

广东化州3种不同林龄人工林植物多样性研究*

宋霞¹ 邓子超¹ 董辉² 郭韵²
吴文华² 王丹枫²

(1. 广东化州国营丽岗林场, 广东 化州 525100; 2. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650)

摘要 为了研究3种不同林龄人工林群落植物组成及其多样性特征, 在广东省化州市选取了不同年龄的尾叶桉 *Eucalyptus robusta* 林、湿地松 *Pinus elliottii* 林和混交林各3个。通过样地调查法, 分析其物种组成, 生物多样性特征和物种耐阴性特征。结果表明: 调查样地有维管束植物150种, 分隶58科111属, 3种不同林龄人工林林下植物组成种类差异显著。林下植被物种多样性指数都体现出混交林>尾叶桉林>湿地松林的趋势。40年混交林的草本层物种多样性指数最低。同一林分不同层次间的物种耐阴性指数表现为草本层>灌木层>乔木层, 不同林分类型则表现为混交林>湿地松林>尾叶桉林。由此可知, 桉树林物种多样性并不比同是外来树种的湿地松林低, 营造人工混交林有利于提高林下植物物种多样性, 也有利于林分向地带性森林群落演替。

关键词 人工林; 植物多样性; 耐阴性; 地带性森林群落

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 04-0108-09

Study on Plant Diversity of Three Different Age Plantations in Huazhou, Guangdong Province

SONG Xia¹ DENG Zichao¹ DONG Hui² GUO Yun²
WU Wenhua² WANG Danfeng²

(1. State-owned Ligang Forest Farm in Huazhou, Huazhou, Guangdong 525100, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

Abstract In order to study the community plant composition and diversity characteristics of three plantations of different ages, *Eucalyptus urophylla*, *Pinus elliottii* and mixed forests of different ages were selected in Huazhou city, Guangdong province. Species composition, biodiversity characteristics and species negative tolerance were analyzed by sample plot investigation. The results showed that there were 150 species of vascular plants, which were divided into 58 families and 111 genera, and there were significant differences in the composition of undergrowth plants in the three plantations of different ages. The species diversity index of undergrowth vegetation all showed the trend of mixed forest > *E. urophylla* forest > *P. elliottii* forest. The species diversity index of herb layer in 40-year mixed forest was the lowest. The negative tolerance index of species in different levels of the same stand showed as herb layer > shrub layer > tree layer, and different stand types showed as mixed forest > *P. elliottii* forest > *E. urophylla* forest. In conclusion, the species diversity of eucalyptus forest is not lower than that of wetland pine forest, which is the same exotic tree species. The construction of artificial mixed forest is beneficial to improve the understory plant species diversity, and is also conducive to the succession

* 基金项目: 广东省林业局 2020 年野生动植物保护项目 (E036011002)。

第一作者: 宋霞 (1981—), 女, 工程师, 主要从事林业资源利用与保护研究, E-mail: 835568035@qq.com。

of stand to zonal forest community.

Key words plantation; plant diversity; shade tolerance; zonal forest community

生物多样性的格局、形成与维持机制一直是生态学研究热点^[1-2]。林下植被作为森林生态系统重要部分，在维持群落生物多样性、保持生态系统平衡、调控生态系统物质能量交换等方面具有重要作用^[3]。林下植物多样性受多种因素的影响，如立地条件、环境因子和人为活动等^[4-5]。林下植被受林分密度影响较大，林下植物的种类随着林分密度的增加有从阳生向阴生性变化趋势^[6]。一般认为天然林的林下物种多样性大于人工林^[7-8]，但也有研究认为人工林相比于天然林林下植物多样性指数更大^[9]。

我国是人工林面积最大的国家，并且相当部分人工林被划为生态公益林经营^[10-11]，生态公益林的性质决定了对其经营应以提高森林生态系统服务功能为主要目的。不同林分类型，由于其林冠结构、树种组成、养分循环、林下微环境等的差异，将导致其林下植物的组成和多样性格局差异^[12-13]，从而影响林分的生态系统服务功能。因此，研究不同人工林林下植物多样性差异及其维持机制，对维持人工林可持续经营和服务功能提升具有重要意义。

大面积连片种植单一树种配置的人工林，虽然有速生、丰产、质优的优势，然而，快速生长的植物都具有光合作用强、需水需肥量大等特点^[14-15]，并且长期的连作或大面积、高密度种植单一树种还会造成林地的地力衰退、病害多发、生产力下降等现象，使得林下植物多样性受到影响^[14,16-17]，进而直接威胁人工林的可持续发展。由于种植单一树种人工林产生的各种弊端，林地阔叶化改造研究逐渐受到重视，林地树种多样化选择、配置以及混合程度的确定等是实现人工林群落长久经营需要解决的关键问题。本文以广东化州国营林场3种不同树种配置不同林龄人工林群落为研究对象，通过比较分析立地条件相似的3种不同树种配置不同林龄人工林群落植物组成及其多样性之间的差异，探讨树种配置对化州人工林林下植物多样性的影响，研究还进一步对一种特殊阔叶混交人工林（风水林）进行了深入的林下植物多样性及植物耐阴性分析，探讨人工林向

地带性森林演替的进程，以期为人工林的可持续经营和生态系统服务功能提升提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东化州市中部的国营丽岗林场和国营平定林场，约东经110°23′~110°40′，北纬21°42′~22°04′。地貌类型属丘陵台地，山丘多呈馒头状，相对高差一般小于100 m；地带性土壤类型为发育于花岗岩和砂页岩的赤红壤，土层较深厚，有机质含量在42.58 mg/kg左右，pH值为4.19左右。气候属南亚热带季风海洋性气候，平均气温22.9℃，降水充沛，年平均降雨量1 890 mm，夏秋期间，台风暴雨频繁^[18]。地带性植被类型为南亚热带低地常绿阔叶林。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查方法 调查样地分别位于化州市国营丽岗林场和平定林场，样地的地形地貌、海拔、母岩、土壤类型等相同或相近，坡度都在15°以下；样地造林密度和造林抚育措施基本一致，株行距一般为2 m×3 m，造林后前3 a进行水平带状砍杂除草，种植穴复土施肥等抚育措施，施肥量保持一致，头年抚育两次，第2、3年抚育3次，3 a后基本不再抚育管理。

样地选取的尾叶桉林和湿地松林作为商品林经营，混交林作为生态公益林经营。在平定林场选取5、15 a尾叶桉林 *Eucalyptus robusta* 和10 a湿地松林 *Pinus elliottii*，其中，15 a尾叶桉林因林地权属存在争议，在造林抚育3 a后处于自然演替状态；在丽岗林场选取10 a尾叶桉林、5 a和15 a湿地松林、5 a和10 a混交林，其中，湿地松林中偶有原桉树头萌生的个体，5 a生混交林造林树种为尾叶桉、湿地松和红锥 *Castanopsis hystrix*，10 a生混交林造林树种为红锥、尾叶桉和格木 *Erythrophloeum fordii*；在丽岗林场场部附近的卜岭村选取100 a前种罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*，40 a前补种窿缘桉 *Eucalyptus exserta* 后自然演替的风水林。各样地基本情况见表1。

表 1 研究样地概况
Table 1 Overview of the study site

林场 Forest farm	森林类型 Forest types	林 龄 /a Age	经纬度 Coordinate	海拔 /m Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	平均胸 径 /cm Mean DBH	平均树 高 /m Mean height	郁闭度 Canopy density	林下盖度 /% Understory coverage	主要乔木 Main trees
平定 Pingding	尾叶桉林 <i>Eucalyptus urophylla</i> forest	5	110°27'57"E, 22°02'54"N	100	10°	EN	10.7	12.1	0.75	20	尾叶桉
丽岗 Ligang	尾叶桉林 <i>Eucalyptus urophylla</i> forest	10	110°31'23"E, 21°44'42"N	75	15°	WS	15.4	15.0	0.65	40	尾叶桉、山苍子 <i>Litsea cubeba</i>
平定 Pingding	尾叶桉林 <i>Eucalyptus urophylla</i> forest	15	110°30'03"E, 22°01'20"N	70	15°	ES	17.2	14.3	0.60	95	尾叶桉、鸭脚木 <i>Schefflera heptaphylla</i> 、 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>
丽岗 Ligang	湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	5	110°30'01"E, 21°54'29"N	80	10°	WS	7.0	5.6	0.65	90	湿地松 <i>Pinus elliotii</i> 、尾叶桉、银 柴 <i>Aporosa dioica</i>
平定 Pingding	湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	10	110°28'45"E, 22°03'45"N	75	15°	ES	11.0	8.6	0.90	40	湿地松、窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>
丽岗 Ligang	湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	15	110°31'03"E, 21°55'28"N	60	15°	ES	13.9	12.1	0.90	45	湿地松、银柴 <i>Aporosa dioica</i> 、山 苍子
丽岗 Ligang	混交林 Mixed forest	5	110°29'59"E, 21°54'29"N	40	15°	WN	7.8	8.3	0.65	95	尾叶桉、湿地松、红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>
丽岗 Ligang	混交林 Mixed forest	10	110°30'58"E, 21°55'09"N	80	15°	WS	9.6	9.0	0.85	20	红锥、尾叶桉、格木 <i>Erythrophleum fordii</i>
卜岭 Buling	混交林（风水林） Mixed Forest (Feng Shui Forest)	40	110°35'00"E, 21°50'56"N	25	5°	ES	11.5	9.4	0.98	40	广东润楠 <i>Machilus kwangtungensis</i> 、 降真香 <i>Acronychia oligophlebia</i> 、 猴耳环 <i>Archidendron clypearia</i> 、窿 缘桉、罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i> 、竹节树 <i>Carallia brachiata</i>

2020 年 9 月，用相邻格子法，在上述林地内设置 20 m×60 m 的调查样地，依插值法分成 3 个 20 m×20 m 的样方和 12 个 10 m×10 m 的小样方。参考中国森林生物多样性监测网络（CForBio）和美国史密森热带森林研究中心（CTFS）有关长期固定样地监测的调查方法^[4-5]，对样地内胸径（DBH）≥1 cm 的乔木个体进行每木检尺，记录种名、树高、胸径和冠幅等。在每个小样方内随机设立 1 个 5 m×5 m 的灌木层样方，1 个 2 m×2 m 的草本层样方，调查 DBH<1 cm、树高大于 50 cm 的灌木和草本层样方中的所有草本植物，记录其种名、株数、高度和冠幅（或盖度），丛生草本的株数记丛数，同一母体分蘖的草本的株数记每个冠幅不重叠的个体数；同时记录样地内出现的层间植物及其盖度。

1.2.2 分析方法 （1）重要值 采用公式为重要值（IV）= 相对多度 + 相对频度 + 相对显著度，其中，乔木显著度用胸高断面面积计算，灌木和草本显著度用盖度计算；

（2）生物多样性分析 包括物种丰富度指

数、多样性指数和均匀度指数等。其测度公式为物种丰富度指数（S）：样地内的物种数；Shannon-Wiener 物种多样性指数（Sw）： $Sw = -\sum P_i \ln P_i$ ；Pielou 均匀度指数（Jsw）： $Jsw = Sw / \log_2 S$ 。式中，S 为样方的植物种数； P_i 为种 i 的个体数占总个体数的比率；N 为样方所有物种的个体数之和^[12]。

利用 SPSS16.0 进行单因素方差（one-way ANOVA）。采用 Duncan 新复极差法比较各指标在各观测样地的差异性，极显著性水平设为 $\alpha=0.01$ ，显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

（3）植物的耐阴性指数分析 植物的耐阴性是植物长期适应光环境而演化形成的重要生态特性。林下植被的组成及其耐阴性与森林群落的林龄、郁闭度、群落结构等息息相关，不同演替阶段的林分其林下植物组成不同，阳生性种类只出现在林分演替早期，阴生性种类只出现在林分演替的中后期，而中生性种类可在林分中维持较长时间，大部分地带性顶极群落的优势种或建群种都是中生性的，幼苗幼树阶段很耐阴，但突出林冠后又能耐受强阳光照。

为了更直观地对植物进行耐阴性分析,我们将上述 3 类不同耐阴性植物植物进行赋值,便于比较耐阴性。阳生性种类植物耐阴性赋值 1,即 $NY=1$,如桃金娘 *Rhodomyrtus tomentosa*、芒萁 *Dicranopteris pedata*; 中生性种类植物耐阴性赋值 3,即 $NY=3$,如黄桐 *Endospermum chinense*、九节 *Psychotria asiatica*、扇叶铁线蕨 *Adiantum flabellulatum* 等; 阴生性种类植物耐阴性赋值 5,即 $NY=5$,如棱果木 *Barthea barthei*、黑嘴蒲桃 *Syzygium bullockii*、半边旗 *Pteris semipinnata* 等。群落植物组成的耐阴性指数 (Shade-enduring index, 简称 Se): $Se = \sum NY/S$ 。式中, NY 为样方植物的耐阴性值, S 为样方的植物种数。群落林下植被 Se 指数值越高,群落阴生性种类越多,群落距离地带性森林类型越近。

2 结果与分析

2.1 物种组成特征

根据 27 个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 样方统计 (表 2), 本次调查共记录到维管束植物 150 种, 分隶 58 科 111 属, 以茜草科 Rubiaceae (13 种)、樟科 Lauraceae (11 种)、桃金娘科 Myrtaceae (10 种)、大戟科 Euphorbiaceae (10 种) 等为优势科, 这些科的植物都具有较强的热带性, 与本地气候相适, 因而, 人工林营建时应适地适树; 所有植物中乔木层有 25 科 53 属 68 种, 灌草层有 49 科 94 属 122 种; 在灌草层中有蕨类植物 12 种, 裸子植物 3 种, 被子植物 107 种。

3 种不同林龄人工林林下植物组成种类差异明显。表 3 列出 3 种不同林龄人工林林下灌木草本层重要值排前 5 的优势种类, 分析发现, 5 a 生人

工林林下植被无论是灌木还是草本都以阳生性种类为主, 灌木种类以桃金娘、黄牛木 *Cratoxylum cochinchinense*、米碎花 *Eurya chinensis*、岗松 *Eucalyptus exserta*、银柴 *Aporosa dioica* 等为主, 草本以芒萁、芒、山菅兰 *Dianella ensifolia* 等为主, 3 种林分的物种数是混交林 > 湿地松林 > 尾叶桉林; 10 a 生人工林林下植被也以阳生性种类为主, 灌木种类主要有桃金娘、鬼灯笼、黄牛木等, 草本植物主要有芒萁、芒 *Miscanthus sinensis*、薇甘菊 *Mikania micrantha* 等, 但草本层已开始出现一些中生性种类如剑叶凤尾蕨 *Pteris ensiformis*、海金沙 *Lygodium japonicum* 和玉叶金花 *Mussaenda pubescens* 小苗等, 而混交林的灌木层开始出现中生性的九节、鸭脚木 *Schefflera heptaphylla* 和朱砂根 *Ardisia crenata* 等, 3 种林分的物种数是混交林 > 尾叶桉林 > 湿地松林; 15 a 生尾叶桉林由于林分郁闭度较低, 林内自然生长的鸭脚木、木荷 *Schima superba*、红锥、中华锥 *Castanopsis chinensis* 和萌生的杉木等树高已达 5~10 m, 形成了复层林冠, 林下植被组成种类不但数量较多, 且有不少中生性种类如九节、猪肚木 *Canthium horridum*、乌毛蕨 *Blechnum orientale* 等成为优势种, 而 40 a 生混交林作为风水林受保护, 林分已演替到地带性森林群落中期, 林下植被的组成种类基本都是中生性和阴生性种类, 灌木层以上层乔木的小苗如降真香 *Acronychia oligophlebia*、广东润楠 *Machilus kwangtungensis*、华润楠 *Machilus chinensis*、罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*、猴耳环 *Archidendron clypearia*、竹节树 *Carallia brachiata* 及中生性和阴生性灌木如九节、棱果木 *Barthea barthei*、黑嘴蒲桃 *Syzygium bullockii* 等为优势种

表 2 化州 3 种人工林维管束植物统计

Table 2 Statistics of the vascular plants of the 3 plantation forests in Huazhou

类群 Group	类别 Type	组成统计 Composition			性状统计 Character				
		科 Family	属 Genus	种 Species	乔 Tree	小乔 Small tree	灌 Shrub	草 Grass	藤 Vine
蕨类植物 Fern		7	8	12	0	0	0	10	2
裸子植物 Gymnosperms		4	4	4	3	0	0	0	1
被子植物 Angiosperm	双子叶 Dicotyledons	42	89	122	33	25	42	9	16
	单子叶 Monocotyledons	5	10	12	0	0	1	8	0
合计 Total		58	111	150	36	25	43	27	19

表 3 化州不同林龄人工林林下优势植物
Table 3 Three dominant undergrowth plants of plantations in Huazhou

林分 Stand	层次 Layer	5 a		10 a		15 a(混交林为 40 a)	
		种名 Species	重要值 /% IV	种名 Species	重要值 /% IV	种名 Species	重要值 /% IV
桉树林 Eucalyptus forest	灌木层 Shrub layer	米碎花 <i>Eurya chinensis</i>	142.09	鬼灯笼 <i>Clerodendrum fortunatum</i>	58.52	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	35.17
		毛果算盘子 <i>Glochidion eriocarpum</i>	48.28	红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i>	51.24	银柴 <i>Aporosa dioica</i>	22.98
		银柴 <i>Aporosa dioica</i>	23.14	山苍子 <i>Litsea cubeba</i>	27.81	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	21.66
		毛稔 <i>Melastoma sanguineum</i>	21.96	黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinense</i>	26.71	猪肚木 <i>Canthium horridum</i>	20.19
		粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	16.60	大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	21.21	椭圆叶豺皮樟 <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	14.98
		其他 4 种	47.93	其他 20 种	114.50	其他 39 种	185.01
	草本层 Field layer	地稔 <i>Melastoma dodecandrum</i>	84.79	华里白 <i>Diplopterygium chinensis</i>	52.74	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	161.24
		阔叶丰花草 <i>Borreria latifolia</i>	43.79	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	50.99	黑莎草 <i>Gahnia tristis</i>	34.83
		芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	33.49	薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	34.92	扇叶铁线蕨 <i>Adiantum flabellulatum</i>	31.61
		山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	27.82	剑叶凤尾蕨 <i>Pteris ensiformis</i>	33.75	乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	17.34
		半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	20.25	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	27.17	团叶鳞始蕨 <i>Lindsaea orbiculata</i>	10.81
		其他 10 种	89.86	其他 11 种	100.43	其他 9 种	44.17
	灌木层 Shrub layer	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	67.23	鬼灯笼 <i>Clerodendrum fortunatum</i>	121.82	三叉苦 <i>Evodia lepta</i>	69.08
		黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinense</i>	62.44	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	26.43	黄牛木 <i>Cratoxylum</i> <i>cochinchinense</i>	31.87
		岗松 <i>Eucalyptus exserta</i>	42.54	窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	24.27	鬼灯笼 <i>Clerodendrum fortunatum</i>	28.82
		银柴 <i>Aporosa dioica</i>	37.65	竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	15.56	粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	25.89
		毛稔 <i>Melastoma sanguineum</i>	19.50	黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinense</i>	14.34	银柴 <i>Aporosa dioica</i>	19.06
		其他 12 种	70.64	其他 18 种	97.58	其他 22 种	125.28
	草本层 Field layer	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	167.52	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	153.77	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	61.78
		芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	33.76	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	46.28	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	39.83
		酸藤子 <i>Embelia laeta</i>	18.81	剑叶凤尾蕨 <i>Pteris ensiformis</i>	22.28	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	36.51
		山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	17.12	玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	19.61	玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	34.11
		阔叶丰花草 <i>Borreria latifolia</i>	10.33	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	15.31	剑叶凤尾蕨 <i>Pteris ensiformis</i>	27.74
		其他 12 种	52.46	其他 9 种	42.74	其他 13 种	100.03

林分 Stand	层次 Layer	5 a		10 a		15 a(混交林为 40 a)	
		种名 Species	重要值 /% IV	种名 Species	重要值 /% IV	种名 Species	重要值 /% IV
人工混交林 Artificial mixed forest	灌木层 Shrub layer	黄牛木 <i>Cratogeomys cochinchinense</i>	50.66	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	31.73	降真香 <i>Acronychia oligophlebia</i>	31.30
		银柴 <i>Aporosa dioica</i>	39.28	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	31.11	广东润楠 <i>Machilus kwangtungensis</i>	23.37
		桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	36.87	椭圆叶豺皮樟 <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	23.49	华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	22.81
		毛稔 <i>Melastoma sanguineum</i>	30.40	鸭脚木 <i>Schefflera heptaphylla</i>	22.54	罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i>	20.31
		岗松 <i>Eucalyptus exserta</i>	19.09	朱砂根 <i>Ardisia crenata</i>	17.95	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	17.11
		其他 23 种	123.71	其他 30 种	173.18	其他 42 种	185.11
		芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	111.00	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	73.86	鳞始蕨 <i>Lindsaea odorata</i>	140.82
		山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	23.06	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	38.45	扇叶铁线蕨 <i>Adiantum flabellulatum</i>	104.46
		芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	18.37	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	27.97	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	18.84
	草本层 Field layer	菝葜 <i>Smilax china</i>	14.73	剑叶凤尾蕨 <i>Pteris ensiformis</i>	26.03	乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	11.23
		酸藤子 <i>Embelia laeta</i>	14.35	玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	23.67	罗浮买麻藤 <i>Gnetum lofuense</i>	9.42
		其他 19 种	118.49	其他 18 种	110.02	其他 2 种	15.23

类，草本层不仅盖度小且种类也少，常见的主要为鳞始蕨和扇叶铁线蕨。

2.2 物种多样性特征

物种多样性是生物多样性的基础，是生态系统功能的重要组成部分。一般地，在一个群落中，如果有许多物种，而且它们的多度非常均匀，则该群落的多样性较高；反之，如果群落中物种少并且它们的多度不均匀，则群落的多样性较低。

从图 1 A 可知，3 种林分类型间、不同林龄间物种丰富度指数差异显著 ($P < 0.05$)，同一林分内乔木层、灌木层和草本层的物种丰富度指数差异极显著 ($P < 0.01$)。不同林分类型 S 指数表现为混交林 > 尾叶桉林 > 湿地松林，而且不同林龄的林分类型都表现出相似的规律；同一林分类型表现为林龄越大物种丰富度指数也越大，同一林分类型不同层次的物种丰富度指数表现为灌木层 > 乔木层 > 草本层。混交和高林龄人工林具有较高的物种丰富度。

从图 1 B 可知，3 种林分类型间的物种多样性指数 (Shannon-Wiener 指数 Sw) 差异显著 ($P < 0.05$)，同一林分内不同林龄和不同层次的 Sw 指数差异不显著 ($P > 0.05$)。不同林分类型 Sw 指数表现为混交林 > 尾叶桉林 > 湿地松林，不同林

龄的林分类型也都表现出相似的规律；湿地松林不同林龄的 Sw 指数表现为 15 a 林 > 5 a 林 > 10 a 林，而尾叶桉林和混交林都表现为林龄越大 Sw 指数也越大；3 种林分类型不同层次的 Sw 指数都表现为灌木层 > 草本层 > 乔木层，这是由于 3 种人工林都还处于生长阶段，乔木层冠幅延展充分，为林下灌木和草本种子萌发及生长创造了条件。

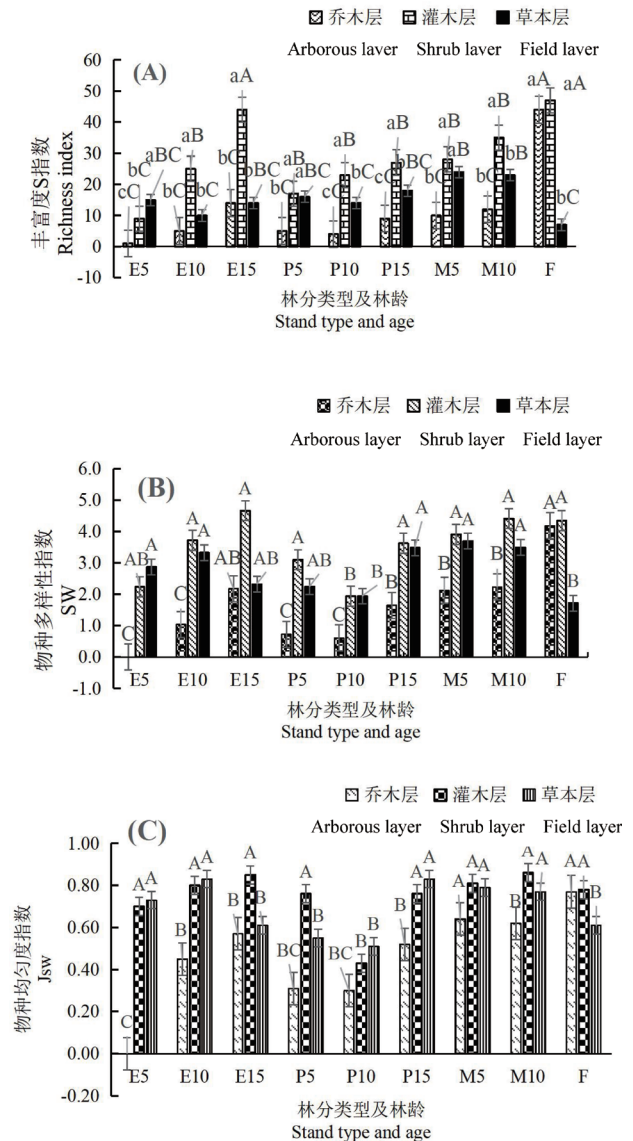
从图 1 C 可知，3 种林分类型间的物种均匀度指数 (Pielou 指数 Jsw) 差异显著 ($P < 0.05$)，同一林分内不同林龄和不同层次的 Jsw 指数差异不显著 ($P > 0.05$)，这是林分还处于生长阶段的原因。不同林分类型的物种均匀度指数 (Jsw) 表现为混交林 > 尾叶桉林 > 湿地松林，不同林龄的林分类型也都表现出相似的规律；湿地松林不同林龄的 Jsw 指数表现为 15 a 林 > 5 a 林 > 10 a 林，而尾叶桉林和混交林的 Jsw 指数都表现为 10 a 林 > 15 a (40 a) 林 > 5 a 林；3 种林分类型不同层次的 Jsw 指数都表现为灌木层 > 草本层 > 乔木层，草本植物个体数量极少，且分布比较均匀，呈现出均匀度指数高于乔木层的规律。

综上，3 种不同林龄人工林的林下植被物种多样性指数基本都体现出混交林 > 尾叶桉林 > 湿地松林的趋势，桉树林物种多样性高于同是外来

树种的湿地松林, 40 a 混交林的草本层由于长期处于高郁闭度环境中而表现出其物种多样性指数最低的现象。比较本研究的 3 种人工林林下植物组成, 10 a 人工混交林林下灌木与风水林的共有种达 19 种, 占 10 a 混交林灌木层种类的 54.2%, 而 15 a 的湿地松林和尾叶桉林灌木层与风水林的共有种都只有 16 种, 分别占各自灌木层种类的 44.4% 和 36.4%; 在重要值排前 5 的灌木层植物中, 15 a 尾叶桉林有银柴、九节、猪肚木、椭圆叶豺皮樟 *Litsea rotundifolia* var. *oblongifolia* 4 种, 15 a 湿地松林有粗叶榕 *Ficus hirta* 和银柴 2 种与风水林共有, 而 10 a 混交林就有九节、椭圆叶豺皮樟、鸭脚木、朱砂根 4 种与风水林共有。

2.3 物种耐阴性特征

从图 2 可知, 3 种林分类型间、同一林分不同层次间的物种耐阴性指数 Se 差异极显著 ($P < 0.01$), 同一林分不同林龄的物种耐阴性指数差异显著 ($P < 0.05$)。总体而言, 乔木层 Se 指数介于 1.00~2.23 之间, 灌木层 Se 指数介于 1.93~2.74, 草本层 Se 指数介于 2.07~3.29; 不同林分类型 Se 指数表现为混交林 > 湿地松林 > 尾叶桉林, 但湿地松林与尾叶桉林之间差异不大, 甚至由于 15 a 尾叶桉林物种丰富度极高其群落耐阴性指数远大于 15 a 湿地松林; 湿地松林不同林龄的 Se 指数表现为 10 a 林 > 15 a 林 > 5 a 林, 这可能是由于 15 a 湿地松林郁闭度极高, 群落中阳生性种类逐渐枯死, 中生性和阴生性的林下种类又因时间不够还未定居, 使其林下植被物种丰富度较低而造成的, 而尾叶桉林和混交林则都表现为林龄越大 Se 指数也越大; 3 种林分类型不同层次的 Se 指数都表现为草本层 > 灌木层 > 乔木层, 其中, 40 a 混交林草本层的耐阴性指数 (3.29) 为最高。物种对遮光的耐受性是预测生物多样性影响的重要特征^[19], 在遮光耐受中形成了优势效应或互补效应。在桉树林中, 桉树林相较于湿地松林和混交林, 林下光照强度较大且均匀, 导致少数优势种生长, 生物多样性较低; 在混交林中, 遮光耐受中的功能多样性形成了互补效应, 即混交林其乔木层物种较多形成了不同的林冠, 林下各部分接受阳光强度不一, 带来林下环境的异质性, 不同物种之间具有互补性, 生物多样性也不断提高。

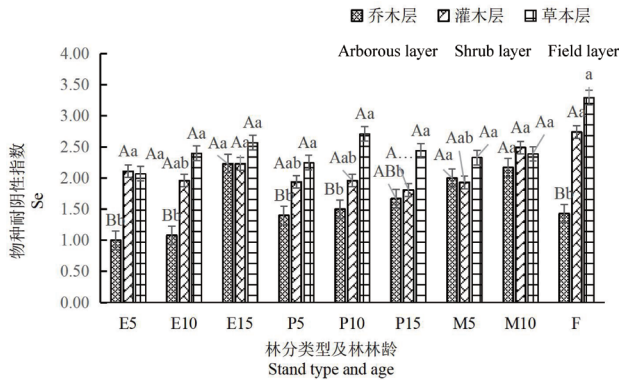


注: 图中柱状体长度表示各类指数的大小。图 (A) 不同类型、群落层次物种丰富度 S 指数; 图 (B) 是不同类型、群落层次 Sw 指数。图 (C) 表示不同类型、群落层次 Jsw 指数。不同大写字母表示不同林分乔木层间、灌木层间和草本层间 3 种指数的差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一林分乔木层、灌木层和草本层间 3 种指数的显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: the length of the columns in the figure indicates the size of each index. Fig. (A) species richness index of different types and community levels; Fig. (B) Sw index of different types and community levels. Figure (C) shows the Jsw index of different types and community levels. Different capital letters indicated significant differences in three indexes among tree, shrub and herb layers in different stands ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicated significant differences of three indexes among tree layer, shrub layer and herb layer in the same stand ($P < 0.05$).

图 1 3 种人工林物种丰富度指数 S 、物种多样性指数 Sw 和物种均匀度指数 Jsw 分析

Figure 1 Analysis of species richness index, species diversity index and species evenness index of three plantations



注：图中柱状体长度表示 Se 指数的大小。不同大写字母表示不同林分乔木层间、灌木层间和草本层间物种耐阴性指数的差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示同一林分乔木层、灌木层和草本层间物种耐阴性指数的显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: the length of the cylinder in the figure indicates the size of the Se index. Different capital letters indicated that there were significant differences in negative tolerance indices among tree, shrub and herb layers in different stands ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicated significant difference in negative tolerance index among tree layer, shrub layer and herb layer in the same stand ($P < 0.05$).

图2 3种人工林物种耐阴性指数 Se 分析

Figure 2 Analysis of negative tolerance index Se of three plantation species

3 讨论

3.1 桉树是桃金娘科桉树属树种的总称，约有 822 个种及种分类单元，主产于澳大利亚。目前，全球 100 多个热带亚热带国家和地区有引种栽培桉树，桉树人工林面积已超过 2 000 万 hm^2 ；我国从 1890 年代开始引入桉树，到目前，引入的种类多达 110 多个，前期多作为观赏和绿化树种引入，1950—1970 年代，桉树造林主要以少数国营林场和“四旁”绿化为主，种植树种主要有大叶桉 *E. robusta*、蓝桉 *E. globulus*、柠檬桉 *E. citriodora* 和窿缘桉 *E. exserta* 等，1980 年代培育出雷林一号桉 *E. exserta* ‘leilin No.1’，1990 年代后又以尾叶桉 *E. urophylla* 为父母本培育出多个优良杂交无性系，开始在全国 17 个省区推广种植桉树速生丰产林，至 2014 年，全国桉树人工林面积超过 450 万 hm^2 ，成为全球第二大桉树种植国^[20-21]。

从 1990 年代桉树速生丰产林快速发展以来，大力发展桉树林造成的生态问题一直是人们关注的焦点，其中，桉树林下的植物多样性问题是研究的热点，大部分研究认为长期的桉树连作不可避免造成林地的地力衰退和生物多样性下降等问题^[14,17]，也有不少研究认为，桉树林与其他人工

林比较，物种多样性都没有明显差异^[22-23]，不同林龄桉树林林下植被的物种多样性也没有明显差异^[24-25]。本研究发现，3 种不同林分类型的人工林物种多样性差异性显著，同是外来树种的人工纯林，各个林龄桉树林的物种多样性都要高于湿地松林。

3.2 从提出林业分类经营理念到本世纪初真正实施，我国经历了 10 多年的研究探讨，最初的分类经营目的更多的是为了进一步加强商品林经营管理^[26]，随着我国对生态文明的重视，生态公益林的经营管理问题才逐渐被行业重视。我国是人工造林最多的国家，在进行林业分类经营时，有大量的人工林被规划为生态公益林，而人工纯林是传统造林，也是商品林经营的主要方式，这些林分的生态效益显然无法与混交林和天然林相比。本研究结果表明，不同林龄混交林的物种多样性都显著高于人工纯林；不同林龄的林下植被物种多样性也是混交林显著高于人工纯林，只是 40 a 混交林的草本层由于长期处于高郁闭度环境中而表现出其物种多样性指数最低的现象，但其耐阴性指数却是最高的。因此，在进行生态公益林林分改造时应注重营造混交林，这与相关研究结果^[27]：与单一栽培相比，具有两个、三个或四个物种的混合物种人工林可以提高生产力，并在生物多样性、经济和森林健康方面具有更多优势相一致。

3.3 植被的演替是指在一地段上一种植被类型向另一种植被类型发展或是一种植物群落为另一种植物群落所替代的过程。植被演替过程，按其性质和发展方向可分为正向演替和逆向演替两类。正向演替是指植物群落在没有外来干扰的自然状态下，植物群落在组成成分和结构上，从简单到复杂，从低级向高级，从不稳定向稳定方向发展的过程；逆向演替则相反。单一树种种植的人工林倾向于促进植物入侵并损害特有物种的生存，与原生森林或混交林相比，植物的生物多样性都大大降低了，稳定性也随着栽植强度的增大而越来越弱^[28]。

本研究的 40 a 混交林是在 100 多年前种植罗汉松，40 a 前补植窿缘桉后，以风水林形式受保护而自然演替形成的，已接近地带性森林群落。林分上层乔木自然定居的广东润楠、降真香、猴耳环、竹节树、黄桐、牛矢果 *Osmanthus matsu-*

muranus 等无论是个体数、树高还是胸径都接近或超过人工种植的窿缘桉和罗汉松。营造混交林更有利于林分向地带性森林群落演替,且相关研究也表明混交林的生物量生产力也要比组成物种的单一栽培高得多^[19]。在一些特殊环境下,种植人工林可以提高树木的多样性,并且有可能适度增加树木的生长速度^[29]。

参考文献

- [1] 胡喻华, 刘锡辉, 谭志权, 等. 肇庆星湖国家湿地公园湿地植物群落物种多样性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 80-87.
- [2] 周淑荣, 张大勇. 群落生态学的中性理论[J]. 植物生态学报, 2006, 30(5): 868-877.
- [3] SALLEM S, KUMAR M. Vegetation diversity and soil nutrient status of submergence zone of hydroelectric project in Srinagar of Garhwal Himalayas, India [J]. International Journal of Biodiversity and Conservation, 2014, 6(12): 829-847.
- [4] 李民义, 张建军, 郭宝妮, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1083-1090.
- [5] 于立忠, 于水强, 史建伟, 等. 不同类型人工阔叶红松林高等植物物种多样性[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 3-7.
- [6] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 等. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 732-738.
- [7] DUAN R Y, WANG C, WANG X A, et al. Differences in plant species diversity between conifer (*Pinus tabulaeformis*) plantations and natural forests in middle of the Loess plateau [J]. Russian Journal of Ecology, 2009, 40(7): 501-509.
- [8] HUNT S L, GORDON A M, MORRIS D M, et al. Understory vegetation in northern Ontario jack pine and black spruce plantations: 20-year successional changes [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(9): 1791-1803.
- [9] VERMA R K, KAPPOR K S, RAWAT R S, et al. Analysis of plant diversity in degraded and plantation forests in Kunihar Forest Division of Himachal Pradesh [J]. Indian Journal of Forestry, 2005, 28(1): 11-16.
- [10] 杜志, 胡觉, 肖前辉, 等. 中国人工林特点及发展对策探析[J]. 中南林业调查规划, 2020, 39(1): 5-10.
- [11] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [12] 李华军, 廖德志, 刘敏杰, 等. 生态公益林林分结构对林下植被多样性的影响[J]. 湖南林业科技, 2020, 47(4): 63-67; 91.
- [13] 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.
- [14] 杨再鸿, 杨小波, 余雪标. 人工林林下植被及桉树林生态问题的研究进展[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2003(3): 278-282.
- [15] 林义辉. 广东省桉树人工林生态问题评价[J]. 广东林业科技, 2001, 17(4): 32-36.
- [16] 李伟, 张翠萍, 魏润鹏. 广东中西部桉树人工林植物多样性与林龄和土壤因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4957-4965.
- [17] 洪维, 廖宇杰, 陈富强, 等. 龙眼洞林场红锥人工林林下植物组成研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 63-70.
- [18] 化州市人民政府网. 化州介绍[EB/OL]. [2021-01-29] <http://www.huazhou.gov.cn/hz/gk/index.html>.
- [19] VAN D P T, VERHEYEN K, PONETTE Q, et al. Overyielding in young tree plantations is driven by local complementarity and selection effects related to shade tolerance [J]. Journal of Ecology, 2017, 106: 1096-1105.
- [20] 周晓果. 林下植物功能群丧失对桉树人工林土壤生态系统多功能性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [21] 中国林学会. 桉树科学发展问题调研报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [22] 张卫强, 张卫华, 潘文, 等. 桉树林和针阔混交林对植物多样性的影响比较[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 122-128.
- [23] 韦春义. 速生桉、马尾松、湿地松等人工林物种多样性研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(9): 170-173; 181.
- [24] 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.
- [25] TYYNELÄ T M. Species diversity in *Eucalyptus camaldulensis* woodlots and miombo woodland in Northeastern Zimbabwe [J]. New Forests, 2001, 22(3): 239-257.
- [26] 朱大业. 实行林业分类经营办好商品材基地[J]. 农业现代化研究, 1988(6): 18-21.
- [27] Liu C L C, Kuchma, Krutovsky. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future[J]. Global Ecology and Conservation, 2018, 15: 13-26.
- [28] BRAUN A C, TROEGER D, GARCIA R, et al. Assessing the impact of plantation forestry on plant biodiversity: A comparison of sites in Central Chile and Chilean Patagonia[J]. Global Ecology and Conservation, 2017, 10: 159-172.
- [29] CHAMAGNE J, TANADINI M, FRANK D, et al. Forest diversity promotes individual tree growth in central European forest stands[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54: 71-79.