

和黑腐皮壳菌菌丝的生长,说明该菌株能产生非挥发性气体的抑菌活性物质来抑制多种植物病原真菌的生长,这些抑菌活性物质很有可能也是蛋白类和脂肽类物质,同时本研究发现SY-15能产生纤维素酶和蛋白酶,进一步说明了SY-15能产生蛋白类的细胞壁裂解酶。此外,通过二分皿法也证明了菌株SY-15能产生具有抑菌活性的挥发性气体,其能有效抑制金黄壳囊孢菌、迂回壳囊孢菌和黑腐皮壳菌的生长,其中对金黄壳囊孢菌的抑菌活性达到100%。

本研究对拮抗菌株SY-15的种类进行了鉴定,并进一步分析了其抑菌活性,研究表明,基于形态学特征、生理生化特性和16S rDNA序列分析,最终将拮抗菌株SY-15鉴定为枯草芽孢杆菌。拮抗菌株SY-15的无菌培养滤液和挥发性气体均能有效抑制金黄壳囊孢菌、迂回壳囊孢菌和黑腐皮壳菌的菌丝生长。此外,还发现菌株SY-15能产生蛋白酶和纤维素酶。研究结果显示出了拮抗菌株SY-15的较高研究和应用价值,是一株潜在的防治杨树腐烂病及其他植物病害的生防菌株资源。本研究虽然初步分析了枯草芽孢杆菌SY-15的抑菌活性和抑菌活性物质,但对于其具体的抑菌机理及抑菌活性物质种类目前还不清楚,有待后续开展深入的研究。

参考文献

- [1] 袁嗣令.中国乔、灌木病害[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] 徐梅卿,周旭东,朴春根.中国不同栽培区杨树品系及其病害种类[J].林业科学研究,2009,22(5):705-714.
- [3] 刘淑香,杨军玉,孙玉红.几种杀菌剂对杨树腐烂病的治疗效果试验[J].河北林业科技,2010(1):10.
- [4] SHAFI J, TIAN H, JI M. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review[J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2017, 31(3): 446-459.
- [5] 宋瑞清,冀瑞卿.四种毒蘑菇菌株及其毒素对杨树烂皮病菌生长的抑制作用[J].北京林业大学学报,2005,27(2):88-91.
- [6] YI H W, CHI Y J. Biocontrol of *Cytospora* canker of poplar in north-east China with *Trichoderma longibrachiatum*[J]. *Forest Pathology*, 2011, 41(4): 299-307.
- [7] 于地美,黄华毅,梁小文,等.一株生防真菌TRCC27001的鉴定及其抑菌特性[J].福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(2):148-154.
- [8] REN J H, YE J R, LIU H, et al. Isolation and characterization of a new *Burkholderia pyrrocinia* strain JK-SH007 as a potential biocontrol agent[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, 27(9): 2203-2215.
- [9] REN J H, LI H, WANG Y F, et al. Biocontrol potential of an endophytic *Bacillus pumilus* JK-SX001 against poplar canker[J]. *Biological Control*, 2013, 67(3): 421-430.
- [10] 徐明,吴小芹.杨树烂皮病菌颞颞菌株的初步筛选与分子鉴定[J].江苏林业科技,2012,39(5):1-6.
- [11] HUANG H, YU D, SUN Y, et al. Optimization of medium to improve the antifungal activity of *Bacillus atrophaeus* XW2 using response surface methodology[J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2015, 9(3): 1783-1793.
- [12] HUANG H, TIAN C, HUANG Y, et al. Biological control of poplar anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc[J]. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2020, 30(1): 1-9.
- [13] 东秀珠,蔡妙英.常见细菌系统鉴定手册[M].北京:科学出版社,2001.
- [14] SNEATH P H A, MAIR NS, SHARPE ME, et al. *Bergey's manual of systematic bacteriology*[M]. 2nd. Baltimore: Williams & Wilkins, 1986.
- [15] 黄华毅,于地美,黄咏槐,等.拮抗菌株XZQ-20的鉴定及对多种植物病原细菌的拮抗活性分析[J].林业与环境科学,2020,36(4):24-29.
- [16] MARCHESI J R, SATO T, WEIGHTMAN A J, et al. Design and evaluation of useful bacterium-specific PCR primers that amplify genes coding for bacterial 16S rRNA[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64: 795-799.
- [17] 孙妍,于地美,黄华毅,等.黄栌枯萎病菌拮抗细菌的分离与鉴定[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(6):17-23.
- [18] ESSGHAIER B, FARDEAU M L, CAYOL J L, et al. Biological control of grey mould in strawberry fruits by halophilic bacteria[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 106: 833-846.
- [19] 金海强,贾斌,李熙英.杨树腐烂病内生拮抗细菌鉴定及防治研究[J].中国森林病虫,2012,31(6):1-4.
- [20] 田爱霞.拮抗菌株TJB-8的鉴定及抑菌物质分析[J].浙江农林大学学报,2017,34(6):1071-1078.
- [21] 黄华毅,黄咏槐,黄焕华,等.枯草芽孢杆菌STO-12脂肽类物质抑菌活性及其特性分析[J].林业与环境科学,2018,34(4):8-14.

不同桉树密度下桉阔复层林的结构与组成*

王 锋¹ 苏永新² 龚益广¹ 徐明锋³
何春梅³ 梁育兴¹ 王 凯¹ 李春永¹

(1. 广东省德庆林场, 广东 德庆 526600; 2. 广东珠江口中华白海豚国家级自然保护区管理局, 广东 珠海 519080;
3. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 桉树 *Eucalyptus* spp. 是我国南方最主要的速生树种之一, 由于长期掠夺式经营, 桉树林出现了地力衰退、病虫害严重、生物多样性下降等一系列生态问题, 营造桉阔复层混交林是平衡经济效益与生态效益的有益尝试。研究通过调查粤西桉阔复层混交林, 分析不同桉树密度下林分结构、物种组成的差异, 筛选不同桉树密度下林分结构更加稳定、生物多样性更高、林木生长更优的桉阔复层林。研究结果表明: 低桉树密度林分中, 天然更新物种占优势, 黄牛木 *Cratoxylum ligustrinum*、土蜜树 *Bridelia tomentosa*、破布叶 *Microcos paniculata* 是林分中主要的先锋树种; 在高桉树密度林分, 栽植物种占据优势, 尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*、樟树 *Cinnamomum camphora* 是主要的栽植树种; 桉树密度越接近的林分, 其科属种组成差异越小, 反之差异越大; 不同桉树密度林分间的物种丰富度、个体密度没有显著差异, 胸高断面、平均高度、平均胸径则有显著差异 ($P < 0.01$); 从径级结构来看, 随着桉树密度的升高, 林分的径级结构从倒“J”型分布向峰型分布发展。低桉树密度林有着稳定的天然林更新替代, 但所处的演替阶段较早, 高桉树密度林能更早到达林分成熟期, 所处的演替阶段更高, 可获取的林木资源更丰富。

关键词 桉树密度; 桉阔复层林; 桉阔混交林; 林分结构; 物种组成

中图分类号: S792.39 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 06-0083-10

Structure and Composition of *Eucalyptus*-broadleaved Compound Forest with Different *Eucalyptus* Densities

WANG Feng¹ SU Yongxin² GONG Yiguang¹ XU Mingfeng³
HE Chunmei³ LIANG Yuxing¹ WANG Kai¹ LI Chunyong¹

(1. Deqing Forest Farm of Guangdong Province, Zhaoqing, Guangdong 526600, China; 2. Guangdong Pearl River Estuary National Nature Reserve Administration of Chinese White Dolphin, Zhuhai, Guangdong 519080, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract *Eucalyptus* spp. is one of the most important fast-growing tree species in south China. Due to long-term plundering management, *eucalyptus* forest had been confronted with a series of ecological problems, such as soil degradation, serious diseases and declining biodiversity. It is a beneficial attempt to balance economic benefit and ecological benefit to build *eucalyptus*-broadleaved compound forest. In this study, we investigated *eucalyptus*-broadleaved compound forests in western Guangdong province, analyzed the stand structure, species composition and stand differences under different *eucalyptus* densities, and then screened *eucalyptus*-broadleaved compound forests with more stable stand structure, higher biodiversity and better forest growth. The results

* 基金项目: 广东省森林生态综合示范园(省德庆林场森林质量提升示范园)项目。

第一作者: 王锋(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事森林经营管理, E-mail: 27734975@qq.com。

通信作者: 徐明锋(1988—), 男, 工程师, 主要从事森林生态和林下植物收集与利用工作, E-mail: 735871702@qq.com。

showed that, in low *eucalyptus* density forest, the naturally refreshed species were dominant, and *Cratogeomys ligustrum*, *Bridelia tomentosa*, and *Microcos paniculata* were the main pioneer species. In high *eucalyptus* density forest, planting tree species were dominant, such as *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and *Cinnamomum camphora*. The closer the *eucalyptus* density was, the smaller the difference in family, genera and species composition was, and vice versa, the larger the difference was. There was no significant difference in species richness and individual density among different *eucalyptus* densities, but there were significant differences in basal area, average height and average DBH. In terms of size distributions, with the increase of *eucalyptus* density, the size distributions developed from inverse J-shape to peak-shape. The low density *eucalyptus* forest had a stable replacement of natural forest, but it was in an earlier succession stage. High *eucalyptus* density could reach the maturity stage earlier. It was at a higher stage of succession and had more abundant wood resources.

Key words *eucalyptus* density; *eucalyptus*-broadleaved compound forest; *eucalyptus*-broadleaved mixed forest; stand structure; species composition

桉树是我国南方重要的速生丰产用材树种之一,目前我国桉树人工林总面积达 540 多万 hm^2 ,已覆盖 18 个省市地区,年产木材 3 000 多万 m^3 ,占全国商品林木材产量的 26.9%,对解决我国木材供需矛盾、调整林业产业结构以及提升地方经济发挥着重要的作用^[1-5]。然而,桉树人工林在带来显著经济效益的同时,由于很多地方经营不科学,如多代纯林连栽、肥料滥用、经营周期短等因素,导致很多桉树林地出现不同程度的地力衰退、生态脆弱、水源涵养功能降低、生物多样性降低等生态问题^[6-10],严重制约了桉树人工林的可持续经营^[2]。经过多年的研究,现在业界普遍认为将桉树与其他树种混交造林是解决上述问题的有效途径^[11-12]。

桉树人工林经营周期短、生态风险较大,乡土阔叶树种经济价值高、生态功能较强、生长周期长,桉阔混交模式很好的实现了“长短结合、以短养长”的目标,也增加了林分的物种多样性,维持和提高了立地生产力,减少了病虫害的发生,提高了森林生态系统稳定性^[13]。因此,国内开展了许多桉阔混交试验,着力于结合桉树的高生产力和阔叶树的高生态价值,提高森林质量和蓄积量,平衡森林的生态效益和经济效益^[14]。研究认为,桉阔混交林相对于桉树纯林有以下优点:桉阔混交中,桉树可为阔叶树提供荫庇作用,但密度过大则会导致阔叶树生长不良甚至死亡^[15];桉阔混交可明显的提高桉树的生长速度,提高林分的生物量和蓄积量,更好的发挥碳汇作用^[2, 16-17];另外,桉阔混交还可改善土壤理化性状^[2, 18]、增加生物多样性^[13-14]、减少病虫害发生^[13]等。

为探索桉阔混交林的搭配模式和阔叶树筛选原则,揭示其发挥的生态、经济效益,广东省德庆林场采用不同桉树密度搭配多种乡土阔叶树的方法,营造桉阔复层林。本研究通过调查分析 16 年生桉阔复层林的群落结构和物种组成,回答以下问题:(1)不同桉树密度下的桉阔复层林科属种组成如何?(2)不同桉树密度会造成桉阔复层林群落结构怎么样的差异?(3)不同桉树密度复层林的径级结构和分布情况。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本文研究样地位于广东省肇庆市德庆县德庆林场的富石管护片区,广东省德庆林场(111°22'~112°06' E, 23°07'~23°25' N)紧邻北回归线,总面积 8 753.65 hm^2 。林场地形属低山高丘,海拔多在 200~600 m。大部分林地地势较陡,坡度在 25°~40°之间。土壤成土母岩有泥质页岩、黑色页岩、红色粉砂岩、砂岩、石英岩和花岗岩等。土壤有赤红壤、山地红壤和山地黄壤。赤红壤分布在海拔 350 m 以下,土壤酸性,表土层多为中壤至重壤,下层为重壤至轻粘。林场处于南亚热带季风气候区,年平均气温 19~22 °C,最热月平均温度 28.8 °C,极端最高温度 38 °C,最冷月平均温度 13.7 °C,极端低温 -2.2 °C,积温 6 825~8 168 °C。年光照充足,时长 2 200 h 以上。雨量充沛,年降雨量 1 513 mm,蒸发量 1 343.4 mm,降雨多集中于 4—9 月,春季阴雨绵绵,夏秋常有强台风降雨,秋末及冬季较干旱,无霜期 330 d。森林植被

属南亚热带季风常绿阔叶林区, 林场主要森林植被为马尾松 *Pinus massoniana*、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 和桉树人工林, 以及红锥 *Castanopsis hystrix*、火力楠 *Michelia macclurei*、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 等珍贵阔叶林^[19]。

1.2 样地设置和植物调查

研究样地位于广东省德庆林场富石管护片区, 研究区在 2004 年栽植了 26.64 hm² 的阔叶混交林, 主要树种有樟树 *Cinnamomum camphora*、木荷 *Schima superba* 等, 在 2005 年对死亡的阔叶树进行补植, 补植了尾巨桉, 营造桉阔复层林。补植后各样方 (20 m × 20 m) 的种植密度不变, 但各样方补植的桉树数量不同, 各样方的桉树密度 (*Eucalyptus density*, ED) 可分为低、中、高 3 种, 分别为: ED ≤ 10、11 < ED ≤ 20、20 < ED ≤ 35。造林后前两年, 每年进行两次除草割灌抚育。在 2012 年、2013 年、2014 年、2015 年和 2019 年进行了修枝。样地调查以 20 m × 20 m 样方为基本单位进行, 低、中、高桉树密度分别调查 9、14、11 个样方。

植物调查时间在 2020 年 7—9 月。样地每木检尺起测胸径 (Diameter at breast height, DBH) 为 1 cm, 每木检尺调查的指标有种名、胸径、树高、枝下高、冠幅等。

1.3 数据统计分析

优势种分析指标主要为重要值 (Important Value, IV), 重要值具体公式如下^[20]:

$$IV_i = (RA_i + RF_i + RB_i) / 3$$

式中, RA_i 为相对密度, RF_i 为相对频度, RB_i 为相对基盖度。群落优势种通过重要值大小进行筛选确定。

重要值在软件 PC-ORD 7.0 (MjM Software, Gleneden Beach, OR, USA) 中进行计算。

科属种的物种组成和个体数、群落组成差异分析 (单因素方差分析和 LSD 多重比较)、群落径级结构和分布在 Excel 2013 中进行数据整理, 在 Statistica 8.0 (Statsoft, Inc. Tulsa, OK, USA) 进行统计分析和做图。

2 结果与分析

2.1 桉阔复层林科属组成

低、中、高桉树密度下的桉阔复层林科的数

量分别为 22、26、22 个。如表 1 所示, 在低桉树密度下, 金丝桃科的个体数最高, 占了总体的 30.53%, 但大戟科所含的物种数最多, 有 5 种。在中桉树密度下, 金丝桃科、桃金娘科、樟科是个体数较多的优势科, 其个体数占总体比例分别为 19.56%、19.00%、14.09%, 包含物种数较多的科有大戟科、樟科、芸香科、桑科。在高桉树密度下, 桃金娘科的个体数最高, 占了总体的 32.77%, 但大戟科所含的物种数最多。总的来看, 包含个体数较多的主要优势科有桃金娘科、金丝桃科、樟科, 包含物种数较多的科有大戟科、樟科、芸香科。

低、中、高桉树密度下的桉阔复层林属的数量分别为 32、35、29 个。如表 2 所示, 在低桉树密度下, 黄牛木属的个体数最高, 但榕属所含的物种数最多, 有 4 种。在中桉树密度下, 黄牛木属、桉属是个体数较多的优势属, 其个体数占总体比例分别为 19.56%、18.63%, 包含物种数较多的属有榕属、樟属、锥属。在高桉树密度下, 桉属个体数最多, 占了总体的 32.77%, 樟属、榕属所含的物种数较多。总的来看, 包含个体数较多的主要优势属有桉属、黄牛木属、樟属。包含物种数较多的属有榕属和樟属。

2.2 桉阔复层林优势种组成

不同桉树密度下桉阔林物种数量的分别为 37 (低)、40 (中)、31 (高) 个, 不同桉树密度林分优势物种的物种组成具有一定差异 (表 3)。在低桉树密度下, 黄牛木 *Cratogeomys ligustrinum*、樟树是主要的优势种, 黄牛木的个体数量多, 相对多度大, 樟树的平均胸径大, 相对基盖度大。在中桉树密度下, 尾巨桉是主要的优势种, 樟树、黄牛木为次优势种, 尾巨桉的相对多度和相对基盖度大, 黄牛木的相对多度大。在高桉树密度下, 尾巨桉是主要优势种, 重要值达 30.54, 尾巨桉的相对多度和相对基盖度均明显大于其他树种。

2.3 不同桉树密度下桉阔林组成差异

从科的差异性来看, 不同桉树密度林分差异性最小的是: 低 vs 中, 低密度和中密度相同科的数量有 21 个, 两者科的总数是 27 个, 不同科的数量占总科数的比例为: 22.22%。较高的是: 低 vs 高 (42.86%), 最高的是: 低 vs 中 vs 高 (44.83%)。从属的差异性来看, 差异性最小的是: 中 vs 高 (40%), 较高的是: 低 vs 高

表 1 不同桉树密度下优势科的物种组成和个体数

Table 1 Species composition and individual number of dominant families under different *eucalyptus* densities

桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	科 Family	物种数 Number of Species	物种数百分比 /% Percentage of species	个体数 Number of individuals	个体数百分比 /% Percentage of individuals
低 Low	金丝桃科 Hypericaceae	1	2.70	316	30.53
	大戟科 Euphorbiaceae	5	13.51	118	11.40
	椴树科 Tiliaceae	1	2.70	109	10.53
	樟科 Lauraceae	2	5.41	99	9.57
	桑科 Moraceae	4	10.81	74	7.15
	漆树科 Anacardiaceae	3	8.11	74	7.15
	榆科 Ulmaceae	1	2.70	60	5.80
	桃金娘科 Myrtaceae	1	2.70	59	5.70
	山茶科 Theaceae	2	5.41	24	2.32
	芸香科 Rutaceae	2	5.41	19	1.84
	鼠李科 Rhamnaceae	1	2.70	17	1.64
中 Medium	金丝桃科 Hypericaceae	1	2.50	211	19.56
	桃金娘科 Myrtaceae	2	5.00	205	19.00
	樟科 Lauraceae	3	7.50	152	14.09
	大戟科 Euphorbiaceae	4	10.00	119	11.03
	椴树科 Tiliaceae	1	2.50	70	6.49
	芸香科 Rutaceae	3	7.50	48	4.45
	榆科 Ulmaceae	2	5.00	48	4.45
	壳斗科 Fagaceae	2	5.00	40	3.71
	金缕梅科 Hamamelidaceae	1	2.50	32	2.97
	山茶科 Theaceae	1	2.50	30	2.78
	桑科 Moraceae	3	7.50	28	2.59
高 High	桃金娘科 Myrtaceae	1	3.23	234	32.77
	樟科 Lauraceae	3	9.68	93	13.03
	大戟科 Euphorbiaceae	5	16.13	76	10.64
	金丝桃科 Hypericaceae	1	3.23	63	8.82
	榆科 Ulmaceae	1	3.23	63	8.82
	椴树科 Tiliaceae	1	3.23	57	7.98
	山茶科 Theaceae	1	3.23	32	4.48
	芸香科 Rutaceae	2	6.45	17	2.38
	胡桃科 Juglandaceae	1	3.23	17	2.38
	五加科 Araliaceae	1	3.23	15	2.10
	桑科 Moraceae	2	6.45	13	1.82

(51.22%)，最高的是：低 vs 中 vs 高 (58.7%)。从种的差异性来看，变化与属的差异性变化一致。总的看来，桉树密度差异越大，两者在科属种的差异性也随着增大 (表 4)。

不同桉树密度下林分结构和物种多样性的差

异如表 5 所示，可以看出，不同桉树密度林分的物种丰富度和个体密度没有显著差异，但胸高断面面积、平均高度、平均胸径均有极显著差异 ($P < 0.01$)。从多重比较分析结果来看，不同桉树密度林分间的胸高断面面积、平均胸径在中、高桉树密

表 2 不同桉树密度下优势属的物种组成和个体数

Table 2 Species composition and individual number of dominant genus under different *eucalyptus* densities

桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	属 Genus	物种数 Species	物种数百分比 /% Percentage of species	个体数 Number of individuals	个体数百分比 /% Percentage of individuals
低 Low	黄牛木属 <i>Cratoxylum</i>	1	2.70	316	30.53
	破布叶属 <i>Microcos</i>	1	2.70	109	10.53
	土蜜树属 <i>Bridelia</i>	1	2.70	105	10.14
	樟属 <i>Cinnamomum</i>	2	5.41	99	9.57
	榕属 <i>Ficus</i>	4	10.81	74	7.15
	朴属 <i>Celtis</i>	1	2.70	60	5.80
	桉属 <i>Eucalyptus</i>	1	2.70	59	5.70
	漆属 <i>Toxicodendron</i>	1	2.70	57	5.51
	木荷属 <i>Schima</i>	1	2.70	19	1.84
	雀梅藤属 <i>Sageretia</i>	1	2.70	17	1.64
中 Medium	枫香树属 <i>Liquidambar</i>	1	2.70	12	1.16
	黄牛木属 <i>Cratoxylum</i>	1	2.50	211	19.56
	桉属 <i>Eucalyptus</i>	1	2.50	201	18.63
	樟属 <i>Cinnamomum</i>	2	5.00	149	13.81
	土蜜树属 <i>Bridelia</i>	1	2.50	112	10.38
	破布叶属 <i>Microcos</i>	1	2.50	70	6.49
	朴属 <i>Celtis</i>	1	2.50	44	4.08
	锥属 <i>Castanopsis</i>	2	5.00	40	3.71
	枫香树属 <i>Liquidambar</i>	1	2.50	32	2.97
	吴茱萸属 <i>Evodia</i>	2	5.00	31	2.87
高 High	木荷属 <i>Schima</i>	1	2.50	30	2.78
	榕属 <i>Ficus</i>	3	7.50	28	2.59
	桉属 <i>Eucalyptus</i>	1	3.23	234	32.77
	樟属 <i>Cinnamomum</i>	2	6.45	92	12.89
	土蜜树属 <i>Bridelia</i>	1	3.23	67	9.38
	黄牛木属 <i>Cratoxylum</i>	1	3.23	63	8.82
	朴属 <i>Celtis</i>	1	3.23	63	8.82
	破布叶属 <i>Microcos</i>	1	3.23	57	7.98
	木荷属 <i>Schima</i>	1	3.23	32	4.48
	黄杞属 <i>Engelhardtia</i>	1	3.23	17	2.38
	鹅掌柴属 <i>Schefflera</i>	1	3.23	15	2.10
	榕属 <i>Ficus</i>	2	6.45	13	1.82
	吴茱萸属 <i>Evodia</i>	1	3.23	9	1.26

度间无显著差异, 其余的两两比较均有显著差异。随着桉树密度的升高, 林分的胸高断面面积、平均高度、平均胸径也随着增加。

2.4 不同桉树密度下桉阔林径级结构

径级结构是反映林分数量特征的重要指标之

一^[21-22], 不同桉树密度下桉阔林径级结构如图 1 所示, 其中, 低、中这两种桉树密度的林分径级结构呈倒“J”型分布, 说明其更新良好, 表现出林分结构稳定与生长状况良好的趋势。高桉树密度的径级结构呈峰型分布, 说明其群落乔木层开

表 3 不同桉树密度下优势物种组成
Table 3 Dominant species composition under different *eucalyptus* densities

桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	种名 Species	多度 Abundance	频度 Frequency	基盖度 Basal coverage	相对多度 /%RA	相对频度 /%RF	相对基盖度 /%RB	重要值 /%IV	
低 Low	黄牛木 <i>Cratoxylum ligustrinum</i>	316	11	7 267	30.53	7.19	14.90	17.54	
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	86	11	12 251	8.31	7.19	25.12	13.54	
	尾巨桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>E.grandi</i>	59	9	8 305	5.70	5.88	17.03	9.54	
	土蜜树 <i>Bridelia tomentosa</i>	105	11	4 001	10.14	7.19	8.21	8.51	
	破布叶 <i>Microcos paniculata</i>	109	7	2 885	10.53	4.58	5.92	7.01	
	木荷 <i>Schima superba</i>	19	6	5 030	1.84	3.92	10.31	5.36	
	朴树 <i>Celtis tetrandra</i>	60	9	1 914	5.80	5.88	3.92	5.20	
	对叶榕 <i>Ficus hispida</i>	58	10	1 214	5.60	6.54	2.49	4.88	
	野漆树 <i>Toxicodendron</i>	57	10	258	5.51	6.54	0.53	4.19	
	阴香 <i>Cinnamomum burmanii</i>	13	4	1 668	1.26	2.61	3.42	2.43	
	中 Medium	尾巨桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>E.grandi</i>	201	14	36 260	18.63	8.14	37.77	21.51
		樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	115	14	19 339	10.66	8.14	20.15	12.98
黄牛木 <i>Cratoxylum ligustrinum</i>		211	12	5 492	19.56	6.98	5.72	10.75	
土蜜树 <i>Bridelia tomentosa</i>		112	14	6 227	10.38	8.14	6.49	8.34	
破布叶 <i>Microcos paniculata</i>		70	11	1 794	6.49	6.40	1.87	4.92	
朴树 <i>Celtis tetrandra</i>		44	11	2 716	4.08	6.40	2.83	4.43	
阴香 <i>Cinnamomum burmanii</i>		34	8	4 644	3.15	4.65	4.84	4.21	
木荷 <i>Schima superba</i>		30	3	3 991	2.78	1.74	4.16	2.89	
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>		32	4	2 319	2.97	2.33	2.42	2.57	
箬欖花椒 <i>Zanthoxylum avicennae</i>		17	7	1 128	1.58	4.07	1.17	2.27	
高 High		尾巨桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>E.grandi</i>	234	9	39 381	32.77	7.50	51.34	30.54
		樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	58	9	9 539	8.12	7.50	12.44	9.35
	木荷 <i>Schima superba</i>	32	6	8 645	4.48	5.00	11.27	6.92	
	土蜜树 <i>Bridelia tomentosa</i>	67	9	2 737	9.38	7.50	3.57	6.82	
	黄牛木 <i>Cratoxylum ligustrinum</i>	63	8	2 715	8.82	6.67	3.54	6.34	
	朴树 <i>Celtis tetrandra</i>	63	7	2 952	8.82	5.83	3.85	6.17	
	破布叶 <i>Microcos paniculata</i>	57	8	2 260	7.98	6.67	2.95	5.87	
	阴香 <i>Cinnamomum burmanii</i>	34	7	3 383	4.76	5.83	4.41	5.00	
	鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	15	5	738	2.10	4.17	0.96	2.41	
	箬欖花椒 <i>Zanthoxylum avicennae</i>	8	6	480	1.12	5.00	0.63	2.25	

表 4 不同桉树密度下桉阔林的科属种差异性

Table 4 The difference of family, genus and species of eucalyptus–broadleaved compound forest under different *eucalyptus* densities

指标 Index	桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density			
	低 vs 中 Low vs Medium	低 vs 高 Low vs High	中 vs 高 Medium vs High	低 vs 中 vs 高 Low vs Medium vs High
相同科数 Number of the same families	21	16	20	16
总科数 Total number of families	27	28	28	29
科的差异性 /% Families differences	22.22	42.86	28.57	44.83
相同属数 Number of the same genus	25	20	24	19
总属数 Total number of genus	42	41	40	46
属的差异性 /% Genus differences	40.48	51.22	40.00	58.70
相同种数 Number of the same species	27	21	25	20
总物种数 Total number of species	50	47	46	55
种的差异性 /% Species differences	46.00	55.32	45.65	63.64

表 5 不同桉树密度下桉阔林结构和物种多样性差异性

Table 5 The difference of structure and species diversity of eucalyptus–broadleaved compound forest under different *eucalyptus* densities

指标 Index	低 Low	中 Medium	高 High	P 值 P value
物种丰富度 Species richness	13.91 ± 0.49 a	12.29 ± 0.71 a	13.33 ± 0.60 a	0.177
个体密度 / (株 · 400 m ²) Stem density	94.09 ± 11.30 a	77.07 ± 7.54 a	79.33 ± 6.21 a	0.339
胸高断面积 /m ² Basal area	4 433.26 ± 284 a	6 856.73 ± 659.31 b	8 522.82 ± 693.62 b	0.000
平均高度 /m Average height	6.61 ± 0.29 a	10.05 ± 0.63 b	12.16 ± 0.36 c	0.000
平均胸径 /cm Average DBH	6.52 ± 0.44 a	9.54 ± 0.63 b	10.44 ± 0.29 b	0.000

注: 低、中、高分别表示桉树密度为 0~10 株/400 m²、11~20 株/400 m²、21~35 株/400 m²。

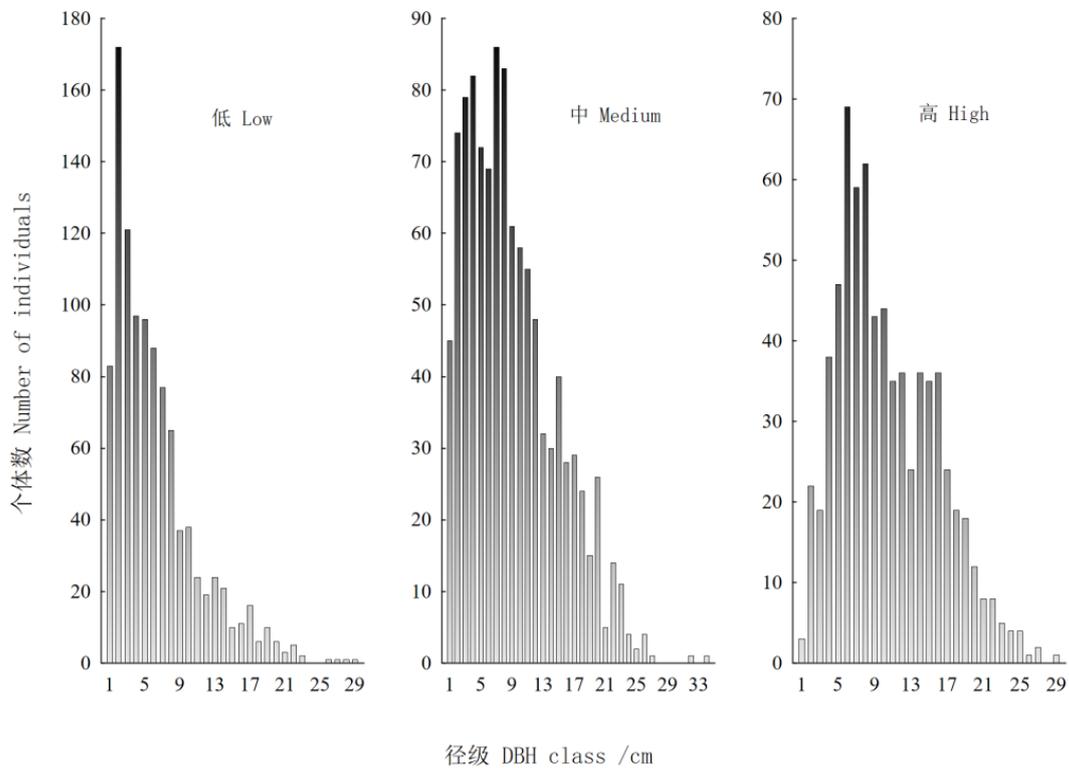
Note: Low, medium and high respectively indicate that *eucalyptus* densities are 0~10 plants/400 m², 11~20 plants/400 m² and 21~35 plants/400 m².

始进入成熟期, 林下更新较弱。从径级分布来看(表 6), 在 1~7 cm 小径级林木中, 随着桉树密度的升高, 小径级林木占比不断减少。在 8~15 cm 中小径级林木中, 随着桉树密度的升高, 中小径级林木占比不断增加。16~27 cm 中径级林木中,

中径级林木变化趋势与中小径级林木一致。

3 结论与讨论

本研究中, 低、中、高桉树密度下桉阔林科的数量分别为 22、26、22 个, 属的数量分别为



注：低、中、高分别表示桉树密度为 0~10 株 /400 m²、11~20 株 /400 m²、21~35 株 /400 m²。
 Note: low, medium and high respectively indicate that eucalyptus densities are 0~10 plants/400 m², 11~20 plants/400 m² and 21~35 plants/400 m².

图 1 不同桉树密度下桉阔林的径级结构 Figure 1 DBH structure of *eucalyptus*-broadleaved compound forest under different *eucalyptus* densities

表 6 不同桉树密度下桉阔林的径级分布 Table 6 DBH distribution of *eucalyptus*-broadleaved compound forest under different *eucalyptus* densities

径级 /cm DBH class	低 Low		中 Medium		高 High	
	个体数 Number of individuals	个体数百分比 /% Percentage of individuals	个体数 Number of individuals	个体数百分比 /% Percentage of individuals	个体数 Number of individuals	个体数百分比 /% Percentage of individuals
1~7	734	70.92	507	46.99	257	35.99
8~15	238	23.00	407	37.72	315	44.12
16~27	61	5.89	163	15.11	141	19.75
≥ 28	2	0.19	2	0.19	1	0.14

注：低、中、高分别表示桉树密度为 0~10 株 /400 m²、11~20 株 /400 m²、21~35 株 /400 m²。
 Note: low, medium and high respectively indicate that *eucalyptus* densities are 0~10 plants/400 m², 11~20 plants/400 m² and 21~35 plants/400 m².

32、35、29 个，物种数量的分别为 37、40、31 个。除去栽植树种外，则低、中、高桉树密度下的桉阔林科的数量分别为 18、21、17 个，属的数量分别为 27、28、23 个，物种数量分别为 31、31、24 个。说明天然更新的科属种数量已经成为桉阔复层林的主要组成部分。在天然科属种占据优势的低桉树密度林分中，最优势科属种分别为

金丝桃科、黄牛木属、黄牛木。本研究中，金丝桃科、黄牛木属的唯一组成物种就是黄牛木，在中国植物志对黄牛木的描述是：生于丘陵或山地的干燥阳坡上的次生林或灌丛中，能耐干旱^[23]，这说明黄牛木是森林演替过程中的先锋树种。随着森林演替，华南地区森林的顶级群落优势种主要为壳斗科、樟科、山茶科、大戟科等植物，比

如, 鼎湖山群落的主要优势科为樟科、大戟科、茜草科等, 优势种为锥 *Castanopsis chinensis*、木荷、黄杞 *Engelhardtia roxburghiana* 等^[24]。在覃林等^[25]研究中, 黑石顶群落主要优势种有黄枝木 *Xanthophyllum hainanensis*、水栗 *Castanopsis nigrescens*、长叶木姜 *Litsea elongata*。在周先叶等^[26]研究中, 黑石顶阳性常绿阔叶林群落主要优势种有为黄樟 *Cinnamomum porrectum*、泡花树 *Meliosma fordii*, 中生性常绿阔叶林群落主要优势种有小叶胭脂 *Artocarpus styracifolius*、硬叶稠 *Lithocarpus lohangu*、福建青冈 *Quercus chungii*。由于鼎湖山群落、黑石顶群落以及研究样地均位于肇庆市, 处于相同的气候带, 有着相近的水、热、土壤等环境条件, 两者具备很高的参考价值。在天然更新物种中, 黄牛木为先锋树种, 其他优势树种还有土蜜树和破布叶, 中国植物志对土蜜树的描述为: 生于山地疏林中或平原灌木林中^[23], 这说明土蜜树也属于喜阳的先锋树种。从天然更新的主要优势种看, 研究样地的天然群落处于阳性常绿阔叶林的早期。

桉树密度越接近的林分, 其科属种组成越相近。这可能是随着桉树密度升高, 桉树对生态位相近的物种有排斥作用, 同时也多了一些桉树的伴生物种, 又或者是桉树改变了林分的结构, 间接改变了林地环境, 进而改变了生存适应的物种。在低桉树密度的林分中, 主要优势种为黄牛木、土蜜树等天然更新树种, 但物种丰富度并没有显著变大, 说明低桉树密度林分并不意味着有更高的物种多样性。随着桉树密度升高, 栽植物种重要性增加成为主要优势种, 物种丰富度没有显著变化, 但优势种从先锋种转变为阳性种, 森林演替逐步推进。不同桉树密度林分的单位面积物种丰富度为 12.29~13.91, 远大于张柳桦等^[27]在四川省新津县研究的不同密度桉树林的物种丰富度, 这其中原因既有本研究样地相对处于低纬度, 受纬度水热作用物种丰富度高, 也有样地人工干扰少, 有利于森林天然更新等原因。

随着桉树密度升高, 样方的胸高断面面积、平均胸径和平均高度均有显著提升, 主要原因是栽植树种, 特别是尾巨桉的数量增加。低、中、高桉树密度下尾巨桉的平均高度是 15.2、16.3 和 17.7 m, 平均胸径是 13.7、14.2 和 13.9 cm; 其他栽植阔叶树的平均高度是 9.4、11.2 和 12.5 m, 平

均胸径是 12.5、13.2 和 13.7 cm; 天然更新树种的平均高度是 5.4、7.1 和 8.0 m, 平均胸径是 4.7、6.5 和 6.7 cm。可以看出, 在平均高度和平均胸径上, 尾巨桉 > 其他栽植阔叶树 > 天然更新树种, 这说明桉树和栽植阔叶树是林分平均高度、平均胸径的主要贡献, 在桉阔复层林中, 桉树位于林分冠层之上, 栽植的阔叶树构成林分冠层, 天然更新树种处于林下。从目前设置的 3 种桉树密度来看, 随着桉树密度升高, 栽植阔叶树和天然更新树种的平均高度和平均胸径均随着升高, 说明在研究设置的桉树密度内, 桉树密度的增加促进了其他树种的生长, 原因可能是先成长的桉树为下层树木提供了相对荫庇的环境, 加剧了下层树木对光照的竞争, 促使它们往高处生长, 同时也带动了胸径的增长。本研究中的 15 年生尾巨桉的平均胸径与张柳桦等^[27]在四川省新津县研究的不同密度桉树林的相近, 但与张培等^[28]在广西友谊关的桉阔混交研究样地中的桉树对比, 本研究中的 15 年生尾巨桉的平均胸径还小于其 6 年生的巨尾桉的平均胸径, 其中的主要原因可能是施肥、抚育的差异导致, 另外也有树种差异、种质差异、立地的土壤肥力等差异。

从径级结构来看, 随着桉树密度的升高, 林分的径级结构从倒“J”型分布向峰型分布发展。倒“J”型分布说明林分处于演替初期, 幼苗更新良好, 群落稳定^[28]。峰型属于中径级个体储备型^[24], 说明林分乔木层成熟, 但幼苗更新较弱。在低桉树密度中, 黄牛木的相对多度最高, 为 30.53%, 接着是破布叶 (10.53%) 和土蜜树 (10.14%), 这 3 个树种均为天然更新, 主要类型为小乔木、乔木, 它们是倒“J”型分布的主要贡献组成。在中桉树密度中, 黄牛木、尾巨桉、樟树、土蜜树的相对多度最高, 分别为 19.56%、18.63%、10.66%、10.38%, 径级结构从倒“J”型分布向峰型分布过渡, 栽植树种贡献度增加。在高桉树密度中, 尾巨桉相对多度高达 32.77%, 径级结构转为峰型分布, 栽植树种成为主要的贡献组成。

桉树是我国南方最主要的速生树种之一, 具有经营周期短、产业链健全、经营技术成熟、种质资源开发深入等重要优点, 但由于长期掠夺式经营, 桉树人工林出现了地力衰退、病虫害严重、生物多样性下降等一系列生态问题。许多专家学

者进行了一系列的桉树改造试验,一些地方政府也出台了桉树改造的政策措施,但哪些桉改方案较优,桉改后林分的生长状况如何,经济效益和生态效益如何发挥等问题还需要继续深入讨论。本研究提供了粤西地区的一种桉阔复层混交方案,并初步研究得出了桉阔复层林的结构和组成,得到了较好的桉树密度范围,可为地方政府的桉改政策提供理论指导和数据支撑。下一步需深入挖掘桉阔复层林在林分碳汇、土壤肥力、生物多样性保护、林木收获等方面发挥的生态效益和经济效益,以期为桉改、人工林经营等提供科学参考。

参考文献

- [1] 李超. 正视桉树人工林生态问题[J]. 桉树科技, 2015, 32(4): 46-50.
- [2] 许冰, 李宝福, 郑耀三, 等. 桉树择伐后套种3种阔叶树的生长及土壤理化性状效应分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4): 47-51.
- [3] ARNOLD R J, XIE Y J, MIDGLEY S J. Emergence and rise of eucalypt veneer production in China[J]. International Forestry Review, 2013, 15(1): 33-47.
- [4] 杜埕榕. 四川乐山市巨尾桉人工林林分质量评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [5] 刘雅静, 张书源, 李静, 等. 坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(4): 48-55.
- [6] FLORENCE R G. Cultural problems of Eucalyptus as exotics[J]. Commonwealth Forestry Review, 1986, 65(2): 141-163.
- [7] LIU H, LI J H. The study of the ecological problems of eucalyptus plantation and sustainable development in Maoming Xiaoliang[J]. Journal of Sustainable Development, 2010, 3(1): 197.
- [8] WASSIE A, WUBALEM A, LIANG J. Effects of exotic *Eucalyptus* spp. plantations on soil properties in and around sacred natural sites in the northern Ethiopian Highlands[J]. AIMS Agriculture and Food, 2016, 1(2): 175-193.
- [9] 于福科, 黄新会, 王克勤. 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.
- [10] 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.
- [11] 邓海燕, 胡绍平, 莫晓勇. 桉树人工混交林营造技术研究综述[J]. 广西林业科学, 2017, 34(4): 53-58.
- [12] Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(8): 1129-1142.
- [13] 刘志龙, 蔡道雄, 贾宏炎, 等. 我国南方人工林近自然化改造模式和效益分析: 基于中国林科院热林中心实践研究[J]. 林业科技通讯, 2016(10): 3-7.
- [14] 尤龙辉, 聂森, 陈金章, 等. 桉树林分改造模式对林下植物物种多样性的影响[J]. 林业勘察设计, 2019, 39(1): 16-22.
- [15] 李渊顺. 刨花楠与桉树混交造林的生长效应研究[J]. 绿色科技, 2020(1): 1-3.
- [16] 温远光, 张祖峰, 周晓果, 等. 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响[J]. 广西科学, 2020, 27(2): 111-119.
- [17] 许冰, 陈国彪, 林祖荣, 等. 桉树壳菜果混交林生长量及生物量分析[J]. 林业调查规划, 2020, 45(4): 128-131.
- [18] 王纪杰, 王炳南, 李宝福. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 8-14.
- [19] 广东省德庆林场, 广州沛森园林景观设计有限公司. 广东省德庆林场森林经营方案[Z]. 2018: 1-2.
- [20] 李俊清, 牛树奎, 刘艳红. 森林生态学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [21] 丁晖, 杨云方, 徐海根, 等. 武夷山典型常绿阔叶林物种组成与群落结构[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1142-1154.
- [22] 孙越, 夏富才, 赵秀海, 等. 张广才岭温带次生针阔混交林物种组成和群落结构特征[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3425-3436.
- [23] 中国科学院植物研究所. 中国植物志[Z]. 2004.
- [24] 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林20公顷样地群落特征研究[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 274-286.
- [25] 覃林, 余世孝, 王永繁. 广东黑石顶不同森林类型的优势种分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(5): 83-85.
- [26] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 等. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中的群落动态[J]. 植物学报, 1999, 41(8): 877-886.
- [27] 张柳桦, 齐锦秋, 柳苹玉, 等. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(1): 166-175.
- [28] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 1-7.
- [29] 祝燕, 赵谷风, 张俐文, 等. 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地: 群落组成与结构[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 262-273.