北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响

何映乾 李治鑫 尹大川

Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings

He Yingqian, Li Zhixin, Yin Dachuan

引用本文:
何映乾, 李治鑫, 尹大川. 卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10):74–83. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250195
He Yingqian, Li Zhixin, Yin Dachuan. Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10):74–83. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250195

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250195

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物炭添加阻控河岸林地氮污染

Biochar addition to control nitrogen pollution in riparian forests

北京林业大学学报, 2025, 47(2): 40–48. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240303

山新杨谷胱甘肽S–转移酶编码基因*PdbGSTU*功能分析

Functional analysis of encoding gene *PdbGSTU* for glutathione S–transferase in *Populus davidiana* × *P. bolleana*

北京林业大学学报, 2024, 46(8): 68–78. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240020

加纳木霉ACCC30153对山新杨幼苗促生抗病功能分析

Growth promotion and disease resistance function of *Trichoderma ghanaiana* ACCC30153 on *Populus davidiana* × *P. bolleana* seedlings

北京林业大学学报, 2024, 46(12): 103–113. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230346

丛枝菌根真菌对银中杨叶片物质代谢及化学防御的影响

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on metabolism and chemical defense of *Populus alba* × *P. berolinensis* leaves

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 86–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200172

氮添加及接种处理对1年生樟子松苗木根系形态及养分含量的影响

Responses of root morphology and nutrient content of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings to nitrogen addition and inoculation treatments

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 1–7. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200071

杨棒盘孢菌对不同杀菌剂及其复配剂的敏感性

Susceptibility of *Coryneum populinum* to different fungicides and their compounds

北京林业大学学报, 2025, 47(2): 66–78. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230274

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250195

卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响

何映乾　李治鑫　尹大川
（沈阳农业大学林学院，辽宁 沈阳 110866）

摘要:【目的】为验证卷边桩菇与生物炭联合施用对山新杨幼苗生长的协同增效作用，探讨其对苗木生长的促进机制，为东北地区山新杨优质育苗和生态环境改善提供理论依据和数据基础。**【方法】**以山新杨苗木为研究对象，设置空白处理、单独施用卷边桩菇、单独施用生物炭、卷边桩菇与生物炭联合施用 4 个处理。通过植物生理与生化指标测定，评估各处理对苗高、地径、叶面积、生物量、光和色素、纤维素、可溶性蛋白、可溶性糖等生长及生理参数的影响，同时分析根系生长情况。**【结果】**联合施用卷边桩菇与生物炭显著促进了山新杨的生长，苗高、地径和叶面积分别较空白处理提高 23.2%、16.7% 和 17.06%；单独施用卷边桩菇山新杨幼苗的苗高、地径和叶面积较空白处理分别提高 17.5%、29.5% 和 16.23%。在生理指标方面，联合施用显著提升了叶片中叶绿素 a、纤维素、可溶性糖和可溶性蛋白含量，增幅分别为 10.03%、6.23%、19.63% 和 85.51%，而叶绿素 b 略降 1.77%；单独施用卷边桩菇时，叶绿素 a、纤维素、可溶性糖及可溶性蛋白含量较空白处理分别提高 6.72%、5.84%、9.37% 和 45.6%，而叶绿素 b 下降 6.32%。此外，联合施用显著促进了山新杨根系的生长发育。生物炭和菌液联合施用的山新杨苗木根系相较于对照组根系长度和根表面积分别增加了 145.51% 和 86.82%。**【结论】**卷边桩菇与生物炭联合施用能显著促进山新杨幼苗的生长与生理活性，具有较好的协同增效功能。本研究结果可为提高苗木质量、增加造林成活率及推动生态林业可持续发展提供了理论与实践依据。

关键词：山新杨；外生菌根菌；生物炭；协同增效
中图分类号：S792.11　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)10−0074−10
引文格式：何映乾，李治鑫，尹大川. 卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(10)：74−83. He Yingqian, Li Zhixin, Yin Dachuan. Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 74−83.

Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings

He Yingqian　Li Zhixin　Yin Dachuan
(School of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

Abstract:［**Objective**］This paper aims to verify the synergistic effects of combined application of *Paxillus involutus* and biochar on *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings by exploring their growth-promoting functions, so as to provide data support for subsequent research, and offer a theoretical basis for high-quality seedling cultivation and ecological environment improvement in northeastern China.［**Method**］Using *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings as the research objects, four treatments were established: blank

收稿日期: 2025−05−30　**修回日期:** 2025−06−09
基金项目: 国家自然科学基金项目(31800542)，辽宁省自然科学基金项目(Z20250060)。
第一作者: 何映乾。主要研究方向：森林病理。 Email: 2760621698@qq.com　地址：110866 辽宁省沈阳市沈河区东陵路 120 号沈阳农业大学林学院。
责任作者: 尹大川，副教授。主要研究方向：森林病理。 Email: yindachuan@syau.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

control, sole application of *Paxillus involutus*, sole application of biochar, and combined application of *Paxillus involutus* and biochar. Plant physiological and biochemical experimental methods were employed to measure growth and physiological indices, including seedling height, ground diameter, leaf area, biomass, photosynthetic pigments, cellulose, soluble protein, and soluble sugar content, as well as root growth under each treatment. [**Result**] Growth indices: seedling height, ground diameter, and leaf area significantly increased. Compared with blank control, the combined application treatment improved these indices by 23.2%, 16.7%, and 17.06%, respectively. The sole application of *Paxillus involutus* increased them by 17.5%, 29.5%, and 16.23%, respectively. Physiological indics: chlorophyll a, cellulose, soluble sugar, and soluble protein content in leaves significantly rose. The combined application treatment enhanced these above by 10.03%, 6.23%, 19.63%, and 85.51%, respectively, while chlorophyll b decreased by 1.77%. The sole *Paxillus involutus* treatment increased them by 6.72%, 5.84%, 9.37%, and 45.6%, respectively, with chlorophyll b declining by 6.32%. Additionally, the combined application markedly improved root growth in *Populus davidiana* × *P. alba*. The roots of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings treated with both biochar and *Paxillus involutus* showed a 145.51% increase in root length and an 86.82% increase in root surface area compared with control. [**Conclusion**] The combined application of *Paxillus involutus* and biochar can significantly promote the growth and physiological activity of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings, demonstrating a notable synergistic effect. The findings of this study provide both theoretical and practical foundations for improving seedling quality, enhancing afforestation survival rates, and promoting the sustainable development of ecological forestry.

Key words: *Populus davidiana* × *P. alba*; ectomycorrhizal fungi; biochar; synergistic effect

山新杨(*Populus davidiana* × *P. alba*)是以山杨(*Populus davidiana*)为母本、新疆杨(*P. alba*)为父本的人工杂交品种，经多年选育而成的优良速生树种。近年来，随着生态环境保护意识的增强，山新杨作为一种重要的生态树种受到广泛关注[1]。由于其蒴果不具备繁殖功能，春天开花后不会产生飞絮，因此成为城市绿化的优选树种，在生态环境改善与建设中具有重要价值[2−3]。然而，近年来环境条件的恶化，如病原微生物侵染、极端温度及水分胁迫等不利因素，导致杂交种在生长过程中受到不同程度的损害[4−6]。因此，如何提高杂交林木的抗逆性及生长质量显得尤为重要。

杨树是典型的菌根依赖性树种，可与外生菌根菌、内生菌根菌形成共生关系，其中外生菌根是杨树的重要菌根类型。研究表明，外生菌根菌能够显著提高毛果杨(*Populus trichocarpa*)的抗逆性并促进其生长[7]。外生菌根菌通过形成发达的菌丝网络扩大根系吸收面积，并通过分解转化的方式为杨树提供磷、钾、氮等土壤中难以直接吸收的养分[8]。外生菌根菌还可分泌酶类分解有机化合物，将其转化为杨树可吸收的离子形式，从而扩大根系对营养元素的吸收范围并提高吸收效率，进而增强杨树的逆境耐受性，显著改善其生长状况[8]。前期研究表明，卷边桩菇(*Paxillus involutus*)能与山新杨形成典型的外生菌根结构，显著提高苗木的苗高、地径、叶片含水率等生长及生理指标[9]。在干旱胁迫下，卷边桩菇通过调节渗透调节物质含量、提高抗氧化酶活性和清除活性氧积累等生理机制，显著提升山新杨苗木的耐旱性[9]。

生物炭作为一种新型土壤改良剂，通过改善土壤理化性质、提高保水保肥能力等途径对植物生长产生积极影响。研究表明，生物炭通常对植物生长有显著促进作用。例如，生物炭能显著促进白桦(*Betula platyphylla*)和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)的根系生长、苗高增加和叶面积扩大，在幼苗期为其创造更适宜的生长环境，并增强其对水分和养分的吸收能力[10]。在盐碱土壤中，生物炭可通过降低根际土壤酸碱度的方式，缓解芦苇(*Phragmites australis*)的盐胁迫侵害，与此同时，生物炭还可以减少小麦(*Triticum aestivum*)在盐胁迫下对 Na^+ 的吸附，降低成熟植株内的 Na^+ 残留[11]。生物炭添加至土壤后，可促进植物细胞扩增与细胞壁松弛，提高水及养分的转运效率，从而促进植物新陈代谢与生长[12]。

目前，关于生物炭与外生菌根菌协同作用对林木生长影响的研究相对较少，其协同机制尚不明确。基于前期研究基础，本研究以山新杨组培苗为研究对象，采用室内接种盆栽试验，通过测定植物生理与生化指标，探讨生物炭与卷边桩菇协同作用对山新杨幼苗生长及生理特性的影响机制，为山新杨高质量育苗及科学提高其生长质量与抗逆性提供理论依

据和数据基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

山新杨幼苗为通过组织培养获得的生长性状一致的组培苗。卷边桩菇采自辽宁省彰武县沈阳农业大学实验林场。玉米秸秆生物炭(HENANLIZE，河南郑州)为网购产品。

1.2 供试基质

将蛭石和无菌土按照体积比 1∶2 混合均匀，装入灭菌袋中，于 120 ℃ 高温高压灭菌锅中灭菌 2 h 后冷却备用。

1.3 菌剂制备

将卷边桩菇菌纯菌接种至 PDA 培养基(配方：马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、磷酸二氢钾 3 g、硫酸镁 1.5 g、琼脂 19 g，水 1 000 mL)中，在恒温培养箱((24 ± 1)℃、相对湿度(65 ± 5)%、光照周期 16 L∶8 D)中培养扩繁。待菌丝长满培养基后，用直径 5 mm 的无菌打孔器均匀取出卷边桩菇菌饼，转移至盛有液体培养基的 500 mL 三角瓶中，置于恒温摇床(25 ℃，150 r/min)中震荡培养，制备卷边桩菇菌液体菌剂，使用前用搅碎机将菌剂匀浆处理。

2 试验方法

预试验结果表明，质量比为 2% 的生物炭施用量对苗木促生效果最佳，因此本研究采用质量比为 2% 的生物炭进行相关研究。共设计 4 种处理，空白处理(CK)：将灭菌后的无菌土与蛭石混合物直接装入栽培盆，每盆中移栽 1 株山新杨组培苗；单独施用生物炭(TT)：在混合物中加入质量比为 2% 的生物炭 50 g，加水搅拌均匀后装入栽培盆，每盆移栽 1 株山新杨组培苗；生物炭与卷边桩菇联合施用(AT)：在单独施用生物炭的基础上，用搅碎机将卷边桩菇菌剂匀浆处理，将液体菌剂通过打孔灌根接入山新杨幼苗，每株幼苗浇灌 50 mL；单独施用卷边桩菇(JT)：在空白处理的基础上，用搅碎机将菌剂匀浆处理，将液体菌剂通过打孔灌根接入山新杨幼苗，每株浇灌 50 mL。每个处理设置 3 次重复。

2.1 山新杨幼苗生长指标测定

2.1.1 菌根侵染率测定

在苗木正常管理 3 个月后，每个处理随机挖取 3 株幼苗，流水冲掉根部附着土，在体式镜下观察菌根形态，并采用统计记样法测定菌根侵染率。具体方法：随机选取山新杨须根数条，并将其剪成 1 cm 等长的根段，每处理组 200 个根段，按照公式(1)计算菌根侵染率。

$$C_j = n/N \times 100\% \tag{1}$$

式中：C_j 为菌根侵染率(%)，n 为侵染菌根根段数，N 为总根段数。

2.1.2 地径及苗高的测定

样本采集后，用游标卡尺和直尺分别测量植株的地径和苗高，每 7 d 测定一次，共测定 4 次，并记录相关动态数据。

2.1.3 生物量和叶面积测定

地上部分及地下部分鲜质量均采用电子天平称量，每个处理重复 3 次。样品先经 105 ℃ 烘箱杀青 20 min，再于恒温干燥箱中 80 ℃ 烘干至恒质量，最后测定干质量。

从山新杨幼苗中部随机选取叶片，每个处理组随机采集 3 片叶片，采用方格法测定叶面积[13]。具体操作如下：将叶片轮廓精确描绘于标准计算纸(最小方格尺寸为 1 mm × 1 mm)上，统计轮廓覆盖的方格数(超过或等于半格计为 1 格，不足半格舍去)，取平均值作为最终叶面积测定值。

2.2 苗木生理指标测定

2.2.1 叶绿素和纤维素测定

叶绿素测定采用丙酮研磨法[13]。随机选取山新杨幼苗中部叶片 0.5 g，放入研钵中加入 0.5 mL 丙酮、少量 $CaCO_3$ 和石英砂，研磨成匀浆，用 10 mL 80% 丙酮冲洗研钵，过滤后定容至 25 mL 容量瓶中。以 80% 丙酮为空白对照，分别在分光光度计 470 nm、645 nm 和 663 nm 波长下测定吸光度，每个处理重复 3 次。按公式(2 ~ 4)计算叶绿素 a(C_{Chla})、叶绿素 b(C_{Chlb})及类胡萝卜素(C_{ar})含量。

$$C_{Chla} = 12.21 \times A_{663} - 2.81 \times A_{645} \tag{2}$$

$$C_{Chlb} = 20.13 \times A_{645} - 5.03 \times A_{663} \tag{3}$$

$$C_{ar} = 1\,000 \times A_{470} - 3.27 \times C_{Chla} - 104 \times C_{Chlb}/229 \tag{4}$$

纤维素测定采用蒽酮比色法[14]。取山新杨茎秆粉末(过 100 目筛)0.1 g，加入 60 mL 60% 浓硫酸，冷水浴消化 30 min，定容至 100 mL 后过滤。取 5 mL 滤液稀释至 100 mL，再取 2 mL 加入 0.5 mL 2% 蒽酮试剂和 5 mL 浓硫酸，静置 12 min 后测定 620 nm 吸光度，结合标准曲线计算纤维素含量。

$$C_m = \frac{Cn \times 10^{-6} \times 100\%}{W} \tag{5}$$

式中：C_m 为纤维素含量，C 为查标准曲线得出的纤维素含量，n 为样品稀释倍数，10^{-6} 为将 μg 换算成 g 的系数，W 为样品质量。

2.2.2 可溶性糖和可溶性蛋白含量测定

可溶性糖采用蒽酮比色法[13]。取干质量为 0.1 g

的山新杨叶片磨碎后，加入 15 mL 蒸馏水沸水浴提取 20 min，冷却后定容至 100 mL。取 1 mL 提取液加入 5 mL 蒽酮试剂，沸水浴 10 min 后测定 620 nm 吸光度，按标准曲线计算含量。

$$C_{Xi} = \frac{CnV_t \times 100\%}{WV_s \times 10^6} \quad (6)$$

式中：C_{Xi} 为可溶性糖含量(%)，V_t 为提取液总体积(mL)，V_s 为测定时的取样量(mL)，10^6 为将 g 换算成 μg 的系数。

可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 法[13]。取 0.2 g 叶片研磨匀浆，定容至 10 mL，离心取上清液。取 0.1 mL 上清液加 5 mL G-250 试剂和 0.9 mL 蒸馏水，静置 2 min 后测定 595 nm 吸光度，按标准曲线计算含量。

$$C_p = \frac{CV_t}{WV_s \times 1\,000} \quad (7)$$

式中：C_p 为可溶性蛋白的含量(mg/g)，1 000 为将 μg 换算成 mg 的系数。

2.2.3　根系参数测定

每个处理随机选取 3 株苗木，冲洗根部洗去附着的土壤后剪下根系，使用扫描仪扫描并测定根长、根表面积、投影面积、体积、平均直径及根尖数等参数。

2.3　数据分析

本试验数据全部采用 Excel 2013 整理和统计，SPSS 26.0 进行单因素方差分析($P < 0.05$)，并用 Origin 2021 制图。

3　结果与分析

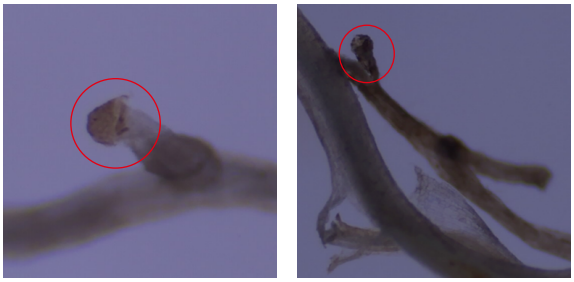
3.1　菌根侵染率及菌根形态观察

施用卷边桩菇后，山新杨幼苗可形成典型的外生菌根(图 1)。在显微镜下观察，菌根共生体表现为根系尖部膨大、整体呈棒状、颜色较浅。单独施用卷边桩菇、生物炭与卷边桩菇联合施用的菌根侵染率分别为 62.14% 和 76.31%。

3.2　卷边桩菇与生物炭联合施用对山新杨苗木生长指标的影响

与对照处理相比，单独施用生物炭、单独施用卷边桩菇、生物炭与卷边桩菇联合施用 3 组处理均可以显著促进山新杨的生长(图 2～6)。其中，第 4 周时，3 组处理苗高分别较对照处理增加了 6.6%、17.5% 和 23.2%(图 2、4)。3 组处理相较于对照处理，苗木地径显著提高($P < 0.05$)。其中，单独施用卷边桩菇的苗木地径增加最多(增幅为 29.5%)(图 3)。

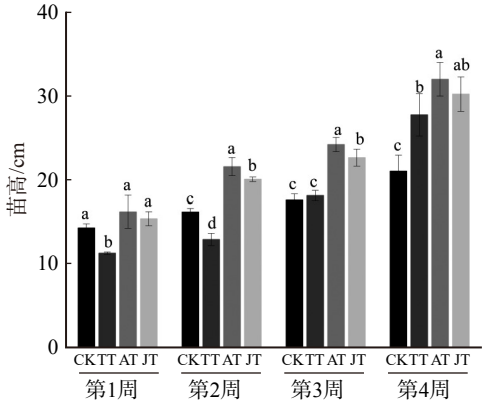
单独施用生物炭、单独施用卷边桩菇、生物炭与卷边桩菇联合施用相较于对照处理，均能显著提高



a 单独施用卷边桩菇　　b 生物炭与卷边桩菇联合施用

图 1　山新杨与卷边桩菇形成的共生菌根

Fig. 1　Symbiosis mycorrhizal formed by *Populus davidiana* × *P. alba* and *Paxillus involutus*



CK. 对照处理；TT. 单独施用生物炭；JT. 单独施用卷边桩菇；AT. 生物炭和卷边桩菇联合施用。不同小写字母表示相同时间各指标在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 2　4 种处理下不同时间山新杨幼苗高

Fig. 2　Height of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings at different times under four treatments

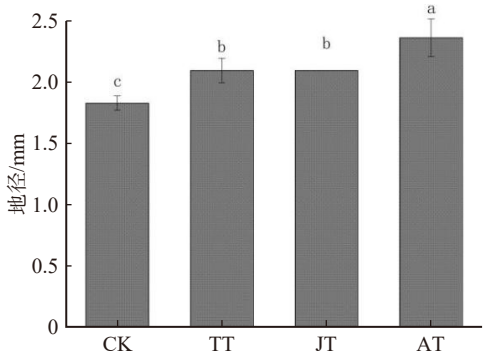


图 3　4 种处理下山新杨幼苗地径

Fig. 3　Ground diameter of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings under four treatments

山新杨苗木的生物量，且联合施用处理效果明显优于单独施用生物炭和卷边桩菇，4 种处理之间的差异均显著($P < 0.05$，图 5)。试验数据分析表明，与对照处理相比，联合施用处理显著促进了植株生长，其地上组织鲜质量与干质量增幅分别达到 152.20% 和 214.46%，地下组织相应指标分别提升了 159.63% 和 217.77%。在单一处理组中，单独施用生物炭可使

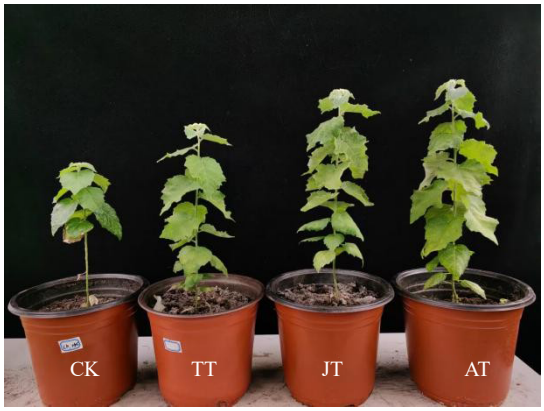


图 4 不同接种处理 4 周后的山新杨苗木

Fig. 4 *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings after 4 weeks of different inoculation treatments

地上部分鲜质量与干质量分别提高 50.77% 和 68.60%，地下部分相应增长 43.60% 和 17.78%；而单独施用卷边桩菇则使地上组织鲜质量和干质量分别增加 98.94% 和 154.96%，地下部分对应指标分别上升 104.27% 和 57.78%。

单独施用生物炭、单独施用菌液、生物炭与卷边桩菇联合施用相较于对照处理，均能显著提高山新杨苗木的叶面积，且联合施用处理的苗木叶面积提高最多。联合施用处理相较于对照处理的叶面积增加了 17.06%，相较于单独施用生物炭的叶面积增加了 8.07%，相较于单独施用卷边桩菇的叶面积增加了 7.08%；单独施用生物炭和联合施用处理相较于对照处理苗木的叶面积分别增加了 8.32% 和 16.23%（图 6）。

3.3 卷边桩菇和生物炭联合施用对山新杨苗木生理指标的影响

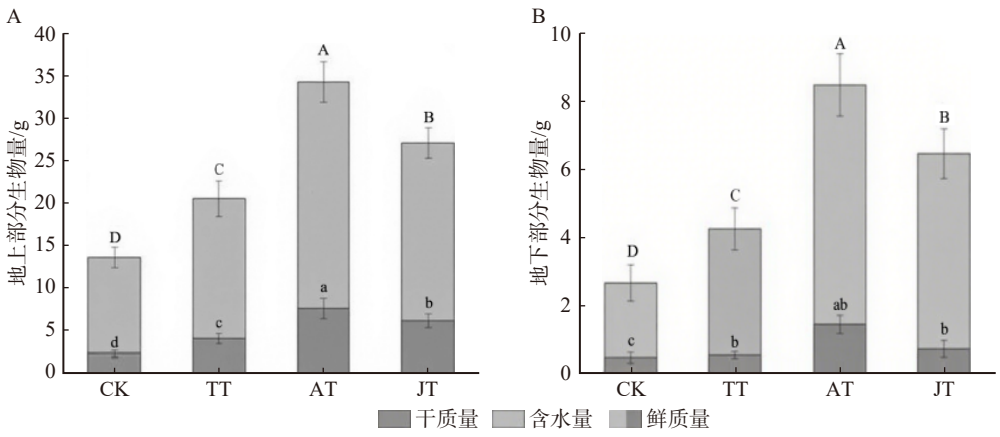
与对照处理相比，各处理组（单独施用生物炭、单独施用卷边桩菇、生物炭与卷边桩菇联合施用）均显著提高了山新杨幼苗的叶绿素 a 含量（$P < 0.05$，图 7A）。其中，联合施用处理组促进作用最显著，其叶绿素 a 含量相较于对照处理、单独施用生物炭和单独施用卷边桩菇处理分别增加了 10.03%、2.30% 和 2.77%；而单独施用生物炭处理与单独施用卷边桩菇的叶绿素 a 含量相较于对照处理分别增加了 7.53% 和 6.72%。

在叶绿素 b 含量方面，各处理组均显著低于对照组（$P < 0.05$），且组间差异显著（$P < 0.05$）。联合施用处理组叶绿素 b 含量降幅最小（较对照处理下降 1.77%），而单独施用生物炭和单独施用卷边桩菇分别下降了 6.76% 和 6.32%（图 7B）。

对于类胡萝卜素含量，各处理组均表现出显著的提升（$P < 0.05$）。联合施用处理增幅最大（较对照处理增加了 60.80%），而单独施用生物炭和单独施用卷边桩菇分别增加了 23.11% 和 35.17%（图 7C）。各处理组对可溶性蛋白含量的提升效果也差异显著（$P < 0.05$）。联合施用处理增幅最高（较对照组增加了 85.51%），而单独施用生物炭和单独施用卷边桩菇分别增加了 32.16% 和 45.60%（图 7D）。

在可溶性糖含量方面，各处理组均显著提高了苗木叶片与茎部的可溶性糖含量（$P < 0.05$）。联合施用处理山新杨苗木叶片与茎部的可溶性糖含量分别增加了 19.63% 和 15.11%，单独施用生物炭分别增加了 5.81% 和 9.85%，单独施用卷边桩菇分别增加了 12.97% 和 9.37%（图 7E）。

此外，施用生物炭的两个处理组均显著提高了叶片中的纤维素含量（$P < 0.05$）。联合施用处理山新杨苗木叶片的纤维素含量增幅最大（较对照处理增加了 6.23%），单独施用卷边桩菇处理次之（增加了 5.84%），而单独施用生物炭的增幅最小（仅 0.4%）（图 7F）。



不同大写字母表示各处理下含水量差异显著（$P < 0.05$）；不同小写字母表示各处理下干质量的差异显著（$P < 0.05$）。

图 5 不同处理下山新杨幼苗地上和地下部分生物量

Fig. 5 Biomass of aboveground and underground parts of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings under different treatments

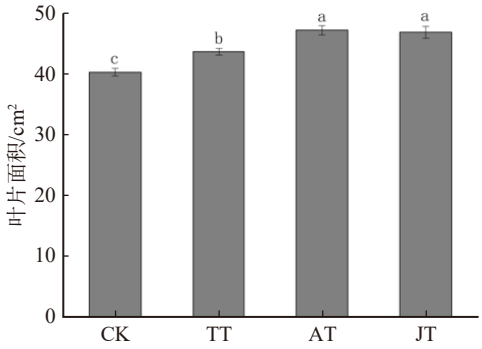


图 6　4 种处理下山新杨幼苗叶片面积

Fig. 6　Leaf area of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings under four treatments

3.4　联合施用对山新杨苗木根系的影响

除了单独施用卷边桩菇与联合施用的根直径与对照相比差异不显著($P > 0.05$)之外，其余各处理苗木的根系参数与对照相比均差异显著($P < 0.05$)。单独施用生物炭的山新杨苗木根系相较于对照组根系长度、根表面积、根投影面积、根平均直径、根体积、根尖数分别增加了 130.66%、80.03%、80.05%、28.12%、39.13%、94.86%；单独施用卷边桩菇山新杨苗木根系相较于对照组根系长度、根表面积、根投影面积、根平均直径、根体积、根尖数分别增加了 145.51%、86.82%、86.89%、−0.31%、39.13%、108.11%；联合施用处理的山新杨苗木根系相较于对照处理根系长度、根表面积、根投影面积、根平均直径、根体积、根尖数分别增加了 145.51%、86.82%、86.88%、−3.22%、39.13%、112.52%(表 1)。

3 种处理组均显著促进了山新杨苗木根系的发育。通过根系扫描图像可以直观观察到，各处理组苗木具有更为发达的根系结构。具体表现为根系总长度显著增加，分支数量明显增多，直径分布更加合理，表面积显著扩大。3 种处理均对山新杨苗木根系的生长都起到了促进作用，但联合施用处理对山新杨苗木根系生长的促进效果更加明显(图 8)。

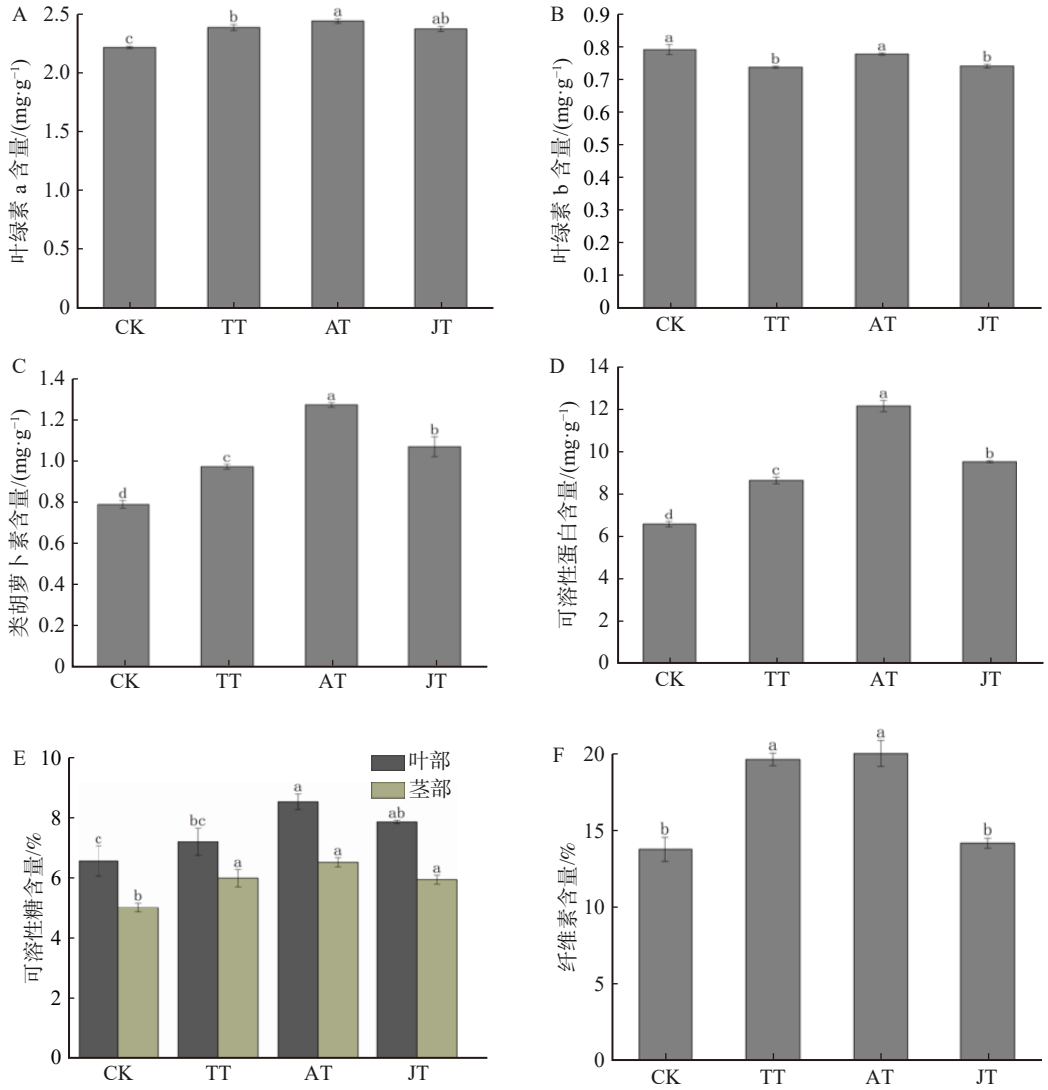


图 7　4 种处理下山新杨幼苗生理指标

Fig. 7　Physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings under four treatments

表 1 不同处理对山新杨苗木根系的影响

Tab. 1 Effects of different treatments on root system of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings

处理	根系长度/cm	根表面积/cm^2	根投影面积/cm^2	根平均直径/mm	根体积/cm^3	根尖数
CK	175.23 ± 38.21c	22.54 ± 8.21c	7.17 ± 1.76c	0.32 ± 0.02b	0.23 ± 0.08c	974 ± 36d
TT	404.20 ± 96.56b	40.58 ± 11.38b	12.91 ± 2.42b	0.41 ± 0.03a	0.32 ± 0.13b	1 898 ± 118c
AT	774.31 ± 132.87a	80.17 ± 30.53a	25.52 ± 5.31a	0.32 ± 0.03b	0.66 ± 0.16a	3 566 ± 160a
JT	430.21 ± 87.65b	42.11 ± 10.86b	13.40 ± 2.34b	0.31 ± 0.02b	0.32 ± 0.14b	2 070 ± 120b

注：数值为均值 ± 标准差，每列中不同字母代表不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。

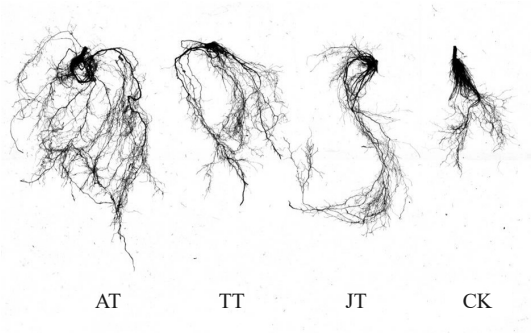


图 8 不同处理下山新杨苗木根系扫描图

Fig. 8 Scanned images of root system of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings under varied treatments

4 讨论与结论

4.1 讨 论

外生菌根菌广泛存在于自然界，与多种高等植物共生，在维持森林生态系统稳定等方面发挥着重要作用[15]。外生菌根的形成有利于植物对水分和营养物质的吸收，通过提高寄主根系的适应性等促进苗木根系的生长和发育[9,16–17]。卷边桩菇是一种广泛存在于各种森林中的常见外生菌根菌[18]，能够促进宿主灰杨（*Populus* × *canescens*）对氮元素的吸收和利用[19]。前期基础研究发现，外生菌根影响植物生长的主要途径是通过改善植物根系土壤环境，从而促进植物对营养元素的吸收[9]。生物炭通过热解或在低氧环境中加热生物质从而对植物等的生长发育提供营养物质，目前已经被广泛用作土壤改良剂，通过改善植物根部周围的土壤微生物群落结构和理化性质，从而促进植物生长[20–21]。

4.1.1 卷边桩菇和生物炭联合施用对山新杨苗木生长的促进效应

苗木生长指标是评价其生长发育状况的重要依据，能够直观反映苗木的生理状态和生长潜力[22–24]。苗高增加表明苗木具有较强的生长势和良好的分生能力，地径的增粗表明苗木具有较强的机械支撑能力和抗倒伏能力，二者能够直观地反映苗木的生长状况[25]。已有研究表明，外生菌根菌和生物炭均能显著提高寄主植物的苗高和地径[26–29]。本研究发现，单独施用生物炭、卷边桩菇菌以及联合施用均对山新杨苗木的苗高和地径有显著提高作用，其中联合施用的效果最为显著。此外，联合施用处理显著提高了山新杨苗木地上和地下部分的鲜质量和干质量，叶片面积也显著大于单独施用处理。

纤维素是植物细胞壁的主要成分，其含量能够反映植物细胞壁的结构与功能特性。纤维素含量的提升，增强了植物叶片的结构稳定性，从而对植物的生长速度和细胞壁功能产生重要影响[30]。接种菌根真菌的板栗（*Castanea mollissima*）在田间的纤维素水平相较于田间非菌根板栗含量显著增加 43.3%[31]。另外，有研究表明，生物炭的施用能够使植物纤维素含量提高 8.1%[20]。与上述研究结果一致，本研究中单独施用生物炭处理的叶片纤维素含量增长高于单独施用卷边桩菇处理，而联合施用处理的纤维素含量增长最为显著。

4.1.2 生物炭与卷边桩菇联合施用对山新杨苗木生理指标的影响

光合作用对促进植物的生长、生物量和干物质积累有重要作用[32]。植物叶绿素 a、叶绿素 b 等叶绿素含量的高低直接影响叶片光合能力的大小[33]。类胡萝卜素不仅能够参加光的吸收传递，还能够防止叶绿素被氧化破坏[34]。研究发现，接种外生菌根菌后能够促进白皮松（*Pinus bungeana*）等古树的叶绿素含量提高，施用生物炭后能够弥补普通化肥对水稻（*Oryza sativa*）叶绿素含量的不利影响[17,35]。同时，联合施用生物炭和外生菌根菌后，叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量高于单独施用处理，表明两者存在明显的协同效应。

可溶性蛋白和可溶性糖含量与植物适应胁迫的渗透调节特征密切相关，通过积累的方式维持水分平衡以保证细胞内的代谢活动正常进行[36]。添加外生菌根菌后，能够提高马尾松（*Pinus massoniana*）的可溶性蛋白和可溶性糖含量，进而提高抗逆性[37]。添加生物炭后，新疆连作棉花（*Gossypium hirsutum*）的可溶性蛋白和可溶性糖含量，表现出更强的生理活性，更有利于植物对养分的吸收[38]。本研究发现，

山新杨的可溶性蛋白和可溶性糖含量在单独施用生物炭、卷边桩菇以及联合施用后均显著提高，且联合施用处理的提高幅度要高于单独施用处理。

4.1.3　卷边桩菇与生物炭联合施用对山新杨苗木根系结构的影响

山新杨是典型的菌根依赖树种，外生菌根菌的存在可以有效改善其根系生长的微环境[39−40]。根系生长和形态结构反应植物自身的养分摄取能力，具有调整和优化营养吸收以适应外界环境变化的功能[41−42]。干旱胁迫下，彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)能够增加青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)的根系生物量、总根长和根面积; 盐胁迫下，双色蜡蘑(*Laccaria bicolor*)能够显著增加黑松(*Pinus thunbergii*)主根长、根面积和根尖数，说明外生菌根能通过促进根系生长进而协调植物在胁迫下的响应[43]。另外，有研究显示，配施生物炭可以显著提高玉米(*Zea mays*)根系的生长质量，使得土壤有机质积累和根系发育达到最佳状态[44]。本研究的 3 种处理均对山新杨苗木根系的生长起到了促进作用，且联合施用生物炭和卷边桩菇对山新杨苗木根系生长的促进效果更为明显。

本研究利用打孔灌根接种卷边桩菇处理山新杨苗木，同时施用生物炭。结果表明，苗木的生长势和体内生理抗性指标的变化规律趋势一致，证明在造林初期，施用卷边桩菇与生物炭协同处理以达到更好的壮苗效果是可行的。然而，本研究仅通过室内试验进行了初步验证，在野外环境中各种限制因素远比室内控制试验复杂。尽管试验过程中各处理组苗木实现了有效的变量控制，使得试验结果具有一定的可信度，但仍需要在不同立地条件和环境胁迫中进一步验证其实用性。

4.2　结　论

本研究针对生物炭、卷边桩菇分别单独施用和联合施用对山新杨苗木生长指标的影响进行了系统研究。主要结论如下。

(1)生长指标显著改善。生物炭、卷边桩菇均能够显著提高山新杨苗木的苗高、地径、叶面积等生长指标，其中联合施用的效果最为显著，表现出明显的协同效应。

(2)生理指标协同提升。生物炭与卷边桩菇联合施用能显著提高叶片的叶绿素 a、类胡萝卜素含量，以及纤维素、可溶性糖和可溶性蛋白等生理指标，表明卷边桩菇和生物炭联合施用能够提高山新杨自身的光合作用能力，促进其生长，加快木质化进程。

(3)根系生长显著提升。生物炭与卷边桩菇联合施用能够显著促进山新杨根系生长。生物炭与卷边桩菇联合施用的山新杨苗木根系在根系长度、根表面积、根投影面积、根体积、根尖数分别显著提升。该结果表明，卷边桩菇和生物炭联合施用能够更好地促进山新杨根系生长发育，增大山新杨根系吸收面积，进而促进根系的养分吸收，促进苗木的生长。

参　考　文　献

[1] 张冰玉, 苏晓华, 郑书星. 山新杨叶片高频率植株再生体系建立及其遗传稳定性 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 68−73.
Zhang B Y, Su X H, Zheng S X. Establishment of a highly efficient plant regeneration system of *Populus davidiana* × *P. bolleana* and study of its genetic stability[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(3): 68−73.

[2] Yao Z, Baloch A M, Liu Z, et al. Cloning and characterization of an *Aux/iaa* gene in *Populus davidiana* x *P. alba* var. *pyramidalis* and the correlation between its time-course expression and the levels of indole-3-acetic in saplings inoculated with *Trichoderma*[J]. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50(1): 169−177.

[3] 蒋先翠. 山新杨硬枝扦插育苗技术 [J]. 防护林科技, 2019(9): 89−90.
Jiang X C. Seedling technique for hardwood cuttings of *Populus davidiana* × *P. bolleana*[J]. Protection Forest Science and Technology, 2019(9): 89−90.

[4] 屈艳萍, 康绍忠, 王素芬. 甘肃石羊河流域人工种植新疆杨耗水规律研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(2): 130−137.
Qu Y P, Kang S Z, Wang S F. Study on water consumption of irrigated *Populus alba* var. *pyramidalis* in Shiyang River Basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(2): 130−137.

[5] 赵则民, 迟锐, 杨世桢, 等. 白杨派杂交杨抗寒性研究 [J]. 防护林科技, 2015(9): 42−43.
Zhao Z M, Chi R, Yang S Z, et al. Cold resistance of hybrid poplar for Sect. *Populus*[J]. Protection Forest Science and Technology, 2015(9): 42−43.

[6] 遇文婧, 杨帅, 刁桂萍. 深绿木霉对山新杨生长及抗叶枯病能力的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 71−75.
Yu W J, Yang S, Diao G P. Effect of *Trichoderma atroviride* on growth and disease resistance of *Populus davidiana* × *P. alba* var. *pyramidalis*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(1): 71−75.

[7] Baum C, Stetter U, Makeschin F. Growth response of *Populus trichocarpa* to inoculation by the ectomycorrhizal fungus *Laccaria laccata* in a pot and a field experiment[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 163(1−3): 1−8.

[8] Desai S, Naik D, Cumming J R. The influence of phosphorus availability and *Laccaria bicolor* symbiosis on phosphate acquisition, antioxidant enzyme activity, and rhizospheric carbon flux in *Populus tremuloides*[J]. Mycorrhiza, 2014, 24(5): 369−382.

[9] 张天泽, 孟凡君, 尹大川. 干旱胁迫下外生菌根菌对山新杨幼苗生物量、渗透调节物质和抗氧化酶的影响 [J]. 菌物学报, 2023, 42(7): 1558−1574.
Zhang T Z, Meng F J, Yin D C. Effects of ectomycorrhizal fungi on biomass, osmoregulatory substances and antioxidant enzymes of *Populus davidiana* × *P. bolleana* seedlings under drought stress[J]. Mycosystema, 2023, 42(7): 1558−1574.

[10] 吴星慧. 生物炭对白桦和兴安落叶松种子萌发与幼苗生长的影响 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2021.
Wu X H. Effects of biochar on seed germination and seedling growth of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii* [D]. Shenyang: Shenyang University, 2021.

[11] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Residual effects of bio-char on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 61−68.

[12] Viger M, Hancock R D, Miglietta F, et al. More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar[J]. GCB Bioenergy, 2015, 7(4): 658−672.

[13] 高凤俊. 植物生理学试验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao F J. Guidance for plant physiology experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[14] 牛森. 物品质分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1992.
Niu S. Material quality analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992.

[15] 葛伟, 董醇波, 张芝元, 等. 外生菌根真菌与内生细菌共生互作的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2021, 48(10): 3810−3822.
Ge W, Dong C B, Zhang Z Y, et al. Symbiotic interaction between ectomycorrhizal fungi and endobacteria: a review[J]. Microbiology China, 2021, 48(10): 3810−3822.

[16] 别格坚巴哈提, 邓玉侠, 尹大川, 等. 樟子松苗木促生长高效外生菌根菌的筛选 [J]. 林业科技, 2017, 42(3): 31−33.
Biegejian Bahati, Deng Y X, Yin D C, et al. Screening of ectomycorrhizal fungi for promoting the growth of seedlings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. Forestry Science & Technology, 2017, 42(3): 31−33.

[17] 金陈斌. 外生菌根菌促进白皮松和桧柏古树生长的应用 [J]. 广西林业科学, 2018, 47(2): 233−236.
Jin C B. Application of ectomycorrhizal fungi to promote the growth of ancient pines and cypress trees[J]. Guangxi Forestry Science, 2018, 47(2): 233−236.

[18] 李玉, 李泰辉, 杨祝良, 等. 中国大型菌物资源图鉴 [M]. 郑州: 中原农民出版社, 2015.
Li Y, Li T H, Yang Z L, et al. Atlas of Chinese macrofungal resources[M]. Zhengzhou: Zhongyuan Farmers Publishing House, 2015.

[19] 杨玲玉, 石文广, 罗志斌. 外生菌根真菌卷边桩菇促进宿主灰杨氮吸收利用特征 [J]. 林业科学, 2024, 60(9): 69−79.
Yang L Y, Shi W G, Luo Z B. Characteristics of ectomycorrhizal fungi *Paxillus involutus* promoting nitrogen uptake and utilization of its host *Populus tremula* × *Populus alba*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(9): 69−79.

[20] Głuszek S, Paszt L S, Sumorok B, et al. Biochar-rhizosphere interactions: a review[J]. Polish Journal of Microbiology, 2017, 66(2): 151−161.

[21] Deng S, Wipf H M L, Pierroz G, et al. A plant growth-promoting microbial soil amendment dynamically alters the strawberry root bacterial microbiome[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 17677.

[22] 孙海波. 大豆根系及其与地上部分关系的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
Sun H B. Study on soybean root systems along with its relations with upperground characteristics[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006.

[23] 李国雷, 刘勇, 祝燕, 等. 国外苗木质量研究进展 [J]. 世界林业研究, 2011, 24(2): 27−35.
Li G L, Liu Y, Zhu Y, et al. A review of oversea studies of seedling quality[J]. World Forestry Research, 2011, 24(2): 27−35.

[24] Zarbakhsh S, Shahsavar A R. Exogenous γ-aminobutyric acid improves the photosynthesis efficiency, soluble sugar contents, and mineral nutrients in pomegranate plants exposed to drought, salinity, and drought-salinity stresses[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 543.

[25] 郑保砼, 于丝浓, 王改萍, 等. 配方施肥对文冠果苗木生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(2): 101−111.
Zheng B T, Yu S N, Wang G P, et al. The effect of NPK proportional fertilization on the growth of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(2): 101−111.

[26] 李娟, 张彦文. 外生菌根菌对东北红豆杉幼苗生长的影响 [J]. 林业科技, 2019, 44(4): 19−21.
Li J, Zhang Y W. Effects of exotic fungi on seedling growth of *Taxus cuspidate*[J]. Forestry Science & Technology, 2019, 44(4): 19−21.

[27] Zhang Y, Bi Y, Shen H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance sea buckthorn growth in coal mining subsidence areas in northwest China[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, 30(6): 848−855.

[28] 曹行行, 杨官凯, 祁瑞雪, 等. 有机营养液灌溉下发酵秸秆添加生物炭对番茄生长和品质影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 134−142.
Cao H H, Yang G K, Qi R X, et al. Effect of straw block with biochar addition on the growth and fruit quality of tomato under the irrigation of organic nutrient solution[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(2): 134−142.

[29] 谢寿艳. 生物炭添加对乌桕容器苗根系生长的影响 [J]. 中国林副特产, 2024(2): 31−33.
Xie S Y. Effect of biochar addition on root growth of *Triadica sebifera* container seedlings[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2024(2): 31−33.

[30] 杨帅, 高尚珠, 卢晗, 等. 植物细胞壁形成及在非生物胁迫中的作用 [J]. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1251−1264.
Yang S, Gao S Z, Lu H, et al. Plant cell wall development and its function in abiotic stress[J]. Plant Physiology Journal, 2023,

59(7): 1251−1264.

[31] 李晓, 张昊琳, 孙芝林, 等. 板栗外生菌根细胞结构及其细胞壁组分的变化 [J]. 北京农学院学报, 2020, 35(1): 25−30.
Li X, Zhang H L, Sun Z L, et al. Changes of ectomycorrhizal cell structure and cell wall components in Chinese chestnut (*Castanea mollissima*)[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2020, 35(1): 25−30.

[32] Aasamaa K, Heinsoo K, Holm B. Biomass production, water use and photosynthesis of *Salix* clones grown in a wastewater purification system[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(6): 897−905.

[33] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89−113.

[34] 张向娜, 熊立瑰, 温贝贝, 等. 茶树叶色变异研究进展 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(4): 643−653.
Zhang X N, Xiong L G, Wen B B, et al. Advances in leaf color variation of tea plant (*Camellia sinensis*)[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(4): 643−653.

[35] 李妍琦, 吴奇, 宫福征, 等. 鸟粪石基载镁生物炭对干湿交替灌溉水稻产量与品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 91−103.
Li Y Q, Wu Q, Gong F Z, et al. Effects of struvite-based magnesium modified biochar on rice yield and quality under alternate wetting and drying irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 91−103.

[36] 尹大川, 邓勋, 郑宇, 等. 盐碱胁迫对哈茨木霉 T28 的生长及营养代谢的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 109−116.
Yin D C, Deng X, Zheng Y, et al. Effects of salt-alkali stress on growth and nutritional metabolism of *Trichoderma harzianum* T28[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 109−116.

[37] 李快芬, 刘海燕, 丁贵杰. 接种褐环乳牛肝菌对马尾松苗抗铝性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(1): 49−57.
Li K F, Liu H Y, Ding G J. Effect of inoculation with *Suillus luteus* on aluminum resistance of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(1): 49−57.

[38] 董秀秀, 张智勇, 王绍明, 等. 生物炭添加对新疆连作棉花不同根序根系形态和生理特征的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(6): 1430−1436.
Dong X X, Zhang Z Y, Wang S M, et al. Morphological and physiological response of different root orders to biochar addition in continuous cropping cotton in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(6): 1430−1436.

[39] 朱智梅, 张玉红, 撒刚, 等. 外生菌根真菌 *Paxillus involutus* 吸收 Cd^{2+} 及 H_2O_2 对 Cd^{2+} 内流的调控作用 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 24−32.
Zhu Z M, Zhang Y H, Sa G, et al. Uptake of Cd^{2+} by ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus* and the modulation of H_2O_2 in Cd^{2+} influx[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(4): 24−32.

[40] 黄颖, 苗嘉琪, 遇文婧, 等. 加纳木霉 ACCC30153 对山新杨幼苗促生抗病功能分析 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 103−113.
Huang Y, Miao J Q, Yu W J, et al. Growth promotion and disease resistance function of *Trichoderma ghanaiana* ACCC30153 on *Populus davidiana* × *P. bolleana* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 103−113.

[41] 黄颖, 王晓东, 遇文婧. 山新杨谷胱甘肽 S-转移酶编码基因 PdbGSTU 功能分析 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8): 68−78.
Huang Y, Wang X D, Yu W J. Functional analysis of encoding gene PdbGSTU for glutathione S-transferase in *Populus davidiana* × *P. bolleana*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 68−78.

[42] 胡佳, 吕亚茹, 辜夕容, 等. 接种外生菌根真菌对铝胁迫下马尾松幼苗根形态性状的影响 [J]. 森林与环境学报, 2025, 45(2): 184−191.
Hu J, Lü Y R, Gu X R, et al. Effect of inoculation with ectomycorrhizal fungi on root morphological traits of *Pinus massoniana* seedlings under aluminium stress[J]. Journal of Forest and Environment, 2025, 45(2): 184−191.

[43] 周晓莹. 菌根真菌对盐胁迫下黑松幼苗生长及生理指标的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Zhou X Y. Effects mycorrhizal fungi on growth and physiological indexes of *Pinus thunbergii* seddlings under NaCl stress [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.

[44] 孙晨, 胡树平, 孙继颖, 等. 氮肥配施生物炭对土壤性状及春玉米根系特性的影响 [J]. 玉米科学, 2024, 32(3): 93−100.
Sun C, Hu S P, Sun J Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with bio-char on soil properties and root characteristics of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(3): 93−100.

（责任编辑　范　娟
责任编委　戴玉成）