

间伐强度对杉木林下植物物种多样性和结构组成的影响*

Effects of Understory Plant Species Diversity and Composition in *Cunninghamia lanceolata* Plantations with Different Thinning Intensity

尤业明^{1,2}, 黄雪蔓^{1,2}, 朱宏光^{1,2}, 蓝嘉川^{1,2}, 蔡道雄³, 温远光^{1,2,*}

YOU Ye-ming^{1,2}, HUANG Xue-man^{1,2}, ZHU Hong-guang^{1,2}, LAN Jia-chuan^{1,2}, CAI Dao-xiong³, WEN Yuan-guang^{1,2}

(1. 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西大学林学院, 广西高校林业科学与工程重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Forestry Science and Engineering, Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

摘要:【目的】研究营林措施对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林下植被的多样性影响及其关键控制因素,从本质上解释人工林下植被变化的调控机制。【方法】以3种不同间伐强度(强度:74%,中度:50%和弱度:34%)的杉木人工林为研究对象,采用野外调查和室内分析相结合的方法,重点探究间伐强度对林下植物物种丰富度和多样性的影响,以及林下植物物种组成与生境因子之间的关系及其重要控制因子。【结果】间伐8a后,杉木林下灌木层的物种丰富度和多样性没有发生明显变化,但间伐措施能明显改变灌木层的物种组成,这种效应在中度间伐和强度间伐的杉木林中表现尤为突出;间伐不仅能显著改变杉木林下草本层的物种丰富度和Whittaker β多样性,而且也能明显改变草本层的物种组成,这种作用在强度间伐的杉木林中最强;冗余分析(RDA)结果揭示了土壤碳氮比和乔木胸高断面面积是影响杉木林下灌木层物种变化的最主要因子,而影响林下草本层物种组成的最显著因子为土壤有机碳含量和乔木胸高断面面积。【结论】间伐措施,特别是高强度的间伐措施能显著改变灌木层的物种组成,以及草本层的多样性和物种组成,可能对杉木人工林的生态过程和林木生长产生一定影响。

关键词:物种多样性 杉木人工林 间伐强度 主成分分析(PCA) 南亚热带

中图分类号:Q145 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2015)06-0593-07

收稿日期:2015-09-09

作者简介:尤业明(1983-),男,讲师,主要从事森林土壤碳周转的调控机制研究。

* 国家自然科学基金项目(31460121)和国家科技支撑计划项目(2012BAD22B01)资助。

** 通讯作者:温远光(1957-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事森林生态和森林培育研究,E-mail:wenyg@263.net。

Abstract:【Objective】Investigating the effects and key control factors of silvicultural measures on plant species diversity of understory in *Cunninghamia lanceolata* plantations was conducted in order to demonstrate the mechanisms of vegetation changes in understory of plantation.【Methods】This study focused on exploring the effects of plant species diversity and composition in *Cunninghamia lanceolata* plantations

with different thinning intensity (High:74%,Middle:50% and Low:34%). Also, the relationship between understory plant species composition and environmental factors, and its key controlling factors were determined by combining field investigations and laboratory analysis. **【Results】**The species richness and diversity of shrub layer were not changed significantly with different thinning intensity, but the composition of plant species in shrub layer changed significantly after thinning 8 years, which appeared stronger especially in the moderate and high intensity thinning. In addition, thinning not only significantly changed plant species richness and Whittaker β diversity, but also changed the species composition significantly in herbaceous layer, which appeared strongest in high intensity thinning; Redundancy analysis suggested that soil C/N and tree basal area were the most important factors determining shrub layer plant distribution, while soil organic carbon and tree basal area were the most important factors determining herb layer plant species composition. **【Conclusion】**High intensity thinning significantly changed the composition of species in shrub layer, and species diversity and composition in herb layer. These change may finally influence the ecological processes and tree growth in *Cunninghamia lanceolata* plantations.

Key words: species diversity, *Cunninghamia lanceolata* plantation, thinning intensity, principal component analysis (PCA), south subtropics

0 引言

【研究意义】林下植被是构成森林生态系统的重要组成部分,越来越多的研究表明林下植被在维持整个森林生态系统结构和功能上发挥着至关重要的作用,特别是在维持整个森林生态系统的物种多样性、系统稳定性、水土保持、调控地上和地下物质循环和能量交换、影响种子的萌发以及幼苗更新等方面发挥着不可替代的作用^[1~4]。近期中国科学院华南植物园的 Wu 等^[4]发现,通过去除人工林林下灌草能引起土壤微生物群落结构的改变并显著减缓凋落物的分解,最终必将影响人工林的养分循环以及土壤碳排放。相对于乔木层而言,灌木层和草本层的生物量在整个群落中所占的比例相对较小,所以常常被人们所忽视。长期以来,人们为了最大限度获取木材产量,在人工林经营中往往采用大面积高密度种植同一树种来提高木材产量,但同时却导致林下植被减少,最终将可能影响人工林的土壤肥力、土壤质地和系统稳定性等。**【前人研究进展】**间伐作为一种重要的森林经营措施,其在调整林分密度结构并促进林木生长的同时,也能影响其林下植被的更新与生长,改变林下植被物种的多样性和结构组成。由于林分类型、间伐强度、间伐方式或间伐后恢复时间等的不同,目前有关间伐措施对植被物种多样性的影响也没有统一的结论^[5~7]。一般认为,间伐措施改变了冠层的结构,能够增加林下植被的多样性和均匀度,而且植被的多样性随着间伐强度的增大而增加^[8]。但也有一些研究认为间伐措施降低了植被物种的多样性^[9],李瑞霞等^[10]发现虽然间伐能够提高马尾松林下植物物种的多样性和均匀度,但未表现出随间伐强度增大而增加

的规律。**【本研究切入点】**杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方特有的优质速生用材林针叶树种,因具有适应性强和经济效益高的特点而被广泛种植。迄今为止,不少研究结果虽然揭示了不同的营林措施对杉木林的生物量、生物量分配、植被多样性和土壤养分等的影响,但林下植被物种多样性及其分布格局受多种生物和非生物因素的影响,系统研究营林措施对杉木林下植被的多样性影响及其关键控制因素将有助于从本质上解释人工林下植被变化的调控机制。**【拟解决的关键问题】**以中国林业科学研究院热带林业实验中心 1992 年造林,并于 2005 年实施 3 种不同间伐强度(74%,50%和 34%)的杉木人工林为研究对象,重点探究间伐强度对杉木林下灌木层和草本层物种多样性的影响,并运用多元统计分析,较为系统地探究杉木林下灌木层和草本层的物种组成和生境因子之间的关系,确定影响杉木林下灌木层和草本层物种分布格局的关键控制因子,为准确预测杉木林下植被物种多样性变化和林业的可持续经营提供科学的基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

本研究区域位于广西壮族自治区凭祥市境内的中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验林场(22°10' N,106°50' E)。该地区属于亚热带季风气候区域内的西南部,属湿润半湿润气候,干湿季分明。境内光照充足,雨量充沛,年均降水量为 1400 mm,降雨主要集中在每年 4~9 月;年蒸发量 1261~1388 mm,相对湿度 80%~84%。年平均气温 20.5~21.7℃,平均月最低温度 12.1℃,平均月最高

温度 26.3℃;年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 6000~7600℃。主要地貌类型以低山丘陵为主,地带性土壤以砖红壤为主,主要由花岗岩风化形成^[11]。

于 2004 年 9 月,在青山实验场 6 林班选择 1992 年种植的杉木林,改造前林地以传统林分经营方式进行林业管护,林分内建立了 12 个 20 m \times 30 m 固定实验样地,设计 3 组重复实验。2005 年,在样地内选择生长良好的杉木作为目标树,按强度间伐 H(74%)、中度间伐 M(50%)和弱度间伐 L(34%)3 种不同间伐强度疏伐去生长不良、干形不优的干扰树,以没有经过任何间伐处理的样地作为对照。于 2013 年 8 月,对间伐 8 a 后的杉木林和对照组进行传统的样地调查。

1.2 样地调查

采用典型的样地调查方法,记录样地周边营林小班情况,以及样地的经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位等基本信息。分别对每个样地中胸径大于 2 cm 的乔木进行每木检尺,利用胸径尺测定林木胸径(1.3 m 处),并记录树高、枝下高和冠幅等指标;对样地每个 10 m \times 10 m 样方内固定一角设置一个 5 m \times 5 m 小样方调查灌木层和草本层的物种组成,并记录种名、盖度、个体数、平均高度。

1.3 土壤样品采集和测定

在每个固定样方按“品”字形设采样点,挖取土壤剖面,记录土壤颜色、土层厚度、质地等特征,并按 0~20 cm、20~40 cm 分两层采集土样,然后按四分法混合取土样,带回实验室晾干后过 2 mm 土筛并进行土壤理化性质测定。

1.4 数据分析

为描述林下灌木层和草本层物种在其相对应群落中的地位,采用物种重要值(importance value, IV)反映其在相应群落中的优势,计算公式为

$$\text{重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3. \quad (1)$$

采用物种丰富度和 Shannon-Weaver 多样性指数(α 多样性)描述样地的灌木层和草本层物种多样性,Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i), \quad (2)$$

式中, P_i 表示第 i 个种的多度比例,即 $P_i = \frac{N_i}{N_0}$ 。

采用 Whittaker β 多样性指数描述不同环境梯度下灌木层和草本层物种多样性的变化,Whittaker β 多样性指数:

$$\beta = \frac{S}{A} - 1, \quad (3)$$

式中, S 是研究系统中所记录到的总物种数, A 为环境梯度上(样方)所发现物种的平均数。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别比较不同间伐强度杉木林之间的灌木层和草本层物种多样性指数和物种丰富度。

以上所有分析均在软件 SPSS 17.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago, USA)下运行,采用 LSD 程序分析比较它们均值的差异性,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

基于野外观测和室内分析,一共得到了 17 个生物和非生物因子,包括微环境:海拔(elevation)、坡位(slope position)、坡向(slope aspect)和坡度(slope);植物特性:乔木密度(tree density)、胸高断面积(basal area)、地表凋落物量(litter mass)和郁闭度(canopy density);土壤理化性质:含水量(% , SWC)、容重(BD)、有机碳(SOC)、总氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效钾(AK)、碳氮比(C/N)和氮磷比(N/P)。

采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)检验杉木林在不同间伐强度处理 8 a 后其林下灌木层和草本层物种组成的分异程度。此外,采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)确定影响该区域杉木林下灌木层和草本层物种变异的最主要因子。首先在 RDA 程序中运用蒙特卡洛检验(Monte Carlo, 999 iterations)对得到的 17 个生物和非生物因子进行预选,把具有显著性影响($P < 0.05$)的生物和非生物因子作为最后 RDA 分析的环境变量。物种数据分别采用灌木层和草本层物种的重要值数据^[12],其中灌木层物种数据矩阵为 12 \times 82,草本层物种数据矩阵为 12 \times 70。以上 RDA 分析在软件 CANOCO for Windows 4.5 (Biometris-Plant Research international, Wageningen, The Netherlands)上进行。所有的数据在分析之前均经过对数转换。

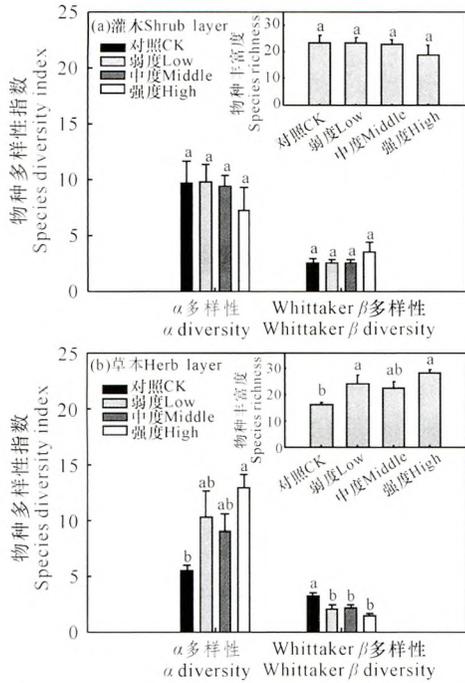
作图在软件 Sigma Plot 10.0 上完成。

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度杉木林下灌木层和草本层物种丰富度和多样性变化

单因素方差分析结果表明不同间伐强度杉木林之间灌木层的物种丰富度、 α 多样性和 Whittaker β 多样性的差异均未达到显著性水平($P > 0.05$, $df = 3, 8$)。在 4 种试验处理中,杉木林下灌木层的物种丰富度无明显变化,对照组稍高,弱度间伐次之,强度间伐最低; α 多样性指数的变化规律和物种丰富度的变化规律相似;而 Whittaker β 多样性指数则表现为强度间伐最高,对照组次之,弱度间伐最小(图 1a)。

不同间伐强度能显著改变杉木林下草本层的物种丰富度 ($F = 4.496, P = 0.040$) 和 Whittaker β 多样性 ($F = 5.959, P = 0.019$), 但不能显著改变其草本层的 α 多样性 ($F = 3.972, P = 0.053$)。在 4 种试验处理中, 强度间伐的草本层物种丰富度最高, 弱度间伐次之, 对照组最小; α 多样性指数的变化规律和物种丰富度的变化规律相似; 而 Whittaker β 多样性指数则表现为对照组最大, 中度间伐次之, 强度间伐最小(图 1b)。



不同字母代表该指标在不同间伐强度之间的差异性显著 ($P < 0.05$)。

Different letters above the bars indicate significant differences among thinning intensity ($P < 0.05$).

图 1 不同间伐强度杉木林下灌木层和草本层物种多样性和丰富度变化(平均值±标准误差, $n = 3$)

Fig. 1 The species diversity and richness in shrub layer and herb layer under varying thinning intensity in *Cunninghamia lanceolata* plantation (Values are mean \pm SE, $n = 3$)

2.2 不同间伐强度对杉木林下灌木层和草本层物种组成的影响

分别对不同间伐强度下杉木林下灌木层和草本层的物种组成进行主成分分析(PCA), 其分析结果表明: 在灌木层, 第 1 主成分轴(PCA 1)和第 2 主成分轴(PCA 2)分别解释了其物种组成变异的 42.3% 和 21.0%; PCA 1 能明显把对照组和 3 种间伐强度下的物种分开, 其中强度间伐和对照组还能明显被 PCA 1 和 PCA 2 分开(图 2a), 表明经过间伐处理 8 a 后, 与对照相比, 其灌木层物种组成发生明显的改变, 特别

是在强度间伐的杉木林中。

在草本层, 第 1 主成分轴(PCA 1)和第 2 主成分轴(PCA 2)一共解释了其物种组成变异的 58.8%; PCA 2 能明显把对照组和 3 种间伐强度下的物种分开, 其中强度间伐和对照组还能明显被 PCA 1 和 PCA 2 分开(图 2b), 表明中、低强度的间伐(34% 和 50%)不能明显改变草本层的物种组成, 但高强度的间伐(74%)能显著改变草本层的物种组成(与对照组相比)。

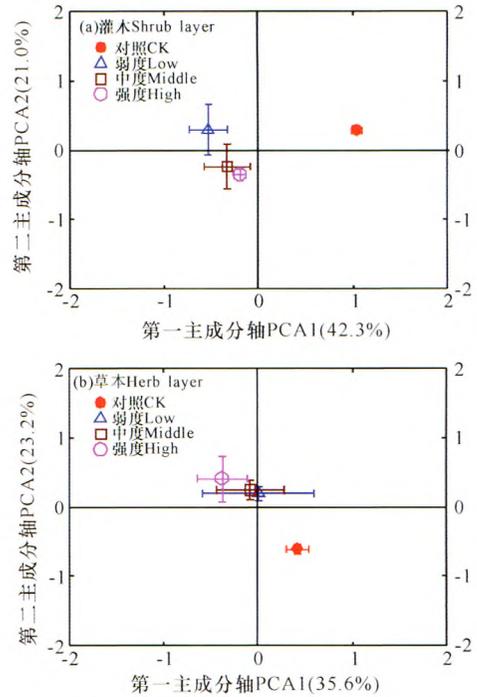


图 2 不同间伐强度杉木林灌木层和草本层物种组成的主成分分析(误差线为标准误差, $n = 3$)

Fig. 2 Principal component analysis (PCA) of species composition in shrub layer and herb layer under varying thinning intensity in *Cunninghamia lanceolata* plantation (Error bars indicate \pm SE, $n = 3$)

2.3 生境因子对杉木林下灌木层和草本层物种组成的影响

在调查的 17 个生境因子中, 通过对单一环境因子进行蒙特卡洛检验预选后得到 5 个生境因子与灌木层的物种组成显著相关, 包括 C/N、BA、TD、CD 和 SOC, 它们并被选入最后的模型分析, 结果表明这 5 个主要生境因子的叠加效应总共解释了超过 60% 的灌木层物种的变异(表 1, Lambda- β 解释量的总和)。通过 RDA 分析对以上 5 个生境因子进行排序后确定 C/N 和 BA 是影响该区域杉木林下灌木层的物种组成的最主要生境因子(表 1)。

在调查的 17 个生境因子中, 通过对单一环境因子进行蒙特卡洛检验预选后得到 5 个生境因子与草本层的物种组成显著相关, 包括 SOC、BA、CD、TN

和 C/N,它们并被选入最后的模型分析,结果表明这 5 个主要生境因子的叠加效应总共解释了超过 50% 的草本层物种的变异(表 1, Lambda- β 解释量的总和)。通过 RDA 分析对以上 5 个生境因子进行排序后确定 SOC 和 BA 是影响该区域杉木林下草本层的物种组成的最主要生境因子(表 1)。

表 1 冗余分析(RDA)样地主要生境因子对杉木林下灌木层和草本层物种组成作用的变异解释率和叠加效应解释率

Table 1 Marginal and conditional effects of site factors on species composition of shrub layer and herb layer in *Cunninghamia lanceolata* plantation obtained from the summary of forward selection in Redundancy analysis (RDA)

变量 Variables	解释率- α^1 Lambda- α^1	解释率- β^2 Lambda- β^2	P ³	F-ratio ⁴
灌木层 Shrub layer				
土壤碳氮比(C/N)	0.21	0.21	0.039	2.59
胸高断面积(BA)	0.18	0.18	0.014	2.74
乔木密度(TD)	0.15	0.09	0.195	1.41
郁闭度(CD)	0.16	0.09	0.218	1.37
土壤有机碳(SOC)	0.20	0.04	0.707	0.68
草本层 Herbaceous layer				
土壤有机碳(SOC)	0.18	0.18	0.035	2.19
胸高断面积(BA)	0.18	0.16	0.023	2.13
郁闭度(CD)	0.13	0.09	0.278	1.28
总氮(TN)	0.16	0.04	0.732	0.61
土壤碳氮比(C/N)	0.15	0.09	0.321	1.24

注:¹表示样地主要生境因子单独对灌木层或草本层物种组成变异的边缘解释率;²表示样地所有主要生境因子叠加时某个生境因子对灌木层或草本层物种组成变异的叠加解释率;³和⁴分别表示样地所有主要生境因子叠加后某个生境因子进行蒙特卡洛显著性检验的 P 值和 F 值(95%置信区间)。

Note:¹describes marginal effects, which show the variance explained when the variable is used as the only factor;²describes conditional effects, which show the additional variance explained by each variable when it is include in the model;³ and ⁴ mean the corresponding P value and F value when performing Monte Carlo test at the 0.05 significance level, respectively.

3 讨论

在人工林的经营措施中,间伐作为一种重要的森林经营手段,其在调整林分密度结构并促进林木生长的同时,也能影响其林下植被的更新与生长,改变林下植被物种的多样性和结构组成。其中,采取何种间伐强度最有利于人工林可持续经营一直是林业科学工作者重点关注的问题。本研究表明,间伐 8 a 后,杉木林下灌木层物种丰富度和多样性没有随间伐强度的增加而发生显著的变化,但间伐能显著影响杉木林下草本层的物种丰富度和 β 多样性,特别是强度间伐(74%)能显著影响草本层的物种丰富度和多样性

(与对照组对比)。许多研究结果表明,间伐能够提高林下灌木层和草本层的物种丰富度和多样性,且随着间伐强度的增大而增加^[8,13],这与本研究中草本层的物种丰富度和 α 多样性随间伐强度增大有明显增加趋势一致,其主要原因是间伐后郁闭度降低,林下植被能够获取更多的光源,可能有利于改善林下草本的生存空间和一些新草本物种的出现。但在本研究中,灌木层的物种丰富度和 α 多样性随间伐强度的增加而有减少的趋势,这与 Nagai 等^[9]的研究结果相似,表明灌木层物种的丰富度和 α 多样性除了受光照影响外,其它环境因子(如土壤养分、水分、凋落物量和土壤质地等)也可能是显著影响其灌木物种更新和生长的重要控制因素^[14]。

许多研究表明,林分的冠层结构、土壤养分和微环境调控林下灌木层或草本层的物种组成^[15,16]。人工林的林下植物分布不仅受到经营树种、林冠郁闭度和经营措施的影响^[11],而且还受到立地条件(海拔、地形、地貌、土壤养分和光照条件等)的作用,其中光照条件是影响林下植物物种组成和生长的主要因素之一^[16,17]。在本研究中,间伐 8 a 后杉木林下灌木层和草本层的物种组成均发生了一定程度的改变,表明本实验所采用的间伐强度能够引起乔木冠层结构发生变化,最终能够导致其林下植被物种组成发生明显变化,特别是强度间伐(74%)处理下,杉木的林冠结构被彻底打破,林下植物大量繁殖和生长,尤其是一些阳生性植物如粗叶悬钩子(*Rubus alceaefolius*)、求米草(*Oplismenlis undulatifolius*)和半边旗(*Pteris semipinnata*)等迅速占据了间伐后剩余的空间,显著改变了间伐后杉木林下植物物种的组成。本研究的冗余分析(RDA)结果较好反映了生境因子与灌木层或草本层物种组成的关系,揭示了土壤的碳氮比和乔木层的胸高断面积是影响杉木林下灌木层物种变异的最主要因子,土壤有机碳和胸高断面积是影响杉木林下草本层物种变异的最主要因子,其中,本研究的乔木胸高断面积变量在一定程度上能够反映林分的冠层结构特征。这与许多前期的研究结果一致^[18,19]。

综上所述,间伐措施不能明显改变杉木林下灌木层的物种丰富度和多样性,但能明显改变灌木层的物种组成,这种效应在中强度间伐和强度间伐的杉木林中表现尤为突出;间伐措施不仅能显著改变杉木林下草本层的物种丰富度和 β 多样性,而且也能明显改变草本层的物种组成,这种作用在强度间伐的杉木林中最强;土壤碳氮比和乔木胸高断面积是影响杉木林下灌木层物种变化的最主要因子,而影响林下草本层物种

组成的最显著因子为土壤有机碳含量和乔木胸高断面面积。间伐,特别是高强度的间伐能够显著改变灌木层的物种组成、草本层的多样性和物种组成,最终可能对杉木人工林的生态过程和林木的生长产生一定影响,但这还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Muller R N. Nutrient relations of the herbaceous layer in deciduous forest ecosystems[M]//Gilliam F(ed.). The Herbaceous Layer in Forests of Eastern North America. New York:Oxford University Press,2003:15-37.
- [2] Whigham D F. Ecology of woodland herbs in temperate deciduous forests[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35(1):583-621.
- [3] Gilliam F S. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems[J]. Bioscience, 2007, 57(10):845-858.
- [4] Wu J, Liu Z, Wang X, et al. Effects of understory removal and tree girdling on soil microbial community composition and litter decomposition in two *Eucalyptus* plantations in South China[J]. Functional Ecology, 2011, 25(4):921-931.
- [5] Widenfalk O, Weslien J. Plant species richness in managed boreal forest - effects of stand succession and thinning[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257:1386-1394.
- [6] Taki H, Inoue T, Tanaka H, et al. Responses of community structure, diversity, and abundance of understory plants and insect assemblages to thinning in plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3):607-613.
- [7] 陈东莉, 郭晋平, 杜宁宁. 间伐强度对华北落叶松林下生物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4):37-38.
- Chen D L, Guo J P, Du N N. Effect of thinning intensity on biodiversity of undergrowth vegetation in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(4):37-38.
- [8] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(5):1-9.
- Ma L Y, Li C Y, Wang X Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5):1-9.
- [9] Nagai M, Yoshida T. Variation in understory structure and plant species diversity influenced by silvicultural treatments among 21-to 26-year-old *Picea glehnii* plantations[J]. Journal of Forest Research, 2006, 11(1):1-10.
- [10] 李瑞霞, 闵建刚, 彭婷婷, 等. 间伐对马尾松人工林植物多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(3):61-68.
- Li R X, Min J G, Peng T T, et al. Effect of thinning on understory species diversities of *Pinus massoniana* forests[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2013, 41(3):61-68.
- [11] Huang X, Liu S, Wang H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with *Eucalyptus urophylla* in subtropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73:42-48.
- [12] Yu M, Sun O J. Effects of forest patch type and site on herb-layer vegetation in a temperate forest ecosystem[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300:14-20.
- [13] 李春义, 马履一, 王希群, 等. 抚育间伐对北京山区侧柏人工林林下植物多样性的短期影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3):60-66.
- Li C Y, Ma L Y, Wang X Q, et al. Short-term effects of tending on the undergrowth diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(3):60-66.
- [14] Small C J, McCarthy B C. Relationship of understory diversity to soil nitrogen, topographic variation, and stand age in an eastern oak forest, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 217(2):229-243.
- [15] 余敏, 周志勇, 康峰峰, 等. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释[J]. 植物生态学报, 2013, 37(5):373-383.
- Yu M, Zhou Z Y, Kang F F, et al. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshegou of Lingkong Mountain, Shanxi, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2013, 37(5):373-583.
- [16] 朱宏光, 熊江波, 尤业明, 等. 不同更新方式巨尾桉林下植物群落变化及其环境解释[J]. 广西科学, 2014, 21(5):1-8.
- Zhu H G, Xiong J B, You Y M, et al. Change of understory plant community in *Eucalytus grandis* × *E. urophylla* plantation and associated environmental explanations[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(5):1-8.
- [17] Tinya F, Márialigeti S, Király I, et al. The effect of light conditions on herbs, bryophytes and seedlings of temperate mixed forests in örség, Western Hungary[J]. Plant Ecology, 2009, 204(1):69-81.
- [18] 刘秋锋, 康慕谊, 刘全儒. 中条山混沟地区森林乔木种

的数量分类与环境解释[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3):383-391.

Liu Q F, Kang M Y, Liu Q R. Quantitative classification and environmental interpretation of forest tree species in Hungou, Zhongtiao Mountain[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3):383-391.

- [19] 冯云, 马克明, 张育新, 等. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的 DCCA 分析[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3):568-573.

Feng Y, Ma K M, Zhang Y X, et al. DCCA analysis of plant species distributions in different strata of oak (*Quercus liaotungensis*) forest along an altitudinal gradient in Dongling Mountain, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3):568-573.

(责任编辑: 陆 雁)

(上接第 592 页 Continue from page 592)

- [16] 莫晓勇, 彭仕尧, 龙腾, 等. 雷州半岛桉树无性系选择及其早期综合评价[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3):293-298.

Mo X Y, Peng S Y, Long T, et al. The variation of main properties of different *Eucalyptus* clones and the synthetic evaluation[J]. Forest Research, 2003, 16(3):293-298.

- [17] 黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 不同造林密度对尾叶桉生长, 产量及材性影响的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(1):81-90.

Huang B L, Lv C Q, Meng Y C, et al. Effects of different planting densities on the growth, output and wood properties of *Eucalyptus urophylla* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1):81-90.

- [18] 申文辉, 李宏伟, 黄锡泽, 等. 广西东门桉树无性系选育研究[J]. 广西林业科学, 2004, 33(3):111-114.

Shen W H, Li H W, Huang X Z, et al. *Eucalyptus* clon-

al breeding at Guangxi Dongmen Forest Farm [J]. Guangxi Forestry Science, 2004, 33(3):111-114.

- [19] 钱国钦. 桉树生态问题及发展思路[J]. 湖南林业科技, 2007, 34(2):67-70.

Qian G Q. Ecological problem and development countermeasure of *Eucalyptus* [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2007, 34(2):67-70.

- [20] 陈李花, 曾炳山, 吕成群, 等. 中国桉树人工林可持续经营的问题与对策[J]. 广东林业科技, 2009, 25(2):78-83.

Chen L H, Zeng B S, Lv C Q, et al. The problems and solutions of *Eucalyptus* plantations' s sustainable management in China[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2009, 25(2):78-83.

(责任编辑: 陆 雁)