



# 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响

张柳桦<sup>1</sup>,齐锦秋<sup>1,2</sup>,柳萍玉<sup>1</sup>,周楷玲<sup>1</sup>,李 雪<sup>1</sup>,李 琦<sup>1</sup>,郝建锋<sup>1,3\*</sup>

(1 四川农业大学 林学院,成都 611130;2 木材工业与家具工程重点实验室,成都 611130;3 水土保持与荒漠化防治重点实验室,成都 611130)

**摘要:**采用典型样地法,以四川新津县普兴镇桉树(*Eucalyptus robusta*)人工林为研究对象,设置5种不同林分密度(A. 625 株·hm<sup>-2</sup>;B. 750 株·hm<sup>-2</sup>;C. 875 株·hm<sup>-2</sup>;D. 1 000 株·hm<sup>-2</sup>;E. 1 125 株·hm<sup>-2</sup>)样地各3个,对不同林分密度人工林群落结构和物种多样进行分析,探讨确定桉树人工林的合理栽植密度,为维持桉树人工林群落结构稳定、增加物种多样性提供依据。结果表明:(1)研究区桉树人工林群落共记录到96种植物,隶属于51科79属;在各个林分密度的群落中,植物科属种数量变化规律均为:草本层>灌木层>乔木层;当密度为1 000 株·hm<sup>-2</sup>时,乔木层物种数最高(6种);当密度为750、875 株·hm<sup>-2</sup>时,灌木层群落物种数最高(17种);在林分密度625 株·hm<sup>-2</sup>下,草本层物种数最高(32种)。(2)桉树人工林群落各层次的丰富度指数D值、Shannon-Wiener指数H值、Simpson指数H'、Pielou均匀度指数J<sub>sw</sub>值均表现为:草本层>灌木层>乔木层;乔木层的D值和H'值在875 株·hm<sup>-2</sup>密度下最大,H值在625 株·hm<sup>-2</sup>密度下最大,J<sub>sw</sub>值在750 株·hm<sup>-2</sup>密度下最大;灌、草层各指数分别均在密度750、625 株·hm<sup>-2</sup>时有最大值。(3)从群落结构上看,5种林分密度的群落径级结构均呈单峰型分布,乔木个体多分布在中径级(7.0≤d<23.0 cm);高度级结构与径级结构对林分密度的响应不一致,密度A、B、C 和 D、E 的个体分别集中在高度级Ⅱ~V (6.0≤h<18.0 m)、Ⅲ~V (9.0≤h<18.0 m)、Ⅱ~Ⅲ (6.0≤h<12.0 m) 和Ⅳ~V (12.0≤h<18.0 m)。(4)各层次优势种不同,乔木层中桉树是绝对优势树种,各密度林分中构树(*Broussonetia papyrifera*)的重要值基本仅次于桉树;灌木层中,桉树幼苗只在密度E出现,构树在各密度下优势地位显著,在密度B~D中,均有八角枫(*Alangium chinense*)和女贞(*Ligustrum lucidum*)存在,并在密度B下八角枫(0.118 4)和女贞(0.183 2)长势较好,具有较大的更新潜力;青蒿(*Artemisia carvifolia*)和荩草(*Arthraxon hispidus*)作为草本层的优势种在5种林分密度下都有生长。研究认为,林分密度750 株·hm<sup>-2</sup>(密度B)是新津桉树人工林的最适林分密度,该密度更有利于该地区桉树人工林群落结构和物种多样性的稳定可持续发展。

**关键词:**桉树人工林;林分密度;群落结构;物种多样性

中图分类号:Q948.12; Q948.15<sup>+</sup> 文献标志码:A

## Effects of Stand Density on Community Structure and Species Diversity of *Eucalyptus robusta* Plantation

ZHANG Liuhsua<sup>1</sup>, QI Jinqiu<sup>1,2</sup>, LIU Pingyu<sup>1</sup>, ZHOU Kailing<sup>1</sup>, LI Xue<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, HAO Jianfeng<sup>1,3\*</sup>

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Wood Industry and Furniture Engineering, Sichuan Provincial Colleges and Universities Key Laboratory, Chengdu 611130, China; 3 Soil and Water Conservation, Desertification Combating of MOE, Sichuan Provincial Colleges and Universities Key Laboratory, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** In order to find a reasonable density to maintain a stable community structure and improve species

收稿日期:2017-11-06;修改稿收到日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金(31370628);四川省教育厅一般项目(自然科学,15ZB0020);四川农业大学双支计划(03571838);四川农业大学科研兴趣培养(ky2016189)

作者简介:张柳桦(1997—),女,本科生,主要从事森林生态学研究。E-mail:357657785@qq.com

\*通信作者:郝建锋,博士,副教授,主要从事森林生态学研究。E-mail:haojf2005@aliyun.com

diversity, we studied the effects of different stand densities on community structure and species diversity of *Eucalyptus robusta* plantation in Puxing Town, Xinjin County, Sichuan Province, using typical sampling method, setting 3 plots in each stand density (A. 625 trees · hm<sup>-2</sup>; B. 750 trees · hm<sup>-2</sup>; C. 875 trees · hm<sup>-2</sup>; D. 1 000 trees · hm<sup>-2</sup>; E. 1 125 trees · hm<sup>-2</sup>). The results showed that: (1) a total of 96 plants were recorded, belonging to 51 families and 79 genera. The number of species in the vegetation of every kind of stand density arranged from greatest to least was: the herb layer, the shrub layer, and the tree layer. When the density was 1 000 trees · hm<sup>-2</sup>, there were 6 species in the tree layer, which was the maximum. And the maximum was 17 species in the shrub layer when the densities were 750 and 875 trees · hm<sup>-2</sup>, there were 32 species in the herb layer under the stand density 625 trees · hm<sup>-2</sup>. (2) In general, the species richness index *D*, Shannnon-Wiener index *H*, Simpson index *H'* and Pielou uniformity index *J<sub>sw</sub>* of the *E. robusta* plantation community in all kinds of stand densities were all expressed as: herb layer>shrub layer>tree layer. The maximum of the *D* and *H'*, *H*, *J<sub>sw</sub>* value of the tree layer was respectively from the density C, A, B; each index of the shrub and herb layer had the maximums respectively at the density 750 and 625 trees · hm<sup>-2</sup>. (3) Seen from the community structure, the diameter class of the five kinds of stand densities showed a single peak type distribution, and the trees were mostly distributed in the middle diameter classes( $7.0 \leq d < 23.0$  cm); the height class was different from the diameter class, the trees in the density of A, B, C and D, E were concentrated respectively in the height classes II to V ( $6.0 \leq h < 18.0$  m), III to V ( $9.0 \leq h < 18.0$  m), II to III ( $6.0 \leq h < 12.0$  m), IV to V ( $12.0 \leq h < 18.0$  m). (4) The dominant tree species varied among different layers. It was *E. robusta* in the tree layer, and the important value of *Broussonetia papyrifera* in each density was second only to *E. robusta* in general. In the shrub layer, *E. robusta* seedlings only appeared in density E, and the dominant position of *B. papyrifera* in each density was significant. In density B—D, both *Alangium chinense* and *Ligustrum lucidum* existed, in which they grew well with the important value of 0.118 4 and 0.183 2 under density B, having great potential for renewal. As the dominant species of herb layer, *Artemisia carvifolia* and *Arthraxon hispidus* both grew under the five kinds of stand densities. The results showed that the stand density 750 trees · hm<sup>-2</sup> was the optimum for the *E. robusta* plantation, which was more conducive to the stable and sustainable development of community structure and species diversity of *E. robusta* plantation in this area.

**Key words:** *Eucalyptus robusta* plantation; stand density; community structure; species diversity

群落结构主要表现在种类组成、群落外貌、垂直结构和水平结构等方面,物种多样性是衡量一定区域内生物资源丰富程度的一个客观指标。群落结构与物种多样性研究在植被恢复和物种多样性保护方面有着重要意义,目前已成为生态学研究的热点<sup>[1]</sup>。林分密度是指林木生长过程中单位面积上的立木株数<sup>[2]</sup>。Daniel 等<sup>[3]</sup>认为,林分密度是仅次于立地质量评价立地生产力的第二个重要因子,是林业工作者能用来干预林分生长发育最易掌控的主要因子。改善人工林群落结构的途径之一是调控林分密度,它影响人工林枯落物层厚度与积蓄量<sup>[4]</sup>及群落光、热、水分等生态因子的分配,使林下物种多样性及结构发生变化<sup>[5]</sup>。目前,林分密度的调控是人工林培育的重要措施,是实现人工纯林向天然林恢复的有效手段之一<sup>[5-7]</sup>。

现中国人工林面积仍居世界首位<sup>[8]</sup>,人工林虽有极大的经济和生态效益,但在其建设中,由于忽视其生态价值,人工林的发展面临地力退化、水土流

失、病虫害频发、生物多样性降低等诸多生态环境问题的挑战<sup>[9]</sup>。随着社会、科技的发展和林业经济增长方式的转变,如何让人工林的经营走上可持续发展道路是广大林业工作者亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。研究表明,较高的物种多样性能增加人工林的稳定性,促进生态系统功能的发挥<sup>[10-12]</sup>。

桉树(*Eucalyptus robusta*)属桃金娘科(Myrtaceae)桉属(*Eucalyptus*),多数为高大乔木,原产澳大利亚,因其具有速生、高产、轮伐期短、经济效益显著等特点,所以被中国广泛引种栽植,已成为中国南方速生丰产林的战略性树种<sup>[13-14]</sup>。现桉树在医学、建筑、造纸、燃料等多个方面占有重要地位,受到众多森林经营者的青睐。大面积的种植虽能带来明显的经济效益,但同时也带来诸多生态问题<sup>[13]</sup>。桉树人工林大多是结构单一的同龄纯林,生态稳定性较差,主要表现在对气候和自然变化的适应性和抗逆性差<sup>[13]</sup>。对于桉树人工林内生物多样性下降的问题,国内外有不少研究,有学者认为是由桉树本身造

成的<sup>[15-16]</sup>,也有学者认为其本身不会造成生物多样性的下降,相反还能改善当地贫瘠的土壤生境,任何树种在不当的经营措施下都会造成生物多样性的下降,其最大的影响因素还是人为因素<sup>[13, 17]</sup>。桉树人工林的地力衰退问题主要表现为:土壤养分含量下降,土壤物理性质变差,土壤板结,结构退化,林下植被稀少<sup>[13]</sup>。而实际大部分生态问题均与桉树人工林的经营管理有关,因此,本试验以四川新津县普兴镇桉树人工林为例,探究不同林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响,通过数据分析来找到最适宜桉树及林下植被生长的林分密度,为当地桉树人工林栽种和经营提供理论参考,使其更好地发挥生态和经济价值,促进桉树人工林群落生态可持续发展。

## 1 研究区和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川新津县境内东部普兴镇( $30^{\circ}25'17''\sim30^{\circ}26'4''N, 103^{\circ}53'21''\sim103^{\circ}54'25''E$ ),地处牧马山浅丘中段,距离新津县城10 km,全县森林面积4 974.7 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率26%;属亚热带湿润季风气候区,气候温暖湿润,雨量充沛,四季分明,年平均气温16.4 ℃,年平均降水量987 mm,无霜期年平均为297 d。土壤肥沃,多为黄壤,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,年平均相对湿度为84%。

由于人为活动频繁和20世纪50年代的“大砍大伐”致使新津县原始植被彻底破坏,在21世纪初,县林业局进行生态建设,为响应退耕还林政策,普兴镇在结合当地实际以及借鉴其他市区实践经验,综合考虑树种经济效益的情况下,选择大面积营造桉树人工林。起始栽植密度大约为1 500株·hm<sup>-2</sup>,由当地林业站组织人员进行管护,到桉树采伐年龄时对纯林进行间伐,多以木材形式出售和作为薪材。后因林业站管护力度下降和桉树人工林经济效益暂不如民意,其经营管理渐被忽视,人为干扰逐步加大,其密度也出现了不同程度的变化,大致分化出625、750、875、1 000、1 125株·hm<sup>-2</sup>的林分密度。现普兴镇的森林多为原始植被破坏后形成的次生林和人工营造的人工林分,主要乔木树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、柏木(*Cupressus funebris*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、桉树等,桉树人工林中伴少量构树(*Broussonetia papyrifera*)、悬铃木(*Platanus orientalis*)、刺楸(*Kalopanax septemlobus*)等,物种组成较单一。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 研究地选择与设置** 依据方精云、薛建辉等<sup>[18-19]</sup>的样地设置方法,在新津县普兴镇的调查研究范围内,在全面踏查的基础上,采用典型抽样的方法,选取立地条件基本相似、林相整齐、林层丰富、具有代表性的A(625株·hm<sup>-2</sup>)、B(750株·hm<sup>-2</sup>)、C(875株·hm<sup>-2</sup>)、D(1 000株·hm<sup>-2</sup>)、E(1 125株·hm<sup>-2</sup>)5个密度类型,每个类型3个样地,共计15个,每个样地面积为20 m×20 m,总计6 000 m<sup>2</sup>。采用相邻格子法,在每个样地内设置乔木样方4个,每个面积10 m×10 m;采用对角线法在每个样地设置灌木样方6个,每个面积5 m×5 m;草本样方12个,每个面积1 m×1 m。共计乔木样方60个,灌木样方90个,草本样方180个,调查样方共计330个。各样地基本情况见表1。

测定和统计的内容有:(1)乔木层:测定高度 $\geqslant 3$  m的所有植株,记录树种类、胸径、树高、冠幅、株数;(2)灌木层:测定所有高度 $<3$  m的木本个体,包括乔木幼苗和幼树,记录植物种名、高度、冠幅、株数;(3)草本层:统计包括草质藤本和蕨类植物,但大型木质藤本按胸径大小分别计入乔木层、灌木层,记录其种类、高度、盖度和株数(丛数)。

**1.2.2 群落结构划分** 依据孟祥楠等<sup>[20]</sup>对乔木树种胸径和高度的划分方法,统计桉树人工林5种不同密度群落内高度不小于3 m乔木个体的径级和高度级并绘制图1。乔木个体的胸径分为8个径级,每4 cm为一个径级,分别为径级I: $d < 3.0$  cm;II: $3.0 \text{ cm} \leqslant d < 7.0$  cm;III: $7.0 \text{ cm} \leqslant d < 11.0$  cm;IV: $11.0 \text{ cm} \leqslant d < 15.0$  cm;V: $15.0 \text{ cm} \leqslant d < 19.0$  cm;VI: $19.0 \text{ cm} \leqslant d < 23.0$  cm;VII: $23.0 \text{ cm} \leqslant d < 27.0$  cm;VIII: $d \geqslant 27.0$  cm。将乔木个体的高度分为8个高度级,每3 m为一个高度级,分别为高度级I: $3.0 \text{ m} \leqslant h < 6.0$  m;II: $6.0 \text{ m} \leqslant h < 9.0$  m;III: $9.0 \text{ m} \leqslant h < 12.0$  m;IV: $12.0 \text{ m} \leqslant h < 15.0$  m;V: $15.0 \text{ m} \leqslant h < 18.0$  m;VI: $18.0 \text{ m} \leqslant h < 21.0$  m;VII: $21.0 \text{ m} \leqslant h < 24.0$  m;VIII: $h \geqslant 24.0$  m。

**1.2.3 数据处理** 根据样地资料和调查的内容,计算各物种的重要值(important value, IV)、相对密度、相对频度、相对显著度(相对盖度)。本文用物种丰富度指数D值、Shannon-wiener多样性指数H值、Simpson优势度指数H'值和Pielou均匀度指数J<sub>sw</sub>值来综合评价桉树人工林群落的物种多样性。

重要值:

乔木层:IV=(相对密度+相对频度+相对显著

表 1 新津桉树人工林研究样地概况

Table 1 Geophysical characteristics of the investigating plots in *E. robusta* plantation in Xinjin

样地编号 Plot number	海拔 Altitude /m	坡度 Slope	地理位置 Geographical position	郁闭度 Canopy density	密度 Density / (trees · hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 Average diameter/cm	平均树高 Average height/m	密度划分 Density class
1	502	0°	103°54'11.90"E, 30°25'33.31"N	0.8	1 000	15.6	10.2	D
2	504	0°	103°54'12.55"E, 30°25'34.08"N	0.7	1 000	17.0	9.5	D
3	502	0°	103°54'11.39"E, 30°25'32.23"N	0.8	1 000	12.9	7.6	D
4	501	1°	103°54'11.30"E, 30°25'31.04"N	0.7	875	14.8	9.5	C
5	502	1°	103°54'11.66"E, 30°25'29.54"N	0.7	875	14.3	10.6	C
6	503	2°	103°54'11.88"E, 30°25'28.49"N	0.8	875	14.5	9.5	C
7	510	2°	103°54'4.48"E, 30°25'47.31"N	0.6	750	13.3	10.9	B
8	515	2°	103°54'2.59"E, 30°25'47.33"N	0.7	750	13.6	12.3	B
9	513	2°	103°54'2.59"E, 30°25'47.33"N	0.7	750	13.7	11.9	B
10	493	0°	103°53'51.12"E, 30°25'40.27"N	0.6	625	16.4	11.2	A
11	493	0°	103°53'48.83"E, 30°25'41.83"N	0.7	625	15.1	11.3	A
12	497	4°	103°53'47.35"E, 30°25'43.58"N	0.6	625	18.0	11.8	A
13	507	1°	103°54'15.20"E, 30°25'25.81"N	0.8	1 125	15.7	14.0	E
14	507	1°	103°54'15.45"E, 30°25'24.88"N	0.8	1 125	14.7	12.8	E
15	506	2°	103°54'15.38"E, 30°25'23.91"N	0.9	1 125	16.3	11.0	E

度)/3×100%

灌木层、草本层:IV=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3×100%

物种丰富度:D=S

Simpson 指数(优势度指数): $H' = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$ Shannon-Wiener 多样性指数: $H = -\sum_{i=a}^s P_i \log P_i$ Pielou 均匀度指数: $J_{sw} = \frac{-\sum P_i \log P_i}{\log S}$ 

上述各式中,  $P_i$  为第  $i$  种的个体数  $n_i$  占所有种个体总数  $n$  的比例, 即  $P_i = n_i/n; i=1, 2, 3, \dots, s$ ,  $S$  为物种数。文中所有数据采用 SPSS17.0 统计软件、Origin8.0 和 Excel 进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验群落高度级和径级以及各层次多样性指数的显著性差异( $\alpha=0.05$ )。

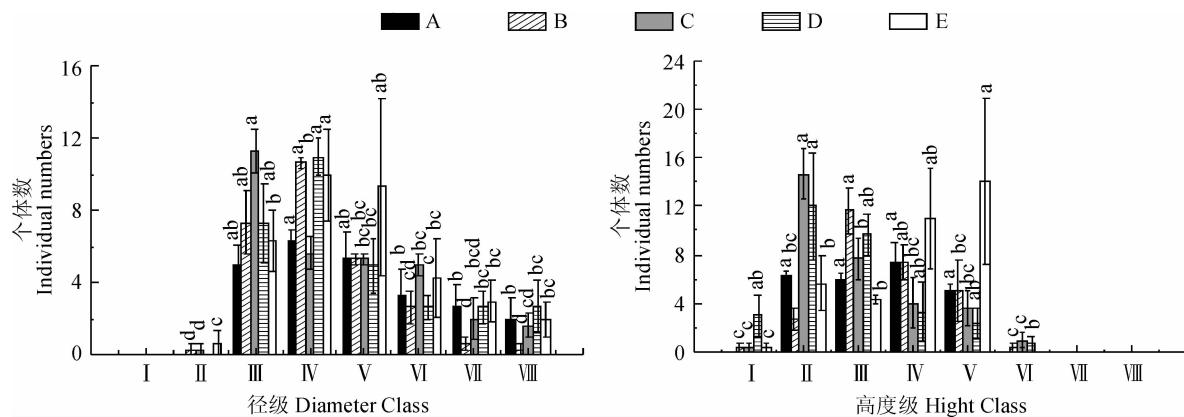
## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分密度对径级、高度级的影响

**2.1.1 群落径级结构** 植物群落的径级结构是植物生长与环境关系的综合反映, 是评价植物群落稳

定性、生长发育状况、预测林分结构发展的重要指标。从图 1 可以看出, 5 种林分密度的群落径级结构均呈现单峰型分布, 密度 A、B、D、E 均在径级 IV ( $11.0 \text{ cm} \leq d < 15.0 \text{ cm}$ ) 出现峰值, 分别为 19、32、33 和 30 株, C 密度在径级 III ( $7.0 \text{ cm} \leq d < 11.0 \text{ cm}$ ) 便出现峰值(34 株), 各密度桉树人工林群落在径级 I 均无植株个体。个体数在各径级分布差异较大, 群落结构不稳定, 但 A 密度径级分布相对较均匀。

**2.1.2 群落高度级结构** 植物群落高度级结构不仅能反映群落垂直结构的物种组成性状, 还能体现出垂直空间层次上的物种多样性和动态性, 定量分析和评价植物群落高度级结构有助于掌握群落结构的复杂性、发展阶段和稳定程度。图 1 显示, 不同林分密度对桉树人工林群落乔木层高度级影响差异明显。高度级结构对林分密度的响应与径级结构对林分密度的响应结果不一致。高度级结构的个体只出现在前 6 个高度级中, 集中在高度级 II ~ V ( $6.0 \text{ m} \leq h < 18.0 \text{ m}$ )。同一高度级中不同密度下个体数差异较大。A、E 2 种密度的高度级分布并非呈简单的单峰型分布, A 密度在高度级 II ( $6.0 \text{ m} \leq h < 9.0 \text{ m}$ ) 和 IV ( $12.0 \text{ m} \leq h < 15.0 \text{ m}$ ) 分别出现峰值 19 株



A. 625 株·hm<sup>-2</sup>; B. 750 株·hm<sup>-2</sup>; C. 875 株·hm<sup>-2</sup>; D. 1 000 株·hm<sup>-2</sup>; E. 1 125 株·hm<sup>-2</sup>; 径级 I ~ VIII [ I . d<3.0 cm; II . 3.0 cm≤d<7.0 cm; III . 7.0 cm≤d<11.0 cm; IV . 11.0 cm≤d<15.0 cm; V . 15.0 cm≤d<19.0 cm; VI . 19.0 cm≤d<23.0 cm; VII . 23.0 cm≤d<27.0 cm; VIII . d≥27.0 cm]; 高度级 I ~ VII [ I . 3.0 m≤h<6.0 m; II . 6.0 m≤h<9.0 m; III . 9.0 m≤h<12.0 m; IV . 12.0 m≤h<15.0 m; V . 15.0 m≤h<18.0 m; VI . 18.0 m≤h<21.0 m; VII . 21.0 m≤h<24.0 m; VIII . h≥24.0 m]; 不同小写字母表示不同径级间、不同高度级别的差异显著( $P<0.05$ )；下同。

图 1 不同林分密度桉树人工林群落乔木层径级和高度级结构

A. 625 trees·hm<sup>-2</sup>; B. 750 trees·hm<sup>-2</sup>; C. 875 trees·hm<sup>-2</sup>; D. 1 000 trees·hm<sup>-2</sup>; E. 1 125 trees·hm<sup>-2</sup>; Diameter class I ~ VIII [ I . d<3.0 cm; II . 3.0 cm≤d<7.0 cm; III . 7.0 cm≤d<11.0 cm; IV . 11.0 cm≤d<15.0 cm; V . 15.0 cm≤d<19.0 cm; VI . 19.0 cm≤d<23.0 cm; VII . 23.0 cm≤d<27.0 cm; VIII . d≥27.0 cm]; Height class I ~ VII [ I . 3.0 m≤h<6.0 m; II . 6.0 m≤h<9.0 m; III . 9.0 m≤h<12.0 m; IV . 12.0 m≤h<15.0 m; V . 15.0 m≤h<18.0 m; VI . 18.0 m≤h<21.0 m; VII . 21.0 m≤h<24.0 m; VIII . h≥24.0 m]; Different lowercases indicate significant differences among different diameter class and height class( $P<0.05$ ). The same as below.

Fig. 1 The diameter and height class in tree layer of *E. robusta* plantation under different densities

和 22 株, E 密度在高度级 II 和 V ( $15.0 \text{ m} \leq h < 18.0 \text{ m}$ ) 分别出现峰值 17 株和 42 株; 密度 C 和 D 分别在高度级 II 出现峰值 44 株和 36 株; 密度 B 在高度级 III ( $9.0 \text{ m} \leq h < 12.0 \text{ m}$ ) 达到峰值 35 株。其中 A 密度的个体集中在高度级 II ~ V, 且分布均匀。

## 2.2 不同林分密度下群落物种组成

在调查的总面积为 6 000 m<sup>2</sup> 的 15 个样地内, 分别统计 5 个林分密度类型的桉树人工林群落的物种组成情况(图 2)。共记录到 96 种植物物种, 隶属于 51 科 79 属。其中, 从林分密度 A~E, 乔木层植物的分布情况分别为: 4 科 4 属 4 种、2 科 2 属 2 种、5 科 5 属 5 种、6 科 6 属 6 种、5 科 5 属 5 种, 在密度 B 乔木种类最少; 灌木层植物分布情况分别为: 15 科 16 属 16 种、13 科 15 属 17 种、12 科 15 属 17 种、10 科 11 属 11 种、9 科 10 属 11 种; 草本层分别是: 20 科 29 属 31 种、16 科 22 属 27 种、15 科 21 属 23 种、15 科 18 属 19 种、12 科 14 属 15 种。

在各个林分密度桉树人工林群落中, 植被科属种数量变化规律均是: 草本层>灌木层>乔木层; 林下植被灌木层和草本层对密度响应各异, 灌木层物种数随着密度增大先增多后减少, 物种数在前 3 种密度下基本一致, 草本层物种随着林分密度减小而

越来越丰富。虽然在密度 B 中乔木的树种数最少, 但从林下乔灌层来看, 密度 B 能维持一个较稳定的物种组成结构, 使灌木层物种数达到最多的同时, 使草本层物种数目也相对较多(27 种), 仅次于密度 A 下的物种数(31 种)。因此, 认为密度 B 能使乔灌草 3 个层次的物种数相对平衡。

## 2.3 不同林分密度下桉树人工林各群落层次物种的重要值

重要值是反映某个物种在森林群落中作用和地位的综合数量指标, 通过重要值可以找出群落中的主要优势树种。本研究中不同林分密度下桉树人工林群落各层次的物种组成和优势种不同(表 2)。乔木层中, 桉树在 A~E 林分密度中的重要值分别为 0.812 0、0.679 8、0.647 6、0.740 0 和 0.827 6, 是绝对优势树种; 不同密度中的伴生树种有所差异, 且密度大的群落中树种更为丰富。灌木层中, 构树在 5 个林分密度下优势地位显著, 其中, 密度 B 中构树的重要值最小, 此密度下女贞(*Ligustrum lucidum*, 0.183 2)和八角枫(*Alangium chinense*, 0.118 4)长势较好; 桉树仅在最高林分密度(E)下的灌木层中出现; 在 A~D 的林分中都出现了八角枫, 只有高密度 E 中没有; 除密度 A 外, 其他 4 种密度下灌木层

中都有女贞,女贞在林下具有较大的更新潜力。不同林分密度下草本层的重要值特征不同,青蒿(*Artemisia carvi folia*)和荩草(*Arthraxon hispidus*)作

为优势种在5种林分密度下都有生长。

## 2.4 不同林分密度对群落物种多样性的影响

对不同密度群落乔木层、灌木层和草本层物种

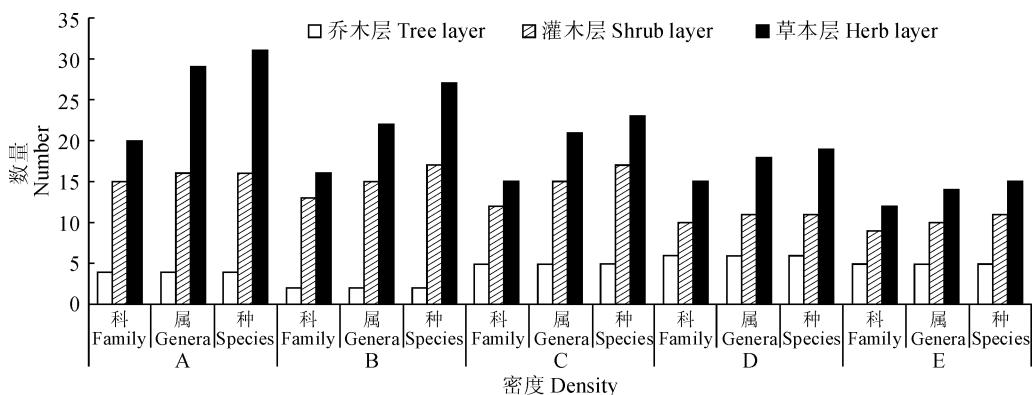


图2 不同林分密度桉树人工林群落物种组成

Fig. 2 The species composition of *E. robusta* plantation under different densities

表2 不同林分密度桉树人工林群落层次物种重要值

Table 2 The important value for layers of *E. robusta* plantation under different densities

层次 Layer	密度 Density	物种及其重要值之和 The sum of important value
乔木层 Tree layer	A	桉树(0.812 0)+构树(0.143 8)+刺楸(0.022 1)+枣树(0.022 1) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Kalopanax septemlobus</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>inermis</i> (1.000 0)
	B	桉树(0.679 8)+构树(0.320 2) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> (1.000 0)
	C	桉树(0.647 6)+构树(0.171 9)+悬铃木(0.126 0)+杨树(0.035 8)+刺楸(0.018 8) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Platanus orientalis</i> + <i>Populus simonii</i> var. <i>przewalskii</i> + <i>Kalopanax septemlobus</i> (1.000 0)
	D	桉树(0.740 0)+悬铃木(0.166 4)+枣树(0.026 1)+构树(0.025 2)+杨树(0.021 5) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Platanus orientalis</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>inermis</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Populus simonii</i> var. <i>przewalskii</i> (0.979 2)
	E	桉树(0.827 6)+悬铃木(0.065 4)+构树(0.061 4)+杨树(0.022 8)+枣树(0.022 8) <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Platanus orientalis</i> + <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Populus simonii</i> var. <i>przewalskii</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>inermis</i> (1.000 0)
灌木层 Shrub layer	A	构树(0.722 2)+八角枫(0.043 2)+柑橘(0.024 2)+柚子(0.019 6)+山麻黄(0.018 2) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Alangium chinense</i> + <i>Citrus reticulata</i> + <i>Citrus maxima</i> + <i>Ephedra equisetina</i> (0.827 4)
	B	构树(0.380 4)+女贞(0.183 2)+八角枫(0.118 4)+君迁子(0.053 2)+苦木(0.050 0) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Alangium chinense</i> + <i>Diospyros lotus</i> + <i>Picrasma quassoides</i> (0.785 2)
	C	构树(0.501 6)+臭牡丹(0.263 4)+八角枫(0.057 5)+女贞(0.031 5)+七里香(0.022 4) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Clerodendrum bungei</i> + <i>Alangium chinense</i> + <i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Rosa banksiae</i> (0.876 4)
	D	构树(0.622 2)+臭牡丹(0.186 6)+女贞(0.050 1)+八角枫(0.028 7)+野蔷薇(0.025 4) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Clerodendrum bungei</i> + <i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Alangium chinense</i> + <i>Rosa multiflora</i> (0.913 0)
	E	构树(0.635 9)+桉树(0.117 3)+插田泡(0.092 2)+含笑(0.037 9)+悬铃木(0.031 7) <i>Broussonetia papyrifera</i> + <i>Eucalyptus robusta</i> + <i>Rubus coreanus</i> + <i>Michelia figo</i> + <i>Platanus orientalis</i> (0.915 0)
草本层 Herb layer	A	青蒿(0.144 2)+荩草(0.093 8)+酸模(0.088 1)+葎草(0.078 4)+狗尾草(0.077 0) <i>Artemisia carvi folia</i> + <i>Arthraxon hispidus</i> + <i>Rumex acetosa</i> + <i>Humulus scandens</i> + <i>Setaria viridis</i> (0.481 5)
	B	荩草(0.263 1)+青蒿(0.202 5)+狗尾草(0.114 8)+贯众(0.075 1)+灯心草(0.069 2) <i>Arthraxon hispidus</i> + <i>Artemisia carvi folia</i> + <i>Setaria viridis</i> + <i>Cyrtomium fortunei</i> + <i>Juncus effusus</i> (0.724 7)
	C	荩草(0.419 1)+青蒿(0.124 5)+葎草(0.086 1)+接骨草(0.061 1)+土牛膝(0.056 0) <i>Arthraxon hispidus</i> + <i>Artemisia carvi folia</i> + <i>Humulus scandens</i> + <i>Sambucus javanica</i> + <i>Achyranthes aspera</i> (0.746 8)
	D	葎草(0.236 7)+荩草(0.209 2)+青蒿(0.163 2)+臭牡丹(0.081 3)+千里光(0.051 3) <i>Humulus scandens</i> + <i>Arthraxon hispidus</i> + <i>Artemisia carvi folia</i> + <i>Clerodendrum bungei</i> + <i>Senecio scandens</i> (0.741 7)
	E	荩草(0.326 6)+青蒿(0.236 8)+莲子草(0.166 6)+葎草(0.056 4)+蕨(0.021 6) <i>Arthraxon hispidus</i> + <i>Artemisia carvi folia</i> + <i>Alternanthera sessilis</i> + <i>Humulus scandens</i> + <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn var. <i>latiusculum</i> (Desv.) Underw. ex Heller(0.808 0)

表3 不同林分密度桉树人工林群落各层次物种多样性指数  
Table 3 Species diversity index of *E. robusta* plantation under different densities

层次 Layer	密度 Density	物种丰富度指数 $D$	Shannon-Wiener 指数 $H$	Simpson 优势度指数 $H'$	物种均匀度指数 $J_{sw}$
乔木层 Tree layer	A	2.666 7±0.333 3a	0.448 0±0.028 1a	0.238 5±0.149 4a	0.480 6±0.058 7b
	B	2.000 0±0.000 0a	0.256 1±0.025 1a	0.402 6±0.052 6a	0.850 9±0.083 5a
	C	3.666 7±0.333 3a	0.348 2±0.036 9a	0.447 7±0.054 4a	0.620 5±0.038 7ab
	D	3.333 3±1.333 3a	0.218 8±0.092 4a	0.241 9±0.088 9a	0.465 0±0.132 2b
	E	3.333 3±0.881 9a	0.278 1±0.083 2a	0.224 4±0.665 5a	0.402 9±0.037 1b
灌木层 Shrub layer	A	8.666 7±1.333 3ab	0.517 8±0.098 1a	1.456 3±0.061 3ab	0.691 6±0.060 3a
	B	11.333 3±1.453 0a	0.782 2±0.034 5a	1.868 0±0.151 4a	0.772 4±0.023 1a
	C	8.000 0±0.577 4ab	0.573 2±0.081 8a	1.149 2±0.030 8bc	0.555 2±0.021 3a
	D	6.333 3±0.333 3b	0.541 8±0.025 4a	1.093 8±0.052 4bc	0.595 1±0.039 0a
	E	5.666 7±0.333 3b	0.577 5±0.066 0a	0.971 6±0.108 4c	0.566 3±0.080 7a
草本层 Herb layer	A	24.666 7±2.333 3a	0.903 3±0.010 2a	2.671 2±0.094 3a	0.903 3±0.010 2a
	B	16.000 0±2.081 7ab	0.857 8±0.004 6a	2.246 1±0.064 5ab	0.857 8±0.004 6a
	C	16.666 7±3.527 7ab	0.813 6±0.036 4a	2.108 0±0.218 1ab	0.813 6±0.036 4a
	D	15.333 3±0.333 3ab	0.854 8±0.019 5a	2.197 4±0.093 5ab	0.854 8±0.019 5a
	E	11.666 7±0.666 7b	0.818 1±0.028 1a	1.983 9±0.140 4b	0.818 1±0.028 1a

多样性的分析表明(表3),不同密度各群落乔、灌、草各层次间的物种多样性不存在显著性差异( $P>0.05$ )。总体上,桉树人工林群落各层次的丰富度指数  $D$  值、Shannnon-Wiener 指数  $H$  值、Simpson 指数  $H'$ 、Pielou 均匀度指数  $J_{sw}$  值均表现为:草本层>灌木层>乔木层。各个密度中,乔木层丰富度指数  $D$  值在密度 B 最低;Shannnon-Wiener 指数  $H$  值在 D 密度最低,在最小密度 A 有最大值,与  $D$  值变化不一致;Simpson 指数  $H'$  在密度 C 中有最大值;Pielou 均匀度指数  $J_{sw}$  值在密度 B 最大。灌木层各个指数随密度变化的响应与乔木层不一致,随着林分密度的增加,4 个指数均呈现先增大后减小的规律,在密度 B 时达到最大值。在草本层中,4 个指数均在密度 A 达最大,  $D$  值在密度 B~E 间先增大再减小,其他 3 个指数在不同密度下相差不大,未显现一特定规律。

### 3 讨 论

#### 3.1 林分密度对桉树人工林群落结构的影响

群落组成和结构是研究生态系统过程和功能的基础,可反映群落垂直空间层次上的多样性<sup>[21]</sup>。在本研究中,不同林分密度对桉树人工林的群落结构影响不同。5 种林分密度的群落径级和高度级结构

的乔木个体数峰值出现在中径级和中高度级范围内,其中密度 B 最明显。A 密度的个体在径级和高度级中分布相对均匀,可能是因为林分密度小,群落内部空间资源充足和水热条件好,使得树木生长发育较整齐。密度越大,群落结构的乔木个体数量分布规律差异越大,密度 B 的径级和高度级结构最接近山峰型,不同大小个体数在群落中分布趋于合理,群落结构相对较稳定。而密度大于 B 的群落结构分布呈偏峰型。这反映了较低密度林分的个体对空间资源竞争相对缓和,有利于林分生长和更新,这与郝建锋等<sup>[8, 21]</sup>、刘相兵等<sup>[22]</sup>、Nguyen 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。

#### 3.2 林分密度对桉树人工林物种组成的影响

不同林分密度的物种组成不同。在各个林分密度桉树人工林群落中,植被科属种数量变化规律均是:草本层>灌木层>乔木层,灌木层与草本层为该人工林群落的物种丰富度做了很大贡献,与郝建锋等<sup>[8]</sup>对喜树人工林的研究结果一致。康冰等<sup>[10]</sup>认为,林下植物的生长发育及拓殖主要由林分内光照及水分条件所决定,当林分密度增大时,林分内光照及水分条件发生变化,从而影响了林下植被的种类及组成。灌木层在 D、E 两密度时的物种数较前 3 种密度的种数急剧下降,说明 D、E 两密度对于林下

灌木来说密度过大,有限的环境资源已不能满足较多灌木的存活条件,适生灌木树种减少。草本层物种数随着密度的增大逐渐减少,但下降趋势缓和,可能是因为草本植物生活在乔木林下,加上还有灌木层的遮蔽,因此对环境的要求不如灌木严格,对乔木层密度的响应也较灌木层迟钝。从林下灌草层来看,密度B能维持一个较稳定的物种组成结构,使灌木层物种数达到最多的同时,使草本层物种数目也相对较多(27种),仅次于密度A下的物种数。因此,认为密度B是合适的林分密度,能同时使乔灌草3个层次的物种数相对平衡。

### 3.3 林分密度对桉树人工林物种多样性的影响

桉树人工林群落各层次的丰富度指数D值、Shannnon-Wiener指数H值、Simpson指数H'、Pielou均匀度指数 $J_{sw}$ 值均为:草本层>灌木层>乔木层。灌木层各指数在密度B时达最大值,与密度A的各指数较接近,而在密度C~E时急剧下降。草本层的4个指数均在密度A即达最大,其原因可能是在密度低时,林分郁闭度低,射入到林下草本层的光照相对丰富,为一些喜光喜温的草本植物提供了一个适宜的生境;D值在密度B~E间先增大再减小,其他3个指数随密度增大并未呈现明显的变化规律,且各个指数在5种密度间的差异不如灌木层明显。原因是灌木层直接处于乔木之下,对于林分密度变化引起的微小生境差异都有敏感的反应,因此灌木层在不同密度下物种多样性变化较大;而草本层处于乔灌两个层次之下,由于灌木层的阻隔,冠层结构变化对草本所处的微生境影响不显著,虽然随着乔木层遮蔽程度的改变,灌木层的冠幅也在随之变化,但这种变化对于乔木层给草本层产生影响的削弱也是微乎其微的,造成草本层各指数在不同密度下的差异不明显。人工林群落中最具更新活力的是灌木层,因此该桉树人工林群落林下的物种多样性水平主要取决于灌木层的多样性水平,而本研究中灌木层在密度B时有最佳生长状态,物种多样性相对较高,说明该密度恰好能为林下灌木层提供良好生长空间,有利于物种丰富度、物种多样性水平、物种均匀分布程度的提高,从而使群落维持最大的更新潜力,认为密度B为最适林分密度。

### 3.4 桉树人工林群落可持续发展的思考

从该地桉树人工林群落各层次物种重要值来看,乔木层绝对优势树种是桉树,但各个密度林分中构树的重要值基本仅次于桉树,且构树也是灌木层在每个林分密度中的绝对优势树种,灌木层的桉树幼苗只在密度E出现,除此,每个密度下基本都出现了八角枫、女贞,说明桉树在林下基本不具更新潜力,构树、八角枫和女贞则是经过物种间激烈竞争保留下来的适应能力强的树种。因此笔者认为在对桉树人工林林分调整后应对构树、八角枫等乡土树种加以保护,促进与桉树的林分混交比例,形成复层混交异龄林。王志超等<sup>[13]</sup>研究认为在桉树人工林经营中,应实行多树种、多无性系造林,营造块状混交林、混农林业,这样可以提高林分的生态稳定性。实践也证明,混交林是提高人工林可持续经营的重要手段之一<sup>[13, 24]</sup>。另外,林下植被是人工林生态系统的重要组成部分<sup>[25-26]</sup>,在促进人工林养分循环和维护林地土壤质量中起着不可忽视的作用<sup>[25]</sup>,对维护生态系统物种多样性也十分重要<sup>[27]</sup>。秦新生等<sup>[28]</sup>指出在影响物种多样性的众多因素中林分密度最显著。林分密度与林下植被多样性的关系对充分发挥森林的经济效益和生态效益有重要意义<sup>[27]</sup>,林下植被应是人工林经营者不可忽略的对象。在本研究中,草本层中青蒿和荩草作为优势种在5种林分密度下都有生长,说明它们适应范围广,繁殖能力强,因此这2种草本植物可作为林下草本植被的主要对象。

随着社会生产对纤维材需求量的日益增长,桉树因其优良特性更显露出它的特殊地位和作用。发展桉树人工林不仅是中国国民经济建设的需要,也是中国建设生态林业、发展区域优势、农民脱贫致富的需要<sup>[29]</sup>,可以有效缓解对天然林砍伐的压力<sup>[13]</sup>。人工林虽然有着生长速度快、便于经营等优点,但作为森林的组成部分,人工林同样负有生态功能和社会功能<sup>[24]</sup>,因此对于人工林,我们应响应林业可持续发展号召,杜绝“重造轻管”现象,特别是桉树这类速生丰产林,建立起通过改良桉树人工林栽培、育种、森林经理等措施,可持续的遗传育种策略和桉树人工林可持续经营的技术体系,充分发挥桉树人工林的生态、经济和社会效益,实现桉树人工林的生态经营<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

[1] 孙玉军,马 炜,刘艳红.与物种多样性有关的长白落叶松人

工林生物量[J].生态学报,2015,35(10):3 329-3 338.

SUN Y J, MA W, LIU Y H. Biomass of *Larix olgensis plan-*

- tations based on species diversity analyses in Heilongjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(10):3 329-3 338.
- [2] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 等. 不同林分密度下川北白云山地区喜树人工林的群落结构和物种多样性[J]. 植物研究, 2015, **35**(5):772-778.
- HAO J F, WANG D Y, LI Y, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Camptotheca acuminata* plantation in Baiyun Mountain, Mianzhu District, Sichuan Province[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, **35**(5):772-778.
- [3] 罗素梅, 何进东, 谢益林, 等. 林分密度对尾赤桉人工林群落结构与生态效应的影响研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, **18**(4):357-363.
- LUO S M, HE J D, XIE Y L, et al. Effect of stand density on community structure and ecological effect of *Eucalyptus urophylla E. eamalduensis* plantation[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, **18**(4):357-363.
- [4] 贺宇, 丁国栋, 梁文俊, 等. 林分密度对枯落物层持水特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4):68-72.
- HE Y, DING G D, LINAG W J, et al. Influence of stand density on water-holding characteristics of litter layer [J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.), 2012, **40**(4):68-72.
- [5] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10):2 323-2 331.
- KANG B, LIU S R, CAI D X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(10):2 323-2 331.
- [6] BALDWIN V C, PETERSON K D, CLARK A, et al. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **137**(1/3):91-102.
- [7] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(19):6 154-6 162.
- LUO Y H, SUN D J, LIN J Y, et al. Effect of close-to-nature management on the natural regeneration and species diversity in amasson pine plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19):6 154-6 162.
- [8] 郝建锋, 李艳, 王德艺, 等. 雅安市谢家山两种密度柳杉人工林群落结构和物种多样性研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(2):217-223.
- HAO J F, LI Y, WANG D Y, et al. Researches on structure and species diversity of *Cryptomeria fortunei* plantation under two kinds of densities in Xiejiashan, Ya'an, Sichuan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(2):217-223.
- [9] 张明, 李智勇, 何友均. 人工林与绿色经济[J]. 世界林业研究, 2013, **26**(1):7-11.
- ZHANG M, LI Z Y, HE Y J. Plantation and green economy [J]. *World Forestry Research*, 2013, **26**(1):7-11.
- [10] ARES A, NEILL A R, PUETTMANN K J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, **260**:1 104-1 113.
- [11] ROTAA E, CARUSOB T, BARGAGLI R. Community structure, diversity and spatial organization of enchytraeids in Mediterranean urban holm oak stands[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **62**:83-91.
- [12] 马克平. 生物多样性与生态系统功能的实验研究[J]. 生物多样性, 2013, **21**(3):247-248.
- MA K P. Studies on biodiversity and ecosystem function via manipulation experiments[J]. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(3):247-248.
- [13] 王志超, 杜阿朋, 陈少雄. 我国桉树人工林现状及可持续经营对策研究[J]. 桉树科技, 2012, **29**(4):58-62.
- WANG Z C, DU A P, CHEN S X. Current situation and sustainable management strategy of eucalypt plantations in China[J]. *Eucalypt Science&Technology*, 2012, **29**(4):58-62.
- [14] 杨尚东, 吴俊, 谭宏伟, 等. 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价[J]. 生态学报, 2013, **33**(24):7 788-7 797.
- YANG S D, WU J, TAN H W, et al. Variation of soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantations after controlled burning in the red soil region and its ecological evaluation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24):7 788-7 797.
- [15] 于福科, 黄新会, 王克勤, 等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(2):393-398.
- YU F K, HUANG X H, WANG K Q, et al. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(2):393-398.
- [16] 吴锦容, 彭少麟. 化感——外来植物入侵的“Novel Weapons”[J]. 生态学报, 2005, **25**(11):301-305.
- WU J R, PENG S L. Allelopathy: “Novel Weapons”of exotic invasive plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(11):301-305.

- [17] 陈少雄. 桉树生态问题的来源与对策[J]. 热带林业, 2005, 33(4):26-30.
- CHEN S X. The origin and countermeasure of *Eucalyptus* ecological problem[J]. *Tropical Forestry*, 2005, 33(4):26-30.
- [18] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性[J]. 生物多样性, 2009, 17(6):533-548.
- FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6):533-548.
- [19] 薛建辉. 森林生态学[M]. 北京:中国林业出版社, 2006: 129.
- [20] 孟祥楠, 赵雨森, 郑磊, 等. 嫩江沙地不同年龄樟子松人工林种群结构与林下物种多样性动态[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9):2 332-2 338.
- MENG X N, ZHAO Y S, ZHENG L, et al. Population structure and understory species diversity of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Nenjiang Sandy Land of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9):2 332-2 338.
- [21] 郝建锋, 王德艺, 唐永彬, 等. 人为干扰对江油地区马尾松人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):729-735.
- HAO J F, WANG D Y, TANG Y B, et al. Effects of human disturbance on species diversity of *Pinus massoniana* plantation in Jiangyou district, Sichuan Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5):729-735.
- [22] 刘相兵, 刘亚茜, 李兵兵, 等. 生态疏伐对林分密度及直径结构的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3):145-149.
- LIU X B, LIU Y Q, LI B B, et al. Influences of ecological thinning on the stand density and diameter structure[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(3):145-149.
- [23] NGUYEN H, FIM J, LAMB D, et al. Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334:106-113.
- [24] 白嘉雨. 我国桉树栽培区的人工林培育[J]. 桉树科技, 2017, 34(2):33-36.
- BAI J Y. Eucalypt plantation silviculture in southern China [J]. *Eucalypt Science&Technology*, 2017, 34(2):33-36.
- [25] 林开敏, 俞新妥, 洪伟, 等. 杉木人工林林下植物对土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(z1):94-98.
- LIN K M, YU X T, HONG W, et al. Effects of undergrowth plant on soil fertility in Chinese fir plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(z1):94-98.
- [26] 赵燕波, 张丹桔, 张健, 等. 不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6):1 048-1 054.
- ZHAO Y B, ZHANG D J, ZHANG J, et al. Understory vegetation diversity of *Pinus massoniana* plantations with various canopy density[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, 22(6):1 048-1 054.
- [27] 李伟伟, 谷建才, 陈瑜, 等. 林分密度对华北落叶松人工林林下植被多样性影响的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6):84-88.
- LI W W, GU J C, CHEN Y, et al. Research on the effects of stand density on understory vegetation diversity of *Larix principis-rupprechii* plantation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(6):84-88.
- [28] 秦新生, 刘苑秋, 邢福武. 低丘人工林林下植被物种多样性初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3):223-228.
- QIN X S, LIU Y Q, XIN F W. Species diversity in undergrowth of artificial forests on lower hilly land[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(3):223-228.
- [29] 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, LU C Q, et al. The problems and solutions of *Eucalyptus* plantations' s sustainable management in China [J]. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 2009, 25(2):78-83.

(编辑:潘新社)