

尖峰岭杉木人工林与天然次生林结构及物种多样性比较

尹思冠^{1,2,3#}, 林诗云¹, 宋希强^{1,2}, 彭文成^{3*}

(1. 海南大学 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/热带农林学院, 海南 海口 570228 中国;
2. 海南国家公园研究院/海南国家公园保护与发展重点实验室, 海南 海口 570203 中国; 3. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南 海口 571100 中国)

摘 要: 本研究以海南热带雨林国家公园尖峰岭片区内自然恢复 26 年、30 年的杉木人工林及天然次生林为对象, 通过分析径级结构、树高结构和物种多样性等非空间结构因子, 系统揭示了杉木人工林在长期自然恢复过程中的结构演变特征及其与天然次生林的差异。研究发现, 杉木人工林径级结构呈倒“J”型分布, 大径级仍以杉木为主, 乡土更新树种集中分布于小径级; 树高结构呈左偏态分布, 杉木在高树高级别中占据优势; 物种多样性指数表明人工林与天然次生林存在显著差异, 但人工林在恢复过程中结构趋于复杂, 物种多样性较高。本研究的创新在于从长时间序列自然恢复的角度, 定量揭示了杉木人工林的结构恢复潜力及其转型为天然林的可行性, 为海南热带雨林国家公园内人工林生态修复与近自然经营提供了科学依据。

关键词: 杉木人工林; 天然次生林; 林分结构; 径阶结构; 树高级结构; 物种多样性

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1674 – 7054(2026)05 – 0808 – 09

尹思冠, 林诗云, 宋希强, 等. 尖峰岭杉木人工林与天然次生林结构及物种多样性比较[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(5): 808–816. DOI: [10.15886/j.cnki.rdswwb.20250168](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20250168) CSTR: [32425.14.j.cnki.rdswwb.20250168](https://cstr.cn/32425.14/j.cnki.rdswwb.20250168)



天然林资源是维护中国生态环境安全、稳定与平衡的重要保障, 作为森林生态系统的重要组成部分, 其兼具较高的生态价值与显著的经济价值^[1–2]。依据退化程度差异, 天然林可划分为原生林和次生林两大类型。其中, 天然林生态功能尤为多元, 不仅能够固定二氧化碳、释放氧气, 还具备凋落物制肥、蓄水调洪等核心生态功能, 同时能改善生态环境以支撑生态旅游; 相较于人工杉木幼林, 天然林在减少泥沙和保存土壤养分方面优势明显^[3–4]。而人工林作为森林资源的重要补充, 亦发挥着不可替代的生态作用, 其作为重要的碳汇在维持区域碳储存、缓解气候变化中成效显著^[5], 同时还具备净化水质、保育生物多样性等生态功能^[6]。值得注意的是, 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国重要的亚热带地区优势树种, 综合价值显著, 原产地的杉木人工林具有生长快、出材量大、周期短, 适应性与抗逆性强、耐高寒等特点, 同时还具有一定的防治病虫害效能与生态效益^[7]。但该树

种于 20 世纪 80 年代被引入海南种植后, 在中部山区形成了一定的规模分布, 尤其在海南热带雨林国家公园内, 现存的较大面积杉木人工林已对热带天然林资源的恢复产生了不容忽视的负面影响。这种负面影响集中体现在对生态系统自然性与原真性的干扰上。一方面, 杉木作为外来引入树种, 其人工林单一的群落结构易打破区域原有物种竞争与协调平衡, 阻碍天然林乡土物种的自然更新与扩散; 另一方面, 杉木人工林还可能改变林下光照、土壤理化性质等微生境条件, 进一步制约天然林生态系统的正向演替^[8]。

林分结构作为森林生态系统的核心载体, 直接揭示了森林群落生态系统的结构与功能关系, 更决定了生态系统服务功能的发挥效能^[9–10]。森林林木的胸径、树高等林分非空间结构重要指标, 是评价人工林林分质量的参量^[11]; 在探究海南热带雨林国家公园内杉木人工林干扰下的天然林恢复机制时, 林分非空间结构更是解析生态系统自然

性、原真性退化的核心点。林分非空间结构因子是指能够反映林分基础结构,同时可较好表征林木生长结构与生长趋势的关键指标^[12],能够直接影响林分的发展潜能^[13]。具体而言,林分非空间结构主要包括种类结构、组成结构、竞争系数、径级结构、高度结构、密度等;其中林分内部的径级结构是森林生态系统健康状态的关键体现,直接决定了其功能性,进而深刻影响着森林生产力、生物多样性、生态稳定性及可持续经营能力^[14]。优化径级分布不仅能够有效协调林木的年龄组成与生长动态,为森林资源的持续管理奠定基础,而且能够大幅增强森林的生态抗逆性,同时促进其在木材生产、碳储存和非木材林产品供给等方面的综合效能^[15-17]。这种结构对整个森林生态系统的生产力提升、生物多样性维护、生态稳定性保障及可持续经营潜力均具有不可替代的作用。树高结构深刻反映了森林群落的分层现象,它清晰呈现了林分中树木按高度分布的模式。深入分析林分的树高结构,有助于揭示其垂直结构特征及空间布局,为科学评估森林生长过程提供重要资料,同时还能准确判断立地条件并指导营林措施的制定,为相关理论体系建设提供有力支撑^[18-19]。物种多样性是生物多样性在物种层面的核心内容,直接关联着群落结构功能复杂性,不仅包含了生命有机体所携带基因的丰富度和多样性^[20],也体现了基因与其生活环境交互作用所形成的多样性和特异性^[21]。这种多样性特征对研究群落结构和功能具有关键意义。该指标既能量化物种多样性,也可反映分布的均衡性,高水平多样性可增强群落稳定性,从而促进森林生态系统功能的完善^[22]。

目前关于杉木人工林自然恢复过程中结果演变与天然次生林差异的系统研究仍较少,本文对海南热带雨林国家公园尖峰岭片区内自然恢复26年、30年的杉木人工林和天然次生林进行了研究分析,进一步阐明了杉木人工林群落的一些特征,选择了径级结构、树高结构和物种多样性指标,运用这些指标从树种非空间结构分布的角度对杉木人工林群落进行了量化。本研究旨在探讨杉木人工林在经过26~30年自然恢复后,是否在结构多样性上接近天然次生林,为海南热带雨林国家公园内杉木人工林转型为天然林的路径选择提供科学依据。

1 研究地概况

研究样地位于海南省乐东县境内的海南热带雨林国家公园尖峰岭分局(18°20'—18°57' N, 108°41'—109°12' E)的南崖管护站范围,坡度约10~15°,坡向东或东南,土壤为砖黄壤。杉木人工林种植时间为1990年,初始造林规格为1.5 m × 1.5 m,造林后3年内每年进行人工抚育管理,后来实行封山育林。离人工林100 m范围内有天然次生林分布。林地种植杉木前为热带天然林,皆伐后通过炼山、挖穴种植杉木。本文选取自然恢复时间为26年和30年的杉木人工林与60年的天然次生林样地为研究对象。

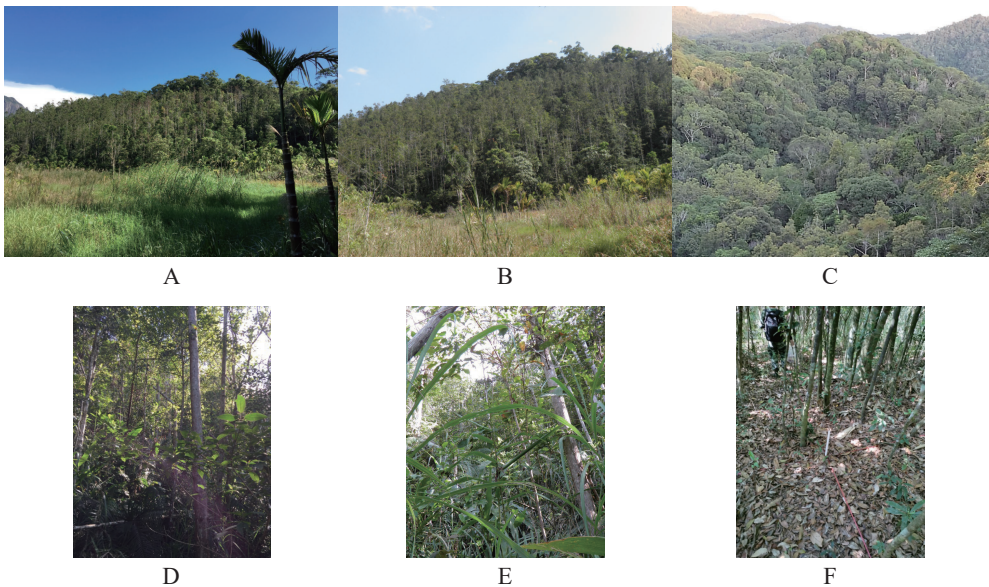
2 研究方法

2.1 样地调查方法 杉木人工林与天然次生林均设置一个为50 m × 50 m的正方形样地。在每块样地内划分100个连续相邻的5 m × 5 m的小样方。在每个小样方内对所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的树木挂上铝牌,对所有人工林林木和林下天然更新林木进行每木调查,并在调查时按照确定的方位以样方的左下角为坐标原点,按照铝牌号依序记录各株树木的x、y坐标值和树种、胸径、树高和冠幅等信息,同时仔细辨认所调查的林木个体是否存在萌蘖,按照萌生或分枝记录其萌蘖状况。

2.2 林木径级与高度级划分 物种的径级分布不仅能反映群落的生长发育情况,还可以作为评价群落稳定性和预测演替趋势的重要指标^[23]。本研究对杉木人工林与天然次生林的所有林木按径阶进行统计,每个径阶以2 cm划分,利用上限排外法共划分为15个径级。如表1所示。

群落树高结构特征不仅反映了不同个体在垂直空间上的分布格局,也反映了群落的发展趋势,树高结构规律为森林经营措施的制定提供重要的理论依据^[24]。本研究中树高结构以3 m为步长,利用上限排外法共划分为6个等级。如表2所示。

2.3 物种多样性计算 如表3所示,物种多样性选用 Simpson 指数(Simpson index)、Shannon-Weiner 指数(Shannon-Weiner index)、Margalef 指数(Margalef index)和 Pielou 指数(Pielou index)测度^[25-26]。



A、D分别为26年杉木人工林样地外貌图与内部植被实景图；B、E分别为30年杉木人工林样地外貌图与内部植被实景图；C、F分别为天然次生林样地外貌图与内部植被实景图。
A and D are respectively the appearance picture and the actual internal vegetation picture of the 26-year-old fir plantation plot; B and E are respectively the appearance picture and the actual internal vegetation picture of the 30-year-old fir plantation plot; C and F are respectively the appearance picture and the actual internal vegetation picture of the natural secondary forest plot.

图 1 不同恢复时间杉木人工林与天然次生林样地照片
Fig. 1 Photographs of Sample plots in *Cunninghamia lanceolata* plantations and natural secondary forests at Different Restrstration stages

表 1 树木径级划分

Tab. 1 Diameter class classification of trees															
径级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级	IX 级	X 级	XI 级	XII 级	X III 级	X IV 级	X V 级
DBH/ cm	[0, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10)	[10, 12)	[12, 14)	[14, 16)	[16, 18)	[18, 20)	[20, 22)	[22, 24)	[24, 26)	[26, 28)	[28, 30)

表 2 树木高度级划分

Tab. 2 Height class classification of trees							
径级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级
H/m	[0, 3)	[3, 6)	[6, 9)	[9, 12)	[12, 15)	[15, 18)	[18, 21)

表 3 物种多样性指标计算

Tab. 3 Assessment of species diversity indices		
参数 Parameter	公式 Formula	备注 Remark
Simpson指数	$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$	S为样地中A一层次物种的总数; P_i 为物种 <i>i</i> 的个体数占总个体数的比例; N为样地内个体单株的总数。
Shannon-Weiner指数	$H = - \sum_{i=1}^{SP} 2 \log_2 P_i$	
Margalef指数	$R = \frac{S-1}{\ln N}$	
Pielou指数	$J = H / \ln S$	

2.4 数据处理与分析 本研究通过应用 WPS Office 软件对数据进行整理, 运用 R v4.4.3 中 tidy 包、vegan 包对径阶和树高进行分类划分与多

样性函数进行计算分析, 涵盖了样地的林分空间结构参数。相关图表制作通过 ggplot 包完成。

3 结果与分析

3.1 径阶结构 杉木人工林 26 年、30 年自然恢复径级分布如图 2 所示。杉木人工林径级结构总体呈现明显的倒“J”型结构, 各径阶林木的相对含量呈随着径阶的增加而明显下降趋势, 当增加到一定径阶后下降趋势缓慢, 较小径阶内各径阶的林木所占比例很大, 表现自然恢复条件下的异龄林径级分布特点。杉木人工林总体径级分布虽然趋于正态分布, 峰态在 10 ~ 12 cm 径阶, 但杉木人工林乡土更新树种主要在 0 ~ 4 cm 径阶内, 径级分布呈倒“J”型。通过系统分析, 发现杉木人工林大径阶时期优势种群所占的相对含量明显高于各乡土更新树种的数量, 乡土更新树种集中在较小径阶内。这可能是因为随着杉木作为建群种的引

入, 其生态位保持的优势是更强的竞争力和生态位获取能力, 而乡土更新树种通过原生环境的快速修复, 其生态位在进化过程中得到分化。通过对不同恢复时间的杉木人工林对比发现, 杉木在 0~12 cm 这一区间的株数占比由 7.90% 增加至 8.31%; 径阶大于 12 cm 的株数占比由 5.66% 增加至 6.20%。乡土更新树种在径阶 0~4 cm 这一区间的株数占比由 60.41% 减少至 55.33%; 径阶大于 4 cm 的株数占比由 26.02% 增加至 30.12%。这一结果表明杉木在各径阶依旧保有微小的增长速度(均不足 1%), 而乡土更新树种的更新速度在小径阶上减缓, 在大径阶上逐渐上升, 且幅度相较于杉木更大。整体来看, 杉木即使更新潜力不足, 但仍存在更新能力, 而乡土更新树种的更新潜力明

显不足, 大径阶树种仍由杉木占据优势地位。

天然次生林径级结构如图 2 所示, 该林分径级结构呈现出典型的倒“J”分布, 林分内 0~6 cm 径阶的株数占比为 74.97%, 径阶大于 6 cm 的株数占比为 25.03%。小径阶林木在种群中占据优势地位, 幼苗株数占比显著高于大径阶林木, 种群数量呈现上升趋势, 且大径阶林木呈现平稳状态, 表明林分整体更新潜力较强, 健康水平较高。自然恢复下 30 年杉木人工林与天然次生林相比, 呈现为不同的径阶曲线, 两者在幼苗和小径级林木范围内, 具有相似的株数占比和更新潜力, 但在大径阶分布范围内, 30 年杉木人工林大都有杉木占据, 下降曲线较为明显; 天然次生林则由乡土更新树种组成, 且其林木株数分布呈现多峰分布。

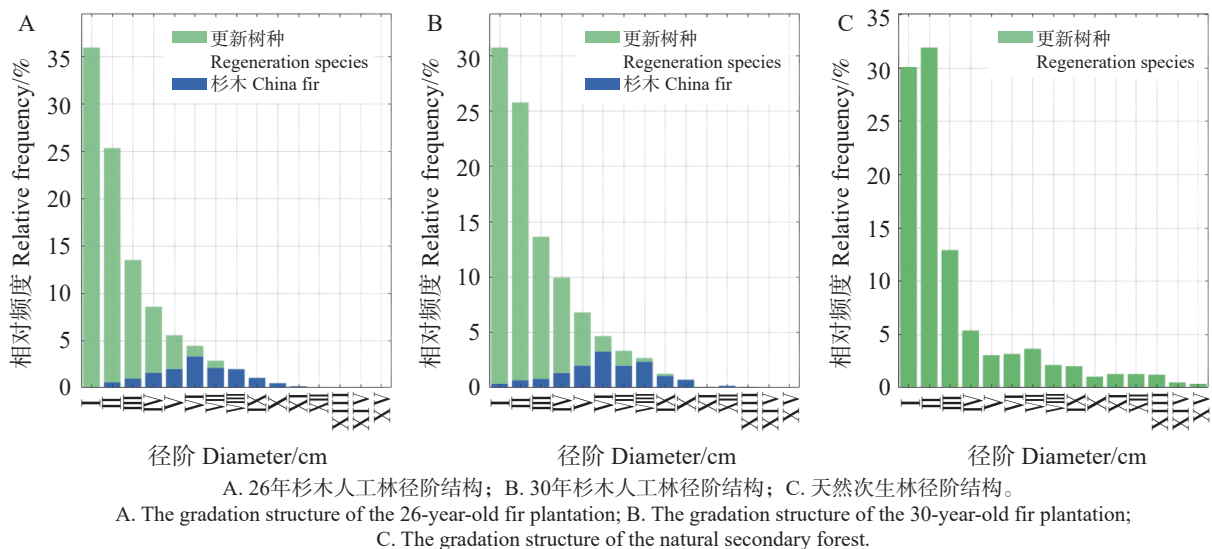


图 2 不同恢复时间杉木人工林与天然次生林径阶结构比较

Fig. 2 Comparison of diameter class structure between *Cunninghamia lanceolata* plantations and natural secondary forests at different restoration stages

3.2 树高结构 杉木人工林自然更新 26 年和 30 年的树高的结构变化如图 3, 曲线呈左偏态分布结构, 树高等级的树木株数分布呈波浪形变化结构, 在较低等级的树高呈上升的变化趋势, 到达一个高点后, 出现平稳分布的上升趋势。杉木树种分布右偏, 在一个较高等级的树高等级的株数占比较乡土更新树种占比较高, 并且株数占比较乡土更新树种的占比呈现先上升后降低的复合结构。杉木人工林经过自然恢复更新后, 杉木 0~9 m 树高株数占比较大, 从原来的 2.53% 上升到 3.28%, 乡土更新树种株数占比从原来的 79.05% 上升到 76.04%; 9 m 以上杉木树高株数占

比较大, 从原来的 11.23% 上升到 11.24%, 乡土更新树种的株数占比从原来的 18.42% 上升到 20.67%。这些数据反映了杉木树种与乡土更新树种在自然恢复中处于不同树高区间的竞争和演替。这表明林分内杉木树种幼苗和树高较小的林木株树比例虽然偏低, 但仍有增长趋势, 其在树高较大的分布范围内占比远超乡土更新树种。乡土更新树种株数占比在树高较小范围内虽呈现下降趋势, 但其林木个体数量远超杉木树种, 且其在树高较大范围内远不及杉木树种。这一结果表明, 林分中较多杉木处于乔木上层, 对其林下空间资源有着天然的竞争优势, 导致乡土更新树种在垂

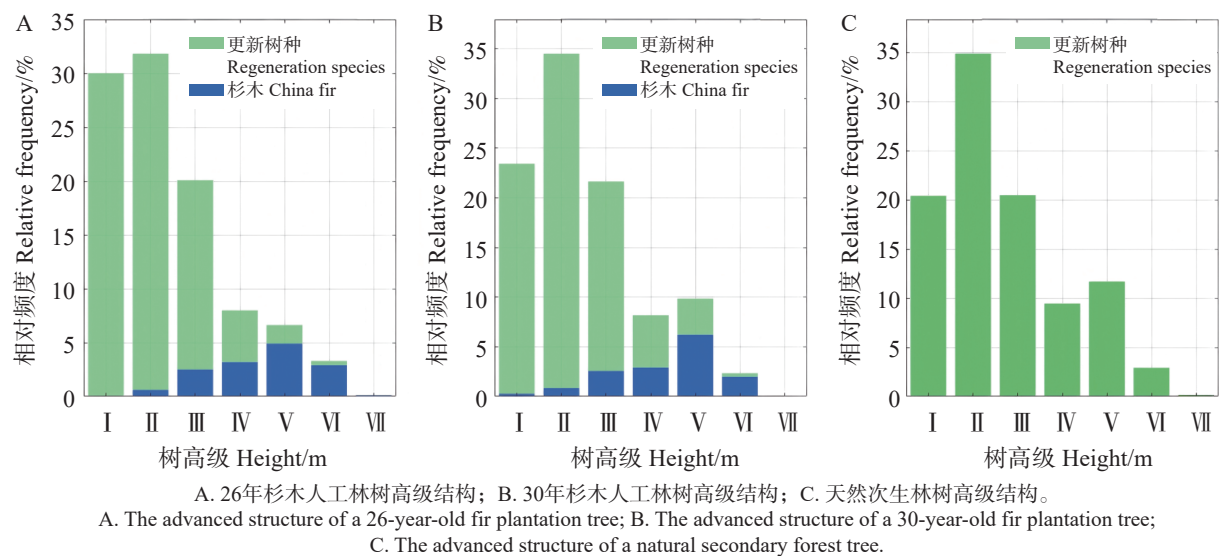


图 3 不同恢复时间杉木人工林与天然次生林树高级结构比较

Fig. 3 Comparison of height class structure between *Cunninghamia lanceolata* plantations and natural secondary forests at different restoration stages

直空间上的资源利用率低。

天然次生林的树高组成结构从图 3 中可以明显看出为偏左型,呈现先升高后降低趋势,其中 3~6 m 为最高峰,该高度林木占总树高的 34.78%。从天然次生林和杉木人工林的自然恢复 30 年树高的构成来看,杉木人工林较高树高组所占树高空间比例较高,但树木组成和空间分布结构比较相似。两者占比及分布相似,说明各层林木占据相应生态空间,垂直空间利用率较高。

3.3 物种组成及物种多样性 如表 4 所示,杉木人工林在自然恢复中,乔木层、灌木层和草本层主要物种无明显变化,通过重要值排序,选取前 3 的物种可以确立乔木层主要物种为水锦树(*Wendlandia uvariifolia*)、柬埔寨子楝树(*Decaspermum montanum*)、粗叶木(*Lasianthus chinensis*);灌木层主要物种为丛花山矾(*Symplocos poilanei*)、红算盘

子(*Glochidion coccineum*)、九节(*Psychotria asiatica*);草本层主要物种为琼海卷柏(*Selaginella hainanensis*)、仙茅(*Curculigo orchioides*)、割鸡芒(*Hypolytrum nemorum*)。天然次生林的各层主要物种与杉木人工林有显著差异,乔木层主要物种为鹅掌柴(*Heptapleurum heptaphyllum*)、肖蒲桃(*Syzygium acuminatissimum*)、鸡毛松(*Dacrycarpus imbricatus*);灌木层为九节(*Psychotria asiatica*)、山黄皮(*Micromelum falcatum*)、五列木(*Pentaphylax euryoides*);草本层为竹叶蕨(*Taenitis blechnoides*)、莎草蕨(*Actinostachys digitata*)、割鸡芒(*Hypolytrum nemorum*)。

如图 4 所示,本文通过计算 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Margalef 指数等对不同自然恢复时期杉木人工林和天然次生林物种多样性进行了计算和比较;重点分析了各乔

表 4 不同恢复时间杉木人工林与天然次生林各层主要物种

Tab. 4 Main species by layer in Chinese fir plantations and natural secondary forests at different restoration stages

林分类型 Stand type	乔木层主要物种(除杉木外) Main species in the tree layer (except fir)	灌木层主要物种 Main species of shrub layer	草本层主要物种 Main species of herbaceous layer
26年杉木人工林 26-year-old fir plantation	水锦树 <i>Wendlandia uvariifolia</i> 柬埔寨子楝树 <i>Decaspermum montanum</i> 粗叶木 <i>Lasianthus chinensis</i>	丛花山矾 <i>Symplocos poilanei</i> 红算盘子 <i>Glochidion coccineum</i> 九节 <i>Psychotria asiatica</i>	琼海卷柏 <i>Selaginella hainanensis</i> 仙茅 <i>Curculigo orchioides</i> 割鸡芒 <i>Hypolytrum nemorum</i>
30年杉木人工林 30-year-old fir plantation	水锦树 <i>Wendlandia uvariifolia</i> 柬埔寨子楝树 <i>Decaspermum montanum</i> 粗叶木 <i>Lasianthus chinensis</i>	丛花山矾 <i>Symplocos poilanei</i> 红算盘子 <i>Glochidion coccineum</i> 九节 <i>Psychotria asiatica</i>	琼海卷柏 <i>Selaginella hainanensis</i> 仙茅 <i>Curculigo orchioides</i> 割鸡芒 <i>Hypolytrum nemorum</i>
天然次生林 Natural secondary forest	鹅掌柴 <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> 肖蒲桃 <i>Syzygium acuminatissimum</i> 鸡毛松 <i>Dacrycarpus imbricatus</i>	九节 <i>Psychotria asiatica</i> 山黄皮 <i>Micromelum falcatum</i> 五列木 <i>Pentaphylax euryoides</i>	竹叶蕨 <i>Taenitis blechnoides</i> 莎草蕨 <i>Actinostachys digitata</i> 割鸡芒 <i>Hypolytrum nemorum</i>

木层物种多样性变化情况,各类型林分物种多样性指数都为高值类型。自然恢复 26 年杉木人工林 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Margalef 指数平均值分别为 0.90、2.60、0.93、4.79; 自然恢复 30 年杉木人工林 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Margalef 指数平均值分别为 0.90、2.56、0.93、4.67; 天然次生林 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Margalef 指数平均值分别为 0.88、2.35、0.95、4.00, 物种多样化格局较高。通过 ANOVA 检验,从 Simpson 指数上看,30 年杉木人工林与其他 2 个林分差异不显著,26 年杉木人工林与天然次生林差异显著($P<0.05$); 从 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数上看,2 个杉木人工林之间差异不显著,但两者与天然次生林差异显著($P<0.05$)。其中, Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均呈现下降趋势, Pielou 指数呈现先增后减的趋势。整体上看,各林分内物种丰富,分布较为均匀,群落稳定且复杂程度大。

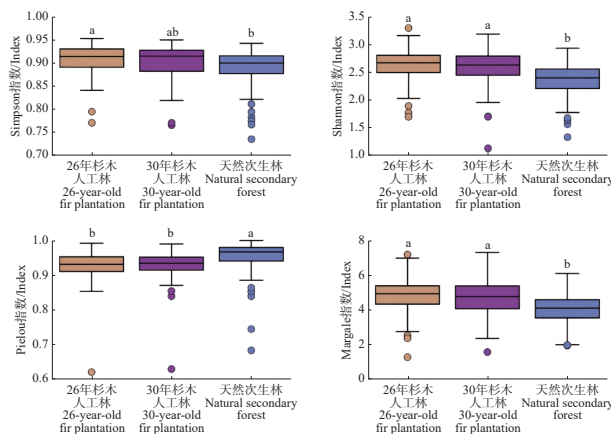


图4 不同恢复时间杉木人工林和天然次生林林分物种多样性

Fig. 4 Stand species diversity in Chinese fir plantations and secondary natural forests at different restoration stages

注:表中数据以“平均值±标准差”表示。同列数据后如附有不同小写字母,则表示不同恢复时间林分间在 $P<0.05$ 水平上存在显著差异。

Note: Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among stands with different restoration times at the $P < 0.05$ level.

4 讨论

林木胸径与树高作为关键指标,能够显著反映森林生长的总体态势,同时也能揭示植物生长

与环境条件之间的复杂互动关系^[12]。在自然恢复过程的林分中,这些指标的数值表现出较好的结构稳定性。深入分析径级与树高的分布模式,不仅能提供植物群落稳定性评估的依据,还有助于理解群落结构发展动态、预测生态演替进程,并制定相应的科学管理策略^[27]。

4.1 不同时期恢复下杉木人工林与天然次生林的径级结构差异 对比不同时期恢复下杉木人工林与天然次生林,其林分径阶结构均呈现典型的倒“J”型分布形态,这一分布特征与典型天然异龄林的直径分布模式一致。这与袁梓馨对鹅掌楸群落研究结果相似,括苍山系森林群落、长白山森林群落、秦岭皇冠温性落叶阔叶林等研究也有相似结果^[28-30]。随着林分的自然恢复,林木径阶增大,个体间的竞争不断加强,从而导致大径阶林木个体数量减少。从单一林分径级结构特征可知,人工林内杉木树种具有较差的更新能力,其径阶主要分布在 10~12 cm,多为大径级树木;乡土更新树种主要集中在 0~4 cm,能够充分发挥对环境的适应力和资源的竞争力,具有较高的更新潜力,如丛花山矾(*Symplocos poilanei*)、尖峰蒲桃(*Syzygium jienfunicum*)等树种。由于杉木前期作为建群树种,其冠幅较大,对光照等资源竞争力强,因此乡土更新树种中出现大径阶林木较少;而杉木天然更新能力弱于乡土更新树种,乡土更新树种能够快速占领林下、林隙等空间,从而易于形成小径阶林木聚集。天然次生林在小径阶上更新潜力更大,在较大径阶上分布较为平稳。通过径级结构图对比发现,人工林在小径级林木上更新能力呈现下降趋势,在径阶和数量上低于天然次生林。随着乡土更新树种径阶不断增大,其对其他树种的生存空间不断压缩,导致小径阶林木占比出现减少的趋势,而中大径阶林木呈现增加趋势。

4.2 不同时期恢复下杉木人工林与天然次生林的树高结构差异 不同恢复时间的杉木人工林和天然次生林树高结构均呈现左偏态分布,这与雷纳庆等对兴安落叶松天然林的研究和陆志星等对桂西北喀斯特地区 3 种人工林的研究相类似^[31-32]。三种林分内林木树高均集中在 3~6 m,其变化均为上升至峰值后开始递减,且各树高级分布范围内均存在一定数量的林木,这表明林木在垂直空间上利用率高,具有一定的发展潜力。不同恢复

时间的杉木人工林在 0~9 m 这一树高级大都由乡土更新树种组成,而大于 9 m 的林木仍由杉木占据;且两者乡土更新树种的林木占比在 0~9 m 这一树高级无明显变化,在大于 9 m 这一树高级呈现明显的上升趋势。杉木自然死亡过程漫长,且林分内大径阶树木对乡土更新树种有着一定抑制作用,其原因可能是早期占据的生态位优势与化感作用。可通过对林分内杉木进行近自然改造及抚育间伐,或补植大径阶的乡土更新树种加速人工林向天然林转型,改善林分更新状况,促使林分更加合理健康的发展。

4.3 不同自然恢复时期杉木人工林和天然次生林物种多样性差异 由于杉木人工林经过漫长的自然恢复,其内部结构已从单一转为复杂,物种数量由少到多,因此其 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数均与天然次生林相近。本研究发现, Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数均低于自然恢复的杉木人工林,这与王健敏等^[33]、邢韶华等^[34]对川西米亚罗林区云杉(*Picea asperata*)天然林与人工林的研究结果相悖,究其原因可能是天然次生林林内物种组成与结构趋于稳定,竞争力弱的树种逐渐被淘汰,竞争力强的树种居于资源的垄断地位;而人工林在自然恢复过程中,竞争力强的树种在杉木的抑制下无法快速处于垄断地位,从而导致竞争力弱的树种无法被淘汰。总体上看,人工林的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数虽与天然次生林有显著差异,但其群落结构复杂,物种多样性指数较高,生态系统处于一个稳定的状态。

5 结论

总的来说,从物种多样性指标来看,杉木人工林具备向天然林转型的种源基础,但林下自然更新的乡土树种受限于杉木人工林在径阶和树高结构方面占据的空间优势,其通过自然转型的时间将比较漫长。本研究选择了尖峰岭内具有时间序列的同一块杉木人工林样地与邻近的一块天然次生林样地,具有一定局限性,并不能代表整个海南热带雨林国家公园内杉木人工林的更新趋势,建议未来对种源传播力较弱区域与国家公园内不同类型人工林进行深入研究。通过对两种林分的探

讨,建议通过间伐或补植乡土树种促进杉木人工林向天然林转型,加快更新速度,加速海南热带雨林国家公园内人工林向天然林转型。

参考文献:

- [1] 向钦,郭秋菊,艾训儒,等. 湖北木林子自然保护区天然林不同恢复阶段林分结构特征[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(11): 21–26. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2023.11.003>
- [2] 李禹龙. 天然林抚育间伐技术探讨[J]. 世界热带农业信息, 2025(10): 93–95. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1726.2025.10.031>
- [3] 陈步峰,林明献,周光益,等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统的水文生态效应[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 423–429. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2000.03.013>
- [4] 李意德,陈步峰,周光益,等. 海南岛热带天然林生态环境服务功能价值核算及生态公益林补偿探讨[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 146–152. <https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2003.02.005>
- [5] 支轻,汤海宁,栾军伟,等. 结构多样性是海南热带人工林树木碳储量的主要驱动因素[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2025, 5(2): 13–22. <https://doi.org/10.12356/j.2096-8884.2025-0022>
- [6] 曾慧芬,樊孝凤,杨川,等. 海南岛橡胶林生态系统服务功能及其价值评估分析[J]. 热带生物学报(中英文), 2025, 16(4): 598–605. <https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20240121>
- [7] 洪美珍,高家华,王鑫,等. 间伐、修枝对杉木人工林生长和材种结构的影响[J]. 林业科学研究, 2025, 38(5): 82–92. <https://doi.org/10.12403/j.1001-1498.20240410>
- [8] 黄耀,梁彩群,莫燕妮,等. 长期干扰对海南热带雨林国家公园森林群落木本植物特征的影响[J]. 国家公园(中英文), 2024, 2(4): 235–245. <https://doi.org/10.20152/j.np.202312290043>
- [9] 王新宇,郝帅,王冰,等. 兴安落叶松天然次生林空间结构特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(03): 92–103. <https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.03.010>
- [10] 武秀荣. 祁连山青海云杉种群分布格局及更新机制研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025. <https://doi.org/10.27025/d.cnki.ggsnu.2025.000068>
- [11] 陈奕辰. 南方杉木人工林林分非空间结构及林分质量遥感量化[D]. 福州: 福建农林大学, 2024. <https://doi.org/10.27018/d.cnki.gfjnu.2024.000669>
- [12] 袁梓馨. 鄂西南鹅掌楸天然林和人工林的林分结构特征比较与综合评价[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2025. <https://doi.org/10.27764/d.cnki.gghbmz.2025.000264>
- [13] 周雨飞,罗超,李生,等. 亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11–21. <https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240292>
- [14] 郭奔,董希斌,张佳旺,等. 间伐强度对小兴安岭落叶松天然林林分径级结构的影响[J]. 东北林业大学学报

- 报, 2025, 53(12): 34–40. <https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2025.12.015>
- [15] 吴兆飞, 张雨秋, 张忠辉, 等. 东北温带森林林分结构与生产力关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 48–55. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20190017>
- [16] 范秀华, 张宝权, 范春雨. 长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1–8. <https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210071>
- [17] Kassier H W. Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model[J]. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2011, 73(1): 63–65. <https://doi.org/10.2989/20702620.2011.574816>
- [18] 李凤日. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [19] 楼一恺, 范忆, 戴其林, 等. 天目山常绿落叶阔叶林群落垂直结构与群落整体物种多样性的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8568–8577. <https://doi.org/10.5846/stxb202007301989>
- [20] 卢炜丽. 重庆四面山植物群落结构及物种多样性研究[D]. 北京: 林业大学, 2009.
- [21] 索安宁. 天水小陇山锐齿栎群落生物多样性研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2003.
- [22] 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(7): 1104–1113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.023>
- [23] 薛卫星. 鄂西南野生鹅掌楸群落结构与人工促进鹅掌楸更新方法研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2021. doi:10.27764/d.cnki.ghbmz.2021.000069
- [24] 刘帅. 天然次生林林分结构分析及多目标智能优化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [25] Cao R B, Wang H, Zhu Y, et al. The synergistic effect of species diversity and functional diversity in subtropical naturally regenerating forests promotes environmental adaptability of biomass accumulation[J]. *Trees, Forests and People*, 2025, 22: 101037. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101037>
- [26] Rahmsdorf E, Doktor D, Feilhauer H, et al. Drivers of remotely sensed tree height heterogeneity across spatial scales: tree species diversity effects depend on local conditions and forest type[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 179: 114245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114245>
- [27] 谢小魁, 苏东凯, 刘正纲, 等. 长白山原始阔叶红松林径级结构模拟[J]. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1477–1481. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2010.0259>
- [28] 沈伟康, 吴江, 官凯程, 等. 台州地区雁荡山系和括苍山系森林群落结构与物种组成分析[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(1): 34–44. <https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240416>
- [29] 孙越, 王清玉, 刘志宇, 等. 长白山区3种类型天然次生林乔木层物种组成和群落结构特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(4): 743–749. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2023.11039>
- [30] 何春梅, 李雨珊, 尹秋龙, 等. 秦岭皇冠暖温性落叶阔叶林优势树种的径级结构和数量特征[J]. 植物生态学报, 2023, 47(12): 1658–1667. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2023.0132>
- [31] 雷娜庆, 刘洋, 萨如拉, 等. 大兴安岭兴安落叶松天然林结构特征[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 8–12. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2017.03.002>
- [32] 陆志星, 王智慧, 韦铄星, 等. 桂西北喀斯特地区不同植被恢复模式植物群落结构与多样性特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(9): 115–126. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.09.013>
- [33] 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. <https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2010.04.021>
- [34] 邢韶华, 姬文元, 郭宁, 等. 川西米亚罗林区云杉天然林与人工林的群落特征比较[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 218–225. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2786.2010.02.014>

Comparison of stand structure and species diversity between *Cunninghamia lanceolata* plantations and natural secondary forests in Mt. Jianfengling

Yin Siguang^{1,2,3#}, Lin Shiyun¹, Song Xiqiang^{1,2}, Peng Wencheng^{3*}

(1. Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education/School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Institute of National Park/Key Laboratory for National Park Protection and Development of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203, China; 3. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571199, China)

Abstract: A comparison was made between *Cunninghamia lanceolata* plantations with 26 and 30 years of natural restoration and natural secondary forests in the Jianfengling area of Hainan Tropical Rainforest National Park. Their non-spatial structural factors such as diameter class structure, height structure, and species diversity were analyzed to systematically reveal the structural evolution of plantations during long-term natural restoration and their differences from natural secondary forests. The results showed that the diameter class structure of plantations exhibited an inverted J-shaped distribution, with large-diameter trees still dominated by *C. lanceolata*, while native regenerating species were concentrated in small diameter classes. The height structure displayed a left-skewed distribution, with *C. lanceolata* predominating in the higher height classes. Species diversity indices indicated significant differences between plantations and natural secondary forests. However, the plantations showed increasing structural complexity and relatively high species diversity during restoration. The innovation of this analysis lies in quantitatively elucidating the structural restoration potential and feasibility of transforming *C. lanceolata* plantations into natural forests from a long-term natural restoration perspective, providing a scientific basis for ecological restoration and close-to-nature management of plantations in Hainan Tropical Rainforest National Park.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* plantation; natural secondary forest; stand structure; diameter class structure; tree height class structure; species diversity

(责任编辑: 张 瑁)