

不同桉树密度下桉树-阔叶树复层林物种多样性研究*

苏永新¹ 龚益广² 王 锋² 徐明锋³
何春梅³ 梁育兴² 王 凯² 李春永²(1. 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; 2. 广东省德庆林场, 广东 德庆 526600;
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 采用多响应置换检验、指示种分析等多元统计方法, 分析桉树-阔叶树复层林中不同林分的物种多样性、物种组成和指示植物, 揭示不同林分的物种多样性变化规律。结果表明: 低桉树密度林的物种多样性和个体数稍微高于中、高桉树密度林, 中等桉树密度林的均匀度高于其他两者; 3 种林分的个体数主要组成均为优势种, 但物种主要组成为常见种和偶见种; 在种面积曲线拟合的结果中, 同等面积下, 不同桉树密度林分拟合的物种数大小主要为低>中>高; 在单因素方差分析中, 物种多样性、均匀度、优势度、个体数等指标在不同桉树密度林分间均无显著差异, 在多响应置换检验分析中, 物种组成与分布在不同桉树密度间有极显著差异; 所有林分共有 7 种指示植物, 其中低、高桉树密度林分的指示植物分别有 5 种、2 种, 而中等桉树密度林分没有指示值和 p 值达到标准的指示植物。当桉树密度处于一定范围内时, 桉树-阔叶树复层林可维持较高的物种多样性水平。

关键词 桉树密度; 桉树-阔叶树复层林; 物种多样性; 物种组成; 物种分布

中图分类号: Q948.15 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 02-0033-09

Species Diversity of *Eucalyptus*-Broadleaved Compound Forest with different *Eucalyptus* DensitiesSU Yongxin¹ GONG Yiguang² WANG Feng² XU Mingfeng³
HE Chunmei³ LIANG Yuxing² WANG Kai² LI Chunyong²

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

Abstract This study used multivariate statistical methods such as multi-response permutation procedures and indicator species analysis to analyze the species diversity, species composition and indicator plants of different stands in the eucalyptus-broadleaved compound forest, revealing the changes of species diversity in different stands. The results showed that the species diversity and number of individuals in the low *eucalyptus* density forest was slightly higher than that of the medium and high *eucalyptus* density forest, while the evenness of the medium *eucalyptus* density forest was higher than the other two. The main plant components of the three stands were dominant species, but the main species components were common species and occasional species. In the species area curve fitting, the number of species fitting of different *eucalyptus* densities were mainly as follows: low>medium>high. In one-way ANOVA, species diversity, evenness, dominance and number of individuals were

* 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: 苏永新 (1966—), 男, 高级工程师, 主要从事森林经营管理, E-mail: 776970726@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, E-mail: 735871702@qq.com。

not significantly different among different *eucalyptus* densities. In the multi-response permutation procedures analysis, species composition and distribution were significantly different among different *eucalyptus* densities. There were 7 indicator plants in all stands, of which there were 5 and 2 indicator plants in low and high *eucalyptus* density stands, respectively, while there were no indicator plants in medium *eucalyptus* density stands with both indicator values and *p* values above the standard. When the *eucalyptus* density was within a certain range, the *eucalyptus*-broadleaved compound forest could maintain a high level of species diversity.

Key words *eucalyptus* density; *eucalyptus*-broadleaved compound forest; species diversity; species composition; species distribution

桉树具有生长快、干型通直、适应性强、应用性广等特点,它用不到3%的林地面积解决了18%的工业用材需求,是最重要的商业用材树种之一^[1-3]。但目前国内大多数桉树林分的轮伐期为6 a上下,属于高度集约经营的森林,在连续经营中,对林地的人为干扰变得十分频繁,导致了物种多样性的下降^[4]。经过多年的经济发展,人们对森林生态效益的追求渐渐超越了森林提供的木材经济效益,形成新的以生态保护为主,兼顾经济效益的森林经营格局。营造桉树—阔叶树复层林是新时期重要的森林经营模式^[5-6]。大片连栽的桉树纯林模式存在较大的生态风险,营造桉树—阔叶树复层林可以有效减少病虫害的发生,更好的发挥森林稳定性^[7]。我国南方地区以山地为主,如果科学利用好这些山地资源,在保证发挥森林生态效益的前提下开发其经济效益,对山区的经济发展和林农的收入提高将有明显的作用。有研究表明,桉树—阔叶树复层林可更好的发挥森林碳汇效益^[8-10]、改善土壤理化性状^[10-11]、减少病虫害发生^[7]等。桉树—阔叶树复层林既兼顾了桉树的短期经济效益,也发挥了阔叶树的长期生态和经济效益^[12]。

目前,对桉树—阔叶树复层林的研究主要集中在林分生长效果、生产力、生物量、经营模式^[13-16]等。桉树混交林的研究相对较多,但集中点主要在生长效应^[17-18]、生物量^[16, 19]、土壤^[20-22]、林下植物^[23]等方面,对林分物种多样性的研究相对较少。已有的研究表明,桉树混交林能明显提高林分的物种多样性^[24-25],但研究地的气候^[26]、林分配置^[27-28]等均对林分的物种多样性有较大影响,在粤西山地营造桉树—阔叶树复层林的物种多样性如何尚鲜见报道,需要进行相关研究,为广东的桉树经营和改造工作提供数据支撑和理论指导。

本研究样地坡度较陡,平均坡度达32°,土壤石砾含量高,立地条件较差。在此地营造桉树—阔叶树复层林并探索其物种多样性变化情况,可为困难立地的桉树—阔叶树复层林森林经营提供有力的数据支撑和理论指导。本研究旨在回答以下问题:(1)不同桉树密度的桉树—阔叶树复层林的物种多样性特征如何?(2)不同桉树密度的桉树—阔叶树复层林的物种多样性、物种组成和分布的差异。(3)不同桉树密度林分的指示植物。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究样地位于广东省德庆林场的富石管护片区,广东省德庆林场位于肇庆市德庆县和封开县,紧邻北回归线,经度111°22′~112°06′,纬度23°07′~23°25′,总面积8 753.65 hm²。林场处于南亚热带季风气候区,春季潮湿雾气笼罩,夏季酷热,秋季干燥凉爽,冬季少有冰霜。年均温19~22℃,最热月均温28.8℃,极端最高温38℃,最冷月均温13.7℃,极端低温-2.2℃,积温6 825~8 168℃。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。地形属低山高丘,山势连绵起伏,沟壑交错,海拔多在200~600 m,最高海拔为象牙顶947 m。大部分林地地势较陡,坡度在25°~40°。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,母岩分别为泥质页岩、黑色页岩和红色粉砂岩,土壤酸性,表土层多为中壤至重壤,下层为重壤至轻粘。森林植被属亚热带季风常绿阔叶林区,林场主

要森林植被为马尾松、杉木和桉树人工林，以及红锥、火力楠、降香黄檀等珍贵阔叶林^[29]。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、木荷 *Schima superba*、阴香 *Cinnamomum burmanii*、枫香 *Liquidambar formosana* 等，在2005年补植了尾巨桉，营造桉树-阔叶树复层林。2004—2005年每年进行两次除草割灌抚育。在2012、2013、2014、2015和2019年进行了修枝。

1.2 样地设置

样地调查以20 m×20 m样方为基本单位进行，按照每个样方的桉树密度 (*Eucalyptus* density, ED) 进行划分，划分为低、中、高桉树密度，分别为 $ED \leq 10$ 、 $11 < ED \leq 20$ 、 $20 < ED \leq 35$ 。低、中、高桉树密度分别调查9、14、11个样方。在样地调查过程中，每个20 m×20 m样方分成4个10 m×10 m小样方，调查方向以西北角的小样方为起点，逆时针调查。

1.3 植被调查

植物调查时间为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树种名、胸径、树高、枝下高、冠幅等。对活立木进行测定和记录，主干1.3 m以下有分枝的植株，每个分枝均按单株立木进行调查，并标记分枝。

每公顷个体数不多于1株的物种定义为稀有种，1~10株的为偶见种，10~100株的为常见种^[30-31]，多于100株的为优势种^[32]。

1.4 数据分析

1.4.1 物种多样性指标 物种多样性指数^[33]采用物种丰富度 S (Species richness)、辛普森指数 D (Simpson index)、香浓—维纳指数 H' (Shannon-Wiener index)、均匀度指数 E (Pielou index)、优势种指数 $D_{(B-P)}$ (Berger-Parker dominance)：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i \times P_i)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \times \ln P_i)$$

$$E = H' / \ln S$$

$$D_{(B-P)} = N_{\max} / N$$

式中： S 为物种数； P_i 为样方中属于 i 种的所

有个体在全部个体中的比例。 $N_{\max}$ 为样方内多度最高的物种的个体数， N 为样方内个体总数。优势度指数可用来表征物种水平的多度分布均匀情况，即生态优势度。

1.4.2 多响应置换检验和指示种分析 采用多响应置换检验 (multi-response permutation procedures, MRPP) 来分析不同桉树密度林分间的物种分布差异。MRPP是一种非参数统计方法，广泛用于生态学数据分析，检验两个或者更多群落之间物种分布的差异^[34-35]， T (Test statistic) 绝对值越大，则组间分离越大， A (Agreement statistic) 值为描述组内数据同质性的统计量， A 值越大，组内同质性越高^[36-37]。

采用指示种分析 (indicator species analysis, ISA) 来研究不同桉树密度林分间指示植物、指示值 (IV, indicator value) 的差异，应用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 检验来分析检验每种植物指示值的显著性^[34, 38]，设定指示值 $IV \geq 20$ 且 $p < 0.05$ 的植物为不同林分的指示植物^[36, 39]。

1.4.3 数据统计软件 物种多样性指标、种面积曲线在软件 Excel 2013 和 PC-ORD 7.0 (MjM Software, Gleneden Beach, OR, USA) 中进行计算。

多样性特征统计描述、物种序位曲线图、物种组成、种面积曲线图、物种多样性差异箱型图 (单因素方差分析)、物种多样性差异的 Kruskal-Wallis 非参数检验、MRPP 分析、指示种分析等在 Excel 2013 中进行数据整理，在 Statistica 8.0 (Statsoft, Inc. Tulsa, OK, USA) 统计分析和做图。

2 结果与分析

2.1 桉树-阔叶树复层林的多样性特征

不同桉树密度林分的多样性特征如表1所示，物种丰富度、辛普森指数、香浓—维纳指数常作为衡量物种多样性大小的指标^[40-41]，由这3个指标可以看出，低桉树密度的林分物种多样性稍微高于中、高桉树密度的林分。个体数的大小排序则为低>高>中。在均匀度指数、优势度指数方面，中等桉树密度林分优势度较低，均匀度较高，低桉树密度林分居，高桉树密度林分则是优势度相对较高，均匀度较低。从变异系数来看，随着桉树密度增大，物种多样性指标的变异系数变小。总的看来，物种多样性指标在不同桉树密度林分间的差异较小。

2.2 桉树－阔叶树复层林的物种组成

不同桉树密度林分的物种多度序位曲线如图 1 所示，中等桉树密度林分的曲线较缓，低桉树密度林分居中，高桉树密度林分较陡，随着曲线由缓变陡，林分各物种多度差异增大，物种优势度增大，均匀度减少。由表 2 可知，在偶见种中，低桉树密度林在个体数、物种数上均最少，中等桉树密度林则最多。在优势种中，低桉树密度林在个体数、物种数上均最多，中等桉树密度林则在个体数百分比和物种数百分比上均最少。3 种林分的个体数主要组成均为优势种，但物种主要组成成为常见种和偶见种。

种面积曲线如图 2 所示，3 种林分的曲线由上到下大致分别为低、中、高，说明在同等面积下，拟合的物种数大小主要为低 > 中 > 高。当样方数

量在 2 个或以下时，曲线处于快速上升期，样方数量在 2 个时，拟合的物种数大小为低（19.12）> 高（17.67）> 中（17.18），拟合的物种占比为 51.68%（低）、42.95%（中）、57%（高）；当样方数量在 3~5 个时，曲线处于较快上升期，样方数量在 5 个时，拟合的物种数大小为低（26.92）> 中（25.93）> 高（23.37），拟合的物种占比为 72.76%（低）、64.83%（中）、75.39%（高）；当样方数量在 6~9 个时，曲线处于缓慢上升期。

2.3 物种多样性在不同桉树密度林分的差异

不同桉树密度林分的物种多样性差异如图 3 所示，6 个指标在不同桉树密度林分间均无显著差异。个体数的大小变化为低 > 高 > 中；物种丰富度、辛普森指数和香浓－维纳指数这 3 个衡量物种多样性的指数变化不一致，但低桉树密度林分

表 1 不同桉树密度林分多样性特征
Table 1 The diversity characteristics of stands with different *eucalyptus* densities

桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	多样性指标 Diversity index	统计指标 Statistical index			
		平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 /% Coefficient of variation
低 Low	<i>S</i>	13.91	11.00	16.00	11.79
	<i>N</i>	94.09	55.00	164.00	39.84
	<i>D</i>	0.81	0.61	0.90	10.79
	<i>H</i>	2.10	1.45	2.48	14.17
	<i>E</i>	0.80	0.61	0.91	13.15
	<i>D_(B-P)</i>	0.33	0.14	0.60	42.33
中 Medium	<i>S</i>	12.29	9.00	18.00	21.52
	<i>N</i>	77.07	41.00	143.00	36.58
	<i>D</i>	0.82	0.64	0.90	8.10
	<i>H</i>	2.01	1.50	2.57	13.61
	<i>E</i>	0.81	0.65	0.92	9.31
	<i>D_(B-P)</i>	0.30	0.19	0.57	33.98
高 High	<i>S</i>	13.33	10.00	16.00	13.52
	<i>N</i>	79.33	55.00	114.00	23.47
	<i>D</i>	0.80	0.77	0.85	3.55
	<i>H</i>	1.99	1.85	2.20	5.59
	<i>E</i>	0.77	0.72	0.84	5.18
	<i>D_(B-P)</i>	0.36	0.24	0.44	16.12

注：低、中、高分别表示桉树密度为 0~10 株 · (400 m²)⁻¹、11~20 株 · (400 m²)⁻¹、21~35 株 · (400 m²)⁻¹。
Note: low, medium and high respectively indicate that *eucalyptus* densities are 0-10 plants · (400 m²)⁻¹, 11-20 plants · (400 m²)⁻¹ and 21-35 plant · (400 m²)⁻¹.

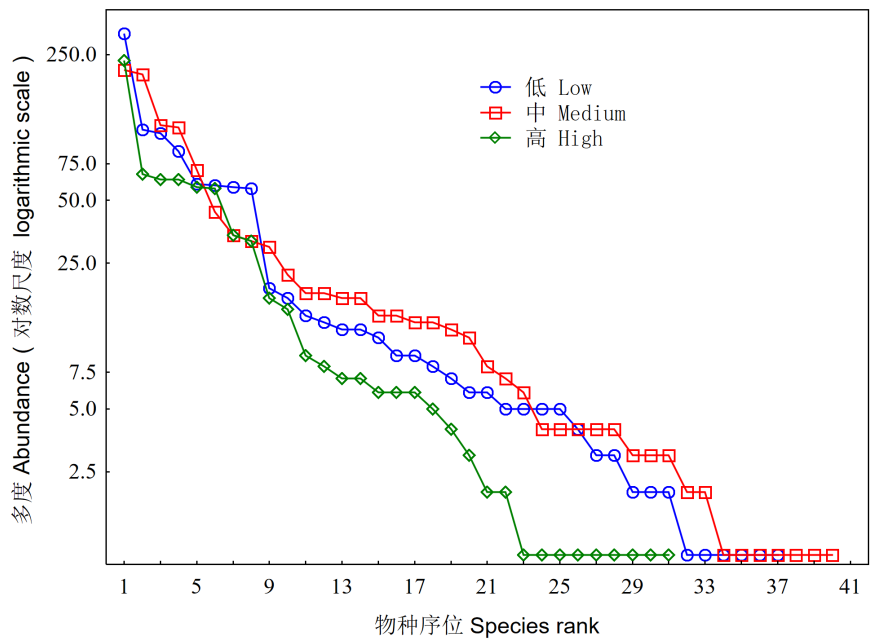


图 1 不同桉树密度林分的物种多度序位曲线

Figure 1 Rank–abundance curves of the species of stands with different *eucalyptus* densities

表 2不同桉树密度林分的物种组成

Table 2 Species composition of stands with different *eucalyptus* densities

物种 Species	桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	个体数 Number of individuals	物种数 Number of Species	个体数百分比 /% Percentage of individuals	物种数百分比 /% Percentage of species
偶见种 Occasional species	低	18	11	1.74	29.73
	中	40	17	3.71	42.50
	高	20	13	2.80	41.94
常见种 Common species	低	167	18	16.14	48.65
	中	330	18	30.58	45.00
	高	152	12	21.29	38.71
优势种 Dominant species	低	850	8	82.13	21.62
	中	709	5	65.71	12.50
	高	542	6	75.91	19.35

总体较其他两种林分高；均匀度指数和优势度指数这两个衡量物种分布均匀度的指数的变化可以看出中等桉树密度林分的物种分布比较均匀，低桉树密度林分居中，高桉树密度林分的优势度比较突出。

用多响应置换检验分析不同桉树密度林分间物种组成和分布的差异（表 3），除了低、中这两种桉树密度林分，物种组成与分布在其他不同桉树密度两两间均有极显著差异。低、高这两种桉

树密度林分的组间分离最大（ $|T| = 6.062$ ），低、中这两种桉树密度林分的组间分离最小（ $|T| = 1.363$ ），随着桉树密度差距增大，组间分离变大，物种的组成与分布的差异随着变大。

2.4 不同桉树密度林分的指示植物

不同桉树密度林分的指示植物如表 4 所示，各林分共有 7 种指示植物，其中低、高桉树密度林分的指示植物分别有 5 种、2 种，而中等桉树密度林分没有指示值和 p 值达到标准的指示植物。

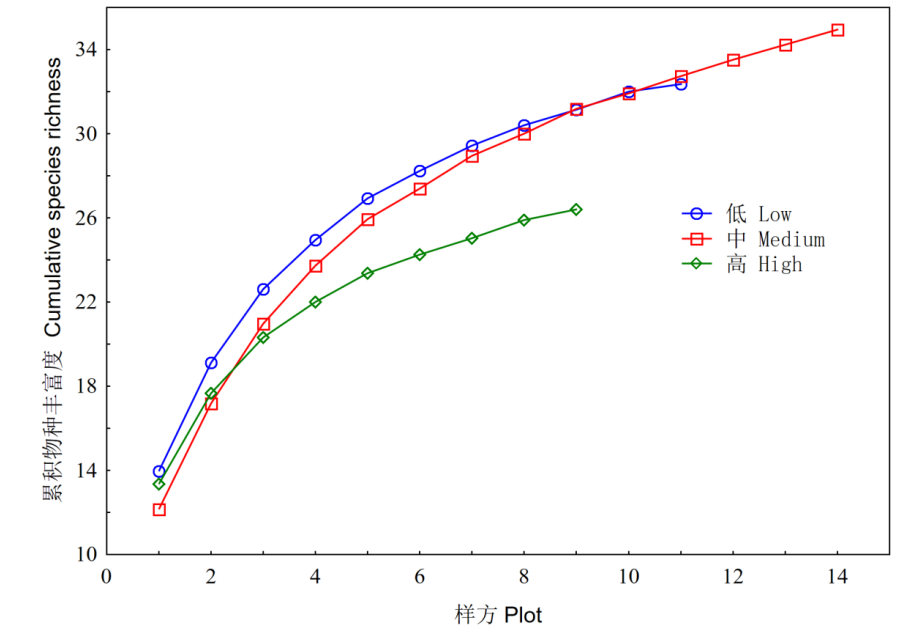
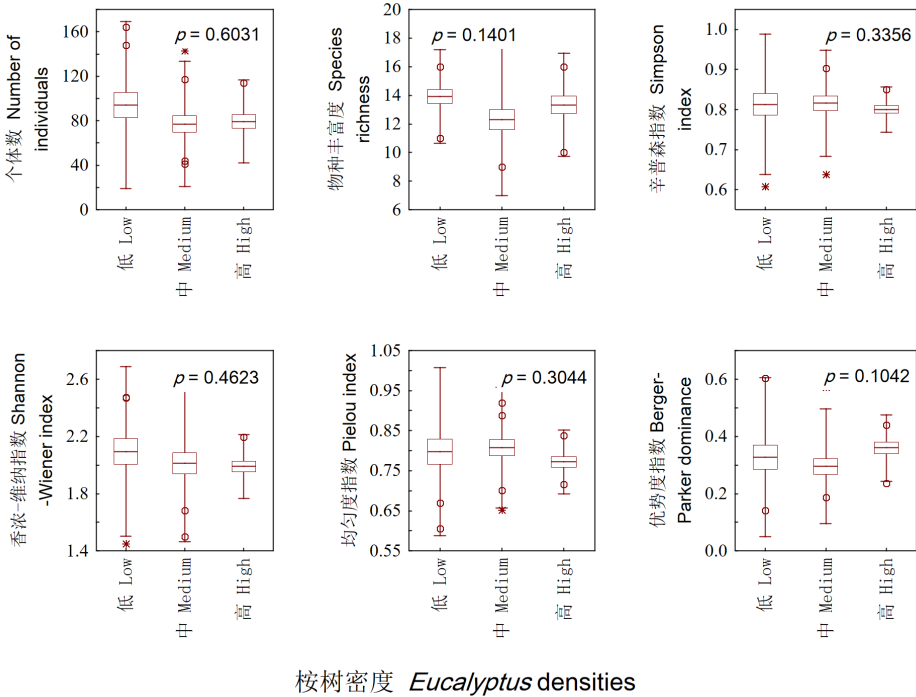


图 2 不同桉树密度林分的种面积曲线
Figure 2 Species-area curves of stands with different *eucalyptus* densities



桉树密度 *Eucalyptus* densities
图 3 不同桉树密度林分的物种多样性差异
Figure 3 The difference of species diversity of stands with different *eucalyptus* densities

由于低桉树密度保留的桉树较少，主要优势种为天然更新的黄牛木、土蜜树 *Bridelia tomentosa* 等，处于森林演替的早中期，林下阳光资源相对更充足，更适合一些喜阳的先锋树种生长，因此，像

野漆树、黄牛木、雀梅藤、盐肤木等喜阳先锋树种成为低桉树密度林的指示植物。在高桉树密度林分中，尾巨桉数量多优势大，成为指示植物。在中桉树密度林分中，以栽植的尾巨桉、樟树、

表 3 多响应置换检验分析不同桉树密度林分间物种组成和分布差异

Table 3 Multi-response permutation procedures (MRPP) to test for significance of variation in plant species composition of stand with different *eucalyptus* densities

项目 Item	组间比较 Groups compared	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
总体比较 Overall comparison	低：中：高 Low vs. Medium vs. High	-4.591	0.083	0.002
	低：中 Low vs. Medium	-1.363	0.028	0.092
成对比较 Pairwise comparison	低：高 Low vs. High	-6.062	0.139	0.000
	中：高 Medium vs. High	-3.587	0.044	0.004

表 4 不同桉树密度林分的指示植物

Table 4 Plant species with a significant indicator value (IV) ≥ 20 for different *eucalyptus* densities

指示植物 Indicator specie	桉树密度 <i>Eucalyptus</i> density	指示值 Indicator value	<i>p</i> 值 <i>p</i> value
野漆树 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	低 Low	76.1	0.000 4
对叶榕 <i>Ficus hispida</i>	低 Low	66.0	0.001 0
黄牛木 <i>Cratoxylum ligustrinum</i>	低 Low	56.6	0.031 0
雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	低 Low	46.0	0.0146
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	低 Low	45.5	0.003 6
尾巨桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> $\times$ <i>E. grandis</i>	高 High	56.9	0.000 2
银柴 <i>Aporosa dioica</i>	高 High	41.1	0.021 8

天然起源的黄牛木、土蜜树共同作为优势种，各优势种的优势地位不明显，也没有数量较多的特有的物种，没有达标的指示植物。

3 结论与讨论

本研究中低、中、高桉树密度林分的香浓维纳指数分别为 2.1、2.01、1.99，比陈传国等^[42]对广东典型植被研究中的人工阔叶林（0.91）、暖性针叶林（1.36）和热性针叶林高（0.97），与其研究中的暖性针阔混交林（2.00）、热性针阔混交林（1.85）和常绿落叶阔叶混交林（2.11）数值接近，比常绿阔叶林（2.21）稍低。这说明桉树-阔叶树复层林分中的物种多样性在广东典型林分的物种多样性中处于中上游位置。但与练琰愉等^[43]对鼎湖山南亚热带常绿阔叶林计算的香浓维纳指数值（2.63）相比，仍相对较低，说明桉树-阔叶树复层林的物种多样性仍有较大的上升空间。

低桉树密度的林分物种多样性高于中、高桉树密度林分，这是因为低桉树密度林分中桉树数量较少，需要的土壤、光照资源随之减少，其他树种获得了更多的资源，有利于其他树种的繁殖

和生长^[44-45]。虽然平均每个样方个体数中低桉树密度林分的个体数最多，但如果只统计林冠层的大树（ $8 \leq \text{DBH}$ ），则平均每个样方个体数排序为高（47.77）>中（38.21）>低（24.27）。而小树（ $1 \leq \text{DBH} < 8$ ）是样地物种的主要组成，占比达 94.5%。高桉树密度林分中大树数量多，其生长所需的资源量大，挤占了小树、幼树的生长空间。随着桉树密度的增加，小树占样地个体数比例不断减少，分别为 74.20%（低）、50.42%（中）、39.78%（高），这也说明了在本研究范围内，桉树等大乔木数量增加导致了林下层植物数量和种类的减少。

中等桉树密度林分的物种序位曲线较缓，说明其各个物种数量分布较为均匀，个体数最多的种为尾巨桉，有 201 株，占比 18.6%。低桉树密度林分的曲线居中，其个体数最多的种为黄牛木，有 316 株，占比 30.5%。高桉树密度林分的曲线相对最陡，个体数最多的种为尾巨桉，有 234 株，占比 32.7%。不同林分物种序位曲线的变化趋势反映了林分中物种数量的差异。另外也可以看出，大多数物种的个体数量较少，说明林分中的物种

主要组成成为偶见种和常见种,但个体数的主要组成成为优势种,这与他人的研究结果一致^[46-47]。

种-面积曲线可以描述物种数随抽样面积的增大而增加的趋势情况^[48],可用于确定调查样地的最小取样面积^[49],有利于森林群落物种多样性的监测与维持^[47]。本研究中,低、中、高这3种林分的曲线趋势均是先快速上升,然后趋向缓慢上升的变化情况。并且低桉树密度林分的拟合物种数多于高桉树密度林分,这可能因为低桉树密度林分的天然更新程度更高,物种更丰富,而高桉树密度林分中的人工种植树木占据了很多资源,一定程度抑制了天然更新物种的生存生长,而人工种植树种一般比较单一。

桉树的密度差异越大,物种组成与分布的差异越大。这可能是因为,随着桉树密度的降低,有更多的其他物种代替了桉树的生态位,获得了桉树减少后剩下的资源,从高桉树密度林分中人工种植树种占据优势逐渐转化为低桉树密度林分中天然更新物种占据优势。低桉树密度林分的指示植物有野漆树、黄牛木、盐肤木等,主要都是喜光的先锋树种,反映了低桉树密度林分中的光照较为充足,正处于天然更新演替初期。高桉树密度林分的指示植物有尾巨桉和银柴,银柴适应于有一定荫蔽程度的林分,说明高桉树密度林分中林冠层比较郁闭。从演替时期来看,高桉树密度林分中除了桉树外,其他优势种如樟树、木荷为本地顶级群落的优势树种,群落更快达到演替顶级,而低桉树密度林分中的优势种如黄牛木,是先锋树种,后期会被其他更顶级的优势种所取代,群落还处于演替初期。从经营角度看,高桉树密度林分中平均胸径更大,蓄积量更高,更符合经营目标。因此,从生态保护和经济效益平衡来考虑,本研究中的高桉树密度林更适合作为经营模式来进行森林经营。

参考文献

[1] 鲁法典,王亭然,秦晓锐.桉树林生态经济风险评价[J].林业经济问题,2020,40(4): 406-411.
[2] 谢耀坚.论中国桉树发展的贡献和可持续经营策略[J].桉树科技,2016,33(4): 26-31.
[3] 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.
[4] 陈法霖,张凯,王芸,等.引进种桉树人工林取代天然次生林对土壤微生物群落结构和功能的影响[J].生态学报,2018,38(22): 8070-8079.
[5] 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].桉树科技,2017,34(4): 53-58.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 尤龙辉,聂森,陈金章,等.桉树林分改造模式对林下植被物种多样性的影响[J].林业勘察设计,2019,39(1): 16-22.
[13] 柯文生.尾巨桉与千年桐复层异龄混交林生长效果分析[J].福建林业,2019(6): 42-44.
[14] 韦菊玲,郭文福,雷丽群,等.南亚热带人工林近自然高效可持续经营模式[J].林业调查规划,2018,43(3): 145-149.
[15] 何金元.柠檬桉与乡土树种复层混交林效果分析[J].安徽农学通报,2008,14(19): 163-164.
[16] 叶绍明,郑小贤,杨梅,等.尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究[J].北京林业大学学报,2008,30(3): 37-43.
[17] 刘媛,陈晓龙,韦大勇,等.大花序桉与闽楠混交林生长效应研究[J].桉树科技,2021,38(2): 29-32.
[18] 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): 31-37.
[19] LUDVICHAK A A, SCHUMACHER M V, VIERA M, et al. Growth, biomass and nutrient stock in mixed-species planting of hybrid *Eucalyptus urograndis* and *Acacia mearnsii* in Southern Brazil[J]. New forests, 2021 (1): 1-17.
[20] XUEMAN H, SHIRONG L, YEMING Y, et al. Different mechanisms underlying the divergent responses of soil respiration components to an introduction of N₂-fixer

- tree species into *Eucalyptus* plantations[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2021.: 308-309.
- [21] 邓海燕, 莫晓勇, 梅嘉仪, 等.桉树人工混交林林分生长与土壤养分研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 95-102.
- [22] 邵文哲, 周晓果, 温远光, 等.桉树与红锥混交对土壤水解酶活性及其化学计量特征的影响[J].广西植物, 2021: 1-14.
- [23] 陈秋海, 周晓果, 朱宏光, 等.桉树与红锥混交对土壤养分及林下植物功能群的影响[J].广西植物, 2021: 1-17.
- [24] AMAZONAS N T, FORRESTER D I, SILVA C C, et al.Light- and nutrient-related relationships in mixed plantations of *Eucalyptus* and a high diversity of native tree species[J].New forests, 2021, 52(5): 807.
- [25] AMAZONAS N T, FORRESTER D I, SILVA C C, et al.High diversity mixed plantations of *Eucalyptus* and native trees: An interface between production and restoration for the tropics[J].Forest Ecology and Management, 2018, 417: 247-256.
- [26] ESUBALEW E.Woody species diversity, regeneration and population structure along altitude gradient in Alem-saga forest, South Gondar, North Western Ethiopia[J].Journal of Biodiversity & Endangered Species, 2021, 9(7): 9-15.
- [27] 陈富强, 程欣欣, 洪维, 等.不同类型群落下闽楠的生长与植物物种多样性分析[J].林业与环境科学, 2021, 37(2): 55-61.
- [28] 肖石红, 张卫强, 黄钰辉, 等.深圳铁岗-石岩市级湿地自然保护区典型次生林物种多样性与土壤化学性质[J].林业与环境科学, 2020, 36(4): 35-40.
- [29] 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.
- [30] 刘海丰, 李亮, 桑卫国.东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构[J].生物多样性, 2011, 19(2): 232-242.
- [31] HE F, LEGENDRE P, LAFRANKIE J.Distribution patterns of tree species in a Malaysian tropical rain forest[J].Journal of Vegetation Science, 1997, 8: 105-114.
- [32] 兰国玉, 谢贵水, 王纪坤.西双版纳龙脑香热带雨林乔木种:多度分布研究[J].热带作物学报, 2011, 32(3): 514-517.
- [33] 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.
- [34] MCCUNE B, GRACE J B, URBAN D L.Analysis of ecological communities[M].Gleneden Beach, Oregon: MjM Software Design, 2002.
- [35] BARBERIS I M, BATISTA W B, PIRE E F.Woody population distribution and environmental heterogeneity in a Chaco forest, Argentina[J].Journal of Vegetation Science, 2002, 13(5): 607-614.
- [36] 徐明锋, 胡砚秋, 李文斌, 等.土壤养分对亚热带天然林物种分布的影响[J].中南林业科技大学学报, 2014, 34(9): 91-97.
- [37] 孙东, 朱纯, 熊咏梅, 等.林隙光照对广州市风景林林下植物分布的影响[J].华南农业大学学报, 2011, 32(4): 63-66.
- [38] DUFRÈNE M, LEGENDRE P.Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach[J].Ecological Monographs, 1997, 67(3): 345-366.
- [39] ZHOU Y, SU Y, ZHONG Y, et al.Community attributes as indicators of habitat invasibility across land use patterns in an agricultural and forest landscape[J].Forests, 2019, 10: 17.
- [40] MAGURRAN A E.Measuring biological diversity[M].Oxford, UK: Blackwell Science, 2004.
- [41] SHANNON C E, WEAVER W, BLAHUT R E, et al.The mathematical theory of communication[M].Urbana, USA: University of Illinois Press, 1949.
- [42] 陈传国, 薛春泉, 汪求来, 等.基于2017年森林资源连续清查样地的广东省典型植被型植物多样性研究[J].林业与环境科学, 2020, 36(2): 60-65.
- [43] 练琚瑜, 陈灿, 黄忠良, 等.鼎湖山南亚热带常绿阔叶林不同成熟度群落特征的比较[J].生物多样性, 2015, 23(2): 174-182.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 杨晓惠, 林文树, 吴金卓.小兴安岭阔叶红松林物种-多度分布格局[J].中南林业科技大学学报, 2020, 40(12): 104-113.
- [47] 柯炳氨.亚热带木本植物群落多样性与尺度效应研究[D].广州: 华南农业大学, 2018.
- [48] 周瑾婷.华东黄山山脉、天目山脉植物多样性及群落特征研究[D].杭州: 浙江大学, 2019.
- [49] 陈泓, 黎燕琼, 郑绍伟, 等.岷江上游干旱河谷灌丛群落种-面积曲线的拟合及最小面积确定[J].生态学报, 2007(5): 1818-1825.