安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 698-705
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260915.005

许萍萍，陈宋佳，李　旭，等. 桉树人工林改造对林下植物群落的短期影响[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 698-705.
Xu Pingping, Chen Songjia, Li Xu, et al. Short-term effects of *Eucalyptus robusta* plantation transformation on understory plant communities[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 698-705.

桉树人工林改造对林下植物群落的短期影响

许萍萍[1,2*]，陈宋佳[2]，李　旭[2]，崔晓东[3]，陈耀辉[3]，李保彬[3]，张　硕[4]
(1. 齐鲁师范学院地理与旅游学院，山东 济南 250200；2. 中国科学院华南植物园退化生态系统植被恢复与管理重点实验室，广东 广州 510650；3. 广东省东江林场，广东 河源 517000；4. 肇庆市林业局，广东 肇庆 526000)

摘　要:【目的】探究桉树（*Eucalyptus robusta*）纯林改造对林下植物群落的短期影响。【方法】以广东东江林场11 年生（EP1）、4 年生（EP2）桉树纯林及分别改造后形成的混交林（EM1、EM2）为研究对象，通过林下植被调查与多样性指数计算，分析不同林龄林分改造后林下植物群落的变化。【结果】1）林分改造影响林下植物群落组成，EM1中灌木和草本型植物的相对重要值占比在短期内分别提高 8.95%和 8.87%，小乔木、藤本和蕨类植物的相对重要值占比分别下降 3.45%、5.50%和 8.87%；EM2 中小乔木和蕨类植物的相对重要值占比分别下降 22.56%和 21.84%，而灌木、藤本及草本植物的相对重要值占比分别增加 10.24%、12.32%和 21.84%。2）与 EP2 相比，EM2 中灌木层物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数在短期内显著提高 78.48%、124.24%、106.70%和 78.45%（P＜0.05），而草本层物种丰富度显著下降 40.15%（P＜0.05）；与 EP1 相比，EM1 中灌木层和草本层多样性指数整体变化不显著（P＞0.05）。3）冗余分析表明，土壤全磷含量与灌木层群落组成显著相关，有效磷含量与草本层群落组成显著相关。【结论】桉树纯林改造为混交林后在短期内影响了林下群落的物种组成和生活型结构，且林下植物群落的变化具有明显的林龄依赖性和层次差异。土壤磷素与植物群落变化关系显著，林下植物群落可能沿磷素可利用性梯度发生重组。建议未来在更长时间尺度上对林下植物群落变化进行监测，以期为桉树人工林改造提供更充分的理论支持。

关键词: 桉树人工林；林分改造；林下植物群落；物种组成；物种多样性
中图分类号: S718.54　　文献标志码: A　　文章编号: 1672-352X (2026)04-0698-08

Short-term effects of *Eucalyptus robusta* plantation transformation on understory plant communities

Xu Pingping[1,2], Chen Songjia[2], Li Xu[2], Cui Xiaodong[3], Chen Yaohui[3], Li Baobin[3], Zhang Shuo[4]
(1. School of Geography and Tourism, Qilu Normal University, Jinan 250200, China; 2. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Guangdong Dongjiang Forestry Farm, Heyuan 517000, China; 4. Zhaoqing Municipal Bureau of Forestry, Zhaoqing 526000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the short-term effects of transforming *Eucalyptus robusta* monocultures into mixed stands on understory plant communities. **[Method]** 11- (EP1) and 4- year-old (EP2) *E. robusta* monoculture plantations and their corresponding transformed mixed stands (EM1 and EM2, respectively) in the Guangdong Dongjiang Forestry Farm, were selected as study sites. Changes in understory plant communities following stand transformation at different stand ages were analyzed based on understory vegetation surveys and diversity index calculations. **[Result]** 1) Stand transformation affected the composition of understory plant communities. In EM1, the relative importance values of shrubs and herbs increased by 8.95% and 8.87%, respectively, in the short term, while those of small trees, lianas, and ferns decreased by 3.45%, 5.50%, and 8.87%, respectively. In EM2, the relative importance values of small trees and ferns decreased by 22.56% and 21.84%, respectively, whereas those of shrubs, lianas, and herbs increased by 10.24%, 12.32%, and 21.84%, respectively. 2) Compared with EP2, shrub-layer species richness, Shannon–Wiener index, Simpson index, and evenness in EM2 increased significantly by 78.48%,

收稿日期: 2025-08-10；**录用日期**：2026-03-31；**网络出版日期**：2026-09-16
基金项目：山东省自然科学基金青年科学基金项目（ZR2024QC343）；山东省高等学校青创科技支持计划项目（2023KJ298）
作者简介：许萍萍，博士，讲师，E-mail：xupp2024@163.com
* **通信作者**：许萍萍，博士，讲师，E-mail：xupp2024@163.com

124.24%, 106.70%, and 78.45%, respectively ($P < 0.05$), whereas herb-layer species richness decreased significantly by 40.15% ($P < 0.05$). In contrast, no significant changes were detected in the diversity indices of either the shrub or herb layer between EP1 and EM1 ($P > 0.05$). 3) Redundancy analysis indicated that soil total phosphorus was significantly associated with shrub-layer community composition, while available phosphorus was significantly associated with herb-layer community composition. **[Conclusion]** The transformation of *E. robusta* monocultures into mixed stands can reshape the species composition and growth-form structure of understory plant communities, exhibiting pronounced stand age dependence and layer-specific differences. Soil phosphorus is a key environmental factor explaining changes in plant community composition, and understory communities may be redistributed along gradients of phosphorus availability. Long-term monitoring of understory vegetation dynamics is recommended to provide stronger theoretical support for the sustainable transformation and management of *Eucalyptus* plantations.

Keywords: *Eucalyptus robusta* plantation; stand transformation; understory plant community; species composition; species diversity

20 世纪 60 年代以来，我国开展了大规模植树造林工程[1]，对提升木材供给能力、增强固碳增汇功能和促进生态修复等发挥了重要作用。然而，大多数人工林由单一树种组成，导致经营过程中产生生物多样性下降、土壤退化、生态服务功能单一等问题[2-3]。与纯林相比，混交林具有更高的林分生产力和生态系统稳定性[4]，且对林下植被的积极影响随时间推移而增强[5]。因此，将纯林改造为混交林被认为是优化人工林生态系统功能的重要途径和实践方向。

林下植物群落是森林生态系统的重要组成部分[6-7]，能够反映生态系统群落结构和功能的稳定性与复杂性[8]，对维持森林生态系统生物多样性、促进土壤养分循环和能量流动起着关键作用[9-11]。从作用途径来看，林分改造主要通过影响林冠结构、光环境、微气候及土壤理化性质，引起林分内环境资源的重新分配[12]，进而重塑群落构建与多样性格局[13]。值得注意的是，与对光环境和林冠结构的广泛关注相比，关于土壤理化性质在改造后如何驱动林下群落组成与多样性的实证研究仍相对匮乏[14]。从改造效果来看，林分改造可以通过增加资源可获得性和允许更多林下物种持续存在来提高林下物种丰富度[15]，但也可能由于一种或几种优势物种的增加而降低林下植物多样性[16]；此外，林分改造还可能导致林下植物出现分层响应差异[17]。综上所述，系统研究林分改造对林下群落组成与多样性的影响，对于全面理解其生态响应及优化经营策略具有重要意义。

桉树是我国南方地区重要的造林树种之一，传统的连栽经营制度已导致桉树林下植物物种多样性减少[18-19]、生态系统服务功能严重减弱。将桉树纯林改造为混交林被认为是促进桉树人工林可持续经营的重要手段。当前关于桉树纯林改造的研究多关注其对林分生长、土壤质量和微生物群落影响[20-22]，而对林下植物群落的响应关注不足。近年研究表明，采用同龄混交方式改造桉树纯林能显著提高林下植物群落多样性并改变其功能特征[23-24]。除同龄混交外，间伐套种也是林分改造的常用手段。然而，间伐套种对林下植物群落多样性和结构的影响尚存争议[2,25]，且鲜有研究关注该改造方式在桉树纯林中的应用效果。

基于此，本研究以广东省东江林场不同生长阶段的桉树人工纯林及其经间伐套种后形成的混交林为研究对象，探讨以下问题：1）不同生长阶段桉树纯林改造后，林下植物群落组成及多样性的变化特征；2）林分改造过程中土壤理化性质对林下植被群落组成与多样性的影响机制。通过深入分析上述问题，以期为相关理论研究提供实证数据支撑，并为区域桉树人工林可持续经营管理及物种多样性保育提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地位于广东省东江林场，林场现经营总面积 76.76 km^2（11.5 万亩），森林总蓄积量为 28 万 m^3，森林覆盖率为 88.0%。该地区属南亚热带湿润季风气候，年平均气温 20.7 ℃，年均降水量 1 767.2 mm，年日照时数 1 687 h，有明显的干湿季之分。该地区属于低山丘陵区，海拔多在 200 m 以下，平均坡度 10°～15°。土壤为酸性赤红壤，主要成土母岩为花岗岩、页岩，部分为砂页岩[26]。林场内广泛分布有针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、山顶常绿灌丛等植物群落。

1.2　样地设置与调查

1.2.1　样地选取　本研究选取不同林龄的尾叶桉（*Eucalyptus urophylla*）纯林及其经间伐套种改造

形成的混交林为研究对象（表 1）。桉树纯林 EP1 和 EP2 分别营造于 2006 年和 2013 年，株行距均为 2 m×3 m。2017 年分别对 EP1 和 EP2 进行间伐套种改造，间伐比例为 50%。间伐后选择固氮树种、珍贵乡土树种等与保留桉树进行行间随机组合混交，择伐后的桉树与新套种树种的株数比约为 1∶1。其中，EM1 的套种树种主要为黑木相思（*Acacia melanoxylon*）、红锥（*Castanopsis hystrix*）、香樟（*Cinnamomum camphora*）和木荷（*Schima superba*）；EM2 的套种树种主要为水翁（*Syzygium nervosum*）、海南红豆（*Ormosia pinnata*）和木荷。改造后的混交林在前 3 年进行统一抚育管理，包括除草、割灌和施肥，每年 1 次。

1.2.2 *群落调查* 根据林场内林分生长、分布及改造现状，于 2021 年 5 月在上述各林分中分别设置 3 个 20 m × 30 m 的重复样地。样地布设于林分内部，尽量避开林缘与道路等强边缘干扰区域，同一林分内重复样地间距大于 100 m。在每个 20 m × 30 m 样地内设置 3 个 2 m × 2 m 小样方，调查灌木层和草本层的植物组成特征。其中，灌木层包括所有灌木、胸径小于 2 cm 的乔木个体（不含套种树）及所有藤本植物；草本层包括所有草本植物（含蕨类等）。调查内容如下：1）灌木层：记录样方内物种名称、高度、株数等；2）草本层：记录物种名称、高度、物种数等[27]。

表 1 样地信息

Table 1 Information of sampling sites

林分	东经（E）	北纬（N）	密度/株·hm^{-2}	海拔/m	坡向/（°）	平均胸径/cm	平均树高/m
EP1	114.72°	23.61°	1 300	200	东 68	15	17
EM1	114.73°	23.62°	600（保留桉树）	183	西 289	19	17
EP2	114.73°	23.61°	1 300	203	北 9	12	13
EM2	114.72°	23.62°	600（保留桉树）	182	北 56	14	13

1.2.3 *土壤样品采集与测定* 本研究中土壤样品均在对应样地范围内采集。采样时采用“S”形布点法，采样点与群落调查样方的距离具有均匀性。2021 年使用内径 3.5 cm 的土钻采集样方内 0～10 cm 土层土壤，每个林分选取 6～8 钻，混合成一个样品，共采集 12 个土壤样品。采用环刀法采集原状土用于测定土壤容重（soil bulk density，BD）。土壤 pH 值按土液比 1∶2.5（质量体积比）将过 2 mm 筛的风干土样与 1 mol·L^{-1} KCl 溶液混合，用经标准缓冲溶液校正后的 pH 计测定。土壤有机碳含量采用元素分析仪测定；鉴于本研究区土壤呈酸性，默认总有机碳（soil organic carbon，SOC）含量等于总碳含量[28]。土壤铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）的浓度通过 1 mol·L^{-1} KCl 浸提后采用比色法测定；土壤全磷（total phosphorus，TP）采用浓硫酸消煮后用钼蓝比色法以紫外分光光度计测定；土壤有效磷（available phosphorus，AP）采用 HCl-NH4F 浸提，通过钼蓝比色法以紫外分光光度计测定[28]。

1.3 生长型划分及多样性计算

结合亚热带地区森林的植物类型，将森林群落维管植物按生长型分为小乔木、灌木、草本、藤本和蕨类 5 个层次[29]。根据样地调查数据，计算林下植被的 α 多样性指数。本研究采用物种丰富度（*R*）、Shannon-Wiener 多样性指数（*H′*）、Simpson 多样性指数（*D*）和 Pielou 均匀度指数（*E*）4 个常用指数测度灌木和草本层的物种多样性；采用重要值（importance value，IV）反映物种在群落中的相对重要性；采用变化率（change rate，*CR*）反映林分改造后植物群落各指标的变化程度。具体计算公式如下[30-31]：

物种丰富度 *R*：$R=S$ （1）

Simpson 多样性指数（*D*）：$D=1-\sum_{i=1}^{s}P_i^2$ （2）

Shannon-Wiener 多样性指数（*H′*）：

$$H'=-\sum_{i=1}^{s}(P_i\ln P_i) \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数（*E*）：$E=H'/\ln S$ （4）

重要值（IV）：IV=（RA+RC+RF）/3

RA 为该物种的相对多度，RC 为该物种的相对盖度，RF 为该物种的相对频度。 （5）

变化率（CR）

$$\mathrm{CR}=(X_{\mathrm{EM}}-X_{\mathrm{EP}})/X_{\mathrm{EP}}\times 100\% \quad (6)$$

式（1）—（6）中，*S* 为样方中的物种数，P_i 为第 *i* 个物种的个体数占群落总个体数的比例。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 R 4.2.0 计算相关指标。使用单因素方差分析和多重比较检验不同林

分间植物多样性指数及土壤理化性质的差异。方差分析前对数据进行正态性检验，符合正态分布后采用 LSD 法进行多重比较；若数据不符合正态分布，则进行数据转换，重新检验正态性后再进行 LSD 多重比较。单因素方差分析与多重比较分别使用 R 语言“car”包和“agricolae”包，作图使用 GraphPad Prism 8。采用冗余分析（redundancy analysis，RDA）探究林下植物群落与土壤理化性质的关系，分析时使用逐步回归剔除共线性较强的因子。RDA 分析及作图使用 R 语言“vegan”包和“ggplot2”包。

2　结果与分析

2.1　林下植物群落组成

EP1 改造为混交林后，灌木层植物减少 2 科、4 属、3 种（表 2），草本层植物增加 1 科，减少 1 种（表 2）。从生长型来看，灌木和草本植物的相对重要值占比分别增加 8.95%和 8.87%，而小乔木、藤本、蕨类植物的相对重要值占比分别下降 3.45%、5.50%和 8.87%（表 3）。改造前灌木层优势种主要为白花泡桐（*Paulownia fortunei*）、粗叶榕（*Ficus hirta*）和玉叶金花（*Mussaenda pubescens*），改造后灌木层主要优势种为白花灯笼（*Clerodendrum fortunatum*）、三桠苦（*Melicope pteleifolia*）和玉叶金花，草本层内主要优势种无变化，为淡竹叶（*Lophatherum gracile*）和芒萁（*Dicranopteris pedata*）。

EP2 改造为混交林后，灌木层植物增加 5 科、9 属、10 种（表 2），草本层植物减少 7 科、8 属、9 种。从生长型来看，小乔木、蕨类植物的相对重要值占比分别下降 22.56%和 21.84%，而灌木、藤本、草本植物的相对重要值占比分别增加 10.24%、12.32%和 21.84%（表 3）。灌木层改造前的主要优势种为白花泡桐和玉叶金花，改造后新增优势种白花灯笼；草本层改造前的主要优势种为淡竹叶，改造后新增优势种芒萁。

2.2　林下植物群落多样性

EP1 改造为混交林后，林下灌木层和草本层的多样性指数均未发生显著变化（$P>0.05$；图 1，图 2）。EP2 改造为混交林后，林下灌木层的物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数分别显著提高 78.48%、124.24%、106.70%和 78.45%（$P<0.05$；图 1（a）—（d））；林下草本层的物种丰富度显著降低 40.15%（$P<0.05$；图 2（a）），其他多样性指数均未发生显著变化（$P>0.05$；图 2（b）—（d））。短期内，不同林龄林分的植物多样性指数对改造的响应存在差异，且灌木层与草本层的物种多样性指数对林分改造表现出明显的分层响应特征。

表 2　林分改造对灌木层和草本层植物组成的影响

Table 2　Effect of stand transformation on plant composition of shrub and herb layer

层次	林分	科	变化率/%	属	变化率/%	种	变化率/%
灌木层	EP1	24	−8.33	30	−13.33	31	−9.68
	EM1	22		26		28	
	EP2	16	31.25	17	52.94	17	58.82
	EM2	21		26		27	
草本层	EP1	7	14.29	9	0	10	−10.00
	EM1	8		9		9	
	EP2	14	−50.00	16	−50.00	18	−50.00
	EM2	7		8		9	

注：以上数据基于调查样方内各科、属、种数量统计所得。

表 3　林分改造对林下植物生长型的影响

Table 3　Effect of stand transformation on the growth pattern of understory plants

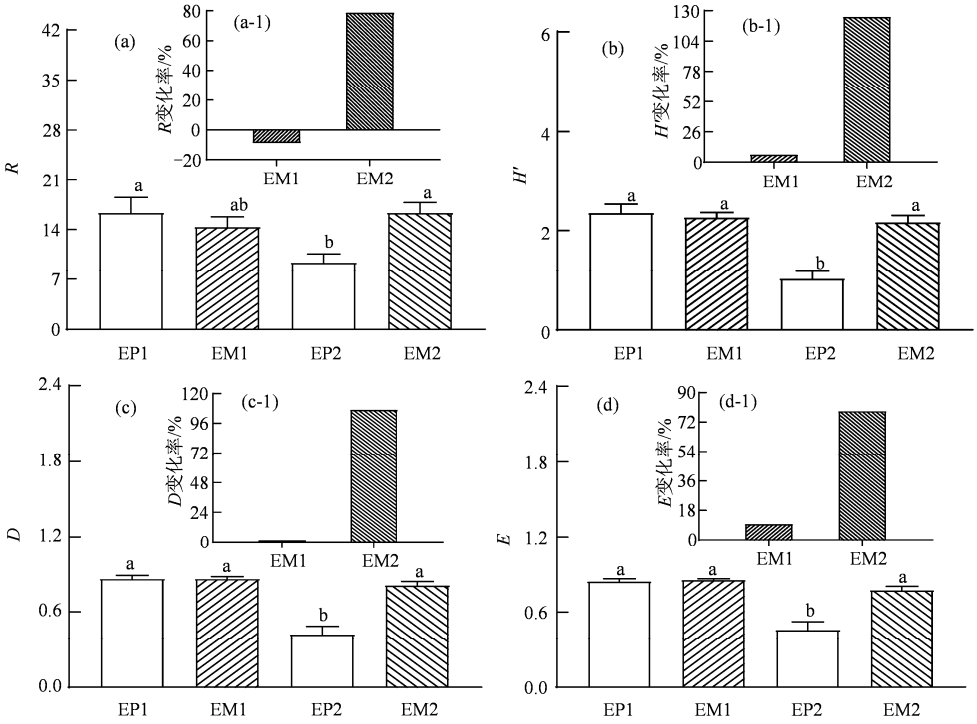
林分	灌木层/ %						草本层/ %			
	小乔木	变化率	灌木	变化率	藤本	变化率	草本	变化率	蕨类	变化率
EP1	29.12	−3.45	56.81	8.95	14.07	−5.50	87.01	8.87	12.99	−8.87
EM1	25.67		65.76		8.57		95.88		4.12	
EP2	50.79	−22.56	41.49	10.24	7.72	12.32	77.03	21.84	22.97	−21.84
EM2	28.23		51.73		20.04		98.87		1.13	

注：灌木层植物生长型包括小乔木、灌木和藤本；草本层植物生长型包括草本植物和蕨类植物。

2.3　土壤理化性质

根据表 4，EP1 改造为混交林后，土壤 TP、AP、NO_3^--N/ NH_4^+-N 显著增加（$P<0.05$），土壤 pH 值显著降低（$P<0.05$），混交林内 SOC、TN、BD 无

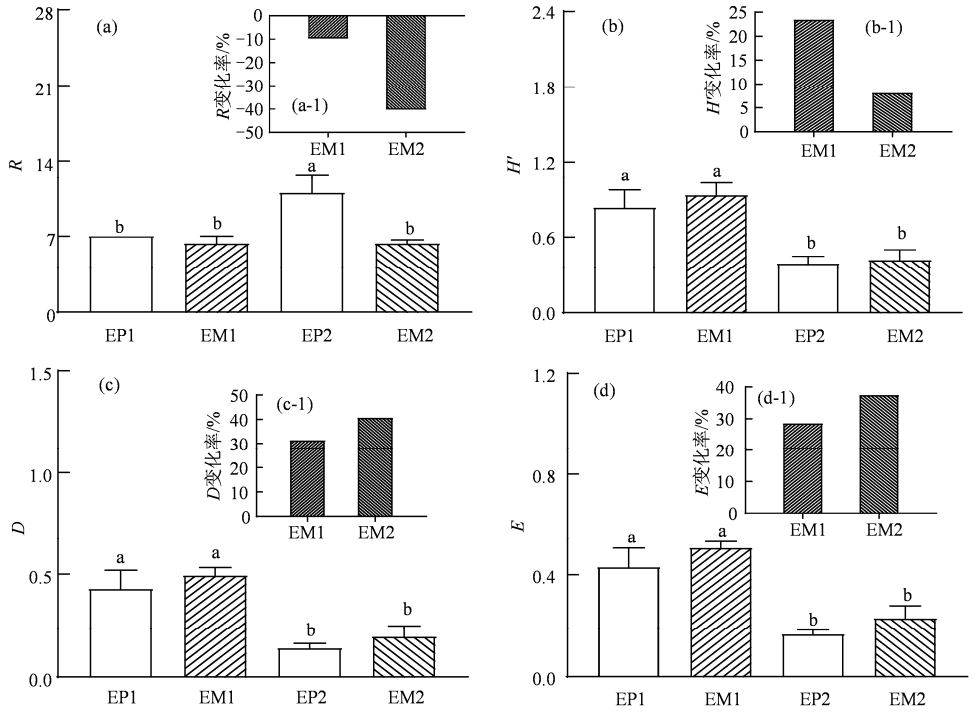
显著变化（$P>0.05$）。EP2 改造为混交林后，混交林内 TP、AP 含量及 pH 值均显著降低（$P<0.05$），SOC、TN、NO_3^--N/NH_4^+-N、BD 无显著变化（$P>0.05$）。



（a）R，物种丰富度；（b）H'，Shannon-Wiener 多样性指数；（c）D，Simpson 多样性指数；（d）E，Pielou 均匀度指数。不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。（a-1）、（b-1）、（c-1）和（d-1）分别为 R、H'、D 和 E 在林分改造后的变化率。

图 1 林分改造对灌木层物种多样性的影响

Figure 1 Effects of stand transformation on species diversity of shrub layer



（a）R，物种丰富度；（b）H'，Shannon-Wiener 多样性指数；（c）D，Simpson 多样性指数；（d）E，Pielou 均匀度指数。不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。（a-1）、（b-1）、（c-1）、（d-1）分别为 R、H'、D 和 E 在林分改造后的变化率。

图 2 林分改造对草本层物种多样性的影响

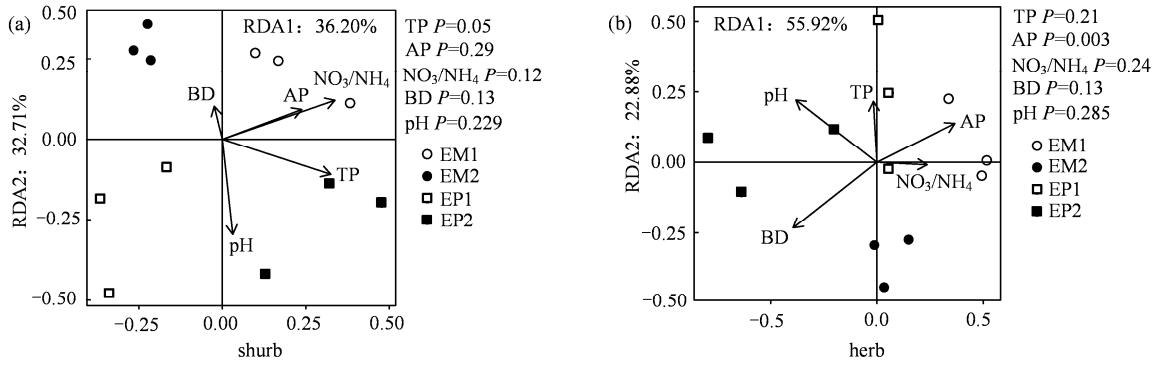
Figure 2 Effects of stand transformation on species diversity of herb layer

表 4　林分改造对土壤理化性质的影响

Table 4　Impacts of stand transformation on soil physicochemical properties

林分	SOC /（g·kg^{-1}）	TN /（g·kg^{-1}）	TP /（mg·kg^{-1}）	NO_3^--N/ NH_4^+-N	AP /（mg·kg^{-1}）	pH	BD /（g·cm^{-3}）
EP1	33.18±4.28^a	2.54±0.29^a	614.06±13.56^b	1.28±0.14^c	10.34±1.41^b	4.47±0.08^a	1.13±0.09^a
EM1	40.82±0.69^a	3.08±0.04^a	804.26±39.34^a	8.24±2.88^a	30.35±0.97^a	3.94±0.14^b	1.00±0.04^a
EP2	20.43±1.65^b	1.59±0.09^b	720.31±80.10^{ab}	4.51±0.84^{bc}	12.00±1.63^b	4.42±0.18^a	1.28±0.14^a
EM2	18.83±3.32^b	1.38±0.22^b	420.24±69.71^c	2.81±0.09^c	6.16±0.30^c	3.91±0.13^b	1.35±0.06^a

注：表中数值为平均值±标准误。不同小写字母表示同一指标在不同林分类型间差异显著（$P<0.05$）。



（a）灌木层，R^2=0.55；（b）草本层，R^2=0.61。R^2 为约束方差。NO_3/NH_4，硝态氮与铵态氮比值。

图 3　物种组成的冗余分析

Figure 3　Redundancy analysis of species composition

2.4　土壤理化性质对林下植物群落的影响

林下灌木层物种组成与土壤 TP 显著相关（图 3（a））。RDA 约束轴共解释了灌木层植物群落变异的 55%，其中 RDA1 和 RDA2 分别解释了约束方差的 36.20%和 32.71%（图 3（a））。图 3（b）表明，土壤 AP 与林下草本层植物群落组成显著相关。RDA 约束轴共解释了草本层植物群落变异的 61%，其中 RDA1 和 RDA2 分别解释了约束方差的 55.92%和 22.88%。

3　讨论

通常认为，将纯林改造为混交林可以提升森林生态系统功能，促进林分可持续经营[32-33]。林分改造能够改变林内环境，并通过影响地上-地下耦合过程重塑物种更新与竞争关系[34-35]，进而影响群落组成与多样性维持。

3.1　林分改造对林下植物群落组成与多样性的短期影响及其林龄依赖性

本研究表明，桉树人工林经间伐套种后，林下植物群落的变化具有明显的林龄依赖性和群落层次差异。EM1 灌木层中灌木类植物的相对重要值上升，藤本植物占比下降，乔木型植物基本保持稳定（表 3），表明林下层呈现促进木本植物生长、抑制藤本植物生长的趋势；草本层则表现为草本植物重要值提高、蕨类植物占比下降（表 3），反映出在有限扰动下已有优势类群的相对权重发生调整，而非大规模物种替换。上述结构变化并未显著改变 EM1 林分的 α 多样性指标（图 1、图 2），说明改造后短期内 EM1 林下植物群落的响应更接近微调而非重建。这一结果与已有观点一致，即适度干预可通过改变林冠结构与林下光环境，降低藤本干扰而不破坏已形成的林下层次结构[32,36-37]。此外，本研究发现 EM1 林分林下草本层物种多样性的变化幅度大于灌木层。这可能是因为林分改造减轻了上层林冠对草本层的抑制作用，加之草本植物体型较小、适应性强、资源需求高、获取速度快[38]，使其能更有效地利用林下空间、光照和养分[13,39-40]。

与此相对，EM2 林分中林下植物群落对改造的响应更为强烈，竞争也更为激烈，具体表现为：灌木层物种数量明显增加（表 2），灌木类和藤本类植物的相对重要值大幅上升，而乔木型个体在灌木层中的相对重要值则明显下降（表 3）；草本层呈现草本植物完全占据、蕨类植物几乎消失的格局，并伴随物种数的大幅下降（表 3）。此外，EM2 灌木层不仅组成结构发生变化（表 3），多样性也显著提升（图 1）。这种变化与张俊艳[41]和庞圣江[42]等的研究结果相似，表明干预在幼龄林林下打开了资源窗口，使更多灌木类群得以进入并共存；但与此同时，草本层物种丰富度显著下降（图 2（a）），说明在林下地表，少数高竞争力草本形成单优群落，挤压了其他草本和蕨类植物的生存空间。

3.2　土壤理化性质对林下植物群落的影响

除林下小气候变化影响林下植被群落生长外，

土壤理化性质也对林下植被具有重要影响[43]。土壤理化性质的差异会影响植物萌发、生根、更新与演替，而林下群落组成的变化又反过来影响土壤发育及养分有效性。RDA 分析结果表明，土壤磷含量与灌木层和草本层物种组成显著相关（图 3）。该结果与李婷婷等[44]的研究一致，即土壤磷含量会影响林下植被的组成与多样性，表明林下植物群落的更新与演替可能呈现沿资源可利用性梯度重新组合的趋势。具体表现为，EM2 中土壤 TP 和 AP 含量下降，伴随灌木层物种明显增补、多样性提升，以及草本层少数高竞争力物种占据优势、蕨类明显衰退（表 3）。长期处于相对贫瘠养分环境的灌木类群往往通过较高的养分利用效率与丛生策略适应胁迫[45]，因此在低磷与光照增强并存的改造后阶段更易共存与补充；相对而言，依赖稳定、湿润、遮阴微环境的蕨类和部分乔木幼苗反而丧失优势[32,46]，导致草本层物种简化。在 EM1 中，灌木类植物相对重要值上升，藤本占比下降，乔木型植物基本保持稳定，草本型植物占比提高、蕨类占比下降，整体 α 多样性未发生显著变化，而土壤 TP 和 AP 含量呈显著增加趋势。推测这一现象可能主要由竞争格局改变而非资源短缺所致，即改造后的 EM1 林分并未打破既有垂直结构，乔木层与优势灌木可能凭借发达根系优先利用土壤浅层磷素，从而限制了其他下层植物对磷的获取，具体表现为优势种集中、弱势种续存受限，而 α 多样性总体保持稳定。

3.3 研究局限

受客观条件限制，本研究仍存在若干局限。首先，在空间尺度与样本量方面存在不足。本研究仅在每种林分内设置 3 个重复样地，虽尽可能保证了造林历史和立地条件的可比性，但在南亚热带复杂地形和经营背景下，有限的样地数量难以充分反映环境异质性，也可能降低部分指标的统计功效。其次，本研究并非严格意义上的长期动态监测，尚不能替代多时相连续观测所得的时间序列证据。未来可在现有固定样地基础上开展多期重复调查，结合林下光环境、土壤水分与微生物群落等过程监测，在更大时空尺度上验证本研究提出的理论框架，从而为桉树人工林改造模式优化和可持续经营提供更为全面、稳健的科学依据。

4 结论

本研究分析了桉树纯林改造对林下植物群落的短期影响。结果表明，EM1 林分中林下植物群落 α 多样性指数未发生显著变化，其在改造后短期内的响应更接近微调而非重建；EM2 林分中林下植物群落对改造的响应更为强烈，竞争作用加剧，灌木层不仅组成结构发生变化，多样性也显著提升；草本层则呈现草本植物完全占据、蕨类植物几乎消失的格局，并伴随物种数大幅下降。上述结果表明，不同生长阶段的桉树纯林改造为混交林后，可在短期内重塑林下群落的物种组成和生活型结构，且林下植物群落的变化具有明显的林龄依赖性和层次差异性。此外，土壤磷含量是解释林下植物群落差异的关键环境因子，林下植物群落可能沿磷有效性梯度发生重组。然而，受样地数量和研究时间尺度等限制，本研究结论主要适用于本区域特定改造模式下的短期情景。建议未来在更长时间尺度上对林下植物群落动态进行监测，以期为区域内桉树人工林改造提供更可靠的理论支持。

参考文献：

[1] Shang R, Chen J M, Xu M Z, et al. China’s current forest age structure will lead to weakened carbon sinks in the near future[J]. Innovation, 2023, 4(6): 100515.

[2] 叶永昌,张浩,陈葵仙,等.香港人工林改造对林下植物自然更新和物种多样性的早期影响[J].林业与环境科学,2016,32(6):1-9.

[3] Liu C L C, Kuchma O, Krutovsky K V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future[J]. Glob Ecol Conserv, 2018, 15: e00419.

[4] Chen R J, Guo X L, Ge Y X, et al. Tree species mixing effects on the radial growth of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix*: a comparison between even-aged and uneven-aged stands[J]. For Ecol Manag, 2024, 566: 122058.

[5] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, et al. Impacts of tree mixtures on understory plant diversity in China[J]. For Ecol Manag, 2021, 498: 119545.

[6] Das Gupta S, Pinno B D. Drivers of understory species richness in reconstructed boreal ecosystems: a structural equation modeling analysis[J]. Sci Rep, 2020, 10: 11555.

[7] Jin Y Q, Liu C G, Qian S S, et al. Large-scale patterns of understory biomass and its allocation across China’s forests[J]. Sci Total Environ, 2022, 804: 150169.

[8] 毛亦杨, 陈富强, 郭勇, 等. 不同林龄红锥人工林林下植被物种多样性恢复动态[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(4): 930-937.

[9] Nilsson M C, Wardle D A. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest[J]. Front Ecol Environ, 2005, 3(8): 421-428.

[10] Fu X L, Yang F T, Wang J L, et al. Understory vegetation leads to changes in soil acidity and in microbial communities 27 years after reforestation[J]. Sci Total Environ, 2015, 502: 280-286.

[11] Su X P, Zheng G C, Chen H Y H. Understory diversity are driven by resource availability rather than resource heterogeneity in subtropical forests[J]. For Ecol Manag, 2022, 503: 119781.

[12] Ares A, Berryman S D, Puettmann K J. Understory vegetation response to thinning disturbance of varying complexity in coniferous stands[J]. Appl Veg Sci, 2009, 12(4): 472-487.
[13] 李俊杰, 韩梦豪, 赵家豪, 等. 间伐对马尾松人工林林下植物多样性的动态影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(4): 788-795.
[14] Balandier P, Mårell A, Prévosto B, et al. Tamm review: forest understorey and overstorey interactions: So much more than just light interception by trees[J]. For Ecol Manag, 2022, 526: 120584.
[15] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6154-6162.
[16] Li X K, Li Y N, Zhang J, et al. The effects of forest thinning on understory diversity in China: a meta-analysis[J]. Land Degrad Dev, 2020, 31(10): 1225-1240.
[17] Yu J T, Zhang X N, Xu C Y, et al. Thinning can increase shrub diversity and decrease herb diversity by regulating light and soil environments[J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 948648.
[18] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 246-250.
[19] 温远光, 左花, 朱宏光, 等. 连栽对桉树人工林植被盖度、物种多样性及功能群的影响[J]. 广西科学, 2014, 21(5): 463-468.
[20] 张兵. 林分改造对桉树林土壤养分含量及氮磷径流流失的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
[21] Pereira A P A, Durrer A, Gumiere T, et al. Mixed *Eucalyptus* plantations induce changes in microbial communities and increase biological functions in the soil and litter layers[J]. For Ecol Manag, 2019, 433: 332-342.
[22] 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.
[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, 2022, 42(4): 556-568.
[24] 王磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1340-1349.
[25] 王家妍, 陈亮, 莫冰萍, 等. 杉木人工林套种不同树种对林分生长和植物多样性的影响[J]. 桉树科技, 2024, 41(2): 57-64.
[26] 黄立新. 东江林场主要植被类型及群落类型分析[J]. 林业勘查设计, 2017, 46(2): 109-111.
[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] Liu X, Reich P B, Liang C, et al. Ecosystem-level warming reduces microbial necromass in the topsoil but not in deeper soil of a subtropical forest[J]. Geoderma, 2025, 458: 117336.
[29] 张星元, 张璐, 马丁, 等. 不同冠层结构下的植物生长型与生活型特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(7): 37-44.
[30] 陈涵, 郭弘婷, 陈睿, 等. 杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10274-10284.
[31] 吴安驰, 邓湘雯, 任小丽, 等. 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7727-7738.
[32] Forrester D I, Pretzsch H. Tamm Review: On the strength of evidence when comparing ecosystem functions of mixtures with monocultures[J]. For Ecol Manag, 2015, 356: 41-53.
[33] Xu H D, Yuan H J, Yu M K, et al. Large macroaggregate properties are sensitive to the conversion of pure plantation to uneven-aged mixed plantations[J]. Catena, 2020, 194: 104724.
[34] Cheng C P, WANG Y D, FU X L, et al. Thinning effect on understory community and photosynthetic characteristics in a subtropical *Pinus massoniana* plantation[J]. Can J For Res, 2017, 47(8): 1104-1115.
[35] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 239-250.
[36] Ares A, Neill A R, Puettmann K J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. For Ecol Manag, 2010, 260(7): 1104-1113.
[37] Ingwell L L, Wright S J, Becklund K K, et al. The impact of lianas on 10 years of tree growth and mortality on Barro Colorado Island, *Panama*[J]. J Ecol, 2010, 98(4): 879-887.
[38] Ampoorter E, Baeten L, Koricheva J, et al. Do diverse overstoreys induce diverse understoreys? Lessons learnt from an experimental-observational platform in Finland[J]. For Ecol Manag, 2014, 318: 206-215.
[39] 杨玉婷, 石玉林, 李战刚, 等. 陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6542-6551.
[40] 周润惠, 唐永彬, 王敏, 等. 威远不同年龄桉树人工林林下物种多样性和土壤理化性质[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 742-748.
[41] 张俊艳, 陆元昌, 成克武, 等. 近自然改造对云南松人工林群落结构及物种多样性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(3): 72-77.
[42] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等.不同造林模式对桉树人工林林下植物物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 44-52.
[43] 姚俊宇, 齐锦秋, 张柳桦, 等. 人为干扰对碧峰峡山矾次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2942-2950.
[44] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1168-1177.
[45] 苏波, 韩兴国, 黄建辉, 等. 植物的养分利用效率(NUE)及植物对养分胁迫环境的适应策略[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 335-343.
[46] Denslow J S. Tropical rainforest gaps and tree species diversity[J]. Annu Rev Ecol Syst, 1987, 18: 431-451.