

Sustainable Management, Biodiversity & Climate Change

Proceedings of the 2009 Forum on Bamboo Ecology and Management

September 25-26, 2009

Lin'an, Zhejiang, China

Organized jointly by:

INBAR EU-China Bamboo Forest Ecosystem Biodiversity Project

College of Environmental Science of Zhejiang Forestry University

Editor: Lou Yiping

Proceedings published by

International Network for Bamboo and Rattan

September, 2009

Foreword

As the effect our actions have on the global and local environment becomes increasingly apparent, we are better equipped with both evidence and resources to change our patterns of development so that these are sustainable in the long run.

With better knowledge on the interaction between forests, biodiversity and climate change coming to the forefront in discussions towards an agreement at COP 15 in Copenhagen this year, it is timely that this workshop which addresses these issues in the bamboo sector is taking place now.

The bamboo sector in Southern China has brought great economic gains and rapid development to rural and urban populations over the course of its modern industrial history, and is now recognized worldwide as a model for the sector, as well as a forerunner in the Chinese forestry sector. Although these gains are impressive, they have come at the expense of ecological health in the bamboo forests which have been subject to increasing intensive management, loss of biodiversity and in the long run decreased productivity.

However, new research in sustainable management theory and technology which has emerged in China in recent years can help to reconcile the dual aims of high productivity and ecological health of bamboo forests. Moreover as modern technology and cross-disciplinary methods can be employed to quantify environmental services for example carbon credits in bamboo stands and can potentially raise funds in carbon markets, ‘sustainable growth’ of the bamboo sector is no longer an elusive goal.

It is the first time that the three topics of this 2009 Forum; Sustainable Management, Biodiversity and Climate Change for bamboo forests are being discussed in a forum involving about sixty experts from different fields and it is hoped that this occasion will be an opportunity to share the findings of recent years and facilitate future research and actions in these heavily integrated disciplines.

INBAR, through its EU-China Bamboo Forest Ecosystem Biodiversity Project, together with the College of Environmental Science of Zhejiang Forestry University, is pleased to cooperate in organizing this forum and the production of this publication, which hopefully can help to further promote a sustainable path for the bamboo sector both in China, and in those countries seeking to replicate the successes of the Chinese bamboo sector, whilst avoiding its mistakes.

Dr. Coosje Hoogendoorn
Director General
International Network for Bamboo
and Rattan (INBAR)

Professor Zhou Guomo
President
Zhejiang Forestry University (ZFU)

前言

竹林是中国南方山区经济价值高、经营面积大、经营强度大的森林类型之一。几十年来，中国在竹林经营理论与技术研究、示范和推广方面取得了丰硕的成果，在竹林资源培育和产业发展方面取得了显著的成就。竹产业已成为林业的朝阳产业之一。但在竹业经济快速发展的过程中，以实现短期经济效益为主要目标的竹林过度开发和不合理利用导致的一些竹林的生物多样性丧失、长期生产力下降和生态服务功能降低等现象逐渐显现，并日益受到关注。

自 1992 年各国签署联合国《生物多样性公约》和达成《联合国气候变化框架公约》以来，森林经营与生物多样性保护和气候变化及其相互关系一直是林业界研究和关注的热点。在森林经营强调生物多样性保护、加强可持续经营以及应对全球气候变化的大背景下，如何科学、合理、可持续地经营竹林资源，发挥竹林的多重功能，实现竹林的多种效益，使竹林经营与经济、社会、环境建设相协调，促进竹产业发展与竹林生态环境、与生物多样性保护和应对气候变化相协调，关注全球林业研究和实践前沿和热点问题，成为竹业研究者面临的新的机遇和挑战。借鉴和应用国内外先进的农林业经营理论和技术，拓展视野，鼓励开展多学科交叉研究，开展竹林经营理论和技术研究的突破和创新性研究，将有助于引导竹林经营走上可持续发展道路。

为此，国际竹藤组织“中欧竹林生态系统生物多样性保护项目”和浙江林学院环境科技学院于 2009 年 9 月 25-26 日在浙江临安举办为期两天的以竹林经营与生物多样性和气候变化为主题的“2009 竹林生态和经营学术论坛”。相信在今年 12 月份联合国气候变化大会及此间的第三次森林日大会前夕召开这次学术会议，对我国竹业界加强这方面的研究和实践有一定的推动作用。

在会议筹备期间，我们面向中国国内从事竹林研究的有关高校、科研院所等相关机构征集了有关竹林经营、竹林生物多样性和竹林碳平衡等方面的论文。经过专家们精心的评审、作者们认真的修改和编辑们认真的编审，现汇编成册供大家参考。

我们期望就多种效益兼顾的竹林经营理论和技术创新、竹林经营与生物多样性保护、竹林经营与缓解和适应气候变化、竹林碳贸易潜力等议题，开展深入的学术研讨和交流，探讨中国竹林可持续经营理论和技术创新研究的趋势和方向，共同引导和促进中国竹业界

关注全球林业研究热点，以推动中国竹林可持续经营、竹林生物多样性保护和竹林碳汇碳贸易的研究和实践。

在此，我们非常感谢作者们热情地为论坛提供研究论文，与大家分享他们的研究成果。感谢在论文的征集和编辑过程中，国际竹藤组织项目官员李艳霞和李璇做的大量工作，感谢国际竹藤组织项目官员 Giles Henley 和英国牛津大学 Kathleen Buckingham 审改了英文摘要，并撰写了论文集的英文概要。感谢丁雨龙、范少辉、吴良如、姜培坤、杨光耀等众多专家花费宝贵的时间对稿件进行认真的评审。也非常感谢《林业科学研究》编辑部的彭南轩等编辑对稿件进行了认真的编审。

对于本论文集编审中存在错误或不足之处，敬请读者批评指正和提出宝贵意见，以便我们在修订新的电子版时修改完善。会议论文集修订后的电子版将于会后在国际竹藤组织网站（www.inbar.int）在线发表，供大家参考。

国际竹藤组织 环境项目部主任 楼一平

二〇〇九年九月 北京

目 录

Foreword.....	2
前 言.....	4
目 录.....	7
Summary of the forum papers.....	9
主题一 竹林可持续经营技术理论与实践.....	13
Theme I. Bamboo Forest Sustainable Management Theory and Practices	
研究论文.....	14
1. 闽北不同类型毛竹林的生物循环特征研究.....	15
2. 生态型毛竹林土壤肥力维持技术的初探.....	26
3. 丛生竹集约经营和丰产定向培育理论初步研究.....	34
4. 地面覆盖对毛竹生长影响的初步研究.....	44
5. 竹子纯林经营的林地水分问题刍议.....	49
6. 散生型笋用竹笋体有机农药残留研究.....	51
7. 安吉县毛竹林叶面积指数空间分布研究.....	60
8. 浙江省安吉县竹产业发展分析.....	69
9. 竹林现代化生态经营的理念与对策初探.....	77
10. 雷竹主要器官 Se 的分配与富集累积规律研究.....	82
11. 粉单竹竹材化学成分遗传变异的初步研究.....	88
12. 龟甲竹光合生理特性及其与主要影响因子的关系.....	96
论文摘要.....	105
1. 中国竹林认证可行性探析.....	105
主题二 竹林生态系统生物多样性保护.....	107
Theme II. Bamboo Forest Ecosystems and Biodiversity Conservation	
研究论文.....	108
1. 毛竹林物种多样性对集约经营的响应模型.....	109

2. 毛竹林植物物种组成及其多样性研究.....	116
3. 闽北山地上位阔叶林对毛竹林生长的影响.....	125
4. 不同栽培历史毛竹纯林土壤微生物多样性特性研究.....	132
5. 竹子有性生殖及其多样性.....	145
6. 竹类植物生物多样性减少原因及保护对策.....	152
7. 龙竹云南种群遗传多样性的 ISSR 分析及种源保护.....	161
论文摘要	171
1. 湖南桃花江林场毛竹林群落生物多样性研究.....	171
主题三 对气候变化的响应：竹林碳汇	173
Theme III. Response to Climate Change: Bamboo Forest Carbon Sequestration	
研究论文	174
1. 湖南会同林区毛竹林生态系统碳平衡的估算.....	175
2. 湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸的研究.....	183
3. 集约经营雷竹林土壤碳库的演变特征.....	193
论文摘要	206
1. Landsat TM 数据反射率及 NDVI 对毛竹林地上生物量响应.....	206
2. 基于 Landsat TM 数据安吉县毛竹林地上部分碳储量估算.....	208
参会人员名单	209

Summary of the Forum Papers

Giles Henley & Lou Yiping

The INBAR 2009 Forum on Bamboo Forest Ecology and Management is convened in recognition of the need to pay greater attention to the environmental aspects of productive bamboo forests in Southern China, and share information on recent developments in the sector which allow for the better management and greater ecological returns from bamboo forests.

In recent years, the important environmental challenges that the bamboo industry faces in the management of bamboo forests cultivated for economic purposes have received growing attention from within and outside the sector. The previous path of development adopted in Anji, Zhejiang Province and other developed bamboo industry areas emphasized rapid economic development and exploitation of natural bamboo forests and monoculture plantations at the expense of ecological functions and biodiversity conservation. Whilst resulting in important economic gains, those models have since been shown to have negative environmental spillovers including environmental degradation in forests through loss of soil fertility, increased soil erosion, loss of biodiversity and long-term decline in productivity of bamboo forests.

In order to address the various issues which affect the relationship between bamboo cultivation and the environment, the Forum is split into three general themes which aim to promote the sharing of knowledge and experience in numerous domains of research.

The first theme addresses Sustainable Management Technology, Theory and Practices in Bamboo Forests, and examines recent developments in the management of bamboo forests, which take into account environmental effects and goals.

The Second theme addresses the description of bamboo forest ecosystems in terms of the interaction between different ecosystem components, their biodiversity, and the ecological services that they provide.

The third theme addresses issues related to the multifarious interaction between the bamboo sector and climate change encompassing both mitigation and adaptation. These include the extent to which bamboo forests can capture and store atmospheric carbon in different carbon pools, reductions in Green House Gas (GHG) emissions in the bamboo industry and subsequent financial returns through carbon trading both in regulatory and voluntary markets.

Theme I. Bamboo Forest Sustainable Management Theory and Practices

Integrating environmental factors into management technology, theory and practices is a necessary step to ensure sustainability in bamboo production systems. Recently attempts have been made to design management practices which have a positive effect on both the bamboo and the environment. Most of the papers in this section study a single or number of parameters and the effects that different management practices have on these.

Fan Shao Hui and Liu Guanglu study the effect of increasing the species diversity of the forest on total

nutrient accumulation, concluding that bamboo mixed with broadleaf trees results in the highest levels of nutrient accumulation. In his paper, Gao Zhiqin shows the relationship between different management practices and **soil fertility** in bamboo stands through experiments in measuring the effect of adjusting different parameters including the component structure, number of species and various site conditions. Yang Yumin et al. describe management theory and practices for **sympodial** bamboo species, using a factor regulation approach. Wang Kuihong et al. provide research on the effects of **ground cover** on the growth rates of Moso bamboo, specifically for the production of bamboo shoots, whilst Zhang Peixin studies the effects of monoculture bamboo forests on the **soil moisture content** of the forest floor.

In their paper, Guo Ziwu et al. look at **pesticide residues** in bamboo forests under different management practices and for different end-uses, finding that the bamboo under highly intensive management has the highest chemical residue content. Fan Wei-Liang et al. use geostatistics to analyze the Leaf Area Index in bamboo forests in Anji County to establish their comparative uses of different methodologies. Wei Bin et al. provide suggestions for the bamboo sector optimization based upon a gray relation analysis. From a broader perspective, Lu Yulong et al. describe the ecological management concept from an economics perspective, and provide some recommendations for the planting of modern bamboo forests. **Selenium levels** in different organs of the *Phyllostachys praecox* bamboo were studied by Xie Jinzhong et al, who concluded that levels of Selenium are highest in leaves and shoots. The effects of **low temperatures** on *Dendrocalamus Giganteus* Munro were observed by Zhang Wei to test tolerance to change in temperatures. Yang Xiuyan et al. look at the **chemical composition** in *Bambusa Chungji*, concluding its suitability for pulping. Li Yingchun et al. study the **photosynthetic characteristics** of *Phyllostachys heterocycla* leaves and describe the important factors which affect them. Lastly, Xu Bin provides a discussion on the newly developed standards of bamboo certification in China, in response to the recommendations from the INBAR-CAF workshop on a bamboo certification feasibility study in September 2009.

The papers provide a wide overview of the effects of different types of management on certain characteristics in bamboo species and forests. These include both characteristics of bamboo plant composition, as well as soil and canopy makeup. Comparing the different characteristics studied, most respond highly to different levels of intensity in management, often with negative consequences for the highest level of intensity. Collectively, the papers raise issues useful for ‘ecological management’ and how this should be defined and potentially measured for developing standards and certification.

Theme II. Bamboo Forest Ecosystems and Biodiversity Conservation

The study of bamboo ecosystems is important in its own right, but also due to the important information that it produces on the extent of biodiversity protection and ecological services that bamboo forests provide. An increasingly important area of study is concerned with the effect of bamboo on biodiversity when mixed with other tree species and vegetation, as this is an important determinant on how well the ecosystem supports other life forms.

In their paper, Yang Qingpei et al. examine the changes in species diversity at different extents of intensive management of bamboo. Zhang Ganghua and Xiao Jianghua quantify vegetative species in Yongan, Fujian and correlate the relation between canopy, shrub and herbage layer. Liu Guohua et al. describe the correlation between broadleaf trees and Moso using mixture ratio, altitude, slope, aspect parameters. Xu Qiufang examine soil microbial biodiversity in bamboo stands of different ages and across different

management practices. Liu Shuyan et al examine and describe the flowering patterns of bamboo. Cheng Ping et al. address the decreasing biodiversity in bamboo, explaining why this is occurring and what can be done about it. Yang Hanqi et al. examine the genetic diversity of *Dendrocalamus Giganteus* Munro in Yunnan and provide suggestions on which genes deserve special attention. In their paper on plant biodiversity and the canopy mix, Tan Yimin al. details the mix of Moso bamboo with broad-leafed species at the canopy level, and the relationship with the shrub and herbaceous layers below.

The papers provide an overview of the complementary issues of bamboo reproduction and natural biodiversity, and the effects of intensive management on biodiversity at different layers in the forest. In many cases, the mix with broad-leafed species is most relevant due to the role that these have in the ecosystem and in supporting other species' growth.

Theme III. Response to Climate Change: Bamboo Forest Carbon Sequestration

The extent to which bamboo forests can effectively sequester carbon and demonstrate results on scale and over time will largely define its potential for inclusion in, and the financial benefit that can be derived from carbon markets. Although there have been numerous assertions of bamboo's high potential to sequester carbon, the science is still undecided as to the rate of sequestration in bamboo and the overall advantage of bamboo over other plant species. In China, the studies have mainly focused on Moso bamboo due to its wide distribution, well known economic functions and fast growth rates.

In their research Fan Shaohui et al. measure carbon respiration in 5 pools with the soil pool accounting for the highest volume. Xiao Fuming et al measuring respiration in Moso plantations found high annual and diurnal changes in soil respiration, peaking in August and in the afternoon respectively, when temperatures are highest. Pei Kungjiang et al. look at the effects of different management practices ranging from 5 to 15 years on the total volume of soil carbon, and comparing soil organic carbon total accumulation with stability. In order to properly quantify bamboo biomass, use of satellite imagery is of increasing importance, and researchers Du Huaqiang et al. present findings based upon use of Landsat and NDVI methodologies.

The papers look at both methodological issues and variables within the bamboo forests which can affect how carbon is stored, and quantified. These will have important implications for bamboo's ability to tackle climate change issues from a mitigation point of view, as well as whether it will be considered eligible for inclusion in carbon markets, now in CDM, voluntary markets and future potentially in REDD.

主题一 竹林可持续经营技术理论与实践

Theme I. Bamboo Forest Sustainable Management Theory and Practices

研究论文

闽北不同类型毛竹林的生物循环特征研究

刘广路 范少辉

(国际竹藤网络中心 竹藤科学与技术重点实验室, 北京, 100102)

摘要 以福建省永安市集约经营的毛竹纯林 (I)、竹阔混交林 (II) 和竹针混交林 (III) 三种毛竹林为研究对象, 对其 N、P、K、Ca、Mg 元素分布格局及生物循环特征进行了研究。结果表明, I、II 和 III 的养分元素累积量分别为 $84504.20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $93950.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $83083.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中乔木层分别为 $792.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $812.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $688.60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 灌木层分别为 $39.28 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $30.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $46.35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 草本层分别为 $18.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $16.46 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $20.64 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物层分别为 $44.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $48.20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40.88 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 竹阔混交林凋落物中五种元素累积量最高, 具有较好的自肥能力。三种林分 N、P、K、Ca、Mg 五种养分元素年吸收量别为 $690.88\pm 65.09 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $421.37\pm 42.09 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $376.22\pm 15.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 年吸收量分归还量分别为 $62.17\pm 5.40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $56.07\pm 12.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26.38\pm 4.19 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 说明混交经营的毛竹林养分归还能力高于毛竹纯林经营。然而, 在三种林分中, 竹阔混交林的养分贮存量最高, 因而养分元素的周转时间最长。混交林经营毛竹林时, 维持其生产力在适当的水平对毛竹林生产力的维持十分重要。

关键词 毛竹纯林; 竹阔混交林; 竹针混交林; 养分元素分布; 生物循环特征

Biological Cycle Characteristics of Typical *Phyllostachys pubescens* (Moso Bamboo) in North Fujian

LIU Guanglu & FAN Shaohui

(International Center for Bamboo and Rattan)

Abstract: Distribution patterns of nutrients and biological cycle in pure moso bamboo forests (I), bamboo stand mixed with broad-leaved trees (II) and bamboo stand mixed with coniferous trees (III) were studied in Yongan County, Fujian Province. The results showed that the total nutrients accumulation of I, II and III were $84504.20 \text{ Kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $93950.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $83083.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, in which the nutrients accumulation of tree layers were $792.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $812.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $688.60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively; shrub layer were $39.28 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $30.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $46.35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively; grass layer were $18.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $16.46 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $20.64 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively; and litter layers were $44.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $48.20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $40.88 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The higher amounts of nutrients elements of litter layer

in mixed bamboo broad-leaved stands (II) determined that it had stronger capacity of self fertilization. The annual uptake nutrients of I, II and III were 690.88 kg·hm⁻², 421.37 kg·hm⁻², and 376.22 kg·hm⁻², respectively; annual return of nutrients were 62.17 kg·hm⁻², 56.071 kg·hm⁻², and 26.38 kg·hm⁻², respectively. The return amount of nutrients in bamboo stand mixed with broad-leaved trees was more than the pure bamboo forest. However, the nutrients storage of bamboo stand mixed with broad-leaved trees was highest among the three type of bamboo, and turnover time was shortest among the three type of bamboo forest. It was important to maintain the productivity of bamboo in a reasonable range when a bamboo forest is mixed with some broad-leaved trees.

Key words: pure bamboo forest; bamboo stand mixed with broadleaves trees; bamboo stand mixed with coniferous trees; nutrient accumulation; biological cycles

引言

毛竹 (*Phyllostachys heterocycal* var. *pubescens*) 林是我国重要的竹林资源类型, 占竹林面积的三分之二左右。近年来, 由于片面追求经济效益, 许多天然粗放经营的毛竹林转变为集约经营状态^[1]。集约经营毛竹林在获得更高的经济收益的同时, 也造成土壤理化性质的恶化^[1], 严重影响毛竹林的可持续经营^[2]。毛竹林生物量是毛竹群落结构与功能的主要标志, 而营养元素的分布则是系统生产力及持久性的重要表征参数之一^[3], 对集约经营的毛竹林的生物量和营养元素的分布特征进行研究, 可以为毛竹林的可持续经营提供依据。有关竹林生物量及营养元素分布的研究已有较多报道, 毛竹生物量的研究主要集中在毛竹种群生物量结构^[4]及毛竹初级生产力的估测^[5,6]等方面; 毛竹林养分分布的研究主要集中在林内降水及秆流的养分输入及小流域径流养分输出^[7,8]、不同经营类型毛竹林地上部分养分积累与分布^[9,10]及不同栽培措施毛竹林的凋落物量及分解^[11-13]等方面, 缺乏对不同栽培模式集约经营毛竹林养分元素分布及生物循环特征的系统研究。

本文以福建省永安市不同栽培模式集约经营的毛竹林为研究对象, 对集约经营的毛竹纯林、竹阔混交林及竹针混交林的养分分布和生物循环特征进行了研究, 以期能够深入揭示集约经营毛竹林生物量及养分分布规律, 为毛竹林生态经营、长期生产力保持提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于福建省永安市天宝岩国家级自然保护区 (117°31'~117°33.5'E, 25°55'~25°58'N), 属于戴云山余脉, 中低山地貌, 海拔 580m~1604.8m。亚热带东南季风气候型, 平均气温 23℃, 最低温-11℃, 最高温 40℃, 无霜期 290d 左右, 平均降水量 2000mm, ≥10℃的活动积温在 4520~5800℃, 持续天数为 225~250d, 空气相对湿度月均为 80%左右。竹林主要分布在海拔 800m 以下, 土壤为红壤。研究区内竹林覆盖率 96.8%, 主要为毛竹, 其间混生江南油杉 (*Keteleeria cyclolepis*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、杨梅 (*Myrica rubra*)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、鹅掌楸

(*Liriodendron chinense*)、木荷 (*Schima Superba*) 等树种。

2 研究方法

2.1 样地调查

2007年9月在研究区内选择有代表性的集约经营毛竹纯林(I)、竹阔混交林(II 混交比例8:2)、竹针混交林(III 混交比例8:2)样地各4块,其中混交比例根据胸高面积比例确定。三种林分均为扩鞭繁殖的毛竹林,自1998年起每年进行劈草、每两年施用毛竹专用肥(总养分含量 $\geq 30\%$, N: P₂O₅: K₂O=9: 5: 6),施肥用量为每株0.25kg, 篲穴施,穴深度为40cm、每5年垦复一次。

2.2 毛竹生物量测定

乔木层生物量:毛竹生物量采用收获法,根据标准地调查资料,分别计算出毛竹纯林、竹阔混交林和竹针混交林地中1~6年生毛竹的平均立竹,各选取2株作为标准竹砍伐,每种毛竹林采伐毛竹12根,共采伐毛竹36根。毛竹伐倒后,按秆、枝、叶、根、秆基+秆柄分别称取鲜重,然后各

取一部分带回实验室测定含水率。生物量公式为: $w_1 = \sum_{i=1}^n n_i w_i$

式中 w_1 为毛竹的生物量, n_i 为 i 龄竹株数, w_i 为 i 龄标准竹生物量, i 为竹龄。

竹鞭生物量(w_2)的测定采用挖掘法。沿样地对角线设置1×1 m²的小样方5个,每20cm为一层,逐层挖出鞭和鞭根,洗净泥土后滤干称鲜质量,取一部分带回实验室测定样品含水率。

本研究毛竹林中伴生的针叶树种为杉木,阔叶树种为木荷、南酸枣。木荷、南酸枣的生物量采用冯宗炜先生主编的《森林生态系统生物量 and 生产力》一书中P₁₀₂₋₁₀₃常绿伴生乔木和落叶伴生乔木回归方程拟合所得,杉木生物量和生产力回归模型采用福建洋口所得回归模型^[14]。

灌木、草本层生物量:灌木层和草本层生物量采用常用的收割法进行,在各标准地内沿对角线“S”型布设5个点1 m×1 m的小样方,收割各样方内所有的灌木和草本,称其鲜重,并带回1.0kg左右灌木、草本样品测其含水量,以测其干重。根系生物量采用样方法挖取、洗净、烘干称重推算而来。

2.3 毛竹生产力的测定

根据标准竹所得毛竹生物量,可以推算出毛竹不同器官的生产力,公式为:

$\Delta w_1 = \sum n_i (\overline{w}_i - \overline{w}_{i-1})$, 式中 Δw_1 为毛竹地上部分的生产力, n_i 为 i 龄竹株数, \overline{w}_i 为 i 龄标准竹

生物量， i 为竹龄。竹鞭及鞭根生产力通过其生物量的比值推测。

2.4 凋落物的收集与凋落物分解试验的设定

样地内沿对角线方向设置 1 m×1 m 小样方 5 个，收集样方内的凋落物，测定样地的现存量。在不同混交模式样地内沿对角线方向设置 1 m×1 m 的凋落物框，没块样地设置 5 个，每个月收集一次凋落物，计算林分年凋落量。在不同类型毛竹林林地内设置毛竹凋落物分解袋，每种林分设置 36 袋，共设置凋落物分解袋 108 袋。

2.5 样品营养元素的测定

将外业采集的植物样品在105℃下杀青0.5个小时，烘干、粉碎、过2 mm 筛备用。植物样样品用硫酸-高氯酸消煮制成待测液，扩散法测定植物N；钼锑抗比色法测定P；火焰光度计法测定K。扩散法测定土壤全N；碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全P；碱熔火焰光度法测定土壤全K。

3 结果与分析

3.1 毛竹林养分元素分布格局

3.1.1 乔木层养分分布格局

表 1 乔木层养分分布

组分	I		II		III		
	毛竹	毛竹	木荷	合计	毛竹	杉木	合计
竹秆/干	370.90	370.95	7.48	378.43	261.13	52.33	313.46
根	58.80	60.77	2.31	63.08	46.10	24.19	70.28
叶	121.51	118.52	3.13	121.64	91.21	24.40	115.62
枝	82.38	82.35	11.93	94.28	61.92	20.76	82.67
竹箨/根茎	52.74	53.03	2.30	55.33	36.33	0.00	36.33
竹鞭	81.47	77.12	0.00	77.12	54.06	0.00	54.06
鞭根	24.35	23.05	0.00	23.05	16.16	0.00	16.16
合计	792.16	790.14	27.15	812.94	566.91	121.68	688.59

① 单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; unit: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

毛竹栽培方式不同，养分累积量不同，其中 $\text{II} > \text{I} > \text{III}$ ，分别为 $812.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $792.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $688.59 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （表1）；三种栽培方式的毛竹林地上部分养分累积量 > 地下部分，其中地上部分毛竹累积量所占比例分别为 72.56%、73.11%、74.32%，说明混交经营提高了毛竹林地上部分的养分累积量，降低了地下部分的养分累积量。毛竹林叶生物量在总生物量中所占比例最低，但其养分累积量

仅次于树干的养分累积量，可见叶凋落物在养分归还过程中有重要的作用。

3.1.2 灌木层养分分布格局

不同类型林分灌木层养分累积量的排列顺序为III > I > II（图 1），其中林分III的累积量是 I 的 1.18 倍，II 的 1.54 倍，这可能与林分III乔木层郁闭度较小有关。三种林分灌木层养分元素累积量表现出叶最高，枝次之，根最少的特征，因此毛竹林进行劈草作业，可以为毛竹林地提供较为充足的养分来源。

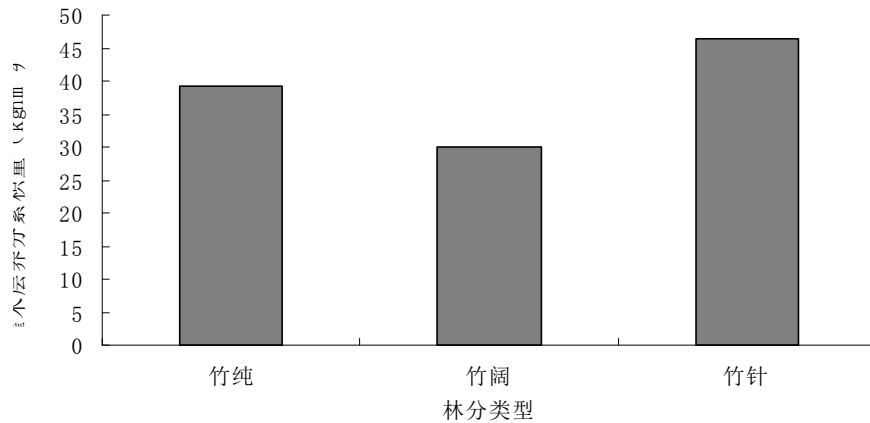


图 1 灌木养分元素分布

3.1.3 草本层养分分布

林分类型不同，草本层累积的养分含量也不同，排列顺序为III > I > II（表 2），与灌木层养分累积量的排列顺序相同。其中叶养分累积量所占比例大于根养分累积量，林分 I 草叶累积量占总累积量的 65.88%，II 为 53.80%，III 为 57.12%。三种林分中，草叶养分元素累积量的排列顺序为 K > Ca > Mg > N > P，草根为 K > Mg > Ca > N > P，可见草本层累积较多 K 元素，其次为 Ca、Mg 元素，P 元素最少。

3.1.4 凋落物层养分分布

林分类型不同，凋落物养分元素的累积量也不同，II > I > III（图 2），林分 II 灌木草本层累积的养分元素含量虽然较小，但是因为阔叶树的年凋落量较大，因而凋落物养分元素的累积量较大。林分类型不同，凋落物养分元素的累积量也不同，林分 I N 累积量最少，Mg 累积量最多；林分 II N 累积量最大，P 累积量最少；林分 III Mg 含量最高，P 含量最少。可见，混交经营可以提高凋落物层 N 的累积量，降低 P 的累积量。

表 2 草本层养分分布

林分类型	叶						根					合计	
	N	P	K	Ca	Mg	合计	N	P	K	Ca	Mg		合计
I	1.20±0.08	0.32±0.02	7.66±0.59	1.72±0.04	1.52±0.25	12.42±0.98	0.42±0.07	0.08±0.01	2.33±0.38	0.42±0.07	3.19±0.51	6.43±1.04	18.85±2.02
	0.84±0.02	0.22±0.02	4.71±0.50	1.29±0.10	1.79±0.09	8.86±0.73	0.49±0.02	0.10±0.00	2.75±0.14	0.49±0.02	3.77±0.18	7.61±0.37	16.46±1.10
II	1.87±0.07	0.50±0.01	4.93±0.34	2.41±0.12	2.09±0.25	11.79±0.79	0.57±0.07	0.11±0.01	3.20±0.39	0.58±0.07	4.39±0.53	8.85±1.06	20.64±1.85

① 单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; unit: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

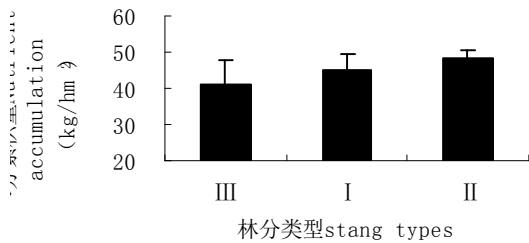


图 2a 不同林分类型凋落物养分积累量

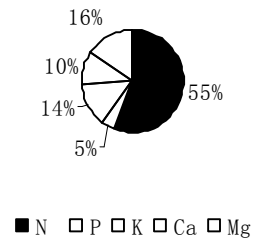


图 2b 林分 I 养分元素分布

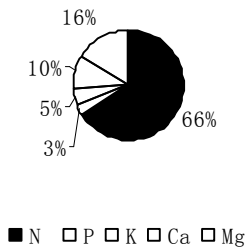


图 2c 林分类型 II 养分元素分

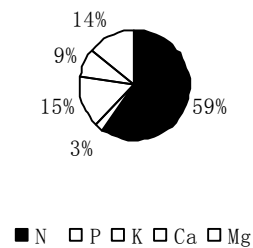


图 2d 林分 III 养分元素分布

图 2 不同类型林分凋落物养分积累量及分布

3.1.5 土壤层养分分布

三种林分类型林分 0-60 cm 土层 N、P、K、Ca、Mg 五种元素总积累量的排列顺序为 II > I > III, 其中林分 I 与 III 的积累量相似, 分别为 $84504.20 \pm 9268.18 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $83083.16 \pm 12016.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 林分 II 养分元素积累量最高, 为 $93950.42 \pm 10421.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 3)。三种类型林分中 N 的积累量均表现为 0-20、40-60 cm 土层积累量较高, 而 20-40 cm 土层 N 积累量较少的现象, 毛竹根系主要分布在

0-40 cm土层范围内，N 的消耗较多，通过化学肥料对土壤 N 素的补充主要发生在 0-20 cm土层范围内，这可能是 20-40 cm土层 N 累积量较低的原因。不同林分类型土壤中 P、K、Ca、Mg 在不同土层间的变化并未表现出一致的变化规律，在林分 I 和 II 中 P、K、Ca、Mg 元素的累积量均随着土层的加深而增多的趋势，深层土壤 P、K、Ca、Mg 元素消耗量小于表层土壤元素的累积量是出现这种现象的原因所在。林分 III 中，P、K、Ca、Mg 元素累积量变现出随着土层深度增加而降低的趋势，反映了林分类型不同对土壤不同层次养分累积量产生了不同的影响，林分 I 和 III 养分元素的交换活动主要集中在 0-40 cm土层范围内，而林分 II 的养分元素的交换活动在 0-60 cm范围内均较活跃。可见，毛竹纯林中引入阔叶树对表层土的养分累积量的影响显著，而引入针叶林对林分深层土壤的养分累积有重要的影响。

表 3 土壤层养分分布

林分类型	土层深度	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	0-20	2241.46±293.88	325.76±18.64	31692.81±3831.62	1038.92±67.94	1368.24±95.13	36667.21±3949.87
	20-40	1350.63±211.46	328.84±22.14	39674.25±1240.04	1123.07±37.45	1403.62±57.22	43880.40±1361.72
	40-60	1902.49±126.31	321.20±44.63	57908.09±3996.35	1263.79±39.09	1603.04±50.99	62998.60±3956.59
	合计	3718.40±631.65	699.23±85.41	75363.41±9068.02	2201.09±144.48	2822.85±203.34	84504.20±9268.18
II	0-20	2329.93±578.03	364.77±13.05	40066.94±4393.02	1335.46±67.30	1717.51±115.67	45814.63±5111.10
	20-40	1341.44±184.36	406.67±24.00	41969.25±3806.74	1391.72±45.66	1716.39±56.72	46825.47±3999.69
	40-60	2744.24±425.93	429.83±24.48	46254.94±1157.65	1412.17±51.74	1838.15±85.59	52679.34±1310.33
	合计	4097.29±1188.32	795.92±61.53	83193.85±9357.42	2778.92±164.70	3519.49±257.98	93950.42±10421.11
III	0-20	1697.88±81.74	424.53±20.74	41381.07±5350.58	1284.73±57.53	1619.09±70.28	46407.31±5469.38
	20-40	1279.60±96.69	410.49±24.35	27216.05±1478.24	1268.95±59.14	1571.23±72.62	31746.32±1617.19
	40-60	1805.19±144.39	422.53±48.91	21222.98±4751.93	1159.75±40.93	1482.72±58.51	26093.18±4929.53
	合计	3121.87±322.82	883.93±94.00	73349.05±11580.74	2594.61±157.60	3248.83±201.41	83083.16±12016.11

① 单位： kg·hm⁻²； unit: kg·hm⁻²

3.1.6 毛竹林养分元素累积与分布

三种类型毛竹林分 N、P、K、Ca、Mg 元素的总储量排列顺序为：II > I > III（表 4），分别为 94858.07 kg·hm⁻²、85399.34 kg·hm⁻²、83879.63 kg·hm⁻²。三种林分养分元素累积量虽然存在差异，但不同层次的养分累积量均表现为土壤层 >> 乔木层 > 凋落物层 > 灌木层 > 草本层，林分 I、II 和 III

土壤层养分累积量占林分总累积量的 98.95%、99.04%和 99.05%，混交林土壤养分累积量高于毛竹纯林土壤的养分累积量。养分元素乔木层养分累积量占总林分的 0.93%、0.86%、0.82%，乔木层养分元素累积量与竹材产量密切相关，林分 I 竹材可能有较高产量，损失较多的养分元素。凋落物层养分元素累积量在三种林分间的排列顺序 II > I > III，说明竹阔混交林的养分归还潜力高于毛竹纯林、竹针混交林的养分归还潜力，反映了竹阔混交林具有较强的养分归还能力。

表 4 不同类型毛竹林养分分布

	林分类型	N	P	K	Ca	Mg	合计
乔木层	I	376.31	31.94	182.83	80.92	120.18	792.16
	II	368.94	34.22	192.79	95.06	121.92	812.94
	III	325.48	26.49	157.94	82.78	95.90	688.60
灌木层	I	3.21	0.57	14.28	18.20	3.02	39.28
	II	2.25	0.40	8.78	13.65	4.98	30.05
	III	5.00	0.89	9.18	25.48	5.80	46.35
草本层	I	1.61	0.40	9.99	2.14	4.70	18.85
	II	1.33	0.32	7.46	1.78	5.56	16.46
	III	2.44	0.61	8.13	2.98	6.47	20.64
凋落物层	I	25.00	2.03	6.22	4.54	7.06	44.85
	II	31.69	1.62	2.27	4.81	7.81	48.20
	III	24.46	1.07	6.11	3.49	5.76	40.88
土壤层	I	3718.40	699.23	75363.41	2201.09	2822.85	84504.20
	II	4097.29	795.92	83193.85	2778.92	3519.49	93950.42
	III	3121.87	883.93	73349.05	2594.61	3248.83	83083.16
合计	I	4124.53	734.17	75576.73	2306.88	2957.81	85399.34
	II	4501.50	832.48	83405.16	2894.22	3659.77	94858.07
	III	3479.25	913.00	73530.40	2709.35	3362.76	83879.63

① 单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; unit: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

3.2 毛竹林养分生物循环特征

3.2.1 主要养分元素的生物循环量

三种林分 N、P、K、Ca、Mg 五种养分元素年吸收量的排列顺序为 II > I > III，年吸收量分别为 $690.88\pm 65.09 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $421.37\pm 42.09 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $376.22\pm 15.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，归还量的排列顺序为 III > II > I，分别为 $62.17\pm 5.40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $56.07\pm 12.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26.38\pm 4.19 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，说明混交经营的毛竹林养分归还能力高于毛竹纯林经营；养分元素留存量的排列顺序为 II > I > III，分别为

670.81±60.95 kg·hm⁻², 406.64±40.55 kg·hm⁻², 357.21±14.85 kg·hm⁻² (表 6), 虽然林分 II 养分归还量在三种林分中最大, 但由于其年吸收量也最大, 所以林分 II 养分元素的留存量较多。

表 6 主要养分元素的生物循环量

林分类型	项目	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	吸收量	158.52 ±15.29	15.09 ±1.38	160.58 ±17.68	52.21 ±3.82	34.96 ±3.91	421.37±42.09
	归还量	14.88±1.56	3.70±0.39	1.21±0.13	2.70±0.28	4.20±0.44	26.70±2.79
	存留量	150.31±14.43	13.05±1.16	159.91±17.61	50.72±3.67	32.64±3.67	406.64±40.55
II	吸收量	185.70 ±17.73	19.99±1.94	375.07±35.12	64.31 ±6.10	45.82 ±4.20	690.88±65.09
	归还量	33.33±6.86	10.55±2.17	2.33±0.48	4.57±0.94	7.69±1.58	58.47±12.04
	存留量	174.25±15.37	16.37±1.20	374.27±34.95	62.74±5.78	43.17±3.65	670.81±60.95
III	吸收量	129.13 ±4.52	12.72 ±0.49	149.85 ±7.05	53.53 ±2.26	31.00 ±1.62	376.22 ±15.95
	归还量	42.56±2.45	4.79±0.28	1.68±0.10	5.94±0.34	9.87±0.57	64.84±3.73
	存留量	116.65±3.81	11.31±0.41	149.36±7.02	51.79±2.16	28.10±1.46	357.21±14.85

① 单位: kg·hm⁻²; unit: kg·hm⁻²

表 7 毛竹林养分循环参数

项目	林分类型	N	P	K	Ca	Mg	合计
利用系数	I	0.4652	0.4390	0.7505	0.6316	0.2321	0.5368
	II	0.3746	0.3837	0.5651	0.4577	0.1842	0.3919
	III	0.4185	0.4539	0.6181	0.5363	0.1923	0.4405
循环系数	I	0.1251	0.2882	0.0035	0.0386	0.1153	0.0618
	II	0.0965	0.1654	0.0060	0.0460	0.1024	0.0620
	III	0.1538	0.1138	0.0082	0.0651	0.1687	0.0887
周转时间	I	17.1775	7.9032	378.8939	41.0642	37.3769	30.1590
	II	27.6773	15.7608	293.4140	47.4917	53.0386	41.1782
	III	15.5338	19.3613	197.8045	28.6227	30.8232	25.6068

3.2.2 生物循环特征参数比较

循环系数越大, 林木生长对土壤的养分消耗越少。养分利用系数越大、年吸收量相对越大, 对养分元素的消耗也越多。林分 II 中 N、P、K、Ca、Mg 元素利用系数高于林分 I 和 III 养分元素的利用系数, 而林分 I 和 III 养分元素的利用系数差异不大 (表 7), 反映了林分 II 有相对大的养分吸收量, 需要较多的养分。三种林分不同种类养分循环系数排列顺序不同, N、Ca、Mg 养分循环系数排列顺序为 III > II > I, P 养分循环系数的排列顺序为 II > III > I, 可见竹林 I 的土壤养分消耗最多, 竹林 III 土壤中 N、Ca、Mg 元素含量消耗的最少。Ca 和 Mg 的大量流失, 可以引起土壤酸性增加, 破坏土壤原有离子的动态平衡, 使其生产潜力下降。表 7 反映了不同类型毛竹林分养分元素的周转时间, N、Ca、Mg 的排列顺序为 I > II > III, P、K 元素周转时间的排列顺序为 I > III > II, 说明

了毛竹纯林经营的养分元素周转时间最长，竹针混交林的 N、Ca、Mg 元素的周转时间最短，竹阔混交林的 P、K 周转时间最短。

4 结论

4.1 毛竹林不同层次养分贮存量不同

竹纯、竹阔和竹针林的养分元素累积量分别为 84504.20 kg·hm⁻²、93950.42 kg·hm⁻² 和 83083.16 kg·hm⁻²，其中乔木层分别为 792.16 kg·hm⁻²、812.94 kg·hm⁻² 和 688.60 kg·hm⁻²，灌木层分别为 39.28 kg·hm⁻²、30.05 kg·hm⁻² 和 46.35 kg·hm⁻²，草本层分别为 18.85 kg·hm⁻²、16.46 kg·hm⁻² 和 20.64 kg·hm⁻²，凋落物层分别为 44.85 kg·hm⁻²、48.20 kg·hm⁻² 和 40.88 kg·hm⁻²。土壤层贮存的养分元素最多，土壤层养分累积量占林分总累积量的 99%以上，其次为乔木层。除土壤层养分累积量外，乔木层养分累积量占总林分的 74%以上，竹阔混交林凋落物中五种元素累积量最高，具有较好的自肥能力。

4.2 养分利用系数为吸收量与贮存量的比值

毛竹混交林的养分利用系数低于毛竹林纯林，表明毛竹混交林对土壤养分的消耗较少，混交经营有利于林地土壤长期地力的维持。循环系数为归还量与吸收量的比值，表征元素的循环强度，竹阔混交林的循环系数最高，竹针混交林与毛竹纯林的循环系数相差不大，表明竹阔混交林的养分归还能力最强。周转时间为养分元素经历一个循环周期所需的时间，由养分的总贮存量除以归还量，竹阔混交林具有最大的养分贮存量，所以竹阔混交林有最长的周转时间。因而，竹阔混交林是一种较好的生态经营模式，同时保持适当的生产力对加快养分周转时间有重要的作用。

参考文献

- [1] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. 水土保持学报, 2003, 17(4):15-17, 21
- [2] 陈双林, 萧江华, 薛建辉. 竹林水文生态效应研究综述. 林业科学研究, 2004, 17(3): 399-404
- [3] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. 生态学报, 2005, 25(3): 527-537
- [4] 彭在清, 刘建斌. 福建永春毛竹种群生物量和能量研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 579-583
- [5] 黄启民, 杨迪蝶. 毛竹林的初级生产力研究. 林业科学研究, 1993, 6(5): 536-540
- [6] 李振基, 林鹏. 闽南毛竹林的生物量和生产力. 厦门大学学报: 自然科学版, 1993, 32(6): 762-767
- [7] 方敏瑜, 傅懋毅. 竹林养分循环规律研究: III. 毛竹纯林竹秆流及其养分输入. 竹子研究汇刊, 1998, 17(2): 59-64
- [8] 傅懋毅, 曹根群, 方敏瑜. 竹林养分循环: II. 毛竹林内降水的养分输入及其林地径流的养分输出. 林业科学研究, 1992, 5(5): 497-505
- [9] 吴家森, 周国模, 钱新标等. 不同经营类型毛竹林营养元素的空间分布. 浙江林学院学报, 2005, 22(5): 486-489
- [10] 吴家森, 周国模, 徐秋芳 等. 不同年份毛竹营养元素的空间分布及与土壤养分的关系. 林业科学, 2005, 41(3): 171-173
- [11] 吴家森, 周国模, 钱新标 等. 不同经营类型毛竹林营养元素的空间分布. 浙江林学院学报, 2005, 22(5): 486-489

- [12] 吴家森, 周国模, 徐秋芳 等. 不同年份毛竹营养元素的空间分布及与土壤养分的关系. 林业科学, 2005, 41(3): 171-173
- [13] 傅懋毅, 方敏瑜. 竹林养分循环: I.毛竹纯林的叶凋落物及其分解. 林业科学研究, 1989, 2(3): 207-213
- [14] 高志勤. 不同毛竹纯林枯落物养分含量和贮量的比较. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 51-54
- [15] 黄启堂, 陈爱玲, 贺军. 不同毛竹纯林枯落物养分含量和贮量的比较. 福建林学院学报, 2006, 25(4): 299-302
- [16] 冯宗伟, 王效科, 吴 刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 科学出版社, 1999

生态型毛竹林土壤肥力维持技术的初探

高志勤

(宁波城市职业技术学院环境学院, 浙江奉化, 315502)

摘要 在阅读相关文献和结合实地调查研究的基础上, 以发挥生态效益为主要功能目标的毛竹林为对象, 根据生态型毛竹林组成结构, 植物群落物种多样性, 立地条件和生产力水平, 阐明了它们与经营方式、经营技术的关系, 揭示了在不同经营方式下, 生态竹林土壤肥力的特征和演变规律, 以及不同结构类型、施肥制度和经营方式下, 维持和促进生态型毛竹林土壤肥力的稳定与提高的经营技术。

关键词 毛竹林; 生态经营; 经营方式; 土壤肥力; 维持

Primary Study on the Techniques of Maintenance of Soil Fertility in Ecological Management Stands of *Phyllostachys pubescens*

GAO Zhiqin

Faculty of Environment of Ningbo City Professional Technology College,
Fenghua Zhejiang China 315502

Abstract: This paper deals with the study on the stands of *Phyllostachys pubescens* (referred to as Moso bamboo hereafter) which exert ecological functions as the main aim based on the reading of related literatures combining with site investigations in recent years. We illustrated the relationships between the items that were component structure, plant species diversity of community, site condition and productivity level of ecological management Moso bamboo with management manners and techniques. In the meantime, it put forwards the characteristics and change rules of soil fertility in the stands of ecological management Moso bamboo under the different management styles. At the same time, we also gave some suggestions about management techniques for steadily maintaining or enhancing soil fertility of the stands which were Moso bamboo under different conditions which were different management types, fertilization systems and management practices.

Keywords: *Phyllostachys pubescens* stands; ecological management; management styles; soil fertility; maintain

生态林是指为维护和改善生态环境, 保持生态平衡, 保护生物多样性满足人类社会的生态、社会需求和可持续发展为主体功能的森林、林木和林地, 主要包括防护林和特种用途林, 根据经营树种和发挥的功能主要分为水土保持林、水源涵养林、防风固沙林以及竹林。竹林是中国南方山区经济价值高, 分布面积广, 经营强度大的森林类型之一, 由于竹林特殊的生长习性和更新方式, 以及其所具有的功能, 竹林也纳入生态林范畴, 但并非所有竹林都是生态林, 根据竹林类型,

经营方式、竹林的分布地理,生境状况把竹林分为经济型、防护型和生态型等。毛竹(*Phyllostachys heterocycal var. pubescens*)是目前竹类资源中面积最大,用途广泛,综合效益较好的林种,近几年得到快速发展。我国竹林丰产技术处于世界领先水平,近年来,以实现短期经济效益为主要目标的竹林经营技术对生态和环境的不良影响倍受关注。毛竹长期纯化经营导致水土流失、生物多样性和多种生态服务功能下降等现象,并可能最终影响竹林立地的长期生产力。

1 生态型毛竹林的涵义、分布与作用

1.1 生态型毛竹林的涵义与分布

生态型毛竹林是指以发挥水源涵养、水土保持、维持生物多样性,缓解和改善气候变化为主要目标的毛竹林类型,是具有较高生态效益和社会功能的毛竹林经营类型。生态型毛竹林主要分布在森林可及度较低的高山远山区域,以及河流两岸,主要是指竹木混交林,也有生长分布在低山丘陵地段低密度和粗放经营的毛竹林分。它的作用主要是以改善环境、维持生物多样性和发挥生态效益为主要经营目标,而经济效益的获取是次要目标,生态型毛竹林的规划、恢复、建设是当前开展竹林建设的重要方面。合理经营该类毛竹林对于改善区域生态环境,发挥竹林的多重效益具有重要现实意义。根据孙雪忠^[3](2007, 2008a)等的调查研究,在浙江富阳地区生态经营毛竹林的地表径流率虽然比集约经营毛竹林的高,但其地表土壤侵蚀模数却低于集约经营毛竹林,这也说明,不同的经营模式会产生不同的生态效果,毛竹林适当保留林下树木和减少松土措施和次数,可以减少土壤流失,保持土壤肥力,改善生态环境,有利于毛竹林的可持续经营。

1.2 生态型毛竹林的功能作用

竹资源培育中,三大控制技术包括遗传控制,立地控制和经营控制,其中适地适竹和肥力调控是至关重要的,而生态型竹林更注重土壤肥力调控,利用竹林自身的生长条件和更新能力完成对土壤的培肥环节。经营控制主要是立竹度管理,适度抚育与合理择伐竹秆、竹笋收获,涉及到立竹密度的控制,竹林抚育措施的实施,择伐次数和挖笋强度的选择。与丛生竹撑绿竹(*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis Daii*)、撑麻竹(*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamus latiflorus*)、麻竹(*Dendrocalamus latiflorus*)相比,毛竹林在天然林保护,退耕还林工程中的应用较少,但在陡坡山地、河流两岸仍然可以发挥生态防护作用。在现有经营条件下,选择适宜的毛竹扩鞭种植计划,经营好林地以实现竹产区山区生态、经济和社会的可持续发展。

在集体林权制度改革的背景下,集体竹山经营的对策是稳定竹山承包责任制,集体竹林采取公开招标,分片分段承包经营,科学护竹经营,根据毛竹林生态环境特点,允许多种经济形式和多种

经营方式并存。对于已经分到户经营的责任山，本着“稳大调小放活”的原则，进一步完善承包合同，明确发包双方的责权利，同时要加强承包管理的检查监督，对于管理不善，不按照作业计划和砍伐指标，乱砍竹、滥挖笋等，使毛竹林林相荒芜、残败、立竹度和生产力指标达不到合同规定指标的，要给予罚款，直至收回承包经营权，重新发包，以保证毛竹林生态质量的最大化，同时促使生态型毛竹林质量的提升与功能发挥。

2 生态型毛竹林经营现状和功能发挥

2.1 毛竹林集约经营存在的问题

毛竹是我国最重要的竹类资源，具有生长快，适应性强，利用用途广泛等特点。竹产区集约经营的毛竹林生产经营强度大，多数毛竹林片面强调用材、竹笋的产出，集约经营毛竹林地养分输入、输出均较高，如不采取科学的营林措施往往造成地力衰减。根据竹产区目前的经济、社会和科技条件，多数林地耕作、经营方式粗放，忽视毛竹林的生态效益发挥，而只注重土壤耕作和施肥，伐竹挖笋等作业方式，陡坡山地的毛竹林水土流失现象十分严重，据前人调查集约经营毛竹林的土壤质量变化较大，造成林地生产力不稳定，林地养分不平衡现象比较普遍，从而对于毛竹林的可持续经营产生负面影响。

2.2 生态型毛竹林经营存在的问题

从 2001 年开始实施生态公益林保护工程，以浙江省为例，至“十五”期末，全省竹林面积达到 82.7 万 hm^2 ，竹业产值 160 亿元，以占全国 11.8% 的竹林面积创造了占全国 47% 的竹业产值。目前有相当比例的毛竹林划入生态公益林范围，由于竹农对这部分竹林的经营技术缺乏一定的了解，有些仍旧沿用笋用林、材用林的经营方式，或者采用粗放经营方式导致产量低下，土壤质量下降，尤其是减弱水源涵养和水土保持功能。

对于陡坡山地，分布海拔较高地段的毛竹林，尤其是以毛竹和针叶树、阔叶树混交的竹林，往往其生态功能较好，林地植被也比较丰富，土壤肥力由于有较多林地枯枝落叶的存在，养分生物循环大为加快促进了土壤肥力的提高进程。培肥管理措施各地差异迥然，多年来有些林地基本没有进行施肥处理，导致林地土壤质量下降明显。生态型毛竹林主要是以生物自肥的形式补充土壤肥力，而以集中方式施肥增土壤肥力的措施相对较少。

2.3 生态型毛竹林具有比纯林更高生物量收获和抗击自然灾害能力

集约经营毛竹纯林的生物产量和经济效益较高，然而，大面积推广扩鞭种植毛竹纯林也会带来

一系列的生态问题，长期的毛竹纯林经营也使毛竹林病虫害、雪压、冰挂、风倒危害日趋严重，2008年初波及南方十多省的雨雪冰冻天气造成毛竹资源严重受损，其中纯林更是严重，仅安吉县就折断、断梢、劈裂和翻茆毛竹数量达 720 多万根，直接经济损失高达数千万元。比较而言，在相似立地条件下，合理经营的竹木混交林能改善林分小气候环境，提高竹材产量，与纯林比较，混交林中毛竹平均胸径、竹高度、单株立竹重量，新竹胸径、新竹高度均高于纯林。由于生态型毛竹林与笋用林、材用林、纸浆毛竹林的经营目标不尽一致，因而其经营强度、经营方式和生态管理过程都有自身的特点，尤其是天然毛竹混交林的粗放经营普遍存在，近年来竹阔混交林中阔叶树种被盲目破坏现象严重，珍贵的阔叶树资源被大量砍伐，竹阔混交林资源数量每况愈下，导致竹林生态功能下降。阻碍了竹产区天保工程的顺利实施，需要引起相关部门的高度关注并采取切实措施予以制止。

3 生态型毛竹林的土壤肥力特征和演变

3.1 生态型毛竹林试验地选择和调查

土壤是影响和制约毛竹林生产力提高，生态功能效益发挥的重要生态因子。笔者曾对不同经营类型毛竹林进行土壤养分测定（2003 ~ 2004 a），基于经营年限 20 ~ 25 年和相似立地因子的情况下，于 2003 年 7 月，在浙江省富阳市春建乡尖山林区选择毛竹林试验地，其中包括以发挥水源涵养功能的生态型毛竹林和笋材两用毛竹纯林。试验地处在天目山系余脉，海拔 240 ~ 375 m，成土母岩是砂岩，土壤属于黄红壤亚类，常绿阔叶林是地区顶极森林群落。根据分布区域和经营状况，把该地区毛竹林分为毛竹纯林和天然起源竹阔混交林两种类型，竹阔混交林即是生态型毛竹林，主要是指以木荷为伴生树种的复层混交林分。

表 1 毛竹林分布及基本特征

林分类型	起源/林龄	平均竹高度/m	平均竹胸径/cm	坡向	海拔/m	树种组成	株数密度/(株·hm ²)	经营措施
垦复毛竹林	2 度竹为主	13.85	10.25	东坡南	340	10 竹	3440	每年垦复劈山抚育
未垦复毛竹林	2 度竹为主	14.28	10.68	东坡	370	10 竹	2880	长期未垦，隔年劈山。
毛竹木荷混交林	3 度竹为主	14.26	11.25	东南坡	305	6 竹 4 阔	2365	秋季割灌，冬季择伐毛竹。

3.2 生态型毛竹林土壤肥力的特征与变化

由表 2 可知：0 ~ 10cm 土壤层次，林地的平均养分含量由高到低的序列为：有机质含量：毛竹木荷混交林（45.3 g·kg⁻¹）> 垦复毛竹纯林（44.5 g·kg⁻¹）> 未垦复毛竹纯林（38.8 g·kg⁻¹）；土壤全氮含量：毛竹木荷混交林（3.34 g·kg⁻¹）> 未垦复毛竹纯林（2.39 g·kg⁻¹）> 垦复毛竹纯林（1.50 g·kg⁻¹）；

速效磷含量：毛竹木荷混交林（8.19 mg·kg⁻¹）>未垦复毛竹纯林（4.98 mg·kg⁻¹）>垦复毛竹纯林（3.33 mg·kg⁻¹）；土壤速效钾含量：垦复毛竹纯林（418.42 mg·kg⁻¹）>毛竹木荷混交林（104.87 mg·kg⁻¹）>未垦复毛竹纯林（76.97 mg·kg⁻¹），对于阳离子交换量（CEC）：垦复毛竹纯林（21.12 cmol(+)·kg⁻¹）>毛竹木荷混交林（14.76 cmol(+)·kg⁻¹）>未垦复毛竹纯林（10.06 cmol(+)·kg⁻¹）。

通过肥力合成的综合指数：毛竹木荷+石栎（<5%）混交林土壤层次 I（0~10 cm）肥力指数高于毛竹纯林，垦复毛竹纯林虽然土壤层次 I（0~10 cm）肥力指数小于以香樟杜英苦槠为组成树种的常绿阔叶林，或者是马尾松石栎枫香为组成树种的针阔混交林，但是，垦复毛竹纯林土壤层次 II（10~30 cm）和层次 III（30~50 cm）肥力指数却高于相似立地条件下的未垦复毛竹纯林、常绿阔叶林与针阔混交林。

总体而言，除了速效钾与阳离子交换量外，毛竹木荷混交林土壤养分状况优于未垦复毛竹纯林，有机质、速效钾、阳离子交换量垦复毛竹纯林大于未垦复毛竹纯林，而对于全氮、速效磷未垦复毛竹纯林大于垦复毛竹纯林。说明毛竹阔叶树混交林能有效增加土壤养分，对于保持恢复毛竹林地土壤肥力具有积极作用。这与阔叶树凋落物灰分元素含量较高有关，也与林地阔叶养分矿化率较高有关。因此，在经营毛竹林时，为维护提高毛竹林长期土壤肥力和增加林地生产力，营造或保持一定比例的阔叶树有利于维护或提高土壤肥力。

表 2 毛竹林分土壤养分含量状况

林分类型	土壤深度 /cm	有机质 / (g·kg ⁻¹)	全氮 / (g·kg ⁻¹)	速效磷 / (mg·kg ⁻¹)	速效钾 / (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC/cmol(+)/kg
垦复毛竹林	0 ~ 10	44.5	1.50	3.33	218.42	21.12
	10 ~ 30	41.2	1.70	2.73	103.65	8.86
	30 ~ 50	38.7	0.83	2.46	98.72	8.91
未垦复毛竹林	0 ~ 10	38.8	2.39	4.98	76.97	10.06
	10 ~ 30	30.9	1.81	2.59	61.70	7.61
	30 ~ 50	16.8	1.46	1.84	51.28	6.63
毛竹木荷混交林	0 ~ 10	45.3	3.34	8.19	104.87	14.76
	10 ~ 30	36.7	2.36	4.83	63.72	12.95
	30 ~ 50	24.5	1.98	4.08	57.56	12.54

3.3 生态型毛竹林土壤水分的变化

生态型毛竹林的水分物理性质的比较：从 0~10cm，20~30cm，40~50cm 等 3 个层次平均毛管孔隙度与非毛管孔隙度的比值来看，未垦复毛竹纯林（3.07）>垦复毛竹纯林（2.20）>毛竹木荷混交林（1.66），土壤不同深度的水分物理性质看来，0~10cm、20~30cm 土层的毛管持水量序列为：竹阔混交林>未垦复毛竹林>垦复毛竹林；40~50cm 土层的田间持水量序列为：竹阔混交

林>未垦复毛竹林>垦复毛竹林。相比之下，生态型的竹阔混交林的土壤结构和通透性较好，非毛管孔隙度也以竹阔混交林最高，未垦复毛竹林次之，垦复毛竹林最小，竹阔混交林贮水量居各林分之首。因此，从林地蓄水能力和土壤透气状况来看，以发挥生态效益的竹阔混交林更能体现水土保持和水源涵养的功能，而长期翻耕的毛竹林水分功能下降，不利于保持和发挥林地的人文生态效益功能。

3.4 生态经营措施与毛竹林下植被的保护恢复

林下植被参与养分生物循环也很重要，将每年或隔年清除的毛竹林林下植被作为薪炭材，将会加速地力衰退和引发水土流失，作为生态型毛竹林要保护其林下植被，林下植被对于立地质量具有指示作用，林下植被作为复层林相的下层也具有维持林冠稳定、防止风倒和抗击水土流失的一定作用。毛竹笋竹林在经营过程中，只要采用合理施肥制度，耕作方式和林冠、林下植被的抚育措施，就可以促进体系的良好养分循环，提高生态系统的稳定性和土壤肥力。对因强度耕作使生态条件破坏较严重的毛竹林，要通过编制合理的作业制度，留养恰当的毛竹林密度，采用合理的施肥方法和用量，改善林地的生态条件。前人的多数研究表明：生态经营毛竹林的乔木、灌木、草本及藤本的物种丰富度、均匀度、Shannon–Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数均高于集约经营的毛竹林。这说明生态型毛竹林林下植被的多样性比单纯追求竹材和竹笋产量的毛竹林高，从而提高了生态系统的稳定性，为土壤肥力的稳定和改善创造了条件。

4 基于土壤肥力维持与提高的生态型毛竹林经营技术

4.1 毛竹林养分动态平衡的内容和要求

在毛竹林养分平衡的动态方面，通过生态系统经营达到如下四个方面的养分平衡：（1）人工林生态系统土壤的养分平衡、植物地上茎秆枝叶和地下鞭根系统的养分平衡，（2）在人工林生态系统内部建立养分生物循环体系，（3）养分在人工林中输出和输入的平衡，（4）林地土壤不同养分元素之间数量、种类的平衡。这四方面的平衡是实现毛竹林生态系统稳定的重要基础，也是保证生态系统产量稳定提高的重要前提。然而，由于集约经营的毛竹林是重取轻育，往往造成林地土壤养分失衡，粗放经营毛竹林更是由于自然条件的制约和长期得不到足够的养分补充，使增产潜力和土壤肥力发生逆转，毛竹林分经营管理不合理，就会破坏生态系统的养分平衡；经营管理得当，林地生态系统的养分平衡就会得到恢复。

4.2 生态型毛竹林的经营技术探讨

生态型毛竹林可持续经营的技术措施，即采用适当保留林下植被，特别是保留较多的灌木和草本，通过编制合理施肥制度和采取正确施肥方法，譬如采用以伐桩施肥为主，沟施为辅的施肥方式，施肥量控制在 $650\sim 845\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，林地垦复需要采用适当深度和频率，尽量减少钩梢，可以提高单位面积的新竹产量和林分质量，这种经营方式比集约化程度高的单纯以追求竹材产量的经营模式，更能发挥毛竹林的生态功能和维护生态系统功能。根据生态型毛竹林起源、分布、结构和组成特征，其经营技术主要从以下 5 个方面开展：（1）保持恰当比例的针叶、阔叶树木，使毛竹林的结构得到优化，有效地改善毛竹林生态系统结构，这样既能使毛竹产量稳定提高，又能保持水土、涵养水源与改善土壤养分状况。（2）竹林生物量收获主要采用择伐方式进行，多养笋护竹，保持合理的立竹度，对于陡坡山地，可及度较低的毛竹林，需要采用人工促进更新方式或半封山形式，择伐年龄在 3 度以上的毛竹，使林分保持恰当的林龄、径级结构比例。（3）竹林土壤耕作措施，耕作方法的调整，垦复深度、耕作方式、强度和间隔期的选择需要经营目标和立地条件决定，垦复作业和林下刈割有机结合，尽量采用带垦方式，少用全垦方式，使土壤的理化性质得到改善的同时，提高土壤抗侵蚀能力，增强保持水土的功能，减轻土壤的侵蚀强度。（4）开展竹林土壤施肥制度的试验，主要是施肥方式、方法的选择，肥料种类的选择，开展模式施肥试验以确定合理用量。（5）毛竹纯林改造为混交竹林的途径，包括伴生树种选择、混交比例和混交方式，林分管理措施等，间作固氮植物，提高氮素养分的自然补给能力。调整竹林经营方式以维持生态型竹林的土壤肥力，开展长期定点研究，探索有效促进竹林土壤肥力稳定与土壤质量提高的有效经营措施。

生态型毛竹林土壤肥力维持技术的研究方向：（1）在基于系统生产力监测与模拟的基础上，进行毛竹、林木、草本生物量与土壤养分、微生物和酶学特征分析。（2）生态功能的测定涉及森林小气候、土壤、水文，动植物和微生物等。（3）建立经营技术对竹林生长的作用和反馈机制。（4）经营效益的研究，包括生态效益、经济效益、病虫害控制程度等。（5）系统模拟、设计的研究。目的是探索生态型毛竹林改良土壤、发挥水源涵养、水土保持以及毛竹林自身生态系统生产力与生态功能提高的评价途径。

5 小结与讨论

生态型毛竹林作为以发挥生态效益为主要功能目标的毛竹林型，在改善竹产区生态环境条件方面发挥着积极作用。以毛竹针、阔叶树混交并且分布在陡坡山地、河流两岸的竹林是当前经营的主要对象。在相同尺度和相似经营条件下，生态型毛竹林无论从林地生产力或土壤肥力质量着眼均优

于毛竹纯林。对于土壤有机质、速效钾、阳离子交换量而言，垦复毛竹林高于未垦复毛竹林，而对于全氮、速效磷含量而言，毛竹木荷混交林、未垦复毛竹林高于垦复毛竹林。毛竹木荷混交林表层（0~10cm）土壤肥力指数高于毛竹林，垦复毛竹林（10~50cm）土壤肥力指数分别高于未垦复毛竹林、以香樟石栎为建群种的常绿阔叶林、马尾松枫香为建群种的针阔混交林。从毛管持水量、田间持水量和非毛管孔隙度等水文效应参数来看，毛竹木荷混交林最高，垦复毛竹林最小，未垦复毛竹林居中。综上所述，生态型毛竹林的土壤肥力质量和水文效应均优于毛竹纯林，促进生态型毛竹林土壤肥力稳定提高的技术措施主要从林分结构调整、合理择伐、耕作施肥制度和纯林改造的途径等方面开展定点试验，在取得相关成果的基础上，加以总结并逐步推广。

参考文献

- [1] 高志勤, 傅懋毅. 不同毛竹林土壤水物理性质的特征比较[J]. 利用科技开发, 2005, 19(6):12-15
- [2] 徐太平. 热带南亚热带短轮伐期速生树种人工林养分平衡的探讨[C]. 中国林学会中国土壤学会森林土壤专业委员会. 第六次全国森林土壤学术讨论会论文选编: 森林与土壤, 年份 78 -79
- [3] 孙雪忠, 倪建英, 张玮 等. 生态公益类毛竹林可持续经营及其生态效益评价[J]. 竹子研究汇刊, 2008, 27(1): 32-37
- [4] 高志勤, 傅懋毅. 经营方式对毛竹林土壤肥力指数的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 81-85
- [5] 李玉红, 李正才. 两种不同类型毛竹林群落特征的初步研究[J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(1):45-49
- [6] 王彦辉. 江西省大岗山毛竹林水分效应研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 373-379
- [7] 黄衍串. 毛竹天然混交林的经营及效益[J]. 竹子研究汇刊, 1995, 12(4): 16-23
- [8] 林振清. 竹阔混交林毛竹生产力与经营效益的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 42-45
- [9] 高志勤, 傅懋毅. 不同毛竹林土壤碳氮养分的季节变化特征[J]. 浙江林学院学, 2006, 23(3): 248-254
- [10] 高志勤, 傅懋毅. 毛竹林凋落物养分状况的林型变异特征[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊 1): 95-100
- [11] 郑郁善, 洪伟. 毛竹经营学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 167-178, 238-268
- [12] 周芳纯. 竹林培育和利用[M]. 南京: 南京林业大学竹类研究编委会, 1998: 175-204
- [13] 金爱武. 现代毛竹培育技术及其传播: 问题和方法[M]. 第1版. 北京: 中国农业出版社, 2006: 227-235

丛生竹集约经营和丰产定向培育理论初步研究

杨宇明¹ 杨汉奇² 石明¹ 王娟¹

(1. 西南林学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国林科院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224)

摘要 丛生竹林分与散生竹林分存在着根本性的差异, 丛生竹林由多个独立的个体竹丛所组成, 竹林经营和培育时除了考虑林分结构层次上的林分密度和林分秆龄等因子外, 还要考虑竹丛结构层次上的竹丛密度、丛秆度、竹丛秆龄结构等因子。西南林学院竹藤科学研究项目组基于在丛生竹集约经营和定向培育方面二十余年的研究积累, 根据丛生竹与散生竹在生物学和生态学方面的不同特性, 提出了适应于丛生竹特性的集约经营和丰产定向培育理论和控制技术。

丛生竹集约经营及丰产定向培育的基本思路是基于竹种自身的生态生物学特性, 借鉴天然竹林和丰产竹林的有益成分, 根据不同的培育目标, 采用不同的控制手段将竹林结构调整成丰产竹林结构, 充分利用林地空间, 有效利用水肥条件和光能资源, 合理分配空间和能量, 进行合理的调控和能量输入, 从而达到集约经营和丰产定向培育的目标。

技术体系是在个体、种群、群落和生态系统几个层次上综合运用各种结构控制手段, 在竹林生长和经营的不同时期进行系统控制。其基本手段为竹林结构控制, 并辅以环境控制和生物控制技术。竹林结构控制以竹丛结构控制为主要研究层次, 以林分结构为辅助控制手段, 通过调节其空间结构、年龄结构和林分时间结构实现了基于两个结构水平层次和三元结构因素组合的大型丛生竹集约化经营的配套技术体系。另外, 为了丛生竹集约经营与丰产定向培育研究和实践的需要, 作者建议了适应丛生竹的特殊结构特点的丛生竹林结构的相关概念。

关键词 丛生竹; 集约经营; 定向培育; 结构控制

Preliminary study on theories of the intensive management and directed high-yield cultivation of sympodial bamboos

YANG Yuming¹, YANG Hanqi², SHI Ming¹, WANG Juan¹

(1 College of Resources, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, P.R. China ;

2 Research Institute of Resource Insects, the Chinese Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650224, P.R. China)

Abstract: Stands of sympodial (clumping) bamboo and monopodial (running) bamboo are distinctly

¹ 通讯作者 杨宇明 Email : yymbamb@yahoo.com.cn

different, and sympodial bamboo forest comprises of individual bamboo clumps. The density and age factors at the level of standing forests and factors of density of bamboo clumps, culm numbers per clump and age composition of bamboo culms at the level of bamboo clump should be taken into account in managing sympodial bamboo forests. The research group for bamboo and rattan sciences of Southwest Forestry University has studied the intensive management and directed high-yield cultivation of the sympodial bamboos for over 20 years. In this paper, theories and techniques of the intensive management and directed high-yield cultivation of sympodial bamboo forests were presented based on biological and ecological features of sympodial bamboos.

The fundamental theories of the intensive management and directed high-yield cultivation of sympodial bamboos are introduced below. According to different ecological and biological features of bamboo species, management aim and composition of natural bamboo forests, different means of composition regulation will be used to adjust existing bamboo composition into high-yield bamboo composition. With making full use of forest space, water, fertilizer and solar energy, the space and energy of bamboo forests can be efficiently regulated and allocated to realize the goals of intensive and directed high-yield cultivation.

The systematic technology is using integrated structural control means at individual, population, community and ecosystem levels to operate system control at different phases of growth and management of sympodial bamboo forests. The basic meaning is the composition control of bamboo forests, supplementing with technology of environmental control and biological control. The core of bamboo forest composition control is to control the composition of bamboo clumps. Regulation of three factors, i.e., spatial composition, age composition and forestation period at the levels of bamboo clump and bamboo standing forest, comprises of fundament of supporting technical system of intensive management for large-scale sympodial bamboo. Moreover, in order to meet the needs of researches and practices for intensive management and directed high-yield cultivation of sympodial bamboos, the authors proposed related concepts and terms based on structural characteristics of sympodial bamboos.

Key words: sympodial bamboos; intensive management; directed high-yield cultivation; composition control

竹类植物从地下茎结构上总体可分为丛生竹、散生竹和混生竹三大类，其中丛生竹和散生竹为其基础类型。散生竹以刚竹属 *Phyllostachys*、大节竹属 *Indosasa* 等类群为代表，在我国主要分布于中亚热带和北亚热带；丛生竹以刺竹属 *Bambusa*、牡竹属 *Dendrocalamus* 等类群为代表，我国的丛生竹主要分布于南亚热带和热带北缘。云南是我国丛生竹种类分布最丰富的省份，同时云南也以大型丛生竹为其竹类资源和经营特色^[1-4]。

丛生竹种与散生竹种在生物学特性和生态习性上存在着较大差别，致使其生长特性和竹林结构也有显著差异，故其集约经营和定向培育理论和技术方法均有其特殊性，与目前较为成熟的散生竹丰产结构和集约经营及丰产定向培育模式均有着根本性的区别。中国对以毛竹 *Phyllostachys edulis* 为代表的散生竹类培育和开发研究较为深入^[5-6]，而丛生竹与散生竹相比，在生物生态学特性、繁殖和育苗方法、造林技术和加工利用上都有区别。以牡竹属为代表的热性大型丛生竹是世界上特别是东南亚地区竹亚科植物中优良特性最突出，推广和开发利用潜力最大的竹种之一。其主要特点是：

(1) 生长快，成材周期短，3-4 年即可成材。竹丛秆数多，单位面积产量远高于散生竹林；产笋量大，笋可供食用，多为优良笋材两用竹种，因此竹林经营效益明显。(2) 秆形高大，秆茎粗，节间较长，单秆出材率高，适于竹材工业化生产加工，大径级竹材提高了加工利用率和竹材的使用范围。(3) 成丛生长，可在田边地角、房前屋后、堤岸篱边等地点广泛种植，不占耕地。(4) 地下根茎系统发达，须根庞大，有很好的固土保水能力，是优良的生态防护竹种；而且外形优美，宜作园林绿化观赏。(5) 繁殖育苗容易，可采用埋秆、埋节、扦插、空中诱根和组织培养等无性繁殖方式育苗。(6) 就世界范围来看，其它主要竹产区国家，特别是东南亚各国均以丛生竹为主，而丛生竹和散生竹在生物学特性、经营措施和加工利用上都有较大区别，因此我国丛生竹的培育、竹林经营和开发利用技术与经验对指导这些丛生竹产区具有更加现实的意义^[2,7-9]。

国内对于以毛竹为代表的散生竹林结构控制、集约经营的理论及丰产定向培育技术已较为成熟，但对于丛生竹集约经营和丰产定向培育的技术体系和理论还处于深入研究过程中。西南林学院竹藤科学研究项目组在丛生竹集约经营和定向培育研究方面已有二十余年的研究积累，目前已完成牡竹属、刺竹属、思茅竹属 *Schizostachyum*、空竹属 *Cephalostachyum*、大型箭竹 *Fargesia sp.* 等我国分布的主要大型丛生（混生）竹代表种类的培育和经营技术的系统研究，包括从育苗、造林、管护到集约经营和丰产定向培育等各阶段^[7-17]。项目执行期间，项目组对丛生竹林培育和经营技术进行了总结和提炼，初步形成了丛生竹林培育和经营的系统理论和技术体系，期望能为丛生竹的集约经营和丰产定向培育提供较为系统的理论指导和技术支撑。本文即是对丛生竹林培育和经营理论的一个小结。

1 丛生竹集约经营和定向培育的基本思路

丛生竹的现代培育经营主要涉及三个方面的内容。一是集约经营，指采用先进技术手段，对丛生竹林进行精细管理，从而提高产量和综合效益并实现可持续发展的经营方式。这主要关注的是产量问题。二是定向培育，指根据不同的培育目标，通过特定的技术手段使丛生竹林产品向特定的目标方向靠近，如笋用、材用、笋材两用等。这关注的主要是质量问题，同时也包含了目标产品的产量问题。三是低产退化竹林改造，这主要是关注种群结构更新和调整的问题。

丛生竹集约经营及定向培育的基本思路是针对不同竹种自身的生态生物学特性，借鉴天然竹林和丰产竹林的有益成分，根据不同的培育目标，采用不同的控制手段将竹林结构调整到丰产竹林结构，充分利用林地空间，有效利用水肥条件和光能资源，合理分配空间和能量，进行合理的调控和能量输入，从而达到集约经营和丰产定向培育的目标。

其基本技术方法是在个体、种群、群落和生态系统几个层次上综合运用各种结构控制手段，在

竹林生长和经营的不同时期进行系统控制。其中以竹林结构控制为基本手段，辅以环境控制和生物控制技术。系统控制的核心仍然在于结构控制，可以分为个体、种群、群落和生态系统等层次上的结构控制（图1）。

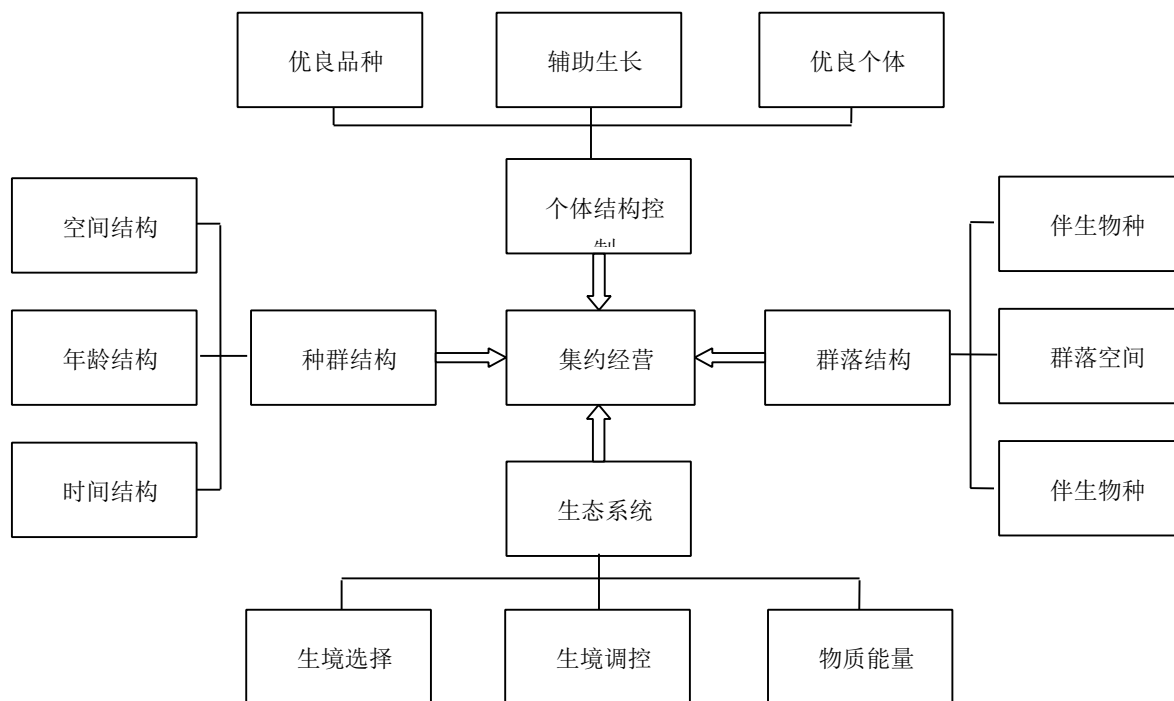


图1 丛生竹系统控制技术示意图

在个体水平上的结构控制主要有三个方面的内容，一是优良品种选育，包括优质种源的选择；二是优良个体的选择，将质量高长势好的优良个体保留，及时伐除弱笋、退笋、老秆、病秆；三是辅助生长技术的使用，所谓的辅助生长技术主要包括调控竹子长势的技术手段，如合理钩梢等。

在种群水平上的结构控制主要是从空间和时间的四个维度上对竹林结构进行调控和优化。其中，空间结构控制包括水平方向上的密度结构控制和垂直上的密度结构控制两个方面；时间结构控制包括因不同年份之间产生差异而进行的竹林结构调控和年龄结构控制；年龄结构控制包括竹丛间的年龄结构控制和竹丛内的秆龄结构控制。

在群落水平上的结构控制主要是处理竹子与伴生植物之间的关系，包括对伴生物种的选择、群落空间结构调控以及群落内各种群之间的空间结构。竹种之间的混交以及竹林内混种其它作物即属于该层次上的技术手段。在此水平上，对群落内的生物多样性结构进行调整和控制是该层次上的一种综合控制技术，同时也是一种生态经营模式，其目的在于利用物理手段，调控生物学结构，达到持续高产稳产的目的，而非以化学手段获得竹林经营效益，避免大水大肥的投入和对自然生态的破

坏性利用。

在生态系统水平上的结构控制主要是对生境的控制。一是对生境的选择，这主要表现为对造林地的选择。二是对生境的调控，这主要表现为对造林地的改造整理，如排水灌溉、劈山整地、除草松土、挖除竹箨等耕作抚育措施。三是物质能量输入，包括通过人为的浇水、施肥等措施调整生态系统的能量在时间和空间上的分配。

系统控制的核心和关键是竹林结构控制，这主要是体现在种群结构和个体结构水平上。丛生竹定向培育和集约经营中的结构控制主要包括空间结构和时间结构，空间结构主要指竹林密度结构，而时间结构主要指竹林年龄结构。

2 丛生竹结构控制的主要理论依据

2.1 丛生竹有着相对于散生竹复杂而独特的结构

丛生竹在生物学特性和生态习性上与散生竹存在着较大差别，致使两者生长特性和竹林结构也有显著差异，故丛生竹集约经营和定向培育理论和技术方法均有其特殊性，与散生竹丰产结构和集约经营模式有着根本性的区别。

虽然丛生竹与散生竹均有密度结构和秆龄结构的概念，但散生竹的一片竹林因地下茎相连，从地下到地上实为一个个体，只有林分密度和秆龄一个层次的结构概念；而丛生竹一片竹林由多个独立的个体竹丛所组成，除有林分密度和林分秆龄的林分结构层次外还有竹丛密度、丛秆度、竹丛秆龄结构等的竹丛结构层次。丛生竹以每一竹丛作为一个独立个体，由多个竹丛个体组成一片竹林。因此研究丛生竹必须首先弄清楚作为个体生命结构单元的竹丛密度和秆龄结构规律，再由竹丛结构规律组合上升到竹林结构规律才有可能实现对丛生竹林的结构控制。比较丛生竹的竹丛与林分两个层次的结构特征，显然竹丛作为林分中相互独立的生命活动组成单元，研究竹丛的密度结构和秆龄结构，要比林分密度和林分秆龄重要得多。只有在弄清竹丛结构的基础上再由竹丛密度、竹丛秆龄的竹丛结构层次与林分密度和林分秆龄的林分结构层次的二层多元结合，才有可能对丛生竹林科学实施“结构控制”。这是丛生竹与散生竹在“结构控制”理论上的重大区别，也是丛生竹林的经营比散生竹要复杂和困难的根本原因。

因而丛生竹结构控制的理论和技术是在两个结构层次上，有多个结构因素控制的条件下进行，与散生竹结构控制理论和技术有重大区别，丛生竹的丰产结构理论与控制技术，既有林分层次的要求，更强调竹丛结构，由竹丛结构决定林分结构。

2.2 笋期生物学特性对发笋成竹有着决定性的影响

发笋是竹类植物生长发育的重要过程，在生产经营和管理中是一个关键的时期。发笋生物学特性，是指竹类植物笋生长过程的规律和特点，包含了发笋历期、数量、发笋及成竹的质量以及以上过程的影响因素。发笋生物学特性的研究对于竹类集约经营和定向培育有着重要的意义和作用，特别是对于笋用竹，发笋生物学特性的研究对于提高竹笋产量和质量以及实现竹林可持续经营具有至关重要的价值。

我们研究结果表明，发笋情况及质量因时间、秆龄差异而有显著的不同，不同秆龄竹在发笋的时间、数量和质量上也有较大的差异，呈现出明显的规律性变化。根据这一特点我们可以在笋期采用选择性疏笋和留笋养竹的方式对成竹质量进行调控。

2.3 地下根茎系统对发笋成竹有着重要的影响

丛生竹的地下茎为合轴型，其秆基、秆柄和竹根合称为竹箨。物质能量相互联系的一个个竹箨构成了丛生竹的地下根茎系统。秆基部分每节着生一大型芽，交互排列。最下一对芽称为“头目”，往上依次称为“二目”、“三目”等，芽眼的数目因竹种而异。各目萌发所成竹笋依次称为“头目笋”、“二目笋”等。

芽眼的大小和萌发力与其着生部分有关，一般分布在秆基中、下部的芽眼充实饱满，生活力强，萌发较早较多，笋体肥大，成竹质量高；着生在上部特别是那些露出地面的芽眼较小，生活力弱，萌发较迟较少。在1年内，每株母竹秆基上的笋目一般只有3-5个能萌发成竹，其余多不能萌发或萌发后因养分不足而枯死，称为“虚目”。三四年生以上秆基的芽眼完全失去萌发力。我们的研究结果表明，头目的发笋率较高，笋体大而粗状，出笋期较早；三目的笋体小，发笋率较低；四目则很少发笋；二目介于一目与三目之间。

2.4 竹秆秆形结构和秆重结构各因子之间存在着特定的数量关系

对于特定的竹种来说，秆形结构和秆重结构各因子之间存在着一定的数量关系，我们对于云南甜龙竹 *Dendrocalamus brandisii*、龙竹 *D. giganteus*、巨龙竹 *D. sinicus* 以及黄竹 *D. membranaceus* 等大型丛生竹的研究都表明了这一点。基于这些数量关系，我们可以运用秆径秆高等便于测量的因子，估算竹秆的秆形秆重情况，以通过疏笋和择伐等技术措施进行秆重控制。

3 丛生竹林空间结构控制的基本思路

3.1 丛生竹空间结构控制的关键在于密度控制

密度结构控制的要点一是控制竹丛的合理密度和丛内合理的秆密度，二是调整种群密度结构

（丛密度）和个体密度结构（秆密度），在空间结构上合理疏笋疏伐使丛生向散生发展。使竹林结构更加疏散均匀，即进行散生化经营，使之能更有效地利用水肥条件和光能资源，并能改善林地小环境，以达到高产目的。

通过科学的疏笋、疏伐和留笋养竹等培育技术措施调整竹林结构，提高发笋和成竹的产量和质量。

3.2 丛生竹经营中为什么要使竹丛向散生化方向发展

① 从成竹质量上看。散生竹林相整齐，均匀度较高，总体成竹质量较高。而丛生竹多呈密丛生长状，秆间竞争过于激烈，导致生长整齐度不高，中间秆高，四周秆低，中间秆直立，四周秆倾斜甚至弯曲。竹丛中各秆之间大小不均匀，成竹质量总体较低。竹秆密集不利于通风透气，特别是人工栽培条件下易产生病虫害，过密易产生弱秆。

② 从生产效益上看。竹丛密集导致竹林空间结构不均匀，林地空间和资源利用效率偏低，且竹丛密集从生产经营上也不便于管理和采伐。

3.3 如何实现丛生竹的散生化经营？

这样的集约经营理论和思路可称为丛生竹散生化经营，其经营途径就是疏丛，方法有疏笋和疏伐两种。在笋期及时采收密笋、弱笋，经营过程中及时采伐密秆、弱秆以此调节竹林密度和竹秆分布均匀度。

4 丛生竹林年龄结构控制的基本思路

丛生竹林的年龄结构实际包含两个层次，一是竹丛间的年龄结构，二是竹丛内的秆龄结构。竹丛间的年龄结构主要用于调控竹林整体可持续性，其合理的结构有助于防止竹林的整体衰退。这一年龄结构很少用到，因为若不是人工竹林，竹丛年龄在一般情况下难以判定，所以也就无从调控。而竹丛内秆龄结构则根据培育目标的不同而定。笋用竹林，应该是将秆龄结构比例调整和保持为：I年生秆占40-45%，II年生秆占45-50%，III年秆应少于10%。在此基础上，可根据竹种的不同和长势的不同作相应的调整，而材用竹林则应根据特定材用目的的竹材物理性质最佳秆龄内，各秆龄竹比例均匀分布。对于退化竹林改造则可根据竹林现状适当加以调整。

5 丛生竹林结构控制的基本方法

5.1 密度结构控制和秆龄结构控制

突破了散生竹的结构概念和内容，提出了与丛生竹相适应的“结构控制”的概念和控制方法，提出了丛生竹密度结构控制的“竹丛度（丛/亩）、丛秆数（秆/丛）、丛秆度（秆/亩）”和秆龄结构控制的“丛秆龄（I、II、III、IV秆龄/丛秆数）”的概念和控制试验方法。以竹丛密度结构和秆龄结构为主要研究层次，在揭示了竹丛密度与秆龄的结构规律后，再上升到林分结构层次进行整合，实现两个层次的结构控制。

5.2 秆形与秆重控制

主要针对材用竹林的定向培育与集约化经营，提出了“秆形与秆重控制”的概念与控制方法，并以形数 f_1 和实验形数 f_2 为秆形指标，应用林分和丛秆数2个密度层次的密度结构和秆龄结构对秆形进行控制，以培育更大秆径和秆高、秆重相对均衡、秆形尖削度较小、秆径与秆高相对整齐、便于工业化加工利用的标准化秆材。在经营中运用密度控制和秆龄控制的技术方法，可以间接控制竹材秆径与秆高，以获得秆形较为理想的竹秆材。

5.3 综合控制

综合应用环境控制、生物控制和结构控制理论，通过施肥试验、竹丛度控制、丛秆度控制、秆龄结构调整及生物控制技术（笋期控制、优良品种选择、病虫害防治）、环境控制技术（施肥量与肥料配比、灌溉次数与时间）、结构控制技术（密度控制、秆龄控制、竹丛分布均匀度控制、秆形与秆重控制技术）、竹农间作技术等。

丛生竹的林分结构主要包括物种组成、丛秆度（秆/亩）、竹丛度（丛/亩）、丛径、竹丛分布均匀度、秆龄结构（林分秆龄、竹丛秆龄）、竹秆大小、竹秆大小的整齐度、叶面积指数和丛秆数（秆/丛）10个主要结构因子。以这10个因子的合理组合，实行结构综合控制，便可获得较高的产量和质量。

6 丛生竹林结构有关的概念

为了丛生竹集约经营与丰产定向培育研究和实践的需要，我们建议了适应丛生竹的特殊结构特点的丛生竹林结构的有关概念。

6.1 密度结构概念

竹丛度：单位面积的竹丛数，其含义为竹丛密度。

竹丛数：竹丛数量，竹丛数=竹丛度×面积

丛秆数：竹丛所含竹秆数

丛秆度：单位面积秆数。丛秆度=竹丛度×丛秆数。其含义为竹秆密度，用于衡量丛生竹林对于林来空间的利用程度。决定于人类的经营强度和土壤肥力。

6.2 竹林均匀度概念

竹丛均匀度：竹丛空间分布的均匀程度。以统计面积内竹丛中心位置为竹丛位置，竹丛均匀度=统计面积内各丛与相邻最近竹丛的直线距离之和/（竹丛分布最均匀时最近竹丛间距×竹丛数）

丛秆均匀度：竹丛中秆的空间分布均匀程度。以统计竹丛内竹秆秆基中心位置为丛秆位置，丛秆均匀度=统计竹丛内各秆与相邻最近竹秆的直线距离之和/（竹秆分布最均匀时最近竹丛间距×竹秆数）

6.3 秆龄结构概念

丛秆龄= I、II、III、IV 秆龄/丛秆数。这一概念表述了竹丛的秆龄结构组成。

6.4 发笋生物学有关概念

发笋数：限定单位内发笋头数。这一概念用于衡量笋产量和竹林活力。

成竹数：竹林发笋中成竹的笋的头数。这一概念用于衡量竹林活力。

成竹率：限定单位内成竹数占总发笋数的比例，即成竹率=成竹数/总发笋数。这一概念表征笋的活力，也可表征留笋养竹的成效。

丛发笋数：特定竹丛发笋数量。这一概念用于衡量丛竹笋产量和竹丛活力。

丛发笋度：特定竹丛有孕笋能力的竹秆比例。丛发笋度=丛内发笋秆数/丛秆度。

丛发笋率：竹丛内平均每秆发笋数。丛发笋率=丛发笋数/丛秆度。

秆发笋数：特定竹秆发笋头数。这一概念用于衡量丛秆笋产量和丛秆活力。

参考文献

- [1] 耿伯介, 王正平.《中国植物志》第九卷第1分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [2] 西南林学院等编著. 云南竹类资源及其开发利用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1995
- [3] Yang Y M. Bamboo distribution and utilization. *Bamboo Conservation and Taxonomy*. 2000. 35-42
- [4] Yang Y M, Xue J R, Rao A N , *et al*. A Review of Bamboo Resources in Yunnan, China. *Asem Symposium on Forest Conservation & Sustainable Development*. 2001
- [5] 南京林产工业学院竹类研究室. 竹林培育[M]. 农业出版社, 1974
- [6] 汪奎宏. 中国毛竹[M]. 浙江科学技术出版社, 1996
- [7] 杨宇明, 辉朝茂主编. 优质笋用竹产业化开发 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [8] 辉朝茂, 杨宇明主编. 材用竹资源工业化利用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1998
- [9] 辉朝茂, 杨宇明主编. 中国竹子培育和利用手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002

- [10] 辉朝茂, 杨宇明, 杜凡. 珍稀竹种巨龙竹生态生物学特性及开发利用基础性研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006
- [11] 杨宇明, 张国学, 辉朝茂. 天然沙罗竹林分龄结构和叶面积指数变化规律及应用的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2004, 23(2): 18-22
- [12] 杨宇明, 辉朝茂. 丛生竹经营技术和综合开发研究. 中国热带地区竹藤发展. GTZ/INBAR 竹藤研讨会论文集 (竺肇华主编), 2001,36-46
- [13] 杨宇明, 辉朝茂. 中国竹产业开发的前景和对策研究[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(5): 36-40
- [14] 辉朝茂. 中国竹类多样性及其可持续利用研究现状和展望[J]. 世界林业研究, 2004, 17(1): 50-54
- [15] 辉朝茂, 杨宇明. 关于云南大型丛生竹产业化开发的探讨[J]. 林业科技开发, 2000(1): 7-9
- [16] 杜凡. 云南重要经济竹种的特性及其生产中的误区[J]. 西南林学院学报, 2002, 22(4): 26-30
- [17] Yang Y M, Xue J R, Du F. A study on the techniques of cultivation and integrated development of sympodial bamboo species. *Asem Symposium on Forest Conservation & Sustainable Development*. 2001

地面覆盖对毛竹生长影响的初步研究

汪奎宏¹ 王波¹ 李琴¹ 朱志建²

(1.浙江省林业科学研究院竹类研究所, 浙江杭州, 310023; 2.湖州市林业科学研究所, 浙江湖州, 313000)

摘要 采用覆盖技术后, 毛竹出笋时间显著提前, 笋产量和经济效益大大提高; 覆盖后样方内竹鞭总长度为 740.48cm/m², 幼壮龄鞭占总鞭长的 35.95%, 幼壮龄鞭的平均鞭径为 19.94mm, 和未覆盖竹林相比, 鞭段数有所增加, 总鞭长和幼壮龄鞭的比例有所下降; 覆盖毛竹林鞭侧芽的总数少于未覆盖毛竹林, 但休眠芽中的活芽高于未覆盖竹林, 连续覆盖两年后的毛竹林还具有丰产潜力。

关键词 毛竹; 覆盖; 竹鞭; 生长影响

Study on the impact of artificial ground coverage treatments to moso bamboo growth

Abstract. The artificial ground coverage treatments makes significantly earlier shooting season, and greatly promote the edible shoot productivity and profits of the shoot products in managed *Phyllostachys pubescens* stands than those in the plots without the treatments (contrast plots). According to our investigation, the average length of the rhizome in the treated plots is 740.48 cm/m², in which the proportion of young rhizomes in length is about 35.95% among all ages of rhizomes and their average diameter is 19.94 mm. Consequently, comparing to the bamboo stand in the contrast plots, the proportion of the number of the young rhizome in treated plots increases, while total length of and proportion of the young rhizomes decrease. The number of the buds of the rhizome with the treatment is less than that of contrast plots while the proportion of living buds out of the dormant buds in the treated plots is more than those in contrast plots.

Key words: *Phyllostachys pubescens*; coverage treatment; rhizome

毛竹覆盖是一项全新的培育技术, 可以使毛竹春笋的出笋期提前至春节前后, 以壳黄、肉白的外形和冬笋的品质、春笋的大小等独特优势, 深受消费者欢迎, 市场供不应求。为进一步研究毛竹覆盖高效栽培技术, 探索地面覆盖后对毛竹生长的影响, 我们对覆盖毛竹林的出笋情况、地下结构进行了调查研究。

1. 试验材料和方法

1.1 试验地概况

覆盖毛竹林试验地设在湖州市埭溪镇山背村。该地区年平均气温 15.2~15.6℃, 最冷月 (1月)

平均气温 3.2℃，最热月（7 月）平均气温 28.4℃，年极端最高气温 39.0℃，极端最低气温-11.1℃，年日照时数 2124.5h，年平均无霜期 250d，年平均降水量 1400mm。土壤平均容重 1.22g·cm⁻³，pH 值 4.9~5.2。

1.2 研究方法

试验点面积 0.2 公顷，共分 3 个小区，于 2007 年、2008 年的 10 月份连续 2 年对毛竹林进行覆盖，覆盖材料为稻草、竹叶、砻糠和厩肥。同时选择立地条件和抚育管理措施基本相同的毛竹林 0.1 公顷为对照样地。

（1）地面覆盖对毛竹出笋期和竹笋产量的影响：在产笋季节每天统计竹笋的产量，同时对始笋期、终笋期进行记录。

（2）地面覆盖对毛竹地下鞭生长的影响：在调查地点取 1m×2m 的长方形样地，尽量避免有老竹兜的地方，然后往下挖，每 10cm 为一层，挖至没有竹鞭为止。将每层所挖得的竹鞭、鞭根及竹根收集起来，待洗净晾干后称其重量。竹鞭则按年龄分为 1—2 年生、3—4 年生、5—6 年生、7 年生以上 4 个级别。按每层每级别分别量出竹鞭长度，称出竹鞭重量，数出萌芽及休眠芽，休眠芽还要记录活芽。

2. 结果与分析

2.1 地面覆盖对毛竹出笋量和出笋期的影响

覆盖与未覆盖毛竹林出笋情况见表 1。从 2008、2009 年两年的记录数据来看，地面覆盖明显增加了毛竹笋产量，2008 年增加了 27270 kg/公顷，2009 年增加了 21668 kg/公顷，同时提早并延长了出笋期，2008 年提早 46 天出笋，2009 年提早 56 天。从表 1 可以看出，采取覆盖技术大大提高了毛竹林的产值。

表 1 地面覆盖对毛竹出笋的影响

指标	2007—2008 年度		2008—2009 年度	
	覆盖	对照	覆盖	对照
笋产量 (kg/公顷)	41467	14197	36975	15307
产值 (元/公顷)	404775	19710	331855	24255
始笋期	1 月 27 号	3 月 13 号	1 月 9 号	3 月 6 号
出笋期 (天)	75	58	89	61

2.2 地面覆盖对毛竹林地下结构的影响

2.2.1 地下竹鞭数量特征比较

表 2 毛竹林地下鞭特征

鞭龄	采用覆盖技术毛竹林 (1×2m ²)			未采用覆盖技术毛竹林 (1×2m ²)		
	鞭长 cm	鞭重 g	鞭径 mm	鞭长 cm	鞭重 g	鞭径 mm
1~2a	130.67	501.00	18.18	172.51	613.54	20.07
3~4a	401.67	1817.33	21.69	427.64	1914.39	23.45
5~6a	492.00	2294.00	19.50	448.12	1987.56	18.16
7a 及以上	456.63	2156.67	18.58	458.35	2049.35	18.09
总计	1480.97	6769.00	—	1506.62	6564.84	—

单位面积竹鞭数量主要有鞭的长度、重量和鞭径大小来决定的。统计表明（见表 2），采用覆盖技术的毛竹林竹鞭长度为 740.48cm/m²，幼壮龄鞭（1—2a、3—4a 鞭）占总鞭长的 35.95%，幼壮龄鞭的平均鞭径为 19.94mm；未覆盖毛竹林竹鞭长度为 753.31.48cm/m²，幼壮龄鞭占总鞭长的 39.83%，幼壮龄鞭的平均鞭径为 21.76mm。采用覆盖技术的毛竹林与未覆盖的相比，总鞭长和幼壮龄鞭的鞭径及所占比例有所下降，这与雷竹覆盖对竹鞭的影响结果类似^[1]，但是在调查的过程中未有烂鞭出现。

2.2.2 竹鞭在土壤中的分布比较

采用覆盖技术与对照毛竹林竹鞭在土层中的分布（鞭段数所占比例）见表 3。由表 3 可以看出，覆盖毛竹林竹鞭主要分布在 0~40cm 土层中，40cm 以下土层很少有成活的鞭。其中在 20~40cm 土层之间竹鞭约占 56%；未覆盖毛竹林分布在 20~40cm 土层之间的竹鞭约占 62%。与未覆盖毛竹林相比，采用覆盖技术的毛竹林竹鞭在浅层土中的分布明显增多，这表明竹鞭分布已明显上浮。经过覆盖林地竹鞭在土层中的这种分布状况对形成竹林经济产量并不利，影响笋的孕育和萌发，应采取 措施，加深竹鞭在土层中的分布，使竹鞭主要分布在 20~40cm 土层中。

表 3 不同龄竹鞭在土层中的分布 (%)

分布深度 (cm)	采用覆盖技术				未采用覆盖技术			
	1—2a	3—4a	5—6a	7a 以上	1—2a	3—4a	5—6a	7a 以上
0—10	3.26	2.03	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
10—20	4.15	14.42	13.56	1.23	6.43	13.46	9.23	1.18
20—30	2.34	8.86	9.68	6.28	2.15	15.26	11.05	5.47
30—40	1.21	8.26	10.11	9.21	1.74	10.09	10.36	6.47
40 以下	0.00	1.52	1.49	2.39	0.00	1.04	2.13	1.85
合计	10.96	35.09	34.84	19.11	12.41	39.85	32.77	14.97

表 4 竹鞭侧芽的分布特点

鞭龄	采用覆盖技术毛竹林			未采用覆盖技术毛竹林		
	萌发芽	休眠芽	休眠芽中的活芽	萌发芽	休眠芽	休眠芽中的活芽
1~2a	2.6	65.2	65.2	4.7	81.3	70.3
3~4a	19.8	73.3	65.9	23.3	75.6	62.7
5~6a	34.5	32.6	17.6	31.4	31.5	14.9
7a 及以上	10.8	37.6	0.6	11.6	42.7	1.2
总计	67.7	208.7	149.3	71.0	231.1	149.1

2.2.3 竹鞭侧芽的分布特点比较

一般认为，试验地采用覆盖技术后对林地的地下结构有影响，使烂鞭、烂芽的数量增加^[2]。为了解林地覆盖对地下鞭侧芽的影响，我们对试验地的地下鞭侧芽调查结果进行统计得出表 4。

从表 4 可知，采用覆盖技术的毛竹林鞭侧芽的总数、萌发芽数都要少于未覆盖的毛竹林，但是它的休眠芽中的活芽所占比例要高于未覆盖毛竹林，这也说明毛竹林经过两年的覆盖还具有丰产的潜力。

3. 结论

采用覆盖技术对提早和延长毛竹出笋时间、增加早期笋产量、提高经济效益有明显效果。究其原因，采用地面覆盖不仅有利于地面保温，同时也有利于增加地面持水和保肥能力，覆盖材料本身腐烂分解的有机质也有利于竹鞭的发育，从而提早孕鞭育笋，促进生长。不同的覆盖材料，出笋所需时间各不相同。为了能在预定时间内及时出笋，正确掌握不同酿热材料覆盖时间很重要，必须遵循毛竹孕笋规律和掌握覆盖材料的酿热性能，并与市场需求相联系。有关覆盖材料与竹笋产量之间的定量关系还有待于进一步研究。

采用覆盖技术的毛竹林样方内竹鞭总长度为 740.48cm/m²，幼壮龄鞭的平均鞭径为 19.94mm，和未覆盖竹林地相比，鞭段数有所增加，总鞭长和幼壮龄鞭的比例有所下降。覆盖毛竹林竹鞭在土层中的分布有所上升，分布在 0~20cm 土层之间的竹鞭占到了 38.65%，但是从鞭侧芽的分布来看，连续覆盖 2 年的毛竹林地下鞭还具有丰产的潜力。因此对毛竹林地连续覆盖时间模式还有待深入研究。

在毛竹林覆盖技术实施过程中要扬长避短，以实现林地的可持续经营：建立和完善毛竹覆盖栽培技术，做到合理选择覆盖物和覆盖厚度，对母竹采用覆盖/休闲留养法，既能提高经济效益，又能防止竹林老化；通过后期及时清除覆盖物，保证鞭系健康生长，埋鞭、断鞭和覆土等处理人工助长

竹林鞭系，以提高竹鞭数量和在地层中的分布深度，以保证笋芽数量和萌发率^[3]。

参考文献

- [1] 金爱武, 周国模, 郑炳松等. 覆盖保护地栽培对雷竹地下鞭的影响[J]. 竹子研究汇刊, 1998, 17(4): 36-39
- [2] 何均潮, 方伟, 卢学可. 雷竹双季丰产高效笋用林的地下结构[J]. 浙江林学院学报, 1995, 12(3): 247-252
- [3] 金爱武, 周国模, 郑炳松 等. 雷竹保护地栽培林分退化机制的初步研究[J]. 福建林学院学报, 1999, 19 (1): 94-96
- [4] 何奇江, 汪奎宏, 吴蓉 等. 不同经营类型毛竹笋用林的地下鞭根系统调查研究[J]. 浙江林业科技, 2000, 20(2): 31-34

竹子纯林经营的林地水分问题刍议

张培新

(安吉县林业局 313300)

摘要 生态问题的归根到底是水的问题。竹林纯林经营方式削弱了竹林水分循环作用，与有乔灌木混交的竹林相比，其水分循环是不完整的。竹林水分变化反之又影响到竹林经济效益和生态环境变化。笔者通过对竹子纯林经营水分循环变化的思考，认为乔灌木对竹林起着“引水”和“提水”的作用，是其它各种人工方法都难以取代的，因此建议以科学发展观的态度，从森林群落生态学的角度对竹子混交林的效益、保护、营建、培育等技术方面开展研究，大力提倡混交林经营。

众所周知，天然竹林基本上都是混交林。但在竹子经营上有纯林经营和混交林经营等多种形式。纯林大多是经过人工劈山抚育等措施后形成的，竹子纯林经营的笋竹产量高，经济效益好。半个多世纪以来，发展竹子纯林一直受到各级领导、竹子科技工作者的重视和农民的普遍欢迎，在生产上获得了卓著成效。但是，经过长期的纯林经营，特别是过度的集约经营后，竹林水土流失严重，生物多样性骤减，病虫害频发，竹林生态矛盾日趋显现，经济效益降低，其中竹林的水分问题尤为突出。

1 竹子纯林经营造成的林地水分问题

林地水分滞留是通过植物的叶面、枝干、根莖、枯枝落叶和地面结构得以实现的。植物的叶面、枝干、根莖、枯枝落叶和地面结构越是丰富复杂，滞留水分的效果越好。毛竹纯林的林冠层极为简单，厚度一般也仅在 5—10 米（钩梢后降低了林冠层厚度）。另外，经过长期劈山、平整、化学除草等经营措施后，竹子纯林林地的草、灌植物也变得稀少，加上风吹、日晒和雨淋等自然作用，使得竹林地表变得日趋平滑和坚硬，对雨水的滞留极为不利。另一方面，相比有植被覆盖的林地，竹子纯林林地的水分无效蒸发量大大增加，降低了竹林的抗旱能力。这是显而易见的，更为严重的却是长期地容易被忽视的竹子纯林经营改变了林地水分循环过程。

林地植物的根系在土壤中生长及新陈代谢，促使土壤结构变得疏松，并促进了其它生物和微生物的活动。众所周知，竹子根系一般分布在 50cm 以上的上层土壤，只能在上层土壤中生活且对上层土壤产生作用。而乔灌木的根系可以深入到 50cm 以下的下层土层，并穿透该土层深入到岩石层，其根系不断生长，表皮不断枯死更新，疏松土壤，在土壤上层和岩石层之间形成了输水管道。下雨时，它能将水引导到土壤深处和岩石缝隙中，起到一个“引水机”的作用；干旱时，它又能将地下

水提引到竹子鞭根生长的上层土壤，起到“提水机”的作用。

竹子纯林经营的林地植物根系，除了少量草本植物之外（其根系分布都很浅），主要是分布在上层土壤中的竹子根系。下层土壤非常缺乏植物根系和其他生物及微生物的活动，加上长期的沉淀作用，天长日久逐渐形成了一个不透水的隔离层。这层土壤比较紧密黏重，水分较难渗透，因此阻断了上层土壤和下层土壤直至岩石的渗水通道。竹子纯林的这种土壤结构的变化改变了林地水分的循环过程，使得水分循环主要只能在上层土壤和空气中进行。

由此我们可以发现竹子纯林和混交林的水分循环是大不一样的。竹子纯林降雨时虽然上层土壤水分达到了饱和，但水分无法渗透到下部土壤及岩石中去，久而久之造成地下泉水的减少甚至枯竭；在天晴及干旱时，竹林在消耗完了上层土壤中的水分后，并不能得到林地深层水分的补充，较为容易发生竹林干旱，影响经济产量，并逐渐改变林下植物群落。而在混交林情况下由于乔灌木根系的输水管道作用，降雨时部分水分能够及时被输送到深层土壤及岩石中补充地下水，使得森林泉水长流；在干旱情况下，乔灌木的根系能够吸收深层土壤和岩石中的水分，通过根压和蒸腾，把深层水分提升到林地上层土壤及环境中供林木使用，从而减缓竹林干旱程度。

裸地的水循环在地表（包括表层土壤）和空气中进行，竹木混交林的水分循环能够深入到深层土壤和岩石层，竹子纯林的水分循环介于二者之间，与一般具有乔灌木的竹木混交林相比较，显然竹子纯林的水分循环系统是不完整的，或可称之为半循环。

2 改善竹子纯林水分状况的措施建议

综上所述，竹林经营方式对竹林水分状况影响很大，竹林水分反之又严重地影响到竹林产出和竹林生态。尤其是竹林乔灌木的“引水”和“提水”作用，对竹林水分循环起到很大的作用，也是其它任何人工方法都难以取代的。因此，笔者提出几点具体建议。

第一，转变经营观念，笔者认为要以科学发展观分析并解决问题，逐步改变原来纯林经营的理念。竹子纯林经营始于上世纪的50年代末60年代初期，到70-80年代发展迅速，90年代在全国达到了高潮。回顾其历程，在50-70年代的计划经济时代，社会产品缺乏，对竹材的重视程度高。80-90年代刚刚改革开放不久，一切为了发展经济、提高经济效益。所以，纯林经营在那样的历史背景下对社会发展作出了巨大贡献。时至当前，全国进入了小康社会，我们追求的目标从温饱转向了提高生存和生活质量，理所当然，竹林的纯林经营、单一追求经济产量和经济效益的理念也应及时向注重生态效益和长远发展的方向转变。

第二，对竹林群落植物开展多方面的研究，对竹子混交林的综合效益进行宏观和微观的研究，比较当前和将来的竹子纯林经营和混交林经营的生态、经济、社会效益，探索一套生态效益和经济

效益兼顾的科学方法。研究乔灌木树种和竹子的生态、经济效益互补性和依存性，研究竹子混交林和纯林的生物多样性的变化，改善竹林生态环境和景观效果，防止地力退化、植被退化和病虫害以及风雪等自然灾害。

第三，研究混交林经营的技术措施，开展树种选择、树种配比、混交比例、栽植方法、培育技术等各方面的技术措施进行试验研究，目前可以查阅的这方面资料非常缺少，因此很难找到可资利用的数据依据。目前要根据营林过程区别对策，在竹子造林或者低产竹林改造时，要适当保留乔灌木树种；对目前已经形成的纯林逐步通过套种、补植和留养等方式进行混交林改造。

第四，保留、改善和增加地被植物。应在竹林经营中对拔葵（俗称金刚刺）、五节芒（俗称斑茅）等弊大于利的植物予以清除，主动保留或培育、改善林下植物，特别是一些有经济价值的、适宜竹林生长环境的、能够促进竹林植物向良性方向发展的灌木和草本植物（例如豆科植物）。通过增加林下植物种类和数量，形成生物多样性结构，增强竹林抗旱和自肥能力，促进竹林生态和经济效益的长久的良性发展。

散生型笋用竹笋体有机农药残留研究*

郭子武, 陈双林**, 萧江华

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳, 311400)

摘要 通过浙江省主要产竹区4县(市)竹笋多点取样对主要有机农药残留检测分析, 结果表明: 残留的有机农药种类为三种有机氯农药, 即HCH、DDT、五氯硝基苯, HCH、DDT检出率均100%, 五氯硝基苯(PNCB)检出率75%, 残留量均值均低于国家蔬菜农残标准(50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。经综合污染指数和系统聚类分析, 试验笋样可分为两类, 即安全类, 占82.14%; 基本安全类, 占17.86%, 说明虽然试验取样区竹笋普遍检出HCH、DDT残留, 但污染并不严重; 竹林经营类型、经营水平、土地利用方式对竹林土壤有机农药残留有一定的影响, 集约经营竹林显著高于粗放经营竹林, 笋用竹林较毛竹笋材两用林高, 山地竹林较原农业耕作地改种的笋用竹林低。

关键词 散生型笋用竹; 农药残留; 内梅罗指数; 检出率

Study on organ-pesticide residue in shoot of monopodial shoot-producing bamboo stands

GUO Zi-wu, CHEN Shuang-lin, YANG Qing-ping, XIAO Jiang-hua

(Research Institute of Subtropical Forest, Chinese Academy, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the investigation of organ-pesticides residue in bamboo shoot samples from Zhejiang province, the result were as follows: 3 types of organ chlorine including BCH, DDT, pentachloronitrobenzene were determined, and the detection rate of both BCH and DDT is up to 100%. none of pyrethroid and Organophosphorus pesticides were determined. The average of all organ-pesticide residue is lower than 50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The Nemerow index and cluster showed that tested shoot samples can be divided into two types: safety shoot, accounting for 82.14%; and fundamental safety shoot, accounting for 17.86%. All indicated that organochlorine residue of bamboo shoot from Zhejiang province was universal, but not severe. In addition, management level, management types and topography influenced organochlorine pollution to some extent. The residual of pesticides was higher in shoots under intensive management in bamboo forests, bamboo forest used for shoot production, and bamboo forest converted from cropland than in those under extensive management bamboo forest, *phyllostachys pubescens* forests used for shoot and timber production, and bamboo forests established on mountains, respectively.

Key words: Runner and Shoot-Used Bamboo; Pesticide Residue; Nemerow Index; Detection Rate

***基金项目** 国家林业局“948”引进项目“酶修复经济林地土壤农药污染技术引进”内容

** **通讯作者** 陈双林: cslbamboo@126.com

竹笋肉质细嫩，松脆爽口，营养价值高，历来为人们所喜爱，视为山珍和无公害森林食品^[1,2]，也是我国传统大宗出口产品，2006年全国竹笋业产值达120多亿元。由于笋用竹林多实行大面积纯林集约经营，使得竹林病虫害危害猖獗，竹林病虫害种类达1200余种^[3]，其中，大面积危害的竹子害虫就达40余种^[4]。长期以来竹林病虫害的防治主要依赖于化学农药，在有效控制病虫的同时，也在一定程度上造成了生态环境的污染^[5]，特别是竹笋的农药残留问题较为突出。在当前全社会普遍关注生态环境安全和食品安全的背景下^[6,7]，开展竹笋质量，特别是农药残留及其影响的研究就显得尤为重要。本研究在详细分析浙江省主要产竹区竹笋农药残留特征的基础上，运用内梅罗指数法评价竹笋的污染状况，旨在为竹笋高效生态栽培提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样点选择

在对浙江省主要产竹区竹林分布特点、经营水平和经营历史详细调查的基础上，在富阳、临安、龙游、德清4县（市）确定了28个样点。竹林经营类型为笋材两用毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林和雷竹(*Ph. viofascen*)、早竹(*Ph. parecox*)、红竹(*Ph. iridexcens*)笋用林，经营水平包括粗放经营、集约经营（包括笋用小径竹林地有机材料覆盖）。

1.2 竹笋取样

在选取样点竹林中采用对角线法均匀布点5个，在每样点附近选取近等大、生长正常的竹笋，将笋完整挖起，带回实验室后，取可食部分切碎充分混合，取混合样20g用于有机农药残留的测定。

1.3 农药残留测定

有机磷、有机氯、拟除虫菊农药残留采用气相色谱（Agilent 6890N，Agilent公司，美国）法测定。有机氯、拟除虫菊酯类农药残留检测方法参照(GB/T14553-2003)^[8]，方法检测限在0.001~0.004 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，RSD<10%；有机磷类农药残留参照(NY/T761-2004)^[9]，方法检测限在0.008~0.05 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，RSD<8%。氨基甲酸酯农药残留采用液相色谱（waters alliance 2695，water公司，美国）法测定。氨基甲酸酯农药检测参照蒋新明等^[10]方法，氨基甲酸酯农药最小检出限：2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均RSD为5.47%。

1.4 数据处理

1.4.1 有机农药检出率（DR）

$$\text{检出率 (DR, \%)} = \frac{\text{检出农药残留样品数}}{\text{试验样品总数}} \times 100 \quad (1)$$

1.4.2 评价方法

1.4.2.1 单项污染指数法

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中, P_i 为某污染物的污染指数, C_i 为该污染物实测值 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), S_i 为该污染物评价标准 ($\mu\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 采用国家食品中农药残留最大限量标准[11] (MRL; HCH 为 $50\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, DDT 为 $50\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 五氯硝基苯为 $100\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

1.4.2.2 综合污染指数法

$$P = \sqrt{\frac{P_{j\text{max}}^2 + P_{j\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中, P 为第 j 个笋样的质量综合指数, $P_{j\text{max}}$ 为第 j 个笋样 i 污染物所有单项污染指数中的最大值, $P_{j\text{ave}}$ 为第 j 个笋样 i 污染物所有单项污染指数的平均值。计算出综合污染指数 P 后与污染程度分级进行比较 (未污染, $P < 1$; 轻度污染, $P = 1 \sim 2$; 污染, $P = 2 \sim 3$; 重度污染, $P > 3$)。数据处理采用 Excel 及 SAS 软件完成。

2 结果分析

2.1 散生型竹笋农药残留特征

2.1.1 农药残留种类

从供试的笋样中共检测到 9 种有机农药 (表 1), 全部为有机氯农药, 有机磷农药和氨基甲酸酯类农药均低于检测限。检测到的有机氯农药主要为: α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、 o,p' -DDT、 p,p' -DDE、 p,p' -DDT、 p,p' -DDD、五氯硝基苯。HCH 检出率 100%, 4 种异构体的检出率从大到小顺序为 β -HCH、 δ -HCH、 α -HCH、 γ -HCH, 这与 HCH 各异构体的稳定性及其相互转化规律相符, 即 β -HCH 最稳定, 而在生物体内 α -HCH、 γ -HCH 可以转化成 β -HCH^[12,13]; 最低检出率 (γ -HCH) 超过 70%, 平均检出率 88.25%。DDT 的四种同系物中有两种检测率达 100%, 最低检出率 (p,p' -DDT) 25%, 平均检出率 73.25%。虽然 DDT 的平均检出率低于 HCH, 但是其两个组分的检出率达 100%, 而 HCH 只有一种, 这说明在竹林生态系统中 DDT 的稳定性比 HCH 更高。同时 DDT 各组分残留率规律与

其由 DDT—DDE—DDD 降解过程相符^[14,15]。五氯硝基苯检出率 75%。各残留组分的变异系数均超过 0.5，大部分超过 0.9，最大达 4.109。

2.1.2 农药残留量

从表 1 分析可知，试验笋样 HCH、DDT 各组分及 Σ HCH、 Σ DDT、 Σ OCP 残留均值均低于 $50\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，即国家食品中农药残留最大限量标准^[11]，最大值中 β -HCH、 Σ -HCH、*o,p'*-DDT、 Σ DDT 及 Σ OCP 高于 $50\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，但 HCH 低于 $200\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，DDT 低于 $100\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，符合浙江省地方竹笋标准^[16]。HCH、DDT 各组分组成表明，HCH 各异构体残留量从大到小顺序为 β -HCH、 α -HCH、 δ -HCH、 γ -HCH，其最大残留是最小残留的 14.35 倍，与上述的 β -HCH 最稳定，最难降解， α -HCH 和 γ -HCH 异构体可以转化成 β -HCH 有关。DDT 各同系物残留量从大到小顺序为 *o,p'*-DDT、*p,p'*-DDE、*p,p'*-DDT、*p,p'*-DDD，最大残留是最小残留的 48.08 倍。两种降解产物（*pp*-DDE、*pp*-DDD）中，*pp*-DDE 几乎不为生物和环境所降解^[17,18]，因而含量也最高。五氯硝基苯检出率虽然达到 75%，但含量较低，最大值仅为 $2.255\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （表 1），远低于国家食品中农药残留最大限量标准。

表 1 竹笋有机氯农药残留

Table 1 Organochlorine pesticide residues in the bamboo shoots tested ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

有机氯农药	最大值	最小值	均值	检出率 DR (%)
α -HCH	10.846	0.134	0.775	86
δ -HCH	3.313	0.156	0.995	96
γ -HCH	2.850	0.028	0.476	71
β -HCH	73.063	1.190	11.123	100
Σ -HCH	73.678	2.014	12.981	
<i>p,p'</i> -DDE	23.572	0.336	4.461	100
<i>o,p'</i> -DDT	62.002	2.789	25.581	100
<i>p,p'</i> -DDT	11.728	0.145	0.538	25
<i>p,p'</i> -DDD	2.192	0.138	0.532	68
Σ -DDT	70.449	3.703	31.112	
PNCB	2.255	0.141	0.898	75
Σ -OCP	97.203	23.227	11.613	

2.2 竹笋农药残留评价

本试验对 28 笋样分析表明，所有笋样农药残留均低于 $100\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （浙江省地方竹笋标准），但是部分样品的 DDT 和 HCH 残留超过国家蔬菜农药残留最大限量标准（ $50\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），有 4 个样品的 DDT 高于国家食品 MRL 标准，占 14.29%，有 1 个样品的 HCH 高于国家食品 MRL 标准，占 3.6%，所

有试样的五氯硝基苯含量低于国家食品 MRL。以上述两标准计算计算农药的单项污染指数及用内梅罗(Nemerow)综合污染指数，内梅罗指数 $P < 1$ 安全， $P \geq 1$ 表示受到污染， P 越大污染也就越严重。

以浙江省地方竹笋标准计算出所有笋样的单因子污染指数及综合污染指数均小于 1。以国家蔬菜农药残留最大限量标准计算出所有笋样的单因子污染指数及综合污染指数如表 2 所示，23 个样品的综合污染指数小于 1，占 82.14%，属安全类；只有 5 个样品的综合污染指数超过 1，占 17.86%，但其以浙江省地方竹笋标准计算综合污染指数仍小于 1，故此属基本安全类。对综合污染指数以欧式距离最短距离法系统聚类（图 1），表明 28 个笋样可以分为两类（基本安全类、安全类）。元素综合污染指数分析表明，虽然 DDT 单项污染指数最大值低于 HCH，但其均值却高于 HCH，同时 DDT 的超标率也高于 HCH，其综合污染指数也略高于 HCH，这说明竹笋的 DDT 残留要比 HCH 高。五氯硝基苯的综合污染指数仅为 0.017，未构成污染。

表 2 竹笋有机氯农药污染指数(单项污染指数与综合污染指数)

Table2 Pollution index of organochlorine pesticides in bamboo shoot (single and comprehensive pollution index)

项目	单项污染指数 (P_i)			综合污染指数 P	样号
	Σ -DDT	Σ -HCH	五氯硝基苯		
均值	0.622	0.260	0.011		4、10、12、19、11、13、14
最大值	1.409	1.474	0.023	0.1-0.99	1、16、18、18、2、3、27、22、15、
最小值	0.074	0.040	0.001		23、7、5、17、24、8、21
元素综合污染指数	1.089	1.058	0.017	1.00-1.20	16、6、9、20、25

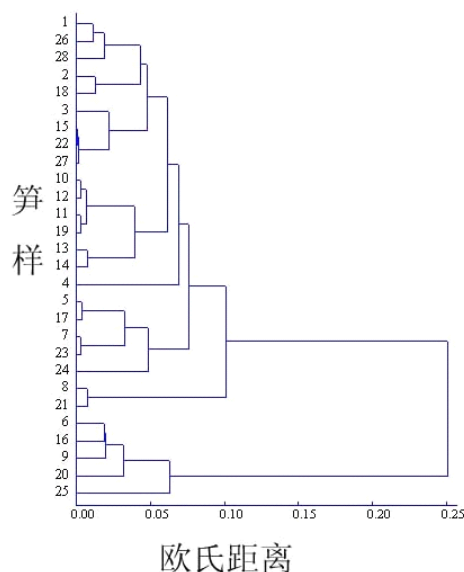


图 1 竹笋有机农药污染聚类分析图

Fig.1 cluster tree of 28 investigated shoot samples

2.3 竹林经营对竹笋有机农药残留的影响

2.3.1 竹林经营类型对竹笋农药残留的影响

试验竹林经营类型分为毛竹笋材两用林、笋用竹林（早竹、雷竹、红竹）。图2表明笋用竹林竹笋中农药残留显著高于毛竹笋材两用林，前者 Σ DDT、 Σ HCH、五氯硝基苯残留分别是后者的1.38倍、3.14倍和7.45倍。其原因可能是HCH、DDT上世纪80年代前在农田大量使用，竹林也有施用，虽然经过近30年的自然降解，在不同类型竹林的竹笋间残留的差别不显著。残留量总体以从农业耕地上发展起来的笋用竹林较高，这与以前农作物种植中该两种农药的使用量有关。而五氯硝基苯是继高毒、高残留、高稳定性有机氯农药后使用的农药，使用时间距今较近，在不同类型竹林间的竹笋间残留存在差异。

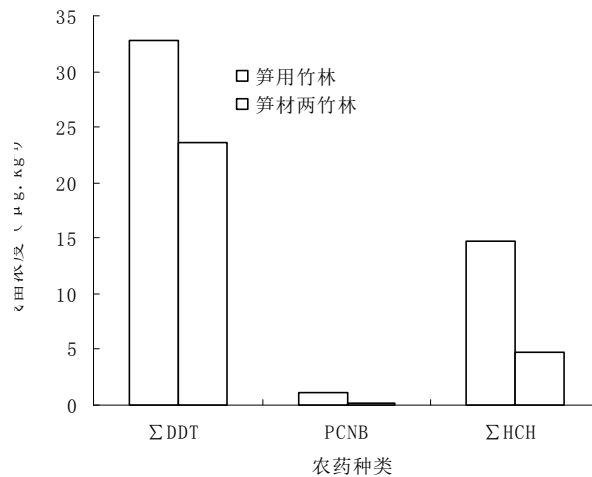


图2 不同经营类型竹林的竹笋有机农药残留状况

Fig 2 Pesticide residues in the shoot samples tested of different management types bamboo forest

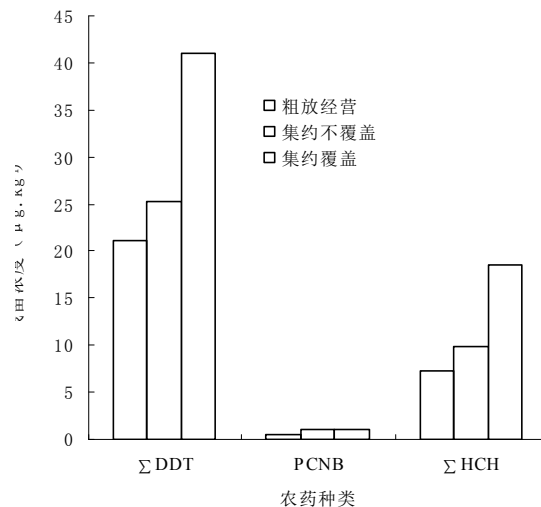


图3 不同经营水平竹林的竹笋有机农药残留状况

Fig 3 Pesticide residues in shoot samples tested of different management levels bamboo forest

2.2.3 土地利用方式与土壤有机农药残留的关系

竹林不同的土地利用方式对竹笋农药残留有一定的影响，原农业耕地改种为笋用竹林的竹笋有机农药残留量高于山地经营的竹林（图4），前者竹笋 DDT、五氯硝基苯和 HCH 残留分别是后者的 1.11、1.02 和 1.18 倍。致成原因与从农业耕地发展起来的笋用竹林，在原先种植农作物时，农药使用量和频率大，土壤本底农残就较高，再者，农业耕地上发展起来的笋用竹林，竹林病虫害较山地竹林发生频繁，农药使用量也较高等有关。

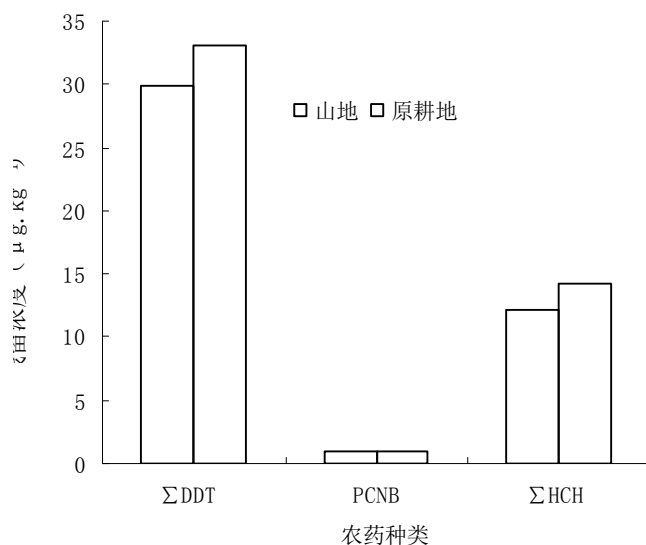


图4 不同土地利用方式的商品竹林竹笋农药残留状况

Fig 4 Pesticide residues in the shoot samples tested of different land use types

3 结论

浙江省主要产竹区竹笋有机氯农药残留具有普遍性，共检测到 9 种有机氯农药。其中 HCH 和 DDT 检测率均达 100%，但在竹林环境中 DDT 更加稳定。

在竹笋检测出的有机农药种类中，仅有少部分笋样农药残留超过国家食品农药 MRL，但低于 $100\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，符合浙江省优质笋标准，没有超标。综合污染指数和系统聚类分析表明，试验笋样可以分为两类，即安全类，占 82.14%，基本安全类，占 17.86%，说明浙江省主要竹产区竹笋虽有有机农药残留，但残留浓度并不高，未构成污染。

竹林经营类型、经营水平和土地利用方式对竹笋有机农药残留有一定的影响，集约经营竹林显著高于粗放经营竹林，笋用竹林较毛竹笋材两用林高，山地竹林较原农业耕地改种的笋用竹林低。

浙江主要产竹区竹笋有机农药残留种类虽不多，浓度较低，但若不及时清除，也易构成符合污染，存在潜在的危险性^[19]。因此，在全面调查竹笋有机农药污染的基础上应着重开展以下方面的工作

作：研究有机农药特别是持久性（POP）有机农药对人类健康潜在危害及其评价^[20]；开展有机氯农药高效降解元素的筛选与应用技术研究^[21]，重点是高效降解菌、降解酶筛选及其降解特性与制剂研发，及影响因子的作用机理，为有机农药污染环境的生态修复，特别是优质、无污染、生态安全竹笋生产配套应用技术^[22]。

参考文献

- [1] 任从尧, 童振杰, 卢建文. 竹笋的营养成分与毛竹生产及竹园的施肥技术. 内蒙古农业科技, 2005, F10, 81-83
- [2] 刘明池. 竹笋的营养价值与食用方法. 蔬菜, 2002, 2, 40-40
- [3] 江泽慧, 许焯灿. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [4] 徐天森. 竹子害虫防治研究. 陕西林业科技, 1992, 2, 40-43
- [5] 祝坚, 马瑾, 潘根兴等. 有机磷农药的残留、毒性及前景展望. 生态环境, 2003, 12(2): 213-215
- [6] 夏运生, 何江华, 万洪富. 广东省农产品污染状况分析. 生态环境, 2004, 13(1): 109-111
- [7] 孙胜龙, 李雪飞, 刘歆瑜. 长春市主要蔬菜中农药残留分析. 生态环境, 2005, 14(2): 214-217
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T14553-2003. 粮食和果蔬质量有机磷农药的测定--气相色谱法 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [9] 中华人民共和国农业部. NY/T761-2004, 蔬菜和水果中有机磷、有机氯、除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留检测方法 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [10] 蒋新明, 蔡道基, 华晓梅. 高效液相色谱柱后衍生法用于氨基甲酸酯类农药的测定. 色谱, 1994, 12(1): 32-34.
- [11] 国家卫生部. GB/2763-2005 食品中农药最大残留限量 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [12] Boyle, A.W., Haggblom, M.M. & Young, L.Y. Dehalogenation of hexachlorocyclohexane by anaerobic bacteria from marine sediments and by sulfate-reducing bacteria. FEMS Microbiology Ecology, 1999, 29(4): 379-387
- [13] CHAUDHRY, G.R., & CHAPALAMADUGU, S. Biodegradation of Halogenated Organic Compounds Microbiological reviews, 1991, 55(1): 59-79
- [14] Hay, A., Focht, D. Cometabolism of 1,1-Dichloro-2,2-Bis(4-Chlorophenyl)Ethylene by *Pseudomonas acidovorans* M3GY Grown on Biphenyl. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(6): 2141-2146
- [15] Lloyd, J., Nadeau & Fu-Min, M. Aerobic Degradation of 1,1,1-Trichloro-2,2-Bis(4-Chlorophenyl)Ethane (DDT) by *Alcaligenes eutrophus* A5. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 51-55
- [16] 宁波市质监局. DB3302/T039.3-2002. 安全卫生优质农产品: 竹笋第 2 部分生产技术规范 杭州: 浙江出版社, 2002.
- [17] Agarwal, H., Singh, D., Sharma, V. Persistence, metabolism and binding of p,p'-DDT in soil in Delhi, India. J Environ Sci Health, 1994, 29, 73-86
- [18] Kelce, W., C. Stone. Persistent DDT metabolite p,p'-DDE is a potent androgen receptor antagonist. Science of The Total Environment, 1995, 375, 581-585
- [19] PG. Rieger., HM, M. & Gerle M, V. Xenobiotics in the environment: present and future strategies to obviate the problem of biological persistence. J Biotechnol, 2002, 94, 101-123
- [20] 孙立波, 郭观林, 周启星等. 某污灌区重金属与两种持久性有机污染物(POPs)污染趋势评价. 生态学杂志, 2006, 25(1): 33-37
- [21] 魏树和, 周启星. 有机污染环境植物修复技术 生态学杂志, 2006, 25(6): 122-127
- [22] 尤民生, 刘新. 农药污染的生物降解与生物修复. 生态学杂志, 2004, 23(1): 73-77

安吉县毛竹林叶面积指数空间分布研究

范渭亮 周国模* 杜华强 徐小军 董德进

(浙江林学院, 杭州, 311300)

摘要: 应用地统计学方法分析浙江省安吉县毛竹林叶面积指数的空间异质性及空间相关性, 并基于以上分析对安吉县境内的毛竹林叶面积指数进行克里金插值, 最后得到安吉县叶面积指数分布图。本研究主要结论有: 安吉县毛竹林的叶面积指数可以用 Gaussian 模型拟合。叶面积指数变化的相关半径为 54317m。安吉县叶面积指数的变异性在空间上具有较强相关性, 同时具有较强的空间自相关性。克里金插值的结果显示安吉县毛竹林的叶面积指数分布总体呈由西向东、由南向北逐渐减少的趋势。本研究为毛竹林叶面积指数的反演方法提供新思路。

关键词: 毛竹林; 叶面积指数; 空间统计

A Study of the LAI Spatial Distribution of Moso Bamboo in Anji Country

FAN Wei-liang, ZHOU Guo-mo, DU Hua-qiang, XU Xiao-jun, DONG De-jin
(Zhejiang Forestry University, Hangzhou, 311300, China)

Abstract: Based on the Geo-statistics method, we analyzed the spatial heterogeneity and spatial correlation on the leaf area indices (LAI) of *Moso* bamboo forest in Anji country, Zhejiang province. The *Moso* bamboo LAI which was located in Anji country were interpolated using Kriging method. Then the LAI distribution map of Anji country was made. The results indicated that the Gaussian model fit the LAI better, and the correlation radius changes of the LAI is 54317 meters. The LAI heterogeneity has a strong correlation in the spatial distribution and has the strong correlation in the spatial autocorrelation. The results of Kriging interpolation indicated that the LAI gradually reduced from the west to the east, from the south to the north. This study provides new ideas of *Moso* bamboo leaf area indices inversion method.

Key words: *Moso* bamboo forest; Leaf area indices; Geo-statistics

1 引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)一般被定义为单位面积柱体内叶子表面积的一半^[1]。叶片作为光合作用的基本器官, 在光照条件下发生光和作用, 产生植物干物质的积累, 随着叶面积的增大,

基金项目 国家自然科学基金(30700638, 30771715), 国家林业局‘948’项目(2008-4-49), 国家 863 项目(2006AA12Z104) 和浙江科技厅重点项目(2451012025,2008C12068)。

***通讯作者** E-mail zhougm@zjfc.edu.cn

植被生物量也增大。可见，叶面积指数是植被生物量反演的主要参数之一^[2]。叶面积指数可以用来反映植物叶面数量、冠层结构变化、植物群落生命活力及其环境效应，为植物冠层表面物质和能量交换的描述提供结构化的定量信息，并在生态系统碳积累，植被生产力和土壤、植物、大气间相互作用的能量平衡等方面其重要的作用^[3-6]。目前，叶面积指数的测定主要有三种方法，分别是直接测定法、仪器测定法和遥感测定法。直接测定法可靠程度最高，但这是一种破坏性的方法，并且费时费力。仪器测定法具有简便快速的优势，但不同仪器应用的范围不同，需要根据测量的冠层选择合适的仪器。遥感测定法可以大面积迅速的获取冠层信息，但受大气条件的影响较大。

地统计学是研究空间格局的一种新工具^[7]。由于地统计学能够较准确的描述区域化变量的随机性和结构性变化，能定量分析环境或生物变量的空间异质性，因而越来越受到重视，相关应用越来越多^[8]。地统计学已经由采矿学、地质学领域逐渐向土壤、水分、气象、环境、生态学领域发展^[7,9-12]。

竹林是中国重要的森林资源，毛竹林是其主体部分，约占竹林总面积的 70%^[13]。另外，毛竹林资源具有巨大的生物量及碳储量，在森林生态系统二氧化碳减量及对全球碳平衡的贡献方面有重要作用。毛竹林叶面积指数是指单位面积上毛竹的叶面积总和与土地面积之比值。毛竹林叶面积指数大，叶量多，单位面积光能利用率高，产量也高；相反，叶面积指数小，叶量少，单位面积光能利用率低，产量也低。光能利用率虽然随着毛竹林叶面积的增加而增加，但并不是无限增加，当达到一定限度后，光能利用率不仅不再增加，反而开始下降。这是由于叶面积指数增加到一定数值后，叶子太多太密，而使下部的叶子得到不正常光合作用所需光照，光合作用无法进行，而呼吸作用照常进行，这样就消耗植株中的营养积累，使有机物质的积累反而减少。获取区域内的叶面积指数，可以应用到森林生产力的估算、森林生物量的计量和植被碳储存等方面。本文应用地统计学的方法研究浙江省安吉县毛竹林的叶面积指数的空间分布，为毛竹林叶面积指数的反演方法提供新思路。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

研究区域位于浙江省西北部的安吉县境内(图 1)。地处东经 119°14'~119°53'、北纬 30°23'~30°53'之间。全县森林覆盖率达 69.4%，拥有山林 13.2 万 ha，其中竹林面积 6.7 万 ha，占有林地面积的 38%左右，丰富的竹林资源为本研究提供了良好的区位条件。

2.2 毛竹林样地调查方法及叶面积指数计算

外业样地调查于 2008 年 8 月下旬到 9 月初完成。共调查 55 个 30m×30m 的毛竹纯林样地。通过每木检尺获得样地内毛竹的胸径和株数。在样地调查的同时对样地中心点进行 GPS 手持机单点定

位。

样地毛竹叶面积指数采用公式(1)计算^[14]。该模型的相关系数 $R=0.91$ ，符合叶面积指数估算精度要求。

$$LAI = 0.007358 \cdot N^{0.9668} \cdot D^{0.7372} \quad (1)$$

其中：LAI 表示叶面积指数、D 表示胸径、N 表示样地内毛竹株数。

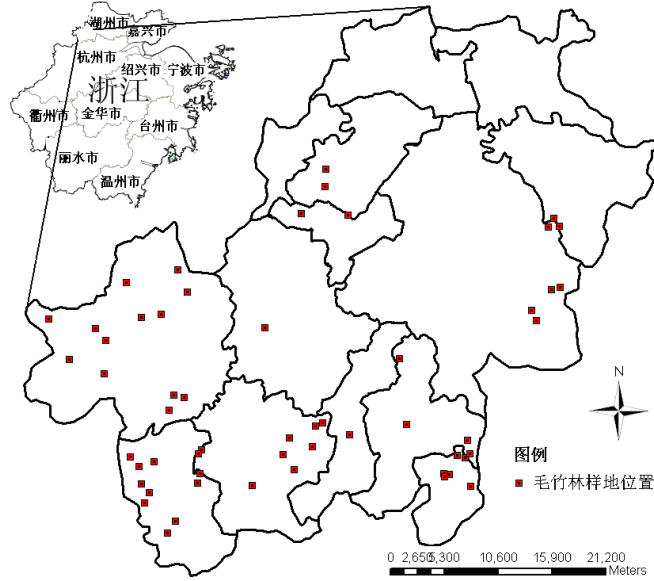


图 1 毛竹林样地位置

Fig.1 The location of the *Moso* bamboo plots

2.3 地统计学

地统计学是一种空间统计学，它是以区域化变量(regionalized variable)为基础，以变异函数为主要工具，研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性或空间相关和依赖的自然现象的科学。半方差分析(semi variance)和空间局部优化插值(克里格插值, Kriging interpolation)是地统计分析的两大主要功能。

区域化变量定义为空间点 x 的三个直角坐标 x_u, x_v, x_w 为自变量的随机场 $Z(x_u, x_v, x_w) = Z(x)$ ^[15]，本研究中 x_u, x_v 为样地的纵横坐标， x_w 为叶面积指数。区域化变量的半方差函数为 2 式。

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

其中， $\hat{\gamma}(h)$ 为半方差 $\gamma(h)$ 的估计值，并且是 $\gamma(h)$ 的无偏估计； h 为样本间距，又称为滞后距离、

分离距离； $N(h)$ 是间距为 h 的样本对； $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 是区域化变量 $Z(x)$ 在点 x_i 和 $x_i + h$ 上的值。

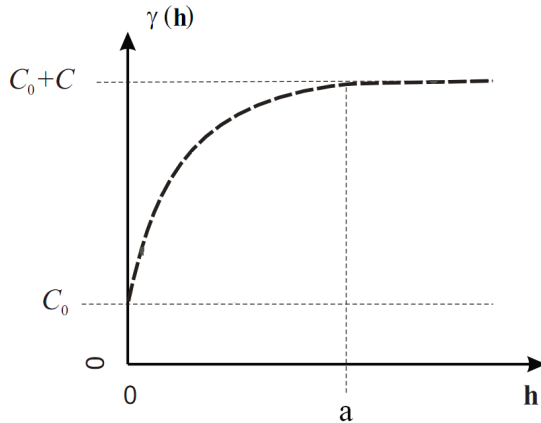


图 2 半方差图
Fig.2 Semi-variance model

把以半方差 $\gamma(h)$ 为 y 轴、滞后距离 h 为 x 轴所绘的曲线称为半方差图(Semi- semivariogram) [7,16]，如图 2。半方差图可以通过球状模型、指数模型、高斯模型、线性有基台模型、纯块金效应模型、幂函数模型、线性无基台模型、抛物线模型等理论模型进行模拟。模型参数包括基台、变程和块金常用于区域化变量空间异质性分析[7,15-18]。

基台 (sill) 是区域总的变化性信息，一般是最大的 $\gamma(h)$ 值，如图 2 所示的 $C_0 + C$ 。其中 C 是称为结构方差(structural variance)，它表示由空间自相关部分所引起的空间异质性。变程(range)是半方差达到基台时采样点间的距离，如图 2 中的 a 。它反映区域化变量影响范围的大小，或变量在空间上自相关性的尺度。在变程以内($h \leq a$)，区域化变量是空间自相关的；超过变程 (即 $h > a$)，空间自相关不存在；块金(nugget variance or nugget)是采样误差和小尺度(小于最小采样距离)上的变异，如图 2 中的 C_0 ，它反映随机部分所引起的空间异质性，如果随机部分引起的空间异质性比重大，那么在小于抽样尺度上的某种过程(如生态学过程)不容忽视。

2.4 分形维数

与半变异函数的几个特征参数一样，空间变异程度也可以用分形维数来表征，分维数 D_0 可以用半方差函数中的 h 和 $\gamma(h)$ 之间的关系确定^[19]。 D_0 由 3 式计算：

$$D_0 = \frac{4 - m}{2} \quad (3)$$

其中 m 为 $\log \gamma(h)$ 与 $\log h$ 用最小二乘法进行线性回归得到的回归直线的斜率。当 $D_0=2$ 时, $m=0$, 此时双对数半方差图是水平的, 它表明在统计学意义上所有的尺度间隔样点间的差异性都相同, 即在所有的研究区域内是同质的, 所以, D_0 越小于 2, 即 m 越大, 双对数半方差图的直线越陡, 说明不同尺度上生态因子场的差异性越大。

3 结果与分析

3.1 毛竹林叶面积指数的统计分析及其正态性检验

由于原始数据的非正态分布会使半方差图产生畸变, 严重时甚至会掩盖其固有的结构^[11,12,15,20]。因此, 在进行地统计学分析前, 为了保证分析结果的可靠性, 经常需要对数据进行正态分布检验。对于非正态分布数据, 经常采用对数变换、平方根变换、Box-Cox 变换、反正弦变换等对原始数据进行处理, 使其达到正态分布或近似正态分布^[21]。

从表 1 可知, 安吉县毛竹林叶面积指数空间分布变异相对较小, 仅为 24.3%。经 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验表明, 原始数据满足正态分布, 因此, 可以直接用于毛竹林叶面积指数的空间异质性分析。

表 1 原始数据基本统计量和正态性检验

Table1 Descriptive statistics and Kolmogorov-Smirnov test for normality of the raw data

观测数 Number	变量 Var	平均 Mean	标准差 SD	变异系数 Cv(100%)	最小值 Min	最大值 Max	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	KS 值 KS_value	KS p
55	LAI	9.1847	2.232	24.3	5.0266	15.44	0.6003	3.592	0.091	>0.01

3.2 毛竹林叶面积指数空间异质性及空间相关性分析

半方差分析要求 h 为最大采样间距的 1/3 或 1/2 内才具有统计意义, 同时步长要求不小于最小采样间距^[12]。根据调查的毛竹林样地分布情况, 图 1 中 55 个样地最大间距为 51125m, 最小间距为 361.8m, 平均间距为 1704.5m。本研究采用地统计学分析时, h 的变化范围取最大最小间距的一半(即 25562m), 而步长取平均距离, 即 1704.5m。

表 2 等方向叶面积指数半方差函数理论模型及参数

Table2 Isotropic LAI Semivariogram models and its parameters

变量 Var	模型 Model	块金 Nugget	基台 Sill	变程(米) Rang(m)	空间结构比 C/(C ₀ +C)	决定系数 R ²	残差 RSS
LAI	Gaussian	2.62	9.249	54317.1133	0.717	0.782	4.38

图3 为安吉县叶面积指数半方差函数图，表2 为叶面积指数的理论模型模拟结果，叶面积指数可用高斯模型拟合(Gaussian Model)。模型决定系数、残差和及模型参数如表2 所示。

块金方差 C_0 为 2.62, 反映了在最小取样距离之内由叶面积指数的变异性及测量误差所引起的系统误差^[16,22]。参数 C 反映了叶面积指数在整个区域内的分布均匀特性, C 越大, $\gamma(h)$ 坡度越大, 叶面积指数分布越不均匀, 其大小可以反映安吉县叶面积指数变程范围内变异的程度。变程主要反映叶面积指数取样点之间的空间相关性, 安吉县境内叶面积指数空间变化的相关半径为 54317m, 超出这一范围, 则叶面积指数变化的相关性很小。本研究中, 毛竹林叶面积指数空间结构比 $C/(C_0+C)$ 等于 0.717, 大于 70%, 说明安吉县叶面积指数的变异性在空间上具有较强相关性。安吉县叶面积指数具有较小的块金值, 占总方差的 28%左右, 说明本研究中毛竹林的叶面积指数具有较强的空间自相关性, 可以进行空间差值。

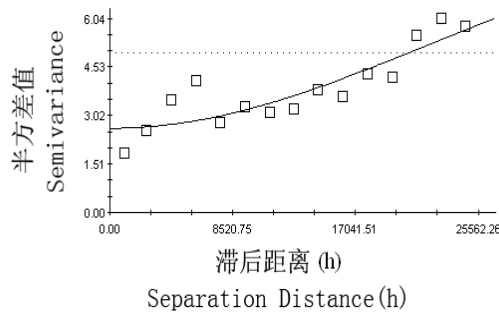


图3 安吉县毛竹林叶面积指数等方向半方差函数理论模型
Fig.3 Isotropic semivariograms models of LAI and its spatial fractal dimensions

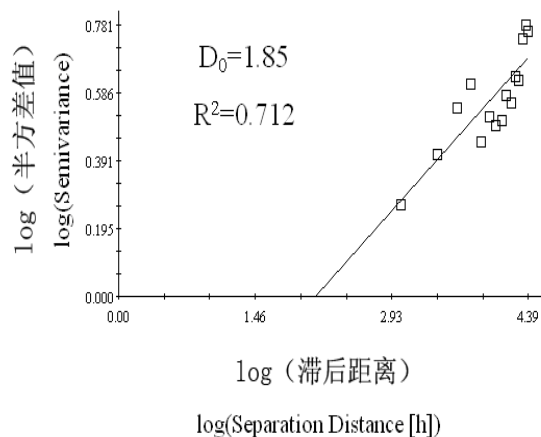


图4 安吉县毛竹林叶面积指数空间格局分形维数
Fig.4 *Moso* bamboo LAI spatial fractal dimensions in Anji Country

分形维数从另一个方面揭示叶面积指数空间分布特征和格局。分形维数表明了小尺度范围内毛

竹林叶面积指数的波动程度，同时，分形维数越大，随机性因素强，结构性差，空间格局相对复杂^[19]。本研究中毛竹林叶面积指数的分形维数为 1.85，说明毛竹林叶面积指数样本之间的变异较小，趋向于同质的森林。但在样本尺度上来看，叶面积指数组成的随机性因素较强，结构性差，空间格局相对复杂。

3.3 安吉县毛竹林叶面积指数空间分布

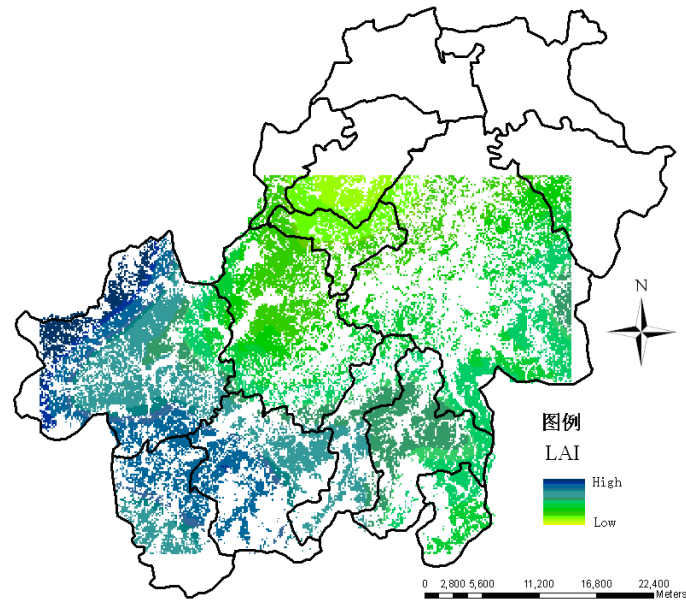


图 5 安吉县毛竹林叶面积指数空间格局

Fig.5 Spatial patterns of the Lai of *Moso* bamboo in Anji Country

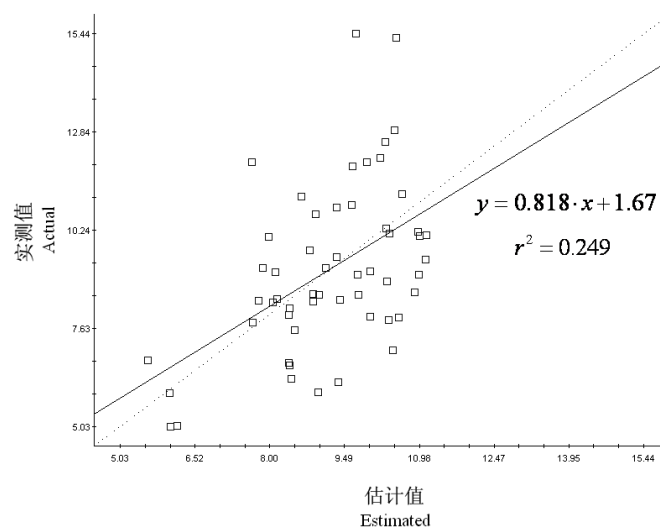


图 6 Gaussian 模型交叉检验

Fig.6 Gaussian model Cross validation

对 55 个毛竹林样地进行克里金差值得到了安吉县毛竹林叶面积空间分布格局图(图 5), 更加直观的揭示了叶面积指数的空间格局。由图 5 可以看出, 安吉县毛竹林的叶面积指数分布呈由西向东、由南向北逐渐减少的趋势。

如果克里金方法对样本的估计值是精确的, 则对数据集中任何一个样本 i ($i=1, 2, \dots, n$; n 为样本总数), 由其余 $n-1$ 个样本的观测值对该样本作出的估计值就应等于其观察值。这一性质给出了一种评价所选择变异函数模型优劣的方法, 即交叉验证(Cross Validation)。图 6 为由 Gaussian 模型计算出的估计值和观察值的回归曲线。预测的标准误差(Standard Error)0.195, 标准误差预测值(Prediction Standard Error)为 1.935。在 0.01 的水平上回归的相关系数是显著的。结果表明, 预测的结果是可信的。

4 结论与讨论

毛竹林是中国重要的竹林资源, 笔者应用区域化变量和克里金方法对浙江省安吉县的毛竹林叶面积指数的变化进行空间异质性分析, 并对叶面积指数在全县区域进行空间插值。主要结论有: 安吉县毛竹的叶面积指数可以用 Gaussian 模型拟合。叶面积指数变化的相关半径为 54317m。安吉县叶面积指数的变异性在空间上具有较强相关性同时具有较强的空间自相关性。通过对分形维数的计算可以看出毛竹林叶面积指数样本之间的变异较小, 是趋向于同质的森林。全县毛竹林叶面积指数的克里金空间插值结果比较理想, 表明该县叶面积指数空间分析的克里金方法的可行性。克里金插值的结果显示安吉县毛竹林的叶面积指数分布总体呈由西向东、由南向北逐渐减少的趋势。

通过对安吉县毛竹林叶面积指数的地统计学分析, 增加了对毛竹林生态系统叶面数量空间分布的认识, 从另一个方面也反映了毛竹林的冠层结构、群落生命活力以及毛竹林生态系统碳积累的定量信息。

参考文献

- [1] Chen J M, Pavlic G, Brown L, *et al.* Derivation and validation of Canada wide coarse resolution leaf area index maps using high resolution satellite imagery and ground measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 80: 165-184
- [2] 陈晓玲. 环境遥感模型与应用[M], 武汉大学出版社, 2008
- [3] 巩合德, 杨国平, 张一平, 等. 哀牢山 4 类植物群落叶面积指数比较[J]. *东北林业大学学报*, 2007, 35 (3) : 34-361
- [4] 王希群 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (5): 537-541
- [5] 王希群, 马履一, 张永福. 北京地区油松、侧柏人工林叶面积指数变化规律[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1486-14891
- [6] 关德新, 吴家兵, 王安志, 等. 长白山红松阔叶混交林冠层叶面积指数模拟分析[J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (3): 499-503
- [7] 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用(I)- 基本理论和方法[J]. *东北林业大学学报*, 1995, 23(2):

- [8] 余昊, 邵强, 王运兵, 等. 新疆和田地区春尺蠖种群空间格局动态分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 334-338
- [9] 潘文斌, 邓红兵, 唐涛, 等. 地统计学在水生植物群落格局研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1692-1696
- [10] 王晓春, 韩士杰, 邹春静, 等. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 781-784
- [11] 孙志虎, 王庆成. 采用地统计学方法对水曲柳人工纯林表层根量的估计[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 923-930
- [12] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 514-520
- [13] 张刚华, 聂洁珠, 萧江华. 毛竹种群空间格局的地统计学分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 136-141
- [14] 陈存及. 毛竹林分密度效应的初步研究[J]. 福建林学院学报, 1992, 12(1): 98-104
- [15] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [16] Villard M A, Maurer B A. Geostatistics as a tool for examining hypothesized declines in migratory songbirds [J]. Ecology, 1996, 77(1): 59-68
- [17] De Jong S M, Pebesma E J, Lacaze B. Aboveground biomass assessment of Mediterranean Forests using Airborne Imaging Spectrometry: the DAIS Payne Experiment [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (7):1505-1520
- [18] Zawadzki J, Cieszewski C J, Zasada M, Lowe R C. Applying geostatistics for investigations of forest ecosystems using remote sensing imagery [J]. Silva Fennica, 2005, 39(4):599-617
- [19] 李爽, 等. 基于分形的DEM数据不确定性研究[M]. 科学出版社, 2007
- [20] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. Environmental Pollution, 2004, 127:239-248
- [21] 施舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [22] 邬建国. 景观生态学—结构、过程、尺度和等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000

浙江省安吉县竹产业发展分析1

魏彬 杨校生 吴丹丹

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳, 311400)

摘要 竹产业是安吉县的主要产业, 近十年来得到了迅速的发展。本文分析了安吉竹产业现状的基础上, 借鉴产业发展和主导产业选择理论, 利用灰色关联度分析和回归分析对安吉县竹产业结构进行了分析, 以了解安吉竹产业结构发展状况以及存在的问题。最后提出了相应的对策和建议, 以便推动安吉的竹产业结构的优化和升级。

关键词 竹产业; 结构优化; 建议; 安吉

Analysis on Industry Development in Bamboo Sector in Anji County of Zhejiang Province

Wei bin, Yang xiaosheng, Wu dandan

(Research Institute of Sub-tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: The bamboo sector, a leading industry in Anji County, has been developed rapidly recently. The paper deals with the development of the bamboo sector and the structure change in Anji by using gray relation analysis and regression analysis to understand the status of bamboo sector and its problems and challenges. Finally, some suggestions and recommendations are put forward to optimize and improve the structure of bamboo sector in Anji County.

Key words: bamboo sector; structure optimization; suggestion; Anji County

产业发展不仅包含产出总量的增长, 而且包含产业由低层次向高层次的转换, 即产业结构的升级。产业结构升级包括三种类型: 产业部类之间的升级调整、产业部类内的调整、行业内部调整。对于产业发展中的产业结构优化仍没有统一的定义^[1-3], 本文认为产业结构的优化意味着产业结构的合理化和高度化, 它主要体现在产业的高附加值化、高技术化、高集约化和高加工度化。我国学者结合区域经济发展和产业结构调整等问题, 对区域主导产业的选择进行了大量有益的探索, 主导产业选择的方法有很多^[1-5], 本文采用灰色关联分析法作为选择方法。

基金项目 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目“浙江森林资源经济利用与LCA综合评价”(2008SY09)

安吉县是浙江竹子生产大县，安吉竹产业近十年来得到了迅速的发展，从 2001 年到 2008 年，安吉县竹产业总值从 33 亿元到 108 亿元，约占全国竹产业总产值的 15%，由此可见安吉竹产业的发展对我国竹产业发展有着重要的影响。很多学者已对安吉的竹产业进行了分析^[1-2]，探讨了竹产业发展存在的问题和对策。本文从安吉竹产业内主要产业的选择和产业结构的变化调整来分析安吉竹产业结构的变化和发展过程，以完善和优化安吉竹产业结构，促进竹产业的发展。

1 安吉竹产业现状

浙江省安吉县地处浙江北部山区，位于长江三角洲经济圈的腹地。全县总面积 18886 平方公里，人口 45 万，其中农业人口占 80%。安吉县是浙江省重点林区县，以盛产毛竹闻名于世。1996 年被林业部评为“中国竹子之乡”。2008 年，安吉县竹林面积 108 万亩，其中毛竹林面积达 86 万亩，毛竹总蓄积量 1.7 亿株，年产鲜笋 4.5 万吨，产商品毛竹 2800 万株，小杂竹 10 万吨。2008 年，安吉县竹产业总产值达 108 亿元，为农民人均增收 6500 元，占农民人均纯收入的 63%。

安吉县的竹、笋制品加工业发展迅速，现有笋竹产品及配套生产企业近 2000 家，其中规模企业 153 家，提供就业岗位 2.5 万个，年加工毛竹材达 1.5 亿株，外省、外县购入约 1.2 亿株，安吉已成为全国最大竹材加工集散地。目前已形成竹凉席、竹窗帘、竹胶板、竹机械、竹纤维等七大系列 3000 余个品种，产品销往港台、东南亚、欧美等 30 多个国家和地区。近几年，竹产业内出现了一些新型的产业，比如竹黄酮、竹纤维等。但相比较而言，传统的行业比如竹笋、竹材、竹地板、竹胶合板材以及竹凉席、竹帘等，在竹产业总产值中占有的份额仍然比较大。2008 年竹产业加工产值达到 92 亿元。

竹产业的发展带动了旅游、交通等相关第三产业行业的发展，以竹为特色的森林生态旅游快速发展。2008 年，竹乡森林旅游全年接待游客 501 万人次，旅游收入 19.1 亿元，门票收入 7160 万元。

2 竹产业结构的灰色关联度分析

2.1 分析方法

2.1.2 数据标准化

由于系统中各因素的物理意义不同或计量单位不同从而导致数据的量纲不同。不同的量纲、不同数量级之间不便比较，或者难以得到正确的结果。为了便于分析就需要在各因素进行比较之前对原始数据进行初值化处理。对一个数列的所有数据均用它的第一个数去除从而得到一个新数列的方法称为初值化处理。

设原有数列 $x^{(0)}(i) = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$

对 $x^{(0)}(i)$ 进行初始化处理后得到 $x^{(1)}(i)$, 既得:

$$x^{(1)}(i) = \left(\frac{x^{(0)}(1)}{x^{(0)}(1)}, \frac{x^{(0)}(2)}{x^{(0)}(1)}, \dots, \frac{x^{(0)}(n)}{x^{(0)}(1)} \right) \\ = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

2.1.2 灰色绝对关联度

设有行序列分别为 $X_0 = (x_0(n_1), x_0(n_2), x_0(n_3), \dots, x_0(n_p))$,

$X_i = (x_i(m_1), x_i(m_2), x_i(m_3), \dots, x_i(m_q))$, 其中 $n_1, n_2, \dots, n_p \in N$, $m_1, m_2, \dots, m_q \in N$,

$n_1 = m_1 = 1$, $n_p = m_q = n$, 其原始零化像分别为 $X_0^0 = (x_0^0(n_1), x_0^0(n_2), x_0^0(n_3), \dots, x_0^0(n_p))$,

$X_i^0 = (x_i^0(m_1), x_i^0(m_2), x_i^0(m_3), \dots, x_i^0(m_q))$, 则 X_0 和 X_i 得广义绝对灰色关联度为

$$\xi_{0i} = \frac{1 + |S_0| + |S_i|}{1 + |S_0| + |S_i| + |S_i - S_0|}$$

其中 $|S_0| = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^p [x_0^0(n_{k-1}) - x_0^0(n_k)](n_k - n_{k-1})$, $|S_i| = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^q [x_i^0(m_{k-1}) - x_i^0(m_k)](m_k - m_{k-1})$

2.2 安吉竹产业灰色关联度分析

表 1 为竹产业内子产业产值, 包括毛竹材、竹胶合板、竹凉席及鲜笋等产值, 以分析与整个竹产业之间的关联度的大小, 同时找出影响度最大的子产业最为竹产业主要的子产业。

表 1 竹业内各产业指标变化情况

Table 1 changes of indicators of bamboo industries

年份 \ 项目	竹业总产值 X_0 (亿元)	笋产值 X_1 (亿元)	竹材产值 X_2 (亿元)	竹胶板产值 X_3 (亿元)	竹凉席、竹帘产值 X_4 (亿元)
1991	4.6	0.4	1.0	0.2	1.5
1996	9.6	0.7	1.3	0.3	5.5
2001	32.0	1.5	2.0	2.2	18.2
2004	46.0	2.1	6.6	8.0	20.0
2008*	108.0	2.7	8.3	18.7	39.3

数据来源: 安吉县林业局

*2008 年的系列数据 (包括表 1 和表 3 的数据) 根据安吉县的三次产业比例、各种产品产量的增长速度、竹产业总产值推算而得到一个概数, 可以反映安吉竹产业的发展情况。

根据公式计算结果： $\xi_{o1}=0.52$ ； $\xi_{o2}=0.55$ ； $\xi_{o3}=0.59$ ； $\xi_{o4}=0.70$ 排序结果： $\xi_{o1} < \xi_{o2} < \xi_{o3} < \xi_{o4}$ 。由上可见竹凉席、竹帘对竹业总产值的关联最大，关联度为 0.70。第二是竹胶合板的关联度为 0.59，第三是竹材产值的关联度为 0.55，对竹产业影响最小的是竹笋产业，关联度仅仅为 0.52。

从绝对值相比较来看，其中竹凉席和竹帘的影响度为 0.70，居于首位，从中可以看出对于竹产业来说，竹凉席和竹帘的影响度是最大的，而且竹凉席、竹帘在安吉是发展最早的产业之一，其占竹业总产值的比重也是最大。因此，竹凉席、竹帘产业目前还是安吉县竹产业的主要子产业。

从关联度的大小差别来看，其他三个关联度之间的大小差别不是非常大。竹胶板对竹业总产值的关联度为 0.59，高于其他两个子产业，比竹凉席和竹帘的影响度要低。但是安吉的竹地板产业发展相当快，相比之下，竹胶合板的增长率比竹凉席、竹帘要高。竹材产值对竹业总产值的关联度为 0.55，相比之下略高于竹笋产值对竹业总产值的关联度为 0.52。

竹笋产值对竹业总产值的关联度是这些传统子产业中最低的，这并不是说明竹笋产业不重要。相反，竹笋产业对于安吉县农村的一些农民来说，竹笋的收入是其收入的主要来源。由于安吉县生态旅游产业的发展，使从事第一产业的人慢慢的向第三产业进行转移，影响了竹笋产值增长的速度。

3 竹产业结构优化分析

3.1 竹产业三次产业的特征

安吉县竹产业在国内是比较典型的案例，它的竹产业结构变化及优化在一定的范围内体现了国内整个竹产业结构的状况。

从安吉县竹产业的发展过程来看（见表 3），竹产业总体结构已得到明显改善，第一产业在整个竹产业中比重从 1990 年到 2008 年下降了 24%，；第二产业在竹产业中比重略增加了 5.4%，一、二产业比例从十年前 1：1.88 调整到 1：6.52，三产从无到有得到了快速发展。

从第二产业内部来看，竹凉席、竹帘所占比重较大，但有下降趋势，竹胶板及竹地板的比重有上升的趋势。从安吉县笋竹制品对外贸易统计（见表 4）中来看，第二产业内部结构有所改善，2001 年出现了一些技术含量比较高的产品，比如竹碳和竹黄酮，它们的产值达 0.1 亿元。竹地板和竹胶板产值增加幅度较大，从 1996 年的 0.2 亿元增加到 2001 年的 1.0 亿元。

从竹产业的三次产业产值变化（见图 1）来看，第二产业的产值增长幅度大，特别是从 1996 年之后，显示出强劲的增长势头。安吉县竹业加工发达，制造业到达了一定的规模经济，形成竹产业集群现象，在一定范围内可以共享和交流竹产业发展的各项信息，从而进一步促进竹产业的发展。竹产业集群现象促进了安吉县制造业的发展，同时也带动了第三产业的发展。根据安吉林业部门的

统计，2008年，安吉县竹产业内第三产业的产值超过第一产业的产值（见图1）。由此可见，竹产业内第一产业的总产值逐年增加，但在竹业总产值的相对比例中呈现出下降趋势，第二产业和第三产业的发展速度要略快，总体上来看竹产业内第二产业还是占主导地位。

表2 安吉县竹产业产值进展统计 单位：亿元

Table 3 changes of the output value of bamboo industry in Anji Unit: billion

项目	1991年		1996年		2001年		2008	
	产值	比重%	产值	比重%	产值	比重%	产值	比重%
总计	4.6		9.7		33.0		108.0	
一产	1.6	34.8%	2.3	23.7%	4.0	12.1%	11.7	10.8%
其中：笋	0.4	8.7%	0.7	7.2%	1.5	4.5%	2.7	2.5%
竹材	1.0	21.7%	1.3	13.4%	2.0	6.1%	8.3	7.7%
副产	0.2	4.3%	0.3	3.1%	0.5	1.5%	0.7	0.6%
二产	3.0	65.2%	7.3	75.3%	27.4	83.0%	76.3	70.6%
其中：水煮笋	1.0	21.7%	1.2	12.4%	1.4	4.2%	2.2	2.0%
竹凉席、竹帘	1.5	32.6%	5.5	56.7%	18.2	55.2%	39.3	36.4%
竹胶板	0.2	4.3%	0.3	3.1%	2.2	6.7%	18.7	17.3%
其它加工	0.2	4.3%	0.3	3.1%	5.6	17.0%	16.1	14.9%
三产			0.1	1.0%	1.6	4.8%	20.0	18.5%

数据来源：安吉县林业网

表3 安吉县笋竹制品对外贸易统计表

Table 3 statistics on the foreign trade of bamboo products

项 目	1991年	1996年	2001年
出口交易总值（亿元）	0.9	2.65	5.9
1、笋及制品	0.68	0.81	1.8
2、竹竿、竹材	0.05	0.3	0.5
3、竹席竹帘		0.4	1.1
4、竹编及工艺品	0.02	0.3	0.5
5、竹家俱及生活用品		0.34	0.5
6、竹地板、胶合板		0.2	1.0
7、竹扫帚	0.15	0.3	0.4
8、竹炭、竹叶黄酮			0.1

3.2 竹产业回归分析

三次产业产值的绝对数值、相对数值及其占总产值的比例确定了一个地区产业结构的现状，它们的演替变化反映了一个地区产业结构的变化，也反映了该地区的经济发展情况。从另一个角度来看，我们可以用某个产业总产值变动量带动该产业内三次产值的变动量来衡量产业与三次产业之间的关系，从而明确产业结构调整的方向。

我们用安吉县竹产业总产值和竹产业内三次产业相应产值进行回归分析来明确竹产业总产值变动的百分比所带来的影响。竹业总产值及三次产业产值的原始统计数据，如表 5。

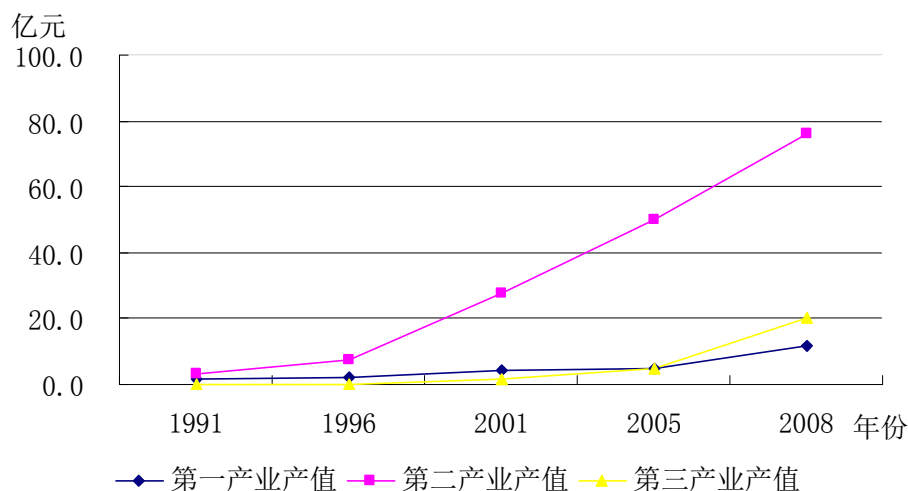


图 1 安吉县竹产业三产产值变化

Fig 1 changes of output value of three industries of bamboo industry in Anji county

表 5 1991-2008 年安吉县竹业产值变化

Table 5 changes of output value of bamboo industry in Anji

年份 产值	1991	1996	2001	2005	2008
竹业总产值	4.6	9.7	33.0	60.0	108.0
第一产业产值	1.6	2.3	4.0	5.0	11.7
第二产业产值	3.0	7.3	27.4	50.0	76.3
第三产业产值	0.0	0.1	1.6	5.0	20.0

用 X 代表安吉县竹产业总产值， Y_1 代表第一产业的产值， Y_2 代表第二产业的产值， Y_3 代表第三产业的产值。分别用 Y_1 ， Y_2 ， Y_3 对 X 进行逐步回归，得到如下方程：

1) 竹产业总产值和第一产业产值之间的关系

$$Y_1 = 0.9356 + 0.0925X$$

$$R = 0.9759; \text{ t 检验值} = 7.7449, \text{ p 值} = 0.0015; \text{ F} = 59.9837, \text{ p 值} = 0.0045$$

2) 竹产业总产值和第二产业产值之间的关系

$$Y_2 = 1.8852 + 0.7179X$$

$$R = 0.9939; \text{ t 检验值} = 15.6150, \text{ p 值} = 0.0001; \text{ F} = 243.8282, \text{ p 值} = 0.0006$$

3) 竹产业总产值和第三产业产值之间的关系

$$Y_3 = -2.8208 + 0.1895X$$

$R=0.9524$; t 检验值 $=5.4217$, p 值 $=0.0056$; $F=29.2976$, p 值 $=0.0124$

从以上的方程组中,可以看出 R 、 T 、 F 统计量都通过检验。所以从方程的数量关系中我们可以看到:当竹产业总产值变动 1%时,相对而言竹产业内第一产业产值变动为 0.0925%,第二产业产值变动为 0.7179%,第三产业的产值变动为 0.1895%。第二产业的变动弹性最大,第三产业次之,第一产业最小。从此可见当竹产业总产值增加时,对竹产业第二产业的辐射性最强,对第一产业的辐射性最弱。

从以上分析可以看出,安吉县竹产业第二产业代替第一产业成为了主导产业,第三产业迅速发展,使安吉县竹产业结构处在不断的升级当中。虽然竹产业第一产业产值绝对值在增加,但是同面临的几个县市相比,绝对优势已经不存在,这是由于工业和工艺加工用竹的基地建设滞后,政府和主管部门对竹林投入扶植近年明显减少,种植面积有限。第二产业产值增长幅度最快,是由于安吉县内竹笋加工民营企业多,总体加工规模大,已形成规模效应。安吉县的第三产业起步晚,但带有竹产业特色的生态旅游的发展势头比较好,比如以农家乐带动的餐饮业、住宿业发展比较快。

4 结论与讨论

安吉竹产业灰色关联度分析表明,随着竹产业的发展,新型领域的产品渐渐的扩大自己的市场份额,但传统加工产品(竹凉席、竹帘等)仍占据着重要的地位。而传统产品的精深加工不足,这影响了竹产业持续健康的发展。

安吉竹产业优化分析表明,安吉竹产业中以第二产业为主导产业,推动第二产业的发展将有效地带动安吉竹产业的发展,促进产业结构升级。安吉竹产业属于外向型,外向度近 80%,其中传统加工产品的出口在 90%以上^[1]。而传统产品整体科技和技术含量不高,升级换代缓慢,这最终将影响贸易额,限制第二产业产业发展。

安吉竹产业的第三产业发展快速,其产值和比重已超越第一产业,带动了整个安吉县产业结构的升级。但是竹产业对于第三产业的辐射性不高,主要原因是旅游服务业发展滞后,这将制约第三产业健康发展,限制第三产业的高级化发展,减缓产业升级的速度。

安吉县竹业增长主要还是依靠传统产业的发展,靠资金、劳力和设备更新投入,靠科技投入带来的增效还不足,这与安吉县竹产业的地位很不相称。因此,安吉竹产业结构的升级与优化,还应采取以下对策措施。

1) 提升竹林经营水平,加大力度进行竹林的现代生态经营、高效经营、无公害竹笋生产、优质竹材定向培育等的研究。扩大先进技术的应用范围,竹林生产的新技术最少要达到 60%以上的覆盖率。这将使竹材供应增加,为竹业旅游提供良好的基础,促进二、三产业发展,推动竹产业升级。

2) 加大科技的投入,特别是竹产品中新精产品开发和加工工艺的提高,新型数控竹工机械开发等一些高新技术。要不断提高产品质量档次,缩短产品开发周期,促进产品升级换代,竹产品从单纯的物理应用拓展到物理化学并举。同时把资源密集型、劳动密集型产业转移到竹材、人力资源丰富,而价格相对较低的地区,完成低级产业的地区转移。这将使竹产业的领域更加宽阔,延伸产业链条,提高附加值,促进竹产业升级。

3) 针对旅游服务业存在的问题,安吉县要不断提高服务行业中的服务素质,服务意识,生态资源保护意识,营销方式和管理水平等。使第三产业内部结构更加合理,促进其健康发展,从而带动安吉竹产业不断升级。

安吉县的竹产业需要不断的进行竹产业结构的调整,不仅使竹产业内的第一、二、三产业的比值合理,而且也要促使产业内的结构更合理。

参考文献

- [1] 苏东水, 王国进. 论上海科技在西部大开发中的作用与策略[J]. 重庆商学院学报, 2000(3): 5-8.
- [2] 李红梅. 21世纪中国产业结构调整的战略选择[J]. 首都师范大学学报(社会科学版), 2000(6): 50-56.
- [3] 周振华. 证券市场与产业结构调整[J]. 财经研究, 1992(12): 9-13.
- [4] 茹少峰, 田真. 基于 DEA 模型的陕西省工业主导产业选择研究[J]. 西北大学学报 (哲学社会科学版), 2009, 39(2): 84-88.
- [5] 周国华, 唐承丽. 长沙市乡镇工业结构优化研究[J]. 农业现代化研究, 1998, 19(2): 125-128.
- [6] 曹骞, 苏鹏飞. 湖北民族地区产业结构的灰色关联度分析-以恩施州为例[J]. 湖北经济学院学报: 人文社会科学版, 2009, 6(1): 22-25.
- [7] 薛东前. 包头市主导产业群体的建立与发展[J]. 陕西师大学报: 自然科学版, 1995, 23(2): 93-96.
- [8] 易双云, 周曙光. 安徽省工业主导产业选择问题研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2008(19): 2-3.
- [9] 沈阳, 杨绍中. 浙江省安吉县竹子生态旅游发展思考[J]. 竹子研究汇刊, 2003, (22): 18-22.
- [10] 杨永年, 鲁春富. 安吉竹产业发展的三次跨越[J]. 林业科技开发, 2004, 18(2): 68-70.
- [11] 董敦义. 安吉竹产业逆境中谋发展[J]. 浙江林业, 2006(3): 26-27.

竹林现代化生态经营的理念与对策初探

吕玉龙 李雪 潘春霞

(安吉县林业局, 浙江安吉, 313300)

摘要 本文运用生态经济学的相关原理对竹林的现代化生态经营理念进行了论述, 结合我国竹林生态化经营现状及存在的问题, 对竹林未来的现代化生态经营提出了相关的措施, 希望对竹林的可持续经营提供一点理论和技术上的指导。

关键词 竹林; 生态经营; 可持续发展

Discussion on the ecological management concept and countermeasures of the modernized bamboo forests

LV Yu-long, YABG Shao-zhong, LI Xue-tao, PAN Chun-xia

(Anji Forestry Bureau, Anji, Zhejiang, 311300)

Abstract: This paper discusses the theory of ecological economics and its application on bamboo planting. Aiming at the current problems of bamboo ecological management in our country, the paper offers solutions of modern management, with the hope that it may provide some guidance on sustainable development of bamboo planting both in theory and technique.

Key words: bamboo; ecological management; sustainable development

竹子是世界上特有的森林资源, 常被誉为“第二森林”。中国作为世界上竹类资源最丰富的国家, 据历史文献资料记载, 对竹子的培育和利用已有 6000 多年的历史^[1]。近年来由于世界人口的剧增、工业的发展, 科学技术在推动人类社会进步的同时也对环境和森林资源造成了越来越大的破坏。特别由于人类对木质品的喜爱, 需求量持续增长, 从而导致了世界性森林资源的过量采伐, 天然林资源严重破坏, 可开采林木资源逐年减少, 从而使得世界木材供给总量锐减, 供需矛盾日益尖锐^[2]。自从上个世纪 80 年代世界上竹资源特别丰富的中国, 日本等国家重视了对竹资源的培育与开发以来, 人们对竹子的优良特性和开发价值得到重新认识, 且已被逐步推上生态环境建设和山区经济建设的历史舞台。竹子具有其他一般林木无法比拟的多重特点和优势, 发展竹资源、开发竹产业能把生态环境建设和产业开发有机结合, 在推进生态环境建设的同时推进产业建设和经济可持续发展。在贫困山区, 发展竹子对解决其环境问题、贫困问题和社会发展问题将具有特殊的意义。因此探讨竹林现代化生态经营的理念与对策, 不仅对我国竹林未来的集约化高效经营具有十分重要的意义,

而且在增加农民收入，解决“三农”问题，推进我国 21 世纪林业生态化建设方面都将起到非常重要的作用。

1 竹林现代化生态经营的含义

竹林的现代化生态经营就是运用工业、现代化科学技术、现代化的森林经营管理方法来经营竹林，将低产出、低效益、自给自足、封闭式的传统竹林改造成高产出、高效益、市场化的开放式现代竹林过程，把经济系统纳入生态系统中加以考以考虑，提倡一种动态稳定经济，既不破坏环境，又不滥用竹类资源，保持竹林生产长久的持续发展。积极采取合理使用和维护竹类资源的方式，并实行技术创新，以确保人类及其后代对竹类资源和产品需求能不断得到满足。通过科学培管资源、综合利用资源、理顺竹业市场来实现竹产业可持续发展的 3 个目标，即积极增加资源总量，既自给自足、又要考虑资源输出；综合利用资源，开展多种经营，增加农民收入；合理利用和保护竹类资源，为其创造良好的生存环境，以利于子孙后代需求和发展的长远利益。

2 竹林现代化生态经营的原则

2.1 坚持可持续发展的原则

在竹资源承载能力和环境容量许可的前提下，促进人类对竹资源的开发利用与竹子的生长繁育在时间、空间、数量、结构及功能关系上的可持续发展，实现从自然经济的林业社会、市场经济向生态经济的可持续发展社会过渡。坚持开发利用与保护发展相结合的原则，既要发展经济，又要保护生态环境，既要开发利用又要保证竹林面积的大幅度增长和质量的大幅度提高，作到良性循环，永续利用。

2.2 开放性原则

竹林现代化是一个系统工程，它不仅包含生态系统物质和能量的利用与转换，而且包含着与其他产业、行业等多种物质形态与非物质形态的渗透与交融。若生态系统越封闭，则废弃物越少，利用程度越高；而产业发展越开放，要素组合越合理，经济效益则越高。因此，要合理适度的对竹林进行开放性经营。

2.3 效益最大化原则

实现竹林综合效益最大化，一方面要把竹林生态系统创造的生态效益和社会效益有效地转化为经济效益，另一方面要追求系统内部自身产生的经济效益最大化^[3]。

3 竹林现代化生态经营中存在的问题

3.1 竹林培育经济效率低

我国竹林培育在发展的过程中由于各种因素的制约和影响存在着严重的经济效率低的问题。张敏新等^[4]在“竹材栽培的经济研究”中曾报道：江西省 1989—1998 林产品成本调查资料计算显示，江西省毛竹平均产值每百根 532.94 元，其中物质消耗成本占 30%，用工成本占 43%，税金占 5%，纯收入仅占 22%。虽然这几年竹林的经济效益在逐年提高，但按最大化效益计算，刨除天气因素、市场价格等因素的影响，目前绝大部分竹林亩产纯效益也只有 200~300 元。这与竹林现代化生态经营亩产经济效益上千元的目标相去甚远。

3.2 竹加工利用产值低

在对竹子的加工生产环节，竹产品大多均系单一产品，而且对竹子的加工只仅仅局限于对其的物理加工利用，且竹材的平均利用率在 30% 以下，甚至仅 10% 左右^[5]；即便是生产规模和精深加工一直走在全国前列的安吉，竹材加工利用率在 60~70% 以上的企业也只占少数。这表明，我国在对竹子的全株利用、化学性开发及深加工，精加工方面还缺乏研究。

3.3 竹林结构单一，土壤污染严重

近年来由于竹农一味追求经济效益，不断劈山造林，一方面造成了水土的流失，大面积的人工林纯林也破坏了森林生物的多样性；另一方面，由于加大了对竹林的施肥，造成了土壤的部分污染。

3.4 竹产业开发缺乏外延

随着工业的发展，人们对竹子的利用也不仅仅再局限于只对竹子本身的一般利用，各类不同的竹制品加工提高了竹子再利用的经济价值。但我们发现人类对竹子的旅游开发及竹文化内涵的挖掘还没有充分的认识。缺少对竹林生态价值服务功能的提升与开发。

4 竹林现代化生态经营措施

4.1 科学管理，实行分类经营

按照竹林的可持续发展原则，我们对竹林的经营应通过实施分类经营，发挥竹林最大自然生产力，提高单位投入的经济产出。竹农可根据市场、立地条件和生产条件等综合因素，对竹林开展多类型的分类定向培育（现代竹林的定向培育类型一般分为笋用林、笋材两用林和材用林三大类型）。

通过采用先进的经营技术和管理手段（如优化营林措施、采用平衡施肥技术、开设竹山便道等）来改善生产条件，降低竹林经营的相对投入，提高竹林产量，从而实现竹林经营效益最大化。依照以上竹林主导功能利用和经营目标的不同进行分类，并按其各自的特点和运行规律，采取相应的技术、经济等手段实施经营管理，最大限度地获得经营效益。从而既满足了社会对竹林功能多样性的需要，又实现了社会经济与自然环境二者的协调持续发展^[6]。另外，加大对竹林的科学培管，不仅仅要提高竹林的产量和产值，更要从降低成本投入，提高单位劳动产值方面入手来提高竹林的生产效率。

4.2 发展竹木混交林，提高竹林生态系统生物的多样性

“多样性导致稳定性”是生态学上一条重要的规律。一个生态系统物种组成越多，食物网越复杂，生态系统抵抗外力干扰的能力越强^[7]。单一的竹林纯林立地结构必然导致地力的严重衰退，造成病虫害，影响竹林的经济效益也生态效益。发展竹木混交林，从而恢复竹林原有的生物群落结构，提高竹林自身的生态系统的稳定性。

4.3 种养结合，发展立体林业

立体种养^[8]是充分利用林地空间，提高单位面积效益，而且又能促进竹林生产，使竹林增产增收，形成一个生产经营和生态维护的动态循环结构。近年来，利用竹林空间发展竹山养鸡，实施“竹笋竹荪”、天麻、兰花套种技术^[9]等立体种养形式为我们发展竹林立体种养提供了值得借鉴的模式。

4.4 提高竹材综合利用水平，构建资源节约型竹产业^[10]

提高竹材的综合利用水平，就要开发技术含量高、产品附加值高的竹材产品，实现全竹综合利用。这是竹产业综合开发的关键所在，也是实现从粗放经营到集约化经营转变、带动资源培育和创造良性循环的关键。通过对产品、工艺、技术和设备等的创新，不断提高竹材的综合利用水平，提高竹材的利用率，节约竹材原料，减少对竹材的过度砍伐，维护生态平衡，建设友好自然环境^[10]。

生产实践表明，生产竹地板竹材利用率仅为16%左右^[11]，且加工工艺复杂。而若对加工废料采用木材热解对其进行干馏，可以得到竹炭、竹醋、竹焦油和竹煤气四大类产品。将竹材加工成微薄竹片后，进行贴面加工，生产具有各种装饰效果的板材，附加值可提高3倍以上，如果将竹材拼接成各种装饰挂件的基材，其经济效益更加客观^[12]。另外，竹叶可以加工竹叶黄酮，竹枝可以生产竹扫帚，竹篾可以加工成竹工艺品。只有对竹材进行多形式、多途径的全竹开发与利用，才能更好地发挥竹子在生态环境建设中的巨大作用，构建资源节约型竹产业。

4.5 积极推进竹产业的外延发展

中国不仅在竹林培育方面有着悠久的历史，而且中国自古以来对竹文化的研究和应用也相当重视。竹林的现代化生态经营也要重视对竹子文化的研究与开发，同时利用竹文化的丰富内涵，拉动竹产业的发展，拓展竹资源的利用途径。可以建立以竹为主的旅游胜地、游览区、竹主题公园等，在合理开发竹资源的经济效益的同时，也巩固和维护了竹林生态的良性循环。

5 结语

竹林的现代化生态经营在宏观层面上要运用生态平衡论（强调竹林的经营要把经济系统和经营活动建立在竹林生态平衡的基础上）、相协调论（强调竹林生态、竹林效益和社会必须协调发展）和可持续发展论（强调竹林经营的可持续性要建立在竹林生态可持续的基础上）对竹林的现代化生态经营进行合理的规划和指导。

在产业层面上，竹林的产业链应该进一步拓展到工业，服务业，旅游业等相关产业，利用社会发展的相关因素来合理组合，从而达到竹林的经济和生态效益的双向发展。

在地域层面上，竹林的生态化经营应该参与到国家生态乡，生态县、生态市、生态省，甚至“天保”等项目的建设。让竹林的生态经营产业化朝可持续发展的方向前进。

致谢：得到安吉县林业局张培新高工的指导，在此表示感谢！

参考文献

- [1] 辉朝茂, 杨宇明, 郝吉明. 论竹子生态环境效益与竹产业可持续发展[J]. 西南林学院学, 2003, 23(4): 25-29
- [2] 周新民. 刍议我国木材工业发展与生态保护[J]. 生态经济, 2001, 8: 70-72
- [3] 段贤斌. 农业现代化与生态经济关系初探[J]. 生态经济, 2001, 2: 42-45
- [4] 张敏新, 肖平. 竹材栽培的经济研究[J]. 林业经济问题, 2001, 21(1): 4-6
- [5] 杨楚潘. 对竹产业可持续发展问题的探讨[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(3): 71-75
- [6] 萧江华. 分类经营 定向培育 提高竹林经营效益[J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(3): 1-7
- [7] 苏小青. 可持续林业与森林生态平衡[J]. 林业经济问题, 2001, 21(2): 94-96
- [8] 王炳兴, 何国林. 毛竹产业化的探讨[J]. 竹子研究汇刊, 2002, 21(2): 32-35
- [9] 叶华琳, 华锡奇, 周文伟, 等. 竹业的循环经济发展模式—浙江竹业一产的循环经济发展模式[J]
- [10] 韩建. 提高竹材综合利用水平 构件资源节约型竹产业[J]. 林产工业, 2007, 34(1): 12-15
- [11] 王晶, 戴迪荣. 浙江省竹材加工利用现状和发展对策. 竹子研究汇刊, 1997, 16(1)
- [12] 毛燕清. 竹材开发利用研究综述[J]. 华东森林经理, 2006, 20(2): 35-37

雷竹主要器官 Se 的分配与富集累积规律研究

谢锦忠¹ 刘云¹ 陈侃² 周君刚³ 张玮¹ 格日勒图¹

(1. 中国林科院亚热带林业研究所, 浙江富阳, 311400; 2. 浙江省富阳市科技局, 浙江富阳, 311400;
3. 浙江省富阳市林业局, 浙江富阳, 311400)

摘要 在浙江省富阳市主产雷竹(*Phyllostachys praecox*)的春建、永昌、胥口、新登、洞桥、万市和湖源的窈口、路西等 7 个乡镇的 8 个试验点的雷竹林和春建乡的 2 年生雷竹林中分别对雷竹主要器官 Se 的富集累积和同一竹鞭系统内立竹间 Se 的转移累积规律进行了研究。结果表明: 在雷竹主要器官中, 以叶片的 Se 含量最高, 平均值为 $0.1328\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重), 其次是竹笋, 平均值为 $0.0670\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重); 其它器官之间差异较小, 且硒含量极低; 雷竹竹鞭硒含量与其它器官(竹笋、叶片、竹枝、竹秆) 硒含量之间又均达到显著和极显著线性相关; 在同一竹鞭系统内, 一竹株茎秆注射亚硒酸钠后, 另一未茎秆注射亚硒酸钠的竹株叶片的硒含量有明显的增加, 证明了硒可在同一竹鞭系统内的立竹间传递。

关键词 雷竹; 硒; 累积规律

Study on the distribution and accumulation of Selenium In the main organs of *Phyllostachys praecox*

XIE Jinzhong¹ LIU Yun¹ CHEN Kan² ZHOU Jungang³ ZHANG Wei¹ Geriletu¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang, 311400, Zhejiang, China;
2. Science and Technology Bureau of Fuyang City, Zhejiang Province, Fuyang, 311400, Zhejiang, China)
3. Forest Bureau of Fuyang City, Zhejiang Province, Fuyang, 311400, Zhejiang, China)

Abstract: Distribution and accumulation of Selenium (Se) in main organs of *Phyllostachys praecox* was studied in 8 locations (Chunjian, Yongchang, Xukou, Xindeng, Dongqiao, Wanshi, Yaokou and Luxi in Huyuan) of 7 towns in Fuyang, Zhejiang Province. The transfer of Selenium in the same rhizome system of *Phyllostachys praecox* was also studied in 2-years-old *Phyllostachys praecox* stand in Chunjian township of Fuyang. The results showed that Selenium content in leaves was the highest amongst the main organs of *Phyllostachys praecox* in 8 locations, the mean content was $0.1328\text{mg}/\text{kg}$ dry matter. The Se content of bamboo shoots of *Phyllostachys praecox* was the second, with mean content of $0.0670\text{mg}/\text{kg}$ dry matter. The Selenium content in other organs of *Phyllostachys praecox* was very low and had no significant

基金项目 浙江省自然科学基金项目“富硒竹笋培育机理研究”(M303369), 浙江省科技厅一般科技项目“保健型富硒竹笋高效培育技术研究”(2008C32010)

通讯简介 谢锦忠: E-mail:jzhxie@163.net

differences. The Selenium content had significant linear correlation between rhizome and other organs. The Selenium content of bamboo leaves un-injected with Na_2SeO_3 increased significantly after other bamboo culms in the same rhizome system were injected with Na_2SeO_3 ; the results showing that the Selenium could transfer to other bamboo culms within the same rhizome system.

Key words: *Phyllostachys praecox*, Selenium, distribution and accumulation

硒是联合国卫生组织确定的人体必需的微量元素，硒缺乏引发许多疾病。富硒食品的研究与开发已逐渐成为近年来研究的热点，并得到应用和推广^[1]。国内外对富硒水果、蔬菜等的研究报道较多，但在富硒竹笋的研究方面罕见报道。雷竹 (*Phyllostachys praecox*) 以出笋早、品质上乘博得百姓的喜爱，是江南地区的主要森林蔬菜。本文拟通过对雷竹主要器官 Se 的富集累积和同一竹鞭系统立竹间 Se 的转移累积规律的探索，为进一步开展富硒雷竹笋的培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 雷竹各器官硒测定试验

于 2005 年 2-3 月在浙江省富阳市周边主产雷竹的 7 个乡镇 (春建乡、永昌镇、胥口镇、新登镇、洞桥镇、万市镇和湖源乡的窈口、路西) 的 8 块常规经营的雷竹林中，分别设定 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地 2 个，每样地选择 3 根标准竹，截取竹秆 (2cm 长的 5 段: 1.3m 高、枝下高、1/2 高、2/3 高段)，枝条 (上、中、下部)，叶片 (上、中、下部)，竹笋和竹鞭 (3cm 长的 5 段)。在上述样地中分别按 0-15cm、15-30cm 深度同步采集土壤混合样；将采集的样品于 85°C 下烘至恒重，各器官样品分别粉碎后装入瓶中待测全 Se。

1.1.2 同一竹鞭系统内立竹间 Se 的转移累积规律

于 2005 年 2 月 21 日在浙江省富阳市春建乡的 2 年生雷竹林中设立了 6 个面积为 3m^2 的试验小区，在每个试验小区 (一个竹鞭系统) 内进行每竹茎秆基部注射亚硒酸钠 (Na_2SeO_3)，并选取其中一株雷竹不进行注射试验，并在其它立竹注射亚硒酸钠 (Na_2SeO_3) 前将其叶片按上、中、下等三个部位取样带回测定硒含量。在同年 3 月 15 日 (笋期) 再次取不注射亚硒酸钠的立竹叶片测定含硒量，以分析试验前后不注射亚硒酸钠的立竹叶子硒含量的变化。具体注射亚硒酸钠的浓度和剂量见表 3。

1.2 分析方法

各竹子器 Se 含量分析参照国标 GB/T5009.93-2003，湿法消解，应用氢化物原子荧光光谱法测

定, 仪器采用 AFS-9130 顺序注射双道原子荧光光度计。仪器条件^[2]: 灯电流: 80mA; 光电倍增管负高压: 280V; 原子化器高度: 8mm; 载气流量: 400ml/min; 屏蔽器流量: 800ml/min; 测量方式: 标准曲线法; 读数方式: 峰面积; 读数时间: 7s; 延迟时间: 1.5s。

土壤样分析方法参照瞿建国等^[3-5]推荐的逐级连续化学浸提技术及其有效 Se、全 Se 测定方法。

1.3 数据处理

利用 SPSS10.0 进行有关相关性分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 雷竹不同器官硒富集能力比较

从雷竹不同器官天然硒含量比较可知(见图 1), 在土壤硒水平基本一致的情况下(见表 1), 雷竹各器官硒含量之间的差异很大, 说明各器官在吸收、累积硒的能力上各不相同。雷竹主要 5 个器官中, 以叶片的天然 Se 含量最高, 平均值为 $0.1328\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重); 其次是笋, 平均值为 $0.0670\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重)。其它器官之间差异较小, 且含量极低, 在 $0.0127\text{-}0.0280\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重)之间。作为竹子的营养器官, Se 在竹叶中的含量最高, 这与彭丽萍研究平竹各器官中 N、P、K、Ca、Mg 的平均含量均在叶中出现最高值相一致^[6]。雷竹各器官天然硒含量的变异系数分别是竹叶(4.87%)>竹笋(2.42%)>竹鞭(1.44%)>竹枝(0.8%)>竹秆(0.5%)。虽然各器官硒含量变异系数之间存在差异, 但是总的变异很小, 说明富阳市雷竹的栽培模式大体一致, 而且竹笋中硒含量变异系数很小, 有利于培育出质量均一和稳定的富硒竹笋。

表 1 富阳市雷竹林土壤中总 Se 和 NaHCO₃ 浸提有效 Se 含量

Table 1 The content of total Se and Se extracted by NaHCO₃ in soil of *Phyllostachys praecox* in Fuyang

采土样点	土壤总硒(mg/kg)		土壤有效硒(mg/kg)	
	0-15cm 土层	15-30cm 土层	0-15cm 土层	15-30cm 土层
春建	0.339±0.040	0.224±0.101	0.026±0.006	0.025±0.012
洞桥	0.364±0.077	0.260±0.147	0.022±0.004	0.022±0.008
路西	0.386±0.031	0.366±0.035	0.028±0.009	0.024±0.010
万市	0.282±0.013	0.215±0.025	0.027±0.005	0.020±0.003
新登	0.295±0.010	0.234±0.076	0.033±0.012	0.021±0.013
胥口	0.360±0.039	0.260±0.091	0.035±0.008	0.027±0.001
窈口	0.320±0.067	0.207±0.016	0.031±0.002	0.027±0.005
永昌	0.486±0.095	0.308±0.054	0.038±0.002	0.033±0.005

竹鞭、竹秆和竹枝的 Se 含量相对较低, 说明在雷竹生长过程中, 鞭、秆和枝条主要作为根系吸收含 Se 物质进入叶的途径; 竹子特殊的生物学特性决定了一定的积累时间后叶片是土壤含 Se 物

质的最终到达地。因此，叶片 Se 含量最高；竹笋是由笋芽到成竹之间的过渡阶段，其营养物质的含量不稳定，并且竹笋还能直接吸收土壤营养物质，与叶片相比，竹笋中 Se 积累时间短，故其累积的 Se 含量低于竹叶中的 Se 含量，但又比其他器官的 Se 含量高。

在 8 个测试点中，胥口的雷竹叶片 Se 含量最高，其次是窈口和万市，洞桥叶片 Se 含量最低。结合土壤中 Se 的有效性研究数据（见表 1），发现土壤全 Se 含量与竹叶 Se 含量的相关程度低，但土壤有效 Se 含量与竹叶等器官 Se 含量的相关程度较高，即土壤中有有效 Se 含量越高，雷竹吸收累积的 Se 含量就越高。

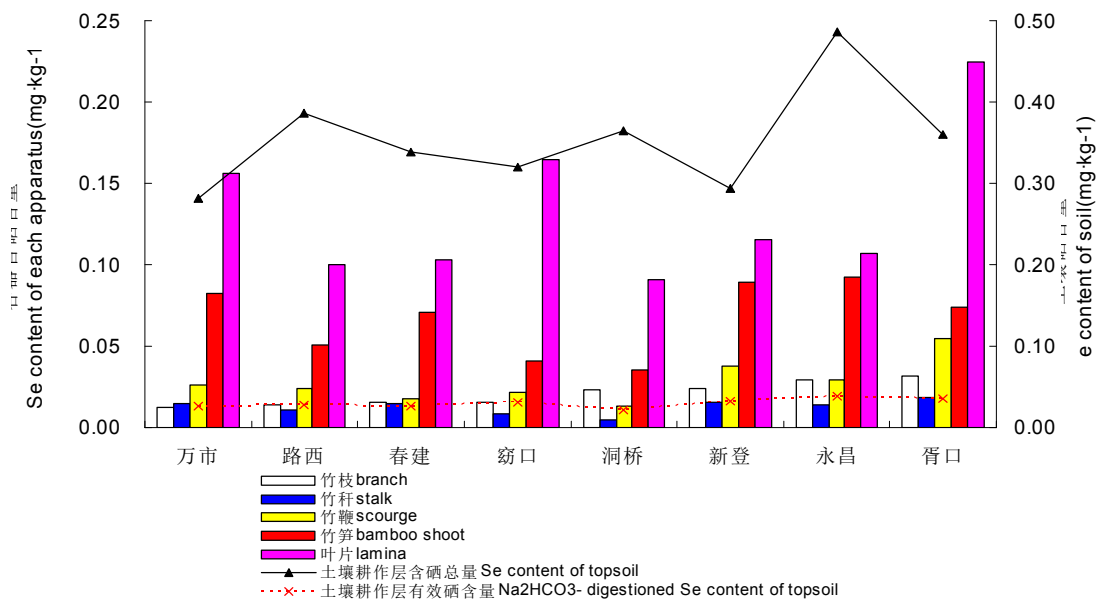


图 1 雷竹不同器官天然硒含量比较

Fig 1 The comparison of Se concentration between different sections in *Phyllostachys*

2.2 雷竹主要器官间硒吸收累积的相关关系

雷竹各器官（竹笋 y_1 、叶片 y_2 、竹枝 y_3 、竹秆 y_4 ）Se 含量与竹鞭（ x ）Se 含量之间线性相关均达到显著和极显著水平（见表 2）；竹笋硒含量（ y_1 ）与竹秆硒含量（ y_4 ）之间线性相关也达到极显著水平（ $p < 0.01$ ）；而在秆与叶、笋与叶之间未发现直接的显著相关性。它们的回归方程分别如下：

$$y_1 = 0.918x + 0.0412 (R^2 = 0.2778); \quad y_2 = 1.992x + 0.0769 (R^2 = 0.347);$$

$$y_3 = 0.362x + 0.0104 (R^2 = 0.420); \quad y_4 = 0.282x + 0.0047 (R^2 = 0.571);$$

$$y_1 = 3.399y_4 + 0.0239 (R^2 = 0.572)。$$

这个结果证实，竹鞭作为母竹和新竹之间 Se 营养储存、运输器官，其 Se 含量的多少直接影响竹株其它器官 Se 含量的多少。这个研究结果与竹子其它营养元素的累积与传递规律相似^[7]。这也是

竹子与树木的区别之处。而竹笋硒含量(y_1)与竹秆硒含量(y_4)之间极显著线性相关的结果, 为富硒竹笋的培育提供了理论依据。

表 2 雷竹不同器官总硒含量之间的相关系数表

Table 2 The correlation coefficient of Se contents of different organs of *Phyllostachys praecox*

器官类型 Type of organs	竹笋 shoot	叶片 leaf	竹枝 branch	竹秆 culm	竹鞭 rhizome
竹笋 shoot	1.0000				
叶片 leaf	0.1221	1.0000			
竹枝 branch	0.4075	0.2715	1.0000		
竹秆 culm	0.7563**	0.3858	0.3986	1.0000	
竹鞭 rhizome	0.5456*	0.5889*	0.6483**	0.7558**	1.0000

2.3 同一竹鞭系统内立竹间 Se 的转移累积

利用春建新造的 2 年生雷竹林地下鞭根系统简单明了的特点, 通过对同一立竹在同一竹鞭系统内另一立竹采取茎秆注射硒肥前后的竹叶硒含量的变化比较来观察同一竹鞭系统内立竹间 Se 的转移累积规律。试验测定结果(见表 3)表明: 在同一竹鞭系统内, 一竹株茎秆注射硒肥后, 另一未茎秆注射硒肥的竹株叶片的硒含量与处理前相比均有明显的增加, 达到了极显著差异(见表 4), 这证明同一竹鞭系统内各竹株之间进行着硒的传递, 且随着施硒总量的加大, 硒的转移累积也相应增大。作为散生竹种, 雷竹靠地下竹鞭的不断延伸, 由鞭芽发育成竹株, 进而成竹林, Se 元素在同一竹鞭系统内进行着传递。由上述结果可知, 竹叶既是硒营养的库, 也可作为硒营养的源。这与其它植物对营养元素的吸收累积和释放规律是一致的。

表 3 同一立竹在同一竹鞭系统内另一立竹采取茎秆注射硒肥前后的竹叶硒含量变化动态

Table 3 The comparison of Se content of the same bamboo between before and after injected Na_2SeO_3 in another culm of the same bamboo rhizome system

小区编号 number	施硒浓度 Se Concentration ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剂量 Dosage ($\text{mL}\cdot\text{株}^{-1}$)	施用硒肥前 before injecting Se ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	施用硒肥后 After injecting Se ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1	1500	5	0.3176	0.4764
2	2000	25	0.4443	0.9158
3	2500	15	0.2264	0.5354
4	1500	5	0.2976	0.4598
5	2000	25	0.4383	0.9082
6	2500	15	0.2368	0.5584

表 4 同一立竹在同一竹鞭系统内另一立竹采取茎秆注射硒肥前后的竹叶硒含量变化的方差分析

Table 4 The analysis squares of Se content of the same bamboo between before and after injected Na_2SeO_3 in another culm of the same bamboo rhizome system

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
组间	0.299	1	0.299	11.054**	.008<0.01
组内	0.270	10	0.02702		
总和	0.569	11			

3 结论与讨论

(1) 在雷竹的所有器官中, 以竹叶的 Se 富集量最高, 其次为竹笋。竹笋中 Se 的富集量仅次于竹叶, 这为富 Se 竹笋的培育提供了理论依据。

(2) 雷竹地下竹鞭 Se 含量与竹笋、竹秆等器官的 Se 含量之间的线性相关关系明显, 证实了竹鞭作为母竹和新竹之间 Se 营养的储存与运输器; 竹笋 Se 含量与竹秆 Se 含量之间也存在明显的线性相关, 这为富硒竹笋的培育提供了理论依据。

(3) 在同一竹鞭系统内, 一竹株茎秆注射硒后, 另一未茎秆注射硒的竹株叶片的硒含量有明显的增加, 证明了硒可在同一竹鞭系统内的立竹间传递, 使竹叶既是硒营养的库, 又是硒营养的源。

(4) 研究雷竹整个竹鞭系统中吸收、运输、转化机理的最佳手段是采用 ^{75}Se 同位素示踪技术。本文采用传统手段, 对同一竹鞭系统内立竹间的叶片中硒含量的累积转移作了简单的分析, 对转移量的多少, 转移的硒的形态, 以及其它器官硒的转移均未涉及, 还有待于用先进的 ^{75}Se 同位素示踪技术开展进一步的深化研究。

参考文献

- [1] 赵中秋, 郑海雷, 张春光 等. 土壤硒及其与植物硒营养的关系 生态学杂志, 2003, 22 (1): 22-25
- [2] 刘云, 谢锦忠, 屈明华 等. 湿法消解-原子荧光法测定竹笋中的微量硒, 竹子研究汇刊, 2007, 26(3): 12-15
- [3] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态. 环境化学, 1997, 16(3): 277-283
- [4] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤中有效态硒和总硒. 土壤通报, 1998, 29(1): 47-封三
- [5] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 上海不同地区土壤总硒的形态分布及其有效性研究. 土壤学报, 1998, 35(3): 398-403
- [6] 江泽慧. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002, 3-6, 112-116, 402
- [7] 郑炳松, 金爱武, 懂林根. 雷竹地下鞭笋芽分化过程中营养动态初步研究. 浙江林学院学报, 1998, 15(3): 232-235

粉单竹竹材化学成分遗传变异的初步研究

杨秀艳^{1,2} 傅懋毅² 谢锦忠²

(1 中国林科学研究院林业研究所 北京 100091; 2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所 富阳 311400)

摘要 本研究选取 8 个产地粉单竹 3 年生竹秆为材料, 共测定 1%NaOH 抽出物、苯醇抽出物、硝酸-乙醇纤维素、木素、灰分、戊聚糖含量 6 个指标, 并对这 6 个指标进行了方差分析、化学成分与原产地地理及气候条件的相关分析、化学成分与生长、形质性状的相关分析。结果表明: (1) 粉单竹竹材化学成分中平均硝酸-乙醇纤维素、木素、1%NaOH 抽提物, 苯醇抽出物、灰分及戊聚糖含量分别为 46.23%、22.73%、25.3%、5.99%、1.34%和 20.73%, 是竹子当中较为适宜造纸的原料。(2) 化学成分中 1%NaOH 抽提物、纤维素和戊聚糖含量三者在地间存在显著或 0.1 水平的差异; 苯醇抽提物和灰分虽在地间无显著差异, 但个体间的差异比较大。(3) 1%NaOH 抽提物、纤维素含量、木素含量、灰分、戊聚糖含量 5 个性状的广义遗传力分别为 0.54、0.71、0.38、0.31、0.70, 受中等或较强的遗传控制; 灰分有随经度增大而增加的地理倾群模式; 降雨量、无霜期及 7 月均温对粉单竹竹材化学成分有较大的影响。(4) 粉单竹竹材化学成分与竹秆生长及形质性状有密切关联。其中 1%NaOH 抽提物与丛内秆数和胸径处节长具有显著负相关; 纤维素与鲜秆质量具有显著正相关; 灰分与竹秆全长和枝下节数呈 0.1 水平负相关, 与枝下高呈显著负相关; 戊聚糖与胸径呈现显著正相关, 与丛内秆数和胸径处节长则呈显著或 0.1 水平负相关。

通过以上结果认为, 粉单竹竹材是较好的造纸原料; 对竹材化学成分中%NaOH 抽提物、纤维素和戊聚糖含量可进行产地选择, 对灰分和苯醇抽出物则适宜开展优良单株选择; 化学成分与生长及形质的相关关系均有利于化学成分与生长(产量)的联合选择。

关键词 粉单竹; 竹材化学成分; 变异; 选择

Study on geographic variation of bamboo wood chemical components in *Bambusa chungii*

YANG Xiuyan^{1,2} FU Maoyi² XIE Jinzhong²

¹ Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091,;

² Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400

Abstract: Bamboo wood samples used in this study were 3-year-old culms taken from 8 provenances of *B. chungii*. All 6 traits including 1%NaOH extractive, benzo-alcohol extractive, cellulose lignin, ash and pentosan content were measured in this study. ANOVA of chemical components and correlation analysis between chemical component and growth and form trait were conducted. The results showed that (1)

bamboo wood of *B. chungii* is a good material for papermaking. The mean of 1%NaOH extractive, benzo-alcohol extractive, cellulose, lignin, ash and pentosan content were 46.23%, 22.73%, 25.3%, 5.99%, 1.34% and 20.73%, respectively. (2) there are significant differences between 1% NaOH extractive, fibrin and pentosan of *B. chungii* from 8 provenances; benzo-alcohol extractive and ash content had no significant difference among provenances, but had significant difference between individuals. (3) The heritability's for 1%NaOH extractive, cellulose, lignin, ash and pentosan content were 0.54, 0.71, 0.38, 0.31 and 0.70, respectively, and moreover, the ash content had an increasing change pattern with geographic variation from west to east. The bamboo wood chemical components were affected by July monthly mean temperature, annual precipitation and frostless days. (4) There was a tightly correlation between chemical components and growth and form traits. There was significant negative correlation between 1% NaOH extractive and culms per clump and node length at DBH, whereas there was a significant positive correlation between fibrin contents and bamboo wood yield. Ash content had 0.1 level negative correlation with height and node number under the first branch, and significant negative correlation with clear height as well. Pentosan had significant positive correlation with DBH, but had 0.1 level negative correlations with culms per clump and length at DBH.

In conclusion, *B. chungii* is an optimal papermaking material. The provenance selection can be carried out to select optimal 1% NaOH extractive, fibrin and pentosan content and individual selection suit to select optimal benzo-alcohol extractive and ash content in *B. chungii*. The correlation between bamboo wood chemical components and growth or yield traits will provide an advantage for combining selection of timber and growth properties.

Key words: *Bambusa chungii*, bamboo wood chemical components, variation, selection

我国造纸工业不断发展，纸和纸板产量仅次于美国、日本，居第3位^[1]，造纸原料短缺情况日益突出。我国竹子资源相对丰富，竹材纤维形态及含量与针叶树相近，纤维素含量高，是较为理想的制浆造纸原料。目前，用竹浆或竹木混合浆已能生产出造纸行业各种大宗商品。粉单竹 (*Bambusa chungii*) 属籼竹属 (*Bambusa*)，单竹亚属 (*Subgen. Lingnania*)，是我国重要的丛生竹种，分布广泛我国南方多个省区。初步统计全国丛生竹林约 80 余万 hm^2 ，其中粉单竹林面积较大^[2]。该竹种具有秆材通直，节间长，竹壁薄，竹材耐湿，韧性强，抗病能力强，产量高等特点，成为广东、广西、福建、海南等地的重要经济竹种而被广泛栽培。

粉单竹生长速度快，产量高，是优良的造纸原料^[3, 4]。合理开发利用粉单竹竹材制浆造纸对我国造纸工业具有积极意义。已有研究表明，粉单竹用 PRC - APMP 法可以制取得率高、纤维结合强度高的高得率浆^[5]，合理地控制碱比可以提高粉单竹化学机械浆 H_2O_2 的漂白效果^[6]。竹材的化学成分是评价其制浆造纸性能的重要指标，也是影响目标产品的质量、产量及生产工艺的重要因素。对木材性状遗传变异的研究表明，材质性状有着广泛的遗传变异，充分利用这种变异是良种选育的任务之一。Zobel^[7]在对火炬松的研究中就发现，木材密度受遗传的控制，而且生长对材性的影响是有限的，选择出生长快而木材密度高的家系是可能的。本研究以粉单竹研究对象，研究其竹材化学

成分的遗传变异规律，并对化学成分与生长性状及形质性状进行相关分析，为今后粉单竹定向培育和材质与生长性状的联合选择提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

材料来自设在广东茂名的粉单竹产地对比林。该试验林由中国林业科学研究院亚热带林业研究所 IITO"中国南方丛生竹可持续经营和利用研究"项目组于 2001 年建立。根据粉单竹的天然分布情况，试验林母竹分别采自广东、海南和广西 3 个省份的 8 个点，采样点详细资料及代码见表 1。田间试验采用随机完全区组设计，3 次重复，12 株小区。造林采用移母竹造林的方法，母竹选择标准为生长健壮、无病虫害及开花迹象、秆基部节芽饱满、中等粗度的竹株，同一产地所取母竹之间相距 50 m 以上；两群体（产地）之间距离在 200 km 以上，以尽量避免相邻群体来源相同的可能性。试验林采用穴植，株行距 3 m×4 m。试验地周围设保护行。

表 1 8 个产地采样点地理位置及气候条件

产地	经度	纬度	海拔 /m	年均温 /°C	极端低温 /°C	1 月均温 /°C	7 月均温 /°C	年均降雨量/mm	年相对湿度/%	无霜期 FD/d
海南琼山 HN	110° 30'	19° 50'	35	23.8	2.8	12.1	28.3	1676.4	85	365
广西南宁 NN	108° 21'	22° 49'	90	21.6	-2.1	12.8	28.2	1304.2	79	360
广西桂林 GL	110° 30'	24° 46'	135	18.9	-2.1	15.6	23.0	1949.5	79	309
广东封开 FK	111° 33'	23° 30'	25	20.8	-3.4	11.2	28.6	1420.8	82	355
广东怀集 HJ	112° 12'	23° 50'	90	20.8	-3.9	13.5	28.8	1785.4	80.2	310
广东信宜 XY	110° 55'	22° 21'	167	22.8	-1.8	13.0	28.0	1800.0	85	340
广东增城 ZC	113° 52'	23° 17'	56	21.2	-2.2	13.2	28.2	1967.2	78	359
广东清远 QY	113° 03'	23° 31'	100	21.6	-0.6	12.4	28.8	2173.6	78	351

1.2 取 样 及 测 定 方 法

对于每个产地，统一选取 3 年生个体中庸且生长正常的竹秆，每个产地采伐 6 株，共 48 株，于竹秆基部齐地砍倒，去梢头。分别在基部，胸径（1.3m）处和上部自下而上截取 30-40cm（粗度不同）长的竹段，编号标记作为测试材料。竹材化学成分则参照造纸原料分析方法国家标准基部和胸径处进行测定^[8]（上部由于材料过少未能测定）。

化学成分均以不同部位检测值的平均值进行方差分析、化学成分与原产地地理及气候条件的相

关分析、化学成分与生长、形质性状的相关分析。数据的统计分析利用 SAS8.0 应用软件包的相关程序完成。

2 结果与分析

2.1 粉单竹竹材化学成分变异分析

2.1.1 抽出物的变异

粉单竹竹材化学成分的产地间方差分析表明(表 2)， 1% NaOH 抽提物在产地间的差异达到了 0.1 水平显著程度， 苯醇抽提物在不同产地间则无差异。同时， 1% NaOH 抽提物无论是在产地间还是在产地内个体间数量的变化都很小， 选择的潜力较小； 苯醇抽提物在个体间的差异比较大（见表 3）， 如苯醇抽提物在广西南宁产地内的变异系数也达到了 20.59%， 这些变异均为个体选择提供了前提条件。

表 2 不同产地粉单竹竹材化学成分方差分析

指标	平均值	变异幅度	变异系数	标准差	F 值	产地遗传力 H^2
1%NaOH 抽提物	25.30	23.7-26.46	4.95	1.25	2.18+	0.54
苯醇抽提物	5.99	5.61-6.44	12.87	0.77	0.37	-
硝酸-乙醇纤维素	46.23	43.68-50.87	4.42	2.04	3.46*	0.71
木素	22.73	21.31-23.94	5.81	1.32	1.60	0.38
灰分	1.34	1.07-2.15	18.5	0.25	1.44	0.31
戊聚糖	20.73	17.33-22.94	6.82	1.41	3.31**	0.70

注： **， *， +分别代表在0.01， 0.05和0.1水平差异显著； -代表性状的广义遗传力为负值。

2.1.2 纤维素、木素和戊聚糖等细胞壁物质的变异

本研究中各产地粉单竹的纤维素含量都较高， 平均达到 46.23%。 纤维含量是衡量纤维原料纸浆得率的重要指标。 竹材中纤维素的比值越大， 可能达到的纸浆得率也越高。 纤维素含量在产地间的差异达到了显著水平， 在产地间绝对量的变化在 43.68%-50.87%之间， 相差 7%以上， 有一定的选择空间。

木素含量影响到制浆、漂白的难易和消耗化学药品的多少， 其含量愈低愈有利于制浆成本的降低， 但木素过低竹材易腐。 木素在产地间的差异并不显著， 其平均含量 22.73%， 变化幅度也不大， 在 21.31-23.94%之间。 这一数值在竹类植物中是比较低的， 王文久等^[9]对云南 14 种材用竹研究表明， 参试的 14 种竹材的平均木素含量为 24.99%。

粉单竹竹材戊聚糖含量平均为 20.73%， 变异范围 17.33-22.94%。 各粉单竹产地戊聚糖含量均值相差并不大， 但在广东怀集和海南两产地内其变异系数较高， 分别达到 8.65%和 9.77%， 说明该指

标在单株水平的变异还是比较大的。

2.1.3 灰分的变异

灰分产地间的差异未达到显著水平，但其变化幅度相对较大，为 1.07-2.15%。在造纸工艺中，灰分质量分数高会影响碱液回收，并造成污染，因此灰分越低越好，而竹类植物灰分含量一般要高于木材。粉单竹的灰分含量平均为 1.34%，低于目前用于造纸的主要竹种慈竹（平均为 2.50%）^[10]。灰分含量在产地内的变异幅度很大，广西桂林产地中的变异系数达到 14.08%，在广东清远产中变异系数更高达 30.02%，这种变异有利于产地内的单株选择。由于竹类植物易于无性繁殖，可以选择性状优良的单株加以无性扩繁，以保证对优良品质的充分利用。

表 3 粉单竹竹材性状在产地内的变异

产地	1%NaOH 抽提物		苯醇抽提物		纤维素		木素		戊聚糖		灰分	
	均值	CV%	均值	CV%	均值	CV%	均值	CV%	均值	CV%	均值	CV%
FK	26.31	3.65	5.90	16.1	44.72	1.68	22.26	6.29	21.58	0.71	1.26	8.13
GL	25.68	5.72	6.44	7.45	47.69	4.28	22.58	5.36	22.09	3.07	1.29	14.08
HJ	23.81	7.43	5.65	16.81	50.87	3.09	23.87	1.68	20.76	8.65	1.21	9.41
HN	26.46	1.55	6.01	11.65	45.5	3.74	23.6	4.87	21.06	9.77	1.40	14.23
NN	25.26	2.34	6.12	20.59	46.16	1.73	22.21	4.59	20.42	7.83	1.22	5.84
QY	23.7	3.88	5.61	3.74	43.68	2.95	23.94	6.22	19.29	4.53	1.48	30.02
XY	26.1	6.51	6.07	8.24	45.75	3.98	21.31	7.84	20.78	3.13	1.37	17.48
ZC	25.04	5.79	6.13	9.62	45.48	9.26	22.05	7.85	19.87	3.06	1.50	22.12

2.1.4 竹材化学成分的株内变异

同一竹秆的不同部位其材性性状同样存在变异（见表 4）。1%NaOH 抽提物和木素两项在竹秆的基部与胸径与之间存在显著或极显著的差异，其他成分则在竹秆内不同部位并无明显不同。其中 1%NaOH 抽提物在基部量比中部大些，这与大木竹^[11]和龙竹^[9]的情况相似。木素则表现中部的量高于基部，这与龙竹、版纳甜竹^[9]和青皮竹^[11]的情况相似。但总体来看，多数竹材化学成分在竹秆纵向并没有一致的变化规律，绝对量在竹秆纵向上的变异幅度要小于其在产地间和个体间的变异幅度，对造纸利用无明显影响。

表 4 竹秆不同部位化学组分变异情况

	1%NaOH 抽提物	苯醇抽提	硝酸-乙醇纤维素	木素	灰分	戊聚糖
基部均值	25.71 A	6.00	46.44	22.02 a	1.36	20.55
胸径均值	24.83 B	5.94	46.36	23.61 b	1.33	20.91

注：表中同一栏中字母不同的为差异显著。

2.2 粉单竹竹材化学成分的遗传控制及地理变异规律

根据 $H^2=(V_p-V_e)/V_p$ (V_p 为产地方差, V_e 为环境方差) 计算产地广义遗传力。其中苯醇抽提物环境方差大于产地方差出现遗传力为负值的情况, 因此不予采用。1%NaOH 抽提物、纤维素含量、木素含量、灰分、戊聚糖含量 5 个性状的广义遗传力分别为 0.54、0.71、0.38、0.31、0.70。其中纤维素含量、戊聚糖含量的遗传力高, 受遗传控制强, 选择效率高; 1%NaOH 抽提物受中等强度遗传控制, 木素和灰分含量受遗传控制较弱。

表 5 粉单竹竹材性状与环境因子的相关系数

	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	年均温 AMT	极端低温 Min T	年降雨量 AP	相对湿度 RH	无霜期 FD	1 月均温 Jan MMT	7 月均温 Jul MMT
1%NaOH 抽提物	-0.465	-0.472	-0.16	0.273	0.32	-0.496	0.686+	0.323	-0.178	-0.241
苯醇抽提	-0.437	0.062	0.246	-0.285	0.067	-0.144	0.026	-0.084	0.565	-0.767*
硝酸-乙醇 纤维素	-0.106	0.302	0.224	-0.372	-0.437	-0.052	-0.066	-	0.552	-0.232
木素	0.24	-0.087	-0.301	0.035	0.308	0.322	-0.195	-0.164	-0.06	0.181
灰分	0.6332+	-0.2457	-0.0486	0.3367	0.4945	0.6914+	-0.0968	0.4374	-0.1188	0.1483
戊聚糖	-0.4578	0.0937	0.0202	-0.3575	-0.1257	-0.3801	0.3924	-	0.3080	-0.6221+
								0.4336		

注: **, *, + 分别代表在 0.01, 0.05 和 0.1 水平相关显著, 下同。

通过竹材化学成分与地理环境因子的相关分析发现, 灰分与地理经度和年降雨量呈现 0.1 水平的正相关。灰分与经度的正相关表明, 粉单竹竹材灰分含量有随着经度增加而增加的地理变异模式。纤维素含量与无霜期之间有显著的负相关, 这与一般生长期长、速生树种纤维素含量较慢生树种为低的规律相符合。苯醇抽提物、戊聚糖含量分别与 7 月均温达到显著和 0.1 水平负相关, 可能是夏季高温抑制植物生长的同时, 也会影响有机内含物的代谢合成。

2.5 竹材化学成分与生长、形质性状的相关分析

数量性状往往受多基因的控制, 由于基因互作使得性状间常常彼此关联, 表现一定的相关性。为了明确竹材化学成分与竹子生长及形质性状的相互关系, 对以上化学成分和鲜杆质量、竹杆胸径、全长、丛内秆数、枝下高、枝下节数和胸径处节长等性状进行了简相关分析。由表6中可以看出, 1%NaOH抽提物与丛内秆数和胸径处节长具有显著负相关, 因此可以根据丛内秆数及胸径处节长两个易于观测的形态指标对竹材中1%NaOH抽提物进行间接选择。纤维素与鲜杆质量具有显著正相关, 直观看来表现为粉单竹竹材中纤维素含量随地上竹杆产量的增加而升高。灰分与竹杆全长和枝下节

数呈0.1水平负相关，与枝下高呈显著负相关，这种关系的存在与竹材特有的结构形态有关。由于灰分主要存在于皮部和竹节部分，所以竹秆短而竹节多的竹材灰分含量会较高。另外，戊聚糖与胸径呈现显著正相关，与丛内秆数和胸径处节长则呈显著或0.1水平负相关，这表明提高竹秆胸径有大小有利于提高戊聚糖的含量，可以通过调节竹丛结构来改善竹材材质。

表6 竹材化学成分与生长、形质性状的相关系数

	鲜秆质量	胸径	全长	丛内秆数	枝下高	枝下节数	胸径处节长
1%NaOH 抽提物	-0.4351	0.5581	0.2619	-0.7552*	0.3239	0.5851	-0.7254*
苯醇抽提	0.1878	0.5533	0.5462	-0.3610	-0.0324	0.3342	-0.3926
硝酸-乙醇纤维素	0.7733*	0.5662	0.3616	-0.2919	0.1581	0.1620	-0.0134
木素	-0.1180	-0.4550	-0.5947	0.3081	-0.4214	-0.4492	0.1634
灰分	-0.2594	-0.6062	-0.6239+	0.5741	-0.7079*	-0.6573+	0.5376
戊聚糖	0.0890	0.7512*	0.3051	-0.7464*	0.5134	0.6129	-0.6993+

3 结论与讨论

用竹材造纸在我国历史悠久，竹子的造纸性能仅次于针叶木，接近于阔叶木而优于禾草类^[18]。经测定，粉单竹竹材化学成分中平均硝酸-乙醇纤维素、木素、1%NaOH 抽提物，苯醇抽出物、灰分及戊聚糖含量分别为 46.23%、22.73%、25.3%、5.99%、1.34%和 20.73%，是竹子当中较为适宜造纸的原料^[12]。

研究中发现，粉单竹竹材化学成分在秆内的纵向变异幅度小于产地间和个体间的变异，对造纸利用影响很小。化学成分中 1%NaOH 抽提物、纤维素和戊聚糖含量三者在地间存在显著或 0.1 水平的差异，适于开展产地选择。苯醇抽提物和灰分虽在地间无显著差异，但个体间的差异比较大，鉴于竹子有很强的无性繁殖能力，对于这种性状可选择优良个体进行无性繁殖加以利用。1%NaOH抽提物、纤维素含量、木素含量、灰分、戊聚糖含量5个性状的广义遗传力分别为0.54、0.71、0.38、0.31、0.70，受中等或较强的遗传控制。灰分有随经度增大而增加的地理倾群模式。降雨量、无霜期及7月均温对粉单竹竹材化学成分有较大的影响。

粉单竹竹材化学成分与竹秆生长及形质性状有密切关联。其中1%NaOH抽提物与丛内秆数和胸径处节长具有显著负相关，纤维素与鲜秆质量具有显著正相关，灰分与竹秆全长和枝下节数呈0.1水平负相关，与枝下高呈显著负相关，戊聚糖与胸径呈现显著正相关，与丛内秆数和胸径处节长则呈显著或0.1水平负相关。这些相关关系均有利于化学成分与生长（产量）的联合选择。

参考文献

- [1] 甘家齐. 我国开发利用竹林制浆造纸前景探讨[J], 西南造纸, 2002, 31(2): 8-10
- [2] 马乃训. 国产丛生竹类资源与利用[J]. 竹子研究汇刊, 2004, 23(1): 1-5
- [3] 张达俊. 广西的竹子及制浆造纸[J]. 西南造纸, 2002, 31(4): 4-6, 20
- [4] 杨仁党, 陈克复. 竹子作为造纸原料的性能和潜力[J]. 林产工业, 2002, 29(3): 8-12
- [5] 黄显南, 农尚勇, 张庭婷. 粉单竹 PRC-APMP 磨浆特性研究[J]. 造纸科学与技术, 2008, 27(6): 83-86
- [6] 黄显南, 詹怀宇, 王双飞 等. 粉单竹化学机械浆 H₂O₂ 漂白的研究[J]. 造纸科学与技术, 2006, 25(1): 7-9
- [7] Bruce Zobel. Genetic manipulation of wood of the southern pines including chemical characteristics [J]. Wood Science and Technology, 1971, 5(4): 255-271
- [8] GB2677-81, 造纸工业产品试验方法[S]
- [9] 王文久, 辉朝茂, 刘翠 等. 云南 14 种主要材用竹化学成分研究[J]. 竹子研究汇刊, 1999, 18(2): 74-78
- [10] 王昌命, 王锦, 王文久 等. 云南主要竹材材性与制浆造纸性能分析[J]. 中国造纸, 2008, 27(8): 10-12, 22
- [11] 苏文会, 顾小平, 马灵飞 等. 大木竹化学成分研究[J]. 浙江林学院学报[J]. 2005, 22(2): 180-184
- [12] 辉朝茂, 杜凡, 杨宇明编. 竹类培育与利用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996, 123

龟甲竹光合生理特性及其与主要影响因子的关系

李迎春 杨清平 陈双林 李艳红 吴明

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要 运用 Li-6400 便携式光合分析仪, 以 2 年生龟甲竹 (*Phyllostachys heterocykla* H. de Lehaie) 为研究对象, 测定光合日变化、光响应曲线 (LRC), 并拟合得出的多个光合生理指标。结果表明: 龟甲竹净光合速率 (P_n) 日变化呈单峰曲线, 峰值出现在上午 9:00 左右, 约 $4.25 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 最大净光合速率 ($P_{M_{\max}}$) 为 $9.18 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光补偿点 (LCP) 为 $14.93 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光饱和点 (LSP) 为 $812.58 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 表观量子效率 (AQY) 为 0.053, 表现出较强的弱光利用能力。通经系数分析表明, 影响龟甲竹 P_n 日变化的主要生理生态因子为大气湿度 (RH) > 叶温 (Tleaf) > 气孔导度 (Cond) > 光照有效辐射 (PPED)。

关键词 光合特性; 生理生态因子; 龟甲竹

Study on the photosynthetic characteristics and Their Relationships to Environmental Factors of *Phyllostachys heterocykla* H. de Lehaie

LI Ying-chun, YANG Qing-ping, CHEN Shuang-lin

(Research Institute of Subtropical of Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: The photosynthetic physico-ecological characteristics of two-years-old of *Phyllostachys heterocykla* H. de Lehaie was studied by LI-6400 Photosynthesis system analyses. The main results showed as follows. The net photosynthetic rate (P_n) of leaves showed the one-peak type, and the peak value was $4.25 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ at 9:00 respectively. The maximum P_n of leaf was $9.18 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ under artificial condition, the LCP of leaves was about $14.93 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the LSP about $812.58 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and the apparent quantum efficiency was 0.053, these indicated the *P. heterocykla* had strong ability to utilize weak light, and extensive adaptability to light intensities. The path coefficient analysis indicated that the diurnal variation of P_n had significant correlation with relative humidity (RH), conductance factor (Cond), photosynthetic photon flux density (PPED) and temperature of leaf (Tleaf) were the important factors which affected P_n and the order of effecting ability was $\text{RH} > \text{Tleaf} > \text{Cond} > \text{PPED}$.

Key word: photosynthetic characteristics; physio-ecological factors; *Phyllostachys heterocykla*

龟甲竹 (*Phyllostachys heterocykla* H. de Lehaie), 别名龙鳞竹 (《竹谱祥录》), 佛面竹、龟文竹 (《植物研究杂志》)、观音竹。其竹秆的节片像龟甲又似龙鳞, 凹凸有致, 秆基部以至相当长一段秆的节间连续呈不规则的短缩肿胀, 并交斜连续如龟甲状, 象征长寿健康, 其竹的清秀高雅,

千姿百态，不仅具有极高的观赏价值，还是刻写书联等高级竹工艺品材料。

植物光合特性及其影响因子是制定栽培技术措施的重要依据，也是科技工作者一直研究的焦点之一，已有许多报道对毛竹 (*Phyllostachys edulis*)^[1-3]、雷竹 (*Phyllostachys praecox*)^[4]、绿竹 (*Dendrocalamopsis oldhami*)^[5,6]等竹类植物进行了研究，然而目前有关龟甲竹光合特性方面的研究尚未见报道。龟甲竹遗传性状不太稳定，栽植后长出的新竹一年比一年小，有的竹竿变成正常竹竿。有研究表明，水分、光照是影响小佛肚竹畸形秆率的主要因素^[7]，龟甲竹竹秆形态易变成不龟甲也可能与光照、水分等条件有关。因此本研究针对龟甲竹光合作用的光响应、日变化和主要生理生态因子对光合作用的影响等光合生理特性进行了研究，旨在为龟甲竹的人工促进栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2008 年 5 月中旬在中国林业科学院亚热带林业研究所罗桥竹种繁育基地苗圃内进行，试验区内年平均气温 16.1℃，极端最低气温-14.4℃，极端最高气温 40.2℃，10℃积温 5100℃，年平均无霜期 232d。年平均降水量 1426mm，降水量随季节变化，7—8 月为季节性干旱期。年平均蒸发量 1392mm，年平均相对湿度 79%。日照总时数年平均为 1995hr，属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候。土壤为花岗岩发育的砂质黄壤，土层厚度 80mm 以上，pH 值 5.5，有机质含量 43g·kg⁻¹，水解 N176.54mg·kg⁻¹，速效 P30.12mg·kg⁻¹，速效 K307.494mg·kg⁻¹。

试验竹林为移龟甲竹畸形秆母竹分单株营造，地径平均 5.0cm 以上，竹高平均 3.62m。主要抚育措施为幼林期每年春天和初夏各中耕除草一次；出笋期间每隔 1 月共三次环状沟法施入 N、P、K 养分含量各占 15%的复合肥，每次株施 0.2kg；除退笋外，其它竹笋均留笋长竹。

1.2 研究方法

光合作用测定采用美国 Li-cor 公司生产的 Li-6400 光合测定系统，主要测定指标有：净光合速率 (Pn)，气孔导度 (Cond)，胞间 CO₂ 浓度 (Ci)，蒸腾速率 (Tr)，叶片水气压差 (Vpdl)，空气温度(Tair)，叶面温度 (Tleaf)，大气相对湿度 (RH)，大气 CO₂ 浓度 (Ca)，光量子通量密度 (PPED) 等。

1.2.1 光合作用日变化

在龟甲竹地下鞭系生长旺盛期 5 月中下旬，选取 2 龄竹的第 8—11 盘枝条上东西南北四个方向的枝条上部第 3 或第 4 片功能叶进行光合测定，重复三次，从 7:00~17:00，每隔 2h 测定光合速

率。

龟甲竹水分利用效率 (WUE) 分析: Pn/Tr ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)

1.2.3 光合作用的光响应

上午 10 时左右叶片充分活化后, 采用 Li-6400 红外 CO_2 气体分析仪自带的红蓝光源测定, 光量子通量密度设置为 2000、1800、1500、1200、1000、800、500、200、100、80、50、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 测定时通过系统控制叶片温度为 $30 \pm 1^\circ\text{C}$, CO_2 浓度和相对湿度均为自然状态。

1.3 数据统计分析

1.3.1 光响应曲线的数学模拟

以光量子通量密度 (PPED) 为横轴、净光合速率 (Pn) 为纵轴用 Photosyn Assistant 软件绘制光响应曲线 (Pn-PPED 曲线)。依据方程 $Pn = P_{\max} (1 - C_0 e^{-\Phi \text{PPED} / P_{\max}})$ [8] 拟合 Pn-PPED 曲线, 其中 P_{\max} 为最大光合速率, Φ 为表观量子效率 (AQY), C_0 为度量弱光下净光合速率趋于 0 的指标。通过适合性检验, 拟合效果良好 ($R^2=0.97$), 然后用下式计算 LCP: $LCP = P_{\max} \ln(C_0) / \Phi$, 假定 Pn 达到 P_{\max} 的 99% 的 PPFD 为 LSP, 则: $LSP = P_{\max} \ln(100C_0) / \Phi$ [9]。

1.3.2 生理生态因子对光合作用的影响

每个测定数值以平均值表示, 采用 Excel 和 SSPS15.0 统计分析软件对观测数据进行相关性分析、逐步多元回归和通经分析。

2 结果与分析

2.1 光合作用的日变化

在晴朗天气, 自然条件下龟甲竹光合作用日变化呈“单峰型 (图 1)。从上午 7: 00 开始随着 PPED 的增加, Pn 逐渐上升, 并在 9: 00 左右出现峰值, 为 $4.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 9: 00—11: 00, 当 PPED 继续上升, 龟甲竹 Pn 呈下降趋势, 11: 00 以后随着 PPED 的下降, Pn 继续下降, 到 15: 00 左右 Pn 达到谷值, 为 $0.43 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于影响植物光合特性的主要生态因子光照强度、空气温度、湿度和 CO_2 浓度等在一天

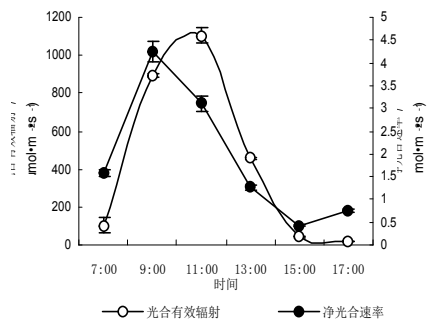


图1 光合有效辐射和龟甲竹净光合速率日变化
Figure 1 Diurnal variation of PAR and net photosynthetic rate of *Phyllostachys heterocyclus* H. de

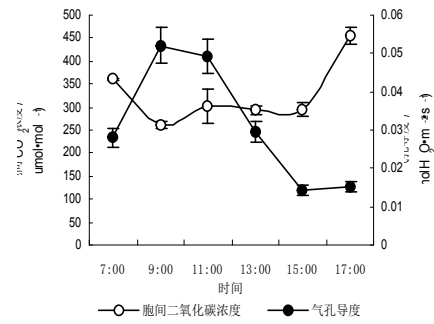


图2 胞间 CO₂ 浓度和气孔导度日变化
Figure 2 Diurnal variation of C_i and Cond

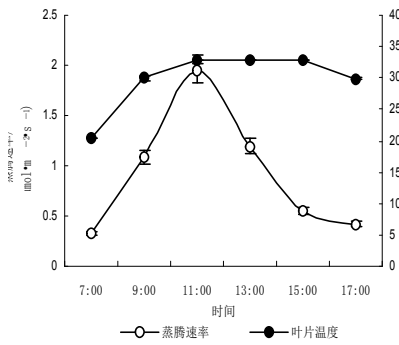


图3 蒸腾速率和叶片温度日变化
Figure 3 Diurnal variation of Tr and Tleaf

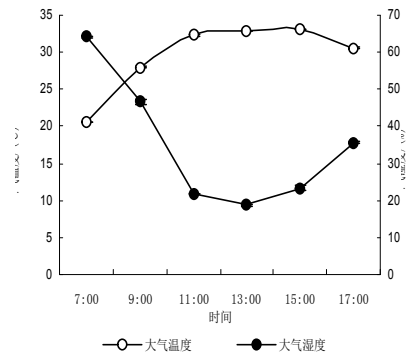


图4 大气温度和大气湿度日变化
Figure 4 Diurnal variation of Tair and RH

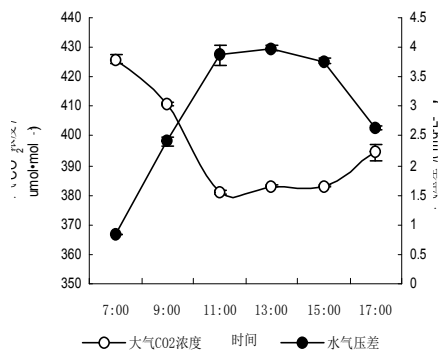


图5 大气 CO₂ 浓度和水气压差日变化
Figure 5 Diurnal variation of Ca and Vpdl

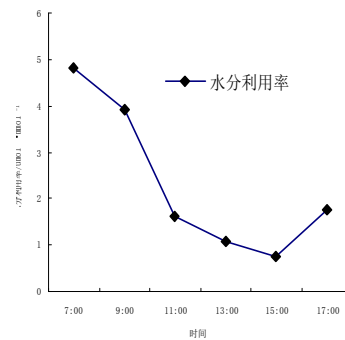


图6 龟甲竹水分利用率的日变化
Figure 6 Diurnal variation of WUE of *Phyllostachys heterocyclus* H. de Lehaie

中呈明显的日变化规律，植物的光合速率、蒸腾速率等生理生态特性也呈现出不同的日变化规律，这种变化因植物种类、生物学特性和生态因子的不同而异。如图 2 至图 6 所示，从 7: 00 到 9: 00

时, 随着 PPED 增加, Tari 升高, Cond 迅速增大, Pn 在这段时间内直线升高, 消耗掉很多的 CO₂, 使得 Ci 迅速下降; 9: 00—15: 00 时, Cond 逐渐变小, Ci 慢慢升高; Tr 的日变化规律也呈单峰曲线, 于 11: 00 时左右达到最高值 1.94 mmol·m⁻²·s⁻¹, 之后呈下降趋势, 水气压差的变化趋势和 Tr 一致, 13:00 时达最大值为 3.98 mg·L⁻¹; RH 在早上 7: 00 最高, 随后, 急剧下降, 15: 00 降低到低谷, 然后 PPED 和 Tair 下降, RH 快速升高 (图 4); 经过夜间的富集, Ca 在早晨最高 (图 5), 随着植物光合作用的进行, Ca 逐步降低, 11: 00 以前 Ca 下降的速度很快, 到 11: 00 降至低谷值 381.05 ul·L⁻¹, 较早晨降低了 44.86 ul·L⁻¹; 此后有所回升。WUE 日变化趋势与 RH 一致, 最高值 4.80 umol·mmol⁻¹ 出现在上午 7: 00, 9: 00 以后由于 Tair 明显上升, RH 降低, Tr 急剧上升, WUE 下降明显, 至 15: 00 降至最低值 0.77 umol·mmol⁻¹ (图 6)。

2.2 光合作用的光响应曲线

由配置红蓝光源设定不同光合有效辐射强度下测定的净光合速率 (图 7) 可知, 当 PPED 在 0—200 umol·m⁻²·s⁻¹ 左右时, 龟甲竹 Pn 几乎呈直线上升, 当 PAR 超过 400 umol·m⁻²·s⁻¹ Pn 上升幅度减少, 渐渐趋于平衡。

光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP) 和表观量子效率 (AQY) 是指示植物光合反应的重要指标^[10]。由表 1 可知, 龟甲竹的 LCP 为 14.93 umol·m⁻²·s⁻¹, LSP 为 812.58 umol·m⁻²·s⁻¹, 说明龟甲竹光适应能力的幅度较小, 利用强光的能力较弱; AQY 为 0.053, 最大光合速率 (P_{max}) 为 9.18 umol·m⁻²·s⁻¹, 均反映出龟甲竹利用弱光能力较强。

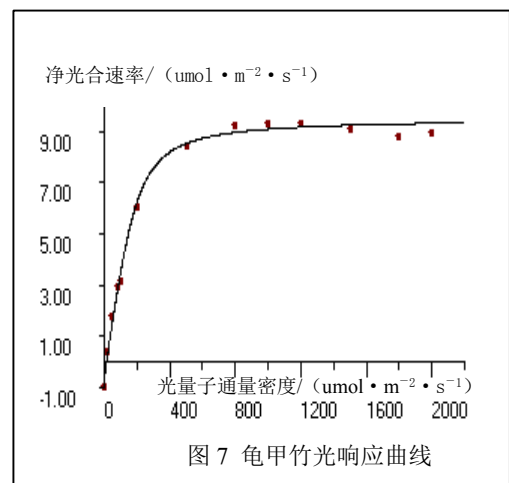


图 7 龟甲竹光响应曲线
Figure 7 Light response curve of *Phyllostachys heterocyclus* H. de Lehaie

表 1 龟甲竹光合特征参数

Table 1 The parameters of light response curves

LCP umol·m ⁻² ·s ⁻¹	LSP umol·m ⁻² ·s ⁻¹	Pmax umol·m ⁻² ·s ⁻¹	AQY
14.93	812.58	9.18	0.053

2.3 生理生态因子对龟甲竹光合作用的影响

2.3.1 龟甲竹光合速率与主要生理生态因子的相关分析

从表 2 的简单相关系数矩阵看出, 龟甲竹 Pn 与 Ci、Vpdl 呈负相关关系, 与 PPED、Cond、Ca、Tr

呈显著或极显著正相关。说明当 PPED 增强，温度上升，龟甲竹 Pn 随之升高，伴随着 Vpdl、Tr 也有升高的现象。

2.3.2 龟甲竹光合速率与主要生理生态因子的回归分析

为定量了解生理生态因子对龟甲竹光合作用的影响，将 Pn 与影响因子的测定数据进行逐步回归分析，建立关系方程式如下：

$$Y_{Pn} = -8.949 + 54.429X_{Cond} + 0.072X_{RH} + 0.210X_{Tleaf} + 0.0008X_{PPED} \quad R^2 = 1.000, F = 100811, p = 0.0024$$

模型的相关性达到了极显著水平，且具有很好的拟合值（表 3），表明其具有较强的预测能力。模型选取 Cond、RH、Tleaf 和 PPED 4 个因子，说明影响龟甲竹 Pn 日变化的主要生理生态因子是 Cond、RH、Tleaf、PPED。

表 2 龟甲竹光合速率（Pn）及主要生理生态因子的相关关系矩阵

Table 2 The correlative matrix on photosynthetic rate of *Phyllostachys heterocycla* H. de Lehaie and its effective factors

影响因子 factor	光合速率 Pn	气孔导度 Cond	大气 CO ₂ 浓度 Ca	蒸腾速率 Tr	相对湿度 RH%	叶面温度 Tleaf	大气温 Tair	水气压差 Vpdl	光量子通量 PPED	胞间 CO ₂ 浓度 Ci
Pn	1.000									
Cond	0.968**	1.000								
Ca	0.305*	0.193	1.000							
Tr	0.607**	0.755**	-0.458**	1.000						
RH	0.214	0.088	0.989**	-0.545	1.000					
Tleaf	0.025	0.083	-0.915**	0.576*	-0.935**	1.000				
Tair	-0.164	-0.094	-0.967**	0.475*	-0.970**	0.980**	1.000			
Vpdl	-0.102	0.015	-0.969**	0.602*	-0.989**	0.960**	0.968**	1.000		
PPED	0.876**	0.946**	-0.129	0.915*	-0.227	0.371**	0.213	0.319*	1.000	
Ci	-0.535**	-0.596**	0.165	-0.556	0.251	-0.350*	-0.212	-0.375**	-0.611**	1.000

表 3 光合速率的观察值与拟合值

Table 3 Observational values and simulated values of Pn

时间 Time	观测值(umol·m ⁻² ·s ⁻¹) Observed value	拟合值(umol·m ⁻² ·s ⁻¹) Fitted value	拟合误差 Fitted error
7: 00	1.56889	1.56819	0.00070
9: 00	4.25111	4.25107	0.00005
11: 00	3.10500	3.10439	0.00061
13: 00	1.26911	1.27106	-0.00195
15: 00	0.42686	0.42321	0.00364
17: 00	0.73711	0.74017	-0.00306

进一步对逐步回归中选取的几个因子与 Pn 进行偏相关系数分析，可看出（表 4），龟甲竹 Pn 日变化与影响因子 PPED、RH、Cond 和 Tleaf 的相关关系均达到了极显著水平。经通径分析，从直接作用绝对值大小看，影响 Pn 的主要因子顺序为 RH>Tleaf>Cond>PPED（表 5）。

表4 光合速率与生理生态因子的偏相关分析

Table 4 Partial correlation analysis between Pn and its effective factors

因子 Factor	偏相关系数 Partial correlation	T 检验 The value of T test	显著水平 P Significance level P
r(Pn,Cond)	0.99959	34.99721	0.00082
r(Pn,RH)	0.99996	111.63859	0.00008
r(Pn,Tleaf)	0.99997	135.11891	0.00005
r(Pn,PAR)	0.99771	14.76604	0.00456

表5 净光合速率与生理生态因子的通径系数分析

Table 5 Path coefficients between Pn of *Phyllostachys heterocyclus* H. de Lehaie and its effective factors

参数 Parameter	直接通径系数	间接通径系数 Indirect effect			
	Direct effect	Cond	RH	Tleaf	PPED
Cond	0.59512		0.07515	-0.05648	0.24171
RH	0.85395	0.05237		-0.63412	-0.05803
Tleaf	0.67850	0.04954	-0.79809		0.09483
PPED	0.25555	0.56289	-0.19392	0.25178	

3 讨论

3.1 光合作用

在自然条件下,当光照强度达到饱和、CO₂浓度和O₂浓度正常,温度最佳、相对湿度较高、所有这些生态因子都处于最佳状态时的光合速率,就是该种植物的光合作用能力,它反映了其光合作用潜力^[11]。植物光合作用潜力与其本身的遗传特性、生存资源环境,以及光合羧化酶的羧化活性等内外因素有关^[12]。由于光合作用与植物生长地的环境条件有密切关系,光合作用的某些生理参数,如P_{max}、LSP、LCP等,已成为植物速生丰产以及制定栽培措施的科学依据^[13]。一般阳生草木植物的LSP为1000—1500 umol·m⁻²·s⁻¹、LCP为10—40 umol·m⁻²·s⁻¹,P_{max}为15—30 umol·m⁻²·s⁻¹^[14]。本研究测得龟甲竹LCP为14.93 umol·m⁻²·s⁻¹,说明龟甲竹利用弱光的能力强,具有一定的耐荫性;LSP为812.58 umol·m⁻²·s⁻¹,表明龟甲竹进行光合作用的适宜光强要求并不高;龟甲竹的AQY为0.053,高于自然条件下一般植物的AQY0.03—0.05^[15],接近典型的阳生耐荫植物地毯草0.059^[16]及狼尾草0.056^[17],进一步说明龟甲竹能够在较弱的光照环境下充分利用光能,具有较强的弱光适应能力,而龟甲竹的成熟叶片的光合速率最大也仅有9.18 umol·m⁻²·s⁻¹,说明龟甲竹的叶片光合能力较低,这可能是因为测定时期为龟甲竹地下鞭生长旺盛,需要养分、水分较大,因而在栽培中应加强肥水管理,尽可能保证整个植株的需要,维持叶片旺盛的生理功能,使叶片的光合能力较长时间维持在较高水平,以最大限度地制造光合产物。

3.2 影响因子

影响光合作用的因子是复杂而多变的, 龟甲竹叶片净光合速率与主要生理生态因子的相关分析和多元回归分析表明: 影响 Pn 日变化的主要因子按相关性排序为 RH>Tleaf>Cond>PPED。Cond 的日变化规律同 Pn 的变化规律存在一定的相似性, 这种变化规律与许大全^[18]提出的 Pn 对 Cond 具有反馈调节作用的想法相一致。本研究龟甲竹叶片自身的光合能力在一天中是相对稳定的, Pn 日变化是由于光合有效辐射引起的 Tleaf 升高, 从而引起一系列的生理因素的变化。因此认为, 龟甲竹光合日变化是受环境因子及生理因子共同影响的。

在田间条件下光照很难控制, 而空气相对湿度、土壤水分供应可通过叶片含水量影响光合作用, 良好的叶片水分状况可明显改善高温低湿条件下的光合性能^[19-21]。在栽培条件下, 灌溉喷水都可以不同程度地提高板栗^[22]光合作用, 喷灌甚至可使番荔枝^[23]的“光合午休”现象消失, 所以地下鞭系生长旺盛期龟甲竹生产上应加强水分管理, 适时灌溉降低环境温度, 增加空气湿度, 减少水分蒸腾, 提高光合水平。

参考文献

- [1] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. 毛竹光合动态研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(5): 551-555.
- [2] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. CO₂ 浓度倍增下毛竹光合作用对光照强度的季节响应[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(2): 215-219.
- [3] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀 等. 毛竹光合作用对环境因子的季节响应[J]. 广西植物, 2007, 27(6): 932-928
- [4] 郑炳松, 金爱武, 程晓建, 等. 雷竹光合特性的研究. 福建林学院学报, 2001, 21(4): 359-362
- [5] 高贵宾, 顾小平, 张小平, 等. 设施内外绿竹光合作用日变化及影响因子研究[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(3): 494-498
- [6] 黄勇. 绿竹种源的光合特性研究[J]. 福建林业科技, 2003, 30(3): 50-53, 72
- [7] 陈双林, 杨清平, 郭子武. 主要环境因素对小佛肚竹出笋、成竹和畸形秆率的影响[J]. 四川农业大学学报, 2008, 26(1): 117-120
- [8] Bassman J, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoids* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoids* clone [J]. Tree Physiol, 1991, 8: 145-159
- [9] 王满莲, 韦霄, 蒋运生, 等. 野生与栽培黄花蒿净光合速率对光强和 CO₂ 浓度的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(1): 45-49
- [10] 王旭军, 吴际友, 廖德志, 等. 长沙市城市森林树种深山含笑光合特性研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6): 120-123.
- [11] 朱万泽, 王金锡, 薛建辉, 等. 四川桉木光合生理特性研究[J]. 西南林学院学报, 2001, 21(4): 196-204.
- [12] 赵敏, 叶萌, 严晓宇, 等. 黄柏幼树光合特性研究[J]. 林业科技开发, 2007, 21(5): 43-46
- [13] 朱万泽, 王金锡, 薛建辉, 等. 台湾桉木引种的光合生理特性研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2012-2019.
- [14] 翟志习, 郭玉海, 马永泽, 等. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1997, 67, 78.
- [15] 邱国雄. 植物光合作用的效率[A]. 余叔文. 植物生理和分子生物学[C]. 北京: 科学出版社, 1992: 236-243
- [16] 蹇洪英, 邹寿青. 地毯草的光合特性研究[J]. 广西植物, 2003, 23(2): 181-184
- [17] 巨关升, 武菊英, 赵军锋, 等. 观赏狼尾草光合特性的研究[J]. 核农学报, 2005, 19(6): 451-455

- [18] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学报, 1997, 33(4): 241-244.
- [19] 张俊佩, 王红霞, 高仪, 等. 核桃(*Juglans regia* L.). 光合影响因子的研究[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(3): 33-36
- [20] 金爱武, 郑炳松, 陶金星, 等. 雷竹光合速率日变化及其影响因子[J]. 浙江林学院学报, 2000, 17(3): 271-275
- [21] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 施肥结构对茶树(*Camellia sinensis* (L.)Kuntze) 光合作用及其生态生理因子日变化的影响. 生态学报, 2008, 28(1): 84-90.
- [22] 刘庆忠, 董合敏, 刘鹏, 等. 板栗的光合特性研究. 果树学报, 2005, 22(4): 335-338
- [23] 游恺哲. 几种南亚热带常绿果树光合特性的研究[J]. 中国青年农业科学学术年报[C]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 950-953

论文摘要

中国竹林认证可行性探析

徐斌 夏恩龙

(中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091)

摘要 在全球可持续经营的背景下, 人们积极寻求有效的缓解生态环境压力、促进森林可持续经营的途径和方法。而竹林作为一种特殊的林分, 对于可持续经营具有特殊的意义, 开展竹林认证成为未来竹产业发展的趋势。中国是世界上最主要的竹产品生产国, 竹子在我国经济和社会生活中扮演着重要的角色。

本研究采取访谈、问卷、考察相结合的调查方式, 在参照国内外森林认证经验的基础上, 立足于中国竹林发展的实际情况, 选取了能代表中国竹林经营现状的四个典型地区浙江安吉县、福建永安市、重庆开县和湖南炎陵县, 从竹林经营现状和竹产业发展情况等方面进行对比分析, 并从经营水平、经济可行性、不同经营模式等角度阐述了我国开展竹林经营认证的必要性和可行性, 并给出恰当的政策性建议。通过实地调查和分析研究我们认为:

竹产业在我国经济、生态和社会发展中占有重要的地位, 积极发展竹林产业是我国林业发展的重要环节。在国际市场的需求不断增长和竹林可持续发展的要求下, 开展竹林认证是我国竹产业发展的一个必然过程。我国开展竹林认证对于提高我国竹林的可持续经营水平, 规避绿色贸易壁垒, 促进我国竹产业的长期健康发展具有重要的意义。

综合来看, 我国发展竹林认证已经具有较好的基础和条件, 目前我国具有较完备的政策法规的支持、竹林权属基本明确、经营技术在稳步提高, 竹林经营具有较高的环境、社会和经济效益, 基本可以满足认证的要求。从成本效益来说, 竹林认证将为认证企业带来更多的市场机会和更高的市场收益, 符合国际绿色环保产品的要求。从我国几个具有代表性地区的调查显示, 不同的竹林经营形式认证的能力有很大的不同, 我国竹林认证能力强弱依次为: 林场>企业+农户>承包大户(集体经营)>农户联合经营。但同时, 竹林认证也面临着一些挑战, 如总体上部分地区经营水平较低, 而部分地区集约经营程度过高导致竹林生物多样性下降、病虫害严重、地力衰退等问题, 以个体经营为主体导致认证主体在经营和管理能力不足。

在我国开展竹林认证过程中, 笔者建议: 积极解决认证动力及费用, 积极寻求企业和其他机构的合作; 根据认证主体的不同, 合理选择有效的认证模式; 加强政策支持与能力建设, 积极推动项目和资金的支持; 加强宣传和教育, 建立信息交流平台; 积极开展研究和技术推广, 加强技术培训。

关键词 竹林经营认证; 经营方式; 经营水平; 成本效益; 可行性

主题二 竹林生态系统生物多样性保护

Theme II. Bamboo Forest Ecosystems and Biodiversity Conservation

研究论文

毛竹林物种多样性对集约经营的响应模型

杨清培¹ 时培建¹ 赵广东^{2*} 杨光耀¹ 于芬¹

(1. 江西农业大学江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 江西南昌, 330045;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京, 100091)

摘要 根据岛屿生物地理学理论及物种—面积关系 ($S = cA^z$), 构建数学生态模型, 研究集约经营对毛竹林物种多样性的影响。结果表明: (1)天然竹林面积对集约经营造成物种数目变化的程度不同, 即原竹林越大, 物种数目减少幅度就越大, 原竹林越小, 物种数目减少幅度就越小; (2)毛竹林诱导扩张过程符合 Logistic 方程, 随着时间的增加, 竹林内物种多样性会达到极限。

关键词 毛竹林; 集约经营; 物种多样性; 灭绝债务

Simulation of Species Diversity in Moso Bamboo Forest Responses to the Habitat Destruction due to Intensive Management

YANG Qing-pei¹, SHI Pei-jian¹, Zhao Guang-dong^{2*}, Yang Guang-yao¹, Yu Feng¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Institute of Forest Ecology Environment and Protection, CAF, Beijing 100091)

Abstract: Based on the theory of island biogeography and its species-area relationship: $S = cAz$, mathematic ecological models were established to analyze the changes of species diversity in Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forests and / or woody forests' responses to the habitat destruction due to intensive management. Here the activity range of species not-including the borders of forests is also considered as a part of the area in the species-area formula. The following were found: (1) intensive management had an influence on species diversity in the bamboo forest (i.e. the larger the area of forest was, the larger the species loss was; the smaller the area of forest was, the smaller the species loss was during intensive management); (2) the expansion to woody forest of the moso bamboo forest fulfils the Logistic equation, and the loss of species diversity, z , could reach its limit as the time t went.

Key words: Moso Bamboo forest; intensive management; species diversity; destruction debt

科技的高速发展和人口的快速增长, 不断加剧的人类活动, 破坏了越来越多的生境, 而生境破坏进一步导致了全球范围的生物多样性丧失, 这使得生境破坏对物种多样性影响的研究成为国际上生态学和生物多样性保护研究的热点内容之一^[1-3]。毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. De Lehaie)是中国南方林区十分重要的经济价值很高的笋材两用竹种^[4]。随着社会对其笋材需求的急剧增加, 出

现了对毛竹林的集约经营（劈山、复垦、施肥等），这使许多原先处于天然粗放的竹林进入了集约经营状态^[5]。许多研究表明，这种经营干扰不但改变了竹林的群落结构，而且也改变了林内的环境条件，从而导致林内动植物种类和数量发生了较大的变化^[6-8]；但这些研究主要集中在人类经营对毛竹林群落结构及植物多样性的静态研究，不具有时空动态性。因此，本文试从集约经营面积的不断扩大和诱导扩张时间的逐渐延长两个角度，分析集约经营对毛竹林物种多样性的影响，从而为毛竹林的科学经营和物种多样性保护提供参考，具有一定的理论生态学意义。

1 理论基础与假设

岛屿生物地理学中关于物种—面积关系的经典公式^[9]为：

$$S = cA^z \quad (1)$$

式(1)中： S 表示物种数目； A 表示栖息地岛屿面积； z 是无维参数，在0.18-0.35间； c 是比例常数。假设天然粗放毛竹林、竹阔混交林或阔叶林中的一些物种可以在集约经营毛竹纯林中活动，虽然这些物种不能长久在这里生活，但在物种—面积关系公式中，栖息地岛屿的面积还应该包括物种距离栖息地岛边界向外活动的范围（图1）。

2 模型构建与分析

2.1 毛竹林集约经营对生物多样性影响的模型

为了方便分析，借鉴 Tilman 等^[10]构建广义生态位模型思路，假设某天然粗放毛竹林是矩形的，长为 a ，宽为 b ，原林地的物种数目为 S_1 ，面积为 A_1 ；正在集约经营毛竹（图1左下角）也是矩形的，长为 D_1 ，宽为 D_2 ，物种活动的距离为 d （图中阴影部分）；未被经营竹林地物种数为 S_2 ，面积为 A_2 ，则有：

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \frac{cA_2^z}{cA_1^z} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^z \\ &= \left(1 - \frac{D_1 D_2 + d^2 - \frac{\pi}{4} d^2}{ab + 2d(a+b) + \pi d^2} \right)^z \end{aligned} \quad (2)$$

如果正在集约经营的毛竹林的长、宽总呈比例增长，令其长度为 D ，其宽就为 Db/a （这里的 a 、 b 是粗放毛竹林的长和宽），其面积为 q （图1），则公式(2)变为：

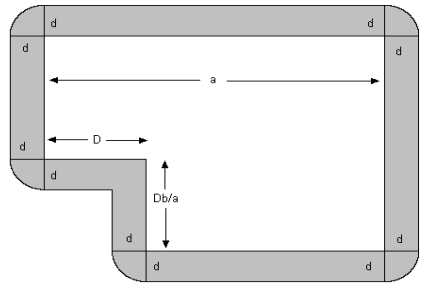


图1 集约经营面积扩张与天然粗放竹林示意图

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \left(1 - \frac{\frac{b}{a}D^2 + d^2 - \frac{\pi}{4}d^2}{ab + 2d(a+b) + \pi d^2} \right)^z \\ &= \left(1 - \frac{q + d^2 - \frac{\pi}{4}d^2}{ab + 2d(a+b) + \pi d^2} \right)^z \end{aligned} \quad (3)$$

将 S_2/S_1 简记为 p ，用来表示剩余天然竹林物种数目占原天然竹林物种数目的比例，则 $1-p$ 就表示集约经营对竹林物种数目的影响程度。

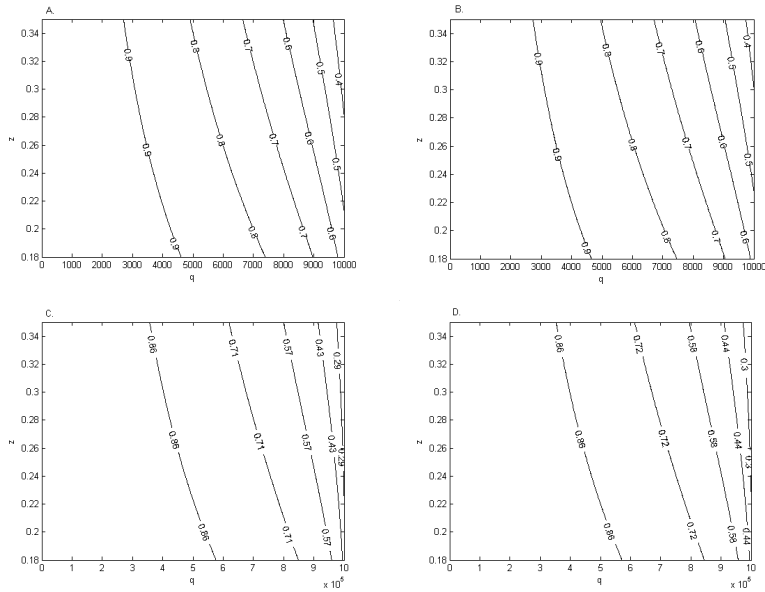
在公式(3)中，当 $D \rightarrow a$ 时， $D^2 b/a \rightarrow ab$ ，即有 $q = ab$ ，那么

$$p \approx \left(\frac{2d + \frac{5\pi d^2}{4(a+b)} - \frac{d^2}{a+b}}{\frac{ab}{a+b} + 2d + \frac{\pi d^2}{a+b}} \right)^z \quad (4)$$

a 和 b 决定了竹林的形状和面积，当 a 和 b 较大而 d 较小时，则有：

$$p \approx \left(\frac{2d}{\frac{ab}{a+b} + 2d} \right)^z \quad (5)$$

当 $a, b \geq 2d$ 时， $ab \geq a+b$ ；此时，若 $ab/(a+b) \geq 2d$ 对 p 值产生影响的变量是 a 、 b 和 z 。图2直观地展示了这3个变量对 p 值的影响。由图可以清晰地看出：在集约经营过程中，竹林形状对物种多样性的影响类似，但在干扰破坏比例相同时，面积较大的竹林相对于较小竹林而言，损失的物种比例更大。



(A) 小面积方形竹林 $a=100, b=100$; (B) 小面积矩形竹林 $a=200, b=50$;
 (C) 大面积方形竹林 $a=1000, b=1000$; (D) 大面积矩形竹林 $a=2000, b=500$ 。

图2 集约经营对不同形状和面积竹林多样性的影响 (P 值随竹林面积、形状与 Z 值的关系)

由图2还可看出: 在 z 值正常的取值范围内, 栖息地破坏都会引起灭绝债务问题, 即当栖息地破坏增大到一定临界值时, 每增加一个单位的栖息地破坏就会引起很多的物种灭绝^[11-12]。

为了反映灭绝债务问题, 可以对 $1-p$ 求偏导数

$$Q = \frac{\partial(1-p)}{\partial q} = \frac{z}{ab + 2d(a+b) + \pi d^2} \left(1 - \frac{q + d^2 - \frac{\pi}{4} d^2}{ab + 2d(a+b) + \pi d^2} \right)^{z-1} \quad (6)$$

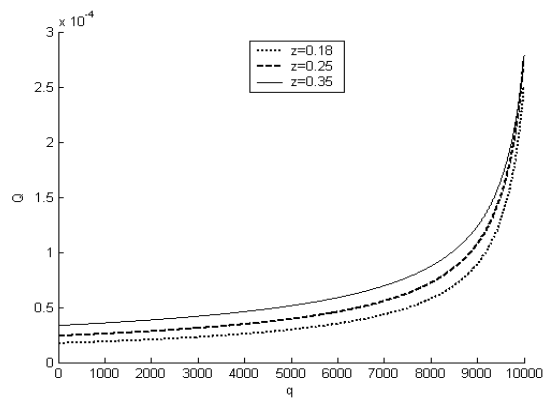


图3 毛竹林不同 z 值下的灭绝债务

图3 (此时设定 $a=100, b=100$) 给出了不同 z 值下的 Q 随 q 增加的变化情况。由图3可以看出: 当 q 在 $[9000, 10000)$ 的范围内, Q 迅速增大。这说明毛竹林在一定的集约经营面积范围内, 物种数

目仍然保持原来物种数目的一半左右，但当经营干扰到原有竹林面积的 9/10 处，物种数目快速减少，减少程度与原竹林面积大小有密切的关系，即原有竹林的面积越大， q 在其面积比例的 [9/10, 1) 处下降的幅度越大。

2.2 诱导毛竹林扩张对生物多样性的影响

为了扩大竹林的面积和提高毛竹林产量，在毛竹经营过程中，一方面，环割致死林缘杂木，通过毛竹林强大的扩鞭能力，向杂木林扩张入侵；另一方面，限制林内杂木树种恢复更新。这样就导致了竹阔混交林，甚至是阔叶林逐渐转变成毛竹纯林^[4-5,13]。

假设只有阔叶林向毛竹林单向转变而不可逆，则有

$$\frac{d\tilde{A}_2}{dt} = r\tilde{A}_2(\tilde{A}_1 - \tilde{A}_2) - m\tilde{A}_2 \quad (8)$$

式(8)中： r 表示毛竹林的扩张率； m 表示环境对毛竹林扩张的抑制率， \tilde{A}_1 表示包括竹林在内的森林面积， \tilde{A}_2 表示扩张到 t 时刻的毛竹林面积，亦可 $\tilde{A}_2(t)$ 表示，这个微分方程的解为：

$$\tilde{A}_2(t) = \frac{\tilde{A}_1 - m/r}{1 + \left(\frac{\tilde{A}_1 - m/r}{\tilde{A}_2(0)} - 1 \right) \exp[(m - \tilde{A}_1 r)t]} \quad (9)$$

结合图 1，式(9)中： $\tilde{A}_2(0)$ 表示毛竹林的初始面积，是一个常数，令其为 $D^2(0)b/a$ ； $\tilde{A}_2(t) = D^2(t)b/a$ ； $\tilde{A}_1 = ab$ 。公式(8)可以写作：

$$\frac{dD}{dt} = \frac{D}{2} \left[r \left(ab - \frac{b}{a} D^2 \right) - m \right] \quad (10)$$

这个方程的解为

$$D^2(t) = \frac{a^2 - am/(br)}{1 + \left[\frac{a^2 - am/(br)}{D^2(0)} - 1 \right] \exp[(m - abr)t]} \quad (11)$$

当 $t \rightarrow +\infty$ 时，在 $ab \geq m/r$ 的条件下，则

$$\hat{D} = \sqrt{a^2 - \frac{am}{br}} \quad (12)$$

进而可以得到毛竹林增长的极限面积为：

$$\frac{b}{a} \hat{D}^2 = ab - \frac{m}{r} \quad (13)$$

将(11)式的平方根代入(3)式，可用以分析不同时间内毛竹林扩张导致物种数目减少的趋势。毛

竹林扩张过程中对生物栖息地的破坏和剩余森林内物种数目的变化趋势见图 4。由图 4 可知：毛竹林诱导扩张符合 Logistic 方程。同时，随着时间的增加，地域森林内物种多样性会降低到极限值，且 Z 值越大，物种多样性减少的程度就越大。

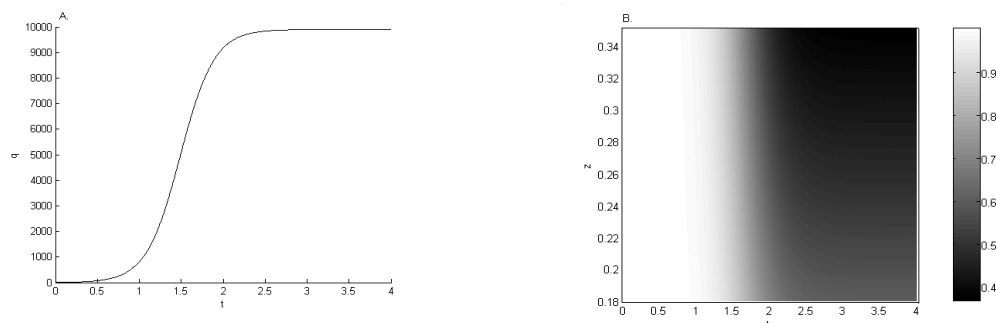


图 4 毛竹林扩张对剩余森林内物种数目影响

(A) 毛竹林的扩张趋势曲线; (B) 毛竹林扩张对剩余森林物种多样性的影响 (设 $a=200, b=50, d=1, D(0)=5, r=0.0005, m=0.05$)

3 总结

假设岛屿生物地理学的物种—面积公式中，面积不但包括栖息地岛本身的面积，还包括栖息地内物种沿边界所能活动的范围，同时假设竹林是一个简单的矩形，分析集约经营过程中，剩余竹林内物种的数目和原竹林物种的数目比值（即 p ），作为衡量集约经营对竹林栖息地破坏，导致对物种数目影响的一个核心指标，随着经营面积增加所发生的变化。

模型分析表明，原竹林面积的大小对 p 值有重要影响，在集约经营过程中，不同竹林形状对物种数目减少的影响相似，但原竹林面积越大，物种数目减少幅度就越大。

另外，在毛竹经营过程中往往环割杂木诱导毛林向阔叶林扩张，假设毛竹林可以侵入扩张到阔叶林，而后者不能转变成毛竹，导致剩余阔叶林物种数目进一步减少。毛竹林诱导扩张符合 Logistic 方程，即存在一定的扩张极限面积。同时，随着时间的增加，森林内物种多样性会降低到极限值。这一极限值与原森林的形状、面积以及毛竹林的扩散率和死亡率都有关系。

本研究仅仅为毛竹林物种多样性对集约经营的响应模型的理论探讨，文中的假设是根据动物的觅食、活动、繁殖的空间性或竞争性提出，相关验证实验有待进一步开展。

参考文献

- [1] Haila Y. A conceptual genealogy of fragmentation research: from island biogeography to landscape ecology[J]. Ecological Applications, 2002, 12(2), 321-334
- [2] Hanski I. Metapopulation dynamics[J]. Nature, 1998, 396, 41-49
- [3] Deconchat M, Balent G. Vegetation and bird community dynamics in fragmented coppice forests[J]. J Forestry, 2001,

- [4] 郑郁善. 面向 21 世纪毛竹林生态经营战略[J]. 林业经济问题, 2000, 20(4): 203-206
- [5] 陈存及. 竹木混交林的科学经营[J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(1): 5-9
- [6] 郑成洋, 何建源, 罗春茂, 等. 不同经营强度条件下毛竹林植物物种多样性的变化[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 1-6
- [7] 高志勤, 傅懋毅. 不同结构毛竹林下植被物种多样性比较[J]. 浙江林业科技, 2005, 25 (4): 1-5
- [8] 张刚华. 不同类型毛竹林结构特征与植物物种多样性研究[D]. 中国林业科学研究院博士学位论文, 2006
- [9] Diamond J M, May R M. Island biogeography and the design of natural reserves[M] /May R M. Theoretical Ecology: Principles and Applications. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1981: 163-186
- [10] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: Theoretical considerations [J]. PNAS, 1997, 94: 1857-1861
- [11] Tilman D, Lehman C L, Yin C. Habitat destruction, dispersal, and deterministic extinction in competitive communities[J]. The American Naturalist, 1997, 149: 407-435
- [12] Tilman D, May R M, Lehman C L, *et al.* Habitat destruction and the extinction debt[J]. Nature, 1994, 371: 65-66
- [13] 丁丽霞, 王祖良, 周国模, 等. 天目山国家级自然保护区毛竹林扩张遥感监测[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(3): 297-300

毛竹林植物物种组成及其多样性研究

张刚华

(江西理工大学, 江西赣州, 341000)

摘要 通过对毛竹林植物物种组成与多样性的研究, 结果表明: (1) 毛竹林内植物物种是丰富的, 但大部分物种是脆弱的。在调查面积 13 800 m² 毛竹林地上, 有植物 92 科 211 属 334 种, 并以禾本科、蔷薇科、菊科植物为优势, 以淡竹叶、求米草、白花败酱为优势草本植物, 以欏木、胡枝子、矩圆叶鼠刺为优势木本植物; (2) 乔木层植物物种多样性与林下木本植物多样性相关显著, 与草本植物物种多样性相关不显著, 乔木层物种多样性指数小于林下植物物种多样性指数; (3) 木本物种多样性指数, 竹阔混交林 > 竹针混交林 > 毛竹纯林, 粗放经营竹林 > 中等集约经营竹林 > 集约经营竹林; (4) 林下草本物种多样性指数, 竹针混交林 > 毛竹纯林 > 竹阔混交林, 中等集约经营竹林 > 粗放经营竹林 > 集约经营竹林; (5) 竹阔混交林向毛竹纯林转型时, 林下木本植物部分丧失, 而草本植物可能增加, 也可能减少。

关键词 毛竹林; 物种组成; 多样性

Species Composition and Diversity in Moso Bamboo Forest

ZHANG Gang-hua¹, XIAO Jiang-hua²,

(1. College of Architectural, Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

2. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China;)

Abstract: The species composition and diversity of moso bamboo stands were researched at Yongan, Fujian Province which was main distribution region of moso bamboo. The results were showed as flow: I, the species in moso bamboo stands was abundant but lots of species were endangered. At the sample plots of 13 800m², in total 92 families, 211 categories and 334 species were identified. Gramineae, Rosaceae and Composita were the predominant families at plots. *Lophatherum acile*, *Oplismenus compositus*, *Patrinia villosa* were the predominant herb. *Loropetalum chinensis*, *Lespedeza bicolor* and *Itea chinensis* var. *oblonga* were the predominnat shrub. II, the diversity of tree layer correlated significantly with species diversity of shrub layer, but poorly with species diversity of herbage layer. The species diversity index of tree layer was lower than those of shrub and herbage layer. III, the numerical relationship of species diversity index at moso bamboo stands of different type were: bamboo mixed stand with hardwood > bamboo mixed stand with conifer > pure bamboo stand, and extensive management bamboo stand > mid-intensive management bamboo stand > intensive management bamboo stand at the tree and shrub layer. IV, the numerical relationship of species diversity at herbage layer were: bamboo mixed stand with conifer > pure bamboo stand > bamboo mixed stand with hardwood and mid-intensive mangament bamboo stand > extensive management bamboo stand > intensive management bamboo stand. V, when bamboo mixed stands with hardwood were turned to pure bamboo stands, lots of tree species under canopy would be lost easily, but amount of herbage species under canopy might be increased or decreased too.

Key words: moso bamboo stand; species composition; diversity

近年来,生物多样性研究是生态学研究中的一个热点,在生物多样性理论探索、现状、生物多样性与生态系统功能等方面进行了较多研究^[1-11],但生物多样性的理论与方法等方面仍处于起步阶段^[4],而在竹林生物多样性方面研究更少^[7,12-14],对其遗传多样性研究,辉朝茂等^[5]指出云南是亚洲竹类的起源中心,要加强珍稀竹种种质资源的抢救和保护研究。对竹林中物种多样性研究表明,人为干扰对多样性影响很大,长期经营后,竹林群落层次结构简化,降低了灌木层物种多样性^[6],人为干扰强度增大,林下植物的丰富度、多样性指数随之减少^[7,17];也有研究认为,经营干扰后竹林乔木层物种多样性下降,而灌木层和草本层物种多样性上升^[13]。对不同类型竹林而言,在毛竹(*Phyllostachys pubescens*)经营林分和天然竹阔混交林中,乔木、灌木物种多样性,经营林分低于天然竹阔混交林;草本物种多样性,经营林分高于天然竹阔混交林^[14]。已有的竹林物种多样性研究不够系统全面,且部分调查面积较小,仅1 600 m²^[14],群落类型少,涉及了毛竹纯林或竹阔混交林^[7,14]。本文在已有研究的基础上,从毛竹纯林、竹阔混交林、竹针混交林三种群落类型和集约经营竹林、中等集约经营竹林、粗放经营竹林三种经营水平类型方面对我国毛竹重点分布区的毛竹林物种多样性进行研究。

1 研究地概况

研究区为福建省永安市天宝岩国家级自然保护区及周边地区,自然保护区地理位置为117°28'3"~117°35'28"E、25°50'51"~26°1'20"N,属中亚热带海洋性季风气候,年平均气温15℃,年平均降水量2 039 mm,多集中于5—9月,年平均相对湿度80%以上。地带性土壤为红壤,另有山地黄红壤、山地黄壤。

天宝岩国家级自然保护区在植物地理上属于泛北极植物区系与古热带植物区系的过渡地带,有8个主要植被类型,分别为:常绿针叶林、常绿针阔叶混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、山顶苔藓矮曲林、竹林、灌草丛、沼泽湿地;区内已定名的维管束植物种类有185科688属1 512种,其中被子植物140科597属1 316种,裸子植物8科20属27种,蕨类植物37科71属169种。

2 研究方法

2.1 样地设置

福建省永安市是我国毛竹林重点分布区,调查区为永安市天宝岩自然保护区及周边区,保护区设置样点4个,分别是核心区的西洋镇沟墩坪、缓冲区和周边区(的西洋镇桂溪村、上坪乡上坪村、

青水乡龙头村；周边区设置样点 2 个，分别是洪田镇东坑村、湍石村。每个样点依毛竹林群落类型分别设置 3~4 个类型样方每类型 3 个重复，总样方 69 个 (23 × 3)，乔木层样方面积为 20 m × 10 m。由于大多数样地不具备灌木层次，因此在样地林下植物中草本和木本调查样方设置时，根据具体的样地情况进行，不具备灌木层样地设置草本样方，大小为 1 m × 1 m，10 个重复；具备灌木层的样地增设木本样方，面积 2 m × 5 m，10 个重复。

表 1 毛竹林各调查样方基本情况

样地号	群落类型	地点	经度 (E)	纬度 (N)	海拔 / m	土壤类型	经营类型
1-1	竹针	洪田镇东坑村	117°15'24"	25°50'09"	275	山地黄壤	粗放
1-2	纯竹	洪田镇东坑村	117°15'24"	25°50'11"	260	山地黄壤	中等集约
2-1	竹针	洪田镇湍石村	117°16'38"	25°48'33"	522	山地红壤	集约
2-2	竹针	洪田镇湍石村	117°16'39"	25°48'34"	523	山地红壤	集约
2-3	竹阔	洪田镇湍石村	117°16'20"	25°49'00"	543	山地红壤	中等集约
2-4	纯竹	洪田镇湍石村	117°16'20"	25°49'00"	543	山地红壤	中等集约
2-5	竹针	洪田镇湍石村	117°16'13"	25°48'43"	479	山地黄壤	中等集约
2-6	纯竹	洪田镇湍石村	117°16'16"	25°48'39"	493	山地黄壤	中等集约
2-7	竹针	洪田镇湍石村	117°16'18"	25°48'39"	512	山地黄壤	中等集约
3-1	纯竹	上坪乡上坪村	117°30'18"	25°57'39"	1128	山地黄壤	中等集约
3-2	竹针	上坪乡上坪村	117°29'30"	25°58'06"	1152	山地黄壤	粗放
3-3	纯竹	上坪乡上坪村	117°30'39"	25°58'11"	1136	山地黄壤	集约
3-4	竹阔	上坪乡上坪村	117°30'47"	25°58'53"	1187	山地黄壤	粗放
4-1	竹阔	西洋镇沟墩坪	117°31'33"	25°55'50"	1083	山地黄壤	中等集约
4-2	竹针	西洋镇沟墩坪	117°31'27"	25°55'37"	1125	山地黄壤	粗放
4-3	竹阔	西洋镇沟墩坪	117°31'43"	25°55'51"	1080	山地黄壤	中等集约
5-1	纯竹	西洋镇桂溪村	117°29'28"	25°53'30"	582	山地红壤	粗放
5-2	纯竹	西洋镇桂溪村	117°29'28"	25°53'23"	835	山地黄壤	集约
5-3	竹阔	西洋镇桂溪村	117°29'08"	25°53'49"	705	山地红壤	集约
5-4	竹阔	西洋镇桂溪村	117°29'08"	25°54'05"	849	山地黄壤	粗放
6-1	竹阔	青水乡龙头村	117°33'01"	25°56'58"	723	山地黄壤	粗放
6-2	竹针	青水乡龙头村	117°33'12"	25°57'26"	712	山地黄壤	中等集约
6-3	纯竹	青水乡龙头村	117°33'19"	25°57'34"	689	石质壤土	中等集约
C-1	林隙	西洋镇沟墩坪	117°31'27"	25°55'37"	1125	山地黄壤	
C-2	阔叶林	洪田镇湍石村	117°16'20"	25°49'00"	543	山地红壤	
C-3	弃田	洪田镇湍石村	117°16'16"	25°48'39"	493	山地黄壤	

注：1-1 表示第 1 个样点的第 1 个样方，C-1 表示对照样地中第 1 个样方，其他类同。竹针表示竹针混交林，纯竹表示毛竹纯林，竹阔表示竹阔混交林，下表同。

张志达等^[18]将我国现有的竹林，按目前的经营水平，大致将其分为三类：第一类为集约经营的竹林，约占竹林总面积的 3%~5%；第二类是中等集约经营的竹林，约占竹林总面积的 30%；第三类为粗放经营的竹林。不同样地基本情况见表 1。

2.2 调查方法

样方按乔木层、林下植被层进行调查。乔木层：测定 10 m × 20 m 样方内所有植株，记录物种名、胸围、估测树高；林下植被层：测定 2 m × 5 m 样方内的木本植物，记录物种名、丛数、高度，同时测定 1 m × 1 m 样方中的草本植物，记录物种名、盖度、高度。

2.3 计算方法

$$\text{Simpson 指数 } (D): D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } (H): H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数 } (E): E = H / \ln S$$

上式中 P_i 为第 i 种的个体数占群落中总个体数的比例， S 为物种丰富度^[19]。

3 结果与分析

3.1 植物物种组成

本研究 6 个区域 23 个样点，面积 13 800m² 毛竹林林地调查到的植物为 92 科 211 属 334 种，分别占保护区内植物资源总量的 50%(科)、30.7%(属)、22.1%(种)，若随着调查面积的增加，毛竹林林地中新的物种仍将出现。其中优势草本植物有：淡竹叶 (*Lophatherum acile*)、求米草 (*Oplismenus compositus*)、白花败酱 (*Patrinia villosa*)；优势木本植物有 榿木 (*Loropetalum chinensis*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、矩圆叶鼠刺 (*Itea chinensis var. oblonga*)。福建省永安市现有毛竹林面积 44 238.8hm²，调查面积仅占总面积的 0.03%，林内物种总数将难于估测，这些数据充分表明毛竹林内现有物种数是非常丰富的。

从科层次看，调查样地中植物主要由禾本科 (Gramineae)、蔷薇科 (Rosaceae)、菊科 (Compositae)、百合科 (Liliaceae)、山茶科 (Theaceae)、樟科 (Lauraceae)、冬青科 (Aquifoliaceae)、豆科 (Leguminosae)、唇形科 (Labiatae)、壳斗科 (Fagaceae)、忍冬科 (Caprifoliaceae)、虎耳草科 (Saxifragaceae)、葡萄科 (Vitaceae) 和杜鹃花科 (Ericaceae) 组成，以上 14 科的物种数占已调查到的物种总数的 50%，其余 78 科植物物种仅占已调查到的物种数的 50%，表明在调查样地中大部分科均以 1 个或 2 个物种在竹林内出现。在人工经营的毛竹林内，由于劈山作业影响，大部分竹林内没有形成完善的灌木层，林下各个物种的个体都比较小，数量也非常有限，生长型为乔木和灌木的物

种无法进行基因交流产生繁殖体，它们能在样地中出现的主要原因：一是原有乔灌物种在林地遗留残体或繁殖体，二是竹林外部乔灌物种繁殖体在风、动物和人为影响下进入竹林。这种现象预示着竹林内虽然物种总体上较为丰富，但在科、种的尺度上，较大部分物种是脆弱的，从物种多样性保护的角度考虑，需要加强毛竹林内植物物种保护。

3.2 乔木层物种多样性

对比竹林乔木层物种多样性指数，结果为毛竹纯林 Shannon - wiener 指数 H 为 0.68 ± 0.39 ，Simpson 指数 D 为 0.34 ± 0.18 ，Pielou 均匀度 E 为 0.63 ± 0.16 ；竹阔混交林 H 为 1.46 ± 0.42 ， D 为 0.63 ± 0.13 ， E 为 0.70 ± 0.08 ；竹针混交林 H 为 0.95 ± 0.44 ， D 为 0.52 ± 0.15 ， E 为 0.78 ± 0.05 。样地中乔木层物种多样指数大小关系为竹阔混交林 > 竹针混交林 > 毛竹纯林，均值比较(表 3)为毛竹纯林与竹阔混交林 H 和 D 差异极显著， E 差异不显著；毛竹纯林与竹针混交林 H 和 D 差异不显著， E 差异显著；竹阔混交林与竹针混交林 H 差异显著， D 和 E 差异不显著。总体表明竹阔混交林乔木层物种多样性相对较高。而竹阔混交林乔木层植物物种多样性指数较对照阔叶林多样性指数稍小，阔叶林若改造成经营性毛竹林，为了让毛竹有更多的生长空间，容易导致乔木层部分物种丧失。

表 2 乔木层物种多样性指数

样地号	群落类型	S	H	D	E	样地号	群落类型	S	H	D	E
1-2	纯竹	3	0.682	0.377	0.620	5-4	竹阔	9	1.402	0.584	0.638
2-4	纯竹	6	1.066	0.494	0.595	6-1	竹阔	7	1.546	0.724	0.795
2-6	纯竹	8	1.191	0.515	0.573	1-1	竹针	4	1.097	0.623	0.792
3-1	纯竹	1	0.000	0.000	1.000	2-1	竹针	2	0.559	0.372	0.806
3-3	纯竹	3	0.647	0.354	0.589	2-2	竹针	2	0.539	0.354	0.777
5-1	纯竹	4	0.838	0.443	0.604	2-5	竹针	3	0.882	0.531	0.803
5-2	纯竹	2	0.296	0.159	0.428	2-7	竹针	7	1.277	0.592	0.656
6-3	纯竹	3	0.700	0.396	0.637	3-2	竹针	3	0.860	0.500	0.783
2-3	竹阔	5	1.148	0.571	0.713	4-2	竹针	10	1.800	0.781	0.782
3-4	竹阔	18	2.179	0.797	0.754	6-2	竹针	2	0.563	0.376	0.813
4-1	竹阔	5	1.162	0.585	0.722	C-1	林隙	0	-	-	-
4-3	竹阔	11	1.772	0.741	0.739	C-2	阔叶林	20	2.307	0.803	0.770
5-3	竹阔	6	0.984	0.436	0.549	C-3	弃田	0	-	-	-

从经营角度考虑，集约经营竹林乔木层 H 为 0.61 ± 0.25 ， D 为 0.34 ± 0.10 ， E 为 0.63 ± 0.16 ；中等集约经营竹林乔木层 H 为 0.95 ± 0.46 ， D 为 0.47 ± 0.19 ， E 为 0.72 ± 0.12 ；粗放经营竹林乔木层 H 为 1.39 ± 0.50 ， D 为 0.64 ± 0.14 ， E 为 0.74 ± 0.08 。物种多样性大小为粗放经营竹林 > 中等集约经营竹林 > 集约经营竹林，粗放经营竹与集约经营竹 H 和 D 差异极显著(表 3)。

表 3 不同类型竹林乔木层物种多样性指数 t 检验

多样性指数	纯林与竹阔	纯竹与生针	竹阔与竹针	集约与中等	集约与粗放	中等与粗放
<i>H</i>	-3.758**	-1.307	2.302*	-1.550	-3.215**	-1.912
<i>D</i>	-3.638**	-2.132	1.647	-1.479	-4.108**	-1.983
<i>E</i>	-1.037	-2.424*	-2.163	-1.180	-1.525	-0.377

注：* 差异显著 $P < 0.05$ ，** 差异极显著 $P < 0.01$ 。表 5，表 7 同。

3.3 林下植被层物种多样性

林下植物物种多样性大小应用 α 多样性指数进行检验，主要为物种丰富度 *S*，Shannon - wiener 指数，Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数几个指标。测度的有 10m² 尺度下植物样，100m² 尺度下木本样，不同样地林下植物物种多样性指数大小分别见表 4 和表 6。

表 4 10m² 尺度林下草本物种多样性指数

样地号	群落类型	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	样地号	群落类型	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1-2	纯竹	48	3.776	0.975	0.976	5-4	竹阔	20	2.806	0.927	0.937
2-4	纯竹	31	3.305	0.958	0.963	6-1	竹阔	20	2.839	0.929	0.948
2-6	纯竹	43	3.675	0.972	0.977	1-1	竹针	33	3.394	0.963	0.971
3-1	纯竹	56	3.844	0.975	0.955	2-1	竹针	46	3.680	0.971	0.961
3-3	纯竹	25	2.954	0.928	0.918	2-5	竹针	45	3.714	0.973	0.976
5-1	纯竹	26	3.105	0.948	0.953	2-7	竹针	33	3.415	0.964	0.977
5-2	纯竹	15	2.471	0.896	0.913	3-2	竹针	24	2.916	0.929	0.917
6-3	纯竹	23	2.957	0.938	0.943	4-2	竹针	45	3.618	0.967	0.950
2-3	竹阔	26	3.159	0.953	0.969	6-2	竹针	26	3.075	0.942	0.944
3-4	竹阔	26	3.090	0.946	0.949	C-1	林隙	34	3.305	0.954	0.937
4-1	竹阔	21	2.818	0.926	0.925	C-2	阔叶林	38	3.473	0.963	0.955
4-3	竹阔	13	2.422	0.900	0.944	C-3	弃田	10	2.154	0.863	0.936
5-3	竹阔	13	2.432	0.895	0.948						

在 10m² 尺度下林下草本物种多样性，毛竹纯林林下物种丰富度 *S* 均值为 33.38，*H* 为 3.261 ± 0.480 ，*D* 为 0.949 ± 0.028 ，*E* 为 0.950 ± 0.024 ；竹阔混交林林下物种 *S* 为 19.86，*H* 为 2.795 ± 0.287 ，*D* 为 0.925 ± 0.021 ，*E* 为 0.946 ± 0.013 ；竹针混交林林下物种 *S* 为 36，*H* 为 3.402 ± 0.307 ，*D* 为 0.959 ± 0.017 ，*E* 为 0.957 ± 0.021 。在 10m² 尺度下林下草本多样性指数 *S*、*H*、*D*、*E* 的大小关系为竹针混交林 > 毛竹纯林 > 竹阔混交林，应用成组法 t 检验进行均值比较，竹阔混交林与毛竹纯林和竹针混交林 *S*、*H*、*D* 差异达显著和极显著，毛竹纯林与竹针混交林 *S*、*H*、*D*、*E* 差异均不显著(表 5)。毛竹林与对照竹林林隙和阔叶林林下植物物种多样性指数相比，*S*、*H*、*D*、*E* 相差不大，而比对照弃田植物物种多样性指数大，反映出毛竹林林下植物物种较为丰富。

从经营角度考虑，10m² 尺度下，集约经营毛竹林林下物种 *S* 为 24.75，*H* 为 2.884 ± 0.581 ，*D*

为 0.923 ± 0.036 , E 为 0.935 ± 0.024 ; 中等集约经营竹林林下物种 S 为 33.18, H 为 3.287 ± 0.452 , D 为 0.952 ± 0.024 , E 为 0.959 ± 0.018 ; 粗放经营竹林林下物种 S 为 27.71, H 为 3.110 ± 0.301 , D 为 0.944 ± 0.017 , E 为 0.946 ± 0.016 。不同经营水平竹林林下草本物种多样性指数大小关系: 中等集约经营竹林 > 粗放经营竹林 > 集约经营竹林。但应用成组法 t 检验进行均值比较, 不同经营水平竹林间物种多样性差异不显著, 即经营水平差异不会导致林下草本物种多样性差异显著。

表 5 10m² 尺度林下草本物种多样性指数不同类型之间均值 t 检验

多样性指数	纯竹与竹阔	纯竹与竹针	竹阔与竹针	集约与中等	集约与粗放	中等与粗放
S	2.512*	-0.418	-3.969**	-1.057	-0.418	0.962
H	2.237*	-0.663	-3.823**	-1.425	-0.865	0.915
D	1.822	-0.814	-3.263**	-1.882	-1.408	0.77
E	0.376	-0.587	-1.139	-2.142	-0.96	1.517

在 100 m² 尺度林下木本植物物种多样性情况, 毛竹纯林林下木本物种 S 为 18.67, H 为 2.519 ± 0.836 , D 为 0.887 ± 0.069 , E 为 0.940 ± 0.014 ; 竹阔混交林林下木本物种 S 为 50.2, H 为 3.730 ± 0.365 , D 为 0.971 ± 0.010 , E 为 0.966 ± 0.006 ; 竹针混交林林下木本物种 S 为 30, H 为 3.186 ± 0.398 , D 为 0.950 ± 0.020 , E 为 0.951 ± 0.007 。在 100m² 尺度下竹林林下木本多样性指数大小关系为竹阔混交林 > 竹针混交林 > 毛竹纯林, 应用成组法 t 检验进行均值比较竹阔混交林与毛竹纯林 S 、 H 、 D 、 E 差异达显著和极显著, 竹针混交林与毛竹纯林和竹阔混交林 S 、 H 、 D 差异均不显著(表 7)。

表 6 100 m² 尺度林下木本物种多样性指数

样地号	群落类型	S	H	D	E	样地号	群落类型	S	H	D	E
5-1	纯竹	38	3.477	0.964	0.956	4-1	竹阔	50	3.809	0.975	0.974
5-2	纯竹	10	2.139	0.864	0.929	4-3	竹阔	75	4.181	0.982	0.968
6-3	纯竹	8	1.941	0.833	0.933	5-3#	竹阔	33	3.386	0.962	0.968
3-2	竹针	33	3.303	0.957	0.945	5-4	竹阔	32	3.332	0.960	0.961
4-2	竹针	39	3.512	0.965	0.959	6-1	竹阔	61	3.942	0.977	0.959
6-2	竹针	18	2.742	0.927	0.949						

注: # 调查小样方面 60 m², 总调查面积 600 m²。

从经营角度考虑, 100m² 尺度林下木本植物物种多样性, 集约经营毛竹林木本物种 S 为 21.5, H 为 2.763 ± 0.881 , D 为 0.913 ± 0.070 , E 为 0.949 ± 0.028 ; 中等集约经营竹林木本物种 S 为 37.75, H 为 3.169 ± 1.021 , D 为 0.929 ± 0.069 , E 为 0.956 ± 0.019 ; 粗放经营竹林木本物种 S 为 40.6, H 为 3.513 ± 0.256 , D 为 0.965 ± 0.008 , E 为 0.956 ± 0.007 。不同经营水平竹林林下木本物种多样性指数大小关系为: 粗放经营竹林 > 中等集约经营竹林 > 集约经营竹林。应用成组法 t 检验进行均值比较经营水平竹林林下物种多样性差异不显著(表 7), 经营水平差异同样不会导致林下木本物种多样性

差异显著。

对比 10m² 尺度林下草本层和 100m² 尺度林下木本层植物不同群落类型之间多样性的排序关系, 发现竹阔混交林林下木本植物多样性指数大, 草本植物多样性指数小, 而毛竹纯林林下木本多样性指数小, 草本多样性指数中, 说明竹阔混交林向毛竹纯林转型的过程中, 木本植物在丧失, 草本植物可能会增加也可能减少, 因为毛竹纯林林下植物变化较大(物种数 15~56 个), 这与竹林经营行为有关, 如除草剂的使用、劈山、垦复等。

表 7 100m² 尺度林下木本物种多样性指数不同类型之间均值 t 检验

多样性指数	纯竹与竹阔	纯竹与竹针	竹阔与竹针	集约与中等	集约与粗放	中等与粗放
<i>S</i>	-2.413*	-0.984	1.698	-0.677	-1.781	-0.194
<i>H</i>	-2.925*	-1.247	1.983	-0.475	-1.968	-0.738
<i>D</i>	-2.863*	-1.52	2.092	-0.266	-1.927	-1.161
<i>E</i>	-3.786**	-1.202	3.316*	-0.403	-0.62	0.032

就乔木层与林下草本、木本层物种多样性的关系而言, 乔木层的物种多样性显著影响林下木本多样性, 它们的相关系数为 0.790, 达极显著相关; 而其对林下草本多样性影响很小, 相关系数仅为-0.194; 林下木本植物多样性对草本层物种多样性影响也很小, 相关系数为-0.023, 相关不显著。对比乔木层与林下植被多样性指数大小关系, 林下植被多样性指数大于乔木层多样性指数。

4 结论

通过对竹林物种组成与多样性的分析表明, 毛竹林内物种是丰富的, 但较大部分物种是脆弱的; 乔木层植物物种多样性与林下木本植物多样性指数相关显著, 与草本植物物种多样性指数相关不显著, 乔木层物种多样性指数小于林下植物物种多样性指数。

毛竹林乔木层物种多样性指数: 竹阔混交林 > 竹针混交林 > 毛竹纯林, 毛竹纯林与竹阔混交林差异极显著, 毛竹纯林与竹针混交林差异不显著, 竹阔混交林与竹针混交林差异显著; 粗放经营竹林 > 中等集约经营竹林 > 集约经营竹林, 粗放经营竹林与集约经营竹林差异极显著。

毛竹林林下植被层草本植物物种多样性指数: 竹针混交林 > 毛竹纯林 > 竹阔混交林, 竹阔混交林与毛竹纯林和竹针混交林差异达显著和极显著, 毛竹纯林与竹针混交林差异不显著; 中等集约经营竹林 > 粗放经营竹林 > 集约经营竹林, 但不同经营水平竹林两两之间林下草本物种多样性指数差异不显著;

毛竹林林下植被层木本植物物种多样性指数: 竹阔混交林 > 竹针混交林 > 毛竹纯林, 竹阔混交林与毛竹纯林差异显著, 竹针混交林与毛竹纯林和竹阔混交林差异均不显著; 粗放经营竹林 > 中等集约经营竹林 > 集约经营竹林, 但不同经营水平竹林两两之间林下木本物种多样性差异不显著。

竹阔混交林向毛竹纯林转型时, 林下木本植物部分丧失, 而草本植物将可能增加, 也可能减少, 因为毛竹纯林林下物种丰富度变化较大。本文研究结果与朱锦懋等研究结果相比增加了群落类型和

经营类型内容^[14], 在毛竹纯林与竹阔混交林多样性大小比较时结果相对一致, 但在草本层物种多样性也出现了竹阔混交林大于毛竹纯林的现象。

参考文献

- [1] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability[J]. *Ecology*, 1996,77(2):350 ~ 363
- [2] Tilman D, Reich P B, Knops J, et al. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment[J]. *Science*, 2001, 294(5543): 843 ~ 845
- [3] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律[J]. *生物多样性*, 2004,12 (1): 1-4
- [4] 赵士洞. 生物多样性科学的内涵及基本问题——介绍“DIVERSITAS”的实施计划[J]. *生物多样性*, 1997, 5(1): 1- 4
- [5] Mulder C P, Uliassi D D, Doak D F. Physical stress and diversity~productivity relationships: The role of positive interactions[J]. *PNAS*, 2001, 98(12): 6704 -6708
- [6] Bond E M, Chase J M. Biodiversity and ecosystem functioning at local and regional spatial scales[J]. *Ecology Letters*, 2002, 5(4): 467-470
- [7] 余树全, 姜春前, 李翠环, 等. 人为经营干扰对人工雷竹林下植被多样性的影响[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(2): 196-202
- [8] 庄雪影, 甄荣东. 增城市主要森林群落植物多样性研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(2): 182-189
- [9] Li L G, He X Y, Li X Z, et al. Comparison of two approaches for detecting the depth of edge influence on vegetation diversity in the arid valley of southwestern China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(2): 105-108
- [10] Loreau M, Mouquet N, Gonzalez A. Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes[J]. *PNAS*, 2003, 100(22): 12765-12770
- [11] Mittermeier R A, Mittermeier C G, Brooks T M, et al. Wilderness and biodiversity conservation[J]. *PNAS*, 2003, 100(18): 10309-10313
- [12] 高志勤. 毛竹林群落特征与生态功能评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2004
- [13] 郑成洋, 何建源, 罗春茂, 等. 不同经营强度条件下毛竹林植物物种多样性的变化[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 1-6
- [14] 朱锦懋, 江训强, 黄儒珠, 等. 毛竹林物种多样性的初步分析[J]. *福建林学院学报*, 1996, 16(1): 5-8
- [15] 辉朝茂, 杨宇明. 关于云南竹类植物多样性及其保护研究[J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 145-152
- [16] 张飞萍. 毛竹林节肢动物多样性及主要叶部害虫发生机[D]: 福州: 福建农林大学, 2003
- [17] 何艺玲. 不同类型毛竹林林下植被的发育状况及其与土壤养分关系的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2000
- [18] 张志达, 刘红, 李世东. 中国竹林培育[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [19] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范[J]. *生物多样性*, 2004, 12(1): 5-9

闽北山地上位阔叶林对毛竹林生长的影响

刘国华 侯慧峰 王福升*

(南京林业大学竹类研究所, 江苏南京, 210037)

摘要 本文以山顶存在阔叶林(投影面积 A:31%、B:15%、C:0%,)的毛竹山为研究对象,分析山顶阔叶林对毛竹林生长的影响,并以混交比例、海拔、坡度、坡向作为主导因子建立与毛竹平均胸径(立竹度相同)的方程。结果表明:山顶存在的阔叶林对提高毛竹林的平均胸径有一定作用,随着海拔的增加(越接近与阔叶林的位置),毛竹林的平均胸径越大,类型 B 增幅为 31.01%、类型 A 为 9.20%,山顶无阔叶林的类型 C 平均胸径减小。在低海拔区域,类型 A、B 的平均胸径要小于 C。胸径的平均值类型 B 最大,为 11.3cm。海拔在 850m 时,各类型毛竹林平均胸径随混交比例的增大而增大。类型 B 的地下径单节间体积、总体积无论是在上坡、中坡还是下坡都为最大,由此可见山顶保留 15%阔叶林最佳。

关键词 山顶阔叶林;毛竹林;生长因子

Effect of mountain broad-leaved trees on the growth of Moso

Liu guohua, Hou huifeng, Wang fusheng*

(Bamboo Research Institute, Nanjing Forestry University, Jiangsu, Nanjing, 210037)

Abstract: With the Moso(the projection area of broad-leaved trees was 31%(type A),15%(type B)and 0%(type C), the effect of broad-leaved trees on the growth of Moso was analyzed, and the equation between the average DBH of Moso and the mixture ratio, altitude, slope, aspect was established. The result showed that the average DBH increased gradually with altitude, and the increment of type B and A was 31.01%, 9.20% respectively, while the type C was different. In the low elevation area, the average DBH of type A and B was lower than that of the type C. In the three types, the average of B was biggest and it was 11.2774cm. When the altitude was 850m, the DBH increased gradually with mixture ratio. In the three types, the volume of subterranean rhizomes (cm³) and the total volume of type was biggest, that is to say, the projection area of 15% was advantage of the growth of Moso.

Key words: mountain broad-leaved trees, Moso, growth factors

毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H.de Lehaie) 在我林业中占有举足轻重的作用。但自 20 世纪 70 年代以来,大面积毛竹以纯林形式开发,林内生物多样性降低,竹林自肥能力差,病虫害猖獗;不合理的土壤管理,如林地季节性连年全垦,不规范地挖笋、砍伐等造成水土流失严重等各种原因,

基金项目 “十一五”科技支撑资助项目(2006BAD19B0204)。

通讯作者 王福升 E-mail:fswang@njfu.com.cn

使纯林出现了竹林矮化, 笋形尖削, 病虫害日趋严重等现象^[1-3]。在毛竹混交林中生长着数量不等, 高度不一的乔木和灌木物种, 多形成复层林改善了毛竹生存环境, 使得混交毛竹林生产力水平较高^[4-6]。合理经营竹阔混交林具有较高的生产力和显著的经济效益^[7]。混交比例 25%-35%时, 林分新竹平均高度、新竹枝盘数表现最好^[8]。实生毛竹母竹与国外松混交之后, 可加快成林, 其新竹量可比纯林增加 72%, 成竹的高度和粗度增加 66.67%和 50%^[9]。

毛竹地下径大部分生长在 25~35cm 之间的土层中, 生长具有一定的趋肥性、趋水性、趋光性^[10-11]。毛竹地下茎喜温暖, 有向上坡生长、横坡生长比向下坡生长量大的特点^[12]。影响毛竹地下茎生长最重要的气候因素为气温, 其次是降水量^[13]。另外, 董文渊^[14-15]研究指出, 当水分状况较好时, 箬竹地下茎总长度变小且地上生物量增加, 因为箬竹不需要浪费太多的能量搜寻水分; 当水分状况较低时, 箬竹地下径总长度变大, 以便搜寻更多的水分。刘庆^[16]对斑苦竹研究也发现类似现象。

为避免纯林集约经营过程中出现的诸多负面效应, 寻找一种新的生态经营模式是当务之急, 本文称之为“斑块混交”(即山顶为阔叶树, 山地为毛竹纯林)的方式即方便纯林经营, 又发挥混交林所带来的正面生态效应, 并有着较高的生产力。本文比较了这两种混交方式毛竹林平均胸径的大小, 分析优劣, 为生产提供指导。

1 试验地区概述

实验所在地位于福建省西北部福建省泰宁县, 与江西省交界。地理坐标, 116°54'-117°24'E, 26°34'-27°07'N, 地处中亚热带, 属中亚热带季风型山地气候。热量资源丰富, 全县年平均气温 17.1℃, 1 月平均气温 5.9℃, 7 月平均气温 26.9℃。极端最低气温 -9.5℃, 极端最高气温 38.9℃, 日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温 5347.2℃, 年日照时数为 1747.2h, 初霜期一般出现在 11 月下旬, 终霜期一般在 3 月上旬, 无霜期 263d, 霜日 30d, 雪日 4.3d。全县年平均降水量 1775.2mm, 年降水天数 179d, 年蒸发量 1347.4mm, 占全年总降水量的 76%。年相对湿度 84%, 全县年平均雾日 152d。

本文主要选择了武夷山西南山脉中的三座样山: 二座山顶有阔叶林的竹山, 分别是类型 A (阔叶林面积占总面 31%)、类型 B (阔叶林面积占总面积 15%), 经调查发现该三种类型的毛竹林均属于阔叶林三者的混交类型, 另一座山顶没有阔叶林的类型 C 作为对照, 经调查发现该三种类型的毛竹林均属于阔叶林三者的混交类型, 具体情况见表 1。各类型经营措施基本相同: 大小年分明, 大年挖笋, 清明前后留竹。小年笋全挖, 秋季劈草。砍竹不分大小年, 冬季进行, 砍四度以上老竹。从不施肥、垦复、浇水、挖竹兜树桩、使用农药, 无钩稍措施。

2 调查和分析方法

在类型 A、B、C 各 30 个样地共 90 个样地内调查立竹度、每棵毛竹的年龄、胸径、混交树数量、每棵混交树的胸径；记录各样地的坡向、坡度、海拔。根据多元线性函数理论，运用 matlab 软件进行分析。在研究毛竹林地下茎时为避免破坏毛竹林的地下系统，本文在类型 A、类型 B 和类型 C 中依其中的一条样带各挖了 10 个 1m*2m 的小样方。测定各小样方中不同年龄阶段的地下茎长度、节数、鞭径。

- ①对于因变量进行 $\sin(y)$, $\cos(y)$, $\log(y)$, $y^{0.5}$, $y^{1.5}$, $y^{-1.5}$, $y^{-0.5}$, y^2 , y^{-2} , y^4 等变换。
- ②对自变量首先进行线性变换，使各自因变量的值基本处于同一级别，然后进行幂变换。
- ③对残差进行学生化残差变换，并做学生化残差分析。
- ④从所有变换后的回归方程中找出方程显著度最高也就是P值最小或复相关系数最大也就是 R^2 最大的回归方程。
- ⑤检验异常值，并删除异常值。
- ⑥重新回归，做学生化残差分析。
- ⑦对回归系数进行t检验，删除对方程贡献不大的变量。
- ⑧对留下来的自变量，重新估计系数。
- ⑨重新进行t检验，直到所有的变量都显著。
- ⑩得到较好的 P 值、R 值和学生化残差分析图。

表 1 各类型山顶阔叶林材积量

	类型 A	类型 B	类型 C
整个坡面投影面积/hm ²	30.3	23.9	19.1
山顶阔叶林投影面积/hm ²	9.2	3.7	
山顶阔叶林所占比例/%	31.00	15.00	
阔叶林面积/m ²	100463.10	42617.26	
总材积/m ³	2219.36	1644.17	
密度/(株/hm ²)	1350	1550	
胸径密度/(cm/m ²)	1.87	2.56	

3 结果与分析

3.1 不同类型毛竹林平均胸径随海拔、混交比例变化

类型 A 和类型 B 随着海拔的增加，毛竹林平均胸径不断增加，其中类型 B 增幅为 31.01%、其次是类型 A 为 9.20%，而类型 C 随着海拔高度的增加，其平均胸径减小。

图 1 表明，类型 C 曲线的拐点出现在海拔 850m 处，这说明对于类型 C 来说，在此处混交比例

升高对毛竹林平均胸径的作用由负变正。类型 B 曲线的拐点大约在海拔 820m 处。这说明混交比例对毛竹林平均胸径的作用，因海拔的不同而变化。

类型 B 大约在海拔 805m 左右时，混交比例的正效应开始显现，胸径由减小变成了增加。在海拔大约 860m 时，毛竹林平均胸径超过类型 C,在此海拔以下，山顶的阔叶林发挥负作用，对毛竹林平均胸径的增大不利。

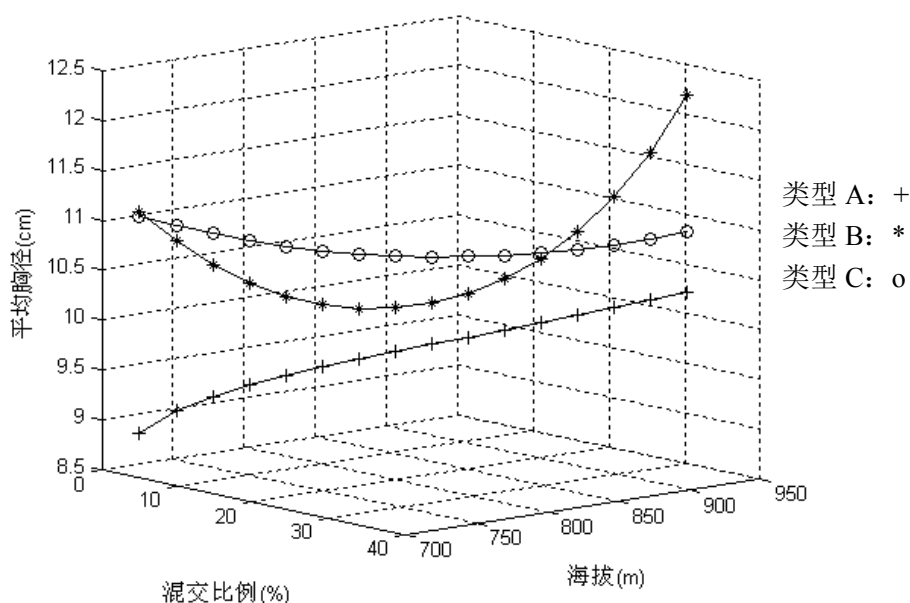


图 1 毛竹平均胸径随海拔变化结果

类型 A 没有拐点，故类型 A 无论在何海拔，毛竹林平均胸径随着混交比例的增大而增大。在海拔大约 940m 的时候，毛竹林平均胸径才超过类型 C。类型 A 山顶过多的阔叶林涵养了过多的水源，在海拔 920m 左右就有水源从地下渗出，以地面径流的形式冲刷地表，造成水土流失。因此类型 A 毛竹林平均胸径表现不佳。而类型 B 在海拔 800m 以下才有水源渗流而出。因此类型 B 的土壤没有太多的流失，毛竹林平均胸径表现最好。由此可见，当混交比例增大到一定程度后（15%），继续增大阔叶树所占比例，将会对毛竹林的经营造成负面影响。

从图中可见在海拔 850 m、坡度 25°、坡向 140° 时：

- (1) 随着混交比例的增加，各类型毛竹林平均胸径不断增大。
- (2) 类型 C 的胸径增大幅度最大为 38.60%，为类型 A、B 的 1.71 倍和 5.66 倍。这说明类型 C 对混交比例的依赖性比类型 A 和类型 B 要大，混交比例的提高对类型 C 来说有更大的作用。在类型 A 和类型 B 中，由于山顶阔叶林的存在，减弱了毛竹林对混交比例的依赖，在类型 A 和类型 B 中可以种植纯度更高的毛竹林。
- (3) 类型 B 的增大幅度最小，证明类型 B 对混交比例的依赖最小，故建议在山顶保留 15% 的

阔叶林为佳。

从图中可见当海拔为 750m、坡度为 25°、坡向为 140°时，与海拔 850m 正好相反，类型 B 和类型 C 的毛竹林的胸径随着混交比例的增大而不断减小，其中类型 B 的减幅最大为 16.07%，其次是类型 C 为 6.06%。类型 B 是类型 C 的 2.65 倍。原因可能是：在较高海拔区域毛竹林直接受阳光、风、雨水的作用，使得温度、湿度等环境变化要远远比低海拔剧烈，而混交则提供了一种保护作用。

3.2 平均胸径与各因子间的函数关系

在类型 A、B、C 各 30 个样地共 90 个样地内调查立竹度、每棵毛竹的年龄、胸径、混交树数量、每棵混交树的胸径；记录各样地的坡向、坡度、海拔。假设：平均胸径(cm)=Y；混交比例(%)= x_1 ；海拔(m)= x_2 ；坡度(°)= x_3 ；坡向(°)= x_4 ；常数= B_0 。根据多元线性函数理论，运用 matlab 软件，建立 Y 与 $x_1 x_2 x_3 x_4$ 之间的线性函数关系。

表 2 平均胸径与各因子关系

变量	类型 A		类型 B		类型 C	
	系数	幂	系数	幂	系数	幂
Y	1	-2	1	-2	1	-4
B_0	1.12E-02	2	1.35E-02	1	-4.71E-04	1
x_1	8.37E-03	-1	4.42E-03	-2	7.96E-03	-4
x_2	-4.68E-09	2	-3.40E+03	-1	4.01E-08	-2
x_3	-2.31E-02	-2	2.04E-02	-2	-1.69E-02	-1
x_4	2.75E-01	-1	-5.65E-02	-1	1.30E-06	2.
x_1			1.03E-03	1	7.30E-04	1
$x_1 x_2$					-6.02E-07	1
$x_1 x_4$					-1.74E-06	1
$x_2 x_4$					-3.69E-07	1
$x_1 x_2 x_3$			-3.41E-08	1		
$x_1 x_2 x_4$			-1.21E-08	1		
$x_1 x_2 x_3 x_4$			3.78E-10	1		
R^2	0.648		0.7675		0.8177	
F	9.6662		7.4289		11.7767	
P	0.0001		0.0002		3.2E-06	
相对误差平均值	0.0299		0.0394		0.0177	

从表中可见各类型的预测值与实测值之间的相对误差平均值不超过 4%，拟合效果较好。由表中各系数也可看出对于类型 A，各因子相互独立影响毛竹林的平均胸径，因子间并未对平均胸径造成综合的影响，由此可见，当混交林中阔叶树的比例增大到 31%后，各因子对毛竹林平均胸径的综合影响减小。类型 B、C 中各因子对其平均胸径均造成综合性的影响，类型 C 中对平均胸径起综合性影响因子有混交比例、海拔；混交比例、坡向；海拔、坡向；

3.3 不同类型毛竹林地下径结构研究

无论在上坡、中坡还是下坡, 类型 B 的地下径单节间体积、总体积都为最大, 类型 A 的节间总体积、节间鞭段长最小, 由此可见, 混交林中混交林比例的大小对毛竹林地下径结构的影响要大于坡

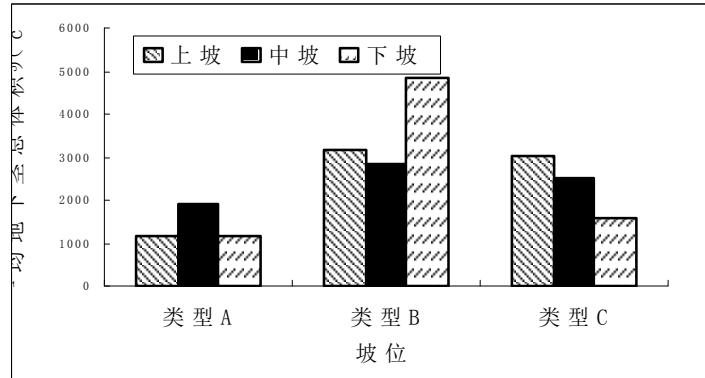


图 2 三种类型毛竹林不同坡位地下茎情况

位, 当混交比例为 15% 时, 对毛竹林的地下径结构最为有利。类型 A 的地下径节间平均体积在上坡和中坡与类型 C 持平, 但在下坡位置超过类型 C, 说明有阔叶树的存在有助于改善毛竹林地下径结构。类型 A 中坡的地下径节间平均体积高于上坡但低于下坡; 但类型 C 中坡的地下径节间平均体积高于上坡和下坡。这说明山顶没有阔叶林的毛竹林, 对中坡位置毛竹林地下径生长有利。所有类型下坡的地下径节间平均体积都高于中坡和上坡, 这说明在下坡位置有利于毛竹林地下径的生长。

4 结论

当阔叶林面积占 31% 时, 毛竹林平均胸径随着混交比例、海拔的升高不断增大, 海拔 750m 时, 类型 B、C 的毛竹胸径随混交比例的增大而不断减小; 海拔 850m 时, 各类型毛竹林平均胸径随混交比例的增加而不断增大, 但类型 B 增加幅度最大; 3 种类型中, B 类型的地下节间体积最大, 下坡的地下径节间平均体积都高于中坡和上坡, 说明下坡位置有利于毛竹林地下径的生长。3 种类型中, 类型 B 的毛竹林各结构因子均好于类型 A、C, 说明当山顶阔叶林的面积在 15% 最有利于毛竹林的生长。

参考文献

- [1] 郭振华. 竹亚科系统学和生物地理学研究进展及存在的问题[J]. 云南植物研究, 2002, 24(4): 431-438
- [2] 林业根. 毛竹林林下植被对土壤氮素、有机质含量影响的调查研究[J]. 竹类研究, 1987, (2): 21-25
- [3] 楼一平. 竹木混交林改为毛竹纯林经营后的林分生长动态[J]. 林业科学, 1997, 10(1): 35-41
- [4] 罗发潘. 竹阔混交林分毛竹生产力的研究[J]. 福建林学院学报, 1997, 17(1): 35-38

- [5] 向梓昌. 杉竹混交林分毛竹生长特性数值分析[J]. 湖北林业科技, 1999, 总 Vol.107: 14-17
- [6] 许才元. 实生毛竹与国外松混交生长及效益调查分析[J]. 江苏林业科技, 1996, 26(2): 43-44
- [7] 林振清. 竹阔混交林毛竹生产力与经营效益的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 42-53
- [8] 廖军. 竹阔混交林的水文效应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(4): 6-10
- [9] 许才元. 实生毛竹与国外松混交生长及效益调查分析[J]. 江苏林业科技, 1996, 26(2): 43-44
- [10] 董晨玲. 毛竹扩鞭成林新竹生长效果研究[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 2(24): 30-33
- [11] 郑郁善. 毛竹经营学 [M]. 厦门大学出版社, 1998: 111-120
- [12] 梁英荣. 毛竹诱鞭扩林要领[J]. 特种经济动植物, 2004, 12:21
- [13] 张幼法. 毛竹林地下鞭动态生长的研究[J]. 竹类研究汇刊, 1999, 18(3): 62-65
- [14] 董文渊. 箬竹类无性系种群生态学研究现状及其应用前景[J]. 林业科学研究, 2002, 15(2): 235-241
- [15] 董文渊. 不同水分条件下箬竹无性系的生态适应性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(6): 21-25
- [16] 刘庆, 钟章成. 斑苦竹无性系生长于水分供应及其适应对策的研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(3): 245-254

不同栽培历史毛竹纯林土壤微生物多样性特性研究

徐秋芳 王纪杰 王奇赞 孙棣棣

浙江林学院 环境科技学院

摘要 为探索毛竹纯林长期经营对土壤微生物多样性的影响，于 2006 年冬季采集不同栽培历史（毛竹种植时间分别为 2002 年，1996 年，1990 年，1980 年，1960 年）粗放经营毛竹林山脚、山腰和山顶 3 个坡位 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品，同时采集马尾松林土样作对照，分别应用 BIOLOG 法和 DGGE 法，分析土壤微生物功能多样性和细菌群落多样性。结果表明，毛竹林在不施化肥仅采取冬季劈山除林下杂灌的粗放经营措施下，土壤微生物功能多样性随毛竹纯林栽培历史延长没有呈现下降的规律，影响土壤微生物多样性的主要因素是土层厚度和土壤养分状况。长期种植毛竹也没有引起土壤细菌多样性的显著变化，但优势种群发生了一定变化。从 46 年（1960 年种植）的毛竹林土壤细菌结构与其它毛竹林的较大差异特点推测，随着毛竹纯林种植年限的不断增加，土壤细菌多样性不会改变，而群落结构将逐渐发生变化。

关键词 毛竹；栽培历史；土壤；微生物多样

Response of Soil Microbial Diversity to *Phyllostachys pubescens* Plantation ages

XU Qiufang ; WANG Jijie ; WANG Qizan; SUN Didi

(School of Environment and Technology, Zhejiang Forestry College,

Lin'an, 311300, P. R. China.)

Abstracts: Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) has been widely planted, and its area is becoming greater and greater by substitution for natural forest. The objective of this paper was to find out the effects of long-term management of monoculture bamboo plantations on soil microbial bio-diversity. Bamboo plantations which were established separately in 2002, 1996, 1990, 1980, 1960 were selected for this study in 2007, and an adjacent Masson pine forests were selected as a control. Soil samples in three sampling sites respectively on the top, middle and the bottom of the hill for each stand were collected at 0-20 cm layer and 20-40 cm layer respectively. The microbial functional diversity and bacterial diversity were evaluated by means of community-level substrate utilization (Biolog) and denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE). From the results, it can be seen that soil microbial functional diversity did not appear to change regularly with the plantation history, and they were mainly mediated by soil thickness and nutrient abundance when bamboo plantation was managed by only cutting weeds in winter time and not subjected to mineral fertilizer. Although, there was no significant variation in bacterial diversity with increase of planting

time of *Phyllostachys pubescens*, the dominant bacterial species, however, has shifted. By comparing bacterial community of soil in the 46 year old bamboo plantation (established in 1960) with the others, it can be observed that with the growing history of bamboo plantation, the richness of soil bacterial diversity does not change but the bacterial community structure could shift from one pattern to another, under traditional management.

Key words: Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*), plantation history, soil, microbial diversity.

生物多样性与生态系统功能的关系早在达尔文时代就引起了人们的注意, MacArthur 于 1955 年首次提出了有关一个群落的物种多样性与生态稳定性之间的相关关系。植物因其表面、直观而被较早地认识到其多样性对生态系统功能和稳定性的重要作用并进行研究^[1](用参考文献格式列入)。然而, 研究发现, 土壤微生物因其丰富的多样性在生态系统中具有决定性影响, 是生态系统中最活跃的生态因子之一, 它们通过分解土壤有机质、同化无机养分驱动土壤的养分循环。毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie) 是我国南方重要的森林资源之一, 因其良好的生态、社会和经济效益。而面积不断扩大, 许多阔叶林、马尾松林 (*Pinus massoniana* Lamb.) 及杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 林等逐渐被毛竹林替代。毛竹纯林面积的扩大使该地区森林植被多样性明显下降, 目前, 浙江省安吉县毛竹林面积已占森林面积的 51%, 并且每年以 1% 的速度扩展。许多山区县目前正对杉木、板栗 (*Castanea mollissima* Blume)、青梅 (*Vatica astrotricha* Hance) 等林分进行套种毛竹改造, 若干年后大部分改造成毛竹纯林。长期毛竹纯林对土壤微生物及土壤质量是否产生不良影响是林地可持续利用的重要研究内容。作者研究发现, 随着林下除杂草结合施用化肥的集约经营时间的增加, 毛竹林土壤微生物量碳、微生物功能多样性呈下降趋势^[2](用参考文献格式列入)徐秋芳等 (xu et al., 2008)。此文的目的是结合 2 种先进的微生物测试方法, BIOLOG 法和 PCR-DGGE 法, 调查研究不同栽培历史、传统的粗放经营模式下毛竹林土壤微生物多样性演变规律。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区设在浙江省桐庐县, 位于浙江省西北部 (29°35' ~ 30°05' N 和 119°10' ~ 119°58' E), 属于典型中亚热带季风气候, 年均温 16.6°C, 年均降水量 1 462 mm。土壤母质为砂岩或粉砂岩。研究区内毛竹林在不同时期由杉木或马尾松林改造而成, 存在不同栽培历史的粗放经营毛竹林。竹林立竹密度为 1 800~2 550 株·hm⁻²。粗放经营措施主要是冬季劈除林下杂灌, 但不翻耕施肥; 毛竹每隔一年出笋长新竹时, 挖去部分春笋, 保留一定数量的新竹, 出笋后次年砍伐 6 年生的成熟毛竹。

1.2 采样与分析方法

1.2.1 土壤样品采样

2006年12月,在研究区中选择立地条件一致,不同栽培历史的毛竹林样地6个(面积为20 m×20 m),毛竹种植时间分别为2002,1996,1990,1980,1960年。同时在调查区内选择1个和毛竹林生境一致的马尾松林作对试样地。在每个样地内的山脚、山腰、山顶分别挖1个剖面作为3次重复,采集0~20 cm的表层土和20~40 cm的下层土壤样品。样品带回室内过2 mm钢筛后分成2份,一份鲜样供土壤微生物功能多样性和细菌多样性(0~20 cm表土)测定用,另一份风干再处理后用于土壤养分含量测定。

1.2.2 土壤基本性质分析

一部分土壤自然风干后,过2 mm筛,分别测定土壤质地(国际分类标准)、有机质、全氮、水解氮、有效磷、速效钾、pH等指标。依据常规土壤农化分析方法分析(用参考文献格式列入)(鲁如坤,1999),即土壤质地采用比重计法,土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法;有效磷采用盐酸—氟化铵浸提,钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提,火焰光度法;土壤pH采用酸度计法,土:水比为1:5。各样地土壤的基本性质见表1。

表1 土壤的基本性质

样地	土层厚度 / cm	质地	<0.002 mm/%	pH 值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)
2002年	0~20	黏壤土	20.42	4.79	25.90	0.90	159.04	24.10	43.80
	20~40				16.00	0.49	117.91	19.80	30.20
1996年	0~20	壤土	18.32	4.38	23.30	0.80	148.24	23.20	37.30
	20~40				12.20	0.34	102.13	15.30	21.80
1990年	0~20	壤质黏土	18.32	4.36	35.50	1.30	198.93	30.10	44.70
	20~40				18.60	0.60	128.72	20.50	33.80
1980年	0~20	黏壤土	18.32	4.44	36.20	1.33	201.84	34.20	56.70
	20~4				18.60	0.60	128.72	21.50	36.80
1960年	0~20	黏壤土	22.53	4.49	34.20	1.25	193.53	30.20	55.00
	20~40				12.50	0.35	103.37	17.50	35.00
马尾松	0~20	砂壤土	14.11	4.79	36.10	1.33	201.42	36.00	55.50
	20~40				22.10	0.75	143.26	26.60	54.3

1.2.3 土壤微生物功能多样性分析

微生物多相关性采用Biolog法测定(用参考文献格式列入)(Garland *et al.*, 1991)。称相当于10 g干土质量的鲜新土,在超净工作台将土壤加入存有100 mL无菌蒸馏水的三角瓶中,加盖振荡30 min(转速为300 r·min⁻¹),静止澄清后,取10 mL上清液加入90 mL的无菌蒸馏水中;重复以上过程使溶液的最终质量分数为10⁻³。将含有土壤微生物的溶液接种至GN2微平板中(GN2 Microtiter

Plate, Biolog Inc. Hayward, CA, USA)。GN2 微平板有 96 孔组成，其中一孔为只含营养基质而不含碳的空白对照，其余 95 孔则分别含有 95 种不同的单一碳源。微生物利用碳源的程度可由内含的指示剂指示，通过测定其光密度值的变化来衡量微生物利用碳源的能力。接种后的 GN2 微平板放入 25 °C 培养箱中温育 8 天，并每隔 24 h（即分别在 24、48、72、96、120、144、168、192 h）于 595 nm 处用 VAMAX 自动读盘机进行自动读取光密度值（Microlog ReL 3.5 软件）。一个样品每次测得的光密度可综合反映土壤微生物对微平板内碳源利用动态。微生物种类越丰富，且数量越多则总体利用程度越大。

1.2.4 土壤细菌多样性分析

1.2.4.1 16S rDNA V3 区 PCR 扩增

用 MO-BIO 公司试剂盒（powersoil DNA kit）提取土壤总 DNA，取 3 μ L 用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测提取的 DNA 质量。应用 BIO-RAD（伯乐）公司的 PTC-200 型 PCR 仪，采用细菌通用引物（338F, 518R）扩增土壤中所有的细菌。PCR 扩增体系：无菌双蒸水 30.7 μ L，10 \times PCR 缓冲液（含 MgCl₂）5.0 μ L，4 \times dNTP 混合物（2.5mmol·L⁻¹）4.0 μ L，引物 338 F-GC（10pmol· μ L⁻¹）2.0 μ L，引物 518 R（10pmol· μ L⁻¹）2.0 μ L，模板 DNA（1 \times 10⁻³ pmol· μ L⁻¹）1.0 μ L，Taq DNA 聚合酶 2 U。PCR 反应条件为 94 °C 预变性 5 min，然后 94 °C 变性 1 min，65 °C 退火 1 min（每个循环降 0.5 °C 至退火温度为 55 °C）（Touchdown PCR），72 °C 延伸 3 min，然后再进行 10 个循环 94 °C 1 min，55 °C 1 min，72 °C 3 min，最后 72 °C 延伸 10 min。扩增产物经 1.0%（质量浓度）琼脂糖凝胶电泳进行分析。

1.2.4.2 变性梯度凝胶电泳（DGGE）

用 BIO-RAD 基因突变仪分离 PCR 产物。使用 8% 丙烯酰胺凝胶，电泳缓冲液为 1 \times TAE，变性梯度 30%~70%（7 mol/L 尿素和 40% 去离子甲酰胺为 100% 变性），PCR 产物上样量为 30 uL + 5 uL 10 倍的 loading buffer。电压 80 V，60 °C，电泳 13 h，用 SYB green（1: 10 000，体积比）染色 0.5 h。BIO-RAD 公司 Versa DOC 仪器系统下成像。用 Quantity one 软件对 DGGE 图谱进行定量分析。

1.3 数据分析

土壤微生物群落 Biolog 代谢剖面的表达：GN2 微平板中（GN2 Microtiter Plate, Biolog Inc. Hayward, CA, USA）微平板中 95 种单一碳源反应程度，即土壤微生物利用碳源的能力，采用每孔的平均吸光值（AWCD）来描述，其计算按下式表达： $\left\{ AWCD_{\text{值}} = \left[\sum (C-R) \right] / 95 \right\}$ ，其中 C 是所测 95 个反应孔的吸光值， R 是对照孔的吸光值。Shannon 多样性指数 $H = -\sum P_i \ln P_i$ ，其中 P_i 为每孔的相

对吸光值 (C-R) 与所有 95 孔的吸光值总和之比; McIntosh 指数 $U = \sqrt{\left(\sum ni^2\right)}$, (其中 $ni=C-R$)^[13]。数据分析采用 DPS 统计软件^[17]

用 Quantity one 软件对 16SrDNA v3 区片段的 DGGE 图谱进行定量分析。该软件的自动分析功能十分强大, 可以对泳道和条带自动识别, 然后根据要求将结果输出。

2 结果与分析

2.1 不同栽培历史毛竹林土壤微生物功能多样性特征变化

土壤微生物对 Biolog 微盘中碳源的利用情况用每孔的平均吸光值 (AWCD) 衡量, 被利用的碳源种类越多且利用程度越大, AWCD 值越大。土壤微生物种类越多则能利用单一碳源种类也越多, 而能利用碳源的微生物数量决定利用程度。(杨永华等, 2000)。从图 1 可以看出, 在 0~20 cm 土层, 不同的栽培历史土壤微生物功能多样性不同, 5 个不同栽培历史毛竹林和对照马尾松林土壤的每孔平均吸光值, 1990 和 1960 年种植的竹林明显高于其他年份的土壤, 且 1990 年竹林又高于 1960 年; AWCD 值相对最低的为 1980 年, 对照马尾松林土壤的 AWCD 与 1996 和 2002 年相近。以上结果表明, 毛竹林土壤微生物利用碳源能力随着栽培时间的增加没有呈现出一定的规律性。一般认为, 土壤微生物特性受土壤有机碳的种类及数量的影响最大(孔维栋等, 2004)。马尾松林、杉木林及杂灌林改种为毛竹纯林后, 农民采用冬季劈山去除林下灌木、杂草的粗放经营的方式, 毛竹林地上植物的组成虽然发生了较大改变, 但生物多样性与以前相比改变不大, 相反, 毛竹栽培后毛竹生物体所含的特殊有机化合物使输入土壤的碳源的多样性更加丰富。因此, 本试验调查地区, 马尾松林、杉木林及杂灌林改种为毛竹后, 以冬季劈山为主的粗放经营方式, 虽然毛纯竹林长达 46 年的栽培历史, 但土壤微生物功能多样性没有呈下降态势, 相反从 AWCD 值看, 46 年栽培历史的竹林土壤微生物功能多样性高于对照马尾松林。

土壤营养及水分状况也是影响微生物活动重要因素。分析不同栽培历史毛竹林土壤基本性质(表 1) 发现, 1990、1980、1960 年毛竹及马尾松林 4 个样地土壤养分状况处于同一水平, 明显好于 2002 和 1996 年毛竹林土壤。1990 和 1960 年种植毛竹林土壤良好的养分水平可以解释其较强的土壤微生物活性, 1996 和 2002 年种植毛竹林土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷钾比其他林地均低, 可以解释其土壤微生物功能多样性差的结果(图 1)。然而, 马尾松林和 1980 年毛竹林土壤有机质含量与 1990 年及 1960 年相近, 但土壤的 AWCD 值却明显低于它们。仔细分析 3 个不同坡位(3 个采样点) 土壤性质发现, 马尾松林和 1980 年毛竹林 3 个重复之间差异较大, 1 号样地(上坡) 其土壤有机质和有效钾明显低于其他 2 个样地(数据未列出), 其 AWCD 值也明显偏低, 因此 3 个

重复的 AWCD 平均值自然低于实际情况。马尾松林和 1980 年毛竹林土壤接种后 48 及 72 h 时 AWCD 的标准差甚至高于平均值（因标准差太大，难以在图中反映，特列表 2 以作补充），96 h 至 192 h 之间的几个测定时间，虽然标准差没有高于平均值，但标准差还是较高。以上结果说明，土壤养分是影响微生物活动的重要因素。

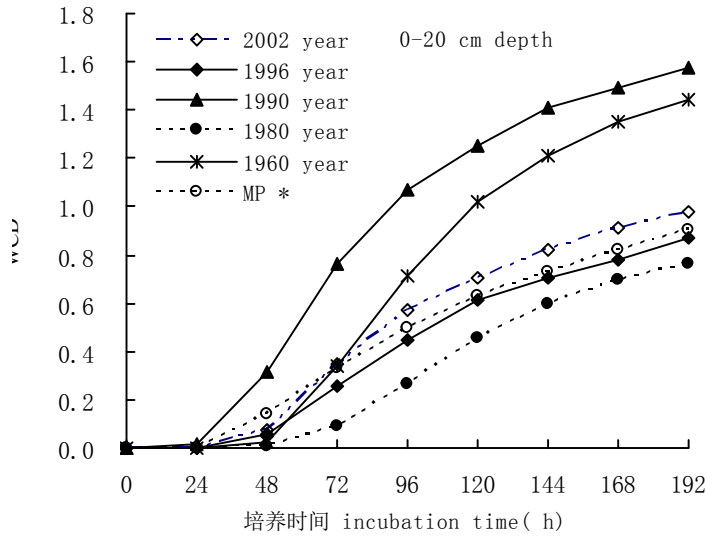


图1 不同经营历史毛竹林 0~20 cm 土层土壤微生物利用碳源的平均吸光值 (AWCD) 比较

*MP 为马尾松林的缩写

Fig.1 Comparison on AWCD of soil (0-20 cm) under *Phyllostachys edulis* forest with different cultivation history.

*MP is an abbreviation of Masson pine

不同栽历史土壤 20~40 cm 土层的微生物功能多样性 AWCD 值的差异不同于表土层，明显地呈 3 组分布（图 2），1980 和 1990 年>马尾松林和 1960 年>2002 和 1996 年。2002 和 1996 年毛竹林 20~40 cm 土层土壤的养分总体处于较低水平，土壤微生物功能多样性相对较差，说明表下层土壤养分对微生物功能起重要作用。马尾松林 20~40 cm 土层土壤各种养分最高，但土壤微生物功能多样性居中，原因有二：其一是因为马尾松林的 1 号样地 AWCD 值明显低于其他 2 个样地，3 个重复土壤 AWCD 值差异大，导致平均值偏低；其二是因为马尾松林土层相对较薄，土壤质地为砂壤土，土壤保水差影响土壤微生物的活动。1990 年毛竹林的表层与表下层土壤微生物多样性均处于最好水平，这与该林地深厚的土层以及良好土壤养分水平有关。然而，1980 年种植的毛竹林地 20-40 cm 土层的 AWCD 值到培养结束时趋于最大，与 0-20 cm 的最低值截然相反，产生这种结果的原因是，1980 年种植的毛竹林地土壤养分水平较好，表层养分在不同坡位差异较大，而表下层则 3 个重复间较均匀，其 AWCD 值的标准差明显小于表层土，因此，粗放经营毛竹林，土壤养分水平对微生物活动起着重要作用。

综合以上结果得出，在该调查区内毛竹的栽培历史与土壤微生物功能多样性之间没有规律存在，也就是说，采取人工方法在冬季除林下杂灌的毛竹林经营措施，长期种植毛竹不会引起土壤微生物功能多样性的下降。影响土壤微生物多样性的主要因素是土层厚度、土壤养分和水分状况。

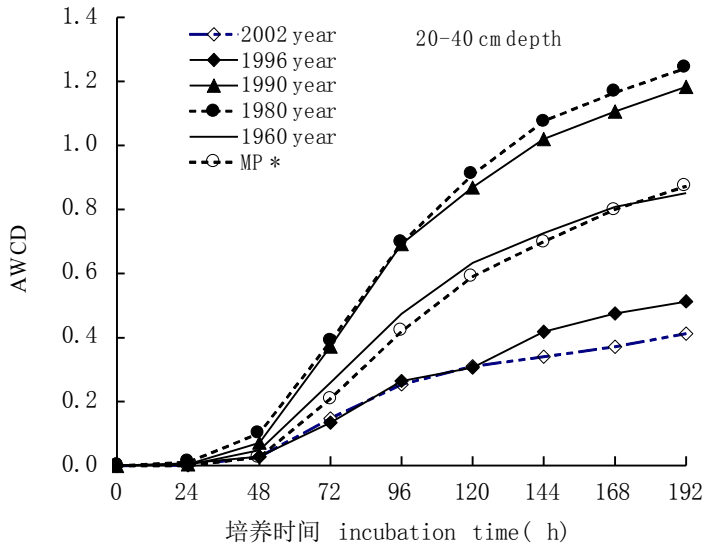


图2 不同经营历史毛竹林 20-40 cm 土层土壤微生物利用碳源的平均吸光值 (AWCD) 比较

*MP 为马尾松林的缩写

Fig.2 Comparison on AWCD of soil (20-40 cm) under *Phyllostachys edulis* forest with different cultivation history.

*MP is an abbreviation of Masson pine

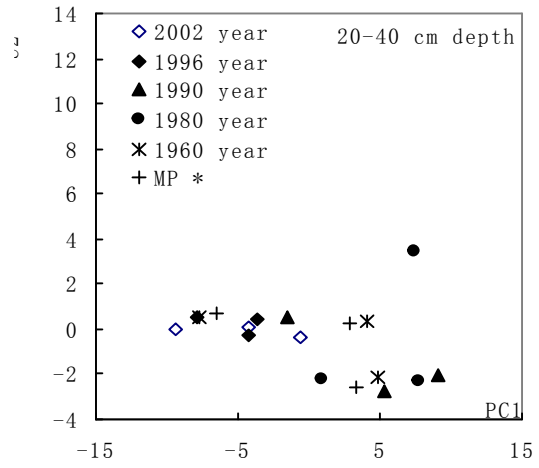
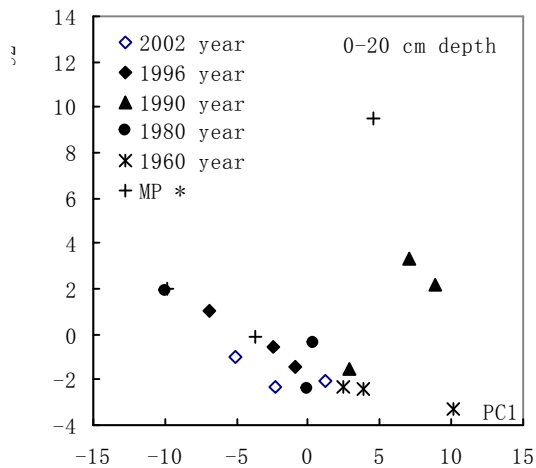


图3 不同经营历史毛竹林 0- 20 cm 和 20-40 cm 土层土壤微生物利用碳源的主成分分析

*MP 是马尾松林的缩写

Fig.3 Principal Component Analysis of carbon utilization of soil under *Phyllostachys edulis* forest with different cultivation history.

*MP is an abbreviation of Masson pine

2.2 土壤微生物利用碳源的主成分分析

主成分分析是把多个指标化为少数几个综合指标的一种统计方法，可以很好地描述不同类型土壤微生物对碳源利用状况的分析方法，数据分析运用较多，且利用广泛 (Preston *et al*, 2002; Podani, 2000; Randerson *et al*, 1993)。土壤微生物利用碳源的主成分分析（以 120 h 的吸光值为依据）表明，由于同一栽培历史毛竹林 3 个重复样地土壤间差异较大，主成分分析结果 3 点分散明显，其中明显的是马尾松土壤。1990 年毛竹土壤微生物利用碳源模式与其他林地有较大差异，其 PC1 值（平均

为 6.268) 明显大于其他林地。不同栽培历史毛竹林地 20~40 cm 土层土壤微生物利用碳源模式与 0~20 cm 有所不同(图 3), 但不同林地间差异也很大, 1990 年毛竹林没有表层土优势明显, 从 PC1 平均值来看, 1990 年毛竹林土壤(4.29) 反而低于 1980 年(5.33)。总之, 从 0~20 cm 和 20~40 cm 综合来看, 1990, 1980, 1960 及马尾松林土壤的 PC1 平均值高于 1996 年和 2002 年毛竹林土壤。这与其相应的 AWCD 值变化规律一致。

2.3 不同栽培历史毛竹林土壤微生物多样性指数

在生物多样性研究中, Shannon index 是常用的表征生物多样性及其均匀度的指标(孔维栋等, 2004), McIntosh index 也是较常用的多样性指数, 能够较好地反映微生物多样性, 受均匀度的影响较小(陈廷贵等, 1999)。土壤微生物利用碳源的能力(即微生物的功能多样性)也可用多样性指数来衡量, 利用的单一碳源种类为拟种数, 某一碳源利用的程度相当于某物种的种群数量。以 120 h 吸光值为依据的 Shannon index 和 McIntosh index 列于表 2。结果发现, 不同栽培历史 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤微生物多样性指数 Shannon index 和均匀度指数 Shannon evenness (J') 均无显著差异, 而 McIntosh 指数之间却表现出显著差异, 1990 年 1960 毛竹林土壤 0~20 cm 的 McIntosh 指数明显高于其他林地, 而 20~40 cm 土层则为 1990 和 1980 年最高, 其次为 1960 年和马尾松林, 2002 和 1996 年最低。以上几个指数说明不同栽培历史毛竹林以及马尾松土壤微生物对碳源的利用模式差异不明显, 但因土壤养分水平的差异可能导致不同林地之间土壤微生物的生物量的差异, 不同栽培历史毛竹林之间土壤 McIntosh 指数的差异与 AWCD 值一致。

表 2 不同经营历史毛竹林土壤微生物多样性指数表
Tab. 2 Functional diversity of soil microbial community with different establishment history

样地 site	Shannon index (H)		McIntosh index	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
2002	5.410 a	4.249 a	10.578 b	5.183 c
1996	5.395 a	5.037 a	9.644 b	5.280 c
1990	6.120 a	5.798 a	15.010 a	12.022 a
1980	5.052 a	5.859 a	8.626 b	11.972 a
1960	5.934 a	5.219 a	15.445 a	8.999 b
MP	5.184 a	5.249 a	9.067 b	9.226 b

注: 表中数据均为 3 个样地平均值。同列中不同英文字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: the decimate capital letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$.

有学者认为应用 Shannon evenness 和 Shannon index 表征土壤微生物丰富度及其均匀度较为可

靠,但他实验证明 McIntosh index 能较真实地反映有机物料对土壤微生物群落功能多样性的影响(孔维栋等,2004)。

2.4 不同栽培历史毛竹林土壤细菌 16S rDNA V3 区片段的扩增

使用MO-BIO试剂盒提取的土壤样品DNA,经过1.0%琼脂糖电泳检测,显示DNA提取效果良好,无拖带现象(图4)。可以直接用于后序实验。

应用细菌通用引物 338F-GC 和 518R 扩增土壤中细菌 16S rDNA V3 区片段,以总 DNA 为模板的 PCR 反应都获得特异性(16S rDNA V3 区)扩增片段,PCR 扩增产物以 1%琼脂糖电泳后用 EB 染色,得不同栽培历史土壤样品 PCR 扩增结果图(图 5),表明 PCR 扩增产物获得了高产量和高特异性的 PCR 产物,片段长度约为 260bp 左右,为目标条带,无明显非特异性扩增,各个样品的扩增产物均可作为变性梯度凝胶电泳(DGGE)的样品。

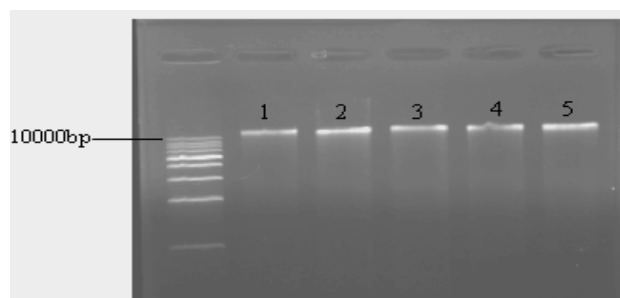


图 4 不同栽培历史自然生长毛竹土壤 DNA 提取效果图谱(左)

Fig. 4 Electrophoretogram of DNA extraction from soil with different plant history

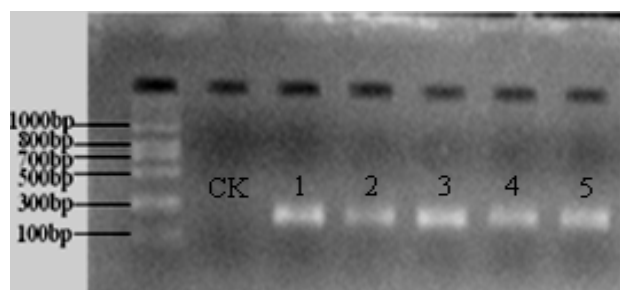


图 5 不同栽培历史自然生长毛竹土壤细菌 16S rDNA V3 区扩增片段(左)

Fig. 5 PCR amplified 16S rDNA(V3) of bacteria from soils with different plant history

注:图中 CK 为 PCR 反应对照,不加模板 DNA,1 至 5 泳道分别代表 2002, 1996, 1990, 1980, 1960 种植的毛竹林土壤

2.5 不同栽培历史毛竹林土壤细菌 16S rDNA V3 区片段 PCR 产物 DGGE 分析

16S rDNA 分子中,既含有高度保守的序列区域,又有中度保守的序列区域和高度变化的序列区域,适用于进化距离不同的各类生物亲缘关系的研究(沈萍,2000),是一种很好的度量生物进化关系的分子钟,有“分子计时器”之称。根据 16S rDNA 保守序列设计特异性引物,对其基因的多变区进行扩增,扩增产物进行 DGGE,对其产生的条带进行分析。目前多数研究均为扩增土壤细菌 16S rDNA 相当于大肠杆菌(*Escherichia coli*) 16S rDNA 338-518 bp 的片段或者 968-1 401 bp 的片段(Nakatsu and Torsvik,2000; Smalla et al.,2001)。DGGE 具有分离长度相同而序列不同 DNA 片段的能力,每一个条带大致与群落中的一个优势菌群或操作分类单位(Operational taxonomic unit, OTU) 相对应,条带数

越多说明生物多样性越丰富，条带染色后的荧光强度则反映该细菌的丰富度，条带信号越亮，表示该种属的数量越多。

不同样品的PCR产物经DGGE分离（图6 a），图谱统计结果表明，5个样品总共分离出了24种不同的电泳条带，不同样地的土壤样品均分离得到18条左右的条带，但条带的位置和亮度存在差异，说明细菌物种的丰富度差异不显著，而不同土壤优势种群的条带有一定变化。以毛竹林1号样品为基准，应用Quantity one 软件定量分析DGGE图谱，定量分析所获得的条带多于肉眼观察（图6 b），且能更准确地反映实际情况。2002，1996，1990，1980，1960种植的毛竹林土壤分别获得18、20、17、19、19条带，每一个条带大致与群落中的一个优势菌群或操作分类单位(Operational taxonomic unit, OTU)相对应，条带数越多说明生物多样性越丰富，条带染色后的荧光强度则反映该细菌的丰富度，条带信号越亮，表示该种属的数量越多。说明随着毛竹种植年限增加，土壤细菌的多样性变化不大。

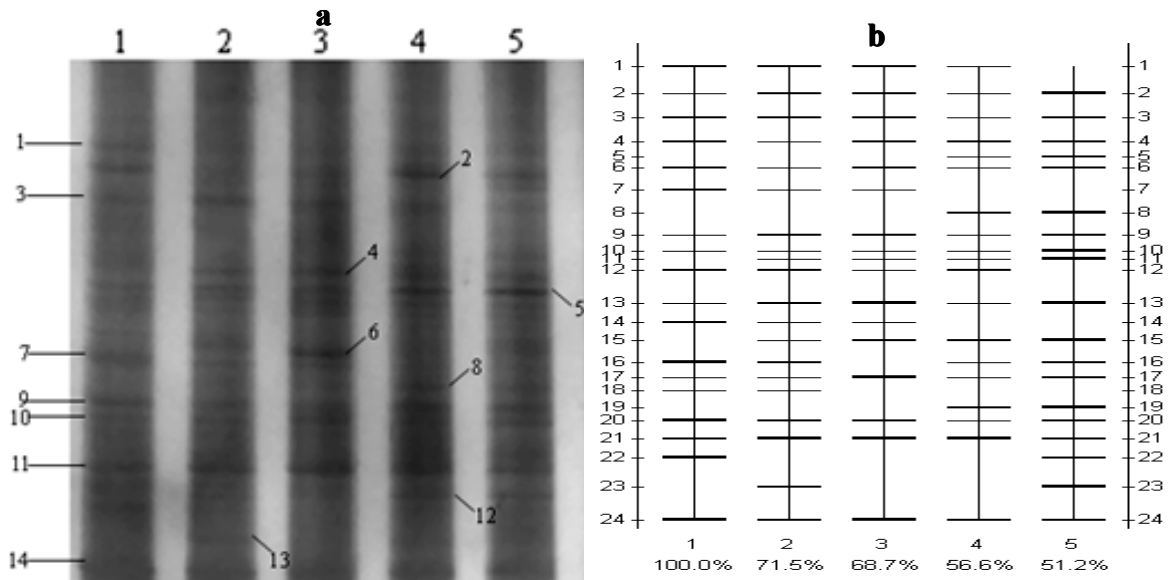


图 6 16S rDNA V3 区扩增片段的 DGGE 分析结果 (a) 以及电泳比较图 (a)

Fig.6 DGGE analytical result of 16S rDNA V3 fragments (a) and comparison of the bands' Dice coefficient (b)

注：图中 1 至 5 泳道分别代表 2002，1996，1990，1980，1960 种植的毛竹林土壤

仔细分析不同土壤样地之间的条带发现，第 6、8、13 条带不是所有土壤所共有，其余均为共性条带，表明这些条带所代表的细菌群落在自然生长毛竹林土壤中，随着种植时间的增加，其种类不受影响。但第 2、4、5、6、8、12 条带随着栽培时间增加亮度加强。条带 5 在种植时间较长的毛竹土壤（1980，1960 种植）特别亮，且随着毛竹栽培时间的增加，其亮度逐渐增加；1980，1960 年种植毛竹林土壤条带 2 和 12 与栽培时间较短的毛竹土壤之间差异也较明显，说明 2、5、12 是毛竹林土壤的优势物种，而相反的情况发生在条带 1 和 3，随着毛竹栽培时间的增加，其亮度逐渐下降。条带 11 在 5 个不同亮度几乎相同，说明此细菌在不同栽培历史毛竹林土壤中的数量没有发生

变化。

以毛竹林 1 号样品为基准, 应用 Quantity one 软件定量分析 DGGE 图谱 (图 6 b), 结果表明, 5 个样品 DGGE 图谱之间的相似性介于 51.2~78.9 之间, 随着毛竹种植时间的增加, 相似度逐渐下降。说明虽然多样性变化不大, DGGE 图谱的香农多样性指数居于 2.833 与 2.995 之间 (表 3), 没有显著差异, 但不同栽培历史的自然生长毛竹林土壤的细菌群落结构 (含种类和丰度信息) 发生了变化。

表 3 不同土壤细菌 16S rDNA V3 区扩增片段的 DGGE 条带 Shannon 多样性指数

Tab 3 Shannon indexes of DGGE bands of amplified 16S rDNA V3 fragments of soil bacteria from different soil samples.

样地	2002	1996	1990	1980	1960
Shannon多样性指数	2.888	2.995	2.833	2.943	2.943

利用相似性矩阵数据(图 7), 通过未加权算术平均对群法 (The unweighted pair group method with arithmetic averages, UPGMA) 进行聚类分析 (图 8), 2 号样品和 3 号样品的相似性最高, 随着毛竹栽培时间的增加, 相邻两个竹林土壤的相似度逐渐下降。一般认为相似值高于 0.60 的两个群体具有较好的相似性。结果认为, 本次调查的毛竹林地, 除 1960 年种植的竹林外, 1980 年以后种植的毛竹林土壤细菌群落结构没有发生显著变化。

Lane	1	2	3	4	5
1	100.0	71.5	68.7	56.6	51.2
2	71.5	100.0	78.9	71.2	54.0
3	68.7	78.9	100.0	66.6	57.0
4	56.6	71.2	66.6	100.0	56.9
5	51.2	54.0	57.0	56.9	100.0

图 7 不同土壤细菌 16S rDNA V3 区扩增片段的 DGGE 条带相关性图 (左)
Fig.7 Correlation coefficient of DGGE bands between different soil samples

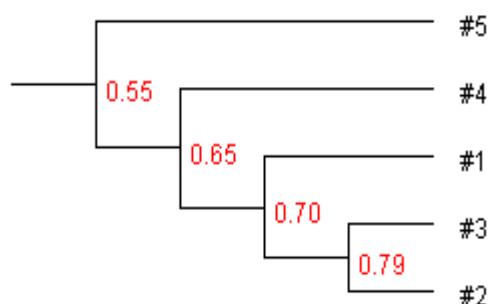


图 8 不同土样 16S rDNA 条带图谱的聚类分析 (左)
Fig.8 Cluster analysis of 16S rDNA banding profiles for communities from different soil samples
注: 图中 1 至 5 泳道分别代表 2002, 1996, 1990, 1980, 1960 种植的毛竹林土壤

应用 BIOLOG 法研究的结果为, 毛竹的栽培历史与土壤微生物功能多样性之间没有规律存在, 土壤微生物功能多样性好坏主要取决于土壤的养分水平以及土壤的水分供应情况。在不施用化肥、

翻耕而采用冬季劈山除林下杂灌这种粗放经营措施下,毛竹林下有较多灌木和草本植物,由于冬季劈山时没有除根,因此来年许多植物仍能生长,长此以往,毛竹林土壤接受的有机物种类没有明显改变,在没有污染、干旱及渍水等胁迫情况下,碳源多样性是影响微生物多样性及结构的最重要因素,因此,土壤细菌结构与多样性也未发生明显变化。但由于竹子地下鞭根系统非常发达,毛竹栽培时间越长,毛竹根系碳源对土壤微生物包括细菌群落结构的影响逐渐加深,从而形成某些优势种群,相反某些种群的数量则减少。调查区土壤质地为理想壤土(表1),虽然不同林地之间存在微弱的差异,但不足以对微生物活动产生明显影响。毛竹种植15年以上(1990年以前毛竹),土壤有机质、总氮、碱解氮以及有效磷含量达到较稳定水平,随着毛竹林栽培时间的增加,土壤细菌数量增加(图6a中主要条带亮度增强)与土壤养分状况改善的结果有关。在这种粗放经营措施下,分子生物技术能反映土壤微生物区系结构的变化趋势,比底物利用方法更好。

3 结论

在本调查时间范围内,在不施用化肥、翻耕而采用冬季劈山除林下杂灌这种粗放经营措施下,毛竹林栽培时间的长短对土壤微生物功能多样性没有显著影响,土壤微生物功能多样性好坏主要取决于土层厚度、养分水平以及水分状况。长期种植毛竹没有引起土壤细菌多样性的显著变化,但优势种群发生了一定变化。从1960年种植的毛竹林土壤细菌结构与其它毛竹林的较大差异特点推测,随着毛竹种植年限的不断增加,土壤细菌的群落结构将逐渐发生变化。

参考文献

- [1] Garland J L., Mills A L. 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community—level sole—carbon—source—utilization[J]. *Appl. Environ. Microb.*, 57:2351-2359.
- [2] Korner, C.H. 1993. Scaling from species to vegetation: the useful of functional groups. In: 1993: 251-253 Lange R T. et al.(eds). *Biodiversity and Ecosystem Function*. Berlin: Springer-Verlag; 117-140.
- [3] Lawton, J. H. 1994. What do species do in ecosystems? *Oikos*, **71**: 367-374
- [4] MacArthur, R. 1955. Fluctuations of animal populations, and a measure of community stability. *Ecology*, 36: 533-537.
- [5] Nakatsu C H, Torsvik VV. 2000. Soil community analysis using DGGE of 16S rDNA polymerase chain reaction products[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1382-1 388
- [6] Preston M J, Boddy L, Randerson P F. 2002. Analysis of microbial community functional diversity using sole—carbon—source utilization profiles—a critique[J]. *FEMS Microb. Ecol.*, 42:1—14.
- [7] Smalla K, Wieland G, Buchner A. 2001. Bulk and rhizosphere soil bacterial communities studied by denaturing gradient gel electrophoresis: Plant-dependent enrichment and seasonal shifts revealed [J]. *Appl. Environ. Microbiol.* 67(10): 4742-4751
- [8] Xu Q F, Jiang P K, Xu Z H. 2008. Soil microbial functional diversity under intensively managed bamboo plantations in southern China[J], *Journal of Soils Sediments*, 8:177-183
- [9] 陈廷贵, 张金屯. 1999. 十五个物种多样性指数的比较研究[J]. *河南科学*, 17(专辑): 55—58.
- [10] 金则新, 李钧敏, 蔡琰琳. 2007. 不同海拔高度木荷种群遗传多样性的 ISSR 分析[J], *生态学杂志*, 26(8): 1143-1147.

- [11] 孔维栋, 刘可星, 廖宗文. 2004. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 15(3): 487-492.
- [12] 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社.
- [13] 沈萍. 2000. 微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- [14] 杨永华, 姚键, 华晓梅. 2000. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 微生物学杂志, 20(2): 23-26.

竹子有性生殖及其多样性¹

林树燕 丁雨龙 王福升

(南京林业大学竹类研究所, 南京, 210037)

摘要 本文主要从我国竹子开花现象、开花竹株形态、花期、花器构造、结实、竹子实生苗等方面对竹子有性生殖的多样性进行了评述, 并探讨竹类资源有性生殖多样性利用存在的问题及对策, 为我国竹类资源多样性开发利用提供依据, 且有利于珍稀濒危竹类的保护。竹子花期不固定, 有的一生一次, 花后死亡; 有的一生多次。一般竹子在开花前竹株表现为生长减退、出笋量明显下降、笋期提早, 枝梢出现短小的变型叶片、叶色变黄等异常现象。竹子开花不受竹秆年龄限制, 在开花竹林或竹丛中刚长出的新竹也可以开花, 还有的新竹在当年正常生长, 秋末形成花芽, 第二年春季开花。竹类植物的花序可分为两大类型, 即一次发生的有限真花序和多次发生的无限假花序。竹花可分为开放型和闭合型两类。花柱可分为长花柱型和短花柱型。竹类果实的形态解剖特征是竹类长期演化的产物, 能反映其系统特征。竹类植物的果实可分为三种类型: ①颖果类型: 绝大多数竹种果实属于颖果类型, 果皮与种皮紧密相连; ②坚果类型: 如方竹属竹种的果实, 为坚果状, 可与种子剥离; ③浆果类型: 少数竹种的果实属于囊果、浆果状类型。各种果实的形状、大小和重量变异很大。不同竹种开花后, 可以抓住其天然开花的有利时机, 进行不同种、不同属之间的杂交授粉, 开展杂交育种工作。同时有些竹种花后能产生大量的种子, 异交和种子的发芽可保证遗传的变异、分离和重组。一般竹子实生苗变异很大, 这为实生苗选优提供了丰富材料, 同时也为遗传学研究提供了重要的内容。

关键词 有性生殖; 竹子多样性; 遗传变异

Sexual reproduction and its biological diversity

LIN Shuyan, DING Yulong, WANG Fusheng

(Bamboo Research Institute of NanJing Forestry University, NanJing, 210037)

Abstracts: Bamboos belong to the subfamily Bambusoideae of family Gramineae. China is rich in bamboo resources with more than 500 species, belonging to 39 genera reported. The flowering cycle of bamboo is long and erratic, and a long-term vegetative propagation makes the genetic variation relatively narrow, so it is difficult to use conventional breeding techniques to change the bamboo character and develop new

基金项目 “十一五”科技攻关项目: 竹资源优良品种选择与育种技术研究(编号: 2006BAD19B0204)。

通讯作者 丁雨龙 ylding@vip.163.com

varieties. In recent years, some bamboo species had been flowering. Bamboo biodiversity showed not only in species and ecosystem but also in its flowering character, fruit and seedling diversity. There is very little information about the research on the bamboo biodiversity, and its diversity protection has not attracted sufficient attention. This paper reviews the diversity of sexual reproduction of bamboo mainly from the bamboo flowering phenomenon, flower structure, seed, hybrid breeding and bamboo seedlings and tried to explore the problems existing in sexual reproduction diversity, and protected the rare and endangered bamboo species.

On the basis of their flowering behaviors, two groups of bamboos are categorized: one is that flower gregariously and periodically, which will die off after flowering in a few years. The second is that the flowering individuals die off while the whole plantation stays alive. Ordinarily, bamboos expresses some abnormal phenomena: low speed of development, fewer quantity of new bamboo shoots, the bamboo shooting time ahead of schedule, the shorter and smaller leaves. The culm age of the bamboos doesn't affect the flowering and the new bamboos also can flower. Even some bamboo species developed normally in spring, but it flowered in autumn, and blossomed in spring of the next year.

There are two basically different types of bamboo's inflorescence. the indeterminate one and determinate one. The florets separate into opening and closing types and the styluses into long and short types. The anatomic characters of bamboos fruit can reflect the system characters. Most of bamboo fruits are caryopsis, but the fruits of certain species are pomes, nuts or utricles. Variations in the size, shape and anatomical structure of the fruits are visible between the genera.

We can take advantage of the time of bamboos blossoming to make hybridization between different bamboo species or different genus. Some bamboo species can get abundant seeds which insure the genetic variation. Usually the bamboo seeding vary largely, so it can provide plenty of materials to choose the excellent species, and enriches genetics research.

竹类植物是禾本科竹亚科植物的总称。我国幅员辽阔，竹类资源非常丰富，有39个属500余种^[1]，世界三大类竹种，即散生竹、丛生竹、混生竹，我国均有分布。由于竹子大多为多年生一次性开花结实的植物，开花周期长，长久的无性繁殖造成遗传变异狭窄，很难利用常规育种手段突破性地改变笋、竹性状和培育新品种。近些年来，全国产竹地陆续出现了竹子开花现象。竹子除在物种、形态结构上种类繁多外，其有性繁殖也存在着多样性。因此竹子生物多样性不仅表现在种内、种间及生态系统的多样性，还表现在其开花、结实及竹苗生长变异的多样性。当前系统研究竹子生物多样性的文献较少，其多样性保护也未引起足够重视。本文在作者近几年对十几个竹种开花特性研究的基础上，结合前人对开花竹种的研究，探讨了竹类植物有性生殖的多样性。

1 竹子开花现象

我国各地竹子开花的现象也不断有报道：1963年广西梧州、桂林几万亩毛竹（*Phyllostachys edulis*）开花结实^[1]；1985—2000年，杜凡等深入云南各地进行竹子调研，15年中共发现有包括毛花酸竹（*Acidosasa hirtiflora*）、碟环慈竹（*Bambusa patellaris*）、料慈竹（*Bambusa distegia*）、緬竹（*Bambusa*

burmanica)、水单竹 (*Bambusa papillata*) 等在内的23属、61种的竹子开花^[2]; 毛高喜和张春霞观察了南京林业大学竹类植物园1984—1996年间竹子开花的情况, 分别有篾竹 (*Phyllostachys nidularia*)、水竹 (*Ph. heteroclada*)、角竹 (*Ph. fimbriiligula*)、寿竹 (*Ph. bambusoides f. shouzhu*)、金佛山方竹 (*Chimonobambusa utilis*)、箬竹 (*Indocalamus tessellatus*) 等11种竹子开花^[3]; 安吉竹种园自1974年建园以来, 已先后有早竹 (*Phyllostachys praecox*)、红壳竹 (*Ph. iridescens*)、五月季竹 (*Ph. bambusoides*) 等10多种竹子发生开花, 面积达3.03hm², 其中衢县红壳竹 (*Ph. rutila*)、美丽箬竹 (*Indocalamus decorus*) 等因开花死亡而在园内绝迹^[4]; 浙江上虞已有700余年栽培历史的角竹, 据程有龙等统计, 1993年开花竹株占30%左右, 1994年达到85%; 浙江鄞县金陆村在1990年下半年有10hm²淡竹 (*Ph. glauca*) 开花^[5]; 浙江西天目山的毛竹在1954年成片开花; 其他如妈竹 (*Bambusa boniopsis*)^[6]、紫竹 (*Phyllostachys nigra*)^[7]、冷箭竹 (*Bashania fangiana*)^[8]、箬竹 (*Qiongzhueta tumidinoda*)^[9]、绿竹 (*Dendrocalamopsis oldhami*)^[10]等也有相关的开花报道。除此之外, 南京林业大学竹种园近年又有月月竹 (*Chimonobambusa sichuanensis*)、异叶苦竹 (*Arundinaria simonii f. albostrigatus*)、鹅毛竹 (*Shibataea chinensis*)、孝顺竹 (*Bambusa multiplex*)、福建茶秆竹 (*Pseudosasa amabilis var. convexa*) 等十几种竹子相继开花^[11]。

2 竹株开花形态

自然界中大多数竹子要经历长时间的营养生长后才会开花, 而且往往是同步开花, 开花后集体死亡^[12-13], 因此, 正常情况下很少看到竹子开花, 竹子花期不固定, 有的一生一次, 有的一生多次。一次开花的竹种, 花后一片竹林或一竹丛死亡, 再天然下种更新恢复 (如毛竹)。也有一片竹林花后开花竹株死亡, 但地下茎仍能抽出更新鞭, 长出更新竹, 如鹅毛竹, 其竹株每节分枝第1, 2节着生花序, 每个花序上簇生5~10个小穗, 花芽于每年10月初在新生竹株上分化, 于第二年3月份开花, 每次花后老秆死亡, 5月又抽出新竹秆, 恢复其营养生长。老竹开花一般都在春季换叶时开始, 如异叶苦竹等在每年3月初于节处长出小穗花轴, 每个小穗含小花6~10朵, 4月初陆续开花^[14]。

一般竹子在开花前竹株或竹丛在生长量、出笋时间、出笋数量、笋体大小、叶片形态等方面都会表现出异常状态, 表现为生长减退、出笋量明显下降、笋期提早, 枝梢出现短小的变型叶片等现象。如麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*) 开花前有明显的预兆^[15], 据邢新婷等连续3年观察, 发现麻竹在开花前, 麻竹林出笋量明显减少且竹笋个体细小, 幼竹或老竹的小枝上开始出现变异型小叶, 老叶片开始变枯黄脱落, 从形态上预示着即将开花。麻竹在出现变异型小叶后, 小枝即停止生长, 其上的顶芽或侧芽从营养生长转变为生殖生长, 成为花分生组织, 继而发育成花芽、花小穗。

3 花期

竹子开花一年四季都可以发生，但盛花期因竹种而有不同。以南京地区为例，丛生竹如孝顺竹的盛花期为5月份；异叶苦竹的盛花期在4月上旬；福建茶秆竹、粉绿竹、花秆早竹、黄槽石绿竹等则在4—5月份；鹅毛竹的盛花期较早，在3月中旬；月月竹的盛花期在3—4月份；而酸竹属的一个竹种则在10—11月份开花。

4 花器构造

竹类植物的花序可分为两大类型。即一次发生的有限真花序和多次发生的无限假花序。真花序有总梗，花序主轴分枝为圆锥状、总状和近穗状，为单次发生花序。假花序由无柄的假小穗组成，形成头状、球状簇丛。小穗有柄或缺，含1至多花。每小穗下方有1至数枚(通常为2枚)颖片^[16]。

竹子的花为颖花，一般由内稃、外稃、雄蕊、雌蕊、浆片等部分组成。雄蕊通常3或6枚；柱头2或3裂；浆片3。开花类型有两种，一为内、外稃张开型，开花时浆片吸水膨胀撑开稃片，雄蕊和雌蕊伸出，如异叶苦竹，其开花时间仅为1~2 h，晴天开花较多，雨天开花较少；上午开花最为强烈，中午、下午较弱。二为内外稃闭合型，如鹅毛竹，开花时稃片不张开，雄蕊伸长露出稃片散粉，有少量雌蕊于雄蕊散粉后才露出稃片，雌雄异熟。根据张文燕等^[17]的研究，将竹子的花柱分为长花柱型和短花柱型：前者柱头细长，开花时稃片微启，柱头伸出稃外；后者花柱较短，不伸出稃外，开花时稃片张开露出柱头。根据作者的观察，花秆早竹、粉绿竹、黄槽石绿竹、鹅毛竹等竹种属于长花柱型。而异叶苦竹、月月竹、福建茶秆竹，短穗竹等竹种，它们的柱头较短，不伸出稃外，开花时稃片张开露出柱头，几小时后稃片闭合，属于短花柱型^[14]。

5 结实情况

竹类植物的果实可分为三种类型^[1]：①颖果类型：绝大多数竹种果实属于颖果类型，干燥而不开裂，果皮与种皮紧密相连，体型较小，通常认作种子，细长或椭圆形似麦粒；②坚果类型：如方竹属竹种的种子，椭圆形，果实为坚果状，果皮较厚硬，可与种子剥离；③浆果类型：少数竹种的果实属于囊果、浆果状类型。各种果实的形状、大小和质量的差异很大。

张文燕等^[18]认为竹类植物普遍存在花而不实的现象，不少竹种大面积开花，且持续多年，但很少结实或不结实。上田弘一郎^[19]最早在开花刚竹中试验，结果仅得到了皱缩的种子。笠原^[20]研究刚竹结实情况后指出，刚竹不能依靠种子来繁殖。张文燕等^[18,21-22]对安吉竹种园13种开花竹的结实情况进行了研究，能采到种子的只有衢县红壳竹，结实率仅为6.1%；秦自生和 Taylor^[23]曾采集拐棍

竹 (*Fargesia robusta*)、糙花箭竹 (*F. scabrada*)、缺苞箭竹 (*F. denudata*)、华西箭竹 (*F. nitida*) 的果穗, 均未采到成熟果实; 程有龙^[5] (1995) 研究角竹时发现, 角竹因长期来用无性繁殖方式繁衍后代, 有性繁殖的机能明显退化。原因在于花粉囊壁较厚, 花药难以破壁撒粉; 绝大多数花粉囊中无花粉, 即使有花粉, 也以干瘪居多; 同时, 雌蕊的柱头退化为绢丝状, 花柱过于细长并且难以伸出稃外。由于存在以上多种原因, 导致角竹开花“华而不实”; 陈舒怀和谭宏超^[24]在研究龙竹 (*Dendrocalamus giganteus*) 时发现, 龙竹的雌蕊子房发育不健全, 而雄蕊又很难形成花粉粒, 故目前尚未见到有关龙竹种子的报道; 袁金玲等^[25]研究丛生竹开花授粉时发现, 绿竹属的 3 个竹种雌蕊退化, 花粉少或无, 不易结实。林树燕等通过几年对鹅毛竹的研究发现, 鹅毛竹花后不结实, 主要原因在于鹅毛竹属于雌雄异熟, 且鹅毛竹柱头几乎没有可授性^[14]。

但又有资料显示, 大多数竹子在开花后都能结实, 尤其是野生竹种。1958~1960 年, 孟加拉国吉大港的 Matamure 和 Sungu 林区, 几万公顷的梨竹 (*Melocanna baccitera*) 开花结实, 老竹枯死, 种子天然更新成林^[1]; 浙江省现有的箬竹林, 也都是 50 年代开花结籽后, 由掉入林地的种子萌发生长繁衍的结果^[5]。张家贤等^[26]对爬竹 (*Drepanostachyum scandens*) 的开花结实情况进行研究, 认为爬竹结实量大, 种子饱满, 发芽率高, 幼苗生长健壮, 天然更新是完全可能的。杜凡等^[21]15 年间通过对 23 属 61 种竹子研究发现, 野生型竹种的结实率较高 (79%), 栽培型竹种结实率较低 (27%), 这意味着竹子的结实率受人为影响: 栽培型竹种可以通过人工移栽等无性繁殖方式传播, 而野生型只能依赖有性繁殖来传播, 长时间选择导致了野生型结实率高而栽培型结实率低的结果; 袁金玲等^[25]通过研究发现撑篙竹 (*Bambusa pervariabilis*) 花的雌雄蕊同时成熟, 柱头和花药同时伸出, 结实容易。林树燕等通过对异叶苦竹、福建茶杆竹、孝顺竹、月月竹的研究发现, 这 4 个竹种在自然条件下均能产生一定数量的颖果, 且人工授粉能显著提高异叶苦竹的结实率。

6 竹苗生长变异的多样性

通过收集种子并繁殖实生苗, 对种子特性和实生苗的生长发育进行了调查分析, 试图为进一步开展竹子优良无性系的系统选育打下基础。目前有关这方面的研究报道很少, 仅对几个竹种如箬竹 (*Qiongzhusia tumidinoda*)^[27]、雷竹 (*Ph. praecox*)^[28-29]、牡竹 (*D. strictus*)^[30]、泰竹 (*Thyrsostachys siamensis*)^[31]、粉单竹 (*Bambusoideae cerosissima*)^[1]、巨竹属一竹种^[32]、麻竹^[15]、异叶苦竹^[14]做过研究。林树燕通过对异叶苦竹颖果及苗期生长研究发现^[14], 异叶苦竹种子长度变化范围在 12.94~20.28mm, 直径为 2.95~5.18mm, 种子之间变异较大。由种子繁殖的实生竹苗分化很大, 近一年生实生苗最高的竹苗达 45.8cm, 生长势良好, 矮的仅 13cm, 且分蘖数少。不同竹苗间高生长存在显著差异。这反映出异叶苦竹实生苗本身存在一定的遗传变异, 还需通过进一步的观察记录, 进行优良

单株选择, 该方面需要进一步的研究。

7 存在的问题及展望

对竹类植物中的特产、珍稀及濒危种开展保护, 是有效保护竹类物种多样性的迫切需要, 也是实现我国竹业可持续发展的基本保障。群体开花死亡对珍稀竹种种质资源的威胁、不良开发经营方式对珍稀竹种造成的破坏应值得注意^[33]。如特产我国极具观赏价值的倭形竹 (*Indosasa shibataeoides*), 1978年时还有天然林野生分布于广东罗浮山, 但20年后因人为活动导致其野生种群几近灭绝。这些珍稀濒危的竹种不乏具有重要开发利用价值的经济竹种, 如世界上最大的竹种巨龙竹 (*Dendrocalamus sinicus*), 具有巨大的材用价值, 但近年来陆续出现零星开花现象, 但只开花不结实, 若等到出现群体开花则将造成这一珍贵竹种的毁灭。因此采取有效措施保护珍稀种质资源, 保护我国竹类多样性已迫在眉睫。

虽然我国竹类植物的生物多样性保护在实践方面已经取得了引人瞩目的成绩, 但总的来看, 仍处于刚刚起步的阶段, 尚有许多理论和实际工作需要进一步深化。在理论研究方面应该着手查清我国竹类植物的基因图谱, 摸清我国竹类植物生物多样性的家底, 并识别和筛选出一批需要特别关注的处于濒危和渐危状态的竹类植物种类。并对那些濒危和渐危的竹类植物种类的生活史进行深入仔细的研究, 找出其致危环节的机制^[34]。

参考文献

- [1] 周芳纯. 竹林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998: 119
- [2] 杜凡, 薛嘉榕, 杨宇明 等. 15年来云南竹子的开花现象及其类型研究[J]. 林业科学, 2000, 36 (6): 57-68.
- [3] 毛高喜, 张春霞. 竹子开花的原因及预防措施[J]. 林业科技开发, 1996, (4): 33-34
- [4] 黄树田. 竹类开花与防止的探讨[J]. 竹子研究汇刊, 1998, 17(2): 53-55
- [5] 程有龙, 任德唐. 角竹开花习性观察及复壮更新对策[J]. 浙江林业科技, 1995, 15(2): 50-56
- [6] 孙谷畴, 王伟. 妈竹开花的水分特性和氮含量[J]. 竹类研究, 1987 (2): 16- 20
- [7] 伊东佑道, 松尾文昭. 毛金竹的开花研究[J]. 日本林学会关西讲集, 1990, 10(41): 171-174
- [8] 秦自生. 冷箭竹生物学特性研究[J]. 四川师范学院学报, 1994, 15(2): 107-113
- [9] 董文渊, 黄宝龙, 谢泽轩, 等. 箬竹开花结实特性的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2001, 25(6): 30-32
- [10] 高培军. 绿竹开花生理生化特性研究[J]. 竹子研究汇刊, 2002, 21(4): 70-75
- [11] 林树燕, 丁雨龙, 张昊. 5种竹子花粉萌发率及开花特性[J]. 林业科学, 2008, 44(10): 159-163
- [12] Janzen D H. Why bamboos wait so long to flower [J]. Annu Rev Ecol Syst, 1976, 7: 347-391
- [13] John C K, Nadgauga R S. In vitro-induced flowering in bamboos [J]. In vitro Cell, 1999, 35:309-315
- [14] 林树燕. 鹅毛和异叶苦竹的生殖生物学研究[D]. 南京林业大学博士论文, 2009

- [15] 邢新婷, 傅懋毅, 肖贤坦. 麻竹开花生物学特性观察及控制授粉的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27 (6) : 103-107
- [16] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 12
- [17] 张文燕, 马乃训. 竹类植物花粉的生活力和自然受粉[J]. 林业科学研究, 1990, 2(2): 250- 255
- [18] 张文燕, 马乃训, 陈红星. 竹类植花粉形态及萌发试验[J].林业科学研究, 1989, 2(2): 67-70
- [19] 上田弘一郎. 竹子的开花和死亡及正确处理[J]. 竹类研究, 1975(2): 57- 60
- [20] 笠原, 冈村, 田中. 刚竹林全面开花后恢复初期过程的观察和研究[J].竹类研究, 1984(2): 64-70
- [21] 张文燕, 马乃训. 竹类植物花期生物学特性[J]. 林业科学研究, 1989, 2(6): 596-600
- [22] 张文燕, 马乃训.五月季竹开花结实的研究[J].竹子研究汇刊, 1992, 11(2): 15-25
- [23] 秦自生, Alan H Taylor.冷箭竹生殖特性研究[J].西北植物学报, 1995, 15(3): 229- 233
- [24] 陈舒怀, 谭宏超. 龙竹的生物学和生态学特性[J].云南林业科技,1997, 4:35-38
- [25] 袁金玲, 傅懋毅, 姜景民. 几个丛生竹种杂交育种的研究[A].中国林学会首届竹业学术大会论文集. 2004
- [26] 张家贤, 罗威, 明勇. 爬竹开花结实调查[J]. 贵州林业科技, 1992, 20(2):31-32
- [27] 董文渊, 黄宝龙, 谢泽轩,等. 筴竹种子特性及实生苗生长发育规律的研究[J].竹子研究汇刊, 2002, 21(1):57-60
- [28] 付顺华, 吴家森, 余永清, 等. 雷竹种子特性及苗期生长观察[J].山东林业科技, 2002(1): 11-12
- [29] 付顺华, 余永清. 雷竹人工制种技术的初步研究[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(1): 6-9
- [30] Mukunthakumar S, Mathur J. Artificial seed production in the male Bamboo *Dendrocalamus strictus* [J]. Plant Science Limerick, 1992, 87(1):109-113
- [31] Richa, Sharma M L. Enhancing the germination of stored bamboo seeds using plant growth regulators [J]. Seed Science and Technology, 1994, 22(2): 313-317
- [32] Muller L. Flowering and fruiting of a *Gigantochloa ridleyi* clone, seed germination and growth [J. American Bamboo Society, 1998, 19(3): 8-11
- [33] 辉朝茂, 胡冀珍, 张国学, 等. 中国竹类多样性及其可持续利用研究现状和展望[J]. 世界林业研究, 2004, 17(1): 50-54
- [34] 李睿, 章笕, 章珠娥.中国竹类植物生物多样性的价值及保护进展[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(4):7-12

竹类植物生物多样性减少原因及保护对策

程平 彭九生 王海霞

(江西省林业科学院, 江西南昌, 330032)

摘要 本文概述了竹类植物生物多样性的概念、意义和现状; 分析了竹类植物生物多样性减少的主要原因, 涉及自然、人为及制度因素, 其中人为因素主要包括生境丧失、竹类资源过度开发、经营模式演替、环境污染等; 同时就提高人们认识、建立和完善法规体系、强化生态培育措施、加强林政管护、增加科技投入、开展保护生物学基础研究等方面提出了相关保护对策, 建议从竹类生物多样性信息系统建立、人为活动对竹类生物多样性的影响、竹类生物多样性长期动态监测、竹类植物遗传多样性研究、珍稀竹类植物濒危机制研究、竹类生物多样性保护技术与对策研究等方面加强竹类植物生物多样性研究。

关键词 竹类植物; 生物多样性; 原因; 保护对策

Decreasing Causes of Bamboo Biodiversity and Its Protection Strategies

CHENG Ping, PENG Jiu-sheng, Wang Hai-xia

(Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, Jiangxi, China)

Abstract: This paper summarizes the conception, the significance and the situation of bamboos' biodiversity, analyses its main reduction reasons consisting of natural, artificial and system factors, meanwhile the protection countermeasures such as improving our cognition, establish and perfect the regulations, strengthen ecological cultivation measures of bamboo forestry, enhance management of forestry administration, increase science and technology investment, develop conservation biology basic research were put forwarded.

Key words: Bamboo, Bio-diversity, Causes, Protection countermeasures

生物多样性是人类社会赖以生存和发展的物质基础, 然而由于自然、人为以及制度方面的原因, 全球生物多样性正日益遭受到严重的损失和破坏, 保护生物多样性已成为当今国际社会环境与发展研究的热点问题之一。中国是一个竹类植物生物多样性十分丰富的国度, 竹类植物是我国重要的森林资源, 研究和探讨竹类植物的生物多样性及其保护对策是我国实现竹业可持续发展的战略需要。

1 生物多样性概述

生物多样性是所有生物种类、种内遗传变异和它们的生存环境的总称, 包括所有不同种类的动

物、植物和微生物，以及它们所拥有的基因，它们与生存环境所组成的生态系统。联合国《生物多样性公约》的定义是：生物多样性是指所有来源的活的生物体中的变异性，这些来源除其他外包括陆地、海洋和其他水生生态系统及其所构成的生态综合体。这包括物种内、物种之间和生态系统的多样性^[1]。生物多样性包含四层含义，即遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性和景观多样性。遗传多样性是指某个物种内个体的变异性；物种多样性是指地球上生命有机体的多样性；生态系统多样性是指生物圈内生境、生态群落和生态过程的多样性以及生态系统内生境差异、生态过程变化的多样性；景观多样性是指不同类型生态系统构成的景观在空间结构、功能机制和时间动态方面的变异性。它们之间既有区别又有联系，其中生态系统多样性是基础，而物种多样性则是关键。

2 竹类植物生物多样性

2.1 物种多样性

竹类植物天然分布于亚洲、非洲、美洲三大洲的热带、亚热带区域，东南亚季风区为竹类植物的中心分布区。目前全球共有竹林面积 2 000 万 hm^2 以上，约占世界森林总面积的 1%。中国的竹林面积约 500 万 hm^2 ，约占全国森林总面积的 4%，占全球竹林面积的 25%。全世界共有竹类植物 107 属 1 300 多种，其中木本竹类植物 79 个属 1 200 多种，草本竹类植物 28 个属 180 余种。据《中国植物志(第九卷第一分册)》记载，中国有竹类植物 39 个属(其中新属及中国新分布属共 19 个)509 种，属数和种数分别占世界总数的 36%和 39%^[2]。

2.2 遗传多样性

我国竹类植物遗传多样性十分丰富，种内产生了众多变种、变型和栽培型，如刺竹属 (*Bambusa*)104 种 16 变种 4 变型 6 栽培型、牡竹属 (*Dendrocalamus*) 46 种 1 变种 5 变型 3 栽培型、大节竹属(*Indosa*) 23 种 1 变种 1 变型、刚竹属(*Phyllostachys*) 65 种 1 变种 45 变型、苦竹属(*Pleiolobatus*) 34 种 1 变种 1 变型等^[3]。迄今国产竹类植物 577 种有变种变型 103 种，其中我国特有竹种 463 种，变种变型 83 种^[4]。竹类植物尤其是一些经济价值高的竹种，因其栽培面积大、人类生产活动频繁，已发生很多变种变型。如毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. pubescens*)，已发现圣音毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Tubaeformis*)、龟甲竹(*Phyllostachys heterocyclus*)、强竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Obliquinoda*)、佛肚毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Ventricosa*)、金丝毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Gracilis*)、方竿毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Tetrangulata*)、梅花毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Obtusangula*)、花毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Tao Kiang*)、黄槽毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Luteosulcata*)、绿槽毛竹(*Phyllostachys heterocyclus cv. Viridisulcata*)、厚皮毛竹 (*Phyllostachys*

heterocyda cv. Pachyloen) 等 10 余种种内变异类型^[5,6]。其它如刚竹、孝顺竹等也发现有多个变异类型^[3]。竹类植物分子系统学研究方面, DNA 分子标记在竹类植物种质资源鉴定、遗传多样性分析、系统进化与分类等方面取得了较快进展, 如利用 RAPD 方法对撑篙竹(*Bambusa pervariabilis McClure*) 自然分布区内 6 个群体进行了遗传多样性分析, (28 个引物共扩增出 173 条带, 其中 85 个为多态性条带, 占总条带的 49.13%,) 对于分布范围相对较窄的撑篙竹来说, 该比例表明其群体在 DNA 水平存在较丰富的遗传多态性, 并且其群体间基因分化系数大于 0.1, 说明群体间的分化较大, 遗传多样性比较丰富^[7]。此外, 迄今在 NCBI 登录的竹亚科序列有核苷酸序列 1 007 条, EST 序列 581 条, GSS 998 条, 共计 2586 条, 应用这些基因组序列研究将揭示竹子许多生物学特性以及系统进化关系^[8]。

2.3 生态多样性

竹类植物按其地下茎结构及竹竿群集程度可分为合轴丛生、单轴散生和复轴混生 3 大类, 其中合轴丛生型竹种较喜暖热, 主要分布在印度、泰国、印度尼西亚、菲律宾等国家及南美诸国; 单轴散生型竹种则较耐寒, 主要分布日本、朝鲜等国家及北美洲; 复轴混生型竹种对热量的需求介于二者之间。在中国, 合轴丛生、单轴散生和复轴混生 3 大类兼有分布^[2]。

我国竹类植物水平分布以北纬 40° 为北界, 垂直分布可至海拔 4 000 m 以下的高山, 全国有竹林分布或栽培的省市达 27 个。华中和华东及其以北地区主要以单轴散生竹为主, 华南和西南地区则以合轴丛生竹为主。竹种自然分布中以云南省最为丰富, 东南沿海的广东、浙江、福建、台湾等省区也较多, 内地则以四川、江西、湖南、广西、贵州等地为主。

2.4 景观多样性

竹类植物物种多样性、遗传多样性和生态多样性为竹子的园林造景提供了广泛素材, 无论是城市绿化、公园景点还是厂区美化、庭园院落, 到处都有竹子的身影。从观赏特性来看, 大致可分为观秆竹种、观叶竹种、观笋竹种和观形竹种; 从竹株外型大小来分, 有类乔木竹种、类灌木竹种、绿篱类竹种和铺地类竹种; 根据园林造景功能分, 竹类植物可作主景、配景、盆景、竹径、绿篱和地被物; 在园林造景方式上, 竹类植物可孤植、丛植、群植、盆植等, 以其形、意、影、趣赋予人们美不胜收的欣赏意境。

3 竹类植物生物多样性的意义

竹类植物生物多样性与人类的生存和发展有着密切的关系。自古以来竹子与人们的日常生活息

息相连，在食、住、行等方面发挥着重要作用，目前广泛应用于建材、建筑、绿色食品、医疗保健、家具农具、日用品、工艺品、文体文艺器材、环境美化等各个领域。它不仅能为人类提供丰富的自然资源，满足人类社会对食品、药物、能源、工业原料、旅游、娱乐、科学研究、教育等的直接需求，而且能提供维持生态系统功能、调节气候、保持水土、净化空气、美化环境等生态服务价值，从而支持着人类社会的经济活动和其它活动。此外中国竹文化内容丰富，博大精深，是中国人民值得骄傲的物质和精神财富，是中华灿烂文化的重要组成部分，因此竹类植物生物多样性对中国的文化多样性有着重要的影响。

4 我国竹类植物生物多样性保护现状

2004年，联合国公布了由联合国环境规划署和国际竹藤组织联合提出的一项研究报告，提出全球大约1200种野生竹种中，将近一半因乱砍滥伐面临消亡危险，有250种因每一竹种面积不到2000平方公里而划为最濒危竹种，极易遭到砍伐而灭绝^[4]。1984年，国务院公布了第一批“中国珍稀濒危保护植物名录”，其中短穗竹(*Brachystachyum densiflorum*)和箬竹(*Qiongzhusua tumidinoda*)被列为稀有种^[10]。1998年出版的《中国生物多样性国情报告研究》一书中，有12种竹类植物被列为中国被子植物濒危及稀有种，它们是酸竹、悬竹、峨热竹、寒竹、方竹、铁竹、薄竹、芸香竹、单枝竹、箬竹、庆元华箬竹、百山祖玉山竹；有11种竹类植物被列为中国被子植物特有属代表种，分别为酸竹、射毛悬竹、巴山木竹、铁竹、贡山竹、井冈寒竹、薄竹、异枝竹、单枝竹、少穗竹、箬竹，其中有6种相重复^[9]。1999年，我国政府公布了第一批“国家重点保护野生植物名录”，其中酸竹(*Acidosasa chinensis*)被列入II级保护^[4]。

目前，我国已在竹类植物就地保护和迁地保护实践方面取得了可喜成就。就地保护方面，我国现有自然保护区300多个，在众多的森林生态系统类型自然保护区中，竹类植物也是其中重要的组成物种，如西双版纳自然保护区的香糯竹(*Cep halostachyum pergracile*)、武夷山自然保护区的武夷玉山竹(*Yushania wuyishanensis*)、江西井冈山自然保护区的花箬唐竹(*Sinobambusa striata*)和井冈寒竹(*Gelidocalamus stellatus*)、海南尖峰岭自然保护区的射毛悬竹(*Ampelocalamus actinotrichus*)等。据初步统计，我国80%的特产珍稀濒危竹类已被划入到各自然保护区的保护植物名录中^[10]。迁地保护方面，全国各地相继建立了竹类植物园(包括专题区)，用于专门收集和保存竹类植物种质资源，其中面积较大、竹种数较多的有20余个^[2]，如浙江安吉竹种园、福建华安竹类植物园等，这些竹类植物园的建立和发展不仅使分散的竹子得到了集中保存，而且使一些分布范围狭窄的残存种群或濒危种群得以保护和发展。此外，我国笋、材用经济竹林的栽培和观赏竹的种植，也对竹类植物生物多样性就地或迁地保护起到了重要的促进作用。

5 竹类植物生物多样性减少的主要原因

5.1 自然原因

竹类植物生物多样性减少的自然因素主要有两方面，一是物种本身的生物学特性。竹类植物通常开花周期长且不稳定，有的竹种百年不见开花，有的竹种不具稔性，因而大多数竹种的繁衍更新基本上依赖无性繁殖。通常来说，一个具有正常有性繁殖能力的竹种比不具备有性繁殖能力的竹种，其后代的繁衍和延续更有前途和希望，也就是说在资源、数量等条件相似或一致的前提下，不具稔性的竹种更容易达到或接近濒危状态，由此看来，单轴型竹类植物应该有更高的濒危等级^[4]。二是地震、火灾、暴风雪、干旱等自然灾害引发的环境突变。如 2008 年我国南方地区遭受雨雪冰冻灾害，我国森林受灾面积 3.4 亿亩，种苗受灾 243 万亩，损失 67 亿株^[11]。毛竹林灾情几近毁灭性，以江西省为例，毛竹林受灾面积达 73 万多公顷，占全省毛竹林总面积的 90%，损毁毛竹 5.97 亿株，占全省现有毛竹蓄积总量的 40%^[12]。

5.2 人为原因

5.2.1 生境的丧失

多种人类活动都可能导致生境的片断化或生境的丧失，如铁路、公路、沟渠、电话网络、农田、电站、其他分隔物等人为设施。由于这些人为设施的建立，引起生境内阳光、温度、湿度及风等因素的变化，改变了生存环境条件，缩小了生存空间。当前一些分布区狭窄的竹种，通常是生态幅窄和高度特化，遗传物质纯化，基因多样性降低，极不适应变化的环境，狭窄的生存环境一旦受到破坏，该类物种就会处于濒危之中，甚至灭绝^[4]。在竹林经营过程中，由于天然林的砍伐和造林树种单一化、针叶化、纯林化及采取炼山等落后的营林手段，许多适合竹类植物生长的环境被破坏，生物链断裂，导致许多竹种病虫害严重、生长衰弱，种群退化缩减，有的竹种呈现出大面积的开花、死亡现象，如 20 世纪 80 年代末至 90 年代中期闽东北的福建酸竹林、肿节少穗竹林曾连续发生大面积开花，导致其分布面积和种群数量锐减^[13]。据资料，目前全球有 250 种因每一竹种面积不到 2000 平方公里而划为最濒危竹种，极易遭到砍伐而灭绝^[4]。

5.2.2 掠夺式的过度开发

竹类资源对人类具有直接的经济价值，随着全球商业化体系的建立和发展，人类对其需求随之迅速上升，其结果导致对这些资源的过度开发并使生物多样性下降。一般来讲，当市场对某种野生生物资源有较大需求时，通常会导致对该物种的过度开发。近二、三十年来毛竹林面积、蓄积不断

扩大，然而许多中小径竹面积、蓄积则锐减，有的甚至已到了濒危的程度。此外在市场经济利益驱动下，毛竹林出现砍伐年龄失控、采伐强度过大、滥挖冬笋等掠夺式的过度开发现象，毛竹林生态系统遭到严重破坏。有些竹林特别是交通便利的竹林采伐强度过大、采伐年龄几乎失控，随处可见3-4年生壮龄大径级毛竹被大量砍伐，造成现有竹林小径竹多、老龄竹多、疏林多，竹林结构严重失调，竹林生长量、立竹质量明显下降；同样，由于对科学疏笋育竹认识不足，管理不力，许多地方普遍出现不同程度地乱挖竹笋，表现为沿竹找鞭、追鞭寻笋，林地被挖得千疮百孔，竹鞭暴露，鞭芽受损，整个竹林损坏严重，势必引起竹林系统生物多样性的降低。

5.2.3 经营模式演替

上世纪五、六十年代，福建、浙江、江西、湖南等毛竹主要产区，毛竹资源主要是天然起源，由不同类型的竹木混交林组成，尽管当时的经营水平很低，但由于竹木混交林生态环境适宜，维持着竹林较高生产力。从70年代开始推广经营毛竹纯林，把竹林中各种伴生的乔木树种特别是阔叶树环剥枯死或砍伐殆尽，变成毛竹单优群落。经过天然阔叶林—竹木混交林—毛竹纯林的演替过程后，原来竹木共生共荣、生态功能互补、稳定协调的生态系统遭受到干扰和破坏，物种流失、竹林生态系统多样性贫乏、生态稳定性降低，各种自然灾害日趋严重。同时，在这种经营模式引导下，加之人们认识不够，把各种毛竹栽培变异类型以及其它中、小型竹种视为“无用之物”而刀斧相向，“清理门户”，使得原本资源有限、生境狭窄的竹种更无立足之地。

5.2.4 环境污染

生物的生存环境被污染后，生物体内的毒物含量会逐渐积累。当富集到一定数量后，生物就开始出现受害症状，生理、生化过程受阻，生长发育停滞，最后导致死亡。污染物能影响植物的生理生化作用、影响植物的光合作用、破坏植物细胞膜的透性使植物的呼吸作用下降，还能改变并降低土壤微生物和酶的活性，影响植物根系对土壤中营养元素的吸收。如矿区、尾矿堆积地、矿区废弃地以及垃圾填埋废弃地都少有树木生长，也少有竹类植物生长。土壤污染通常会使当地植被退化，甚至变成不毛之地，同时土壤动物也会变的稀少甚至绝迹，其生物多样性比未受污染区显著下降。

5.3 制度原因

我国对生物多样性特别是珍稀濒危物种的保护虽一直非常重视，然竹类植物的保护尚为薄弱环节。首先，有关部门对保护竹类植物生物多样性重视不够，缺少相关具体实施细则、行动及专业人才；其次，《自然保护区条例》虽已实施多年，但毕竟在法律效力上位阶较低，调整面窄，处罚力度不够；第三，有些自然保护区本身存在管理混乱、土地权属不清等问题；第四，每个竹种的面积、

资源、分布等资料严重匮乏，应制定相关措施进行查清；第五，由于经济的发展，新城镇、水坝、水库、矿区的开发建设以及旅游活动等对生物多样性也会构成威胁。以上种种都亟需从生物多样性保护角度出发，制定切实可行的相关措施制度，以防生物多样性（包括竹类植物）免遭破坏。

6 保护对策

6.1 提高人们保护意识

国民素质的高低直接关系到生态环境及生物多样性的好坏。就竹类植物生物多样性来说，除发展利用外，更多的应加强民众教育，广泛、通俗、持之以恒地开展与之相关的文化科普教育和法律法规宣传，通过科普宣传教育，使广大群众充分了解竹类植物生物多样性的相关知识，认识到竹类植物生物多样性的经济价值和科学意义，从而提高保护意识，自觉参与资源的保护、发展与可持续利用。

6.2 建立和完善法规体系

自然保护区是具有保护自然环境和自然资源（包括竹类资源）的双重性质，建立自然保护区是就地保护生物多样性最有效的措施。据《世界资源》1997年的统计，全世界已建立较大面积的保护区一万多个，其无论在保存物种、遗传、生态系统的多样性还是在保护物种生境上都起了非常重要的作用，然而由于缺乏相关法律保护，自然保护区建设管理混乱、保护区内开发与保护矛盾突出、乱砍滥挖偷盗行为时有发生，造成一些自然保护区破坏严重。目前许多国家对自然保护区和国家公园进行了专门立法。我国是生物多样性最丰富的国家之一，更应制定相关的保护法规，有序协调指导保护区的保护、建设、管理和竹类资源的开发利用。此外，还应制定相关措施查清竹类植物资源，制订我国竹类植物濒危等级标准，完善重点公益林建设项目配套政策和管理制度，以此促进竹类植物生物多样性的保护。

6.3 强化生态培育措施

竹类资源培育是实现竹业可持续发展的基础，必须重视科学育竹，强化生态培育措施。生态培育的核心是充分发挥和利用竹林自然生产能力，恢复竹林生态系统的自然调控功能，达到竹林永续高效利用。一是通过科学育竹方法继续扩大现有竹林资源面积，从数量上强化资源优势，同时加强其它竹种的引进、繁殖与推广应用，不断优化竹林品种结构。二是通过科技培训转变广大竹农传统的竹林抚育经营观念，彻底改变粗放经营和掠夺性经营方式，提高竹林系统生态质量，禁止炼山、全垦整地造林，保留原生植被带，保留资源稀少的野生竹种。

6.4 加强林政管护

加强林政管护工作对促进竹类植物生物多样性保护也有着不可低估的作用，具体表现在：加大森林执法队伍建设，严厉打击破坏竹林的不法分子；加强森林防火工作，建立专业扑火队伍，维护竹林安全；严格控制竹林采伐限额，组建专业疏笋队伍，推崇生态经营模式，提高育竹水平，保护竹林生态；加大木竹检查检疫力度，杜绝外来病虫害侵入；对资源稀少、生境狭窄的野生竹种建立专项保护小区进行就地监测保护，防止砍伐。

6.5 增加科技投入

长期以来竹类研究多集中在毛竹、雷竹、方竹、淡竹、刚竹、绿竹、麻竹、慈竹等我国主要经济竹种上，而对其它竹种尤其是珍稀濒危竹种的研究甚少，几乎到了忽略地步。近年来，此方面工作虽有一定进展，如相继开展了厚皮毛竹、苦竹、大木竹、金镶玉竹等众多竹种的研究，但还远远不够。要有效保护和发展利用好竹类植物生物多样性，还应加大科研力度，对各种竹尤其是濒危竹种适生环境、生物学特性、资源快繁、丰产培育以及产品开发利用等进行系统的研究，特别要在资源人工快繁方面进行重点攻关，使其种群数量迅速扩大并得到较好的开发利用。

6.6 开展保护生物学基础研究

在进行竹类植物生物多样性保护实践的同时，更应注重竹类植物生物多样性的保护生物学基础研究。随着经济的发展，人口的增加，生物多样性承受的压力越来越大，有些物种（竹种）日益减少甚至濒临灭绝，然而我们对于竹类植物生物多样性受威胁的程度、原因等一无所知，对其动态变化的监测几近空白。因此，建议从竹类生物多样性信息系统建立、人为活动对竹类生物多样性的影响、竹类生物多样性长期动态监测、竹类植物遗传多样性研究、珍稀竹类植物濒危机制研究、竹类生物多样性保护技术与对策研究等多方面加强竹类植物生物多样性基础研究，为其保护策略的完善和实施提供科学理论依据。

参考文献

- [1] 张维平. 保护生物多样性[M], 中国环境科学出版社, 2001
- [2] 李睿, 章箴, 章珠娥, 中国竹类植物生物多样性的价值及保护进展[J], 竹子研究汇刊, 2003, 22(4):7-12
- [3] 周文伟, 华锡奇, 童晓青, 等. 竹子的生物多样性在园林绿化中的应用[J], 中国林学会首届竹业学术大会论文集, 中国林学会竹子分会, 2004
- [4] 马乃训, 陈光才. 我国特产珍稀濒危竹种及标准探讨[J], 中国林学会首届竹业学术大会论文集, 中国林学会竹子分会, 2004
- [5] 中国科学院中国植物志编辑委员会, 中国植物志[M] (第九卷, 第一分册), 科学出版社, 1996, 274-279

- [6] 程平, 彭九生, 黎美莲 等. 毛竹突变体种质资源及其保护发展对策[J], 科学时代, 2006 (11):76-77
- [7] 邢新婷, 傅懋毅, 费学谦等. 撑篙竹遗传变异的 RAPD 分析[J]. 林业科学研究, 2003, 16 (6)
- [8] 胡娇丽, 张岩, 汤定钦. 竹子基因组序列研究及应用[J], 竹子研究汇刊, 2008, 27(1):1-6
- [9] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情报告研究, 中国环境科学出版社, 1998
- [10] 马乃训, 陈光才, 袁金玲. 国产竹类植物生物多样性及保护策略[J], 林业科学, 2007, 43(4):102-106
- [11] http://www.gov.cn/jrzq/2008-04/22/content_951622.htm 低温雨雪冰冻灾害共造成直接经济损失 1516.5 亿元
- [12] 彭九生, 程平, 曾庆南. 江西毛竹林冰压灾害后恢复重建技术措施与建议[J], 世界竹藤通讯, 2008, (2):34-36
- [13] 胡明芳, 福建竹类植物生物多样性的现状、保护和利用[J]. 竹子研究汇刊, 2002, 21(4):33-38

龙竹云南种群遗传多样性的 ISSR 分析及种源保护

杨汉奇¹ 杨宇明² 孙茂盛²

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224;

2. 西南林学院资源学院, 云南 昆明 650224)

摘要 龙竹 (*Dendrocalamus giganteus* Munro) 自然分布于缅甸南部、泰国西北部和我国云南省, 并在亚洲热带和亚热带其它国家或地区广泛引种栽培, 是一种用途广泛、经济价值高的大型丛生竹种。龙竹在自然条件下多见零星开花, 但有性繁殖能力极弱, 在云南分布区内还未见结实的报道, 天然更新非常缓慢。由于日益强烈的人类活动干扰导致龙竹的生境不断恶化, 龙竹在云南现存的天然种群十分稀少, 亟需对其种质资源和天然种群进行保护。

本文首次应用 ISSR 标记对龙竹 7 个云南近天然种群的遗传多样性和遗传分化进行了研究。从 80 个引物中筛选出 7 个用于正式扩增, 在调查的 7 个种群共 113 个样丛中检测到 82 个多态位点。研究表明: (1) 云南分布的龙竹遗传多样性较高, 在种群水平上, 平均多态位点百分率 $PPB=12.24\%$, 有效等位标记数 $N_e=1.0727$, 平均 Nei's 等位标记多样性指数 $H=0.0436$, 平均 Shannon 信息指数 $I=0.0652$; 在物种水平上, $PPB=90.11\%$, $N_e=1.5387$, $H=0.3085$, $I=0.4588$; (2) 种群间遗传分化水平高, 种群间的遗传分化系数 (G_{st}) 为 0.8583; UPGMA 分析结果显示龙竹 7 个云南种群聚成 2 个分支: 3 个滇中种群, 即新平 (XP)、石屏 (SP) 和宁洱 (NE) 种群聚为一个分支, 其它的 4 个种群聚成另外一个分支; (3) Mantel 检测结果显示种群间遗传距离和地理距离之间没有显著的正相关性 ($r=0.3477$, $P=0.0510$)。我们推断人类活动的干扰、生境的片段化以及结实率低的生物学特性是导致龙竹种群稀少的主要因素。考虑到云南分布的龙竹遗传多样性和种群间遗传分化水平较高, 但种群的个体数量较少, 因此应该对龙竹所有种群以及个体实施及时的就地保护; 在迁地保护时应应在各种群内大量采样。

另外, 通过对龙竹云南 7 个代表性的地理种群的秆径和标准竹秆重进行了调查和统计分析, 结果显示各个地区龙竹平均秆径差异极显著, 其中勐海种群 (平均秆径 13.21 cm, 平均单竹秆重 44.97 Kg) 为云南不同原生龙竹种源中的最优种群, 而近二十年来龙竹在云南推广栽培的主要种源—滇中种源并不是云南分布区内的最优种源。滇南勐海的龙竹资源至今还没有得到重视, 建议该地的龙竹

基金项目 国际竹藤网络中心基本科研业务费专项资金项目 (06/07-D37)、“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD19B0301)、云南省科技厅联合支持国家科技项目 (2007GA014)、云南省竹藤科学创新团队项目

通讯作者 杨汉奇 yanghanqikm@yahoo.com.cn

资源作为今后云南推广龙竹栽培的首选种源之一。

关键词 龙竹；地理种群；遗传多样性；遗传结构；ISSR

Genetic diversity and resource conservation of *Dendrocalamus giganteus*

Munro in Yunnan, China

YANG Hanqi¹, YANG Yuming², SUN Maosheng²

1 Research Institute of Resource Insects, the Chinese Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650224, P.R. China; 2 College of Resources, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, P.R. China

Abstract: *Dendrocalamus giganteus* Munro is naturally distributed in southern Myanmar, northwestern Thailand and China's Yunnan province, and is extensively introduced and cultivated in tropical and subtropical Asian. *Dendrocalamus giganteus* is of high economic value and is used for a variety of purposes such as construction materials, paper pulp and vegetables. Due to flowering without seeds, capacity of sexual reproduction of *Dendrocalamus giganteus* is very weak while natural regeneration of *Dendrocalamus giganteus* population is slow. Meanwhile, the growing strong interferences caused by human activities led to deterioration of habitats of this species, and the extent *Dendrocalamus giganteus* populations in Yunnan were greatly decreased. The germplasm resources and natural populations of this species needed to be protected urgently.

The current study provided the first report on inter-simple sequence repeat (ISSR) markers, which were employed to assess the genetic diversity and differentiation among 113 clumps from seven representative populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan, China. Seven informative and reliable primers were chosen from 80 pre-screened primers, and 82 ISSR polymorphic loci were obtained. ISSR markers revealed high genetic diversity among the examined populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan: at population level, the percentage of polymorphic loci $PPB=12.24\%$, effective number of alleles $N_e=1.072$, average Nei's (1972) gene diversity $H=0.043$ and average Shannon's Information Index $I=0.065$; at species level, $PPB=90.11\%$, $N_e=1.538$, $H=0.305$ and $I=0.458$. A high level of genetic differentiation among populations was detected based on Nei's genetic diversity analysis (85.83%). Seven populations were grouped into two clusters in UPGMA dendrogram: one cluster comprised Xinping, Shiping and Ning'er populations from central Yunnan, and the remaining four populations were included in another cluster. There was no prominent correlation between genetic and geographic distance among the populations studied ($r=0.347$, $p=0.051$). The influence of human activities, forest fragmentation and low fruiting rate may play prominent roles in creating this species' current decreased status. According to high genetic diversity and differentiation among populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan, we suggested that all individual from all populations be protected for *in situ* conservation and enough samples be collected from all populations for *ex situ* conservation.

The results of analysis of variance on average culm diameter and culm weight of standard bamboos from seven representative geographic populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan showed that there were significant differences among populations. Menghai population (average culm diameter was 13.21cm and culm weight of standard bamboos was 44.97Kg) seemed to be the best *Dendrocalamus giganteus* population in Yunnan. On the other hand, Xinping, Shiping and Ning'er populations from central Yunnan,

which were main provenances for cultivation of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan during past twenty years, were not optimal. It was recommended that Menghai population should be one of the preferred provenances for cultivation of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan.

Key words: *Dendrocalamus giganteus*; geographical population; genetic diversity; resources conservation; ISSR

龙竹 (*Dendrocalamus giganteus* Munro) 自然分布于缅甸南部、泰国西北部和我国云南省, 并在亚洲热带和南亚热带其它国家或地区广泛引种栽培, 其秆材和竹笋常用于建筑材料、笋制食品以及竹纸浆生产, 是一种用途广泛、经济价值高的大型丛生竹种^[1-2]。龙竹在云南主要分布于滇中、滇南和滇西南海拔 600~1800 m 的河谷坡地; 适生环境为年均温度 $\geq 16^{\circ}\text{C}$, 有效积温 $\geq 5\ 500^{\circ}\text{C}$, 极端最低温 $\geq -4^{\circ}\text{C}$, 无霜期 300 d 以上且无重霜; 平均年降雨量 900~2 000 mm, 年均相对湿度 70%; 尤以土层深厚、湿润肥沃的红壤、砂壤土地区长势最好^[3]。龙竹在自然条件下多见零星开花, 但有性繁殖能力极弱, 在云南分布区内还未见结实的报道^[4], 天然更新非常缓慢; 同时由于日益强烈的人类活动干扰导致的生境的不断恶化, 龙竹现存的天然种群十分稀少, 亟需对其种质资源和天然种群进行保护。

ISSR (Inter-simple sequence repeat) 即简单重复间隔序列标记方法技术是近年来在简单序列重复 (simple sequence repeat, SSR) 技术上发展起来的一种新的分子标记技术^[5]。与 AFLP、RFLP、RAPD、SSR 等分子标记技术相比, ISSR 技术可以揭示更多的多态性, 并且技术简单、稳定性和重复性更高。关于龙竹生物学习性、竹苗培育、竹林经营、竹材特性等方面的研究已有报道^[6-7], 但还未见其种质资源遗传多样性方面的研究。近年竹子遗传多样性研究中多运用 RAPD 和 SSR 技术^[8-10], 而 ISSR 技术的应用还少见报道, 2009 年 Lin 等^[11] 利用 ISSR 技术发现毛竹 *Phyllostachys pubescens* 10 个栽培变型间具有很高的遗传相似性。本文旨在通过 ISSR 技术分析龙竹云南地理种群的遗传多样性及种群间的遗传分化, 分析天然种群严重萎缩的原因, 探讨种质资源保护措施。

1 材料与方法

1.1 供试材料

取样尽量覆盖龙竹在云南的整个分布范围, 通过在其分布区广泛的实地调查, 我们选择了当地起源且人为干扰少的、代表了该竹种在云南竹类植物地理分布区划^[12]中 5 个分布区类型的 7 个近天然种群进行取样。每个种群根据竹丛的分布情况随机采样, 每丛至少相距 50 m, 根据种群大小, 按照约 60-80% 的样品采集率各取样 11-20 丛, 样品的采集地点及编号见表 1 和图 1。所取样品为样丛的幼嫩竹叶, 在野外迅速用硅胶干燥保存。

表 1 用于 ISSR 分析的 7 个龙竹种群

Tab 1 Populations of *Dendrocalamus giganteus* for ISSR analyses in this study

采集地	种群 编号	海拔 m	纬度	经度	样本数	平均秆径 cm	平均单株秆重 (鲜重, kg)
勐海县勐混镇老寨村	MH	1503	21°51'28"N	100°20'40"E	20	13.21	44.97
石屏县大桥乡冲门口村	SP	1210	23°50'55"N	102°21'13"E	15	12.70	41.61
宁洱县宁洱镇老王寨村	NE	1363	23°05'15"N	101°02'10"E	20	12.12	38.89
泸水县上江乡丙奉村	LS	1300	25°36'55"N	98°50'19"E	15	11.30	35.19
新平县老厂乡竹园村	XP	1170	24°08'07"N	101°38'54"E	20	10.91	32.85
双江县勐勐镇弯掌村	SJ	1045	23°29'02"N	99°48'05"E	12	10.52	31.44
耿马县孟定镇芒掌村	GM	501	23°33'34"N	99°05'04"E	11	10.18	29.09

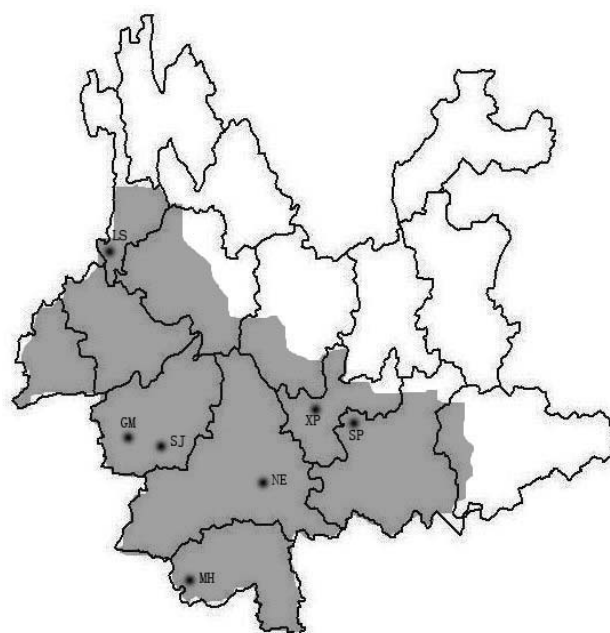


图 1 龙竹在云南的分布区（阴影部分）及 7 个种群的取样地点分布图(居群编号同表 1)

Fig1 Distribution of *Dendrocalamus giganteus*, shaded in the figure, and locations of the seven populations in Yunnan, China. Population codes are the same as in Table 1.

1.2 方法

1.2.1 DNA提取

参照 CTAB 法分别提取各样丛总 DNA，在 1%的琼脂糖凝胶上电泳 30~40 min。DNA 浓度和纯度用分光光度计检测。所提取的 DNA 放于 -20℃冰箱中保存。

1.2.2 引物筛选与PCR扩增反应

所用引物系列为加拿大哥伦比亚大学 UBC 公司公布的第 9 套 ISSR 引物序列 (http://www.biotech.ubc.ca/services/NAPS/Primer_Sets/Primers.pdf)，由上海生工合成。引物筛选时每个种群随机挑选 2 个模板在 25μL 的反应体系中进行，重复 3 次。

PCR反应在ABI Verity 梯度PCR仪上进行。25 μL 反应体系包括：10 \times Buffer (100 mM Tris-HCl, pH =8.8; 500 mM KCl) 2.5 μL , 5 U/ μL 的 Taq DNA 聚合酶(Fermentas)0.5 μL , 25 mmol/L 的 MgCl_2 1.8 μL , 10 mmol/L 的 dNTPs (TAKARA, 宝生物工程(大连)有限公司)2.5 μL , 10 $\mu\text{mol/L}$ 的引物(上海生工生物工程(上海)有限公司)1.5 μL , DMSO 0.5 μL , 50 ng/ μL 的模板 DNA 0.7 μL , 以及 ddH₂O 15 μL 。

扩增程序：94 $^{\circ}\text{C}$ 5 min, 1 个循环； 94 $^{\circ}\text{C}$ 45 s, 53 $^{\circ}\text{C}$ ~55 $^{\circ}\text{C}$ (温度依引物不同而改变) 1 min, 72 $^{\circ}\text{C}$ 2min, 40 个循环； 72 $^{\circ}\text{C}$ 7 min, 1 个循环。

1.2.3 PCR产物的凝胶电泳

PCR 扩增产物在 1.6% 的琼脂糖凝胶上电泳 (0.5 \times TBE, 5V/cm) 分离, 以 100bp DNA Ladder Marker (100-3 000 bp) (Fermentas) 作标记估算扩增片段大小, 溴化乙锭 (EB) 染色后在凝胶成像系统 (UPV) 上成像, 观察并记录, 每个样本重复测定 2 次。

1.2.4 数据分析

电泳图谱中每一扩增条带代表引物的一对结合位点且视为有效的分子标记。同一引物的扩增产物中电泳迁移率一致的条带被认为具有同源性, 依据 ISSR 标记判读电泳图谱中扩增产物的有无及其分子量大小, 将电泳图谱中清晰的条带记作“1”, 否则记作“0”, 建立 0/1 数据矩阵。应用 POPGENE 1.32 软件计算多态性位点百分比 (PPB)、Nei's 等位标记多样性指数 (H)、Shannon 多态性信息指数 (I)、总的等位标记多样性 (H_t)、种群内等位标记多样性 (H_s)、等位标记分化系数 (G_{st})、基因流 (N_m)、Nei's 遗传距离; 应用 NTSYS-PC V2.11C 软件用 UPGMA 方法进行聚类分析; 应用 TFPGA1.3 软件进行种群间遗传距离和地理距离的 Mantel 相关性检测。

1.2.5 竹丛检尺

对取样的 113 个龙竹样丛进行每竹检尺, 记录秆径; 并称量标准竹的单株秆重。

2. 结果与分析

2.1 DNA提取结果

用 CTAB 法提取的 7 个种群的龙竹 DNA 片段大小较一致, 利用 UV2550 紫外分光光度计检测提取的总 DNA 的 OD260 / OD280 比值为 1.8~2.0, 表明 DNA 纯度较好; 0.8% 琼脂糖检测结果显示 DNA 条带清晰, 无降解和 RNA 污染, 适合于 ISSR 标记分析。

2.2 引物筛选结果

从 80 个引物中选取 7 个扩增条带清晰、重复性好的引物（表 2）用于全部样品的 PCR 扩增全部 7 个种群样本分析。

表 2 优选的 ISSR 引物序号和序列

Tab 2 The ISSR primers used in the study

引物号	序列 (5'-3')
807	(AG) ₈ T
810	(GA) ₈ T
836	(AT) ₈ YA
840	(GA) ₈ YT
850	(GT) ₈ YC
855	(AC) ₈ YT
857	(AC) ₈ YG

2.3 遗传多样性和遗传分化分析

在检测到的所有清晰且重复性好的 91 个有效位点中有 82 个多态位点。分析结果表明：在物种水平上，龙竹具有较高的多态位点百分率($PPB=90.11\%$)、平均每个位点的有效等位标记数 ($N_e=1.5387\pm 0.3658$)、Nei's 等位标记多样性指数 ($H=0.3058\pm 0.1796$) 和 Shannon 信息指数 ($I=0.4588\pm 0.2404$)（表 3）。在种群水平上，各个种群的平均多态位点百分率(PPB)差异较大（3.30~25.27%），平均值为 12.24%，平均每个位点的有效等位标记数 (N_e) 为 1.0727 (± 0.2004)，平均 Nei's 等位标记多样性指数(H) 为 0.0436 (± 0.1169)，平均 Shannon 信息指数(I)为 0.0652 (± 0.1726)（表 3）。

表 3 龙竹云南 7 个种群的遗传多样性

Tab 3 Genetic variation in six populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan, China

种群	等位标记观察值 N_a	有效等位标记数 N_e	Nei's 等位标记多样 H	Shannon 信息指数 I	多态位点百分率 PPB
宁洱NE	1.2527±0.4370	1.1396±0.2877	0.0827±0.1610	0.1246±0.2352	25.27
新平XP	1.1538±0.3628	1.0869±0.2132	0.0547±0.1312	0.0828±0.1973	15.38
石屏SP	1.1429±0.3519	1.0757±0.2009	0.0474±0.1244	0.0719±0.1862	14.29
勐海MH	1.0879±0.2847	1.0593±0.2056	0.0340±0.1149	0.0500±0.1665	8.79
泸水LS	1.0330±0.1795	1.0167±0.1023	0.0105±0.0603	0.0163±0.0911	3.30
耿马GM	1.1319±0.3402	1.1029±0.2704	0.0574±0.1488	0.0825±0.2136	13.19
双江SJ	1.0549±0.2291	1.0280±0.1228	0.0182±0.0775	0.0280±0.1183	5.49
居群水平	1.1224±0.3122	1.0727±0.2004	0.0436±0.1169	0.0652±0.1726	12.24
物种水平	1.9011±0.3022	1.5387±0.3658	0.3058±0.1796	0.4588±0.2404	90.11

N_a , Observed number of alleles; N_e , Effective number of alleles; H , Nei's (1972) allele diversity; I , Shannon's information index; PPB , percentage of polymorphic loci.

Shannon 信息指数显示各种群的遗传变异从高到低依次为宁洱 (NE) > 新平 (XP) > 耿马 (GM)

>石屏 (SP) >勐海 (MH) >双江 (SJ) >泸水 (LS) (表 3), 与 *PPB* 值分析的结果基本一致。各种群间的遗传多样性差别较大, 其中宁洱种群 (NE) 的遗传多样性水平最高 (*PPB* = 25.27%, $N_e = 1.1396$, $H = 0.0827$, $F = 0.1246$), 泸水种群 (LS) 的遗传多样性水平最低 (*PPB* = 3.30%, $N_e = 1.0167$, $H = 0.0105$, $F = 0.0163$) (表 3)。

用 POPGENE 计算出的遗传变异分析结果 (表 4) 表明: 龙竹种群间存在着较高的遗传分化。7 个云南种群总遗传多样性 $H_t = 0.3073$, 其中种群内遗传多样性 $H_s = 0.0435$, 种群间的平均等位标记多样性 ($D_{st} = H_t - H_s$) 为 0.2638, Nei 的等位标记分化系数 $G_{st} = 0.8583$, 表明有 85.83% 的遗传变异存在于种群间, 种群内的遗传变异为 14.17%, 种群间的遗传分化明显大于种群内的遗传分化。种群间的基因流 (N_m) 为 0.0826, 基因流小。

表4 龙竹种群等位标记多样性Nei's分析

Tab 4 Nei's (1972) analysis for diversity of ISSR markers in six populations of *Dendrocalamus giganteus* in Yunnan, China

	总等位标记多样性 H_t	种群内等位标记多样性 H_s	等位标记分化系数 G_{st}	基因流 N_m
平均	0.3073	0.0435	0.8583	0.0826
标准差	0.0317	0.0083		

H_t , Total allele diversity; H_s , allele diversity within populations; G_{st} , Coefficient of allele differentiation; N_m , Gene flow.

2.4 遗传距离与聚类分析

本研究中 7 个龙竹种群之间的遗传距离为 0.0501~0.6695, 大部分在 0.4~0.6, 双江种群和新平种群的遗传距离最远为 0.6695, 耿马种群和泸水种群的遗传距离最近, 为 0.0501。根据 Nei's 遗传距离进行 UPGMA 聚类, 分析结果显示 7 个龙竹种群聚成两支 (图 4), 其中滇中地区的新平 (XP)、石屏 (SP) 和临近的宁洱 (NE) 种群聚在一支, 其它的四个种群聚在另一支上。种群间遗传距离和地理距离的相关性检测显示, 地理距离和遗传距离不存在显著的正相关关系 ($r = 0.3477$, $p = 0.0510$) (表 5)。

表5. 龙竹7个种群间的Nei's (1978) 遗传一致度 (对角线上方) 和遗传距离 (对角线下方) (种群代号同表1)

Tab5 Nei's (1978) genetic identity (I , above diagonal) and genetic distance (D , below diagonal) of seven *Dendrocalamus giganteus* populations. Population codes are given in Table 1.

种群	NE	XP	SP	MH	LS	GM	SJ
宁洱NE	****	0.8498	0.7988	0.6026	0.5683	0.5899	0.5458
新平XP	0.1628	****	0.8110	0.5943	0.5373	0.5191	0.5120
石屏SP	0.2246	0.2095	****	0.6914	0.5953	0.5980	0.5932
勐海MH	0.5065	0.5203	0.3690	****	0.8366	0.8206	0.6512
泸水LS	0.5652	0.6211	0.5186	0.1784	****	0.9511	0.8027
耿马GM	0.5278	0.6556	0.5141	0.1977	0.0501	****	0.7729
双江SJ	0.6055	0.6695	0.5222	0.4290	0.2197	0.2576	****

2.5 种质资源分析与评价

7个龙竹云南种群平均秆径(表1)的方差显著性分析结果为 $F=15.898 > F_{0.01(1,6)}=13.75$,表明七个种群龙竹秆径差异极显著($P < 0.01$),结合平均单株秆重,我们认为取样中勐海种群(平均秆径13.21cm,平均单竹秆重44.97Kg)为云南不同原生龙竹种源中的最优种群。

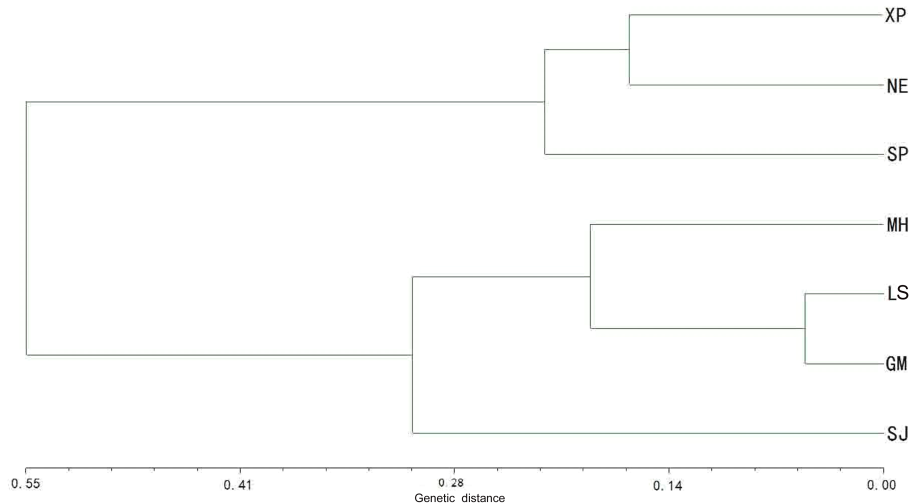


图4 龙竹7个种群Nei's遗传距离的UPGMA聚类图(居群代号:XP-新平;NE-宁洱;SP-石屏;MH-勐海;LS-泸水;GM-耿马;SJ-双江)

Fig 4 UPGMA dendrogram for six *Dendrocalamus giganteus* populations based on Nei's genetic distance (population codes: XP, Xinping; NE, Ninger; SP, Shiping; MH, Menghai; LS, Lushui; GM, Gengma; SJ, Shuangjiang)

3 结论与讨论

本研究中龙竹7个云南种群之间的遗传距离为0.0501~0.6695,集中在0.4~0.6,与另一种丛生竹绿竹*Dendrocalamopsis oldhamii*不同栽培类型间基于RAPD技术的遗传距离(0.1222~0.8154,大部分在0.6以下)相似^[3],而明显高于散生竹雷竹*Phyllostachys pxaecox*不同栽培类型之间的遗传距离值(0.0625~0.5521,大部分在0.4以下)^[4]以及毛竹不同栽培类型之间的遗传距离值(0.023~0.108)^[1],这可能反映了后两种散生竹在长期栽培过程中受到了更多人为选择的结果。龙竹在云南虽然仅分布于热带和亚热带区域,却具有很高水平的遗传多样性(在种群水平上, $PPB=12.24%$, $N_e=1.0727$, $H=0.0436$, $I=0.0652$;在物种水平上, $PPB=90.11%$, $N_e=1.5387$, $H=0.3085$, $I=0.4588$)。尽管由于没有可靠的化石资料致使木本竹子的起源和演化还处于争论之中,吴征镒等^[5]推测竹子起源于第三纪劳亚古陆的热带地区,而该地区自第三纪以来没有遭受大的地质灾害的影响,气候温暖湿润,为龙竹等热带竹子的生长繁衍提供了优越的条件。因此,我们推测龙竹拥有一个广泛连续分布且具有丰富遗传基础的祖先,其祖先丰富的总体遗传多样性一直保留在现存的龙竹种群中。

Nyboom^[6]总结了158份RAPD、27份AFLP、13份ISSR等多项植物遗传多样性研究结果得出的 G_r

平均值分别0.27、0.21和0.34。与Nybom所得出的平均值相比,龙竹云南7个种群呈现出了种群间遗传分化大的特点($G_{ST}=0.8583$)。云南分布的龙竹具有较高水平的群体分化可能在于以下原因。随着人类活动的日益频繁,生境的片段化不断加剧,形成了一些不连续分布的种群,使得各种群的个体数目和分布范围变小。另一方面,木本竹子具有独特的繁殖生物学特性:(1)竹类植物一个生命周期只开一次花,开花周期长达几十年甚至上百年;一株开花后同一个种同一来源的所有克隆植株均陆续开花,开花后绝大多数植株将死亡;(2)在传粉生物学方面,竹子为风媒传粉植物,但在野外多为零星开花,其花粉的传播也是有限的;而且大部分竹子花粉存在大量败育现象^[17]。虽然龙竹繁育系统的研究尚未见报道,但云南分布区内的龙竹在自然条件下有性繁殖能力极弱,多为零星开花且不结实^[4],使得其不能实现种子的传播,影响了基因流的形成,导致其种群间个体迁移率小,基因流小($N_m=0.0933$)。另外,现代越来越多的研究证明,基因流强弱对于群体遗传分化具有重要影响,Wright^[18]指出,如果 $N_m<1$,则很容易发生遗传漂变,并可以导致居群间明显的遗传分化,因此遗传漂变可能是影响龙竹种群间遗传分化的重要因素之一。

另一方面,龙竹在云南的分布可细划为四个地理分布区^[12],但本文Mantel检测结果显示龙竹种群间遗传距离和地理距离之间同样没有显著的正相关性($r=0.3477$, $p=0.0510$),这一点也可以从龙竹取样种群分布图(图1)和UPGMA聚类图(图4)看出。地理距离最远的泸水(LS)和勐海(MH)种群间的遗传距离很近;而地理距离最近的耿马(GM)和双江(SJ)种群间的遗传距离在7个取样种群间处于中等水平(表5)。因此,地理隔离对龙竹种群遗传分化没有显著影响。

4 龙竹种质资源保护和利用的建议

我们推测龙竹天然种群不断萎缩的主要原因是原生境片段化且地理隔离和人类干扰加剧的结果。人类活动导致森林片段化,龙竹生境恶化甚至丧失,可能使原来广泛连续分布的高水平遗传多样性的大种群片段化分布退化为地理隔离、范围狭小的各个小种群;栖息地的变小造成种群内个体数量减少,再加上木本竹子开花周期长、花粉败育率高、结实率低的生物学特性,可能进而导致基因流水平下降和遗传漂变,从而使得龙竹种群间的遗传分化加大。作为云南地区重要的经济竹种以及推广栽培优先发展的竹种,保护好龙竹的种质资源对于云南竹产业的发展具有重要的现实意义,参照其它物种保护遗传学结果^[19-20],我们提出以下保护建议:(1)针对龙竹总体遗传多样性水平高,但种群数量和各种群数量都较少的现状,对现存所有种群的所有个体实施有效的就地保护,尤其是遗传多样性最高的宁洱(NE)种群应该得到林业部门的特别重视;(2)由于各种群间存在高水平的遗传分化,因此有必要采用不同种群间进行混合繁殖和相互移植的方法,以提高其遗传多样性水平。

近二十年来,龙竹和甜龙竹在云南推广栽培约有五十万亩以上,其种源大部分来自滇中地区的新平县、石屏县和宁洱县等地,主要原因可能是因为滇中地区龙竹种源较多,而且种苗运输到其它栽培区的路途较近。我们的研究结果显示滇中地区的龙竹种源并不是云南分布区中的最优种源,而滇南勐海的龙竹在平均秆径和平均单株秆重这两个重要的林分质量指标上表现最突出,但至今还没有得到重视,建议该地的龙竹资源应该作为今后云南推广龙竹栽培的首选种源之一。

参考文献

- [1] 耿伯介,王正平.《中国植物志》第九卷第1分册 [M].北京:科学出版社,1996:189-190
- [2] Dransfield S, Widjaja E A. Plant Resources of South-East Asia (No.7): Bamboos [M]. Leiden: Backhuys Publishers, 1995: 83-85
- [3] 陆素娟,李乡旺.龙竹的环境条件与立地类型[J].西南林学院学报,1997,17(1):12-16
- [4] 杜凡,薛嘉榕,杨宇明,等.15年来云南竹子的开花现象及其类型的研究[J].林业科学,2000,36(6):57-68
- [5] Zietkiewicz E, Rafalski A, Labuda D. Genome fingerprinting by simple sequence repeat(SSR)-anchored polymerase chain reaction amplification [J].Genomics,1994,20:176-183
- [6] Luan S,Chiang T Y, Gong X. High genetic diversity vs. low genetic differentiation in *Nouelia insignis* (Asteraceae), a narrowly distributed and endemic species in China, revealed by ISSR fingerprinting [J].Annals of Botany, 2006, 98 (3): 583-589
- [7] Escandon A S, Zelener N, De La Torre M P, *et al.* Molecular identification of new varieties of *Nierembergia linariaefolia* (Graham), a native Argentinean ornamental plant [J].Journal of Applied Genetics, 2007, 48(2): 115-123
- [8] 李鹏,杜凡,普晓兰,等.巨龙竹种下不同变异类型的RAPD分析[J].云南植物研究,2004,26(3):290-296
- [9] Das M, Bhattacharya S, Pal A. Generation and characterization of SCARs by cloning and sequencing of RAPD products: A strategy for species-specific marker development in bamboo [J]. Annals of Botany, 2005, 95(5): 835-841
- [10] Bhattacharya S, Das M, Bar R, *et al.* Morphological and molecular characterization of *Bambusa tulda* with a note on flowering [J]. Annals of Botany, 2006, 98(3): 529-535
- [11] Lin X C, Ruan X S, Lou Y F, *et al.* Genetic similarity among cultivars of *Phyllostachys pubescens* [J]. Plant Systematics and Evolution, 2009, 277 (1): 67-73
- [12] 杨宇明,辉朝茂,薛嘉榕,等.云南竹类植物地理分布区划研究[J].竹子研究汇刊.1999,18(2):19-28
- [13] 余学军,张立钦,方伟,等.绿竹不同栽培类型 RAPD 分子标记的研究[J].西南林学院学报,2005,25(4):98-101
- [14] 方伟,何祯祥,黄坚钦,等.雷竹不同栽培类型 RAPD 分子标记的研究[J].浙江林学院学报,2001,18(1):1-5
- [15] 吴征镒,路安民,汤彦承,等.中国被子植物科属综论.科学出版社[M].北京:科学出版社,2003:325-328
- [16] Nybom H. Comparison of different nuclear DNA markers for estimating intraspecific genetic diversity in plant [J]. Molecular Ecology, 2004, 13: 1143 -1155
- [17] 张文燕,马乃训,陈红星.竹类花粉形态及萌发试验[J].林业科学研究,1989,2(1):67-70
- [18] Wriglit S. The genetic structure of populations [J]. Annals of Eugenics, 1951, 15: 323-354
- [19] Li Q M, Xu Z F,He T H. *Ex situ* conservation of endangered *Vatica guangxiensis* (Dipterocarpaceae) in China [J]. Biological Conservation, 2002, 106: 151-156
- [20] 陈俊秋,慈秀芹,李巧明,等.樟科濒危植物思茅木姜子遗传多样性的ISSR分析[J].生物多样性,2006,14(5):410-420

论文摘要

湖南桃花江林场毛竹林群落生物多样性研究

谭益民

(中南林业科技大学, 湖南长沙, 410004)

摘要 毛竹又称楠竹 (*Phylloslachys pubescens* Mazel ex H.de Lehaie), 为禾本科 (*Gramineae*), 竹亚科 (*Bambusoideae*)。毛竹群落是经无性繁殖扩大种群, 种群具有强烈的排斥性, 天然毛竹群落发展的顶级是毛竹纯林。根据 44 个样地的调查资料, 分析了该地区毛竹群落物种多样性的特征: 毛竹林群落基本类型有毛竹纯林、毛竹杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb)Hook) 混交林、杉木毛竹混交林、毛竹板栗 (*Castanea mollissima*) 混交林、毛竹阔叶混交林。乔木层毛竹占绝对优势, 结构简单。进入乔木层的其他树种以杉木最多, 板栗次之。南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、香椿 (*Toona sinensis*(A. Juss.) Roem)、泡花树 (*Meliosma glandulosa* Cufod) 偶见。灌木、草本和木质藤本层是植物多样性较集中的层次。通过 10 个典型标准地对灌木层的优势度分析, 粗叶悬钩子 (*Rubus alceaefolius*) > 乌药 (*Lindera aggregata*) > 红脊山麻杆 (*Alchornea davidii* Franch) > 六月雪 (*Serissa japonica*) > 空心泡 (*Rubus rosaefolius* Smith) > 寒莓 (*Rubus buergeri* Miq) > 青灰叶下珠 (*Phyllanthus glaucus*) > 黄栀子 (*Gardenia jasminoides*), 多样性分布很不均匀。草本植物在群落中分布也不均, 在茂密的林下, 通常稀少, 透光度大的隙地常常杂草丛生。藤本植物种类较少, 生长脆弱, 通常葡附地面。调查样地内, 共有维管束植物 194 种, 隶属于 65 个科, 140 个属, 植物多样性处于中下水平。随着群落环境的差异, 植物分布的均匀度差异也十分明显。

关键词 毛竹群落; 生物多样性; 桃花江林场

Research on biodiversity of *Phyllostachys pubescens* forest community in Taohuajiang Forest farm, Hunan

TAN Yimin

(Central South University of Forestry and Technology Changsha, 410004, Hunan)

Abstract: *Phyllostachys pubescens*, also known as Moso bamboo, is a member of the subfamily *Bambusoideae* of the family *Gramineae*. The *Phyllostachys pubescens* ecological community is an expanded population with a strong rejection of asexual reproduction. At the top of the community in the development of natural bamboo is pure *Moso Bamboo Forests*. This study investigated the community biodiversity of *Phyllostachys pubescens* forest in 44 selected sampling places of Taohuajiang tree farm, Hunan. Results showed that *Phyllostachys pubescens* forest included the basic community types of pure bamboo forest, mixed forest of *Phyllostachys heterocyclus* and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook), mixed forest of Chinese fir and bamboo, bamboo and chestnut (*Castanea mollissima*) mixed forest, Moso bamboo and broadleaf tree mixed forest. The tree layer was dominated by bamboo with a simple structure. Chinese fir was the majority of other species into the tree layer, second was chestnut. *Choerospondias axillaries*, *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem, *Meliosma glandulosa* Cufod were rare. Shrubs, herbaceous and woody vine layer had a higher concentration of plant diversity levels. Through the dominance analysis of the shrubs layer in 10 typical standard places, the order of dominance index was *Rubus alceaefolius* > *Lindera aggregate* > *Alchornea davidii* Franch > *Serissa japonica* > *Rubus rosaefolius* Smith > *Rubus buergeri* Miq > *Phyllanthus glaucus* > *Gardenia jasminoides*, so the biodiversity is very uneven distributed. Herbaceous plants in the community were not evenly distributed. In the dense undergrowth, herbaceous plants were often scarce, while a large open space with larger transmittance were often overgrown with weeds. Vine plants species had a scarce presence, and their growth was fragile and was usually attached to the ground. In the surveyed sampling places, there were 194 vascular plants, belonging to 65 branches, 140 genera. The plant diversity was in the middle and lower level. With the differences of community environment, the evenness of the distribution of plants had also very obvious differences.

Key words: *Phyllostachys pubescens*; Biodiversity; Taohuajiang Forest Farm

主题三 对气候变化的响应：竹林碳汇

Theme III. Response to Climate Change: Bamboo Forest Carbon Sequestration

研究论文

湖南会同林区毛竹林生态系统碳平衡的估算¹

范少辉¹ 肖复明² 汪思龙³ 苏文会¹ 于小军³ 申正其³

1. 国际竹藤网络中心, 北京, 100102; 2. 江西省林业科学院, 南昌, 330032; 3. 中国科学院院会同森林生态实验站, 湖南会同森林生态系统国家野外观测研究站, 会同, 418307

摘要 采用CID-301PS光合测定仪, 对湖南会同林区毛竹林土壤CO₂排放动态进行了观测, 并结合现存生物量调查, 对其生态系统碳平衡特征进行了估算, 结果表明, 毛竹林生态系统碳贮量为144.3 tC·hm⁻², 其中, 土壤层、乔木层、林下植被和凋落物层分别占76.89%, 22.16%, 0.44% 和0.51%。毛竹林年固定CO₂总量为37.18 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, 林地土壤异养呼吸和凋落物层每年以呼吸的形式排放CO₂的量分别为20.19 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹和4.16 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, 最后整个毛竹林生态系统年净固定CO₂的量为 12.83tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, 折合成净碳量为3.50 tC·hm⁻²·a⁻¹。

关键词 毛竹林; 碳贮量; 土壤呼吸; 碳平衡

Estimation of the carbon balance of moso bamboo plantation ecosystem in Huitong, Hunan Province

Fan Shao-hui¹, Xiao Fu-ming², Wang Si-long³, Su Wen-hui¹, Yu Xiao-jun³, Shen Zheng-qi³

1 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102; 2 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032

3 Huitong Experimental Station of Forest Ecosystem, Chinese Academy of Sciences; Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307

Abstract: Based on the measurement of soil respiration and the survey of bioproductivity, the carbon balance between assimilation and release was conducted in a Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation. The results showed that: the carbon pool of the Moso bamboo plantation, the total of which amounts to 144.3 tC·hm⁻², mainly consisted of soil, forest biomass, shrub and herb layer and litter layer, which accounted for 76.89%, 22.16%, 0.44% and 0.51%. In general, the total CO₂ assimilated by gross primary production of the forest community was 37.18tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, however, the total release of CO₂ from the system was up to 33.901tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, of which soil respiration and litter respiration were 20.19tCO₂·hm⁻²·a⁻¹ and 4.16tCO₂·hm⁻²·a⁻¹. Therefore, the carbon budget for Moso bamboo plantation ecosystem could be estimated to be net acquisition of 12.83tCO₂·hm⁻²·a⁻¹ or 3.50 tC·hm⁻²·a⁻¹.

Key words: Moso bamboo plantation, carbon storage, soil respiration, carbon balance

基金项目 国家“十一五”科技支撑计划(NO.2006BAD19B0104)资助

随着国际社会对全球气候变化的重视,近年来进行的大尺度的碳平衡研究已被广泛用来分析国家和地区、生物群落和经济区的碳平衡状况,但由于生态系统的多样性,导致这种计算结果很不一致。森林生态系统作为陆地生态系统的主体,是地球上除海洋之外最大的碳库,其有机碳贮量约为1146PgC(1PgC=10⁹tC),占全球陆地总碳贮量(2477PgC)的46%^[1],其在全球变化中的作用就更显得举足轻重。世界森林主要分布于热带和寒温带之间,各地气候、森林植被类型等都有很大的差别,而不同的森林类型其碳源/汇功能不尽相同。随着《京都议定书》的生效实施,正确评价森林对大气CO₂的固定能力,较小尺度上研究某个地区、某个林种的碳平衡特征也就显得十分迫切。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是我国南方重要的森林资源,据不完全统计,中国现有毛竹林总面积300万hm²以上,占全世界竹林总面积20%左右,并且近年来种植面积有不断扩大的趋势^[2]。但是,从国内外关于森林生态系统碳平衡研究来看,区域上主要集中在热带、亚热带和温带地区^[3-5],森林类型上主要集中在针、阔叶林上,对我国亚热带重要森林类型的竹林生态系统碳素特征研究不多^[6-8],并且现有的研究主要针对经营措施对林地土壤有机碳的影响^[9-11],对毛竹林生态系统碳平衡特征还未见报道。因此,通过湖南会同林区毛竹林样地调查、定位观测及试验分析等阐明毛竹林生态系统碳平衡特征,揭示区域尺度下毛竹林在全球变化背景下的碳平衡关系,以期在在林分尺度上合理经营毛竹林生态系统提供理论指导。

1 试验地概况

研究样地毛竹林位于湖南省会同县肖家乡坡脚村(109°53'E, 27°03'N),气候属亚热带湿润气候,年均温度16.5℃,极端最高温和最低温分别为36.4℃和-4.4℃,年均降雨量为1200~1400mm,年均相对湿度在80%以上,年均日照1445.4h,无霜期304d,海拔高为300~500m,土壤为红黄壤。试验林原为荒芜低产毛竹林,1988年冬经过砍杂除茆、全垦深挖、调整结构、适量施肥、合理挖笋、伐竹等措施改造而建立的,现在林分立竹度为1800~2400株·hm⁻²,林分加权平均直径为12.6cm,竹高为12.3m。由于每年对林地进行垦挖,林地灌木基本没有,生长季节林下植被主要以马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鸡屎藤(*Paederia scandens*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)、莎草(*Cyperus difformis*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等杂草为主。

2 研究方法

2.1 毛竹生物量和净生产量测定

2005年11月在3个20m×30m大小的毛竹林样地内进行每株立竹直径和树高调查的基础上,计

算出每度竹的标准竹，并分别砍伐 I、II、III、IV 度竹的标准竹各 2 株，分别测定其竹秆、竹枝和竹叶鲜重，并对地下部分用挖掘法，每个样地挖掘 4 个 1m×1m 样方，挖出竹蔸、竹鞭和竹根，挖至无根为止，用水细心漂洗，再用筛子在水中筛后捞出所有的根，风干后称其鲜重；各器官取样后带回实验室，在 60℃ 烘干至恒重，并取小样 105℃ 烘干，求算生物量。

毛竹年生产力的测定^[12]，根据所伐标准竹得到的经验方程，计算出毛竹地上部份的年净生产量，公式如下：

$$w = \sum n_i(w_i - w_{i-1})$$

式中， w 年毛竹地上部分年净生产量， n_i 为各龄竹的株数， i 为竹龄， w_i 为第 i 龄竹的地上部干重平均值。

由所伐标准竹得到的经验方程中毛竹地下部与地上部现存量之比率乘以地上部分年净生产量得出地下部分年净生产量，加上退笋和笋箨的年产量，再加上年凋落物量和林下植物的现存量(因每年垦挖，故以现存量推算)，即可得出毛竹林生态系统的年净生产量。

2.2 林下植被生物量和净生产量测定

2005 年 11 月在每个标准地内分上、中、下坡位设立 1m×1m 小样方 5 个，采用全挖法实测生物量。即收集每个小样方中全部灌木、杂草，然后混合 5 个小样方中的灌木、杂草，烘干至恒重再估算干重，同时用作分析样品。

2.3 凋落物现存量 and 净生产量测定

2005 年 11 月在每个样地内设置 5 个 (1m×1m) 收集器，收集收集器下小样方的全部枯落物，以后每月收集一次，按组分收集凋落物，并分别称其湿重后，在 80℃ 条件下烘干后称重，同时选取一定量的凋落物作为分析样品。

2.4 样品采集及化学分析方法

在测定生物量的同时，按层分组采集标准株的分析样品。竹秆每 2m 取 10~20g 鲜样进行称重，枝、叶分层(上、中、下)，根系分级(按 <0.2cm、0.2~0.5cm、>0.5cm、根头)，土壤分层(0~20cm、20~40cm、40~60cm) 然后各层(级) 分别采集分析样品，土壤各层取样分上、中、下坡 3 个取样点，并在每个取样点不同位置取 3 个点的混合样，取样点的分布基本采用 S 形，同时采用环刀法取原状土，测定土壤容重^[13]。

植物、土壤样品中碳素含量测定采用重铬酸钾法^[13]。

2.5 碳贮量的计算

不同器官生物量与其碳含量的乘积为不同器官的碳贮量；各器官碳贮量之和为乔木层碳贮量；植被各组分年净生产量与其碳含量的乘积为各组分年有机碳固定量；乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤层有机碳贮量之和为生态系统中的碳贮量。其中，土壤碳贮量的计算公式：

$$\text{土壤有机碳贮量} = \text{土壤容重} \times \text{采样深度} \times \text{土壤有机碳含量} \times \text{面积}$$

2.6 土壤呼吸测定

在3个固定样地的每个样地内选择6个不同的位置（上、中、下坡位，每个坡位2个不同位置），采用壕沟法进行切断根系去除凋落物（-R-L）、保留根系保留凋落物（+R+L）和保留根系去除凋落物（+R-L）3种处理进行试验^[14-16]，具体操作是2005年10月在选定的60cm×60cm小样方，四周插入4块60cm×60cm的硬塑料板，即插入深度为60cm进行挖壕断根处理（壕沟深度达基岩或根系分布层以下）。自2006年1月-2006年12月，每月中旬选择1个晴天昼夜利用CID公司的土壤呼吸室与CID-301光合测定仪进行土壤呼吸观测，每次测定前1天对小样方进行检查和测定前准备，测定时间间隔为2小时，每个处理每次仪器测定3~5min，仪器采样速率为30s，气室内CO₂浓度降至等于大气中浓度后才能进行下一个测定。测定林地土壤呼吸的同时，采用数字式瞬时温度计（Long-stem thermometer 6310）和湿度计（HH2 moisture meter）测定观测点附近地表温度和土壤含水量以及土层5cm、10cm、20cm深的温度。

2.7 毛竹林生态系统碳收支计算公式

毛竹林生态系统的植被固定 CO₂ 的计算公式为： $Ta=NI+L+Rp$

式中：Ta 为毛竹林生态系统群落生产同化 CO₂ 总量，也是系统 CO₂ 总收入量；NI 为植被年固定 CO₂ 净增量；L 为年凋落物层中贮存的 CO₂ 转化量；Rp 为植被年呼吸释放 CO₂ 量。

毛竹林生态系统 CO₂ 支出的计算公式为： $O=Rp+Rl+Rs$

式中，O 为毛竹林生态系统的 CO₂ 支出总量；Rp 为植被年呼吸释放的 CO₂ 量；Rl 为年凋落物分解释放的 CO₂ 量；Rs 为土壤呼吸所释放的 CO₂ 量。

整个毛竹林生态系统的 CO₂ 收支公式为： $\Delta CO_2=Ta-O=NI+L-(Rl+Rs)$

式中， ΔCO_2 为整个生态系统 CO₂ 的平衡值，即生态系统的净生产量（NEP）。

3 结果与分析

3.1 毛竹林生态系统主要组分碳贮量

由表 1 可知,毛竹林生态系统碳贮量为 144.3 tC·hm⁻²,其中,土壤层碳贮量最大,为 110.95 tC·hm⁻²,占 76.89%,其次是乔木层为 31.97 tC·hm⁻²,占 22.16%,林下植被和凋落物层分别为 0.64 tC·hm⁻²和 0.74 tC·hm⁻²,分别占 0.44% 和 0.51%,地上部分与地下部分碳贮量(凋落物和土壤层)之比为 1:3.41,说明林地土壤是一个极大的碳贮量库。

表 1 毛竹林生态系统各组分碳贮量 (单位: tC·hm⁻², %)

项目	乔木层	林下植被层	凋落物层	土壤层	合计
碳贮量	31.97±3.87	0.64±0.06	0.74±0.03	110.95±12.87	144.3
百分比	22.16±1.60	0.44±0.05	0.51±0.03	76.89±7.74	100

3.2 植被层碳素年固定量的推算

森林生态系统的生产力研究的主要内容之一是要确定系统同化CO₂的能力。由表1可知,毛竹林植被层碳贮量为31.97 tC·hm⁻²,只占杉木林的60.67%^[8],但是,毛竹林是异龄林分,通常采取择伐作业,隔年伐去IV度以上竹。因此从生态系统的角度上看,毛竹林分永远处于生长动态平衡之中,并可以近似认为每次采去毛竹的生物量相当于现存生物的1/4,以此换算,毛竹林砍伐掉63.94 t·hm⁻²,约为杉木林现存量的1.21倍。另外,由表2可知,毛竹林年固定有机碳量为10.14 tC·hm⁻²·a⁻¹,相当于年同化CO₂量37.18 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹,是杉木林的1.41倍。

表 2 毛竹林中碳素年净固定量

层次	年净生产量 t·hm ⁻² ·a ⁻¹	年固定碳量 tC·hm ⁻² ·a ⁻¹	折合 CO ₂ 量 tCO ₂ ·hm ⁻² ·a ⁻¹
乔木层	17.68±0.80	8.29±0.38	30.40±1.38
凋落物	2.78±0.14	1.11±0.06	4.07±0.2
林下植被	1.91±0.07	0.74±0.03	2.71±0.12
合计	22.37	10.14	37.18

3.3 毛竹林地土壤呼吸量的估算

由表3可知,毛竹林地土壤年释放CO₂量平均为33.941 t·hm⁻²,月平均为2.828 t·hm⁻²,其中,林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物层呼吸分别占59.5%、28.3%和12.2%。

毛竹林地土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸及凋落物层呼吸呈现明显的季节变化规律,季节变化曲线呈单峰型,表现为1至7月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势,在8月达年呼吸速率的最大值,此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势,直到次年的1月份或2月份,达呼吸最低值。另外,毛竹林土壤呼吸速率随时间的波动,可以通过其最大值与最小值的比来反映,毛竹林的最大值/最小值比为7.04,相差较大,这也从另外一个侧面说明毛竹林的土壤CO₂释放容易受到外界气候因子的影响。

表3 林地释放CO₂量的季节变化

月份	林地土壤 t·hm ⁻²			凋落物呼吸 t·hm ⁻²	林地释放量 t·hm ⁻²
	异养呼吸	自养呼吸	小计		
1	0.8274	0.0737	0.9011	0.0744	0.9755
2	0.7283	0.1838	0.9122	0.0502	0.9623
3	0.9297	0.3672	1.2969	0.0952	1.392
4	1.1708	0.6607	1.8315	0.2292	2.0607
5	1.728	0.866	2.594	0.4083	3.0023
6	2.5081	1.1858	3.6939	0.5485	4.2424
7	2.7522	1.8836	4.6358	0.7349	5.3707
8	3.5481	2.2868	5.8349	0.9404	6.7754
9	2.155	0.9074	3.0624	0.5163	3.5787
10	1.8331	0.646	2.4791	0.3346	2.8138
11	1.0384	0.4944	1.5328	0.1408	1.6736
12	0.9707	0.0407	1.0114	0.0825	1.094
合计	20.1899	9.5961	29.7859	4.1554	33.9414

3.4 毛竹林生态系统碳收支计算

森林生态系统碳平衡包括输入与输出两个过程，输入与输出的差值即为生态系统的净生产量 (NEP)，若 NEP 为正，表明生态系统是 CO₂ 的汇，反之，则为 CO₂ 源。碳的输入主要是植被对 CO₂ 的固定，输出包括群落呼吸、土壤呼吸和凋落物分解释放 CO₂。

表4 毛竹林生态系统碳收支估算 (单位: t·hm⁻²·a⁻¹)

项目	干物质	转换成 CO ₂ 量	折算成 C 量
收入项目	22.37	37.18	10.14
其中: 生物量净增量	17.68	30.4	8.29
凋落物生产量	2.78	4.07	1.11
林下植被	1.91	2.71	0.74
支出项		24.35	6.64
凋落物呼吸		4.16	1.13
土壤呼吸 (不含根系呼吸)		20.19	5.51
收支结余		12.83	3.50

根据以上的研究，将毛竹林生态系统的 CO₂ 固定吸收值及生态系统各分量对大气的 CO₂ 排放过程等一系列参数后，进行汇总列如表 4^[3, 4]，由此可知，毛竹林年固定 CO₂ 总量为 37.18 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹，林地土壤异养呼吸和凋落物每年以呼吸的形式排放 CO₂ 的量分别为 20.19 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹ 和 4.16 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹，最后整个毛竹林生态系统年净固定 CO₂ 的量为 12.83tCO₂·hm⁻²·a⁻¹，折合成净碳量为 3.50 tC·hm⁻²·a⁻¹。

4 结论与讨论

(1) 毛竹林生态系统碳贮量为 $144.3 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中，矿质土壤层碳贮量最大，为 $110.95 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占76.89%，其次是乔木层为 $31.97 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占22.16%，林下植被和凋落物层分别为 $0.64 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.74 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，分别占0.44%和0.51%，地上部分与地下部分碳贮量（凋落物和土壤层）之比为1:3.41，说明林地土壤是一个极大的碳贮量库。

(2) 毛竹林地土壤年释放 CO_2 量平均为 $33.941 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，月平均为 $2.828 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中，林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物呼吸分别占59.5%、28.3%和12.2%，并呈现明显的季节变化规律，季节变化曲线呈单峰型，表现为1至7月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势，在8月达年呼吸速率的最大值，此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势，直到次年的1月份或2月份，达呼吸最低值。

(3) 毛竹林年固定 CO_2 总量为 $37.18 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，林地土壤异养呼吸和凋落物每年以呼吸的形式排放 CO_2 的量为 $24.35 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，最后整个毛竹林生态系统年净固定 CO_2 的量为 $12.83 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，折合成净碳量为 $3.50 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

(4) 针对集约经营毛竹林植被净初级生产力(NPP)和土壤 CO_2 排放量同时增加的现象，开展毛竹林生态系统碳库的循环周期与库存功能研究，建立毛竹林生态系统碳循环动力学模型，分析毛竹林在中国森林碳平衡中的作用和增汇潜力，进而提出毛竹林生态系统碳平衡调控技术措施，是今后进一步加强研究的主要内容。

参考文献

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. IPCC special report on land use. Land Use Change and Forestry, 2000
- [2] 江泽慧. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002
- [3] 方晰, 田大伦, 项文化 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡, 中南林学院学报, 2002, 22(1): 1-6
- [4] 李意德, 吴仲民, 曾庆波 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学, 1998, 18(4): 371-378
- [5] 王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14
- [6] 郭起荣, 杨光耀, 杜天真 等. 中国竹林的碳素特征. 世界竹藤通讯, 2005, 3(3): 25-28
- [7] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 2004, 40(6): 20-24
- [8] 肖复明, 范少辉, 汪思龙 等. 毛竹、杉木人工林生态系统碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2007, 27(7): 2794-2801
- [9] 肖复明, 范少辉, 汪思龙 等. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究, 水土保持学报, 2008, 22(2): 131-134
- [10] 肖复明, 范少辉, 汪思龙等. 毛竹林土壤有机碳及微生物量碳特征研究, 水土保持学报, 2008, 22(6): 128-131
- [11] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究, 水土保持学报, 2003, 17(4): 15-21
- [12] 陈辉, 洪伟, 兰斌等. 闽北毛竹生物量与生产力的研究. 林业科学, 1998, 34 (sp1): 60-64
- [13] 刘光崧. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法—土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996

- [14] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. 生态学报, 2006, 26(6): 1640-1647
- [15] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48:115-146
- [16] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurement of root respiration indicate little to no seasonal temperate acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, 23: 273-280

湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸的研究¹

肖复明¹ 范少辉^{2*} 汪思龙³ 官凤英² 申正其³

(1, 江西省林业科学院, 南昌, 330032; 2, 国际竹藤网络中心, 北京, 100102; 3, 中国科学院院会同森林生态实验站, 湖南会同森林生态系统国家野外观测研究站, 会同, 418307)

摘要 采用 CID-301PS 光合分析仪(配带土壤呼吸室), 对湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸进行测定, 结果表明, 毛竹林地土壤总呼吸速率、异养呼吸速率、自养呼吸速率及凋落物分解释放 CO₂ 的速率的年平均值分别为 2.13、1.44、0.69 和 0.31 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹, 并呈现明显的季节变化规律和日变化规律, 季节变化曲线呈单峰型, 表现为 1 至 7 月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势, 在 8 月达年呼吸速率的最大值, 分别达 4.95、3.01、1.94 和 0.80 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹, 此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势, 直到次年的 1 月份或 2 月份, 分别为 0.76、0.70、0.06 和 0.05 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹。日变化曲线图表现为单峰形态, 一般也是随着温度的升高而加大, 随着温度的降低而减小。6~14 时, 随着土壤温度的升高而增加, 一般在 16~18 时出现最高峰, 此后, 一直递减, 直到次日 4~8 时。由此计算出毛竹林地土壤年释放 CO₂ 量为 33.94 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中, 林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物分解释放 CO₂ 分别占总呼吸的 59.5%、28.3%和 12.2%。

关键词 毛竹林; 土壤呼吸; 自养呼吸; 异养呼吸; 凋落物层呼吸

Soil Respiration of Moso Bamboo Plantation in Huitong, Hunan Province

XIAO Fuming¹, FAN Shaohui², WANG Silong³, GUAN Fengying², SHEN Zhengqi³

1 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032; 2 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102; 3 Huitong Experimental Station of Forest Ecosystem, Chinese Academy of Sciences; Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307

Abstract: The dynamics of CO₂ concentration in Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation was studied with CID-301 portable photosynthesis system in Huitong County, Hunan Province. The results showed that the soil total respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter annual respiration rate of Moso bamboo plantation were 2.13, 1.44, 0.69 and 0.31 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹, respectively. It was obvious that soil respiration rate exhibited strongly annual and daily dynamic pattern in Moso bamboo plantation. The annual dynamic pattern was represented with a single-peak curve. The respiration rates increased with increasing atmospheric and soil temperature from January to July. Total soil total respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter respiration rate

基金项目 国家“十一五”科技支撑计划(NO.2006BAD19B0104)资助

*通讯作者: 肖复明 jxxiaofuming@163.com

reached their highest values in August, being 4.95, 3.01, 1.94 and 0.80 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. All of these respiration rates decreased gradually with falling temperature from August to January or February in the next year. At this time, the respiration rates reached their lowest values, which were 0.76, 0.70, 0.06 and 0.05 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The daily variation of total soil respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter respiration rate of Moso bamboo plantation could also be represented with a single-peak curve. They usually showed a strong consistency with temperature. From 6:00 to 14:00, the respiration rates increased with increasing temperature, and reached the highest value from 16:00 to 18:00. After this time, they decreased until the time from 4:00 to 8:00 in next day. The amount of CO_2 released from Moso bamboo plantation was 33.94 $\text{tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, including 59.5% heterotrophic respiration, 28.3% autotrophic respiration and 12.2% litter respiration.

Key words: Moso bamboo plantation; soil respiration; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; litter respiration

全球性温室效应、气候变暖等生态问题严重威胁人类生存和社会经济的可持续发展，已成为全世界共同关注的焦点问题之一。据 IPCC（1990 年）公布的数据，大气中 CO_2 浓度现正呈上升趋势（年增长率为 1.8 $\mu\text{L/L}$ ），到 2030 年前后，空气中 CO_2 浓度将会达到 550ppm，为产业革命前的 2 倍^[1]。土壤作为一个巨大的碳库(1394PgC)，每年以呼吸的形式释放到大气中的 CO_2 量是化石燃料释放量的 10 倍以上^[2]，其微小的变化可能导致大气 CO_2 浓度的变化^[3]，而森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分，研究林地土壤 CO_2 释放对于探讨全球 CO_2 变化及其影响，具有十分重要的意义。

随着《京都议定书》的生效实施，在较小尺度上研究某个地区、某个林种对大气 CO_2 的固定能力也就显得十分迫切，并且估算生态系统的净初级生产力（NPP）和净生态系统生产力（NEP）均需量化自养呼吸（ R_A ）和异养呼吸（ R_H ）^[4]。同时，在全球变化的背景下， R_A 和 R_H 对环境变化的响应和适应性也可能不同^[5,6]，从而形成不同的碳释放格局。所以土壤呼吸及其组分的分离和量化已成为生态系统生态学、环境科学和全球变化模拟的一个重要议题^[7,8]。近年来，国内外有很多学者对森林生态系统中土壤呼吸组分的动态过程、生物环境控制因子及分离与量化等进行了研究，也取得了一定的成绩^[8-14]，但对于我国南方重要的森林资源——毛竹林地土壤呼吸各组分的分离与量化研究尚未见报道。因此，本研究采用CID-301PS光合分析仪(配带土壤呼吸室)，对湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸进行测定，目的在于揭示其林地 CO_2 释放量的生态因子，阐述毛竹林土壤 CO_2 释放规律，为进一步揭示土壤 CO_2 释放的过程机理提供基础实验数据，从而也为科学估算我国亚热带人工林森林土壤碳库动态和人工林生态系统碳平衡研究提供科学依据。

1 试验地概况

研究样地毛竹林位于湖南省会同县肖家乡坡脚村（109° 53′ E，27° 03′ N），气候属亚热带湿润气候，年均温度 16.5℃，极端最高温和最低温分别为 36.4℃和-4.4℃，年均降雨量为 1200~1400mm。

年均相对湿度在 80%以上, 年均日照 1445.4h, 无霜期 304d, 海拔高为 300~500m, 土壤为红黄壤。试验林原为荒芜低产毛竹林, 1988 年冬经过砍杂除莠、全垦深挖、调整结构、适量施肥等措施改造而建立的, 现在林分立竹度为 1800~2400 株·hm⁻², 林分胸径加权平均为 12.6cm, 竹高为 12.3m。由于每年对林地进行抚育, 林地灌木基本没有, 生长季节林下植被主要以马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鸡屎藤 (*Paederia scandens*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄 (*Ampelopsis aconitifolia*)、莎草 (*Cyperus difformis*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等杂草为主。林地的主要理化性质如表 1 所示。

表 1 林地土壤理化性质一览表

Table 1 Basic soil characteristics of experimental stands

取样深度 Soil depth (cm)	土壤的机械组成 Soil particle size distribution			土壤质地 名称 Name of soil texture	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)	土壤总孔 隙度 Total porosity (%)	土壤有 机质 SOC (%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (%)	有效磷 Available P (ppm)
	各粒级土粒 (直径 mm) %									
	砂粒 (2-0.05)	粉砂粒 (0.05-0.002)	粘粒 (<0.002)							
0~40	6.7	50	43.3	粉砂质粘壤土	1.05	67.72	3.61	0.133	0.058	1.957

2 研究方法

在3个固定样地的每个样地内选择6个不同的位置(上、中、下坡位, 每个坡位2个不同位置), 采用壕沟法进行切断根系去除凋落物(-R-L)、保留根系保留凋落物(+R+L)和保留根系去除凋落物(+R-L) 3种处理进行试验^[7,11,15], 具体操作是2005年10月在选定的60cm×60cm小样方, 四周插入4块60cm×60cm的硬塑料板, 即插入深度为60cm进行挖壕断根处理(壕沟深度达基岩或根系分布层以下)。自2006年1月-2006年12月, 每月中旬选择1个晴天昼夜利用CID公司的土壤呼吸室与CID-301光合测定仪进行土壤呼吸观测, 每次测定前1天对小样方进行检查和测定前准备, 测定时间间隔为2小时, 每个处理每次仪器测定3~5min, 仪器采样速率为30s, 气室内CO₂浓度降至等于大气中浓度后才能进行下一个测定。测定林地土壤呼吸的同时, 采用数字式瞬时温度计(Long-stem thermometer 6310)和湿度计(HH2 moisture meter)测定观测点附近地表温度和土壤含水量以及土层5cm、10cm、20cm深的温度。

数据处理采用SPSS12.0和EXCEL2003统计分析, 土壤各呼吸各组分计算如下:

土壤总呼吸速率 $R_t = \text{呼吸速率}_{(+R+L)}$

异养呼吸速率 = 呼吸速率_(-R-L)

自养呼吸速率 = 呼吸速率_(+R-L) - 呼吸速率_(-R-L)

凋落物层呼吸速率 = 呼吸速率_(+R+L) - 呼吸速率_(+R-L)

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的季节变化规律

由图 1 可以看出,毛竹林地土壤总呼吸速率、异养呼吸速率、自养呼吸速率及凋落物层呼吸速率的年平均值分别为 $2.13\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.44\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.69\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.31\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 并呈现明显的季节变化规律, 季节变化曲线呈单峰型, 表现为 1 至 7 月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势, 在 8 月达年呼吸速率的最大值, 分别为 $4.95\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $3.01\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.94\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.80\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势, 直到次年的 1 月份或 2 月份, 达呼吸速率最低值, 分别为 $0.76\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.71\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.06\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.05\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

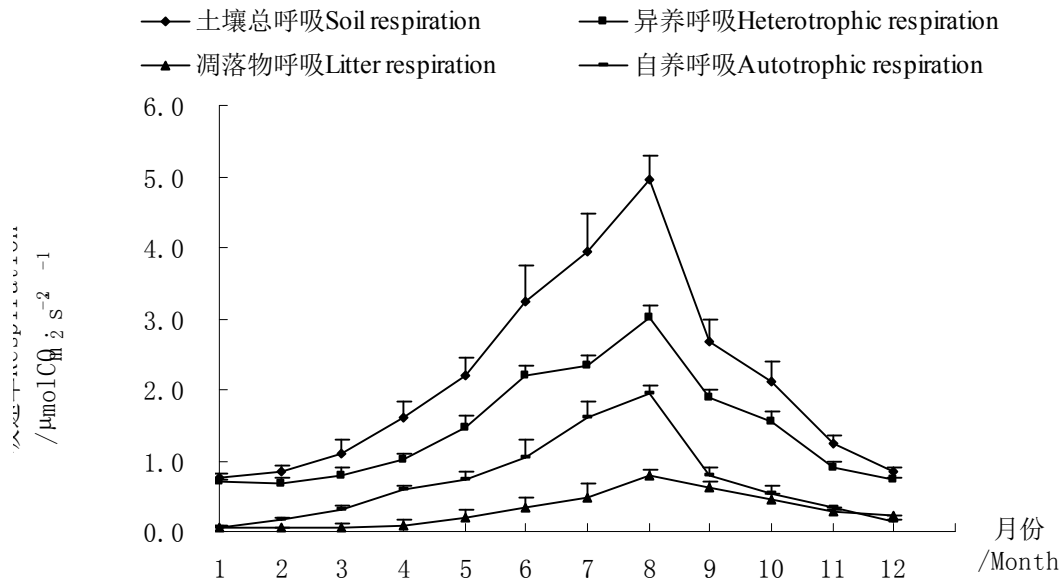


图1 毛竹林地土壤呼吸季节变化曲线

Fig.1 The annual changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation

另外,林地土壤呼吸速率在 6~9 月份维持在相对较高水平, 主要可能因为该地区在 6~9 月水热条件较好的情况下, 有利于土壤微生物和根系的活动, 因此土壤总呼吸速率也较高。凋落物分解主要集中在 5~9 月份, 这期间释放的 CO_2 占全年释放 CO_2 的 73.6%。说明在 5~9 月水热条件较好的情况下, 有利于土壤微生物活动的同时, 也有利于凋落物分解, 排放 CO_2 速率也就大。另外, 毛竹林凋落物层呼吸速率在 1~5 月份均低, 这可能与毛竹林的经营措施和年生长规律有关, 每年 11、12 月份进行的林地垦翻后, 林地部分凋落物混入土壤中, 凋落物现存量减少, 直到次年 4~6 月份大量落叶后, 现存量才增加, 并且此时温、湿度适宜, 有利于凋落物分解。

3.2 土壤呼吸日变化规律

陆地生态系统的动态过程主要受太阳辐射影响，与土壤温度和生物活动密切相关的土壤呼吸过程也不例外。太阳辐射的昼夜变化引起气温的昼夜变化，相应引起土壤温度和土壤生物，尤其是微生物活动强度的变化，进而引起土壤呼吸速率的昼夜变化。

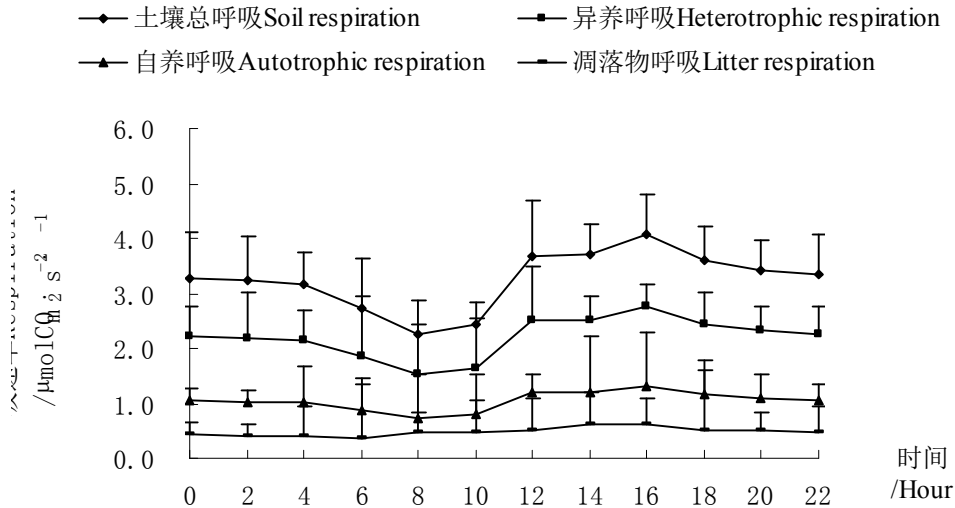


图2 毛竹林地土壤呼吸6月份日变化曲线

Fig.2 The daily changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation in June

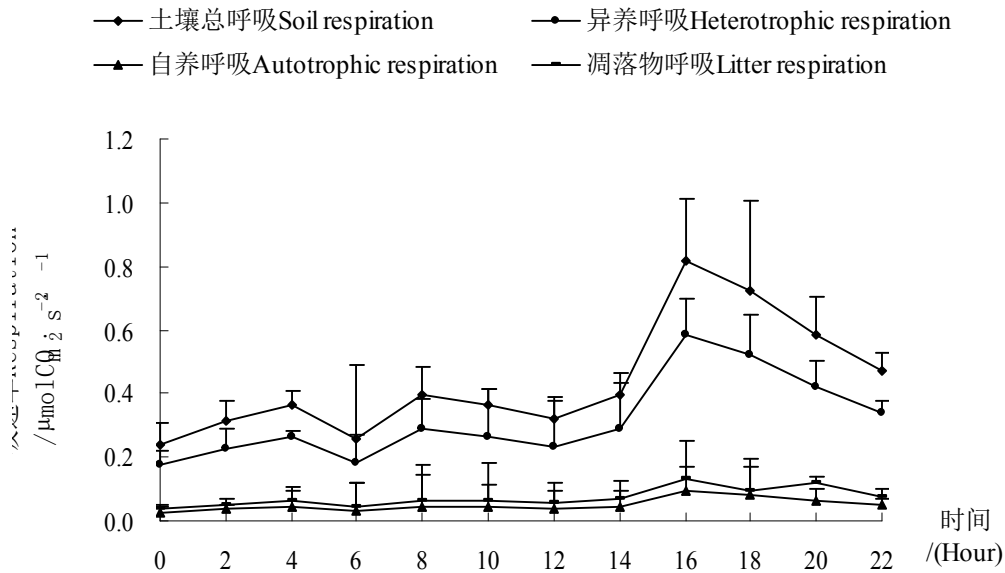


图3 毛竹林地土壤呼吸12月份日变化曲线

Fig.3 The daily changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation in December

图2和图3分别为毛竹林生长季6月份和非生长季12月份林地土壤呼吸速率各组分的昼夜变化曲线，由此可以看出，林地土壤呼吸速率的昼夜变化在不同时间呈现了一定的变化规律：一天中，

毛竹林地土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸和凋落物层呼吸曲线图基本上均呈单峰形态，8~16时，随着土壤温度的升高而增加，一般在14~16时出现最高峰，此后，一直递减，直到次日4~8时。

此外，从毛竹生长季的日变化幅度来看，非生长季节林地土壤呼吸要比生长季节林地土壤呼吸的日变化幅度要相对平缓，6月份变异幅度为 $1.8178\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，比非生长季的12月份要高61.4%，这可能主要与非生长季节的温度昼夜温差小有关，12月份的昼夜温差是6月份的27.9%。

3.3 毛竹林土壤CO₂年排放量及其组分分离

由表2可知，毛竹林地土壤年释放CO₂量平均为 $33.941\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其变异范围为 $30.757\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ~ $37.125\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，月平均为 $2.828\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中，林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物层呼吸分别占59.5%、28.3%和12.2%。

表2 林地释放CO₂量的季节变化

Table 2 The respiration consumption in different month of Moso bamboo and Chinese fir plantation land

月份 Month	异养呼吸 Heterophic Respiration / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	自养呼吸 Autotrophic Respiration/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	凋落物层呼吸 Litter respiration / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	林地释放量 Release/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RC/(%)
1	0.827±0.049	0.074±0.010	0.074±0.019	0.976±0.075	7.56±1.46
2	0.728±0.074	0.184±0.021	0.050±0.017	0.962±0.071	19.10±2.78
3	0.930±0.137	0.367±0.050	0.095±0.058	1.392±0.230	26.38±1.81
4	1.171±0.097	0.661±0.087	0.229±0.100	2.061±0.261	32.06±3.31
5	1.728±0.179	0.866±0.120	0.408±0.114	3.002±0.291	28.84±5.16
6	2.508±0.168	1.186±0.281	0.549±0.156	4.242±0.570	27.95±5.92
7	2.752±0.178	1.884±0.272	0.735±0.208	5.371±0.623	35.07±3.40
8	3.548±0.200	2.287±0.141	0.940±0.091	6.775±0.406	33.75±2.05
9	2.155±0.124	0.907±0.134	0.516±0.088	3.579±0.332	25.36±2.74
10	1.833±0.141	0.646±0.113	0.335±0.099	2.814±0.323	22.96±2.67
11	1.038±0.093	0.494±0.018	0.141±0.038	1.674±0.138	29.54±1.31
12	0.971±0.044	0.041±0.023	0.083±0.016	1.094±0.065	3.72±3.42
合计 Total	20.190±1.350	9.596±0.756	4.155±1.100	33.941±3.184	28.27±1.75

表中数据为平均值±标准误差 Data of the table represent average value ±standard error

另外，毛竹林土壤呼吸速率随时间的波动，可以通过其最大值与最小值的比来反映，毛竹林的最大值/最小值比为7.04，相差较大，这也从另外一个侧面说明毛竹林的土壤CO₂释放容易受到外界气候因子的影响。

3.4 毛竹林土壤呼吸与其他地区林地土壤呼吸比较

本实验测得的数据与其他已发表的数据进行比较, 为了便于比较, 我们将其他单位都转化为 $\text{tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由表 3 可知, 从北温带到热带不同森林类型间的土壤年呼吸量从 $1.83 \sim 50.38 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 并且随着纬度由高到低, 不同森林类型的林地土壤年呼吸量呈逐渐增加的趋势, 期间偶尔出现有波动, 可能与不同的测定方法和不同样地选择有关系, 但是总体来说, 不同气候区域的林地土壤释放 CO_2 量差异较大, 并且同一气候区的不同森林类型或同一森林类型的不同年龄阶段的森林土壤呼吸量也有差异。因此, 对各生态系统的土壤呼吸及其规律的进一步研究将有助于正确评价不同森林类型的碳源/汇功能。

表3 世界范围内一些陆地生态系土壤的年呼吸量 (单位: $\text{tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 3 Annual soil respiration amount of major forest ecosystems in the world (unit: $\text{tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)

编号 NO.	森林生态系统类型 Forest ecosystems	气候带 Regions	呼吸量 Amount of respiration	资料来源 Data source
1	美国田纳西州栎树林 Russian Jaiga	北温带 North temperate	1.83~22.00	[16]
2	俄罗斯泰加林 Quercu forest in Tennessee of U.S.U	温带 Temperate	17.5~39.05	[17]
3	北京温带森林平均 Temperate forest in Beijing	温带 Temperate	8.66~25.07	[17,18]
4	秦岭天然油松、锐齿栎林 Natural forest of <i>P. tabulaeformi</i> and <i>Q. aliena</i> in Qinling mountains	北亚热带 Height subtropical	22.32~28.25	[19]
5	福建格氏栲人工林和天然林 Natural and plantation forest of <i>Castanopsis kawakamii</i> in Fujian	中亚热带 Middle subtropical	16.66~50.38	[20]
6	湖南会同天然次生阔叶林 Secondary evergreen broadleaved forest in Huitong of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	29.085	[21]
7	湖南会同 11 年生杉木林 11-year-old Chinese fir plantation in Huitong of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	31.52	[22]
8	湖南会同毛竹林 Moso bamboo plantation in Huitong of Hunan of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	33.94	本研究
9	广东南亚热带马尾松林 Lower subtropical coniferous forest in Guangdong	南亚热带 Lower subtropical	36.63	[16]
10	海南岛尖峰岭热带山地雨林 Tropical forest in Jianfengling of Hainan island	热带 Tropical	33.16	[23]

4 讨论

(1)土壤呼吸速率在生长季不同月份表现明显的变化格局。如 Fang 等(1998)发现佛罗里达州 26 年生的湿地松人工林土壤呼吸速率在 10 月最高, 而在 1 月最低^[24]; Xu 和 Ye(2001)发现土壤呼吸速率最高值在 6 月和 11~12 月, 最低值在中夏^[25]; Davidson 等(1998)发现土壤呼吸速率在 6~7 月最高, 在 8 月中旬到 9 月初下降^[26]。土壤呼吸速率季节性差异主要受土壤温度和土壤湿度变化的共同影响,

但温度和湿度对土壤呼吸速率的影响程度不同,通常夏天的温度较高,土壤呼吸速率应该较高,但夏天的干旱和洪涝可能也会限制土壤呼吸,从而抵消温度升高对土壤呼吸的促进作用^[27],因此对于不同区域的毛竹林土壤呼吸变化规律的比较分析还有待于进一步研究。

(2)土壤呼吸速率具有明显的昼夜变化格局,而这种变化格局主要与土壤温度的昼夜变化格局密切相关,土壤温度的昼夜变化又主要受空气温度的昼夜变化影响。如 Xu 等发现内华达山脉 8 年生的西黄松人工林土壤呼吸速率最小值在早上 9 时,最大值在 14 时^[25], Davidson 等发现土壤呼吸速率的昼夜变化格局与土壤温度的昼夜变化格局类似^[26]。本研究结果与这些结果基本一致。但是,不同林分中植被对土壤温度的影响及土壤热传导特性的不同都将导致土壤呼吸速率昼夜变化幅度的差异,并且不同林地土壤有机碳含量、有机质稳定性及生物多样性的差异等也影响土壤呼吸速率的昼夜变化格局,因此阐明影响毛竹林地土壤 CO₂ 释放的主要影响因子,可望为毛竹林生态系统土壤碳通量评估提供依据。

(3) 自养呼吸占林地土壤总呼吸量的比例(RC),是近年来森林生态研究的热点之一。由于实际测量中无法直接把自养和土壤区分开来测定,只能应用人工除去根系进行对比试验或采用其他间接方法推算,得出自养呼吸释放碳量占林地土壤总呼吸释放碳量的 10%~90%(主要集中在 40%~60%内)^[24],本研究得出自养呼吸占土壤呼吸所释放碳量的 28.27%,和其他大多数研究结果基本一致^[28],稍微有点偏低,但与张宪权等(2005)在东北地区的落叶松、樟子松、红松和白桦人工林根系呼吸结果相近^[10],这可能与人工林群落组成、林木生长状况及林地理化性质等差异有关。当然,本研究用对样地土壤总呼吸速率减去断根样地土壤呼吸速率而得出自养呼吸速率,由于断根后的根系在观测期间内的 CO₂ 释放量不会立即降低到零,所以观测结果会低于实际值^[29]。

毛竹自养呼吸的RC的季节动态主要受土壤温度和植被本身根系物候的驱动所影响。毛竹林在 4~9 月份期间其RC值就一直维持在30%以上,这期间是根鞭生长比较快的时期,尤其是8、9月份正好是光合产物向地下根分配时期。也就是说不同树种的光合产物分配格局可能影响自养呼吸RC的季节变化^[30]。自养呼吸贡献率还受植被根系特性^[31]、土壤水热状况等因子的综合影响,如Burton等对不同北美森林生态系统的根呼吸研究发现,裸子植物(白云杉*P. glauca*, 赤松*P. resinosa*, 湿地松)比被子植物(香脂杨*P. balsamifera*, 栎-山核桃*Quercus-Carya*, 北美鹅掌楸, 糖槭)根呼吸速率低,主要原因是前者细根氮浓度较低^[31],因此加强毛竹自养呼吸与经营措施及其根系生物量、细根周转等的关系研究也就成为本文有待完善的内容。

(4) 土壤呼吸是一个包括自养呼吸和异养呼吸在内的复杂过程,除与土壤物理、化学性质有关外,还受气候、陆地植被及生物的综合影响。这些都是构成不同生态系统之间土壤呼吸释放碳量差异的可能原因。本文仅以一定地域毛竹林为对象,研究了其林地土壤呼吸变化规律,但为准确评价我

国毛竹林生态系统对全球气候变化的响应及其在全球碳循环中的功能和作用，还应加强对不同区域、不同经营措施下的毛竹林地土壤呼吸研究。此外，采用统一规范的研究方法，获取大量有代表性的毛竹林生态系统土壤呼吸实测数据，也是减少区域尺度碳平衡研究中的不确定性，从而更精确地评价其在全球变化和气候系统中作用的极为重要的研究内容之一。

参考文献

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 1990: the Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23-36.
- [3] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476
- [4] Gower S T, Krankina O N, Olson R J, et al. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*. 2001, 11: 1395-1411
- [5] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396,570-572
- [6] Widén B, Majdi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001,31:786-796
- [7] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48:115-146
- [8] Bond L B, Wang C K, Cower S T. The contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology*, 2004, 22: 993-1001
- [9] 姜丽芬, 石福臣, 王化田等. 东北地区落叶松人工林的自养呼吸. *植物生理学通讯*, 2004, 40 (2): 27-30
- [10] 张宪权, 王文杰, 祖元刚等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性. *东北林业大学学报*, 2005, 33(2): 46-48
- [11] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. *生态学报*, 2006, 26(6): 1640-1647
- [12] 陈光水, 杨玉盛, 王小国等. 格氏栲天然林与人工林自养呼吸季节动态及影响因素. *生态学报*, 2005, 25(8): 1941-1947
- [13] Wang C K, Yang J Y. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests. *Global Change Biology*, 2007,13:123-131
- [14] Liu Y, Han S J, Li X F, et al. The contribution of root respiration of *Pinus koraiensis* seedlings to total soil respiration under elevated CO₂ concentrations. *Journal of Forest Research*, 2004, 15(3): 187-191
- [15] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurement of root respiration indicate little to no seasonal temperate acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003,23: 273-280
- [16] 杨清培, 李鸣光, 王伯荪. 南亚热带森林群落演替过程中林下土壤的呼吸特征. *广西植物*, 2004, 24(5): 443-449
- [17] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119-126
- [18] 孙向阳, 郭青俊. 妙峰山林地CO₂释放量的初步研究. *北京林业大学学报*, 1995, 17(4): 22-28
- [19] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与CO₂释放. *林业科学*, 2003, 39(2): 8-13
- [20] 杨玉盛, 陈光水, 王小国等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25(7): 1684-1690
- [21] 肖复明. 杉木人工林生态系统碳平衡研究. 江西农业大学硕士学位论文, 2003:1-40

- [22] 方晰, 田大伦, 项文化等. 杉木人工林林地土壤CO₂释放量及其影响因子的研究. 林业科学, 2005, 41(2):1-7
- [23] 吴仲民, 曾庆波, 李意德等. 尖峰岭热带山地雨林土壤C储量和CO₂排放量的初步研究. 植物生态学报, 1997, 21(5):416-423
- [24] Fang C, Moncrief J B, Gholz H L, et al. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. Plant and Soil, 1998, 205: 135-146
- [25] Xu M, Ye Q. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global Change Biology, 2001, 7: 667 -677
- [26] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hard forest. Global Change Biology, 1998, 4: 217-227
- [27] 杨玉盛, 陈光水, 董彬等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953-958
- [28] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: production and temperature dependence. Geophysical Research Letters, 2002, 29(6):11-14
- [29] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中自养与微生物呼吸的区分方法与应用. 地球科学进展, 2003 (4):597-602
- [30] Högberg P, Nordgren A, Agren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest. Oecologia, 2002, 132: 579- 581
- [31] Burton A J, Pregitzer K S, Ruess R W, et al. Root respiration in North American forests: effect of nitrogen concentration and temperature across biomes. Oecologia, 2002, 131: 559-568

集约经营雷竹林土壤碳库的演变特征

姜培坤 李永夫 吴家森 林琳

(浙江林学院环境科技学院, 浙江临安, 311300)

摘要 利用时间代替空间的方法, 研究了不同集约经营历史 (1、5、10、15 a) 雷竹林土壤的水溶性碳 (WSOC)、热水溶性碳 (HWSOC)、微生物量碳 (MBC) 和易氧化碳 (ROC) 的情况, 并利用核磁共振方法研究了土壤总有机碳和 WOC 的波谱特征。结果表明: 随着雷竹林集约经营时间的增加, 土壤总有机碳、土壤 WSOC、HWSOC 和 ROC 含量均显著增加, 土壤 MBC 含量表现为先增加后减少的变化趋势; 雷竹林土壤有机碳主要以烷基碳 (A-C) 和烷氧碳 (O-AC) 为主。随着雷竹林集约经营时间的增加, 土壤烷基碳比例显著增加, 芳香碳比例显著下降, 烷氧碳比例则变化不明显。随着雷竹林集约经营时间的增加, 土壤 A-C/O-AC 值显著增加, 而芳香度显著下降; 土壤水溶性碳主要是由烷氧碳组成, 这一点从土壤水溶性碳和土壤含烷氧碳含量呈极显著正相关 ($P < 0.05$) 也得到证明。另外, 土壤碳芳香度和 HWSOC 成显著负相关, 表明与 A-C/O-AC 值相比, 芳香度指标更能表征土壤有机碳的稳定性。

关键词 雷竹; 土壤碳库; 集约经营; 核磁共振

Fertilization and organic mulch affect soil carbon pools under intensively managed bamboo (*Phyllostachy praecox*) forests in southeast China

JIANG Peikun¹, LI Yongfu¹, Scott X CHANG², WU Jiasheng¹, LIN Lin¹

¹School of Environmental Science and Technology, Zhejiang Forestry University, Lin'an, Zhejiang Province 311300, China

²Department of Renewable Resources, University of Alberta, 442 Earth Sciences Building, Edmonton AB T6G 2E3, Canada

Abstract: *Phyllostachy praecox* is one of the bamboo species used for the production of fine edible bamboo shoots and is widely distributed in southern China. To maintain or increase the productivity of bamboo shoots, *Phyllostachy praecox* forests are intensively managed through heavy fertilization and surface mulch of soil with organic residues such as rice husk to increase soil temperature in the winter. Such management techniques can cause a marked influence on soil quality and the dynamics of soil carbon (C). In this study we use a chronosequence (consisting of bamboo forests 1, 5, 10 and 15 years under intensive management) approach to investigate the long-term impact of intensive bamboo forest management on water soluble organic C (WSOC), hot water soluble organic C (HWSOC), microbial biomass C (MBC) and reactive organic C (ROC) as well as soil organic C chemistry using the ¹³C-NMR (nuclear magnetic resonance) technique. We found that total soil organic C, WSOC, HWSOC and ROC increased with time under intensive management, while MBC initially increased then decreased. NMR spectroscopy of solid soil samples showed that alkyl C and O-alkyl C dominated soil organic C in the intensively managed bamboo

forest. However, alkyl C content and alkyl to O-alkyl C ratio increased, aromatic C content and aromaticity decreased while O-alkyl C did not change as time under intensive management increased. Solution ^{13}C -NMR spectroscopy showed that alkyl C dominates the WSOC fraction, consistent with the positive correlation between WSOC and total soil alkyl C content. Soil aromaticity was negatively correlated with HWSOC, indicating that aromaticity is a good indicator of soil organic C stability. We conclude that long-term application of organic mulch over winter increased total soil organic C content but decreased its stability.

土壤是陆地生态系统最大的有机碳库 (Batjes, 1996)。由于土壤碳的库容巨大, 其较小的变幅就会导致大气 CO_2 浓度较大的波动, 因此土壤碳在全球碳循环中起着极其重要的作用。另一方面, 土壤有机碳是土壤肥力的重要指标, 其数量和质量在很大程度上影响了土壤生产力 (周莉等, 2005)。由于土壤碳库在全球碳循环和土壤生产力上的重要作用, 因此有关土壤碳库变化, 特别是人类干扰下引起的土壤碳变化, 越来越受到广大学者的关注 (Jarecki and Lal, 2003; Jandl et al., 2007)。

土壤碳库中包含着各种不同形态的碳。由于它们在化学组成、降解难易程度以及转化速率等方面的差异性, 因而, 土壤中的不同形态碳对人类干扰活动的反应往往存在较大的差异 (Chen et al., 2004; Jiang et al., 2006; Huang et al., 2008)。目前, 水溶性碳、热水溶性碳、微生物碳、易氧化碳和酸性碳是用来表征土壤活性碳库的常见指标 (Graeme et al., 1995; Chen et al., 2004; Huang et al., 2008)。由于提取方法的不同, 上述不同活性碳库测定方法所代表的碳形态也存在较大的差异。例如: 水溶性碳是指土壤中可溶性的、易降解的碳; 而微生物量碳指土壤微生物躯体中包含的碳 (Chen et al., 2004)。近年来, 核磁共振技术被广泛应用于土壤碳库特征的研究中, 该方法在研究土壤碳库的化学组成结构方面具有很大的优势 (Mathers et al., 2000)。

雷竹是中国长江以南地区广泛分布的优良笋用竹种。由于雷竹易栽培, 竹笋营养丰富、味鲜美, 因而雷竹栽培面积不断扩大。近年来, 以重施肥和冬季地表覆盖增温为核心的早产高效栽培技术在雷竹林生产中得到了广泛应用 (方伟等, 1994)。冬季覆盖有机物可以使雷竹提早出笋, 而大量施用肥料可以大大提高竹笋产量, 因此上述技术的应用大大增加了雷竹的经济效益。然而, 上述技术的长期使用, 也在一定程度上导致了一系列环境和生态方面的问题。如土壤物理、生物学性质表现不良、土壤中重金属浓度显著上升、雷竹林提前退化以及由于土壤 NP 养分大量积累而引起的雷竹林土壤周边水体的污染问题等 (金爱武等, 1999; 姜培坤等, 2000; Cao et al., 2004)。土壤碳库是土壤肥力的重要影响因素之一, 然而迄今有关长期集约经营条件下, 雷竹林土壤碳库的变化特征在国内外还鲜有报道。本文利用时间代替空间的方法, 利用土壤碳的传统分析方法结合核磁共振技术研究雷竹林在长期集约经营 (15 a) 过程中土壤碳库的变化特征, 同时探讨不同方法表征的土壤碳库之间的关系。

1 材料与amp;方法

1.1 样地概况

采样地点设在浙江省临安市三口镇，试验采样范围位于30°05.339' N, 119°43.679' E与30°05.398' N, 119°44.013' E之间。该区属于中纬度北亚热带季风气候，四季分明、气候温和、雨量充沛（年降水量1420 mm），多年平均气温为15.9 °C。1年中，7月份最热，1月份最冷，历年平均日照时数1943 h，无霜期236 d。试验栽培区均属低山丘陵地貌，土壤为发育于砂页岩的红壤土类、黄红壤亚类。

雷竹林集约经营模式为每年11月下旬至12月上旬给雷竹林地表覆盖有机物以增温避冷保湿（周国模等，1999），日增地温达4~5 °C。通常是在雷竹林地表先覆10~15 cm 稻草，再在上面覆盖10~15 cm 的砻糠，稻草用量40 t/hm²，砻糠用量55 t/hm²，次年3、4月份揭去未腐烂的砻糠（一般与新砻糠掺和合并使用三次，逐年新加1/3）；下层的稻草经过一个冬春的发酵和雨雪水的淋泡已基本腐烂入土。当地竹农一般每年施3次肥，时间为5月中旬，9月中旬和覆盖前。每次将肥料撒施于竹林地表，深翻入土。肥料主要以氮磷钾复合肥（N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15）和尿素等化肥为主，厩肥、圈肥、菜籽饼等有机肥为辅。每年施入复合肥2.25 t·hm⁻²，尿素1.125 t·hm⁻²，每次施入的数量基本相等。一般从母竹定植后的第5年开始进行大量的施肥和覆盖，最初5年施肥用量较小。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤取样

2007年7月，在研究区内选择立地条件基本一致，集约经营历史分别为1、5、10和15年的雷竹林样地各4个（集约经营1年是指当年改种雷竹的样地）。按照五点取样法采取各处理0~20 cm的表层土壤样品。样品采集后，带回室内过2 mm钢筛并分成2份，1份新鲜土样保存在4 °C的冰箱中，另外1份风干处理后保存。

1.2.2 土壤基本性状的测定

土壤pH值采用土水比1:2提取后测定；土壤总有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定；总氮采用半微量凯氏定氮法；碱解氮采用碱解扩散法；全磷采用硫酸-高氯酸消煮，钼锑抗比色法；有效磷采用碳酸氢钠浸提，钼锑抗比色法（鲁如坤，1999）。土壤基本理化性质见表1。

1.2.3 水溶性碳和热水溶性碳的测定

土壤水溶性碳测定方法参照Ghani等（2003）的方法进行。称取土壤鲜样（相当于3 g干土重）

置于 50 mL 塑料离心管里, 加入 30 mL 蒸馏水, 振荡 30 min (25 °C) 后, 离心 20 min (3500 rpm), 然后通过膜 (0.45 μm, Millipore Corp., USA) 过滤到小的塑料瓶中, 待测。土壤热水溶性碳的测定参照 Sparling 等 (1998) 的方法进行。称取土壤鲜样 (相当于 3 g 干土重) 置于 50 mL 塑料离心管里, 加入 30 mL 蒸馏水, 将上述离心管置于热水中 18 h (80 °C), 振荡 30 min, 离心 20 min (3500 rpm), 然后通过膜 (0.45 μm, Millipore Corp., USA) 过滤到小的塑料瓶中, 待测。上述冷水和热水浸提液中的碳均在岛津 TOC-VCPH/CPN 有机碳分析仪上测定。

表 1 不同集约经营年限雷竹林土壤基本理化

年 份 year (a)	pH (H ₂ O)	全氮 Total N(g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N(mg kg ⁻¹)	全磷 Total P(g kg ⁻¹)	有效磷 Available P(mg kg ⁻¹)
1	5.68	2.18	94.85	0.53	51.22
5	5.11	2.35	246.76	0.92	248.13
10	4.48	2.65	294.35	1.61	468.34
15	4.21	3.41	432.29	2.08	471.16

1.2.4 微生物量碳的测定

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸直接提取法 (Vance et al., 1987)。对照土壤和熏蒸后土壤用 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 提取 (土 : 水=1 : 5), 滤液中 C 含量采用 TOC-V_{CPH} 有机碳分析仪测定。土壤微生物量 C 含量以熏蒸和未熏蒸土样 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 提取液中 C 含量之差乘以系数得到, $MBC = 2.64E_C$, 其中 E_C 为熏蒸土样与未熏蒸土样提取液 C 含量之差。

1.2.5 易氧化碳的测定

土壤易氧化态碳的测定主要参考 Graeme (1995) 的方法进行。称取 2 g 风干土置于 50 mL 塑料离心管里, 加入 25 mL 333 mmol L⁻¹ KMnO₄ 溶液, 震荡 1 h, 离心 5 min (4000 rpm), 吸取上清液, 稀释 250 倍, 稀释液在 565 nm 波长处进行比色, 同时配制标准系列浓度的 KMnO₄ 溶液, 也在 565 nm 处比色, 根据标准曲线求得 KMnO₄ 浓度, 进而计算 KMnO₄ 消耗量。土壤碳素氧化量用 mg/g C 表示 (1 mmol/L KMnO₄ 氧化 1mg C), 根据 KMnO₄ 消耗量就可以求出易氧化碳含量。

1.2.6 土壤的 HF 预处理及固态 ¹³C 核磁共振波谱分析

土壤样品在进行固态 ¹³C 核磁共振波谱分析前先进行 HF 预处理。HF 预处理的目的是为了去除土壤中的 Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 离子, 从而提高仪器分析的信噪比, 提高分析的效率。HF 预处理的方法主要参考 Mathers et al. (2002) 的方法进行。具体方法如下: 称量 5 g 风干土于 100 mL 塑料离心管中, 加 50 mL HF 溶液 (10% v/v), 盖上盖子, 震荡 1 小时; 离心 10 min (3000 rpm), 上清液去掉, 残余物继

续用 HF 溶液处理。共重复 8 次，但振荡时间不一样（ $4 \times 1 \text{ h}$, $3 \times 12 \text{ h}$, $1 \times 24 \text{ h}$ ）。土壤样品经 HF 处理完以后，用双蒸水洗残余物 4 次，主要是为了去除土壤样品中残留的 HF。方法如下：加 50 mL 双蒸水，震荡 10 分钟，离心 10 分钟（3000 rpm）；去掉上清液，重复 4 次。将经过 HF 处理的残余物，在 40 °C 的烘箱中烘干，磨细过 60 目，放在卡口袋中，留待 NMR 上机测定用。

将上述经 HF 预处理过的土壤样品进行固态魔角旋转-核磁共振测定（AVANCE II 300 MH）。实验采用 7 mm CPMAS 探头，观测频率为 100.5 MHz，MAS 旋转频率为 5000 Hz，接触时间为 2 ms，循环延迟时间为 2.5 s。化学位移的外标物为六甲基苯（hexamethylbenzene, HMB，甲基 17.33 ppm）。综合已有的 ^{13}C NMR 的研究结果，土壤有机碳的主要 ^{13}C 信号的化学位移所对应的碳结构如下：烷基碳（0-50 ppm），烷氧碳（50-110 ppm），芳香碳（110-160 ppm）和羰基碳（160-220 ppm）。然后对谱峰曲线进行区域积分，获得各种碳化学组分的相对含量。另外，计算了两个表征有机质稳定性的指标：（1）A/O-A: $C_{0-50 \text{ ppm}} / C_{50-110 \text{ ppm}}$ （烷基碳 / 烷氧碳）（Baldock and Preston, 1995）；（2）芳香度（Aromaticity）： $C_{110-165 \text{ ppm}} / C_{0-165 \text{ ppm}}$ [烷基碳 / (烷基碳+烷氧碳+芳香碳)。各碳化学组分的绝对含量用土壤总有机碳含量和根据区域积分得到的各碳化学组分相对含量值的乘积来表示（Dai et al., 2001）。

1.2.7 土壤水溶性碳的液态 ^{13}C 核磁共振波谱分析

土壤水溶性碳的液态 ^{13}C 核磁共振波谱分析测定主要参考 Armando 等（1996）的方法进行。称取土壤鲜样（相当于 50 g 干土重）置于 100 mL 塑料离心管里，加入 50 mL 蒸馏水，振荡 30 min（25 °C）后，离心 10 min（10000 rpm，0 °C），然后用膜（0.45 μm , Millipore Corp., USA）过滤。将过滤液冷冻干燥，然后用 1 mL 蒸馏水溶解，然后加入 D_2O 用于锁场。然后进行液态 ^{13}C 核磁共振波谱分析，测试累加次数为 153,600。

1.3 统计方法

本文的结果数据为 4 次重复的平均值，数据进行方差分析，并用新复极差法进行多重比较。数据的统计分析均在 Microsoft Excel 和 SAS 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳及不同形态活性碳库

集约经营过程中雷竹林土壤总有机碳的变化结果如图 1 所示。集约经营 1 a、5 a、10 a 和 15 a 的雷竹林表层土壤总有机碳分别为 15.1、19.9、29.3 和 57.9 g kg^{-1} 。在集约经营 1 a—5 a 的过程中，

雷竹林土壤总有机碳变化不显著。集约经营 5 a - 15 a 的过程中，雷竹林土壤总有机碳随着经营时间的延长而急剧增加。集约经营 10 a 和 15 a 的雷竹林土壤总有机碳分别为集约经营 5a 的 1.5 倍和 2.9 倍。

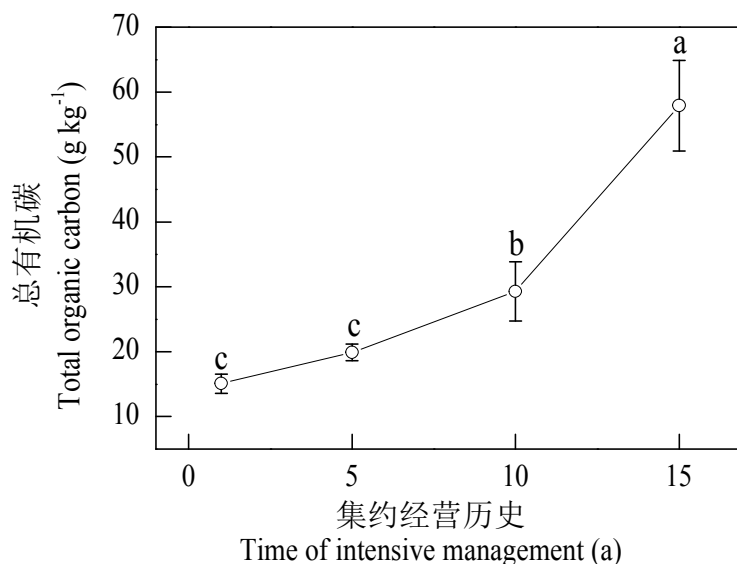


图 1 集约经营过程中雷竹林土壤总有机碳的变化

误差线 ($n = 4$), 不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($P = 0.05$)

Figure 1 Change in total organic carbon of *Phyllostachys Praecox* soil under intensive management

Error bars show standard deviation ($n = 4$); different letters mean significantly different at $P = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test.

集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳库的变化结果如图 2 所示。雷竹林土壤水溶性碳含量随着集约经营历史的增加而显著增加，其中集约经营 5 a、10 a 和 15 a 的雷竹林土壤水溶性碳分别为集约经营 1 a 的 132%、147%和 198% (图 2A)。土壤热水溶性碳在集约经营 1 a - 5 a 间，显著增加，而 5 a - 10 a 间变化不显著，10 a - 15 a 显著增加。土壤易氧化碳的变化规律与总有机碳非常相似。在集约经营初期变化不显著，集约经营 5 a 后，随着集约经营历史的增加而显著增加 (图 2D)。土壤微生物量碳的变化规律与其它三种活性碳库相差较大。在集约经营初期 (1 a - 5 a)，土壤微生物量碳显著增加，而集约经营五年后，随着集约经营时间的延长，土壤微生物量碳呈显著下降趋势 (图 2C)。集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳占总有机碳比例的变化结果如表 2 所示。随着集约经营时间的增加，不同形态活性碳占土壤总有机碳的比例均呈显著下降趋势 (表 2)。

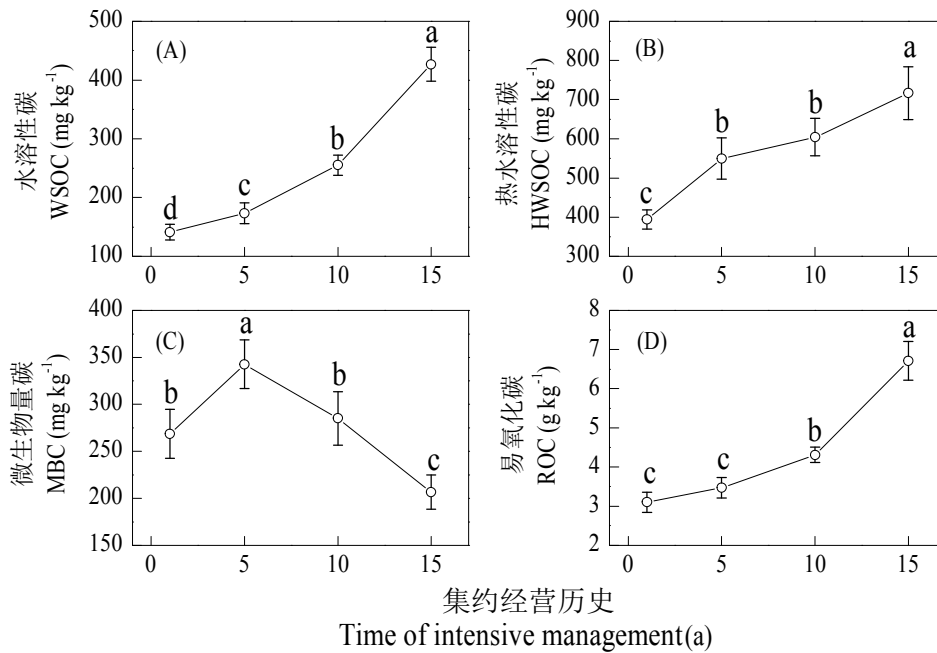


图2 集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳库的变化

误差线 ($n=4$), 不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($P=0.05$)

Figure 2 Change in different carbon pools of *Phyllostachys Praecox* soil under intensive management

Error bars show standard deviation ($n=4$); different letters mean significantly different at $P=0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test.

表2 集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳占有有机碳比例的变化

Table 2 Changes in the ratio of different carbon fractions to total organic carbon of *Phyllostachys Praecox* soil under intensive management

集约经营历史 Time of intensive management (a)	水溶性碳/总有机碳 WSOC/TOC (%)	热水溶性碳/总有机 碳 HWSOC/TOC (%)	微生物量碳/总有机 碳 MBC/TOC (%)	易氧化碳/总有机碳 ROC/TOC (%)
1	0.94 a	2.64 a	1.79 a	20.70 a
5	0.87 ab	2.77 a	1.72 a	17.50 b
10	0.89 ab	2.08 b	0.99 b	14.96 bc
15	0.74 b	1.25 c	0.36 c	11.78 c

同一列中所带字母不同表示新复极差法多重比较差异显著

Different letters in the some column mean significantly different at $P=0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test.

2.2 土壤有机碳的核磁共振波谱特征

不同集约经营历史雷竹林土壤有机碳的固态 ^{13}C 核磁共振波谱谱图如图3所示。各碳组分含量是土壤总有机碳含量和根据区域积分得到的各碳组分相对含量值的乘积。不同集约经营历史雷竹林土壤的核磁共振谱图均包含四个明显共振区, 即烷基碳区(0-50 ppm)、烷氧碳区(50-110 ppm)、芳香碳区(110-160 ppm)和羰基碳区(160-220 ppm), 而具体的信号强度分布则是有区别的(表4.2)。

对于不同集约经营历史的雷竹林土壤而言，烷氧碳均为最大的含碳组分，占总碳含量的 50%以上。集约经营时间的长短对不同碳组分占总有机碳的比例有不同程度的影响。随着集约经营时间的延长，雷竹林土壤有机碳中的烷基碳比例显著增加，芳香碳比例显著降低，烷氧碳比例没有显著变化。羰基碳占总有机碳的比例没有呈现显著的响应。随着集约经营时间的增加，雷竹林土壤的 A/O-A 值显著增加，而芳香度显著降低。

不同集约经营历史雷竹林土壤 WSOC 的液态 ^{13}C 核磁共振波谱谱图如图 3 所示。信号的化学位移主要分布在 50-110 ppm 内。这说明水溶性碳主要以烷氧碳为主。集约经营 1 a 的雷竹林土壤由于水溶性碳含量较低，所以信号非常弱。烷氧碳信号的强度随着雷竹林土壤集约经营时间的延长而显著增加。

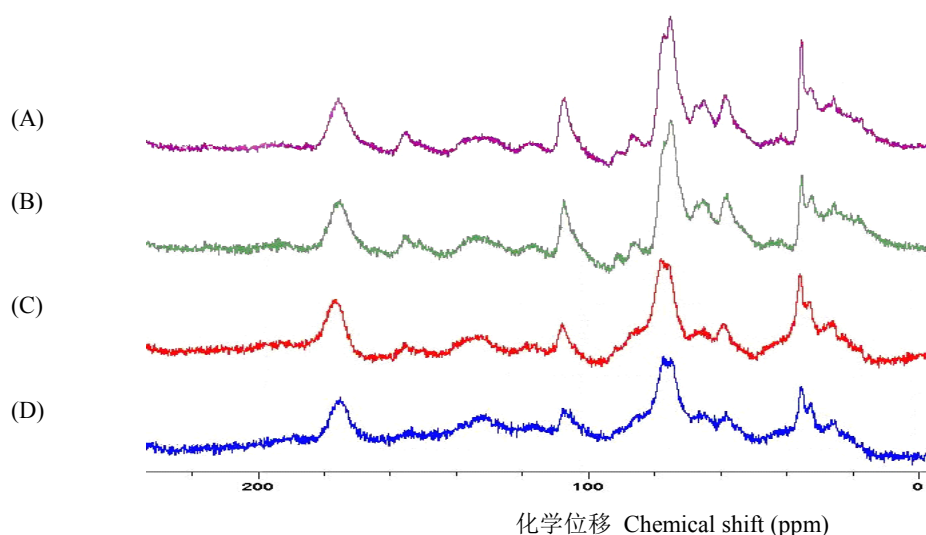


图 3 不同集约经营历史雷竹林土壤有机碳的固态 ^{13}C 核磁共振波谱谱图

Figure 3 Solid-state ^{13}C NMR spectra for organic carbon of *Phyllostachys Praecox* soil in different time of intensive management(A: 1 a; B: 5 a; C: 10 a; D: 15 a)

表 3 不同集约经营雷竹林土壤不同含碳组分在 ^{13}C NMR 谱中的信号强度分布 (%)

Table 3 Distributions of different chemical shift ranges in total signal intensity for ^{13}C NMR of *Phyllostachys Praecox* soil in different time of intensive management (%)

集约经营历史 Time of intensive management (a)	烷基碳 Alkyl-C	烷氧碳 O-alkyl C	芳香碳 Aromatic C	羰基碳 Carbonyl C	A/O-A	芳香度 Aromaticity
1	12.2 c	50.8 a	24.2 a	12.8 ab	0.24 c	27.8 a
5	21.1 b	54.1 a	11.3 b	13.5 a	0.39 b	13.1 b
10	31.2 a	50.9 a	7.6 c	10.3 b	0.62 a	8.5 c
15	32.1 a	47.2 a	6.9 c	13.8 a	0.68 a	8.0 c

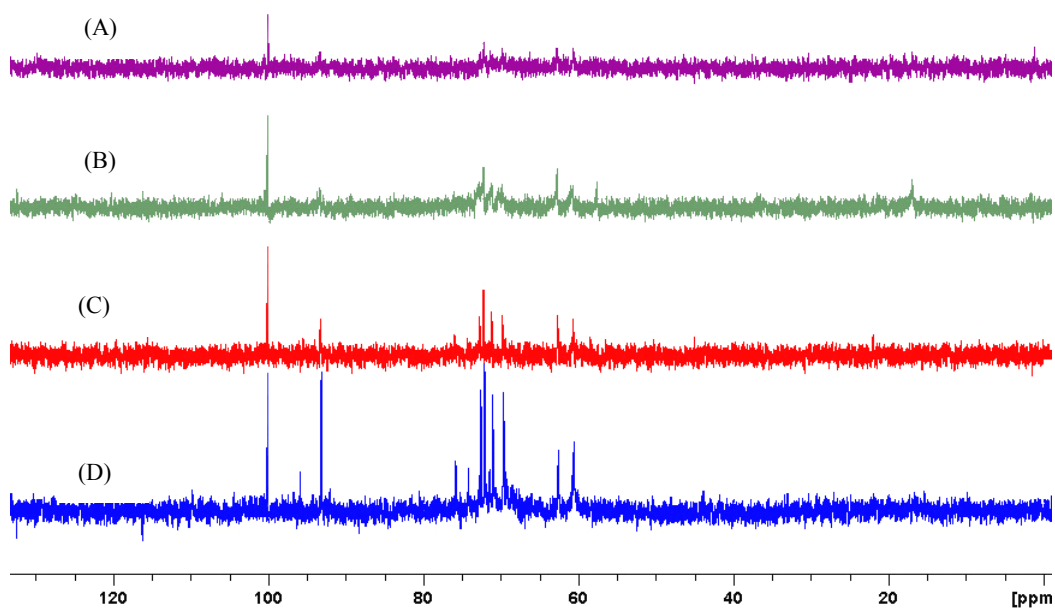


图 4 不同集约经营历史雷竹林土壤水溶性碳的液态 ^{13}C 核磁共振波谱图

Figure 4 Liquid-state ^{13}C NMR spectra for water soluble organic carbon of *Phyllostachys Praecox* soil in different time of intensive management(A: 1 a; B: 5 a; C: 10 a; D: 15 a)

2.3 不同碳库之间的相关性

集约经营雷竹林土壤 WSOC、HWSOC、MBC 以及 ROC 之间的相关性如表 4 所示。WSOC 与 HWSOC 呈显著正相关，与 ROC 呈极显著正相关。HWSOC 与 ROC 呈显著正相关。MBC 与其它三种不同形态的活性碳库均没有显著的相关性。相关性分析表明，集约经营雷竹林土壤的水溶性碳含量与土壤烷氧碳组分的含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；而热水溶性碳含量与土壤的芳香度呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

表 4 集约经营雷竹林土壤不同形态活性碳库之间的相关性

Table 4 Correlation among different labile carbon pools in *Phyllostachys Praecox* soil under intensive management

	水溶性碳 WSOC	热水溶性碳 HWSOC	微生物量碳 MBC	易氧化碳 ROC
水溶性 WSOC	1			
热水溶性碳 HWSOC	0.9100*	1		
微生物量碳 MBC	-0.7713 ^{NS}	-0.4427 ^{NS}	1	
易氧化碳 ROC	0.9976**	0.8936*	0.7841 ^{NS}	1

NS: 不显著; *: 在 $P=0.05$ 水平上显著; **: 在 $P=0.01$ 水平上显著。

NS: not significant; *: Significant at $P=0.05$; **: Significant at $P=0.01$.

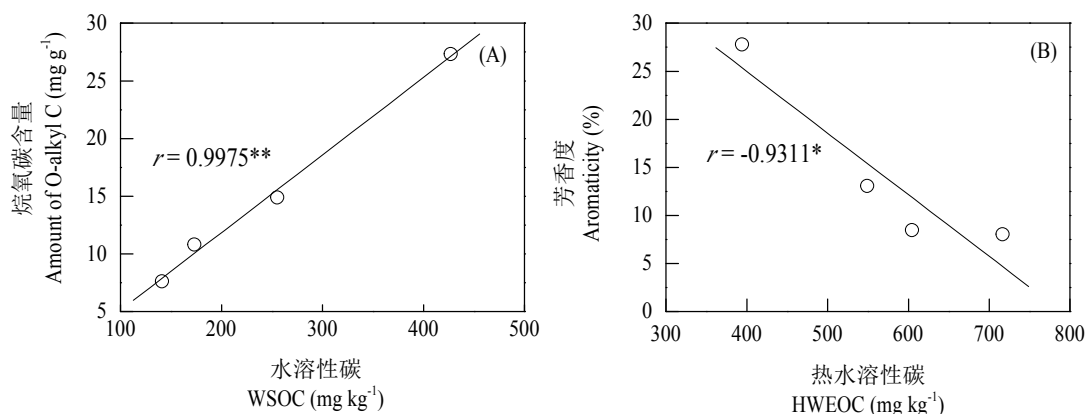


图5 集约经营雷竹林土壤烷氧碳含量与水溶性碳 (A) 以及芳香度和热水溶性碳 (B) 的相关性

*: 在 $P=0.05$ 水平上显著; **: 在 $P=0.01$ 水平上显著。

Figure 5 Relationships between amount of *O*-alkyl C and water soluble organic carbon (A) and between aromaticity and hot water soluble organic carbon (B) in the soil of *Phyllostachys Praecox* under intensive management

*: Significant at $P=0.05$; **: Significant at $P=0.01$.

3 讨论

土壤有机碳是影响土壤肥力的重要因素之一，其总量以及组成的变化也是反映土壤质量状况演变的重要指标（周莉等，2005）。本研究结果表明，在雷竹林集约经营初期（1 a - 5 a），土壤总有机碳含量增加不显著，而 5 a 以后，随着集约经营时间的增加，雷竹林土壤总有机碳含量呈急剧上升趋势。这可能是因为雷竹林在建园初期（1 a - 5 a），在冬季没有采取覆盖有机物措施的情况下，土壤有机质积累速率和分解速率趋于平衡。而 5 a 以后，随着冬季覆盖有机物措施的采用以及化肥的大量施用，有机质的积累速率大大超过了分解速率。在 5 a - 15 a 内，雷竹林土壤总有机碳增加了 38 g kg^{-1} 。增加的这部分碳可能有两个来源：冬季覆盖的有机物腐烂进入土壤和雷竹植物根系分泌物。而上述两种来源的相对比例大小还需要做进一步的研究。另外，本研究只是研究了集约经营 15 a 过程中的变化趋势，那么集约经营 15 a 后，土壤总有机碳是继续增加还是逐渐下降值得进一步的研究。

经营措施对林地土壤碳库有显著的影响，而不同方法表征的土壤活性碳对经营措施的反映规律存在较大的差异（Chen et al., 2004; Huang et al., 2008）。本研究的结果表明，集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳库的变化规律存在一定的差异性（图 2）。其中 WSOC、HWSOC 和 ROC 随着集约经营时间的增加呈显著增加趋势。增加的主要原因应该是冬季采取的覆盖有机物措施，当然雷竹的栽培也会对上述活性碳库的含量造成一定的影响。以往也有不少研究表明覆盖措施可以增加林地土壤 WSOC，HWSOC 含量（Jensen et al., 1997; Huang et al., 2008）。雷竹林土壤 MBC 含量在集约经营过程中的变化规律与 WSOC、HWSOC 和 ROC 差异较大。本研究结果表明，在集约经营初期（1 a - 5 a），雷竹林土壤 MBC 显著增加，但是集约经营 5 a 后，随着集约经营时间的增加而呈显著

下降趋势。而 Huang et al. (2008)的研究结果表明, 覆盖措施条件下土壤的 MBC 含量要显著高于没有采取覆盖的土壤。这可能是因为, 在雷竹林集约经营模式中, 除了覆盖有机物措施外, 还包含了大量施用化肥措施。而大量施用化肥可能会导致土壤微生物活性的减弱, 从而造成微生物生物量的下降。另外, 本研究结果表明, 在集约经营过程中雷竹林土壤不同形态活性碳占总有机碳比例呈下降趋势(表 2), 这表明在集约经营过程中的增加的有机碳越来越多地以稳定的形式存起来。因此, 在一定程度上来说, 上述结果对于增加雷竹林土壤固碳是非常有利的。

^{13}C CPMAS 核磁共振波谱分析法是研究土壤有机质化学结构特征的非常好的工具, 该方法可以对土壤中不同碳组分含量提供半定量的试验结果 (Mathers et al., 2000)。在以往的关于土壤 ^{13}C CPMAS 核磁共振研究中, 大部分土壤有机碳都呈现出四个明显的共振区即烷基碳区(0-50 ppm)、烷氧碳区(50-110 ppm)、芳香碳区(110-160 ppm)和羰基碳区(160-220 ppm) (Chen et al., 2004; Huang et al., 2008)。本实验的研究结果表明, 不同集约经营历史的雷竹林土壤有机碳的核磁共振波谱也呈现上述四个共振区(图 3)。而关于不同碳组分占土壤总有机碳的比例在以往的不同研究结果中存在较大的差异。如 Mathers 和 Xu (2003)的研究结果表明, 烷氧碳在四个不同碳组分中所占的比例是最高的, 而 Chen (2004)的研究结果表明, 烷基碳所占的比例最高。在本试验中, 集约经营 1 a 的雷竹林土壤, 碳组分主要以烷氧碳为主, 而集约经营 15 a 的雷竹林土壤主要以烷基碳和烷氧碳为主(表 3)。不同研究中不同形态碳所占的比例不一样, 可能与土壤类型、气候特征、植物种类以及经营方式有关。本试验中, 随着雷竹林集约经营时间的延长, 烷基碳比例增加, 烷氧碳比例基本不变, 而芳香碳比例下降。由于土壤总有机碳的量也在增加, 所以我们计算了土壤不同碳组分的含量。结果表明, 随着集约经营时间的延长, 雷竹林土壤烷基碳和烷氧碳的含量显著增加, 而芳香碳的含量显著下降。这表明雷竹林土壤在集约经营的过程中, 芳香碳不但没有增加, 反而原先的一部分芳香碳受到了不同程度的降解。从 A/O-A 值的变化来看, 随着集约经营时间的增加, A/O-A 值越来越高, 这表明增加的碳越来越稳定。然而, 从另一指标芳香度的变化来看, 有机质的稳定性随着集约经营时间的增加呈下降趋势。这主要是因为, 在雷竹林集约经营过程中, 覆盖物是砻糠和稻草, 而上述有机物料的降解产物主要是以烷基碳为主, 而在集约化强度经营(覆盖有机物和大量多次化肥施用)下, 芳香碳不容易形成, 相反还有一部分芳香碳分解掉。关于 A/O-A 值和芳香度在两个指标的变化在评价土壤有机质稳定性方面存在矛盾的现象是其他研究学者的报道中也存在 (Huang et al., 2008)。由于外界输入有机物的特性会在很大程度上影响土壤 A/O-A 值的变化 (Mathers et al., 2003; Baldock et al., 1997), 因此, 相比较而言, 用芳香度这一指标来评价土壤有机质的稳定性会更加适合。

相关性分析表明, 不同形态活性碳库(特别是 WSOC、HWSOC 和 ROC)之间存在显著的相关性(表 4)。这说明采用不同方法提取的碳在组分上存在一定的相似性。然而, 不同形态碳库的含量

之间的差异较大。如 WSOC 占 HWSOC 的 2.3%，而 HWSOC 只占 ROC 的 2.3%（图 2）。相比较而言，ROC 包含的碳数量要远远高于 WSOC、HWSOC 以及 MBC。这说明测定 ROC 方法所提取的碳除了包含水溶性碳外，还包含大量其它形态的碳。不少研究结果表明，核磁共振方法测定的不同碳组分含量与不同形态活性碳库含量方面存在一定的关系（Wilson et al., 1983; Huang et al., 2008）。本研究结果表明，土壤的烷氧碳含量与 WSOC 成极显著正相关（图 5），这表明土壤中 WSOC 可能主要是以烷氧碳为主。本研究对 WSOC 的液相核磁共振结果也证实了上述推论（图 4）。另外，HWEOC 被认为是用来表征土壤碳素变化的比较敏感的指标（Ghani et al., 2003）。本研究结果表明，土壤中 HWSOC 与芳香度成显著的负相关，而与 A/O-A 的相关性不显著。这与 Huang 等（2008）人在阔叶林土壤的研究结果是一致的。上述结果进一步证实，与指标 A/O-A 值相比，用芳香度这个指标来表征土壤有机质的稳定性更加合适。

参考文献

- [1] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151-163.
- [2] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20 (1): 99-105
- [3] Jarecki MK, Lal R. Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22: 471-502.
- [4] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson DW, Minkinen K, Byrne KA. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, 137: 253-268.
- [5] Chen CR, Xu ZH, Mathers NJ. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68, 282-291.
- [6] Jiang PK, Xu QF, Xu ZH, Cao ZH. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China. *For. Ecol. Manage.*, 2006, 236, 30-36.
- [7] Huang ZQ, Xu ZH, Chen CR, Boyd S. Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia. *Forest Ecology and management*, 2008, 254, 46-55
- [8] Graeme JB, Rod DBL, Leanne L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46, 1459-1466
- [9] Mathers NJ, Mao XA, Xu ZH, Saffigna PG, Berners-Price SJ, Perera MCS. Recent advances in the application of ¹³C and ¹⁵N NMR spectroscopy to soil organic matter studies. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38, 769-787
- [10] 方伟, 何钧潮, 卢学可, 等. 1994. 雷竹早产高效栽培技术. *浙江林学院学报*, 1994, 11 (2) : 121 - 128
- [11] Cao, ZH, Huang JF, Zhang CS, Li AF. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. *Environ. Geochem. Health*, 2004, 26, 97-103.
- [12] 金爱武, 周国模, 郑炳松等. 雷竹保护地栽培林地退化机制的初步研究. *福建林学院学报*, 1999, 19 (1): 94-96
- [13] 姜培坤, 俞益武, 张立钦等. 雷竹林地土壤酶活性研究. *浙江林学院学报*, 2000, 17 (2): 132 - 136.
- [14] 周国模, 金爱武, 何钧潮, 等. 1999b. 覆盖保护地栽培措施对雷竹笋用林丰产性能的影响. *中南林学院学报*, 19(2): 52 - 54
- [15] 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 146 - 226
- [16] Ghani A, Dexter M, Perrott KW. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.*, 2003, 35, 1231-1243.
- [17] Sparling G. Vojvodic-Vukovic M, Schipper LA. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter:

- the relationship with microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30, 1469–1472.
- [18] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DC. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. & Biochem.*, 19: 703 - 707
- [19] Mathers, N.J., Xu, Z.H., Berners-Price, S.J., Perera, M.C.S., Saffigna, P.G., 2002. Hydrofluoric acid pre-treatment for improving ^{13}C CPMAS NMR spectral quality of forest soils in southeast Queensland, Australia. *Aust. J. Soil Res.* 40, 655–674.
- [20] Dai KOH, Johnson, CE, Driscoll, CT. Organic matter chemistry and dynamic in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 2001, 54, 51-83.
- [21] Armando SNL, Darwin WA, Brock C. Cultivation effects in the nature of organic matter in soils and water extracts using CP/MAS ^{13}C NMR spectroscopy. *Plant and Soil*, 1996, 184, 207-217
- [22] Jensen LS, Mueller T, Magid J, Nielsen NE. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29, 1043–1055.
- [23] Mathers, N.J., Xu, Z.H., 2003. Solid-state ^{13}C NMR spectroscopy, characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia. *Geoderma* 114, 19–31.
- [24] Wilson MA, Heng S, Goh KM, Pugmire RJ, Grant DM. Studies of litter and acid insoluble soil organic matter fraction using ^{13}C -cross polarization nuclear magnetic resonance spectroscopy with magic angle scanning. *J. Soil Sci.*, 1983, 34, 83–97.

论文摘要

Landsat TM 数据反射率及 NDVI 对毛竹林地上生物量响应

杜华强^{1*} 崔瑞蕊¹ 周国模¹ 施拥军¹ 徐小军¹ 范渭亮¹ 吕玉龙²

(1 浙江林学院 环境科技学院 杭州临安 浙江 311300

2 安吉县林业局 安吉 浙江 313300)

摘要 竹林是我国亚热带特使的森林类型，其巨大的生物量碳储量对区域生态系统和全球碳平衡有着重要的作用。本文以毛竹林为，采用浙江省安吉县 LandsatTM 影像和 52 个 30×30 野外样地，主要探讨了毛竹林光谱波段地上生物量响应、NDVI 与毛竹地上生物量的关系。研究表明：(1)TM4、TM5 和 TM7 对毛竹林生物量的解释具有重要的作用，且 TM5 在反映毛竹 AGB 上应该引起足够的重视；(2)毛竹林较高的覆盖度及 TM3 的吸收使得 NDVI 趋于饱和，而不能用来反映毛竹林地上生物量的变化；与土壤背景有关的植被指数与地上生物量在 0.05 水平上显著相关，说明土壤背景也影响了 NDVI 对地上生物量的解释，这为构建适合反射竹林地上生物量的植被指数提供了重要参考；(3) 构建了一个新的植被指数 MBIVI，相对其他植被指数，MBIVI 能更好的反映毛竹地上生物量的变化情况，其与毛竹地上相关系数为 0.48，且该系数与多元线性模型系数(0.55)比较接近，说明该指数对毛竹地上生物量具有一定的适应性。

关键词 毛竹；Landsat TM 影像；光谱反射率；NDVI；地上生物量

The responses of moso bamboo aboveground biomass to Landsat TM spectral reflectance and NDVI

DU Hua-Qiang^{1*}, CUI Rui-Rui¹, ZHOU Guo-Mo¹, SHI Yong-Jun¹, XU Xiao-Jun¹, FAN Wei-Liang¹, LV Yu-Long²

1 School of Environmental Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an, Zhejiang Province, 311300, China; 2 Anji Forestry Bureau, Anji, Zhejiang Province, 311300, China

Abstract: Bamboo, as a unique forest type in the subtropical regions of China. Its huge biomass and carbon storage and its ecological function play an important role in global carbon sink. In this paper, we take moso bamboo forests as example to analyze its spectral behavior using Landsat Thematic Mapper(TM) data in the Anji county of Zhejiang province, China, discuss its spectral responses to aboveground biomass (AGB),

项目基金 国家自然科学基金项目(30700638)、国家林业局 948 项目(2008-4-49)和浙江省科技厅项目(2451012025, 2008C12068)共同资助

***通讯作者** E-mail dhqrs@126.com

and explain the relationship between the normalized difference vegetation index (NDVI) and AGB. It was found that (1) near infrared band (TM4), and the two mid-infrared bands (TM5, TM7) bands there is a more important response to moso bamboo AGB than the three visible bands, and TM5 has a higher path coefficient than that of any other wavebands. Thus, this band should be highly relevant when it was applied to explain moso bamboo AGB. (2) NDVI, commonly used to estimate vegetable biomass, however, show weak correlations with moso bamboo AGB. One important reason is NDVI saturation, another factor is the soil background, because the vegetable indices which relate to the soil adjustment parameters such as Perpendicular Vegetation Index (PVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Soil Adjust Vegetation Index (SAVI) etc. have significant correlation with moso bamboo biomass in 0.05 level. (3) A new vegetation index was developed by this paper's moso bamboo infrared vegetation index (MBIVI) has significant correlation with moso bamboo AGB (correlation coefficient is 0.48), and has a higher correlation coefficient (R) than that of any other selected vegetation indices. In addition, this R is close to the R of multilinker model, indicating that, the MBIVI is feasible to reflect moso bamboo AGB to a certain degree.

Key words: Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*); Landsat TM images; Spectral reflectance; NDVI; aboveground biomass

基于 Landsat TM 数据安吉县毛竹林地上部分碳储量估算

徐小军¹ 杜华强¹ 周国模*¹ 葛宏立¹ 施拥军¹ 周宇峰¹ 范渭亮¹ 范文义²

¹ 浙江林学院环境科技学院, 浙江临安, 311300 ; ² 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨, 150040

摘要 竹林广泛分布于东南亚地区并在全球碳收支方面起到重要的作用。因此, 精确地大面积估算竹林碳储量是一项紧迫的研究。本文结合地面样地调查和 Landsat TM 数据, 采用多元线性回归、偏最小二乘法和后向反馈人工神经网络 (back-propagation neural network, BP-NN) 3 种建模方法对浙江省安吉县毛竹林地上部分碳储量进行估算。结果表明, BP-NN 预测效果最好, 多元线性回归预测误差最大。提出了一种能够大面积估算毛竹林地上部分碳储量可行方法。

关键词 毛竹林; 地上部分碳储量; 偏最小二乘法; 后向反馈人工神经网络; Landsat TM

Estimation of Aboveground Carbon Stock of Moso Bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) Forest with a Landsat Thematic Mapper Image

Xiaojun Xu¹, Huaqiang Du¹, Guomo Zhou^{1*}, Hongli Ge¹, Yongjun Shi¹, Yufeng Zhou¹, Weiliang Fan¹,
Wenyi Fan²

¹ School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang Forestry University, Lin'an, Zhejiang Province, 311300, China;

² Forest College, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang Province, 150040, China

Abstract: The extensive distribution of bamboo forests in South and Southeast Asia plays an important role in the global carbon budget. It is an urgent task to accurately and timely estimate the carbon stock in this large area. In this research, linear regression, partial least-squares (PLS) regression, and Gaussian error function back-propagation (Erf-BP) neural network were used to estimate aboveground carbon stock (AGC) of *Moso* bamboo in Anji county, Zhejiang province, China based on a combined use of Landsat Thematic Mapper (TM) data and field measurements. The results indicated that the Erf-BP model provided the best estimation performance, and linear regression model had poorest performance. This research provides a feasible way to estimate *Moso* bamboo's AGC in a large area.

Key words: *Moso* bamboo forest; Aboveground carbon stock; Partial least-squares regression; Back-Propagation neural network; Landsat TM

项目基金 国家自然科学基金(30700638, 30771715), 国家林业局‘948’项目(2008-4-49), 国家 863 项目 (grant, 2006AA12Z104) 和浙江科技厅重点项目 (2451012025 and 2008C12068).

*通讯作者 E-mail zhougm@zjfc.edu.cn

参会人员名单

List of Participants

单位	姓名	E-mail
福建农林大学	张飞萍	Fpzhang1@163.com
福建师范大学	杨玉盛	geoyys@fjnu.edu.cn
国际竹藤网络中心	范少辉	fansh@icbr.ac.cn
	刘广路	liuguanglu@icbr.ac.cn
国际竹藤组织	吴志民	zmwu@inbar.int
	李璇	xli@inbar.int
	李艳霞	yxli@inbar.int
	楼一平	yplou@inbar.int
	宾朋	331665226@qq.com
国家林业局	李怒云	linyun516@vip.sina.com
	蒋三乃	jiangsannai@sina.com
国家林业局竹子研究开发中心	吴良如	ibamboo@yahoo.cn
	毕毓芳	yufangbi@163.com
	杜旭华	stary8@163.com
杭州市余杭区林业工作站	刘军	hzliu2121@sohu.com
江西理工大学	张刚华	Zgh06@126.com
江西农业大学	杨光耀	Yanggy2004@126.com
	杨清培	qingpeiyang@126.com
江西省林业科学研究院	程平	Chengping398@sina.com
	肖复明	jxxiaofuming@163.com
南京林业大学竹类研究所	丁雨龙	ylding@vip.163.com
	林树燕	lrx@njfu.com.cn
	刘国华	lgh3008@163.com
宁波城市职业技术学院	高志勤	gaozhiqin@yahoo.com.cn

单位	姓名	E-mail
欧盟生物多样性项目办公室	石建斌	jianbin.shi@undp.org
世界自然基金会中国办事处	韩 崢	zhhan@wwfchina.org
西南林学院	董文渊	Wydong6839@sina.com
	付建生	fjsbamboo@163.com
英国牛津大学	凯瑟琳	kathleen.buckingham@ouce.ox.ac.uk
浙江林学院	周国模	zhougm@zjfc.edu.cn
	方 伟	fw@zjfc.edu.cn
	姜培坤	jiangpeikun@zjfc.edu.cn
	郭小勤	xqguo@zjfc.edu.cn
	范渭亮	fanweiliang@163.com
	汤孟平	goodtmp@yahoo.com.cn
	徐秋芳	xuqiufang@zjfc.edu.cn
	杜华强	dhqrs@126.com
	徐小军	xuxiaojun3115371@163.com
浙江省安吉县林业局	张培新	aj.zpx@163.com
	王健锋	wjf.1977@163.com
	吕玉龙	ajlxt@163.com
浙江省林业科学研究院	汪奎宏	wangkh@mail.hz.zj.cn
中国林科院亚林所	萧江华	jhxbamboo@126.com
	傅懋毅	fumy1@tom.com
	谢锦忠	jzhxie@163.net
	陈双林	cslbamboo@126.com
	杨校生	yxiaosheng@263.net
	郭子武	Hunt-panther@163.com
	李迎春	Yingchunli001@126.com
	杨秀艳	sueyxy@126.com
	王 芳	wf0471@sina.com
	张 玮	jadezh@163.com

单位	姓名	E-mail
中国林科院资昆所	杨汉奇	yanghanqikm@yahoo.com.cn
中国林科院科信所	徐 斌	xubin@caf.ac.cn
中国绿色时报	李瑞林	babo8515@163.com
中国科学院华南植物园	邵元虎	sfu@scbg.ac.cn
中南林业科技大学	谭益民	csfutanyimin@126.com

注: 以单位名称拼音排序