

## ◆植物科学◆

## 尾巨桉人工林主要生态效应研究\*

任世奇<sup>1</sup>, 杜阿朋<sup>2</sup>, 胡刚<sup>3</sup>, 顾大彤<sup>4</sup>, 伍琪<sup>1</sup>, 韦振道<sup>1</sup>, 李昌荣<sup>1</sup>, 陈健波<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁桉树森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西南宁 530002; 2. 中国林业科学研究院速生树木研究所, 广东湛江 524022; 3. 南宁师范大学环境与生命科学学院, 广西南宁 530100; 4. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006)

**摘要:**为揭示尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)人工林与生态环境的互作关系, 客观评价尾巨桉人工林的生态功能, 本研究依托南宁桉树森林生态系统广西野外科学观测研究站和湛江桉树森林生态系统国家定位观测研究站, 以尾巨桉人工林为研究对象, 观测单木蒸腾耗水量、林分蒸散耗水量和根系吸水来源; 分析枯落物量及分解归还特征, 并探讨尾巨桉纯林改培混交林对土壤质量的影响; 解析林下植物多样性变化规律; 评估碳储量和固碳效率。结果发现: 尾巨桉单木日均蒸腾耗水量 1.32 mm, 年蒸腾耗水量 349 mm, 占当年降水量的 27%; 尾巨桉林年蒸散耗水量占当年降水量的 82%; 尾巨桉林的凋落物养分归还以氮元素为主, 归还总量随林龄增长而逐渐增加, 延长尾巨桉培育周期有助于凋落物分解、养分还土; 纯林改培套种灰木莲(*Magnoliaceae glance*)的混交林能够显著改善土壤质量; 广西的尾巨桉林中有维管植物 120 科 369 属 584 种, 其中包括灌木 201 种、草本 186 种; 明确中龄尾巨桉人工林白天为碳汇、夜间为碳源, 其中夏季和秋季吸收固定 CO<sub>2</sub> 的能力最强, 每日净吸收固定 CO<sub>2</sub> 约为 11.0 g · m<sup>-2</sup>, 转化为每年净固定碳约为 10.9 t · hm<sup>-2</sup>。阶段性观测研究表明尾巨桉生长未吸收消耗大量水分, 纯林改培为混交林可显著提升土壤质量, 林下植物物种多样性随林龄增长而增加; 桉树的碳汇功能强于其他主要造林树种, 该结论为客观认知桉树人工林与生态环境的互作关系提供了基础资料, 为优化桉树人工林经营方案提供了参考。

**关键词:**桉树人工林; 水分消耗; 土壤养分; 植物物种多样性; 碳汇

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2023)04-0393-10

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20231226.006

桉树是桃金娘科(Myrtaceae)杯果木属(*Angophora*)、伞房属(*Corymbia*)和桉属(*Eucalyptus*)树种的统称, 共有 800 多种<sup>[1]</sup>, 天然分布于澳大利亚、印度尼西亚东部岛屿、东帝汶和菲律宾南部<sup>[2]</sup>。桉树适

收稿日期: 2023-04-16

修回日期: 2023-08-20

\* 国家自然科学基金项目(32160362), 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20325008、桂科 23-026-272), 广西林业科技推广示范项目(桂林科研[2022]第 25 号)资助。

## 【第一作者简介】

任世奇(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事桉树人工林的碳汇、生态服务和优质材培育研究, E-mail: rensq\_20220901@163.com。

## 【引用本文】

任世奇, 杜阿朋, 胡刚, 等. 尾巨桉人工林主要生态效应研究[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(4): 393-402.

REN S Q, DU A P, HU G, et al. Main Ecological Functions of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2023, 39(4): 393-402.

应能力强、生长速度快、加工用途广、经济价值高,其木材可用于生产人造板和制浆造纸;叶片精油可用于护肤品生产、食品添加;树皮可提炼鞣质。世界范围内有 120 多个国家和地区引种栽培桉树,面积多达 3 亿亩<sup>[3]</sup>(1 亩 $\approx$ 666.67 m<sup>2</sup>)。

我国引种栽培桉树已有 130 多年历史,大规模引种栽培桉树始于 1982 年中国与澳大利亚的桉树合作示范项目,其中引种驯化最为成功的桉树树种当属尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)和巨桉(*E. grandis*),利用这两个桉树树种杂交开发具有自主知识产权的尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)和巨尾桉(*E. grandis* × *E. urophylla*)杂交种,这两个杂交种是近 20 年我国种植范围最广、面积最大的桉树品种,种植范围覆盖广西、广东、海南、福建等省区,种植面积超过 8 000 万亩,以此成就了全国桉树木材年产量占全国木材年产量 40% 以上的贡献。广西是我国桉树产业化发展最好的省区之一,2021 年广西桉树人工林面积达 4 550 万亩,居全国第一位<sup>[4]</sup>。

自 2000 年以来,随着桉树人工林种植面积的持续扩大,其大面积连片纯林、短轮伐期等经营方式带来的生态效应受到广泛地关注和质疑。已有研究表明,通过将人工纯林调整为单一树种占较大比率的混交林可提高林地的经济回报和提供更多元化的产品<sup>[5]</sup>,降低病虫害发生率<sup>[6]</sup>,改善土壤理化性质<sup>[7]</sup>。杨承栋<sup>[8]</sup>深入总结单个树种针叶纯林连作效益并提出:有群落结构的混交林是维护、恢复和提高森林土壤功能,提高森林土壤生产力,实现可持续经营的关键。为真实了解桉树人工纯林及其混交林的生态效应,客观认知桉树人工纯林及其混交林生长过程对自然生态环境的影响,本研究围绕桉树人工纯林和混交林的生态系统组成、结构与功能,通过对实施不同经营模式和技术措施形成的不同类型桉树人工林进行定位观测研究,初步评价桉树人工林的主要生态功能,以期为桉树人工林生态和经济综合效益的发挥提供生态高效经营技术方案,最终为实现桉树人工林的科学化发展奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究依托南宁桉树森林生态系统广西野外科学观测研究站(以下简称南宁桉树野外站,包括南宁站点、柳州站点)和湛江桉树森林生态系统国家定位观测研究站,并以桂林、北海两个地区作为植物多样

性调查辅助样点。观测范围跨越北纬 21° - 25°,覆盖桂北丘陵山地、桂中盆地平原、桂东南 - 粤西沿海台地 3 个区域的典型桉树人工林观测样带。气候条件分属中亚热带湿润季风气候、南亚热带季风气候和北热带海洋性季风气候,其地带性植被分别为常绿阔叶林、季风常绿阔叶林和季节性雨林;土壤类型以红壤、赤红壤、砖红壤为主。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 尾巨桉单木、林分的水分消耗及林区水质观测

(1)尾巨桉单木蒸腾耗水量。以南宁桉树野外站(南宁站点)的中龄尾巨桉为研究对象,利用树干茎流仪(TDP, Dynamax 公司,美国)定位观测尾巨桉单木的树干液流密度,通过伐倒木圆盘测定尾巨桉单木边材面积,利用 Granier 公式<sup>[9]</sup>量化分析尾巨桉单木林冠蒸腾水分,即尾巨桉单木蒸腾耗水量<sup>[10]</sup>。

(2)尾巨桉林分蒸散耗水量。以南宁桉树野外站(南宁站点)的中龄尾巨桉林分为研究对象,使用自动气象站(CR1000, Campbell 公司,美国)观测林外大气降水,利用坡面径流场量化地表水分流失量,使用树干茎流仪、自动雨量计(UA-003-64, Hobo 公司,美国)分别采集树干茎流量和穿透水量,通过林外降水与林内穿透水差值获取林冠截留量。根据水量平衡方程由上述样地尺度水分循环分量计算出尾巨桉林分蒸散耗水量。此外,应用彭曼模型(Penman - Monteith)估算尾巨桉林分蒸散耗水量,并将水量平衡方程实测的尾巨桉林分蒸散耗水量与彭曼模型模拟结果进行比较,评价彭曼模型模拟尾巨桉林分蒸散耗水量的适用性<sup>[11]</sup>。

(3)尾巨桉活立木根系吸水来源。使用同位素比率质谱仪(MAT 253, Thermo Fisher Scientific 公司,美国)量化一代植苗林、二代萌芽林(一次萌芽林)、三代萌芽林(二次萌芽林)、四代萌芽林(三次萌芽林)4 种不同连栽代次尾巨桉纯林的土壤水、林分周边地下水、林分外降水等水环境的  $\delta D$  比率,使用 IsoSource 多元混合模型分割量化不同水环境对尾巨桉根系吸水的贡献<sup>[12,13]</sup>,剖析不同连栽代次尾巨桉根系对土壤水、地下水、降水等水环境的吸收策略。

(4)尾巨桉林区地表水水质演变。在尾巨桉三代萌芽纯林(Three generations of pure *E. grandis* × *E. urophylla*, Eck)、尾巨桉采伐迹地丢荒(Cutover land of *E. grandis* × *E. urophylla*, WL)、尾巨桉 + 灰木莲水平带状混交(Horizontal mixed stand of *E.*

*grandis* × *E. urophylla* and *Magnoliaceae glanca*, EMH)、尾巨桉 + 灰木莲垂直带状混交 (Vertical mixed stand of *E. grandis* × *E. urophylla* and *M. glanca*, EMV)、尾巨桉 + 灰木莲株间混交 (Inter-plant mixed stand of *E. grandis* × *E. urophylla* and *M. glanca*, EMI)、灰木莲纯林 (Pure *M. glancastand*, Mck) 6 种土地利用类型中分别安装地表水采集装置, 连续 7 个月采集 6 种土地利用类型的地表水水样, 分析地表水水质演变特征。

### 1.2.2 尾巨桉林地土壤养分循环观测

(1) 尾巨桉纯林凋落物量及分解归还。连续 12 个月按月收集 5 年生、7 年生和 9 年生尾巨桉纯林凋落物, 以枝条、叶片、果皮分类测定生物量及养分含量, 同时将枝条与叶片按不同比率混合分装在 720 个分解袋中并随机放置于该林分的地表, 每月随机抽取 3 个分解袋称重并化验袋中剩余凋落物的养分含量<sup>[14]</sup>。

(2) 尾巨桉三代萌芽纯林及改培混交林的土壤理化性质及微生物群落结构。采集不同龄组尾巨桉纯林、尾巨桉混交林的土壤样品, 分析其土壤微生物群落结构, 剖析不同林分类型对土壤地力维持机制<sup>[15]</sup>。

### 1.2.3 尾巨桉人工林生物多样性调查

在桂林、南宁、北海 3 个不同纬度地区选择 1-3 年、4-6 年和 7-9 年 3 个龄组尾巨桉人工林并区划 60 个样方, 调查尾巨桉林下植物的种类、多度、盖度等指标, 解析尾巨桉人工林林下植物多样性特征<sup>[16]</sup>。

### 1.2.4 桉树人工林碳储量及林冠 CO<sub>2</sub> 交换量观测

以第九次 (2018 年) 全国森林资源清查结果为数据源, 利用政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 推荐的生物量估算模型估算广西桉树人工林的碳储量<sup>[17]</sup>。依托南宁桉树野外站 (柳州站点), 通过在综合观测塔上安装开路式涡度相关系统 (Li-7500A, Licor Co., Ltd., USA) 并连续 3 年观测鹿寨区域的中龄尾巨桉人工林林冠与大气交界面的 CO<sub>2</sub> 通量, 估算尾巨桉人工林生态系统的碳汇能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 尾巨桉单木、林分的蒸腾耗水量及林分水质演变特征

#### 2.1.1 尾巨桉单木蒸腾耗水量

尾巨桉单木日均蒸腾耗水量为 1.32 mm, 其中春、夏、秋、冬四季典型晴天的尾巨桉单木日均蒸腾耗水量分别为 1.58、1.61、1.23、0.84 mm, 其差异表现

在早晨液流提速时刻、中午液流峰值到达时刻、傍晚液流低速时刻和白天液流持续时间。在尾巨桉种植密度为 83 株/亩的情况下, 单位土地面积的尾巨桉单木全年蒸腾耗水量约为 349 mm, 约占当年降水量的 27%。

#### 2.1.2 尾巨桉林分蒸散耗水量

彭曼模型估算结果显示, 中龄尾巨桉人工林的日均林分蒸散耗水量 3.5 mm, 季节平均蒸散耗水量 289 mm (其中夏季蒸散耗水量 445 mm、冬季蒸散耗水量 117 mm), 全年蒸散耗水量占当年降水量的 82%。同时, 全年的每日土壤相对含水量处于适宜或偏湿状态, 土壤水分不是中龄尾巨桉人工林蒸散耗水的限制因子。

#### 2.1.3 尾巨桉人工林水分循环组成

在中龄尾巨桉人工林叶面积指数约为 1.82 的背景下, 林分水量平衡分量特征表现为降水输入再次分配的林冠截留量约占 22%, 穿透水量约占 77%, 树干茎流量约占 1%; 水分输出分量特征表现为林冠截留蒸发量约占 22%, 林冠蒸腾量约占 27%, 林下蒸散量约占 46%, 土壤入渗和地表径流约占 5%。

#### 2.1.4 尾巨桉活立木根系吸水来源

一代植苗尾巨桉根系吸水主要源于 0-60 cm 土层, 该层水分贡献占 82%, 其中 0-10 cm 土层的水分贡献最大, 占 37%。二代萌芽尾巨桉根系吸水也主要源于 0-60 cm 土层, 该层水分贡献占 87%, 根系对该土层的水分吸收较均匀。三代萌芽尾巨桉根系吸水主要源于 0-80 cm 土层, 该层水分贡献占 84%, 根系对该土层的水分吸收较均匀。四代萌芽尾巨桉根系吸水主要源于 0-40 cm 土层, 该层水分贡献占 85%, 其中 0-20 cm 土层土壤水贡献最大, 占 39%。综上, 尾巨桉人工林的根系吸水主要源于土层深度 80 cm 以内的土壤水。

#### 2.1.5 尾巨桉人工林地表水水质演变

定位观测结果显示, 尾巨桉人工林地表水未出现“黑水”现象。尾巨桉人工林地表水的 pH 值约为 5.8。通过分析尾巨桉纯林不同改培模式地表水的化学需氧量 (COD) 和五日生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>) (图 1) 可知, 尾巨桉纯林和灰木莲纯林地表水的化学需氧量变化相似, 二者平均值约为 55 mg · L<sup>-1</sup>, 最大值为 120 mg · L<sup>-1</sup>; 伐桉迹地丢荒地地表水的化学需氧量最小, 平均值仅为 35 mg · L<sup>-1</sup>; 尾巨桉与灰木莲 3 种方式混交林地表水的化学需氧量均比尾巨桉纯林的略高, 总体平均值小于 130 mg · L<sup>-1</sup>。由五日生化需氧量



变化规律可知,尾巨桉纯林及其不同改培模式林分地表水的五日生化需氧量在5月份时最高,其波动范围为40至100 mg·L<sup>-1</sup>,高于其他月份(<60 mg·L<sup>-1</sup>)。尾巨桉纯林及其不同改培模式林分地表水的pH值、化学需氧量、五日生化需氧量3项指标均达《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)规定的限定值。

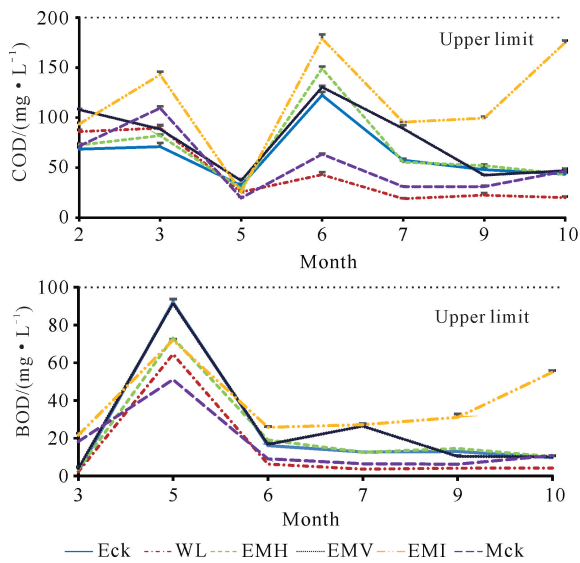


图1 尾巨桉纯林及其不同改培模式地表水的化学需氧量和五日生化需氧量

Fig. 1 Surface water COD and BOD<sub>5</sub> of different forest types shifting from *E. urophylla* × *E. grandis*

表1 尾巨桉纯林不同改培模式林分的土壤化学性质

Table 1 Soil chemical property of different types shifting from *E. urophylla* × *E. grandis*

指标 Indicator	pH值 pH value	有机质/ g·kg <sup>-1</sup> OM/g· kg <sup>-1</sup>	全氮/ g·kg <sup>-1</sup> TN/g· kg <sup>-1</sup>	全磷/ g·kg <sup>-1</sup> TP/g· kg <sup>-1</sup>	全钾/ g·kg <sup>-1</sup> TK/g· kg <sup>-1</sup>	速效氮/ mg· kg <sup>-1</sup> AN/mg· kg <sup>-1</sup>	有效磷/ mg· kg <sup>-1</sup> AP/mg· kg <sup>-1</sup>	速效钾/ mg· kg <sup>-1</sup> AK/mg· kg <sup>-1</sup>	有效钙/ mg· kg <sup>-1</sup> ACa/ mg· kg <sup>-1</sup>	有效镁/ mg· kg <sup>-1</sup> AMg/ mg· kg <sup>-1</sup>	有效铜/ mg· kg <sup>-1</sup> ACu/ mg· kg <sup>-1</sup>	有效锌/ mg· kg <sup>-1</sup> AZn/ mg· kg <sup>-1</sup>	有效硼/ mg· kg <sup>-1</sup> AB/ mg· kg <sup>-1</sup>
Eck	4.05 ± 0.01b	37.7 ± 0.44d	1.32 ± 0.05b	0.44 ± 0.00bc	1.32 ± 0.05b	110.3 ± 4.01c	1.94 ± 0.04c	29.73 ± 0.44c	105.5 ± 7.65c	4.10 ± 0.16d	0.37 ± 0.01d	0.44 ± 0.01c	0.19 ± 0.02c
WL	4.32 ± 0.02a	48.7 ± 2.34b	1.44 ± 0.02b	0.50 ± 0.01a	1.65 ± 0.03a	128.2 ± 5.09b	38.18 ± 2.87a	46.23 ± 3.12a	150.2 ± 9.54a	24.5 ± 1.19a	0.43 ± 0.00b	0.67 ± 0.10a	0.36 ± 0.01a
EMI	3.91 ± 0.01c	54.5 ± 2.22a	1.73 ± 0.04a	0.45 ± 0.01b	1.58 ± 0.06a	162.5 ± 4.18a	4.67 ± 0.11c	39.47 ± 0.41b	148.8 ± 1.26a	7.96 ± 0.72c	0.39 ± 0.00c	0.65 ± 0.03ab	0.26 ± 0.02b
Mck	4.31 ± 0.01a	44.7 ± 0.83c	1.29 ± 0.08b	0.42 ± 0.01c	1.44 ± 0.02b	125.5 ± 2.12b	15.74 ± 0.31b	45.5 ± 0.58a	137.7 ± 6.43b	12.57 ± 0.12b	0.45 ± 0.00a	0.49 ± 0.00bc	0.20 ± 0.01bc
P-value	<0.001	0.001	0.016	0.001	0.007	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.032	0.001

Note: different lowercase letters in the table represent significant differences at the 0.05 level.

### 2.2.3 尾巨桉三代萌芽纯林改培混交林的土壤物理性质特征

由图2可知,尾巨桉纯林、尾巨桉采伐迹地丢荒、尾巨桉+灰木莲株间混交林、灰木莲纯林4种林分的

## 2.2 尾巨桉纯林、混交林的土壤性质变化特征

### 2.2.1 尾巨桉植苗纯林凋落物量及分解养分归还特征

通过对5年生、7年生、9年生3个成熟期的尾巨桉植苗纯林凋落物量及其养分含量连续12次的月度监测,发现叶片是凋落物的主要成分,占凋落物总量的47%–54%。明确凋落物养分归还以氮元素为主,归还量55.48–58.13 kg·hm<sup>-2</sup>;其次为钾元素,归还量16.48–20.37 kg·hm<sup>-2</sup>;磷元素的归还量最小,仅2.61–3.66 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 2.2.2 尾巨桉三代萌芽纯林改培混交林的土壤化学性质特征

由表1可知,尾巨桉纯林、尾巨桉采伐迹地丢荒、尾巨桉+灰木莲株间混交林、灰木莲纯林4种林分的土壤化学性质差异显著。与尾巨桉采伐迹地丢荒比较,尾巨桉纯林土壤的有机质及各养分元素含量显著下降,然而,改培的尾巨桉+灰木莲株间混交林的土壤化学性质有显著改善,且混交林的土壤有机质、全氮、速效氮含量显著提高。值得注意的是尽管尾巨桉+灰木莲株间混交林的速效钾、有效镁含量(39.47、7.96 mg·kg<sup>-1</sup>)显著高于尾巨桉纯林,但是均显著低于尾巨桉采伐迹地丢荒和灰木莲纯林。同时,尾巨桉采伐迹地丢荒和灰木莲纯林的土壤pH值显著提升,土壤酸度降低。

土壤容重差异不显著,总体表现为尾巨桉纯林>尾巨桉采伐迹地丢荒>尾巨桉+灰木莲株间混交林>灰木莲纯林,多重比较显示尾巨桉纯林与灰木莲纯林呈极显著差异。不同林分的土壤质量含水量呈显著差

异,其中尾巨桉+灰木莲株间混交林的最高,尾巨桉纯林的最低。不同林分之间的土壤最大持水量表现为显著差异,其中灰木莲纯林的最大,其极显著高于尾巨桉纯林,而灰木莲纯林与尾巨桉+灰木莲株间混交林、采伐迹地丢荒之间的差异不显著。4种林分之

间的土壤毛管持水量和最小持水量变化规律一致,总体差异不显著,从大到小顺序依次为尾巨桉+灰木莲株间混交林>灰木莲纯林>尾巨桉采伐迹地丢荒>尾巨桉纯林。

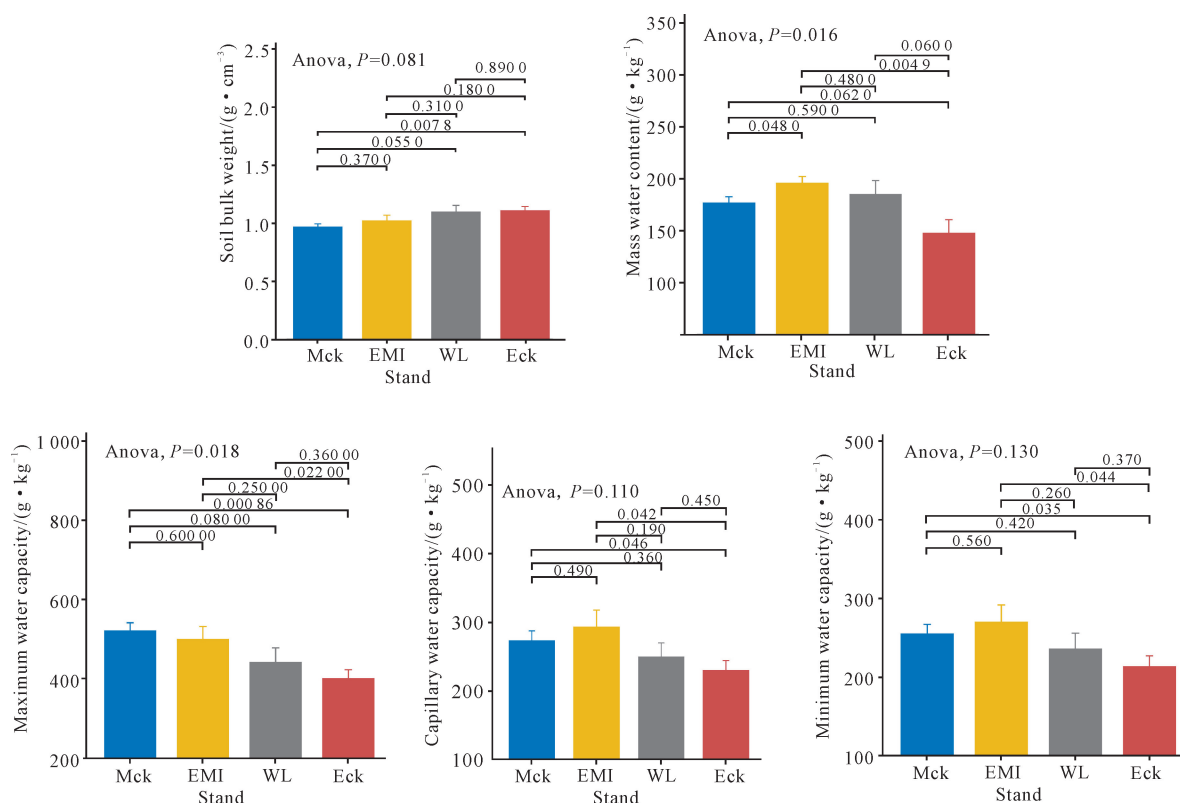


图2 尾巨桉纯林不同改培模式林分的土壤物理性质

Fig. 2 Soil physical properties of different types shifting from *E. urophylla* × *E. grandis*

#### 2.2.4 尾巨桉三代萌芽纯林改培混交林的土壤微生物群落结构特征

尾巨桉纯林改培为混交林后,土壤细菌、真菌的群落结构发生显著变化。灰木莲纯林、尾巨桉采伐迹地丢荒2种林分的土壤细菌群落多样性和丰富度均显著高于尾巨桉+灰木莲株间混交林和尾巨桉纯林;尾巨桉纯林、灰木莲纯林、尾巨桉采伐迹地丢荒、尾巨桉+灰木莲株间混交林4种林分之间的土壤真菌群落多样性差异不显著,但真菌丰富度表现为灰木莲纯林>尾巨桉采伐迹地丢荒>尾巨桉+灰木莲株间混交林>尾巨桉纯林。

### 2.3 尾巨桉人工林植物物种多样性特征

#### 2.3.1 尾巨桉人工林的林下植物物种情况

通过样方调查发现,60个样方共记录2482株植物,隶属58科101属142种(被子植物127种、蕨类植物13种、裸子植物2种)。其中,禾本科(Poaceae)植物最多,有9属11种;其次为菊科(Asteraceae)植

物,有7属8种;茜草科(Rubiaceae)植物有5科7属。单科单种有28科28属,占调查样方总科数的48.28%,包括闭鞘姜科(Costaceae)、番荔枝科(Annonaceae)、钩吻科(Gelsemiaceae)、夹竹桃科(Apocynaceae)、金丝桃科(Hypericaceae)等。101属中有38属为单种属,占调查样方总属数的37.62%。此外,通过广泛调查收集广西桉树林下植物物种组成发现,广西桉树林中有维管植物120科369属584种(其中被子植物101科337属529种,蕨类植物15科28属49种,裸子植物4科4属6种),分别占广西维管植物科、属、种总数的38.83%、18.35%、6.37%。桉树林中植物以灌木(201种)为主,其次为草本(186种)和乔木(106种),藤本(91种)最少。从区系成分看,科包括8个分布区正型,7个变型,属包括14个分布区正型,15个变型,科、属的R/T值(热带成分/温带成分)分别为3.20和5.37。

### 2.3.2 尾巨桉人工林的林下植物物种多样性变化特征

尾巨桉人工林的林下灌木层物种  $\alpha$  多样性随林龄变化的规律与草本层的相反, 其中灌木层物种  $\alpha$  多样性整体上随林龄增长而增加, 当尾巨桉人工林为 7-9 年生时, 灌木层物种  $\alpha$  多样性最大, 表明 7-9 年生的尾巨桉人工林林下灌木层物种分布较均匀; 草本层物种  $\alpha$  多样性整体上随林龄增长而降低, 当尾巨桉人工林为 7-9 年生时, 草本层物种  $\alpha$  多样性最小, 表明草本层物种丰富度随林龄增长而降低, 尾巨桉人工林 4-6 年生时的草本层物种分布较为均匀。不同林龄尾巨桉人工林的林下草本层彼此之间的相似系数随林龄增长而升高。广西尾巨桉人工林的林下植物群落具有明显的垂直地带性, 其中海拔、土壤全钾是影响其分布的主要因子, 其次尾巨桉林分的郁闭度很大程度上也影响着林下植物的分布。

### 2.4 桉树人工林的固碳能力

根据第九次(2018年)全国森林资源清查结果显示, 广西桉树人工林面积 256 万公顷, 其中以幼龄桉树人工林的面积最大, 占 45.23%; 以中龄桉树人工林

林的蓄积量最大, 占总蓄积量 1.09 亿立方米的 50.48%。基于南宁桉树野外站(柳州站点)于 2018-2020 年连续 3 年观测鹿寨区域的中龄尾巨桉人工林林冠与大气界面  $\text{CO}_2$  净交换量(NEE)表明, 尾巨桉人工林白天为碳汇, 夜间为碳源, 夏季和秋季吸收固定  $\text{CO}_2$  的能力最强, 该区域中龄尾巨桉人工林平均每日净固定  $\text{CO}_2$  约为  $11.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 转化为每年净固定碳约为  $10.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 3 讨论

### 3.1 桉树人工林蒸腾耗水特征

通过表 2 列举的几个主要造林树种的单木蒸腾耗水量发现, 4 年生尾巨桉在湿季的蒸腾耗水量仅为  $2.0 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ , 比毛白杨的还少; 5 年生和 6 年生的尾巨桉在湿季的蒸腾耗水量为  $8.0-10.2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ , 少于湿加松、柳杉等树种; 10 年生尾叶桉和 11 年生粗皮桉的蒸腾耗水量也小于马尾松、木荷、锥栗等树种, 由此说明桉树人工林的蒸腾耗水量并未显著高于其他树种。

表 2 桉树单木蒸腾耗水量与其他树种的比较  
Table 2 Comparison of single tree transpiration between eucalyptus and other species

树种 Tree species	年龄/a Age/a	胸径/cm DBH/cm	蒸腾耗水量/( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ) Transpiration/( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ )		参考文献 References
			湿季(7-8月) Wet season (Jul. - Aug.)	旱季(11-12月) Dry season (Nov. - Dec.)	
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	4	11	2.0	1.0	[11]
<i>Populus tomentosa</i>	5	10	2.4	1.6	[18]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	5	13	8.0	-	[19]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	6	13	10.2	3.1	[20]
<i>Cinnamomum camphora</i>	-	12	4.0	-	[20]
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	-	13	5.9	-	[20]
<i>Machilus kwangtungensis</i>	-	18	9.4	8.4	[21]
<i>Pinus massoniana</i>	-	24	29.5	20.9	[21]
<i>Schima superba</i>	-	20	39.3	24.8	[21]
<i>Castanea henryi</i>	-	21	30.4	24.2	[21]
<i>P. elliotii</i> × <i>P. caribaea</i>	10	19	12.3	6.8	[22]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	10	23	15.3	10.2	[22]
<i>E. pellita</i>	11	22	20.5	10.3	[23]
<i>Cryptomeria fortunei</i>	-	26	15.0	-	[24]
<i>Acacia mangium</i>	18	25	29.0	-	[25]

### 3.2 尾巨桉人工林对水质的影响

根据分析结果,尾巨桉纯林及其不同改培模式林分地表水的 pH 值、化学需氧量、五日生化需氧量 3 项指标均达《农田灌溉水质标准》(GB 5084 - 2021) 规定的限定值。同时,2022 年 7 月 18 日,中华人民共和国生态环境部发布的 2022 年第二季度(4 - 6 月)和 1 - 6 月全国地表水环境质量状况显示,在 1 - 6 月全国地级及以上城市中,排前 10 名的城市依次是柳州市、黔东南苗族侗族自治州、桂林市、崇左市、丽水市、嘉峪关市、河池市、梧州市、衢州市、百色市,其中第 1 名柳州市、第 3 名桂林市、第 4 名崇左市、第 7 名河池市、第 8 名梧州市和第 10 名百色市均属于广西,证实广西具有优质的地表水资源。根据广西桉树人工林栽培区分布情况,地表水水质排名第 1 的柳州市、第 4 的崇左市、第 7 的河池市、第 8 的梧州市和第 10 的百色市均是广西桉树人工林的主栽区,这反映出当前桉树人工林的经营方式未降低地表水水质,也验证了通过延长桉树主伐年龄,降低人为活动对桉树人工林的干扰强度,同时引入乡土树种将桉树纯林改培为混交林等科学经营措施可以提升桉树人工林的生态功能,更好发挥桉树林的生态效益。

### 3.3 尾巨桉人工林对土壤理化性质的影响

3 个年龄序列成熟期尾巨桉人工林凋落物量及其养分含量的 12 次连续监测结果显示,凋落物以氮

元素归还为主,凋落物养分归还总量随林龄增长而逐渐增加,建议适当延长尾巨桉人工林的培育周期有利于凋落物分解养分还土。通过将尾巨桉三代萌芽纯林改培为尾巨桉与灰木莲混交林,其土壤的物理性质、化学性质和微生物群落结构均得到显著改善,与 Li 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。

### 3.4 尾巨桉人工林的林下植物物种多样性变化规律

广泛调查广西尾巨桉人工林的林下植物物种组成发现,维管植物有 120 科 369 属 584 种,其中以灌木为主,达到 201 种;其次为草本植物,有 186 种;乔木 106 种;藤本植物最少,仅有 91 种。任世奇等<sup>[27]</sup>也通过植物样方调查和相关文献资料发现,桉树人工林林下植物有 190 种,其中木本植物 32 科 67 属 103 种,藤本植物 16 科 23 属 26 种,草本植物 22 科 53 属 61 种。与此同时,对 60 个调查样方的研究分析发现,桉树人工林的林下灌木层物种多样性整体随林龄增长而增加,其中在 7 - 9 年生的桉树林下的灌木植物多样性最丰富;草本层物种多样性整体随林龄增长而降低,其中在 7 - 9 年生的桉树林下的草本植物多样性最低。通过比较桉树人工林与其他树种的林下植物多样性(表 3)发现,成熟桉树人工林的林下植物物种丰富度并不低,且总体上灌木多样性比草本多样性高。

表 3 不同树种林下的植物物种多样性

Table 3 Plant diversity inside of different tree species

林分类型 Stand type	林龄 Age	物种丰富度 Species richness		Simpson 指数 Simpson index		Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		参考文献 Reference
		灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb	灌木 Shrub	草本 Herb	
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	1	7	12	0.43	0.53	0.60	0.78	0.31	0.32	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	2	7	10	0.16	0.49	0.27	0.83	0.14	0.36	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	3	12	8	0.48	0.39	0.69	0.59	0.28	0.28	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	4	10	13	0.27	0.49	0.43	0.84	0.19	0.33	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	5	10	14	0.29	0.49	0.46	0.82	0.20	0.31	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	6	12	10	0.35	0.49	0.63	0.69	0.25	0.30	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	7	23	10	0.53	0.26	0.95	0.46	0.30	0.20	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	8	13	9	0.60	0.48	1.22	0.84	0.48	0.38	[28]
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	8	13	14	1.78	2.24	0.72	0.86	1.70	0.85	[28]
Eucalyptus plantation	-	-	-	0.71	0.12	1.52	0.30	0.51	0.05	[29]
<i>Acacia mangium</i>	-	-	-	0.52	0.01	0.7	0.01	0.51	0.01	[29]
Native forest	-	-	-	0.81	0.81	1.75	1.52	0.42	0.65	[29]
Coniferous forest	-	-	-	0.73	0.82	1.61	1.53	0.43	0.64	[29]
<i>Phyllostachys pubescens</i>	-	-	-	-	0.91	-	2.52	-	0.81	[30]
<i>Pinus massoniana</i>	15	4.54	2.10	0.81	0.81	2.63	1.84	0.91	0.82	[31]
<i>Betula luminiifera</i>	-	9.16	5.06	0.72	0.75	1.47	1.15	0.62	0.83	[32]



### 3.5 桉树人工林的固碳功能特征

我国主要造林树种的碳汇能力年均约  $2.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (图3), 而桉树人工林每年每公顷可吸收固定碳约  $4.0 \text{ t}^{[33]}$ , 其碳汇能力远大于其他主要造林树种。对鹿寨县黄冕乡的中龄尾巨桉人工林固碳效率

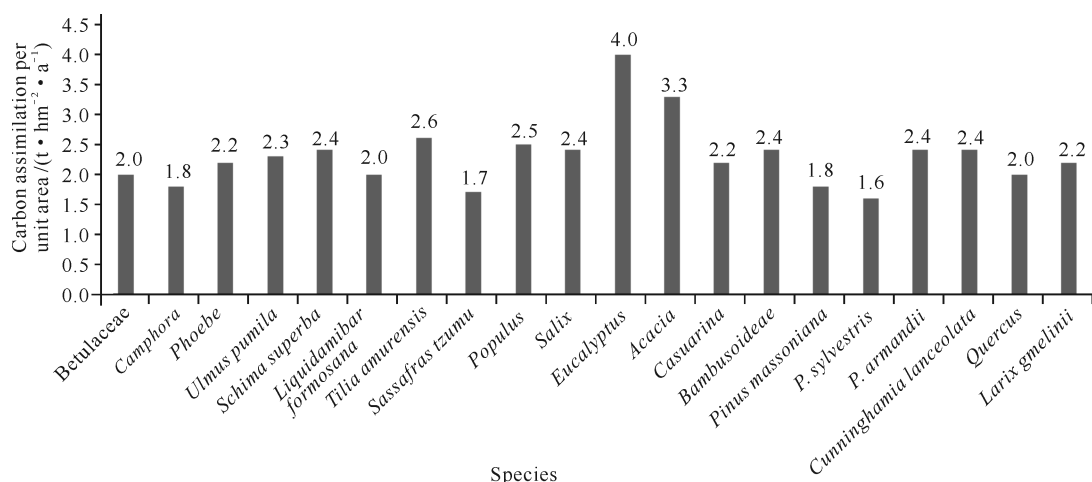


图3 我国主要造林树种的碳汇能力

Fig. 3 Carbon sink capacity of chief tree species in our country

## 4 结论

针对桉树生长的水分消耗, 桉树林对地表水水质的影响, 桉树林地土壤理化性质、土壤酶活性、微生物群落结构, 桉树林下植物物种多样性, 以及桉树的固碳增汇能力等方面内容开展了较系统的研究工作, 总结出了阶段性研究结论: (1) 桉树在生长过程中的单木蒸腾并未消耗大量水分; (2) 桉树未显著降低地表水水质; (3) 桉树纯林改培混交林可显著提升林地的土壤质量; (4) 桉树林下植物物种多样性丰富度随林龄增长呈增加趋势; (5) 桉树的碳汇功能强于我国其他主要造林树种。上述结论揭示了桉树种植对生态环境影响的客观规律。目前, 广西年生产桉树木材 3 000 万立方米以上, 年采伐量 3 000 万立方米以上, 广西以占全国森林面积的 1.4% 生产了全国 32% 的木材, 极大地缓解了我国木材的供需矛盾及木材资源供给不足压力, 2020 年桉树也被列入国家储备林建设树种名录<sup>[34]</sup>。因此, 建议从景观尺度上, 适当延长桉树主伐年龄, 新造林或萌芽林适当套种乡土树种形成同龄或异龄桉树混交林, 同时对林木兼施人工修枝, 以此从定向培育关键技术措施上优化桉树经营方案, 既利用其速生丰产特性, 又充分发挥其生态服务功能, 实现桉树的生产力与生态服务功能双增效益, 更好地为发展广西林业万亿元绿色产业和建设国家

储备林核心基地服务。

## 参考文献

- [1] HILL K, JOHNSON L. Systematic studies in the eucalypts. 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae) [J]. Telopea, 1995, 6(2/3): 185-504.
- [2] 王豁然. 桉树生物学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 祁述雄. 中国桉树[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [4] 广西林学会. 广西桉树产业发展报告[R]. [S. l. : s. n.], 2022.
- [5] KELTY M J. The role of species mixtures in plantation forestry [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 195-204.
- [6] KLAPWIJK M J, BJÖRKMAN C. Mixed forests to mitigate risk of insect outbreaks [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2018, 33(8): 772-780.
- [7] 刘小娥, 苏世平, 李毅, 等. 黄土高原地区人工林营造: 混交林模式生态效益研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 380-391.
- [8] 杨承栋. 发展有群落结构混交林是维护、恢复和提高森林土壤功能实现人工林可持续经营的关键技术[J]. 林业科学, 2022, 58(8): 26-40.
- [9] GRANIER A, BOBAY V, GASH J H C, et al. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest [J]. Agricultural and Forest Meteorolo-



- gy, 1990, 51(3/4): 309-319.
- [10] 任世奇, 邓紫宇, 郭东强, 等. 尾巨桉液流密度动态及其影响因子分析[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 1-7.
- [11] 任世奇, 朱原立, 梁燕芳, 等. 基于 PM 模型的广西南宁尾巨桉中龄林蒸散特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 127-134.
- [12] PHILLIPS D L, GREGG J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [13] 李惠, 梁杏, 刘延锋, 等. 基于氢氧稳定同位素识别干旱区棉花水分利用来源[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 843-852.
- [14] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛桉树人工林凋落物量和养分循环研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(4): 359-366.
- [15] XU Y, REN S, LIANG Y, et al. Soil nutrient supply and tree species drive changes in soil microbial communities during the transformation of a multi-generational *Eucalyptus* plantation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166: 103991.
- [16] 彭杏冰, 胡刚, 任世奇, 等. 广西桉树人工林林下植物的物种和谱系多样性及其影响因素[J]. 植物科学学报, 2022, 40(6): 771-781.
- [17] 姜仲翔, 任世奇, 杜阿朋. 广西桉树人工林固碳释氧总量核算[J]. 桉树科技, 2021, 38(2): 45-47.
- [18] 李广德, 富丰珍, 席本野, 等. 基于热扩散技术的三倍体毛白杨单木及林分蒸腾耗水研究[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2945-2953.
- [19] 周翠鸣, 顾大彤, 黄玉清, 等. 尾巨桉与杉木、香樟耗水特征分析[J]. 桉树科技, 2017, 34(3): 9-15.
- [20] 周翠鸣, 顾大彤, 赵平, 等. 液流径向变化对尾巨桉单株日蒸腾量估算的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2445-2451.
- [21] 程静, 欧阳旭, 黄德卫, 等. 鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4097-4104.
- [22] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 等. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林的蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2147-2155.
- [23] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 等. 雷州半岛粗皮桉蒸腾耗水特征及其与土壤水吸力的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 14-22.
- [24] 郭锦荣, 白天军, 邓文平, 等. 不同胸径日本柳杉树干液流及其蒸腾耗水差异[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(2): 70-77.
- [25] 马玲, 饶兴权, 赵平, 等. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 67-73.
- [26] LI C, XU Y, WANG Z, et al. Mixing planting with native tree species reshapes soil fungal community diversity and structure in multi-generational eucalypt plantations in Southern China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1132875.
- [27] 任世奇, 陈健波. 桉树林下植物识别图鉴[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2021.
- [28] 张沛健, 徐建民, 卢万鸿, 等. 雷州半岛不同林龄尾细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.
- [29] 罗毓明, 谭向平, 邹晓君, 等. 我国南方 4 种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(1): 1-10.
- [30] 李钢, 田刚, 王冉. 不同植被恢复模式毛竹林地植物多样性研究[J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(4): 43-47.
- [31] 张洋洋, 周清慧, 许骄阳, 等. 林龄对马尾松人工林林下植物与土壤种子库多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2121-2129.
- [32] 汪娅琴, 王德炉, 吴丽丽. 间伐强度对光皮桦天然次生林天然更新及植物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 19-24, 32.
- [33] 《中国森林生态服务功能评估》项目组. 中国森林生态服务功能评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [34] 谢耀坚. 科技创新引领中国桉树研究和产业迅猛发展[J]. 桉树科技, 2022, 39(1): 35-42.

## Main Ecological Functions of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation

REN Shiqi<sup>1</sup>, DU Apeng<sup>2</sup>, HU Gang<sup>3</sup>, GU Daxing<sup>4</sup>, WU Qi<sup>1</sup>, WEI Zhendao<sup>1</sup>, LI Changrong<sup>1</sup>, CHEN Jianbo<sup>1</sup>

(1. Nanning Eucalypt Plantation Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Forestry Research Institute, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi, 530002, China; 2. Research Institute of Fast-growing Trees, Chinese Academy of Forestry, Zhanjiang, Guangdong, 524022, China; 3. College of Environmental and Life Science, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530100, China; 4. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Science, Guilin, Guangxi, 541006, China)

**Abstract:** To unveil the interplay between the *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations and the ecological environment, and to objectively assess the ecological functions of the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations, this study relies on the Nanning Eucalyptus Forest Ecosystem Guangxi Wild Field Scientific Observation Research Station and the Zhanjiang Eucalyptus Forest Ecosystem National Positioning Observation Research Station. With the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations as the research subject, the study observes the transpiration of individual trees, stand evapotranspiration, and root water absorption. It analyzes litterfall quantity and decomposition and restitution characteristics and explores the impacts of converting the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations to mixed forest on soil quality. The study also examines the changes in understory plant diversity and evaluates carbon storage and sequestration efficiency. The results showed that the average daily evapotranspiration of a single tree of the *E. urophylla* × *E. grandis* was 1.32 mm, and the annual evapotranspiration of the *E. urophylla* × *E. grandis* was 349 mm, which accounted for 27% of the precipitation of the same year; the annual evapotranspiration of the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations accounted for 82% of the precipitation of the same year. Nitrogen is the most important nutrient returned from apoptosis in the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations, and the total amount of nutrients returned increased with the age of the forest, and prolonging the cultivation cycle of the *E. urophylla* × *E. grandis* helped the decomposition of apoptotic materials and nutrient return to the soil; Pure forest conversion to mixed forests planted with *Manglietia glauc* significantly improved soil quality. In Guangxi, there are 584 species of vascular plants in 120 families and 369 genera, including 201 species of shrubs and 186 species of herbs in the *E. urophylla* × *E. grandis* plantations; it is clear that the middle-aged *E. urophylla* × *E. grandis* plantations are carbon sinks during the daytime and carbon sources during the nighttime. In the summer and fall seasons, the plantation forests had the strongest ability to absorb and fix CO<sub>2</sub>, with a daily net absorption of about 11.0 g · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, which was converted into an annual net fixed carbon of about 10.9 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>. Stage-by-stage observations showed that the growth of the *E. urophylla* × *E. grandis* did not absorb and consume a large amount of water, and the conversion of pure forest to mixed forest could significantly improve soil quality, and the diversity of plant species in the understory increased with the age of the forest, and the carbon sink function of eucalyptus was stronger than that of other major afforestation species. These findings provide basic information for the objective understanding of the interactions between eucalyptus plantation forests and the ecological environment, and provide theoretical basis for the optimization of eucalyptus plantation forest management plan.

**Key words:** Eucalyptus plantation forest; water depletion; soil nutrients; plant species diversity; carbon sinks

责任编辑: 陆媛峰