

绿肥套种对桉树人工林地力修复与林木生长的调控机制研究进展

梁昌卫¹, 李隆军¹, 黄璐^{1,*}

1. 广西民族大学, 材料与环境学院, 广西 南宁, 530006

摘要: 桉树 (*Eucalyptus* spp.) 是全球广泛栽培的速生丰产林树种, 在木材供给中占据重要地位。然而, 桉树人工林的长期集约化经营和多代连作导致了土壤质量持续下降, 表现为土壤养分枯竭、生物多样性下降及地力衰退。在此背景下, 林下绿肥套种作为一种生态经营措施, 为遏制地力衰退、维持桉树人工林生产力提供了可行路径。本文从土壤理化性质改良、根际微生物群落重塑、酶活性增强及林木生长响应四个维度, 综述了绿肥套种对桉树人工林地力的影响, 并解析了其“物理—化学—生物”多维度的调控机制。未来研究应依托长期定位观测与多组学技术, 深入揭示绿肥—土壤—林木的互作机制; 同时, 需加强真菌群落与菌根响应的研究, 并针对不同立地条件优化绿肥品种配置与经营模式。

关键词: 绿肥套种; 桉树人工林; 土壤地力; 土壤微生物; 生产力

Research Progress on the Regulatory Mechanisms of Green Manure Intercropping on Soil Fertility Restoration and Tree Growth in *Eucalyptus* Plantations

Changwei Liang¹, Longjun Li¹, Lu Huang^{1,*}

1. School of Materials and Environment, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, China, 530006

Abstract: *Eucalyptus* spp., as globally important fast-growing tree species, play an irreplaceable role in ensuring timber supply. However, long-term continuous monoculture of *Eucalyptus* plantations has increasingly caused severe problems, such as soil nutrient depletion, biodiversity loss, and overall site degradation. Green manure intercropping, as a typical agroforestry practice, is recognized as an effective strategy for maintaining the sustainable management of *Eucalyptus* plantations. This paper systematically reviews the research progress on the effects of green manure intercropping on soil physicochemical properties, soil microbial community characteristics, soil enzyme activities, and the growth and development of *Eucalyptus* trees, and preliminarily clarifies the intrinsic mechanisms by which green manure enhances soil fertility in plantations. Future research should focus on the long-term ecological effects of green manure intercropping, strengthen studies on fungal community and mycorrhizal responses, and advance the selection of green manure varieties and the optimization of allocation models.

Keywords: Green manure intercropping; *Eucalyptus* plantation; Soil fertility; Soil microorganism; Productivity

1 引言

桉树 (*Eucalyptus* spp.) 凭借其早期生长极快、适应性强及单位面积产材量高等特性, 已成为全球乃至我国最重要的速生丰产林树种。截至 2018 年, 我国桉树人工林面积已达 546 万公顷, 以占全林地不足 3% 的面积贡献了超过 30% 的国产木材产量, 在保障国家木材安全及森林碳汇储备方面发挥着不可替代的作用^[1,2]。然而, 近年来, 桉树人工林高强度的短轮伐期 (通常为 3-5 年) 连作模式

正诱发严重的“连作障碍”。长期连茬经营下,桉树人工林林地养分库枯竭、土壤酸化及生物多样性下降等问题日益凸显,导致人工林生产力的可持续性面临巨大挑战^[3-6]。传统经营高度依赖化学肥料的投入以维持产量,但这种“化学依赖型”增长模式不仅造成土壤板结、微生物活性骤减,更增加了非点源污染风险,难以为继^[7,8]。在此背景下,引入绿肥套种被视为实现人工林地力修复与经营转型的主动策略。

绿肥作物,尤其是豆科植物,凭借根瘤菌共生固氮体系将大气中植物无法直接利用的 N_2 转化为化合态氮,在不增加化肥投入的前提下持续补充土壤氮库^[9,10]。同时,绿肥的生长能有效覆盖地表,起到缓冲地温波动和抑制水分蒸发的作用;其根系在生长过程中不断穿插、挤压周围土壤,死亡后留下生物孔隙,有效改善了土壤的通气与透水条件^[10,11]。更为关键的是,绿肥通过凋落物和根系分泌物的形式,向土壤输入丰富的活性有机碳源。这种输入能够激发土壤中的微生物群落,提高参与碳、氮、磷循环的酶活性,从而活化土壤中被固定的磷素等矿物养分^[12-15]。综上,绿肥套种作为基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS),集生物固氮、物理改土与生化调控于一体,为桉树人工林地力恢复与可持续经营提供了一条切实可行的生态路径。

尽管国内外陆续有关于绿肥套种对桉树林土壤肥力的实验研究,但目前仍缺乏从“土壤理化性质—根际微生态—养分循环—林木响应”全链条视角对其调控机制的系统性梳理。鉴于此,本文围绕绿肥套种对桉树人工林地力修复与林木生长的调控机制这一核心命题,系统综述:(1)绿肥套种改良土壤物理结构、调节土壤养分库的理化机制;(2)绿肥根系分泌物驱动下根际微生态环境与微生物群落的重塑机制;(3)绿肥套种对桉树生及地上生物量的影响规律。本文旨在深化对绿肥—桉树系统地上地下协同调控机制的理论认识,以期为我国速生丰产林的可持续经营及绿色转型提供理论依据。

2 绿肥套种对林下土壤理化性质的影响

2.1 绿肥套种对土壤物理结构的改良

土壤物理结构是林地肥力的基础,直接影响了水分运移、气体交换及桉树根系发育。桉树多代连栽常导致土壤容重增加,孔隙度与持水能力下降^[5]。绿肥套种可通过地上部生物量覆盖减少径流侵蚀和地下部根系穿插形成生物孔隙的双重途径,有效优化土壤的三相结构,改善通气与蓄水能力^[16]。此外,绿肥根系年生产量大、周转快,其腐解残留物作为胶结物质促进土壤团聚体形成^[15,17],也可有效改良土壤结构。

田间试验验证了上述的改良效应。广西东门林场研究表明,桉树幼林下间作黄豆和绿豆,较纯林分别降低土壤容重22.2%和12.6%,提升总孔隙度21.6%和16.6%,最大持水量与毛管持水量亦同步显著增加。林下植被生物量与土壤容重呈显著负相关,与持水量及孔隙度呈显著正相关^[5],因此,恢复林下植被(含绿肥)对地力维持起着关键作用。此外,间作柱花草等牧草可使地表径流量和土壤侵蚀量较纯林降低20.8%~82.9%^[11]。综上,绿肥套种通过物理和生物化学过程的耦合,显著改善了桉树人工林土壤的物理结构。

2.2 绿肥套种对土壤化学性质的调节

2.2.1 碳库扩容与氮磷钾养分补给

绿肥翻压还田是桉树人工林有机碳与矿质养分补给的关键途径。通过豆科植物的生物固氮及残体腐解释放^[10],绿肥套种有效补充了桉树高速生长所需的氮、磷、钾等关键元素,实现了养分库容量与有效性的同步增长^[13,14,17]。朱孔鑫等^[13]的研究发现,套种白灰毛豆和田菁一年后,桉树林下土

壤有机质含量较对照组分别增加 9.66%和 18.44%，土壤速效氮、磷、钾含量也显著增加。刘云等^[17]的间作试验同样表明，桉树—黄豆和桉树—绿豆间作林的有机质含量、全氮、碱解氮、有效磷、有效钾均比纯林提高 8%以上。

2.2.2 酸度缓冲与 pH 调节

我国桉树人工林土壤多呈酸性（pH 常低于 4.3），长期集约经营进一步加剧酸化趋势，导致磷素固定、铝锰毒害等次生障碍^[3,5]。绿肥套种对酸性土壤具有显著的缓冲调节作用。豆科绿肥固氮过程产生的 NH_3 可中和部分 H^+ ，而绿肥腐解过程产生的有机阴离子也可与 H^+ 结合^[9]，由此可有效缓解土壤酸化。基于华安县西陂国有林场 3 年动态监测的研究表明^[16]，桉树人工林套种绿肥后，土壤 pH 显著高于对应无套种土壤的处理。刘云等^[17]的间作试验同样表明，间作林的土壤 pH 比纯林的土壤 pH 提高 12%以上，且土壤养分的有效性相较于纯林也得到了提升。

3 绿肥套种对林下土壤微生物群落结构的重塑与土壤酶活性的增强

3.1 绿肥套种对土壤微生物群落结构与多样性的重塑

桉树人工林长期集约经营易引致土壤微生物生物量下降、群落结构简化及酶活性减弱，形成地力衰退的“生物瓶颈”^[18-19]。绿肥套种通过根系分泌、活体根际沉积及凋落物归还等途径，向土壤输入新鲜有机碳源与养分，对林下土壤微生物群落结构与酶活性产生系统性重塑，构成“根系分泌物驱动—微生物群落重塑—酶活性增强—养分生物转化加速”的级联调控机制^[20-22]。桉树人工林下间种豆科牧草、禾本科牧草的试验^[20]发现，土壤微生物数量与酶活性总体表现为“桉—豆科牧草 > 桉—禾本科牧草 > 纯桉林”，且土壤微生物类群与土壤养分含量之间存在显著相关性。此外，在尾巨桉人工林绿肥套种白灰毛豆和田菁的试验^[19]中也发现，套种处理下土壤微生物生物量及酶活性均显著提升，且群落结构在不同处理间存在显著差异。这种群落结构的差异，反映了不同绿肥品种通过差异化的根系分泌物谱，对根际微生物类群进行了“定向筛选”。在功能潜力层面，PICRUST 功能预测进一步表明：套种白灰毛豆时固氮和硝酸盐还原功能表达显著增加，强化土壤氮素供应；而套种田菁时芳香族化合物降解功能显著表达，可能加速桉树根系分泌酚酸类化感物质的降解，间接缓解自毒效应。

3.2 绿肥套种对土壤酶活性的增强

土壤酶活性是反映土壤微生物群落功能状态及土壤养分转化效率的重要指标。绿肥套种通过增加有机碳和矿质元素输入，促进微生物生长繁殖与酶分泌，从而增强土壤酶活性，加速了碳、氮、磷等关键元素的生物化学循环，有效缓解了桉树生长的养分限制^[12,23]。朱孔鑫等^[13]的研究直接证实，套种白灰毛豆和田菁均可提高土壤酶活性，且酶活性与土壤有效硼、水解氮等养分因子显著正相关。文慧^[24]的研究也表明，在桉树人工林下间作豆科、十字花科、葱属植物均能有效改善土壤性状、提高土壤酶活性。

4 绿肥套种对桉树生长指标及木材产量的影响

绿肥套种对桉树人工林的最终效应，集中体现于林木生理状态的改善与生长量的提升。现有研究一致表明，桉树人工林下套种豆科绿肥可显著促进林木生长^[13,25-29]。覃祚玉^[27,28]等在桂南地区开展的培肥处理对比试验显示，套种山毛、田菁等处理下桉树的平均胸径、树高和蓄积增量较常规施肥对照均有提升。广西国有大桂山林场的田间试验^[29]同样表明，相比于对照，套种白灰毛豆和田菁的处理能显著增加桉树的树高、胸径和蓄积量。

5 结论与展望

综上所述,绿肥套种为破解桉树人工林地力衰退与环境负面效应提供了切实可行的路径。具体而言,绿肥在生长过程中通过穿插挤压优化土壤三相比例,打破长期连栽导致的物理板结;与此同时,豆科绿肥特有的生物固氮与有机酸活化机制增加了土壤养分的库容量与生物有效性;而绿肥还田输入的活性碳源则重塑了根际微生物群落,增强了碳、氮、磷代谢相关的酶活性,加速了养分循环;最终,土壤环境的改善转化为林木生产力的提升,显著增加了桉树林分蓄积量。上述“改土—促生—增效”的级联响应表明,这一基于自然的生物调理措施能够系统性逆转连栽地力衰退趋势,为桉树人工林从“掠夺式利用”走向可持续经营提供了关键的科学依据。

尽管绿肥套种在桉树人工林地力修复中展现出良好前景,但现有研究仍多停留在现象描述与短期验证阶段,未来需在以下方向深化:

(1) 强化多代连栽背景下的长期定位观测。当前绿肥套种的大多数研究观测周期较短(1-3年),远未覆盖桉树一个完整轮伐期,更无法反映多代连栽背景下的累积效应。亟需建立跨轮伐期、跨连栽代次的长周期定位试验站,系统评估绿肥套种在“土壤碳氮库演化—微生物群落演替—林木生长响应”全过程的累积效应。

(2) 加强真菌群落与菌根响应研究。现有文献多聚焦于细菌群落,而对桉树养分获取至关重要的丛枝菌根真菌(AMF)和外生菌根真菌(EMF)响应规律仍近乎空白。未来应重点解析绿肥根系分泌物对AMF/EMF群落组装的影响,以及菌根网络在“绿肥—桉树”养分转运中的桥梁作用。

(3) 推进绿肥品种筛选与配置模式优化。虽然多种豆科绿肥的改土效果已获证实,但针对桉树不同林龄阶段、不同立地条件(气候区、土壤类型、连栽代次)的差异化品种配置方案仍属空白。未来研究应将绿肥套种纳入桉树人工林综合培肥框架,厘清其与有机肥、配方施肥、剩余物还林等措施的协同或替代关系,使地力维持从单一生物措施走向多措施耦合管理。

参考文献

- [1] 刘涛,谢耀坚. 中国桉树人工林快速发展动因分析与展望[J]. 桉树科技, 2020, 37(4): 38-47.
- [2] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告 (2014-2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [3] 王会利,吴秦展,兰文明,等. 多代连栽桉树人工林林下植被和土壤物理性状的变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43 (2): 1-9.
- [4] 陆佳,王华响,陈利军. 连栽对桉树土壤稀有微生物群落及多功能性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(8): 1034-1044.
- [5] 王会利,吴秦展,兰文明,等. 多代连栽桉树人工林林下植被和土壤物理性状的变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(2): 1-9.
- [6] Xu Y, Li C, Zhu Y, et al. The shifts in soil microbial community and association network induced by successive planting of *Eucalyptus* plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 505, 119877.
- [7] 石媛媛,赵隽宇,宋贤冲,等. 基于森林气候与土壤类型的广西人工林土壤分区及其肥力演变[J]. 广西林业科学, 2021, 50(5): 563-569.
- [8] 唐健,赵隽宇,覃祚玉,等. 1993—2018年广西桉树主产区土壤肥力演变特征分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(1): 94-99.
- [9] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461.
- [10] 徐文娴. 绿肥还田及有机肥替代化学氮肥对橡胶园土壤养分的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- [11] 刘苇,余雪标. 桉树人工林林下间作绿肥对土壤的改良效应研究[J]. 热带林业, 2008, 36(2): 16-20.
- [12] 陆艳仙,周晓果,陶彦良,等. 炼山和套种绿肥对桉树人工林下植物和土壤 C: N: P 化学计量特征的影响[J]. 广西科学, 2018, 25(2): 139-148.

- [13] 朱孔鑫, 王会利, 覃祚玉, 等. 绿肥套种对桉树人工林地力提升及林木生长的影响[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(6): 37-43.
- [14] Zhu K, Wang H, Qin Z, et al. Legume green manuring improves soil fertility and plant growth of *Eucalyptus* plantation in south subtropical China[J]. Research in Ecology, 2021, 3(1):14-21.
- [15] 刘小粉, 刘春增, 王守刚, 等. 套种绿肥对土壤养分、团聚性及其有机碳和全氮分布的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(9): 44-47+56.
- [16] 高文杰, 程飞, 廖博一, 等. 套种绿肥对桉树人工林土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 54-61.
- [17] 刘云, 钟莉传, 王建忠, 等. 桉树林下间种黄豆和绿豆土壤理化性质研究[J]. 桉树科技, 2023, 40(2): 41-46.
- [18] 魏圣钊, 李林, 曹芹, 等. 巨桉连栽对土壤微生物生物量和数量的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(1): 35-43.
- [19] 熊珊, 杨德明, 王忠林, 等. 不同连栽代次桉树人工林土壤微生物群落结构及多样性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2026, 46(2): 54-69.
- [20] 谢龙莲, 王真辉, 刘小香, 等. 刚果 12 号桉人工林下土壤微生物与土壤养分研究初报[J]. 热带农业科学, 2007, (4): 50-53+70.
- [21] 朱孔鑫, 庄舜尧, 钱壮壮, 等. 套种绿肥对尾巨桉人工林土壤细菌群落特征的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 313-320.
- [22] 吴通兴, 吴维聪, 周秋惠, 等. 基于绿肥根系分泌物特征的新垦耕地土壤微生物代谢功能改善研究[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 769-779.
- [23] 梅嘉仪, 甘东波, 朱恩永, 等. 桉树人工林土壤酶活性研究进展[J]. 南方林业科学, 2021, 49(4): 42-46.
- [24] 文慧. 桉树人工林复合经营模式对土壤理化性质及酶活性的影响[D]. 贵州大学, 2021.
- [25] 陈健波, 郭东强, 张磊, 等. 桉树林内间种山毛豆试验初期生长效应[J]. 广西林业科学, 2019, 48(2): 157-160.
- [26] 白昌军, 虞道耿, 陈志权, 等. 间作牧草对桉树人工林生长量及凋落物的影响[J]. 热带作物学报, 2012, 33(10): 1896-1902.
- [27] 覃祚玉, 邓小军, 宋贤冲, 等. 不同有机肥对桉树人工林生态和经济效益的影响[J]. 广西林业科学, 2023, 52(2): 173-180.
- [28] 覃祚玉, 石媛媛, 赵隽宇, 等. 不同土壤培肥处理对桂南桉树产量及土壤肥力的影响[J]. 广西林业科学, 2021, 50(5): 522-528.
- [29] 艾辉辉. 广西国有大桂山林场桉树套种绿肥的生长影响试验分析[J]. 绿色科技, 2024, 26(3): 165-168.

基金项目: 2024 年广西民族大学自治区级大学生创新训练计划项目“桉树人工林林下套种绿肥对土壤的改良效应研究”(S202410608344)。

¹第1作者简介: 梁昌卫(2003-), 男, 本科, 研究方向: 土壤修复。E-mail: 3241231701@qq.com。

***通讯作者简介:** 黄璐(1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 土壤修复。E-mail: 20219155@gxmzu.edu.cn。