

引用格式: 王倩, 林于晴, 金璇, 等. 生物炭施用对杨树人工幼林固碳增汇能力的短期影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(4): 723–732. WANG Qian, LIN Yuqing, JIN Xuan, *et al.* Short-term effects of biochar application on the carbon sequestration capacity of a young poplar plantation[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(4): 723–732.

生物炭施用对杨树人工幼林固碳增汇能力的短期影响

王倩¹, 林于晴¹, 金璇¹, 陈冬钦¹, 王国兵^{1,2}

(1. 南京林业大学 生态与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 【目的】探讨生物炭施用对杨树 *Populus* 人工林生态系统固碳增汇能力的影响及主要调控机制, 为中国人工林兼顺木材生产及固碳增汇能力提升的经营实践提供理论与技术支撑。【方法】2023—2025 年于江苏泗洪马浪湖林场, 以 1 年生 ‘南林 3804 杨’ *P. deltoides* ‘Nanlin 3804’ 人工幼林为研究对象, 设置 3 种处理: 未施用生物炭的空白对照 (ck)、低生物炭施用量 (B1, 30 t·hm⁻²)、高生物炭施用量 (B2, 60 t·hm⁻²), 探讨不同生物炭施用量对杨树人工幼林各碳层碳汇能力的短期影响。【结果】①与 ck 相比, B1、B2 处理连续 2 a 显著促进杨树胸径、树高生长 ($P<0.05$), 其中 B2 处理促进效果最显著。②施用生物炭 1 a 后, B1、B2 处理较 ck 均显著提升乔木层、草本层、凋落物层及土壤层的碳增量 ($P<0.05$); 在第 2 年各碳层碳增量较 ck 无显著差异, 表明生物炭 1 次施用养分不足以维持杨树长期生长, 而是通过更稳定的土壤基础改良效应持续发挥作用。③生物炭施用 1 a 后各处理均显著增加 0–40 cm 土层碳储量 ($P<0.05$), 对 40–100 cm 土层无显著影响, 反映出土壤碳储量的增加主要来源于生物炭在 0–40 cm 土层的一次性施用。④相关分析表明: 各碳层碳储量与土壤全氮、全磷、速效磷、铵态氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N)、碳氮比、pH 呈显著 ($P<0.05$) 或极显著正相关 ($P<0.01$); 冗余分析表明: 全氮是影响生态系统各层碳储量的主要贡献因子。【结论】生物炭施用可显著促进杨树人工幼林乔木层、草本层、凋落物层及土壤层的碳汇能力, 且有利于持续稳定促进杨树林木胸径、树高快速生长, 进而长期提升杨树人工幼林综合固碳增汇能力, 其中, 60 t·hm⁻² 的高生物炭施用量可实现短期快速稳定固碳。图 5 表 1 参 36

关键词: 生物炭; 杨树人工林; 碳储量; 林木生长; 人工林经营

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)04-0723-10

Short-term effects of biochar application on the carbon sequestration capacity of a young poplar plantation

WANG Qian¹, LIN Yuqing¹, JIN Xuan¹, CHEN Dongqin¹, WANG Guobing^{1,2}

(1. College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of biochar application on the carbon sequestration capacity of poplar plantation ecosystems and the main underlying regulatory mechanisms, in order to provide theoretical and technical support for forest management practice of balancing timber production and carbon sequestration capacity in artificial forests in China. [Method] From 2023 to 2025, a one-year-old poplar (*Populus deltoides* ‘Nanlin 3804’) plantation was selected as the research object in Malanghu Forest Farm, Sihong County, Jiangsu Province. The 3 treatments were set up: a control without biochar application (ck), low biochar application rate (B1, 30 t·hm⁻²), and high biochar application rate (B2, 60 t·hm⁻²). The short-

收稿日期: 2025-12-11; 修回日期: 2026-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD220040203); 江苏省林业局揭榜挂帅项目 (LYKJ [2022] 01)

作者简介: 王倩 (ORCID: 0009-0008-9150-1332), 从事土壤生态学和森林生态学研究。E-mail: 1538690041@qq.com。通信作者: 王国兵 (ORCID: 0000-0001-8362-9186), 副教授, 博士, 从事土壤生态学和森林生态学研究。E-mail: wangguobing81@aliyun.com

term effects of different biochar application rates on the carbon sequestration capacity of each carbon layer in the poplar plantation were explored. [Result] (1) Compared with ck, B1 and B2 treatments significantly promoted the growth of the diameter at breast height (DBH) and tree height of poplar trees for two consecutive years, among which B2 treatment had the most significant promoting effect ($P < 0.05$). (2) One year after biochar application, both B1 and B2 treatments significantly promoted the net increment of carbon storage in the arbor layer, herb layer, litter layer, and soil layer compared with ck ($P < 0.05$). However, in the second year, there was no significant difference in the net increment of carbon storage in each layer compared with ck, indicating that a single application of biochar was not sufficient to maintain the long-term growth of poplar trees. Instead, biochar exerted a continuous effect through more stable improvement of soil properties. (3) One year after biochar application, all treatments significantly increased the soil carbon storage in the 0–40 cm soil layer ($P < 0.05$), but had no significant effect on the 40–100 cm soil layer, indicating that the increase in soil carbon storage mainly originated from the one-time application of biochar in the 0–40 cm soil layer. (4) Correlation analysis showed that the carbon storage in each carbon layer was significantly or extremely significantly positively correlated with soil total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), carbon-to-nitrogen ratio (C/N), and pH ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Redundancy analysis (RDA) indicated that TN was the primary contributing factor affecting the carbon storage in each layer of the ecosystem. [Conclusion] Biochar application can significantly promote the carbon sequestration capacity of the arbor layer, herb layer, litter layer, and soil layer in young poplar plantations, and is conducive to sustained and stable promotion of the rapid growth of DBH and tree height of poplar trees, thereby improving comprehensive carbon sequestration and sink increment capacity of young poplar plantations. Among them, a high biochar application dose of $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ can achieve short-term rapid and stable carbon sequestration, exhibiting a better promoting effect. [Ch, 5 fig. 1 tab. 36 ref.]

Key words: biochar; poplar plantation; carbon storage; forest tree growth; plantation management

近年来, 如何积极应对全球气候变化, 实现中国碳达峰、碳中和目标已成为关键课题之一^[1]。实现碳中和、碳达峰目标最重要的途径之一是充分发挥生态系统的固碳功能^[2], 其中, 人工林具有非常巨大的储碳功能, 是增加森林固碳的主要途径^[3-4]。然而, 苏北地区林地土壤普遍存在酸性强、肥力低、质地黏重等立地条件缺陷, 严重制约了林地生产力的发展。因此, 探索能够有效改善土壤质量, 维持土壤养分良性循环并提高养分有效性的新途径, 已成为苏北地区林地土壤改良的迫切需求和研究热点。

生物炭是由生物质(如作物秸秆、木屑、畜禽粪便等)在缺氧或限氧条件下热解得到的富碳产物^[5]。生物炭独特的孔隙结构、巨大的比表面积、丰富的表面官能团以及高度的化学和微生物稳定性, 使其在改良土壤方面展现出巨大潜力。多数研究表明: 生物炭施入土壤后可通过物理、化学和生物学途径综合改善土壤环境, 从而成为促进植物生长的土壤改良剂。GLASER等^[6]发现: 生物炭的多孔结构能够有效降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 从而改善土壤通气性并显著增强土壤的持水能力, 缓解水分胁迫。YAO等^[7]研究表明: 生物炭通过其表面官能团吸附铵离子、硝酸根离子及磷酸根离子等, 减少养分淋失, 提高肥料利用率, 其碱性可中和土壤酸性, 提高酸性土壤的pH。此外, 生物炭的孔隙结构为土壤微生物提供了良好的栖息场所, 其本身所含的磷、镁、钾、氮、钠等必需营养元素逐渐释放到土壤溶液中, 进一步促进了微生物的生长和功能, 从而显著影响土壤微生物群落结构与活性^[8], 促进有益微生物的繁殖, 驱动土壤养分循环^[9]。

杨树 *Populus* 作为中国人工林建设的核心树种, 在木材生产、碳汇固持、生态防护等方面发挥着不可替代的作用^[10], 但随着杨树人工林培育规模的持续扩大, 长期连栽和粗放经营导致的土壤肥力衰退、养分失衡、生产力下降等问题日益突出, 严重制约了杨树人工林的可持续发展。大量研究证实, 生物炭可通过改良土壤理化性质、增加土壤稳定性有机碳, 对杨树人工林生态系统固碳增汇能力起到显著的双重调节促进作用^[11]。然而, 目前研究多侧重于生物炭施用对土壤碳库的影响, 如李文杰等^[12]主要研究了

生物炭施用对土壤固碳减排的影响, 蓝兴福等^[13]则聚焦于土壤碳库及微生物等方面。关于生物炭施用对杨树人工林生态系统净碳积累的空间分配格局及总体固碳增汇潜力的影响还鲜有报道。本研究选取江苏泗洪马浪湖林场杨树人工幼林为实验对象, 通过连续 2 a 田间观测, 初步探讨生物炭施用对杨树人工幼林碳汇能力的短期影响, 重点阐明: ①不同生物炭施用量对杨树人工幼林各碳库(乔木层、草本层、凋落物层、土壤层)碳储量净增量的影响规律; ②生物炭施用调控杨树人工幼林短期固碳增汇能力的主要机制。研究结果可为苏北杨树人工林兼顾林木生产及固碳增汇能力提升的多功能经营实践提供技术支撑。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省泗洪县马浪湖林场(33°19'N, 118°18'E), 地处洪泽湖西岸, 属暖温带湿润季风气候, 年降水量为 972.5 mm, 降水集中于 6—8 月, 年平均气温为 14.4 °C, 年日照时数为 2 250.0~2 350.0 h, 无霜期为 197.0 d。土壤母质为洪泽湖淤积土。实验林分为 1 年生杨树人工林(造林时间为 2022 年 3 月), 造林杨树无性系为‘南林 3804 杨’*P. deltoides* ‘Nanlin 3804’, 造林密度为 6 m×6 m, 造林斑块总面积为 6 hm², 造林苗木规格为“两根一干”, 即苗木具备 2 年生的根系及 1 条 1 年生的健壮直立主干。林地土壤容重为 1.25 g·cm⁻³, 土壤全氮、全磷、有机碳分别为 1.06、0.31、15.23 g·kg⁻¹, 土壤速效磷、硝态氮、铵态氮分别为 28.33、9.67、4.62 mg·kg⁻¹, 土壤 pH 为 6.65。

1.2 试验设置

本研究采用随机区组实验设计方案。于 2023 年 3 月底设置 3 种不同实验处理: 未施用生物炭的空白对照(ck)、低生物炭施用量(B1, 30 t·hm⁻²)、高生物炭施用量(B2, 60 t·hm⁻²)。每个处理设 4 个重复样地, 不同样地之间间隔 10 m 以上, 共 12 个样地。样地面积为 24 m×24 m, 每个样地内包含 16 株杨树, 共计 192 株。本研究严格控制单一变量, 所有处理均不进行任何施肥操作, 仅通过生物炭施用量构建差异处理。根据每块样地的实际用量, 先将生物炭均匀铺在样地地表, 然后利用农用土壤翻耕机将生物炭均匀混入 0~40 cm 深土层中。对照样地仅进行与处理组完全一致的翻耕操作, 不做其他任何处理。本研究生物炭总施用量合计 20.8 t, 生物炭材料为稻壳炭, 碳质量分数为 64.61%, 氮质量分数为 0.06%, 氢质量分数为 3.88%, 氧质量分数为 31.41%。

1.3 取样与测定

1.3.1 植被层生物量及碳储量、碳增量估算 乔木层生物量及碳储量估算: 于 2023 年 3 月, 2024 年 3 月、8 月和 12 月以及 2025 年 3 月, 对杨树人工林的乔木进行每木检尺。基于胸径树高数据, 并结合陈乐蓓^[14]已建立的杨树单株生物量异速生长方程, 计算每株林木的生物量并乘以碳转换系数 0.48^[15]换算成固碳量, 最终将所有林木株数累计推算得到乔木层碳储量。

草本层、凋落物层生物量及碳储量估算: 于 2023 年 3 月、2024 年 3 月和 2025 年 3 月, 随机选取 5 个 1 m×1 m 样方, 分别采集草本层和凋落物层样品。称取各小样方样品鲜质量, 五点混匀后取 20% 带回实验室, 放入 105 °C 的烘箱杀青 5~10 min, 并在 85 °C 持续烘干至恒质量, 推算单位面积生物量, 采用常见的碳转换率 0.45^[16]计算碳储量。乔木层、草本层和凋落物层碳增量分别由 2023 年的碳储量与 2024 年的碳储量差值及 2024 年的碳储量与 2025 年的碳储量差值获得。

1.3.2 土壤碳储量、碳增量和理化性质测定 土壤取样时间分别为 2023 年 3 月、2024 年 3 月和 2025 年 3 月, 从每个样地采集土壤样品。对 0~100 cm 深度的土壤剖面取样, 分 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层, 每层土壤采集约 200 g 样品。将样品平均分成 2 份, 一份置于-4 °C 冰箱, 另一份风干, 用于测定土壤养分等指标。采用钼锑抗比色法测定全磷和速效磷; 采用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾浸提法测定土壤铵态氮和硝态氮; 采用电位法测定土壤酸碱度; 借助元素分析仪(Vario Element III)测定土壤全氮。参照杨丽雨等^[17]的方法, 通过单位换算系数对各土层碳质量分数、土壤容重、土层厚度的乘积进行累加计算得到土壤层碳储量, 土壤层碳增量分别由 2023 年的碳储量与 2024 年的碳储量差值及 2024 年的碳储量与 2025 年的碳储量差值获得。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 软件进行数据统计分析, 借助单因素方差分析(one-way ANOVA)方法检验生态系统

各层碳储量在不同处理下的差异显著性;同时使用重复测量方差分析 (Repeated Measures ANOVA) 检验不同处理和时间对各层碳储量的影响。使用 Origin 2024 软件对杨树人工林各层碳储量与土壤理化性质进行相关性分析。使用 Canoco 5.0 对土壤理化因子与土壤生态系统碳储量进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对杨树胸径、树高生长的影响

生物炭施用可以显著促进杨树胸径、树高生长 (图 1)。其中, 2024 年 3 月和 8 月, B2 处理组杨树平均胸径、树高均显著高于 ck ($P<0.05$); B1 处理组与 ck 相比均无显著差异, 表明这 2 个时期高生物炭施用对杨树胸径、树高生长存在短期显著促进作用。测量发现 2024 年 3 月和 8 月胸径生长量 B1 处理较 ck 增长 10.45% 和 12.87%, B2 处理较 ck 增长 14.78% 和 16.54%; 树高生长量 B1 处理较 ck 增长 2.47% 和 6.36%, B2 处理较 ck 增长 18.11% 和 17.12%, 表明胸径、树高生长受 B2 处理影响更显著。

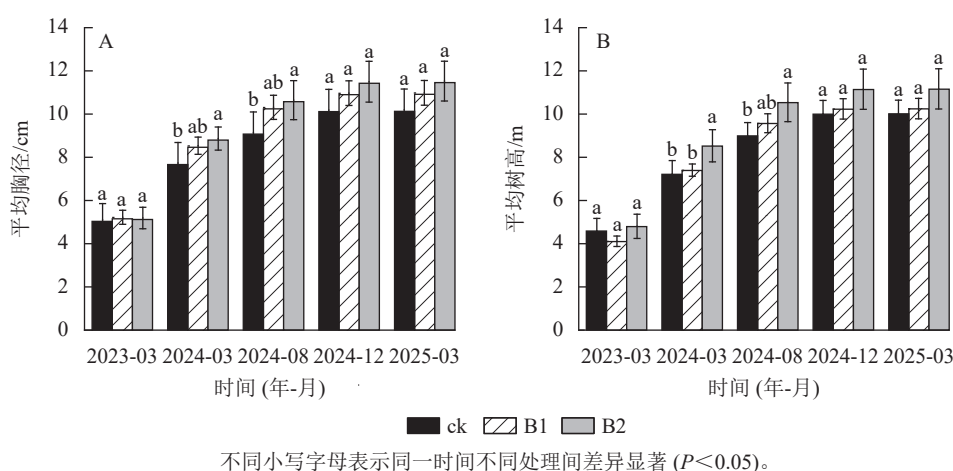


图 1 生物炭施用对杨树平均胸径、树高的影响

Figure 1 Effects of biochar application on mean DBH and mean height of poplar trees

2.2 生物炭施用对杨树人工幼林植被层碳储量净增量的影响

2023—2024 年, 生物炭施用显著提升了乔木层、草本层和凋落物层的碳储量净增量 ($P<0.05$, 图 2A), 而在 2024—2025 年对植被层碳储量净增量的促进作用不显著 (图 2B)。2023—2024 年, 乔木层碳储量净增量在 ck、B1 和 B2 处理下分别为 1.38 、 1.94 和 $2.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 草本层为 0.02 、 0.03 和 $0.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 凋落物层为 0.01 、 0.05 和 $0.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2023—2025 年, 与 ck 相比, B1 和 B2 处理使乔木层碳储量提升 23.26% 和 34.84%, 草本层提升 10.08% 和 26.58%, 凋落物层提升 28.53% 和 53.67%, 乔木层、草本层和凋落物层碳储量净增量从大到小依次均为 B2、B1、ck, 即高生物炭施用量更有利于植被

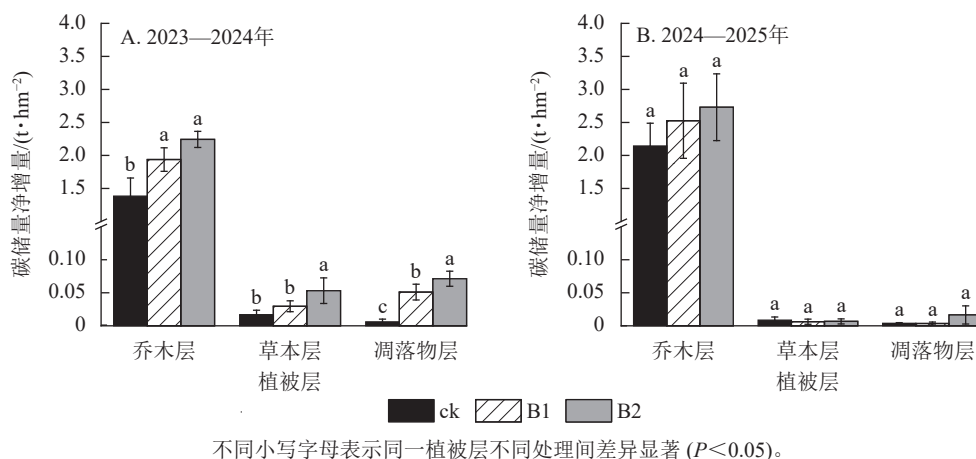


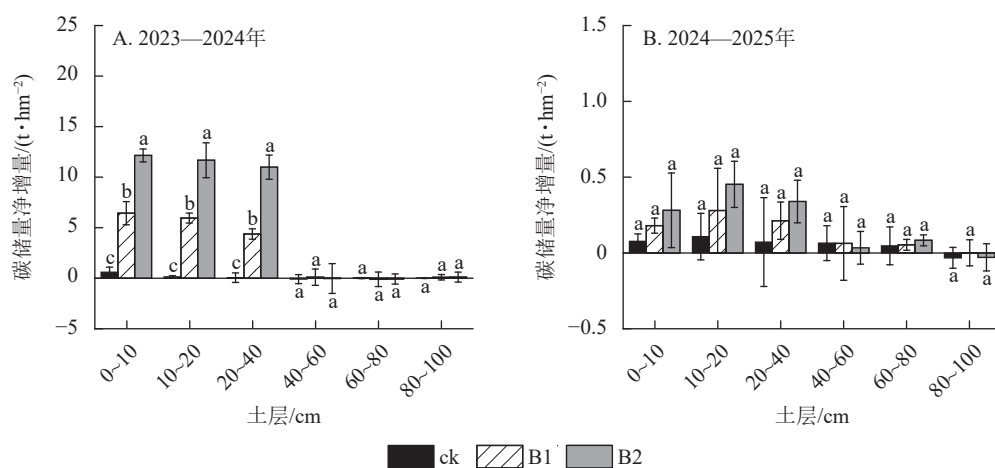
图 2 生物炭施用对乔木层、草本层、凋落物层碳储量净增量的影响

Figure 2 Effects of biochar application on net increases in carbon stock in the arbor layer, herb layer, and litter layer

层生物量有机碳的固持。总体而言，生物炭施用使杨树人工林碳储量呈显著增加趋势，其中 B2 处理对植被层的固碳增汇能力更好。

2.3 生物炭施用对杨树人工幼林土壤层碳储量净增量的影响

2023—2024 年，生物炭施用显著提升了 0~40 cm 的土壤碳储量净增量 ($P < 0.05$, 图 3A)，在 2024—2025 年对土壤层的碳储量净增量作用不显著 (图 3B)。2023—2024 年，B1、B2 处理下 0~40 cm 平均土壤有机碳储量净增量较 ck 分别提高了 15.98、34.02 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，而生物炭施用对 40~100 cm 土壤层碳储量净增量没有显著影响。2023—2024 年 0~10 cm 土壤层碳储量净增量在 ck、B1 和 B2 处理下分别为 0.60、6.44 和 12.15 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；10~20 cm 土壤层碳储量净增量为 0.13、5.95 和 11.67 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。20~40 cm 土壤层碳储量净增量为 0.05、4.37 和 10.98 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各处理土壤层碳汇从大到小依次为 B2、B1、ck。这表明高生物炭施用量有助于提升土壤层碳储量。总体而言，与 ck 相比，生物炭施用 1 a 后，0~40 cm 土壤碳储量净增量均有不同程度增加，其中表层土的增效最大，说明土壤碳储量受到了生物炭的直接影响，生物炭施用对提升杨树土壤碳汇能力具有积极作用。



不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 生物炭施用对土壤层碳储量净增量的影响

Figure 3 Effects of biochar application on net increases in soil carbon stock

本研究对乔木层、草本层、凋落物层碳储量和 0~100 cm 土层土壤总碳储量进行重复测量方差分析。分析结果 (表 1) 表明：不同处理单独作用对草本层、凋落物层和土壤层碳储量有极显著影响 ($P < 0.01$)，但对乔木层没有显著影响；不同时间单独作用对乔木层、草本层、凋落物层和 0~100 cm 土层土壤总碳储量均有极显著影响 ($P < 0.01$)；不同处理和时间的交互作用对凋落物层碳储量和 0~100 cm 土层土壤总碳储量有极显著影响 ($P < 0.01$)，对乔木层和草本层碳储量有显著影响 ($P < 0.05$)。

2.4 影响杨树人工幼林生态系统碳储量的主要因素

相关分析 (图 4) 表明：土壤全氮、全磷、铵态氮和乔木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤速效磷、硝态氮与乔木层呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与草本层、凋落物层和土壤层碳储量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤 pH、碳氮比与草本层、凋落物层和土壤层碳储量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

进一步通过冗余分析探讨了生物炭施用后土壤理化性质对生态系统碳储量的影响机制。冗余分析结果 (图 5) 表明：第 1 轴和第 2 轴共同解释变量的 79.14%，土壤全氮是杨树人工幼林生态系统碳储量的主要贡献因子，解释了 71.6% ($P = 0.002$)。

3 讨论

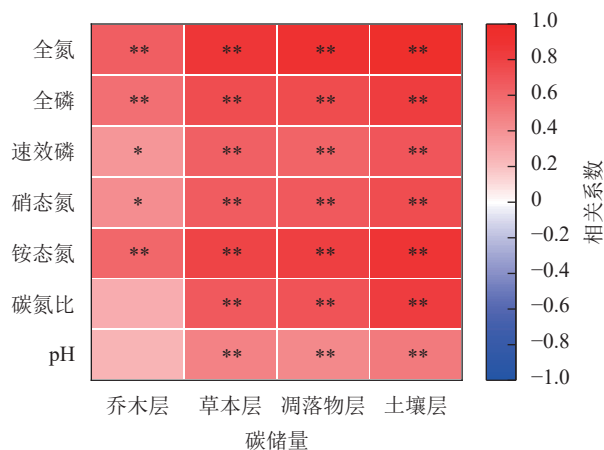
3.1 生物炭施用对杨树人工幼林乔木层、草本层、凋落物层和土壤层固碳增汇能力的影响

本研究表明：生物炭施用后，杨树人工幼林乔木层、草本层、凋落物层和土壤层的固碳增汇能力相较于 ck 均有显著提高。植被层碳储量净增量主要来源于乔木层贡献 (占比 97.9%)，与 ck 相比，生物炭

表1 生物炭施用对杨树人工林生态系统碳储量的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measures variance analysis of the carbon storage of poplar plantation ecosystem with biochar application

层次	方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
乔木层	处理	4.347	2.000	2.174	3.905	0.060
	时间	112.817	1.065	105.966	488.696	<0.001
	处理×时间	2.175	2.129	1.021	4.710	0.036
草本层	处理	0.003	2.000	0.002	29.893	<0.001
	时间	0.011	1.137	0.010	89.048	<0.001
	处理×时间	0.002	2.275	0.001	6.964	0.011
凋落物层	处理	0.014	2.000	0.007	25.467	<0.001
	时间	0.019	2.000	0.010	149.091	<0.001
	处理×时间	0.007	4.000	0.002	29.105	<0.001
土壤层	处理	3 096.186	2.000	1 548.093	345.875	<0.001
	时间	2 547.916	1.175	2 168.353	5 566.610	<0.001
	处理×时间	1 591.213	2.350	677.085	1 738.218	<0.001



*表示显著相关($P < 0.05$); **表示极显著相关($P < 0.01$)。

图4 杨树人工林各层碳储量与土壤理化因子的相关性分析

Figure 4 Correlation analysis of carbon storage in different layers of poplar plantations and soil physicochemical factors

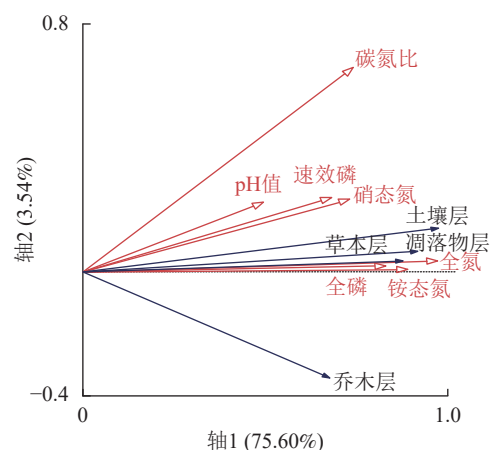


图5 杨树人工林各层碳储量与土壤理化因子的冗余分析

Figure 5 Redundancy analysis of carbon storage in different layers of poplar plantations and soil physicochemical factors

施用大幅度提高了乔木层的固碳增汇能力。这与生物炭物理化学特性密切相关。生物炭可有效降低土壤容重、增大孔隙度,进而增强土壤持水能力,其蕴含的丰富碳元素及灰分中的营养物质为植物生长以及土壤微生物、动物活动提供了良好的养分基础^[18]。YIN等^[19]研究证实:生物炭的多孔结构能有效改善根系发育环境,其表面官能团可与植物分泌物形成配位键,延长养分释放周期。这种特性有利于乔木等多年生木本植物的持续生长。与ck相比,B1和B2处理使乔木层碳汇提升23.26%和34.84%,证实了生物炭在提升植被层碳固定方面的优势。草本层与凋落物层作为生态系统的物质循环枢纽与能量流动载体,其碳汇能力提升并非孤立效应,而是与乔木层、土壤层形成了碳积累的正反馈循环。本研究B1、B2处理的草本层碳汇较ck处理提升10.08%和26.58%,凋落物层碳汇分别提升28.53%和53.67%。这一现象可归因于生物炭改良土壤后,草本植物生长旺盛带来的生物量增加,也与生物炭自身富含芳香性结构,能够抵御土壤微生物的分解有关^[20]。凋落物层碳储量的增加,能够降低土壤侵蚀导致的碳流失,缓慢分解过程释放有机碳和养分,进一步补充土壤碳库,为乔木和草本生长提供滋养。大量研究证实,生物炭可以通过促进植物生长,增加植被生物量碳来保护土壤有机碳免于分解,间接增强生态系统的碳储量^[21]。

有研究显示：自然界中普遍存在碳源与碳汇，固碳减排需提高碳汇规模，以推动碳储量的提升^[22]。固碳能力主要受有机质积累与分解过程调控，两者动态平衡决定了土壤肥力，适当添加生物炭可以增加有机质积累，提升土壤肥力，改善土壤结构，进而提升土壤的碳储量。本研究显示：生物炭施用 1 a 后杨树人工幼林土壤碳储量得以提高，表明生物炭具备良好的固碳效能，对土壤碳封存具有积极促进作用。这一结果与 CRISCUOLI 等^[23]将木屑生物炭施入葡萄园土壤后短期显著提升土壤碳储量的研究结论一致。此外，土壤碳质量分数随着土层深度增加而降低，具有明显的垂直分布特征^[24]。施用生物炭显著改变了土壤碳库的垂直分布格局，其固碳效应在不同土层深度表现出明显的异质性。本研究发现：在 0~40 cm 土层施用生物炭后各土层土壤碳储量均显著提高，且 B1、B2 处理较 ck 分别实现了 36.97% 和 68.56% 的碳汇提升。这主要源于 2 个方面：一是生物炭的直接碳输入，二是生物炭对土壤微环境的综合调控。生物炭的高芳香化结构和多孔特性可增加土壤比表面积^[25]，其表面羧基和酚羟基等官能团通过配位键固定有机分子，形成物理-化学双重保护机制，减少土壤有机碳的矿化分解^[26]；同时，生物炭的碱性特征使表层土壤 pH 提升，改善了苏北淤积土酸性的问题，促进了土壤微生物活性，进一步提升土壤有机碳。本研究中施加生物炭对表层土壤养分总量及有效量均呈现显著增加趋势。这与任涵^[27]研究结果基本一致，进一步佐证了生物炭对表层土壤环境的改良效应。深层土壤碳汇提升，则得益于生物炭在土壤中缓慢迁移并形成稳定的碳骨架^[28]，不易被微生物分解，从而提高土壤碳库稳定性，促进生物炭对土壤固碳的长期影响。在生物炭施用后的第 1 年，对乔木层、草本层、凋落物层及土壤层的碳汇能力均产生了显著的即时促进效应。在第 2 年，B1、B2 处理的乔木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量净增量仍较第 1 年持续提升，但处理间差异不显著，这并未证明其促进作用消失，而是通过更稳定的土壤基础改良效应持续发挥作用。多数研究发现：生物炭施用引起的土壤养分增加通常是短暂的，且由于植物吸收和淋溶，这种影响随时间而下降^[29]，但本研究中第 2 年仍保持稳定固碳，可能是由于生物炭的多孔结构对养分的持续吸附释放有关，可缓解养分淋溶损失，且第 1 年改良的土壤物理结构已形成稳定环境，为植被生长和微生物活动提供了持续保障，这与 GLASER 等^[6]提出的长期施用生物炭对植物生长和产量的影响主要是通过改变养分的生物有效性，而不是通过生物炭直接提供养分的观点一致。由此可见，苏北杨树人工幼林土壤有机质质量分数较低， $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 高剂量生物炭的输入不仅直接增加了土壤碳库的基础储量，对土壤物理性质、养分状况的改良效应也更显著，进而更有效地促进植被生长和碳固定。

3.2 杨树人工幼林生态系统碳储量的主要影响因素

土壤理化性质的改善是碳汇能力提升的重要驱动力，而生物炭的应用已被证明可以显著改善土壤理化性质^[30]。生物炭施用可综合改善土壤水、肥、气、热等环境条件^[31]，从而促进杨树生长发育。本研究相关分析表明：土壤 pH、全氮、全磷、有效磷、铵态氮、硝态氮和碳氮比与杨树人工林乔木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量呈显著正相关，这可能与生物炭特性有关。生物炭能直接为杨树生长提供养分，同时减少酸性土壤中磷的固定作用，提升磷素的生物有效性。同时，生物炭比表面积较大，可以吸附土壤中的氮、磷、钾等有效养分^[32]，提高作物养分利用率^[33]。其中，生物炭对养分的吸附与活化效应，往往与其调节土壤酸碱度的能力密切相关。土壤酸性是影响土壤肥力提升和作物产量增加的关键因子^[34]。本研究结果表明：草本层、凋落物层和土壤层碳储量与 pH 呈极显著正相关。这与樊洪等^[33]研究一致，可能是由于生物炭表面存在负电荷的官能团，可以与土壤溶液结合从而提高土壤 pH。此外，本研究稻壳炭本身 pH 较高，有利于提高土壤 pH^[7]。其次，土壤全氮、全磷、有效磷、铵态氮、硝态氮和碳氮比与生态系统各层碳储量呈极显著正相关，这可能是由于施用生物炭提高了土壤养分有效性，减少了养分损失。CAO 等^[34]研究表明：生物炭施用不仅提高了土壤 pH 和全磷质量分数，而且改善了土壤性质；PRAPAGDEE 等^[35]研究发现：添加 5% (质量比) 的生物炭可显著提升土壤有效磷质量分数；王洪媛等^[36]研究指出：生物炭施用会对土壤氮素转化机制产生影响，进而作用于土壤氨氮。总体来说，由于生物炭独特的理化性质，在杨树幼林土壤中施用生物炭可显著提升土壤养分，增加土壤有机质储备，减少养分淋溶损失，并进一步提高土壤养分的利用效率。施用生物炭对土壤理化性质的改善及土壤肥力的稳定维持或提高是促进作物生长和固碳增汇的可能原因，然而，长期施用生物炭对杨树人工幼林土壤理化

性质的影响机制仍需进一步研究。

4 结论

综上所述,施用生物炭有利于持续稳定促进杨树林木胸径、树高的快速生长,且有效改善杨树人工幼林土壤的全氮、全磷、有效磷、铵态氮、硝态氮、碳氮比和pH,全氮是杨树人工幼林生态系统各层碳储量的主要贡献因子。施用生物炭在改良土壤结构的同时,提高了养分的实际利用效率,进而对杨树人工幼林乔木层、草本层、凋落物层及土壤层的固碳增汇产生正面效应。其中, $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的高生物炭施用量可在短期快速稳定固碳,对杨树人工幼林固碳增汇能力的促进效果更好。因此,施用生物炭可显著提升杨树人工幼林生态系统的固碳增汇潜力,其中乔木层和土壤层碳储量的变化主导了生态系统碳汇能力的提升。未来,应深入开展生物炭与联合施肥对杨树人工林碳储量影响的研究,以推动其在生产中的更广泛应用。

5 参考文献

- [1] ZHANG Min, QIU Yan, LI Chunling, *et al.* A habitable earth and carbon neutrality: mission and challenges facing resources and the environment in China: an overview[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(2): 1045. DOI: [10.3390/ijerph20021045](https://doi.org/10.3390/ijerph20021045).
- [2] YANG Wu, MIN Zhang, YANG Mingxing, *et al.* Exploration of the implementation of carbon neutralization in the field of natural resources under the background of sustainable development: an overview[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(21): 14109. DOI: [10.3390/ijerph192114109](https://doi.org/10.3390/ijerph192114109).
- [3] HONG Songbai, DING Jinzhi, KAN Fei, *et al.* Asymmetry of carbon sequestrations by plant and soil after forestation regulated by soil nitrogen[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**: 3196. DOI: [10.1038/s41467-023-38911-w](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38911-w).
- [4] LI Xu, RAMOS AGUILA L C, WU Donghai, *et al.* Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **904**: 166962. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.166962](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166962).
- [5] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, *et al.* Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **206**: 46–59. DOI: [10.1016/j.agee.2015.03.015](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015).
- [6] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**(4): 219–230. DOI: [10.1007/s00374-002-0466-4](https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4).
- [7] YAO Qin, LIU Junjie, YU Zhenhua, *et al.* Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **110**: 56–67. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.005).
- [8] TAN Zhongxin, LIN C S K, JI Xiaoyan, *et al.* Returning biochar to fields: a review[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **116**: 1–11. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.03.017](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.017).
- [9] CHEN Junhui, SUN Xuan, ZHENG Jufeng, *et al.* Biochar amendment changes temperature sensitivity of soil respiration and composition of microbial communities 3 years after incorporation in an organic carbon-poor dry cropland soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, **54**(2): 175–188. DOI: [10.1007/s00374-017-1253-6](https://doi.org/10.1007/s00374-017-1253-6).
- [10] WERNER C, HAAS E, GROTE R, *et al.* Biomass production potential from *Populus* short rotation systems in Romania[J]. *GCB Bioenergy*, 2012, **4**(6): 642–653. DOI: [10.1111/j.1757-1707.2012.01180.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01180.x).
- [11] DU Zhangliu, ZHAO Jiankun, WANG Yiding, *et al.* Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(3): 581–589. DOI: [10.1007/s11368-015-1349-2](https://doi.org/10.1007/s11368-015-1349-2).
- [12] 李文杰, 左翔之, 王建, 等. 生物炭施用土壤的固碳减排效应及机制[J]. *中国环境科学*, 2023, **43**(11): 5913–5923. LI Wenjie, ZUO Xiangzhi, WANG Jian, *et al.* Effect and mechanism of biochar application on soil carbon sequestration and mitigation[J]. *China Environmental Science*, 2023, **43**(11): 5913–5923. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2023.11.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2023.11.029).
- [13] 蓝兴福, 王晓彤, 许旭萍, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(21):

- 7968–7976. LAN Xingfu, WANG Xiaotong, XU Xuping, *et al.* Subsequent effects of slag and biochar application on soil carbon pools and soil microorganisms in paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(21): 7968–7976. DOI: [10.5846/stxb201806211362](https://doi.org/10.5846/stxb201806211362).
- [14] 陈乐蓓. 不同经营模式杨树人工林生态系统生物量与碳储量的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008. CHEN Lebei. *Study on Biomass and Carbon Storage of Different Poplar Agroforestry Patterns*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008. DOI: [10.7666/d.y1295798](https://doi.org/10.7666/d.y1295798).
- [15] 国家林业和草原局. 森林生态系统碳储量计量指南: LY/T 2988—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. State Forestry and Grassland Administration. *Guideline on Carbon Stock Accounting in Forest Ecosystem: LY/T 2988—2018*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [16] 邢玮, 卜丹蓉, 葛之葳, 等. 不同林龄杨树人工林碳储量研究[J]. *生态科学*, 2014, **33**(1): 154–160. XING Wei, BU Danrong, GE Zhiwei, *et al.* Study on carbon storage of poplar plantation at different stand ages[J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(1): 154–160. DOI: [10.3969/j.issn.1008-8873.2014.01.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8873.2014.01.024).
- [17] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 等. 六盘山 4 种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(15): 5215–5227. YANG Lili, WANG Yanhui, WEN Shizhi, *et al.* Carbon and nitrogen storage and distribution in four forest ecosystems in Liupan Mountains, Northwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(15): 5215–5227. DOI: [10.5846/stxb201401200151](https://doi.org/10.5846/stxb201401200151).
- [18] LIAN Fei, XING Baoshan. Black carbon (biochar) in water/soil environments: molecular structure, sorption, stability, and potential risk[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(23): 13517–13532. DOI: [10.1021/acs.est.7b02528](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02528).
- [19] YIN Yanan, YANG Chao, LI Mengtong, *et al.* Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **798**: 149294. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149294](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294).
- [20] FERNÁNDEZ-UGALDE O, GARTZIA-BENGOETXEA N, AROSTEGI J, *et al.* Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **587**: 204–213. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.02.121](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.121).
- [21] BIEDERMAN L A, HARPOLE W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, **5**(2): 202–214. DOI: [10.1111/gcbb.12037](https://doi.org/10.1111/gcbb.12037).
- [22] 潘勇军, 王兵, 陈步峰, 等. 江西大岗山杉木人工林生态系统碳汇功能研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, **33**(10): 120–125. PAN Yongjun, WANG Bing, CHEN Bufeng, *et al.* Study on carbon sink of Chinese fir plantation ecosystem in Dagangshan Mountain, Jiangxi Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, **33**(10): 120–125. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.10.033](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.10.033).
- [23] CRISCUOLI I, VENTURA M, WIEDNER K, *et al.* Stability of woodchips biochar and impact on soil carbon stocks: results from a two-year field experiment[J]. *Forests*, 2021, **12**(10): 1350. DOI: [10.3390/f12101350](https://doi.org/10.3390/f12101350).
- [24] 左小锋, 魏亚娟, 左合君, 等. 干旱荒漠区不同林龄梭梭人工林碳储量及分配特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, **45**(6): 147–156. ZUO Xiaofeng, WEI Yajuan, ZUO Hejun, *et al.* Carbon storage and distribution characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantations at different stand ages in arid desert areas[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, **45**(6): 147–156. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.06.015](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.06.015).
- [25] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(5): 1402–1417. YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, *et al.* The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, **22**(5): 1402–1417. DOI: [10.11674/zwyf.14539](https://doi.org/10.11674/zwyf.14539).
- [26] 李芳芳, 李中文, 李宇轩, 等. “微生物碳泵”作用下的土壤有机碳稳定性及其吸附特性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(6): 1155–1163. LI Fangfang, LI Zhongwen, LI Yuxuan, *et al.* Stability of soil organic carbon in the “microbial carbon pump” process and its adsorption characteristics: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(6): 1155–1163. DOI: [10.11654/jaes.2021-0860](https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0860).
- [27] 任涵. 生物炭、益生菌对桉树林地土壤微生物多样性及林木生长的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020. REN Han. *The Study of Bichar and Rhizobacteria Affect Soil Microbial Diversity and Plant Growth in A Eucalyptus Seedling*

- Plantation*[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. DOI: [10.27034/d.cnki.ggxiu.2020.000022](https://doi.org/10.27034/d.cnki.ggxiu.2020.000022).
- [28] STEINER C, TEIXEIRA W G, LEHMANN J, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, **291**(1): 275–290. DOI: [10.1007/s11104-007-9193-9](https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9).
- [29] YIN Dawei, LI Hongyu, WANG Haize, *et al.* Impact of different biochars on microbial community structure in the rhizospheric soil of rice grown in albic soil[J]. *Molecules*, 2021, **26**(16): 4783. DOI: [10.3390/molecules26164783](https://doi.org/10.3390/molecules26164783).
- [30] MUKHERJEE A, ZIMMERMAN A R, HARRIS W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars[J]. *Geoderma*, 2011, **163**(3/4): 247–255. DOI: [10.1016/j.geoderma.2011.04.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021).
- [31] van ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1): 235–246. DOI: [10.1007/s11104-009-0050-x](https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x).
- [32] JIN Zewen, CHEN Can, CHEN Xiaomin, *et al.* The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield: a five year field trial with biochar addition in upland red soil, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1467–1480. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.08.412](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.412).
- [33] 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 等. 刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响[J]. *环境科学*, 2024, **45**(6): 3543–3552. FAN Hong, XIE Shan, LONG Tianyu, *et al.* Effects of *Rosa roxburghii* pomace biochar on yield and quality of Chinese cabbage and soil properties[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(6): 3543–3552. DOI: [10.13227/j.hjlx.202306237](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202306237).
- [34] CAO Dianyun, LAN Yu, CHEN Wenfu, *et al.* Successive applications of fertilizers blended with biochar in the soil improve the availability of phosphorus and productivity of maize (*Zea mays* L.)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, **130**: 126344. DOI: [10.1016/j.eja.2021.126344](https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126344).
- [35] PRAPAGDEE S, TAWINTEUNG N. Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L.[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(10): 9460–9467. DOI: [10.1007/s11356-017-8633-1](https://doi.org/10.1007/s11356-017-8633-1).
- [36] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2016, **36**(19): 5998–6011. WANG Hongyuan, GAI Xiapu, ZHAI Limei, *et al.* Effect of biochar on soil nitrogen cycling: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(19): 5998–6011. DOI: [10.5846/stxb201412052414](https://doi.org/10.5846/stxb201412052414).