

坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响*

刘雅静 张书源 李静 张茜莹 邱权

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东广州 510642)

摘要 以广东省信宜市池洞镇和水口镇桉树人工林为研究对象, 通过样地调查, 统计和分析了不同坡位(上坡位和下坡位)和不同密度(低密度 1 350~1 700 株/ha、高密度 1 950~2 475 株/ha)桉树林个体生长量(树高、胸径、单株材积)、林分蓄积量及其林下植被物种多样性(Margale 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数)。结果表明:(1)坡位显著影响桉树林生产力和林下植被多样性, 下坡位桉树树高、胸径、单株材积和林分蓄积量和林下灌木层物种多样性明显高于上坡位, 但下坡位林下草本层物种多样性低于上坡位;(2)密度对胸径和单株材积有显著影响, 但不影响树高和林分蓄积量, 高密度桉树林下灌木层和草本层物种多样性均明显低于低密度桉树林。总体而言, 肥力条件更好的下坡位更利于桉树生长, 产量更高, 坡位对林下灌木层和草本层物种多样性的影响有所不同; 高密度(1 950~2 475 株/ha)造林时, 增产效果不明显, 但存在林下植被多样性下降的风险。

关键词 桉树人工林; 林下植被; 物种多样性; 坡位; 密度

中图分类号: S792.39 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 04-0048-08

Effect of Slope Position and Density on the Species Diversity of Understory Vegetation and Productivity of *Eucalyptus* Plantation

LIU Yajing ZHANG Shuyuan LI Jing ZHANG Xiying QIU Quan

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract Based on the field survey, the species diversity (Margale richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener index and Pielou evenness index) of understory vegetation and individual growth (height (H), diameter at breast height (DBH), and single tree volume (STV)) and stand volume (SV) of *Eucalyptus* plantation under different densities (low density, LD 1 350~1 700 plant/ha and high density, HD 1 950~2 475 plant/ha) at different slope positions (upper slope (US) and lower slope (LS)) in Chidong town and Shuikou town, Xinyi city, Guangdong province was statistically analyzed. The results showed that: (1) Slope position significantly affected the diversity of understory vegetation and productivity of *Eucalyptus* plantation, compared to *Eucalyptus* plantation at US, *Eucalyptus* plantation at LS had a higher species diversity of understory shrub layer and H, DBH, STV, and SV, but performed a lower species diversity of understory herb layer. (2) Density had a significant effect on DBH and STV, but did not affect H or SV, *Eucalyptus* plantation under HD showed a lower level of species diversity of understory shrub layer and herb layer compared to that under LD. In general, LS is beneficial to *Eucalyptus* for its better soil fertilizer, so that *Eucalyptus* plantation at LS presented a higher productivity than that at US, and slope position show different impact on species diversity of understory shrub

* 基金项目: 国家自然科学基金(31800527)。

第一作者: 刘雅静(1998—), 女, 本科生在读, 主要从事林学相关研究, E-mail: 973914583@qq.com。

通信作者: 邱权(1989—), 男, 讲师, 主要从事森林培育、树木生理生态等相关研究, E-mail: qqiu@scau.edu.cn。

layer and herb layer. Also, for *Eucalyptus* plantation under LD (1 950~2 475 plant/ha), there was no obvious promoting effect on the productivity, but a risk of decreasing the diversity of understory vegetation.

Key words *Eucalyptus* plantation; understory vegetation; species diversity; slope position; density

桉树自引入我国以来,因其速生丰产特性,深受群众喜爱。经过长期的科学研究和实践探索,桉树经营水平不断提高,产业体系逐渐完善,种植面积和产业规模不断扩大,已成我国南方地区的主要造林树种之一^[1-2]。通常来讲,立地选择、密度调控等是提高人工林质量与产量的有效技术措施,在桉树人工林经营过程中,为保证其丰产稳产,自然也要重点关注这些技术环节。目前,国内外学者已经在广东、广西、海南、福建、云南、浙江省等地针对桉树立地选择和密度调控技术开展了大量研究,对于立地因子和造林密度对桉树林生产力的影响已经形成了一些基本结论^[3-12]。但是,受制于研究尺度、研究区域、研究方法等因素,部分结论尚未达成共识,仍然需要大量的田间数据进一步验证。人工林物种多样性问题一直是社会各界关注的热点问题,与天然林相比,人工林物种多样性明显偏低,这一结论在黄山松 *Pinus taiwanensis*^[13]、云南松 *Pinus yunnanensis*^[14]、青海云杉 *Picea crassifolia*^[15]、鹅掌楸 *Liriodendron chinense*^[16] 等树种中均已经证实,如何通过森林培育措施保持和提高人工林物种多样性始终是人工林培育领域重点关注的科学问题。近年来,随着桉树大面积种植,由其引发的生物多样性问题带来了诸多争议,民间甚至出现了“桉树林下不长草”的说法。虽然社会舆论言过其实,但不可否认的是,部分桉树林区确实存在林下植被多样性差的现象,这种现象可能与不合理的经营管理措施有直接关系,而并非桉树本身的过错。已有大量研究表明,立地因子^[17-19]、造林密度^[20-23]、抚育管理^[24-26]等经营管理措施均是影响林下植被物种组成和多样性的重要限制因子。

广东省丘陵地形占比较高,多数造林地为丘陵山地^[27]。在丘陵山地进行桉树造林时,需要重点考虑坡向、坡度和坡位问题。坡向一般在高山地区关注得更多,而丘陵地形关注相对较少;坡度对桉树生长的影响相关报道较多,普遍认为,平缓地形更利于桉树生长^[28-29];坡位对桉树生长和林下植被多样性的影响关注相对较少。通

常来讲,对短周期经营桉树人工林而言,考虑到成本和时效问题,基本不会采用抚育间伐的方式,因此,生产上主要关注初植密度。针对上述问题,本研究选择位于广东省信宜市中部山区桉树林作为研究对象,通过布设样地,田间测定不同坡位和初植密度的桉树林的生长量及其林下灌木层和草本层物种多样性指数,并分析坡位和密度因子对桉树林生产力和林下植被多样性的影响,以期进一步丰富桉树人工林培育和生物多样性保护理论,并为桉树人工林经营管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

研究区位于广东省信宜市,属南亚热带季风气候,但又有复杂多变的山区气候特点。气候随海拔高度不同而各异,夏热冬凉,四季分明。境内气候温和,雨量充沛,年平均降雨量 1 477~1 941 mm 之间,时空分布不均,雨热同季,干湿季明显,冬春旱夏秋涝。年均日照 1 757.4 h,年均气温 22.6℃。无霜期长,春有冻害,偶有台风影响,山区、丘陵的天气差异较大,山区冬季气温可低至零下,常凝霜结。土壤为淋溶性土壤,整体呈酸性。

1.2 样地设置

1.2.1 不同坡位对比试验样地设置 在信宜市中部山区池洞镇新垌村内桉树林区内(E110°56'2"、N22°29'18"、海拔 135 m),林分为人工纯林,造林树种为尾巨桉无性系 DH32-29,林龄为 3 a,造林密度为 1 500~1 650 株/ha。在坡度约为 30°,坡向为东南的坡地上,共设置 6 块样地,样地面积为 400 m² (20 m × 20 m),6 块样地按照坡位分成上坡位和下坡位 2 组,每组 3 块,样地基本信息见表 1。

1.2.2 不同密度对比试验样地设置 在信宜市中部山区水口镇群丰村尾巨桉林区内(E110°51'25"、N22°17'15"、海拔 75 m),林分为人工纯林,造林树种为尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 无性系 DH32-29,林龄为 5 a。在坡度约为 30°,坡

向为东南的坡地上,在下坡位共设置的6块样地,样地面积为 400 m^2 ($20\text{ m} \times 20\text{ m}$),6块样地按照密度分为低密度(1350~1700株/ha)和高密度(1950~2475株/ha)两组,每组3块,样地基本信息见表1。

1.3 调查内容与分析方法

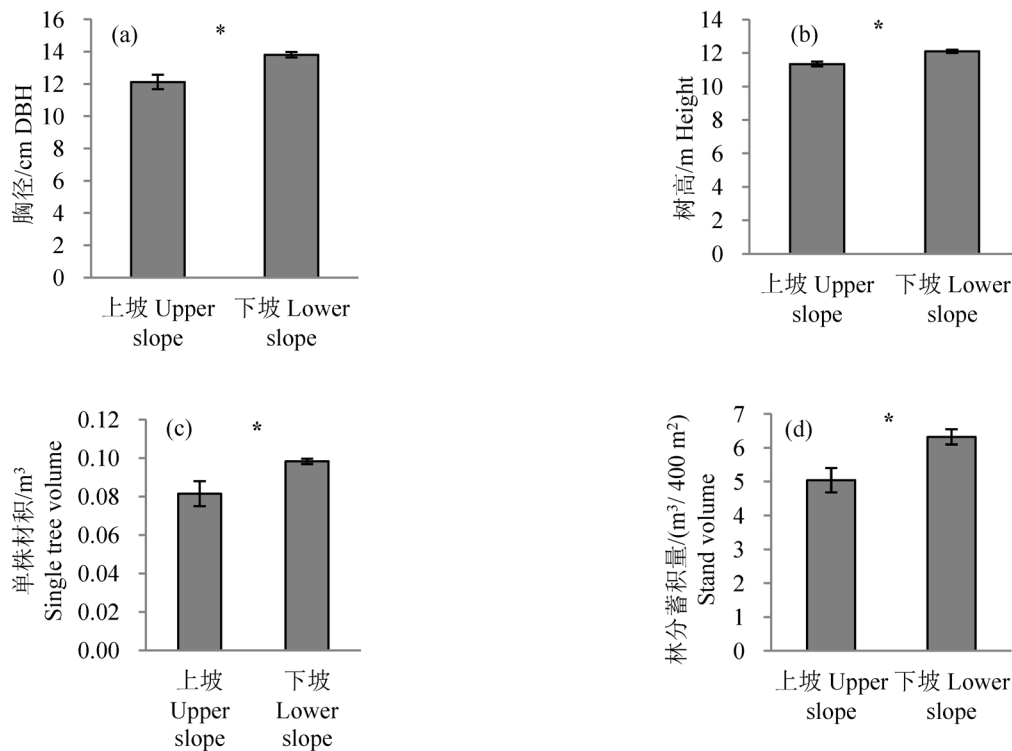
2017年2月,对12块样地分别进行每木检尺,记录样地内尾巨桉树高、胸径,查询二元材积表计算单株材积,统计样地株数后,再根据样

地面积换算林分蓄积量。在样地内四角及中心设置5个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 小样方,对小样内的乔木幼苗和灌木进行调查,记录种类、株数和高度等信息。在样地内四角及中心设置5个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 小样方,对小样方内草本植物进行调查,记录种类、株数和盖度等信息。采用Margale丰富度指数(M)^[30]、Simpson优势度指数(D)^[30]、Shannon-Wiener指数(H)^[31]和Pielou均匀度指数(J_{sw})^[32],来分析林下植被物种多样性。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

因子 Factor	分组 Group	样地数量 Number of sample plots	林龄 /a Stand age	密度/(株·ha ⁻¹) Density	坡度/(°) Slope degree	坡向 Slope aspect
坡位	上坡位	3	3	1500~1650	30	东南
	下坡位	3	3	1500~1650	30	东南
密度	低密度	3	5	1350~1700	30	东南
	高密度	3	5	1950~2475	30	东南



注: *表示差异显著($P \leq 0.05$)。

Note: * indicates statistical significance ($P \leq 0.05$).

图1 不同坡位桉树林平均胸径(DBH)(a)、平均树高(b)、平均单株材积(c)和林分蓄积量(d)

Figure 1 Average diameter at breast height (DBH) (a), average height (b), single tree volume (c) and stand volume (d) of *Eucalyptus* plantation at different slope positions

$$M = (S-1) / \ln N$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$J_{sw} = H / \ln S$$

式中, $P_i = n_i / N$, 为第 i 个物种的个体在样地中所占的比例, N 为所有种的个体总数, S 为种数, n_i 为第 i 种的个体数。

1.4 统计与分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理与作图, 采用 IBM SPSS 20.0 对胸径、树高、单株材积和林分蓄积量等生长数据进行 t 检验统计分析。

2 结果与分析

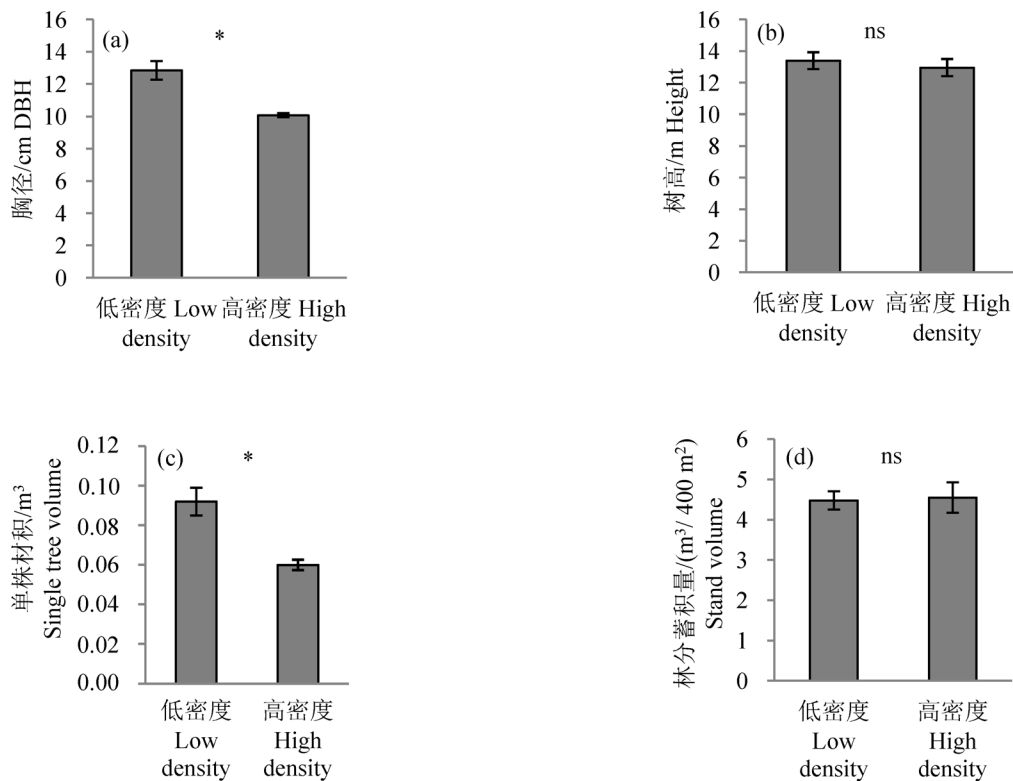
2.1 坡位对桉树生长的影响

对比不同坡位桉树生长表现发现, 上坡位和下

坡位桉树林平均胸径、平均树高、平均单株材积和林分蓄积量均存在显著性差异 ($P \leq 0.05$; 图 1)。如图 1 所示, 下坡位桉树林平均胸径 (图 1a)、平均树高 (图 1b) 和单株材积 (图 1c) 分别为 13.81 cm、12.10 cm、0.10 m³ 和 6.32 m³/400 m², 比下坡位分别提高了 13.94%、6.71%、20.64% 和 25.40%。由此说明, 下坡位更适合桉树生长, 因而生长表现更佳。

2.2 密度对桉树生长的影响

如图 2a 和 2c 所示, 不同密度桉树林平均胸径存在显著差异 ($P \leq 0.05$), 低密度桉树林平均胸径和单株材积分别为 12.84 cm 和 0.09 m³, 与其相比, 高密度桉树林平均胸径和单株材积分别下降了 21.59% 和 34.82%, 说明过度密植大幅限制了桉树粗生长和单株材积。不同密度桉树林平均树高和林分蓄积量差异不显著 ($P > 0.05$; 图 2b 和 2d), 可见密度对桉树高生长和林分蓄积量影响相对较小, 当高密度 (1 950~2 475 株/ha) 种植桉树



注: * 表示差异显著 ($P \leq 0.05$); ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: * indicates statistical significance ($P \leq 0.05$); ns indicates statistical non-significance ($P > 0.05$).

图 2 不同密度桉树林平均胸径 (a)、平均树高 (b)、平均单株材积 (c) 和林分蓄积量 (d)

Fig.2 Average diameter at breast height (a), average height (b), single tree volume (c) and stand volume (d) of Eucalyptus plantation under different densities

时, 林分蓄积量并未增加。

2.3 坡位对桉树林下植被多样性的影响

对不同坡位桉树林下灌木层(含乔木幼苗)和草本层分层计算 Margale 丰富度指数(M)(图 3a)、Simpson 优势度指数(D)(图 3b)、Shannon-Wiener 指数(H)(图 3c)和 Pielou 均匀度指数(J_{sw})(图 3d), 结果表明, 灌木层方面, 与上坡位相比, 下坡位桉树林 M (2.62)、 D (0.83)和 H (2.01)均明显提高, 增幅分别 57.36%、34.58% 和 52.83%; J_{sw} (0.75)也有所增加, 增幅为 7.20%。草本层物种多样性方面, 下坡位桉树林草本层 M (1.95)、 D (0.75)、 H (1.60)和 J_{sw} (0.77)均明显低于上坡位桉树林, 分别下降了 32.80%、14.12%、28.71% 和 14.81%。总体而言, 坡位对灌木层和草本层物种丰富度、优势度和均匀度均有一定影响, 但变化规律完全不同, 下坡位桉树林下灌木层物种多样性明显高于上坡位, 但草本层物种多样性更低。

2.4 密度对桉树林下植被多样性的影响

由图 4 可知, 高密度桉树林林下灌木层 Margale 丰富度指数(M)(图 4a)、Simpson 优势度指数(D)(图 4b)、Shannon-Wiener 指数(H)(图 4c)和 Pielou 均匀度指数(J_{sw})(图 4d)分别为 1.39、0.50、1.10 和 0.53, 与低密度桉树林相比, 4 种多样性指数(M 、 D 、 H 和 J_{sw})呈现出不同程度的下降, 降幅分别为 23.64%、7.75%、16.34% 和 5.27%。草本层物种多样性方面, 密度显著影响了桉树林林下草本层物种多样性, 高密度桉树林林下草本层 M (图 4a)、 H (图 4c)和 J_{sw} (图 4d)分别为 2.31、0.58、0.26, 分别比低密度桉树林下降了 8.09%、68.51% 和 67.00, 但密度对 D 影响相对较小(图 4b)。

3 结论与讨论

3.1 人工林生产力主要由立地条件、遗传因素和经营管理措施等因素决定^[33-34]。坡位是重要的立

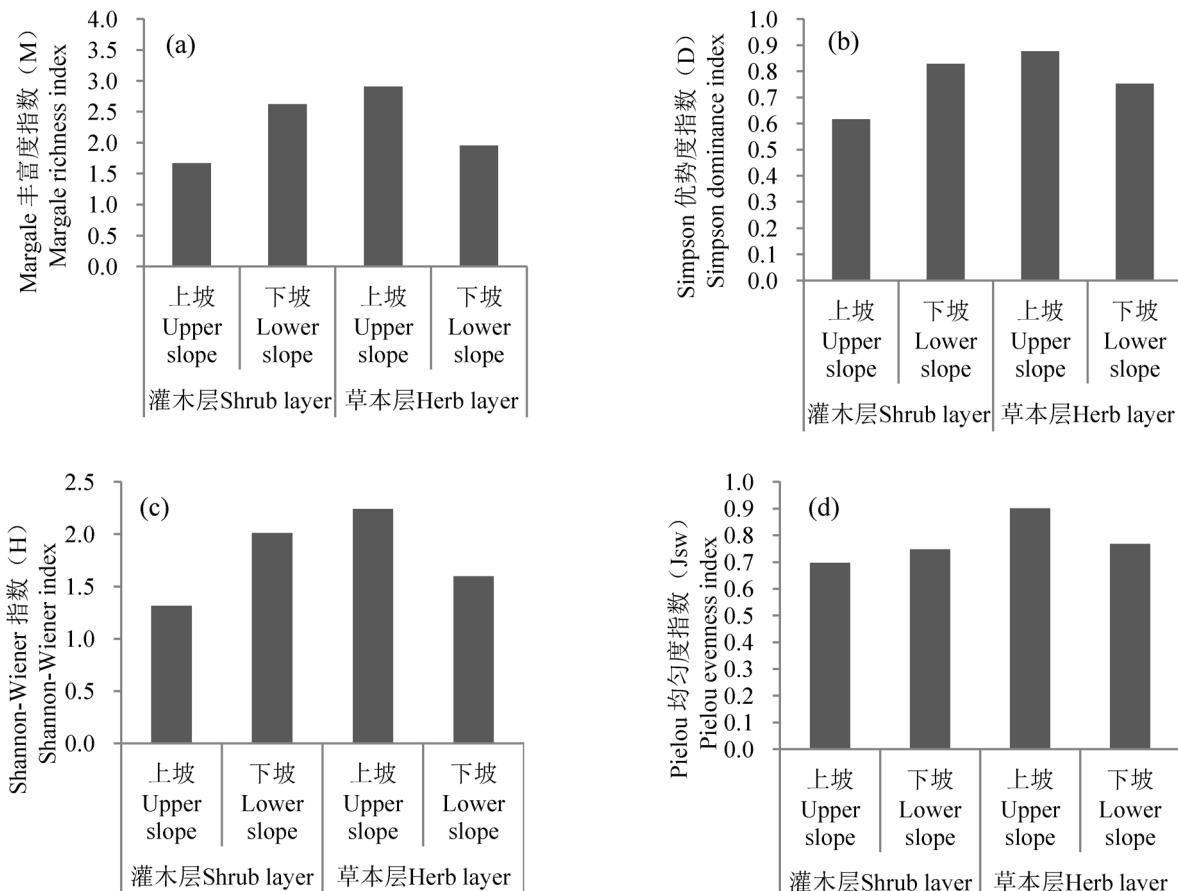


图 3 不同坡位桉树林下灌木层(含乔木幼苗)和草本层物种多样性指数

Fig. 3 Species diversity index of shrub layer (including tree seedlings) and herb layer under *Eucalyptus* plantation at different slope positions

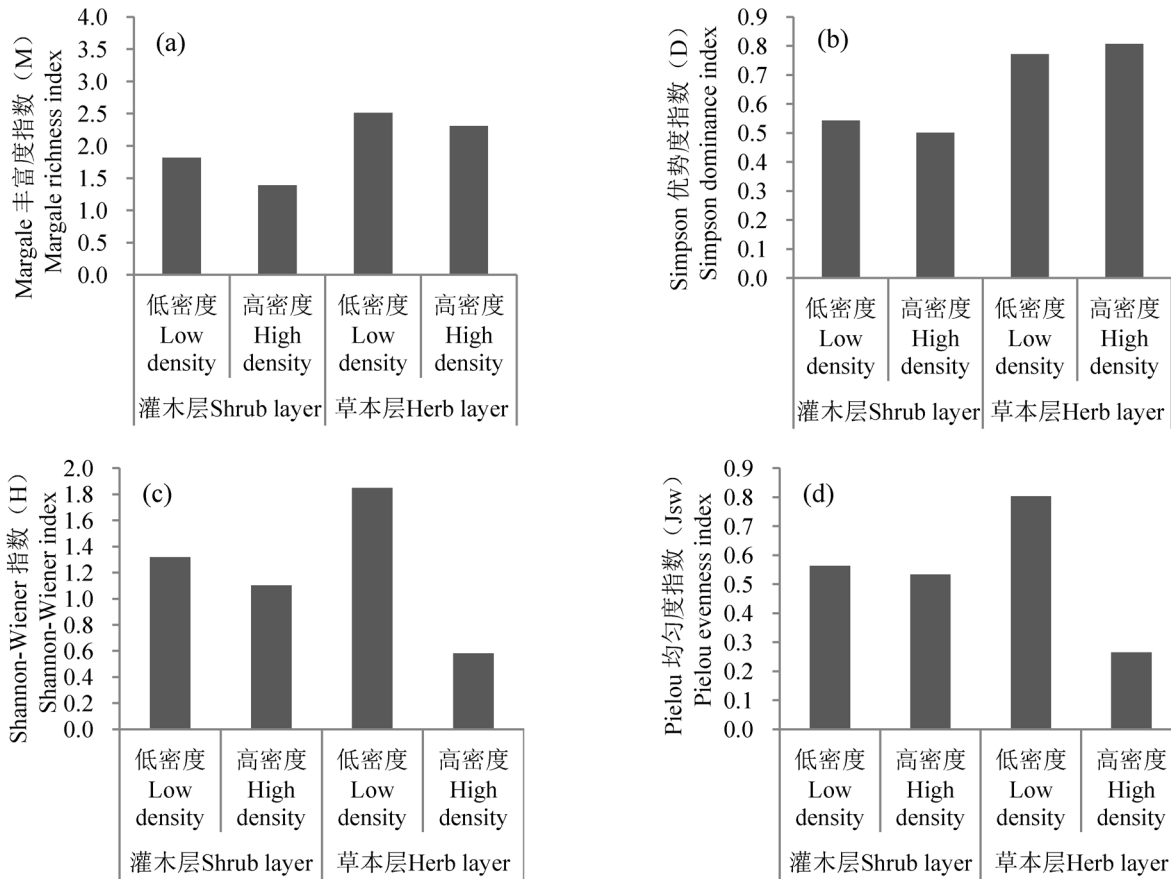


图 4 不同密度桉树林下灌木层（含乔木幼苗）和草本层物种多样性指数

Fig. 4 Species diversity index of shrub layer (including tree seedlings) and herb layer under *Eucalyptus* plantation under different densities

地因子之一，本文研究结果表明，坡位对桉树个体生长和林分蓄积量有显著影响，下坡位桉树林高生长、粗生长、单株材积和林分蓄积量均明显优于上坡位，表现出了更高的生产力。此结果与韦建宏等^[35]研究结果一致，据其观察，下坡位土壤肥力条件更好，更利于桉树生长。造林密度控制是桉树经营管理措施的重点工作之一，在以往的研究中，张英武等^[10]和周元满等^[12]研究显示，造林密度过高时，桉树胸径和单株材积会显著下降，而树高和林分蓄积量基本保持稳定。类似地，本文研究结果表明，与低密度（1 350~1 700 株/ha）相比，高密度（1 950~2 475 株/ha）桉树林林分蓄积量并未增加，原因可解释为，高密度种植引起林木光和水肥资源的竞争，致使桉树个体胸径和单株材积受到抑制，即使桉树个体数量增多，林分蓄积量仍然保持不变。总之，从林分水平来看，下坡位桉树林生产力更高，高密度桉树林生产力与低密度桉树林生产力基本持平。

3.2 人工林生物多样性问题一直是林业领域重点关注的话题，对于桉树人工纯林而言，由于地上部分树种组成几乎无调整空间，所以一般重点聚焦于林下植被群落结构和物种多样性问题^[2, 36]。大量研究表明，立地条件、抚育管理措施会显著影响人工林林下植被物种多样性和功能多样性^[24-25, 37]。从 Margale 丰富度指数 (M)、Simpson 优势度指数 (D)、Shannon-Wiener 指数 (H) 和 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 4 个物种多样性指数综合来看，高密度桉树林下灌木层和草本层物种多样性明显低于低密度桉树林，由此说明，当造林密度过高时，桉树林下植被物种多样性会明显下降。这一结论与前人基于华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*^[20] 和马尾松 *Pinus massoniana*^[21] 的研究结果基本一致，当林分密度过大时，林下光照严重不足，同时水肥竞争激烈，因此，林下植被生长受到抑制，其种类和数量均会大幅下降。坡位方面，研究结果表明，坡位对桉树林下灌木层和草本层物种多

样性的影响有所不同, 总体趋势为: 下坡位桉树林下灌木层物种多样性更高, 而上坡位桉树林下草本层物种多样性更高。这一现象可能与灌木和草本植物对光和水肥因子的不同适应性有关。坡度主要影响土壤理化性质和光照条件, 进而对植被生长和分布产生影响^[36, 38-40]。一般而言, 下坡位土壤土层更厚, 肥力条件更好, 但上坡位光照相对更好。我们推测认为, 与草本植物相比, 灌木树种个体普遍生物量更大, 生长速率快, 对水肥需求更大, 因此, 水肥条件更好的下坡位更利于灌木生长, 而草本植物位于桉树林下最底层, 桉树林通常密度较大, 林下光照严重不足, 与水肥条件相比, 光照对草本植物的影响可能更大, 因此, 光照条件更好的上坡位对草本植物生长更有利。当然, 由于样本数量有限, 研究尺度小, 该研究结果对于其它树种或者其它地区桉树林是否具有普遍性还有待进一步验证。在以往的研究中, 刘广营等^[41]针对华北落叶松的研究认为, 上坡位林下灌木层和草本层物种多样性比下坡位更高, 与本文研究结果不一致。由此说明, 坡位对林下植被多样性影响比较复杂, 林分类型、实际林地环境等因素均可能制约林下植被物种多样性对坡位的响应规律。

3.3 为了保证桉树的丰产稳产, 并提高林下植被多样性, 基于本文主要研究结果, 针对桉树经营过程中的立地选择和经营管理等技术环节, 我们提出建议如下: (1) 合理控制造林密度, 不宜过度密植(1 950~2 475株/ha)。当种植密度过大时, 桉树不会增产, 但造林成本增加, 林下植被多样性显著下降; (2) 条件允许的情况下, 优先选择靠下坡位造林地, 既节约造林和管理成本, 又能保证桉树产量; (3) 在不同坡位营造桉树林时, 宜采取不同的经营管理措施。靠下坡位宜适当减少施肥量, 而靠上坡位宜增加施肥量。

参考文献

- [1] 郭木桂. 浅谈桉树的生态林经营[J]. 亚热带水土保持, 2009, 21(3): 52-54.
- [2] 罗洁贤, 俞政民, 聂钰滢, 等. 不同林龄桉树林下植被多样性分析[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(1): 36-42.
- [3] 崔之益, 徐大平, 杨曾奖, 等. 桉树无性系在华南6种立地条件下的适生性评价[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 79-86.
- [4] 张婷芳, 王宇阳. 中亚热带沿海平原地区不同立地条件下桉树生长情况调查及分析[J]. 防护林科技, 2017(2): 46-48.
- [5] 张金文. 闽南山地桉树无性系U6造林立地条件选择[J]. 林业工程学报, 2005, 19(4): 19-21.
- [6] 吴晓芙, 胡曰利. 桉树立地生产力与养分生产力参数的确定[J]. 林业科学, 2003, 29(2): 71-77.
- [7] 徐建民, 温茂元, 白嘉雨, 等. 海南岛西部地区桉树速生丰产林优化栽培模式研究[J]. 热带林业, 2001, 29(3): 109-123.
- [8] 黄烈健, 杨曾奖, 陈美红, 等. 不同前茬立地类型对桉树人工林生长影响及土壤肥力分析[J]. 广东林业科技, 2013, 29(6): 43-46.
- [9] 李宝琦, 徐建民, 余勇, 等. 栽培密度与施肥对雷州半岛桉树大径材培育效果的中期研究[J]. 广东林业科技, 2009, 25(6): 14-21.
- [10] 张英武, 魏润鹏, 沐海涛. 造林密度和无性系在短周期桉树人工林早期生长表现中的作用[J]. 广东林业科技, 2006, 22(3): 8-12.
- [11] 李付伸, 吕曼芳, 彭雪迪, 等. 桂中地区不同造林密度下桉树无性系生长及经济效益研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(1): 56-60.
- [12] 周元满, 谢正生, 刘新田. 尾叶桉U6无性系林分密度效应研究[J]. 广东林业科技, 2004, 20(4): 39-42.
- [13] 卢琦, 赵体顺, 罗天祥, 等. 黄山松天然林与人工林物种多样性和林分生长规律的比较研究[J]. 林业科学研究, 1996, 9(3): 273-277.
- [14] 王健敏, 刘娟, 陈晓鸣, 等. 云南松天然林及人工林群落结构和物种多样性比较[J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 515-522.
- [15] 何芳兰, 徐先英, 尉秋实, 等. 祁连山青海云杉人工林与天然林群落结构特征及物种多样性比较研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 1-7.
- [16] 胡和, 凌娟, 贾晨, 等. 鹅掌楸天然林与人工林群落特征及物种多样性研究[J]. 四川林业科技, 2016, 37(3): 39-43.
- [17] 王梅, 张文辉. 不同坡向人工油松林生长状况与林下物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29(8): 1678-1683.
- [18] 丁改改, 蒋进, 宋春武, 等. 土壤因子对莫索湾梭梭林林下植被分布和多样性的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 20-26.
- [19] 杨振奇, 秦富仓, 张晓娜. 砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 213-221.
- [20] 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.
- [21] 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): 2323-2331.
- [22] 王春香, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土区刺槐林下植被物种组成及多样性影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(1): 31-36.
- [23] 冯秋红, 吴晓龙, 徐峥静茹, 等. 密度调控对川西山地云杉人工林地被物及土壤水文特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 98-104.
- [24] 段劫, 马履一, 贾黎明, 等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.
- [25] 王丽娟, 王孝安, 原志坚, 等. 抚育对黄土高原人工油松林林下植被的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1301-1309.
- [26] 原志坚, 王孝安, 王丽娟, 等. 抚育对黄土高原油松人工林林下植被功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 339-346.
- [27] 陈倩倩, 薛冬冬, 邱权, 等. 基于GIS空间分析的广东省油茶种植适宜性评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(4): 62-70.
- [28] 吴英, 张万幸, 张丽琼, 等. 基于DEM的地形与植被分布关联分析[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 96-98.
- [29] 陈应彪, 杨曾奖, 蒋虎, 等. 地形因子及整地方式对桉树人工林生长的影响[J]. 热带林业, 2014, 42(1): 23-26.
- [30] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988.
- [31] SHANNON C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [32] WHITTAKER R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. Taxon, 1972, 21: 213-252.
- [33] 孙长忠, 沈国舫. 我国主要树种人工林生产力现状及潜力的调查研究 I. 杉木、马尾松人工林生产力研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6): 613-621.
- [34] 凌子燕, 岑巨延, 韦金丽, 等. 森林生产力与立地条件的相关性分析: 以宁明县的马尾松和桉树森林生产力为例[J]. 广西林业科学, 2012, 41(2): 124-127.
- [35] 韦建宏, 侯敏, 韦添露, 等. 不同坡位桉树人工林生长和土壤理化性质比较[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(5): 167-169.
- [36] 古丽红, 周毅. 不同林龄桉树林下植被结构与物种多样性[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 46-52.
- [37] 钟宇. 不同立地类型巨桉人工林生物多样性特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [38] 陈攀, 慎佳泓, 胡广, 等. 西湖风景名胜区内不同类型森林群落的空间分布及 β 多样性[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2929-2937.
- [39] 樊晶, 杨燕琼. 基于遥感的森林健康度分析: 以东莞桉树林为例[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(1): 40-45.
- [40] 靳甜甜, 傅伯杰, 刘国华, 等. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1783-1793.
- [41] 刘广营, 马长明, 郭延朋, 等. 坡位对华北落叶松生长及林下物种多样性的影响[J]. 河北林果研究, 2015, 30(1): 5-8.