

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230303

# 尾巨桉林不同生长发育阶段的土壤理化性质与林下植物多样性的动态变化趋势及其规律

陆海飞<sup>1,2</sup>, 徐建民<sup>1\*</sup>, 李光友<sup>1</sup>, 马宁<sup>3</sup>, 栗国磊<sup>3</sup>, 张云东<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 热带林业研究国家林业与草原局重点实验室, 广东广州 510520; 2. 浙江树人学院 城建学院, 浙江杭州 310015; 3. 云南云景林纸股份有限公司, 云南景谷 666499; 4. 普洱市卫国林业局, 云南普洱 665199)

**摘要:** [目的] 对比滇南山地桉树纸浆林不同龄组的林分生长指标、土壤理化性质与林下植物多样性的变化及相关性, 探索桉树人工林从幼龄林至过熟林不同生长发育阶段的土壤理化性质与林下植物多样性的动态变化趋势及其规律, 旨在为桉树纸浆林可持续经营提供理论依据。[方法] 本研究选取土壤以粗粒结晶岩、泥类岩和碳酸盐岩发育形成的赤红壤或红壤, 海拔 1 400~1 700 m 立地条件基本一致的样地 106 块, 分属 5 个不同龄组, 通过方差、多重比较和冗余分析不同龄组的生长指标、土壤因子和植物多样性指数之间的差异, 采用相关性分析揭示它们之间的关联性。[结果] 不同龄组尾巨桉的树高、胸径和活立木蓄积量随林分生长而呈增长趋势, 中龄林时增速较快, 而到成熟林 (7~8 a) 时增速放缓。不同龄组间土壤孔隙度和土壤含水量差异显著, 并随林分生长过程整体呈先上升后下降的趋势, 在近熟林时达到最高值。不同龄组的土壤全氮差异显著, 且林木树高、胸径和活立木蓄积量的生长与全氮有较强正相关。尾巨桉林下草本和总灌草的丰富度指数、草本均匀度指数与土壤有机质、有效锌呈正相关。灌木的丰富度指数与土壤含水量、有效氮、有效铜呈正相关。草本和灌木的 Shannon-Wiener 指数与土壤全氮呈正相关, 与土壤密度、pH 值呈较大的负相关。灌木 Pielou 均匀度指数与土壤全钾呈正相关。其中, 土壤有机质对尾巨桉林下植被多样性的影响最大, 解释比例达 18.3% ( $F=13.21, P<0.05$ )。[结论] 滇南山地立地生境相近的尾巨桉人工林, 幼龄林生长与草本植物存在竞争关系, 植物多样性对土壤结构及其物理性质的影响大于化学性质的影响, 近成熟时, 总灌草、灌木生物多样性达最大值, 揭示了近成熟后桉树人工林生态系统进入自恢复演替。

**关键词:** 尾巨桉; 植物多样性; 土壤理化性质; 冗余分析

**中图分类号:** S727.1; S754

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2024)01-0082-10

林木生长发育与气候、地质地貌、土壤、水分和植被等自然因子息息相关<sup>[1]</sup>。其中, 林下植被与土壤是相互作用的有机体, 土壤作为森林生态群落中物质与能量转换的重要媒介, 为林下植被生长发育提供必需的矿质养分和水分, 决定着生态系统的结构、功能和生产力, 是林木赖以生存的基本保障<sup>[2-3]</sup>。立地的差异可以直接影响森林生态系统中

植被的更新与演替, 同时森林生态系统的植物群落构成和多样性又间接改变土壤的理化性质, 进而影响土壤养分的有效性<sup>[4-5]</sup>。因此, 研究人工林林下植被多样性变化及其群落的演替过程与土壤养分的关系, 可为人工林经营、林下植被管理与调控提供重要依据。

自 2004 年国家发改委公布了《全国林纸一体

收稿日期: 2023-08-03 修回日期: 2023-10-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“桉树高纤维纸浆材定向培育技术研究”项目 (2016YFD0600503)

\* 通讯作者: 徐建民, 博士, 研究员, 林木遗传改良与森林培育, E-mail: jianmxu@163.com

化工程建设“十五”及 2010 年专项规划》以来, 国内外大型造纸业在华南地区的海南岛、广东雷州半岛, 广西的桂南和桂中地区, 以及云南的滇南地区营建了大规模的桉树纤维原料林, 初步形成了我国南方地域性的桉树林浆纸一体化发展格局。截止到 2018 年, 我国桉树人工林面积已达 546 万  $\text{hm}^2$  占全国森林总面积 2.5%, 占全国人工林面积 6.8%, 年均生产木材 4 000 万  $\text{m}^3$ , 占全国商品林产材 25%, 为国内木材、纤维原料的生产提供了重要保障<sup>[6]</sup>。其中, 云南桉树人工林面积 42.24 万  $\text{hm}^2$ , 仅滇南的普洱市, 尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) 人工林就已达 18.5 万  $\text{hm}^2$  活立木蓄积量达 3 500 万  $\text{m}^3$  占全省 43.8%。该区域的尾巨人工林立地特征、立地类型划分及其质量评价的研究已有报道<sup>[7]</sup>。

桉树人工林多以纯林为主, 与混交林相比因物种多样性减少, 在降水过程中地表径流、土壤及其养分易流失等生态问题, 导致其生态系统的稳定性相对较弱, 不利于桉树人工林可持续发展<sup>[8]</sup>。林下植被作为森林生态系统的重要组成部分, 在保护森林生物多样性、维持林地土壤水分、土壤理化性质和推动森林生态系统演替及其服务功能发挥等方面起到至关重要的作用<sup>[9-10]</sup>, 植物多样性的增加能一定程度促进人工林生产力的提升<sup>[11]</sup>。因此, 近年来桉树林下植物多样性与土壤理化特征的研究日益受到重视, 有部分学者对不同林龄的人工林林下植被多样性做了相应研究<sup>[12-14]</sup>, 但针对桉树人工林生长发育全过程的植物多样性和土壤理化特征关系的动态变化趋势及其规律的研究甚少。本研究以云南省滇南山地尾巨桉纸浆林为研究对象, 在前期立地类型划分及其质量评价<sup>[7]</sup>和尾巨桉纸浆林龄组划分<sup>[15]</sup>的基础上, 筛选立地生境相近、土壤种类相同和立地条件基本一致的样地, 基于林分发育过程的生长与林下植被多样性及林地土壤理化性质的对比分析, 旨在揭示不同龄组的尾巨桉生长、林地土壤理化性质和林下植物多样性的动态变化及其规律, 为桉树纸浆林高效栽培与林下植被管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

滇南地区的桉树工业原料林是典型山地人工林, 主要分布在普洱市景谷县、澜沧县、宁洱县和

临沧市 ( $22^{\circ}49' \sim 23^{\circ}52' \text{ N}$ 、 $100^{\circ}02' \sim 101^{\circ}07' \text{ E}$ ), 经营范围区属南亚热带季风气候, 由于相对海拔高, 因而气候具有明显的垂直变化特点。年平均气温  $20.1^{\circ}\text{C}$ , 极端高温  $38.6^{\circ}\text{C}$ , 极端低温  $0.2^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $7\ 360^{\circ}\text{C}$ , 年平均降雨量  $1\ 354\ \text{mm}$ , 年蒸发量为  $1\ 916.4\ \text{mm}$ , 5—10 月为雨季; 年均气温  $18.2 \sim 22.1^{\circ}\text{C}$ , 最冷月 (1 月) 平均气温为  $12^{\circ}\text{C}$ , 总的气候特点是四季不分明、干湿季明显, 冬无严寒、夏无酷暑, 日温差大、雨热同季。桉树林下植被以紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophora* (Spreng.) R. M. King & H. Rob)、蔓生莠竹 (*Microstegium fasciculatum* (L.) Henrard)、地桃花 (*Urena lobata* L.)、余甘子 (*Phyllanthus emblica* L.) 等为主的优势种。云景林纸业有限公司自 2001 年起引种广西东门林场中澳桉树项目选育的 DH32-16、DH32-22 和 DH33-27 尾巨桉无性系 (母本尾叶桉是来自印度尼西亚的 Alor Island, 父本巨桉来自澳大利亚昆士兰北部 Mareeba 的 Davies Creek) 发展纸浆纤维原料林, 造林技术措施采用人工挖穴整地, 挖穴规格:  $30\ \text{cm} \times 30\ \text{cm} \times 30\ \text{cm}$ , 造林密度  $2\ 220\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 基肥为桉树专用复合肥 (N : P : K=10 : 16 : 7), 有效养分 33%, 定植当年扩穴铲草抚育 1~2 次、根据杂草旺盛程度适时开展除杂抚育, 翌年追肥 1 次砍杂刈草 2 次, 追肥量  $0.5\ \text{kg} \cdot \text{株}^{-1}$ , 选用氮、磷、钾复合肥 (N : P : K=18 : 12 : 10); 种植第三年追肥 1 次砍杂刈草 1 次, 追肥量  $0.7\ \text{kg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 分析样地的选取

2017—2020 年期间, 在普洱市宁洱县、景谷县和景谷相邻的临翔区平村乡, 依据成土母岩、海拔、坡度、坡位、土层厚度、坡向等立地因子设置标准地, 调查了 1~15 年生尾巨桉人工林。样地设置以  $20\ \text{m} \times 20\ \text{m}$  的标准地, 采用典型抽样法, 通过 GPS (Garmin GPS MAP60 CSX) 记录地理坐标和海拔, 使用超声波测高仪 (Swedish Hagl of Vertex IV-30) 和胸径尺对尾巨桉进行每木检测树高 ( $H$ )/m 和胸径 ( $DBH$ )/cm; 每种立地因子, 至少设置 3 个样地。样地每木调查后选树高排名在前 5 位的为优势木, 取其平均值作为林分优势木平均高。在对角线方向等距离分别挖 3 个土壤剖面, 测

量枯落物厚度, 土壤采集按照 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 剖面层次, 分层采样, 每层重复 3 次。将 100 cm<sup>3</sup> 环刀刃口向下垂直压入土中, 直至环刀筒中充满样品为止, 获得土壤用于后期测定土壤理化性质; 标准地四角及中心位置设置 5 块 2 m × 2 m 林下灌木层样方, 且在灌木样方

内再设置 1 m × 1 m 的草本样方, 记录物种数、个体数、高度、盖度。圆盘制作解析与土壤理化性质的测定方法详见<sup>[16]</sup>。本研究选取土壤以粗粒结晶岩、泥类岩和碳酸盐岩分化形成的赤红壤或红壤, 海拔 1 400~1 700 m 立地条件基本一致的样地进行对比分析, 详见表 1。

表 1 不同龄组分析样地的基本概况

Table 1 Basic conditions of plots of different age groups

龄组 Age groups	样地数 Plots number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	枯落物厚度 Litter thickness/cm	郁闭度 Canopy density
幼龄林 Young aged forest(1~3 a)	19	1 489~1 568	6~36	0~2	0.6~0.8
中龄林 Middle aged forest(4~5 a)	23	1 437~1 568	9~46	0~2	0.6~0.8
近熟林 Near mature forest(6 a)	25	1 510~1 685	11~39	0~3	0.7~0.8
成熟林 Mature forest(7~8 a)	22	1 496~1 702	8~42	0~3	0.7~0.9
过熟林 Over mature forest(≥9 a)	17	1 522~1 671	12~44	0~3	0.6~0.9

注: 龄组划分参考《LY/T 2908-2017主要树种龄级与龄组划分》行业标准, 结合数量成熟龄、工艺成熟龄确定<sup>[15]</sup>

Notes: Age group division was determined by referring to industry standard LY/T 2908-2017 Age Class and Age Group Division of Main tree species, combined with quantitative maturity and process maturity<sup>[15]</sup>

## 2.2 数据处理

冗余分析 (RDA) 是一种约束化的主成分分析排序方法, 适宜分析林下植物多样性与土壤理化性质的相关性<sup>[17]</sup>, 箭头之间的夹角代表变量之间的相关性。用 Canoco 5 进行土壤理化指标与尾巨桉林下植物多样性的冗余分析<sup>[18]</sup>。物种多样性指标主要包含丰富度指数、多样性指数和均匀度指数<sup>[19-20]</sup>。丰富度指数主要用来测定一定空间范围内物种的丰富程度; 多样性指数是用来评价优势种多样性水平与稀有种多样性水平的函数; 均匀度指数是一个群落或环境中的全部物种数目个体数目的分配状况。Shannon-wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数, 公式分别如下。

Shannon-wiener 多样性指数( $H$ ):

$$H = - \sum_i^S N_i \times \ln N_i \quad (1)$$

$$\text{Simpson 多样性指数}(D): D = 1 - \sum_i^S N_i^2 \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数多样性指数( $J$ ):

$$J = \left( - \sum_i^S N_i \ln N_i \right) / \ln S \quad (3)$$

式中:  $S$  代表每块标准地的物种总数;  $N$  代表每块标准地的物种个体总数;  $N_i$  代表每块标准地的第

$i$  个物种的重要值。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同龄组尾巨桉人工林生长状况

由表 2 可知, 尾巨桉林分的树高、胸径和林分活立木蓄积量随树龄增长而呈增长趋势, 由幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林至过熟林树高的增量分别为 98.8%、29.0%、17.4%、8.9%, 每公顷活立木蓄积量增长分别为 797.6%、175.1%、122.5%、70.1%, 尾巨桉林分树高和活立木蓄积量的增幅在生长发育过程中中龄林时最高, 近熟林、成熟林和过熟林之间增幅减缓。优势木的平均高和平均胸径也随林分生长呈增长趋势, 幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林至过熟林的优势木平均高增量分别为 99.0%、23.4%、13.8%、12.2%, 优势木平均胸径增量分别为 78.0%、58.9%、48.3%、22.7%。尾巨桉优势木树高和胸径增幅随生长发育在中龄林最高, 近熟林、成熟林和过熟林之间增幅减缓。

### 3.2 不同龄组尾巨桉人工林土壤理化性质

由表 3 可知, 幼龄林与其他龄组在全氮、全钾、有效磷、有效钾存在显著差异; 近熟林与其他龄组在土壤含水量、土壤孔隙度、全磷、有效锌存在显著差异; 成熟林与其他龄组在土壤密度存在显著差异, 其他龄组之间差异不显著。在幼龄林时全

表 2 样地不同龄组调查统计

Table 2 Survey statistics of different age groups in sample plots

龄组 Age groups	树高 H/m	胸径 DBH/cm	活立木林分蓄积量 Living wood growing stock/ (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	优势木平均高 Average H of dominant trees/m	优势木平均胸径 Average DBH of dominant trees/cm
幼龄林 Young aged forest	8.5 ± 1.46	2.9 ± 0.49	8.19 ± 0.08	10.3 ± 1.41	4.1 ± 1.04
中龄林 Middle aged forest	16.9 ± 2.08	6.8 ± 0.46	73.51 ± 0.09	20.5 ± 2.12	7.3 ± 1.26
近熟林 Near mature forest	21.8 ± 1.74	10.2 ± 0.51	202.19 ± 0.10	25.3 ± 1.75	11.6 ± 1.51
成熟林 Mature forest	25.6 ± 1.21	14.3 ± 0.44	449.93 ± 0.06	28.8 ± 2.53	17.2 ± 1.34
过熟林 Over mature forest	27.9 ± 2.36	18.1 ± 0.54	765.27 ± 0.14	32.3 ± 2.82	21.1 ± 1.72

钾、有效磷、有效钾和有效硼含量最高, 全氮含量最低; 在近熟林时土壤含水量、土壤孔隙度、全氮和有机质含量最高, 全磷和有效锌含量最低; 在成

熟林时土壤密度最高; 在过熟林时全磷和有效铜含量最高, 全钾含量最低。

表 3 不同龄组尾巨桉人工林林地土壤理化性质

Table 3 The physicochemical properties of soil in *E. urophylla* × *E. grandis* at different age groups

龄组 Age groups	幼龄林 Young aged forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Over mature forest
土壤密度 Soil density/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.09 ± 0.17 b	1.16 ± 0.14 b	1.21 ± 0.09 b	1.43 ± 0.15 a	1.27 ± 0.11 b
含水量 Water content/%	25.38 ± 0.81 c	30.51 ± 0.77 b	34.57 ± 0.98 a	29.54 ± 0.84 b	23.31 ± 0.69 c
土壤孔隙度 Soil porosity/%	22.75 ± 1.21 c	25.13 ± 1.41 b	29.32 ± 1.15 a	26.41 ± 0.87 b	23.47 ± 0.93 c
全氮 TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.93 ± 0.08 c	1.18 ± 0.12 b	1.34 ± 0.11 a	1.28 ± 0.09 a	1.12 ± 0.13 b
全磷 TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.96 ± 0.11 a	0.84 ± 0.09 b	0.63 ± 0.07 c	0.87 ± 0.15 b	1.01 ± 0.17 a
全钾 TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	18.83 ± 0.73 a	16.54 ± 0.65 b	15.27 ± 0.57 b	12.07 ± 0.46 c	10.37 ± 0.49 c
有效磷 AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.74 ± 0.31 a	2.83 ± 0.27 b	2.57 ± 0.23 b	1.93 ± 0.31 c	2.06 ± 0.28 c
有效钾 AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	144.5 ± 6.89 a	117.6 ± 5.51 b	94.2 ± 4.87 b	103.6 ± 5.02 b	111.2 ± 3.98 b
有机质 Soil organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.74 ± 2.13 b	14.43 ± 3.35 a	15.12 ± 3.12 a	10.23 ± 2.76 b	9.81 ± 1.86 b
有效硼 AB/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.26 ± 0.03 a	0.19 ± 0.02 b	0.14 ± 0.04 b	0.16 ± 0.02 b	0.23 ± 0.03 a
有效锌 AZn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.98 ± 0.11 a	1.05 ± 0.09 a	0.52 ± 0.07 b	0.82 ± 0.12 a	0.92 ± 0.08 a
有效铜 Available Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.86 ± 0.09 a	0.65 ± 0.07 b	0.71 ± 0.08 b	0.59 ± 0.05 b	0.92 ± 0.08 a

注: 同列数据后不同小写字母代表在 $P<0.05$ 水平上显著差异, 下同

Notes: Different lowercase letters in the same column represent significant difference at  $P<0.05$ . The same below

### 3.3 尾巨桉林下植被多样性的变化

由表 4 可知, 对优势种进行相对重要值分析, 不同龄组的尾巨桉林下灌木和草本物种差异较大, 不同龄组植物的重要值表现不同。在草本层中, 幼龄林、中龄林和成熟林优势种为马唐、紫茎泽兰和葫芦茶; 近熟林优势种为火绒草、葫芦茶和马唐; 过熟林优势种为鬼针草、紫茎泽兰和葫芦茶。葫芦茶在各个龄组中出现且占有优势, 表明它是尾巨桉人工林草本层的优势种。在灌木层中, 幼龄林、中龄林和过熟林优势种为野牡丹、地桃花和盐肤木;

近熟林优势种为地桃花、余甘子和粗叶悬钩子; 成熟林优势种为野牡丹、盐肤木和胡枝子。

将尾巨桉不同林龄组的林下灌木和草本 S、D、H 和 J 进行方差分析。由表 5 可知, 除草本的 Simpson 指数, 其余植物多样性指数在不同龄组间均存在显著差异, 尾巨桉不同龄组的灌木层和草本层的丰富度也存在显著差异。灌木层随林龄的增加而呈现先上升而后下降的趋势, 而草本层则呈下降的趋势。灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和草本层 Shannon-Wiener 指数在幼



表 4 滇南地区尾巨桉人工林林下植物优势种及相对重要值

Table 4 Dominant species and relative importance of undergrowth plants of *E.urophylla* × *E.grandis* plantation in southern Yunnan

层次 Layer	物种 Species	相对重要值 Relative importance value				
		幼龄林 Young aged forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Over mature forest
草本层 Herb layer	紫茎泽兰 ( <i>Eupatorium adenophora</i> )	17.82	19.05	18.12	19.72	23.11
	葫芦茶 ( <i>Tadehagi triquetrum</i> (L.) Ohashi)	11.19	16.32	21.17	17.07	19.21
	马唐 ( <i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.)	31.27	23.12	19.42	18.45	15.72
	鬼针草 ( <i>Bidens pilosa</i> L.)		9.73	13.81	12.84	25.69
	火绒草 ( <i>Leontopodium leontopodioides</i> Willd.)	9.15	15.78	20.57	12.27	
灌木层 Shrub layer	地桃花 ( <i>Urena lobata</i> L.)	27.45	25.17	29.59	17.73	22.87
	盐肤木 ( <i>Rhus chinensis</i> Mill.)	18.12	21.64	19.45	22.47	25.18
	野牡丹 ( <i>Melastoma malabathricum</i> L.)	34.22	25.16	21.45	23.48	19.71
	胡枝子 ( <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.)	11.17	15.61	16.48	21.29	13.15
	粗叶悬钩子 ( <i>Rubus alceifolius</i> Poiret)		17.34	21.72	18.33	15.96
	余甘子 ( <i>Phyllanthus emblica</i> L.)		15.37	24.11	16.76	11.82

龄林与其他龄组之间差异显著，而其他龄组间差异不显著；灌木层 Pielou 均匀度指数在成熟林与近熟林、过熟林之间差异不显著，而与其他龄组差异显著。近成熟时，灌木 Simpson 指数、Shannon-

Wiener 指数、Pielou 均匀度指数达最大值。幼龄林各草本多样性指数高于其他龄组，呈逐渐递减的趋势，而近熟林时灌木各多样性指数最高，呈先增加后下降的趋势。

表 5 不同龄组尾巨桉林下植物多样性指数多重比较

Table 5 Multiple comparison of understory plant diversity index of *E.urophylla* × *E.grandis* plantation in different stand ages

龄组 Stand age	幼龄林 Young aged forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Over mature forest
灌木S Shrub S	11 ± 1.82 c	17 ± 3.13 b	21 ± 3.51 a	16 ± 3.24 b	14 ± 2.91 bc
草本S Herb S	18 ± 2.96 a	14 ± 4.21 b	14 ± 4.77 b	12 ± 3.48 bc	10 ± 2.76 c
灌木D Shrub D	0.51 ± 0.02 b	0.65 ± 0.05 a	0.68 ± 0.03 a	0.67 ± 0.04 a	0.65 ± 0.03 a
草本D Herb D	0.64 ± 0.04 a	0.60 ± 0.03 a	0.59 ± 0.02 a	0.58 ± 0.04 a	0.56 ± 0.03 a
灌木H Shrub H	3.2 ± 0.08 b	4.5 ± 0.08 a	4.7 ± 0.07 a	4.4 ± 0.08 a	4.3 ± 0.09 a
草本H Herb H	5.6 ± 0.08 a	4.4 ± 0.07 b	4.3 ± 0.05 b	4.1 ± 0.04 b	4.0 ± 0.49 b
灌木J Shrub J	0.29 ± 0.03 cd	0.33 ± 0.04 c	0.42 ± 0.03 a	0.41 ± 0.02 ab	0.37 ± 0.02 bc
草本J Herb J	0.41 ± 0.02 a	0.34 ± 0.04 b	0.35 ± 0.05 b	0.31 ± 0.02 b	0.30 ± 0.03 b

对尾巨桉生长指标和林下植物多样性进行相关性分析。由表 6 可知，尾巨桉的生长与林下植物多样性及丰富度存在一定的关联性，灌木丰富度、Shannon-Wiener 指数与尾巨桉林分树高、优势木树高、林分蓄积量生长呈显著正相关，与林分胸径和优势木平均胸径呈不显著正相关；草本

Simpson、Shannon-Wiener 指数与尾巨桉林分树高、蓄积量和优势木平均高呈不显著负相关。

### 3.4 林下植物多样性和理化指标的关系

尾巨桉林下植被多样性的趋势对应分析 (DCA) 显示，第一轴梯度长度为 2.47，小于 3，表明该数据适合 RDA。RDA 的分析揭示了尾巨桉生

表 6 尾巨桉生长指标与植物多样性的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between growth and plant diversity of *E.urophylla* × *E.grandis* plantation

多样性指数 Diversity index	树高 <i>H</i>	胸径 <i>DBH</i>	活立木林分蓄积量 Living wood growing stock	优势木平均高 Average <i>H</i> of dominant trees	优势木平均胸径 Average <i>DBH</i> of dominant trees
灌木丰富度 Shrub <i>S</i>	0.341*	0.312	0.495*	0.359*	0.306
草本丰富度 Herb <i>S</i>	-0.231	0.109	-0.095	-0.082	0.217
总灌草丰富度 Shrub-herb <i>S</i>	0.229	0.127	0.283	0.317	0.198
灌木 Simpson 指数 Shrub <i>D</i>	-0.052	0.091	0.024	0.032	0.037
草本 Simpson 指数 Herb <i>D</i>	-0.314	-0.272	-0.109	-0.207	-0.193
灌木 Shannon-Wiener 指数 Shrub <i>H</i>	0.327*	0.105	0.318*	0.364*	0.313
草本 Shannon-Wiener 指数 Herb <i>H</i>	-0.103	0.182	-0.083	-0.203	0.196
灌木 Pielou 均匀度指数 Shrub <i>J</i>	0.033	0.051	0.045	0.113	0.049
草本 Pielou 均匀度指数 Herb <i>J</i>	0.008	-0.015	-0.038	-0.112	0.002

长与林下植物多样性存在显著的响应。由表 7 可知, 第 1 轴和第 2 轴的特征值分别为 0.846 6 和

0.108 7, 累积解释率为 95.53%, 能较好地反映林下植被多样性与土壤理化性质的关系。

表 7 尾巨桉林下植物多样性与土壤理化指标的 RDA 值

Table 7 RDA ranking of understory vegetation diversity and soil physicochemical property of *E. urophylla* × *E. grandis*

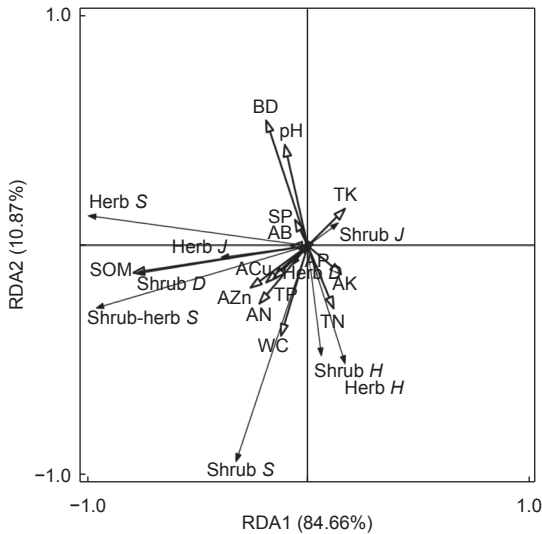
参数 Statistic	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴3 Axis 3	轴4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.846 6	0.108 7	0.016 2	0.011 1
性状-土壤因子的相关性 Correlation of trait-soil factors	0.895 0	0.801 5	0.721 1	0.814 1
性状累计变化 Cumulative variation of trait /%	84.66	95.53	91.15	98.26
总特征值 Sum of all eigenvalues				1
总典范特征值 Sum of canonical eigenvalues				0.572
轴1显著性检验( <i>F</i> 检验) Permutation test on first axis ( <i>F</i> test)	<i>F</i> =19.27	<i>p</i> =0.003		
所有轴显著性检验( <i>F</i> 检验) Permutation test on all axis ( <i>F</i> test)	<i>F</i> =4.935	<i>p</i> =0.004		

通过冗余分析 (RDA) 获得土壤理化指标与尾巨桉林下植被多样性的关系, 实线箭头为尾巨桉林下草本、灌木的丰富度、Shannon-Wiener、Simpson 和均匀度指数, 空心箭头为土壤理化组分。箭头之间夹角代表指标间的相关性, 锐角为正相关而钝角为负相关。由图 1 可知, 尾巨桉林下草本和总灌草的丰富度指数、草本均匀度指数与土壤有机质、有效锌呈正相关。灌木的丰富度指数与土壤含水量、有效氮、有效铜呈正相关。草本和灌木的 Shannon-Wiener 指数与土壤全氮呈正相关, 与土壤密度、pH 值呈较大的负相关。灌木 Pielou 均匀度指数与土壤全钾呈正相关。其中, 土壤有机质对尾巨桉林下植被多样性的影响最大, 解释比例达 18.3%

(*F*=13.21, *P*<0.05)。

## 4 讨论

林分生长、林下植被多样性与林地土壤理化性质之间的关系是人工林经营不可忽视的重要因素, 根据植被多样性和土壤理化性质的差异探索影响林分生长的关键因子, 为人工林可持续经营提供理论依据<sup>[21-23]</sup>。对滇南山地尾巨桉人工林林分生长发育研究发现, 树高、胸径和蓄积量的增长量随龄级的增加而增加, 在中龄林 (4~5 a) 时增速最快, 而到成熟林 (7~8 a) 时增速放缓, 与广西中南部丘陵地区尾巨桉人工林在基准年龄 6 a 时相比, 其林分蓄积量达到数量成熟为 8~9 a 延后 1~2 a<sup>[16]</sup>。



注: 灌木丰富度指数 (Shrub S); 草本丰富度指数 (Herb S); 总灌草丰富度指数 (Shrub-herb S); 灌木 Simpson 指数 (Shrub D); 草本 Simpson 指数 (Herb D); 灌木 Shannon-Wiener 指数 (Shrub H); 草本 Shannon-Wiener 指数 (Herb H); 灌木 Pielou 均匀度指数 (Shrub J); 草本 Pielou 均匀度指数 (Herb J); 土壤密度 (BD); 含水量 (WC); 土壤孔隙度 (SP); 土壤 pH 值 (pH); 土壤有机质含量 (SOM); 土壤总氮含量 (TN); 土壤总氮含量 (TN); 土壤总钾含量 (TK); 土壤水解性氮含量 (HN); 土壤有效磷含量 (AP); 土壤有效钾含量 (AK); 有效铜含量 (ACu); 有效锌含量 (AZn); 有效硼含量 (AB)

Notes: Shrub richness index (Shrub S); Herb richness index (Herb S); Shrub-herb richness index (Shrub-herb S); Shrub Simpson index (Shrub D); Herb Simpson index (Herb D); Shrub Shannon-Wiener index (Shrub H); Herb Shannon-Wiener index (Herb H); Shrub Pielou index (Shrub J); Herb Pielou index (Herb J); Bulk density (BD); Water content (WC); Soil porosity (SP); Soil pH value (pH); Soil organic matter content (SOM); Soil total nitrogen content (TN); Soil total nitrogen content (TN); Soil total potassium content (TK); Soil hydrolyzable nitrogen content (HN); Soil available phosphorus content (AP); Soil available potassium content (AK); Available Cu content (ACu); Available Zn content (AZn); Available boron content (AB)

图 1 尾巨桉林下植被多样性与土壤理化指标之间的 RDA 分析

Fig. 1 Analysis of RDA between understory vegetation diversity and soil physicochemical index of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation

土壤理化性质是影响林木生长发育的重要因子, 其中土壤孔隙度、土壤密度和含水量能影响植物根系的延展性、根呼吸以及对土壤养分的吸收<sup>[24]</sup>。本研究发现土壤孔隙度和含水量在林分龄组间差异显著且存在一定的变化趋势。林地土壤含水量在不同生长阶段具有明显的变化特征, 且与土壤有机碳存在较强的生态关联<sup>[25]</sup>。降雨沿着土壤孔隙下渗, 毛管孔隙和非毛管孔隙分别体现在对水分的静态涵养和动态调节上, 对植物根系的吸收、土壤蒸

发、涵养水源与水土保持起到作用<sup>[26]</sup>。本研究尾巨桉人工林土壤孔隙度和含水量随林分生长发育进程呈先上升后下降的趋势, 在近熟林时达到最高值, 与林下灌木和草本的多样性变化趋势保持一致。这可能因土壤的毛管孔隙和持水力间接对植被多样性产生影响有关。

对华南沿海沙质地公众关注的“桉树林下无杂草”, 在雷州半岛尾细桉人工林林下植物共计 30 科 59 属 63 种<sup>[27]</sup>。相比而言, 滇南景谷、宁洱和临沧地处北回归线, 水热条件优越, 该地区的思茅松天然林林下植被灌木草本共 65 种<sup>[28]</sup>, 滇中地区云南松纯人工林林下植物共计 31 科 61 属 62 种<sup>[29]</sup>, 本研究表明滇南地区尾巨桉纸浆林林下植物共计 42 科 85 属 93 种, 物种数远高于尾细桉、思茅松和云南松人工林林分。其中, 在尾巨桉不同龄组中均有外来入侵物种紫茎泽兰, 其环境适应和繁殖扩散能力极强, 对自然生态系统的平衡和农林牧业生产有较大威胁, 应适时进行清理<sup>[30]</sup>。本研究草本丰富度指数、Simpson、Shannon-Wiener 和 Pielou 均匀度指数在幼龄林是最高值, 与草本植物和木本植物的竞争均会降低幼龄期夏栎胸径和树高的生长结果相似<sup>[31]</sup>。尾巨桉幼龄林期绝大多数草本多样性指数显著高于其他龄组, 整体呈逐渐递减的趋势。笔者认为早期幼龄林透光度高, 草本生长占优势, 林分郁闭后, 进入中龄林、近成熟林后林分透光度降低, 草本的多样性随之降低, 灌木的各多样性指标增加, 同时林分活立木蓄积量显著增加。反映出早期林下植被的草本跟幼龄林木产生竞争关系, 因此, 幼龄林抚育在措施上应注重林下杂草的控制, 林分进入中龄林后仅对蔓藤、大芒等危害性杂草进行清理。

本研究尾巨桉林下草本和灌木的 Shannon-Wiener 指数与土壤全氮呈正相关, 草本和总灌草的丰富度指数、草本均匀度指数与有效锌呈正相关, 灌木的丰富度指数与土壤有效铜呈正相关, 而尾巨桉树高生长与土壤全氮、有效锌和有效铜也呈显著正相关<sup>[7]</sup>, 其中灌木丰富度、Shannon-Wiener 指数与尾巨桉林分树高、优势木树高、林分蓄积量呈显著正相关, 幼龄林后期和中龄林的营林管理应保留尾巨桉林下灌木, 使之发育成次林层优势物种进而促进尾巨桉人工林由单层林向复层林结构的演替。Nadeau<sup>[32]</sup>对哥斯达黎加热带森林林下多样性研究发现, 草本植物结构丰富度与土壤肥力指数和

磷含量呈正相关, 并将其作为衡量土壤肥力的指标。因此, 可间接通过滇南山地尾巨桉林下灌木多样性的丰富度来判别林地土壤肥力, 进而反映其立地质量。

本研究尾巨桉林下草本和灌木的 Shannon-Wiener 指数与土壤密度、pH 值呈较大的负相关, 草本和总灌草的丰富度指数、草本均匀度指数与土壤有机质呈正相关。广西尾巨桉萌芽林下的灌木物种丰富度指数与土壤密度呈显著负相关, 土壤密度与 Shannon-Wiener 指数呈不显著负相关<sup>[33]</sup>。林下植被多样性的增加会促进分解枯落物, 改善土壤孔隙度进而降低土壤密度<sup>[34]</sup>。此外, 植物细根根系分泌物能增加土壤有机质, 促进形成毛管孔隙和土壤颗粒的胶连<sup>[25]</sup>。林地土壤有机质是土壤肥力的核心, 而枯落物是土壤有机养分的主要来源<sup>[35]</sup>, 灌木、草本的丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和草本均匀度指数与土壤含水量呈正相关, 表明水湿条件可影响林地植被多样性, 同时水湿条件好也可加速尾巨桉林下枯落物的降解, 增加有机质, 间接能提升立地质量。研究表明, 在尾巨桉纸浆林林分生长进程中土壤含水量、全氮和有机质整体呈先上升后下降的趋势, 在近熟林时达到最高值, 进一步说明土壤肥力得到一定程度的恢复。

## 5 结论

滇南山地立地生境相近的尾巨桉人工林, 林下草本和灌木的 Shannon-Wiener 指数与土壤密度、pH 值呈负相关, 草本和总灌草的丰富度指数、草本均匀度指数与土壤有机质呈正相关。幼龄期林分生长与草本植物存在竞争关系, 植物多样性对土壤结构及其物理性质的影响大于化学性质的影响, 近成熟时, 总灌草、灌木生物多样性达最大值, 揭示了近成熟后桉树人工林生态系统进入自恢复演替。

## 参考文献:

[1] 朱光玉, 康立, 何海梅, 等. 基于树高-年龄分级的杉木人工林多形立地指数曲线模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(7): 18-29.

[2] CHEN C, FANG X, XIANG W H, *et al.* Soil-plant co-stimulation during forest vegetation restoration in a subtropical area of southern China[J]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(3): 404-420.

[3] LIM B S, KIM A R, SEOL J, *et al.* Effects of soil amelioration

and vegetation introduction on the restoration of abandoned coal mine spoils in South Korea[J]. *Forests*, 2022, 13(3): 483.

[4] COSTA A, MADEIRA M, OLIVEIRA A C. The relationship between cork oak growth patterns and soil, slope and drainage in a cork oak woodland in Southern Portugal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5-6): 1525-1535.

[5] FUREY G N, TILMAN D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(49): 21113-21118.

[6] 国家林业和草原局. 第九次全国森林资源清查主要结果(2014—2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.

[7] LU H F, XU J M, LI G Y, *et al.* Site classification of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantations in China[J]. *Forests*, 2020, 11(8): 871.

[8] 张沛健, 徐建民, 卢万鸿, 等. 基于生长过程的海南桉树纸浆林土壤理化性质和植物多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(5): 82-92.

[9] 温远光, 陈放, 刘世荣, 等. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系[J]. *林业科学*, 2008, 44(4): 14-19.

[10] DENG H Y, SHEN L L, YANG J Q, *et al.* Stand stability of pure and mixed-eucalyptus forests of different tree species in a typhoon-prone area[J]. *Forests*, 2021, 12(4): 458.

[11] HARTLEY M J. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1-3): 81-95.

[12] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2610-2617.

[13] CALVIÑO-CANCELA M, RUBIDO-BARÁ M, VAN ETTEN E J B. Do eucalypt plantations provide habitat for native forest biodiversity?[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 270: 153-162.

[14] ZHANG D J, ZHANG J, YANG W Q, *et al.* Plant and soil seed bank diversity across a range of ages of *Eucalyptus grandis* plantations afforested on arable lands[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1): 307-325.

[15] 陆海飞. 滇南地区尾巨桉纸浆林立地质量评价及主伐年龄的确定[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.

[16] 陆海飞, 刘望舒, 徐建民, 等. 广西中南部尾巨桉人工林立地类型划分及立地质量评价[J]. *林业科学*, 2021, 57(5): 13-24.

[17] CAO Y S, FU S L, ZOU X M, *et al.* Soil microbial community composition under *Eucalyptus* plantations of different age in subtropical China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 128-135.

[18] SMILAUER P, LEPS J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5[M]. London: Cambridge University Press, 2014.

[19] 钟彦龙. 艾比湖湿地植物群落多样性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大



- 学, 2009.
- [20] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 等. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. 林业科学, 2019, 55 ( 4 ): 69-83.
- [21] 林文树, 穆 丹, 王丽平, 等. 针阔混交林不同演替阶段表层土壤理化性质与优势林木生长的相关性[J]. 林业科学, 2016, 52 ( 5 ): 17-25.
- [22] LYU Q, LIU J L, LIU J J, *et al.* Response of plant diversity and soil physicochemical properties to different gap sizes in a *Pinus massoniana* plantation[J]. PeerJ, 2021, 9: e12222.
- [23] DANISE T, INNANGI M, CURCIO E, *et al.* Covariation between plant biodiversity and soil systems in a European beech forest and a black pine plantation: the case of Mount Faito, (Campania, Southern Italy)[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(1): 239-252.
- [24] REYNOLDS W D, DRURY C F, YANG X M, *et al.* Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94(3): 403-419.
- [25] 刘 宣, 崔宁洁, 谭飞川, 等. 华西雨屏区柳杉人工林土壤持水能力及其对土壤有机碳的指示作用[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 ( 3 ): 670-679.
- [26] 王骄洋, 王卫军, 姜 鹏, 等. 华北落叶松人工林林分密度对枯落物层持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20 ( 6 ): 66-70.
- [27] 张沛健, 徐建民, 卢万鸿, 等. 雷州半岛不同林龄尾桉人工林植物多样性和土壤理化性质分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41 ( 9 ): 96-105.
- [28] 王健敏, 李帅锋, 徐凡迪, 等. 计划烧除对思茅松天然林群落结构与物种多样性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35 ( 1 ): 62-67.
- [29] 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.
- [30] 朱先洲. 入侵植物紫茎泽兰资源化利用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2012, 51 ( 14 ): 2905-2907 + 2917.
- [31] JENSEN A M, LÖF M. Effects of interspecific competition from surrounding vegetation on mortality, growth and stem development in young oaks (*Quercus robur*)[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 392: 176-183.
- [32] NADEAU M B, SULLIVAN T P. Relationships between plant biodiversity and soil fertility in a mature tropical forest, Costa Rica[J]. International Journal of Forestry Research, 2015: 732946.
- [33] 张建平. 尾巨桉萌芽林林下物种多样性及土壤理化性质研究[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2015.
- [34] SARIYILDIZ T. Effects of gap-size classes on long-term litter decomposition rates of beech, oak and chestnut species at high elevations in northeast turkey[J]. Ecosystems, 2008, 11(6): 841-853.
- [35] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. 林业科学, 2016, 52 ( 12 ): 1-12.

# Soil Physicochemical Properties and Dynamic Changes of Understory Plant Diversity at Different Growth and Development Stages of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* Plantation

LU Hai-fei<sup>1,2</sup>, XU Jian-min<sup>1</sup>, LI Guang-you<sup>1</sup>, MA Ning<sup>3</sup>, SU Guo-lei<sup>3</sup>, ZHANG yun-dong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Tropical Forestry Research/ Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. College of Urban Construction, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, Zhejiang, China; 3. Yunnan Yun-Jing Forestry and Pulp Mill Co., Ltd., Jinggu 666499, Yunnan, China; 4. Weiguo Forestry Bureau of Pu'er City, Ninger 665100, Yunnan, China)

**Abstract:** [Objective] To study the growth status, soil physical and chemical properties and understory plant diversity of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* pulpwood plantation of different age groups in southern Yunnan for providing theoretical basis for sustainable management of eucalyptus pulpwood plantation. [Method] In this study, 106 plots of red soil or red soil developed from coarse-grained crystalline rocks, muddy rocks, and carbonate rocks, with similar site conditions at an altitude of 1400~1700 meters, belonging to 5 different age groups. The differences in growth indicators, soil factors, and plant diversity indices among different age groups were analyzed through variance, multiple comparisons, and redundancy analysis. Correlation analysis was also used to reveal the correlation between them. [Result] The height, DBH and living wood growing stock of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation in different age groups increased with the growth of the stand. The growth rate was faster in the middle-aged forest, but slowed down in the mature forest (7-8a). There were significant differences in soil porosity and soil moisture content among different age groups, and the overall trend showed an increase and then a decrease with the growth of the stand, reaching the highest value in the near mature forest. There were significant differences in soil total nitrogen among different age groups, and the growth of tree height, diameter at breast height, and stand volume were significantly correlated with total nitrogen. The richness index and evenness index of herbaceous and total shrubland under the *Eucalyptus urophylla* forest were positively correlated with soil organic matter and available zinc. The richness index of shrubs was positively correlated with soil moisture, available nitrogen, and available copper. The Shannon Wiener index of herbs and shrubs was positively correlated with soil total nitrogen, while it was significantly negatively correlated with soil bulk density and pH value. The evenness index of shrub Pielou was positively correlated with soil total potassium. Among them, soil organic matter had the greatest impact on the understory vegetation diversity of *Eucalyptus urophyllus*, with the variance accounting for 18.3% (F=13.21, P<0.05). [Conclusion] There is a competitive relationship between the growth of young *E. urophylla* × *E. grandis* plantation and herbaceous plants. The influence of plant diversity on soil structure and physical properties is greater than that of chemical properties. At near maturity, the total shrub and shrub biodiversity reaches the maximum, which reveals that the eucalyptus plantation ecosystem enters self-restoring succession after near maturity.

**Keywords:** *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*; plant diversity; soil physicochemical properties; redundancy analysis