

生物炭配施菌渣改良香露兜种植土壤及其增产效果分析

余江敏¹, 姚继涛^{2,3}, 孟凡雅^{2,4}, 李玉波^{2,5}, 董刚强⁶, 赵雅琦^{2*}, 王 灿^{2*}

1. 广西农业职业技术大学, 广西南宁 530001; 2. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/农业农村部香辛饮料作物遗传资源利用重点实验室/海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 海南万宁 571533; 3. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319; 4. 华中农业大学, 湖北武汉 430070; 5. 河北农业大学, 河北保定 071000; 6. 安利(中国)植物研发中心有限公司, 江苏无锡 214115

摘 要: 针对香露兜种植相对粗放, 土壤质量不高制约产量与品质提升的问题, 本研究采用不同生物炭比例配施菌渣来改良土壤, 并明确其增产效果及机制, 旨在为香露兜高效种植提供技术支持。在基础施肥下, 通过设置菌渣单独施用 800 kg/hm² (MD)、菌渣 800 kg/hm²+生物炭 1600 kg/hm² 施用 (MDB1)、菌渣 800 kg/hm²+生物炭 3200 kg/hm² 施用 (MDB2)、不添加菌渣和生物炭 (CK) 共 4 个处理, 采用田间小区试验研究不同处理对香露兜植株生长和产量、土壤理化性质及微生物群落结构的影响。结果表明: 较 CK 处理, 单施菌渣 (MD) 增产效果未达到显著水平, 而生物炭配施处理 (MDB1、MDB2) 均能显著提高香露兜鲜叶产量, 这与 MDB1、MDB2 处理的叶片 SPAD 值和净光合速率显著上升, 从而显著增加平均鲜叶质量有关, 但 MDB1 与 MDB2 处理间产量无显著差异。土壤养分分析结果显示, 与 CK 相比, MD、MDB1 和 MDB2 处理均显著提高了土壤 pH 和速效钾含量; 但 MD 处理显著降低了土壤的有机质、碱解氮、速效磷含量, 这可能与菌渣中大量有机质被分解微生物利用, 导致土壤养分被消耗有关, 而配施高用量生物炭 (MDB2) 则可缓解上述影响, 因而 MDB2 处理的有机质含量和碱解氮含量有所上升。基于土壤细菌 OTUs 的 PCA 分析发现, 不同处理之间的群落结构存在显著差异。与 CK 相比, MD 处理的土壤细菌 Shannon 多样性指数下降, Simpson 优势度指数升高, 而 MDB1 和 MDB2 处理则显著提高了土壤细菌多样性; 且与 MD 相比, MDB1 和 MDB2 处理显著增加了潘多拉菌属 (*Pedomicrobium*)、链霉菌属 (*Streptomyces*)、MND1、诺卡氏菌属 (*Nocardioideis*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 等有益促生菌属的相对丰度。RDA 分析表明, 土壤碱解氮是影响细菌群落结构的主要环境因子。综上所述, 单施菌渣虽有增产潜力, 但对土壤改良效果不佳; 配施生物炭可显著提高土壤 pH、速效钾含量, 提高土壤微生物多样性, 促进有益微生物富集, 进而提高叶片叶绿素含量, 增强叶片光合速率, 从而促进香露兜产量显著增加。因此, 生物炭与菌渣协同施用是一种高效、安全的土壤改良策略, 为香露兜高效栽培提供绿色可持续技术支撑。

关键词: 生物炭; 菌渣; 香露兜; 土壤改良; 微生物

中图分类号: S156; S158 文献标志码: A

Synergistic Application of Biochar and Mushroom Residue to Enhance *Pandanus amaryllifolius* Yield and Soil Quality

YU Jiangmin¹, YAO Jitao^{2,3}, MENG Fanya^{2,4}, LI Yubo^{2,5}, DONG Gangqiang⁶, ZHAO Yaqi^{2*}, WANG Can^{2*}

1. Guangxi Agricultural Vocational and Technical University, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Genetic Resources Utilization of Spice and Beverage Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hainan Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops, Wanning, Hainan 571533, China; 3. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 4. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 5. Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 6. Amway (China) Botanical R&D Center Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214115, China

收稿日期 2025-10-10; 接受日期 2025-10-29

基金项目 广西“双高计划”高水平专业群建设项目(桂教职成[2023]57号); 广西农业职业技术大学 2022 年校级课题 (No. YKJ2223); 五指山市生态科技特派员项目 (No. WZSKTPXM202208)。

作者简介 余江敏 (1983—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 植物营养与环境科学。*通信作者 (Corresponding author): 赵雅琦 (ZHAO Yaqi), E-mail: 13061042796@163.com; 王 灿 (WANG Can), E-mail: wangcan_1983@catas.cn。

Abstract: The study was aimed to solve the problems of relatively extensive cultivation and low soil quality of *Pandanus amaryllifolius* that restrict the improvement of yield and quality. Different ratios of biochar combined with mushroom residue were used to improve the soil, clarify its yield-increasing effect and mechanism, and to provide technical support for efficient cultivation of *Pandanus*. Under basic fertilization, four treatments were set up, 800 kg/hm² mushroom residue (MD), 800 kg/hm² mushroom residue + 1600 kg/hm² biochar (MDB1), 800 kg/hm² mushroom residue + 3200 kg/hm² biochar (MDB2), and no mushroom residue or biochar added (CK). A field plot experiment was conducted to study the effects of different treatments on plant growth and yield, soil physicochemical properties and microbial community structure of *Pandanus*. Compared with CK, the yield increase effect of mushroom residue alone (MD) did not reach a significant level, while the biochar combined application treatments (MDB1, MDB2) significantly increased the fresh leaf yield of *P. amaryllifolius*. This was related to the significant increase in leaf SPAD value and net photosynthetic rate of MDB1 and MDB2, which significantly increased the average fresh leaf weight, but there was no significant difference in yield between MDB1 and MDB2 treatments. Soil nutrient results showed that compared with CK, MD, MDB1 and MDB2 all significantly increased soil pH and available potassium content, but MD treatment significantly reduced soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus content, which may be related to the utilization of soil organic matter by a large number of organic matter-decomposing microorganisms in the mushroom residue leading to nutrient consumption, while the combined application of high-dose biochar (MDB2) alleviated this effect, thus increasing organic matter content and alkali-hydrolyzable nitrogen content. PCA analysis based on soil bacterial OTUs found that there were significant differences in community structure among different treatments. Compared with CK, MD soil bacterial Shannon diversity index decreased and Simpson dominance index increased, while MDB1 and MDB2 significantly improved soil bacterial diversity. Compared with MD, they significantly increased beneficial plant growth-promoting bacteria such as *Pedomicrobium*, *Streptomyces*, *MND1*, *Nocardioide*s and *Pseudomonas*. RDA analysis showed that soil alkali-hydrolyzable nitrogen was the main environmental factor affecting bacterial community structure. In summary, although mushroom residue application alone has yield-increasing potential, its effect on soil improvement is poor; combined application of biochar can significantly increase soil pH, available potassium content, improve soil microbial diversity, promote the enrichment of beneficial microorganisms, thereby increasing leaf chlorophyll content, enhancing leaf photosynthesis, and ultimately promoting a significant increase in *P. amaryllifolius* yield. Therefore, the synergistic application of biochar and mushroom residue is an efficient and safe soil improvement strategy, providing green and sustainable technical support for efficient cultivation of *Pandanus*.

Keywords: biochar; mushroom residue; *Pandanus amaryllifolius*; soil improvement; microorganisms

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.014

香露兜 (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.), 又名斑斓, 是露兜树科露兜树属的多年生草本香料植物, 原产印度尼西亚马鲁古群岛。其叶片特有的粽香气息, 使其享有“东方香草”的美誉^[1-2]。凭借天然馥郁的香气和绿色属性, 香露兜在食品、烘焙及日化等健康产业中的应用日益广泛, 成为重要的热带特色香料资源^[3]。香露兜适应性强, 栽培管理相对简便, 喜湿润, 耐高温和适度荫蔽, 可在最低温 $\geq 6^{\circ}\text{C}$ 的无霜冻地区生长。国内种植以海南为主, 广东、云南等地有少量引种^[4]。随着市场对天然风味与健康产品的需求攀升, 及香露兜良好的种植适应性和经济效益, 香露兜产业展现出可观的市场潜力和发展空间。因此, 对其高效栽培方面的要求日益提高, 其产业可持续发展也越来越重要。

近年来, 为提升土壤肥力、优化作物生长环境, 进而推动农业可持续发展, 合理施用土壤改

良剂至关重要。其中菌渣富含有机物和多种矿质元素, 常被利用或加工成肥料^[5]。且有许多研究表明, 施用菌渣后改善了土壤微环境, 提高了果实品质及产量^[6]。而生物炭作为一种多功能材料在农业土壤改良和农产品品质提升等方面也得到了广泛的研究与应用。大量研究表明, 生物炭通常呈碱性, 具有丰富的孔隙结构, 将生物炭施入土壤, 可有效增加土壤有机碳储量、优化土壤物理结构 (如降低容重、增强持水性)、改善化学性质 (如调节 pH、提高养分有效性), 从而创造更利于作物生长的根际环境, 最终提升作物产量与品质^[7-8]。在蔬菜^[9]、果树^[10]、茶叶^[11]等多种作物上的实践已证实, 生物炭可通过改良土壤理化与生物特性, 促进植株生长。生物炭对土壤微生物群落的调控可以在土壤改良过程中发挥关键作用^[12]。生物炭复杂的孔隙网络和表面特性不仅为微生物提供了栖息场所, 还可通过影响养分动态和可溶性

有机质的周转，改变土壤微生态^[13-16]。此外，它还可以增强植物的光合作用、促进生长，并提高叶绿素含量、作物生物量和产量^[17]。香露兜耐粗放管理，常被种植于山谷溪流两岸、低洼谷地，或橡胶林、淘汰槟榔林下。由于种植土壤多养分贫瘠，种植时多依赖化肥补充养分，长期施用化肥导致土壤酸化、板结，微生物多样性下降，进而制约其产量与香气品质的提升^[4]。因此，开展菌渣和生物炭改良香露兜种植土壤的效果分析，并评价其对香露兜生长、产量形成的影响，不仅有助于提升土壤地力，还有利于促进土壤改良与作物增产，为该作物的绿色高效栽培技术提供新方法和理论依据，同时为农业有机废弃物资源化利用提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为带土三叶的香露兜袋装组培苗，购自海南省万宁七彩香露兜农业开发有限公司。生物炭主要原料为花生壳碳化所得，菌渣（食用菌栽培后的菇渣，0.5 kg/包），均由广西农业职业技术大学农业工程学院提供。试验布置时配施的生物有机肥根力多（纯发酵，有机质含量≥65%，有效活菌数≥2.0 亿个/g，40 kg/包），追肥采用的金骆驼复合肥（硫酸钾型，N：P：K 为 10：4：24）和尿素，均购自广西南宁美田农业科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采取双因素试验设计，设置 4 个不同基质配比（表 1），3 个重复，共 12 个小区（10 m×3 m），香露兜种植密度为 30 cm×30 cm。2023 年 4 月 2 日整地，并按照不同处理撒施菌渣、生物炭，每个小区配施 10 kg 生物有机肥根力多；4 月 8 日种植，植后浇足定根水；4 月 13 日挂黄色防虫贴；5 月 16 日除草，每小区穴施 8 kg 金骆驼复合肥；5 月 30 日每小区追施 0.6 kg 尿素（N≥46%）。每次施肥后采用微喷系统灌溉 1 h 以提升肥效；7 月 9 日每个小区在表土均匀撒施 500 g 四聚乙醛防治蜗牛，其他日常农事管理均一致。

1.2.2 采样 7 月 10 日选取相同处理每个小区 5 株长势一致的植株（做好标记），收割植株倒 4 叶以下叶位的叶片，测定鲜叶质量并做好记录；10 月 3 日，在每个小区选取长势一致的 5 株植株，在每株的倒 6 或倒 7 叶（成熟叶），利用 Li-6400

表 1 不同处理及施用肥料

Tab. 1 Different treatments and applied fertilizers

处理 Treatment	施用肥料 Application of fertilizers	施用量 Application rate
对照（CK）	不配施任何基质	
单施菌渣（MD）	菌渣	800 kg/hm ²
菌渣+生物炭（MDB1）	菌渣+生物炭	菌渣 800 kg/hm ² + 生物炭 1600 kg/hm ²
菌渣+生物炭（MDB2）	菌渣+生物炭	菌渣 800 kg/hm ² + 生物炭 3200 kg/hm ²

光合仪测定光合速率，利用叶绿素仪测定 SPAD 值；10 月 5 日，随机选取相同处理 3 个小区 5 株长势一致的植株，摘取倒 6 或倒 7 叶（每个处理 15 株，共 15 片），统计总叶片数，测定叶片总鲜质量，计算单叶鲜质量；10 月 5 日对第 1 次（7 月 10 日）标记的植株进行第 2 次收割，将 2 次鲜质量相加后，计算单株鲜叶质量。10 月 5 日，在每个小区对角线上，选取 5 个点，每个点取 0~20 cm 土层土样 500 g，混匀后，采用四分法取 500 g 土壤，一部分用于测定土壤理化性质，带回实验室后，风干、备用；另一部分用于高通量测序，带回实验室过 2 mm 筛，保存于-80 ℃超低温冰箱中，备用。

1.2.3 指标测定 （1）土壤养分测定。采用《土壤农化分析》^[18]中的方法测定土壤与植物样品的养分指标：利用 pH 计测定土壤 pH；采用二铬酸钾氧化-外加加热法（容量法）测定土壤有机质（SOM）含量；采用碱性非扩散法测定土壤碱解氮（AN）含量；用碳酸氢钠从土壤中提取有效磷（AP），然后用钼锑抗性法进行定量；利用乙酸铵中从土壤中提取有效钾（AK），并通过火焰光度法进行定量。

（2）土壤微生物高通量测序。土壤样本送至上海美吉生物科技有限公司，对土壤样本的细菌 16S rRNA 基因 V3~V4 可变区进行高通量测序。具体流程如下：使用引物 338F（5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'）和 806R（5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'）进行 PCR 扩增。扩增产物纯化后，使用 Illumina MiSeq 平台进行双端测序。

多样性指数计算公式：

Chao 指数= $S_{obs} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)}$

Simpson 指数= $-\frac{\sum_{i=1}^{S_{obs}} n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$

$$\text{Shannon 指数} = -\sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

$$\text{覆盖率} = 1 - \frac{n_2}{N}$$

式中, S_{obs} 为实际观测到的 ASV 数; n_1 为只含有 1 条序列的 ASV 数目; n_2 为只含有 2 条序列的 ASV 数目; n_i 为第 i 个 ASV 所含的序列数; N 为所有的序列数。

1.3 数据处理

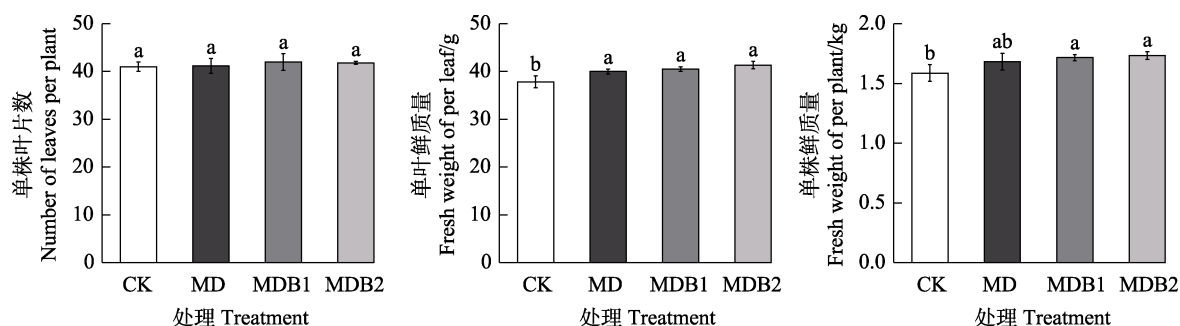
使用 SPSS 26.0 软件对试验数据进行单因素 ANOVA 方差分析, 采用 LSD 多重比较法检验不同处理之间的差异显著性。使用 Origin Pro 软件制图。利用相关性分析, 以确定各影响因子对香露兜产量和光合作用的影响程度。在 Canoco 5.0 软件中将土壤细菌群落优势菌门和属作为响应变量, 土壤理化性质作为环境因子进行冗余分析 (RDA), 并绘制分析图。

2 结果与分析

2.1 施用菌渣及配施生物炭对香露兜生理特性的影响

由图 1 可知, 菌渣与生物炭配施能显著提高香露兜产量。从叶片数来看, 单施菌渣和配施生物炭处理对叶片数量无显著影响; 而在鲜叶质量上, 与 CK 相比, MD、MDB1 和 MDB2 处理均显著增加了单叶鲜质量, 说明单施菌渣及与生物炭配施均有助于增加叶片生物量。从单株产量来看, 与 CK 相比, MD 处理无显著影响, 而配施生物炭的 MDB1 和 MDB2 处理的单株产量均显著增加, 且二者之间无显著差异。

施加菌渣和生物炭对香露兜叶片光合作用的影响如图 2 所示。与 CK 相比, 单施菌渣的叶绿素含量未显著提高, 但叶片净光合速率显著提高。当菌渣配施生物炭后, 较 MD, 叶绿素含量和净光合速率进一步提高, 且二者之间无显著差异。

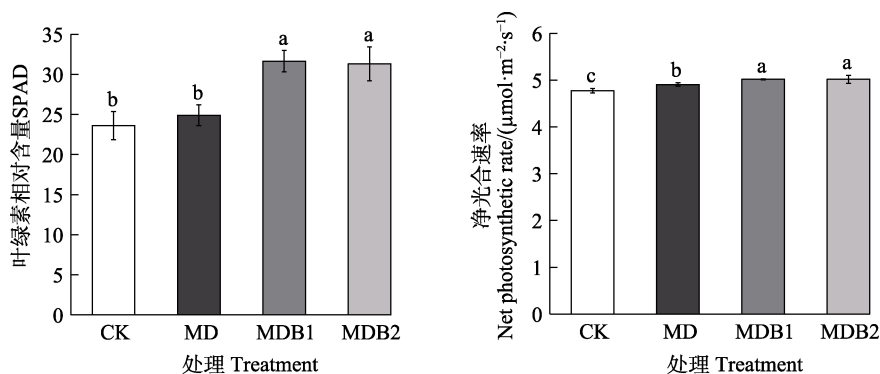


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同施肥处理下香露兜的农艺性状

Fig. 1 Agronomic traits of *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同施肥处理下香露兜的光合作用

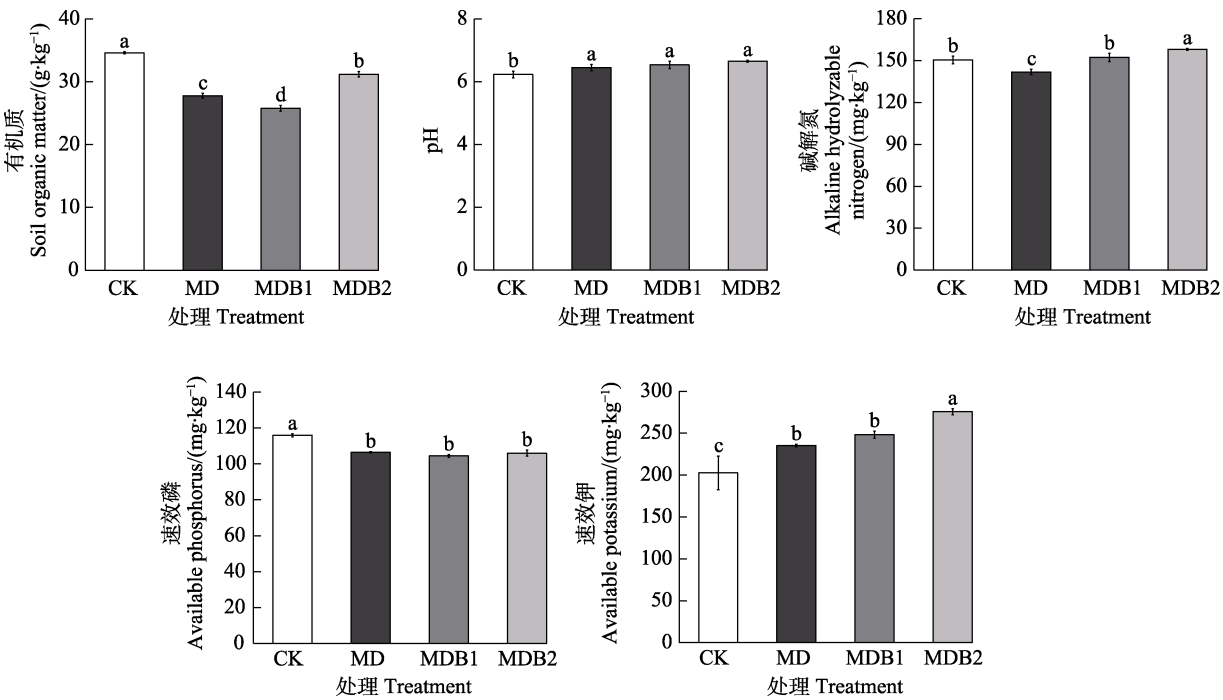
Fig. 2 Photosynthesis of *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

2.2 生物炭配施对香露兜土壤养分含量的影响

结果表明, 不同处理显著影响土壤养分含量

(图 3)。与 CK 相比, MD、MDB1 和 MDB2 处理的土壤 pH 和速效钾含量均显著提高, 而单施

菌渣的土壤有机质、碱解氮、速效磷含量显著降低。生物炭配施后对这种影响有所缓解，特别是生物炭高用量的 MDB2，其土壤有机质含量和碱解氮含量均显著上升。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 3 不同施肥处理下香露兜的土壤养分含量

Fig. 3 Soil nutrient contents of *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

2.3 生物炭配施对香露兜土壤细菌特性的影响

2.3.1 土壤细菌 α 多样性 土壤细菌 α 多样性的差异情况如表 2 所示，覆盖率显示所有处理的测序覆盖度均较高，数据可靠性良好；Chao 指数显示，与其他处理相比，单独施用菌渣的物种丰富度降低，而 Simpson 指数显著增加；Shannon 指数表明，与 CK 相比，MD 处理的土壤细菌多样性显著降低，而 MDB1 和 MDB2 的 Shannon 指数则显著提高。

2.3.2 土壤细菌群落的 β 多样性 通过 PCA 分析进一步揭示了不同施肥处理对土壤细菌群落结构

的影响。结果表明，不同处理的细菌群落结构存在显著差异，且 R 为 0.9333 ($P=0.001$)。其中，MD 处理在 PC1 轴上与 CK、MDB2、MDB2 处理距离较远，表明单施菌渣显著改变了土壤细菌群落结构；而 MDB1 和 CK 距离很近，表明减少生物炭用量的土壤群落结构与 CK 相似，而提高生物炭用量后，MDB2 处理的群落结构进一步发生变化，因而与 MDB1 和 CK 在 PC2 轴上分离 (图 4)，说明随着生物炭配施量增加，对土壤细菌群落结构产生较大影响。

表 2 不同施肥处理下香露兜土壤细菌群落的 α 多样性
Tab. 2 α -diversity of soil bacterial communities in *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

处理 Treatment	Chao 指数 Chao index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	覆盖率 Coverage
CK	3788.26±438.22 ^a	7.25±0.06 ^c	0.0015±0.0002 ^c	0.9908±0.0048 ^b
MD	2434.40±87.40 ^b	7.00±0.07 ^d	0.0029±0.0002 ^a	0.9984±0.0008 ^a
MDB1	4111.37±353.43 ^a	7.51±0.04 ^a	0.0014±0.0002 ^c	0.9920±0.0055 ^b
MDB2	3929.65±104.91 ^a	7.38±0.05 ^b	0.0019±0.0003 ^b	0.9899±0.0014 ^b

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

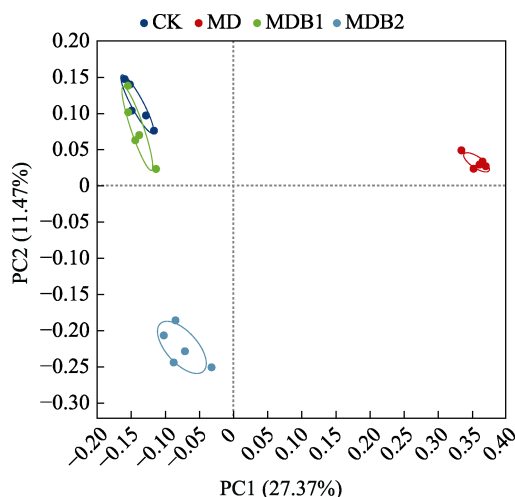


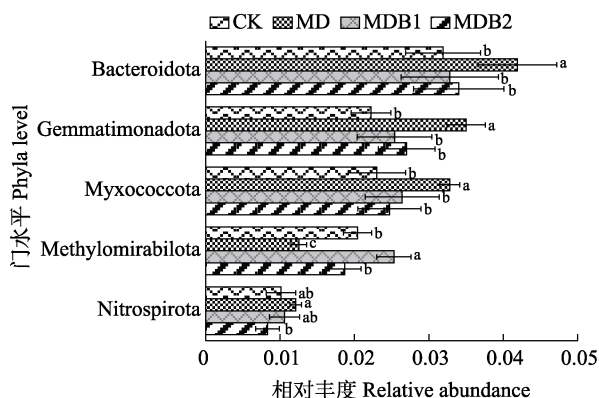
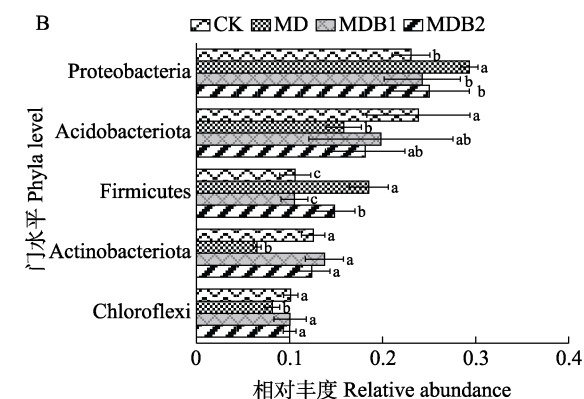
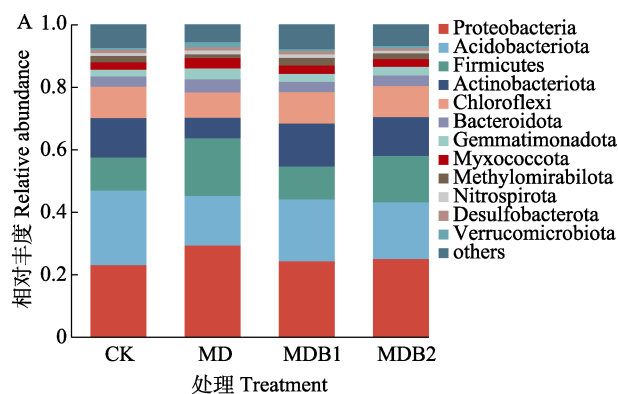
图 4 不同施肥处理下香露兜土壤细菌群落的 β 多样性
Fig. 4 β -diversity of soil bacterial communities in *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

2.3.3 土壤细菌门水平 在门分类水平上, 本研究将相对丰度>1%的门划为优势菌门, 其余的归为其他 (others)。由图 5A 可以看出, CK 和其他处理的土壤细菌优势菌门基本一致, 分别为变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota)、黏细菌门 (Myxococcota) 等。其中变形菌门、酸杆菌门、厚壁菌门、放线菌门、绿弯菌门是绝对优势菌门 (10%)。不同处理间的差异分析表明, 单施菌渣处理 (MD) 的变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门、黏细菌门细菌丰度均显著高于其他处理; 酸杆菌门在 MD 处理中的相对丰度显著降低; 放线菌门在 MD 的相对丰度显著低于其他处理 (图 5B)。

2.3.4 土壤细菌属水平 不同处理对香露兜土壤细菌属水平群落组成的影响如图 6 所示。其中, 与 CK 相比, 在单施菌渣处理中的芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)、类芽孢杆菌属 (*Paenibacillus*) 和罗河杆菌 (*Rhodanobacter*) 相对丰度显著增加, 且除类芽孢杆菌属外, 也显著高于添加生物炭处理 (MDB1 和 MDB2); 假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 在添加生物炭处理 (MDB1 和 MDB2) 后丰度显著增加。

2.4 生物炭配施对香露兜土壤细菌群落结构与环境因子的关系

对土壤理化性质和土壤优势细菌属进行 RDA

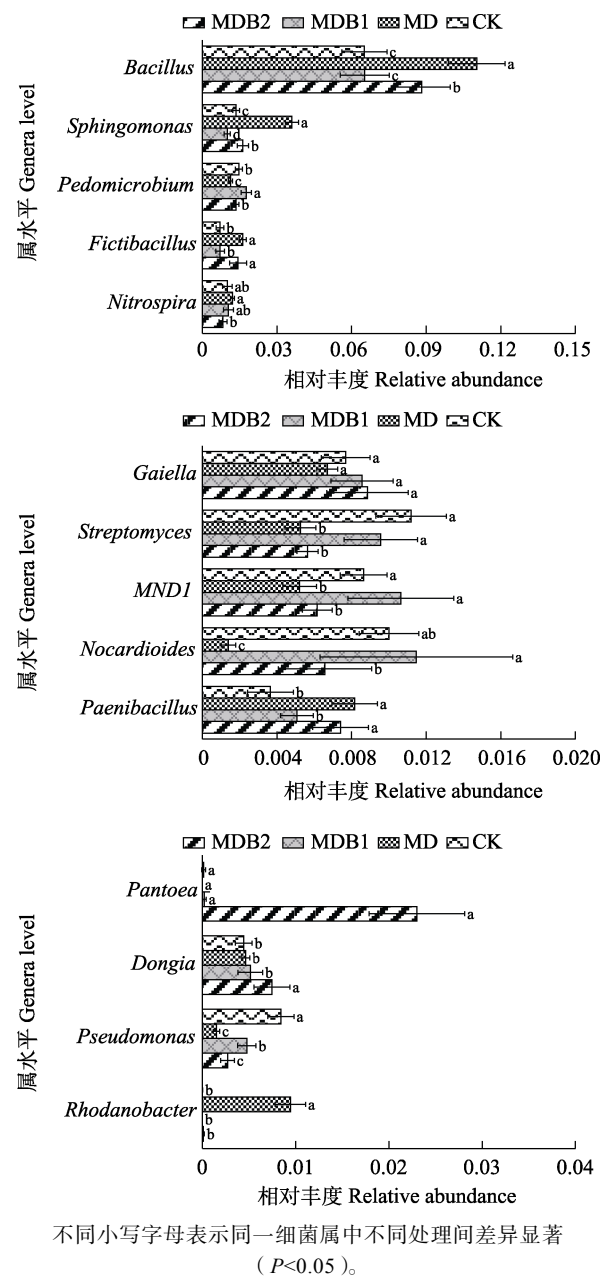


不同小写字母表示同一细菌门不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments within the same bacterial phylum ($P < 0.05$).

图 5 不同施肥处理下香露兜的土壤细菌
门水平群落组成

Fig. 5 Horizontal community composition of soil bacteria phyla level in *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

分析, 获得二维排序图 (图 7)。结果表明, 碱解氮 (AN) 是驱动属水平群落构建的最核心环境因子, 其解释率高达 29.50%, 达到极显著水平 ($P=0.002$)。碱解氮与芽孢杆菌属、鞘氨醇单胞菌属、类芽孢杆菌属呈正相关。有效钾 (AK) 解释率为 10.40%, 达显著水平 ($P=0.042$), 与假单胞菌属呈正相关 (表 3)。



Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments within the same bacterial genus ($P<0.05$).

图 6 不同施肥处理下香露兜土壤细菌属水平群落组成

Fig. 6 Horizontal community composition of soil bacteria genera level in *P. amaryllifolius* under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 菌渣单独施用存在潜在负面效应

菌渣作为一种有机废弃物资源化利用的产物，富含有机质和养分，被广泛应用于有机肥^[19-20]、土壤调理剂^[21-22]和环境生态修复剂^[23]等。但在本研究中，菌渣未经堆肥而单独施用，虽较 CK 提升了植株叶片净光合速率和平均鲜叶质量，而增产效果未达到显著水平，表明单独施用菌渣仍存在

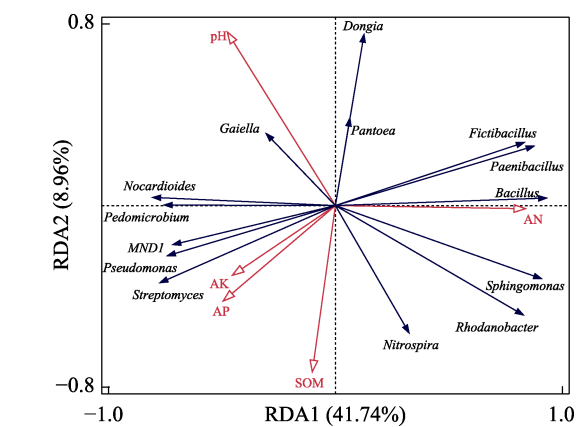


图 7 Redundancy analysis (RDA) of soil physicochemical properties, plant physiological indicators and orizontal community structure of soil microbial genera

表 3 土壤理化性质与土壤细菌属水平群落结构的冗余分析 (RDA) 结果

Tab. 3 Redundancy analysis (RDA) results of soil physicochemical properties, plant physiological indicators and soil microbial genus horizontal community structure

环境因子 Environmental factors	解释率 Interpretation rate/%	R^2	P
AN	29.50	7.5	0.002**
AK	10.40	2.9	0.042*
SOM	8.90	2.8	0.062
pH	1.90	0.6	0.490
AP	1.30	0.4	0.514

注：*表示差异显著 ($P<0.05$)；**表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

潜在负面效应。首先，菌棒在栽培前后质量损失可达 50%以上，说明菌渣中的大量有机质和养分已被消耗^[24]；而且食用菌对菌棒中的养分偏好性吸收会导致菌渣养分失衡，引起菌渣碳氮比 (C/N)、碳钾比 (C/K) 显著下降^[25]；同时菌渣中残留有机质分解类微生物，使菌渣中的微生物群落结构相对单一、多样性下降^[26]。本研究中，单施菌渣处理中，土壤 Shannon 多样性指数显著低于 CK，而 Simpson 指数显著增加，这可能是由菌渣中高度单一化的菌群结构引起的；而且本研究结果也表明，MD 处理的土壤变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门和芽单胞菌门、黏细菌门和 Methyloirabilota 菌门均显著高于其他处理，而在其他研究中显示这些微生物均具有较强的有机质分解能力^[9]，施用菌渣后，这些微生物迅速分解土壤有机质，且随着菌群进一步繁殖，消耗更

多的氮、磷等养分,这可能就是 MD 处理的土壤有机质、碱解氮、速效磷等养分显著下降的主要原因。因此,单施未经堆肥的菌渣可能对作物生长和土壤改良存在负面效应,一般需经过堆肥改造后才能更好发挥其作用^[27]。

3.2 生物炭配施消除菌渣负面效果的原因

生物炭因其稳定的碳含量高特性被农业界描述为“黑金”^[28],这不仅是因为其有助于提高土壤肥力、促进土壤碳固定,而且生物炭较大的比表面积和孔隙度还有助于水和养分的保留,吸引有益微生物定殖,从而更好地改善土壤质量,促进作物生长。本研究中,菌渣配施 1600、3200 kg/hm²生物炭后(即分别为 MDB1 和 MDB2 处理),显著提高了土壤碱解氮含量,且在 MDB2 处理下,土壤有机质含量和速效钾含量也得到显著提升,表明生物炭富含碳、氮、钾等养分,配施后有效补充了单施菌渣而导致的相关养分亏缺,这与王庆阳等^[29]研究发现施用生物炭改善了土壤有机质和速效钾等养分状况的结果一致。同时,相对于 MD 处理, MDB1、MDB2 处理的土壤细菌 Shannon 指数显著提高,而 Simpson 指数显著降低,说明配施生物炭有效消除了菌渣对土壤微生物的负面效应,促进了土壤微生物多样性提升。研究发现,生物炭具有的较大孔隙(10~30 μm),可以为细菌(约 0.3~3.0 μm)等微生物提供良好的栖息场所^[30],因而添加生物炭可以为土壤中的土著微生物提供良好庇护所,保护因外界单一结构微生物入侵而导致的生态位竞争,从而维持原有土壤微生物群落结构及其多样性,这在本研究主成分分析 MDB1 处理与 CK 具有相似群落结构中也得到了印证;且随着生物炭施用量增加,这种保护效果进一步加强,使土壤群落结构进一步变化。具体而言,门、属水平中,与 CK 相比, MDB2 处理显著提升了厚壁菌门、芽孢杆菌属、类芽孢杆菌、泛菌属(*Pantoea*)和 *Dongia* 等细菌丰度。其中芽孢杆菌属是厚壁菌门的一个属,通常可以提高作物抗病能力和促进作物生长^[31],在本研究中该类细菌主要来自前期与菌渣配施的生物有机肥(菌种为枯草芽孢杆菌 N24)^[32];类芽孢杆菌和泛菌属也具有一定抑制病原菌、溶磷和分泌生长素的作用^[33-34]。因此,生物炭配施通过补充矿物养分供应,为微生物生存提供生存场所,促进有益微生物菌群定殖等途径,有效消除了菌渣单施带来的负面效应,二者共同施用效果显著。

3.3 生物炭与菌渣配施促进香露兜产量提升的作用机制

随着市场对香露兜需求的增长,提升作物产量及品质对于香露兜产业发展至关重要。本研究中,菌渣单施处理的产量虽有所上升,但效果并不显著,而与生物炭配施后的产量均显著增加,且这一过程还伴随着香露兜叶片叶绿素和光合速率的显著上升。由上述讨论已知,配施菌渣后可以有效改善香露兜种植土壤养分状况和微生物群落结构,提高微生物多样性。而且已有研究发现,施用生物炭后引起土壤小孔隙(孔径<50 μm)的比例降低,而大孔隙(孔径>300 μm)比例增加^[35],从而增强土壤对作物的供水能力^[36],促进作物根系生长^[37]。此外,生物炭通过较大比表面积吸附易淋洗的速效养分^[38],为作物根系创造养分丰富且稳定的土壤微环境,有助于植物对养分的吸收,这可能是生物炭与菌渣配施促进香露兜产量提升的作用机制之一。

4 结论

生物炭配施可以消除菌渣单独施用带来的负面效应。首先,生物炭自身丰富矿物养分提高了土壤养分含量;其次,生物炭的较大孔隙还为土壤微生物生存提供了微生境,促进了有益微生物定殖,进而维持了土壤微生物群落结构及其多样性。在上述基础上,菌渣与生物炭协同施用可以促进香露兜光合作用、提高产量,可作为香露兜种植土壤改良的一种高效安全措施。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志·第八卷[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China·Volume 8[M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [2] 罗明将, 吉训志, 秦晓威, 鱼欢, 宗迎, 郝朝运, 贺书珍. 香露兜繁育技术及影响香气成分研究进展[J]. 中国热带农业, 2020(6): 46-51.
LUO M J, JI X Z, QIN X W, YU H, ZONG Y, HAO C Y, HE S Z. Research progress in breeding technology and influence of aroma components of *Pandanus amaryllifolius* Roxb.[J]. China Tropical Agriculture, 2020(6): 46-51. (in Chinese)
- [3] 宗迎, 吉训志, 秦晓威, 鱼欢, 郝朝运, 贺书珍, 初众, 胡荣锁. 斑兰叶在海南种植的发展前景[J]. 中国热带农业,

- 2019(6): 15-19, 7.
ZONG Y, JI X Z, QIN X W, YU H, HAO C Y, HE S Z, CHU Z, HU R S. The development prospect of *Pandanus amaryllifolius* cultivation in Hainan[J]. China Tropical Agriculture, 2019(6): 15-19, 7. (in Chinese)
- [4] 余江敏, 杨苛, 黄建道, 陈莉斌, 梁凯. 种植密度和基质对广西引种香露兜挥发性成分的影响[J]. 现代农业科技, 2024(22): 69-72, 78.
YU J M, YANG K, HUANG J D, CHEN L B, LIANG K. Effects of planting density and substrate on volatile components of *Pandanus amaryllifolius* introduced in Guangxi[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(22): 69-72, 78. (in Chinese)
- [5] 李学梅. 食用菌菌渣的开发利用[J]. 河南农业科学, 2003(5): 40-42.
LI X M. Development and utilization of edible fungus residue[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2003(5): 40-42. (in Chinese)
- [6] 高志, 王妍雨, 段兆飞. 菇渣替代草炭对基质微环境及草莓番茄产量品质的影响[J]. 中国农技推广, 2024, 40(11): 73-77.
GAO Z, WANG Y Y, DUAN Z F. Effects of mushroom residue replacing peat on substrate microenvironment and yield and quality of strawberry-tomatoes[J]. China Agricultural Technology Extension, 2024, 40(11): 73-77. (in Chinese)
- [7] CHEN D, LIU X Y, BIAN R, CHENG K, ZHANG X H, ZHENG J F, JOSEPH S, CROWLEY D, PAN G X, LI L Q. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – a meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 222: 76-85.
- [8] ZHAO Y K, ZHANG A, ZHU X Y, HAN J L, LI P F, SHEN X G, HUANG S W, JIN X L, CHEN S, CHEN J Y, LIU J J, LIU H L, HUSSAIN Q, CHEN D. Comparative biotic and abiotic effects on greenhouse gas emissions from agricultural ecosystems: application of straw or biochar?[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(52): 112307-112320.
- [9] 李根生, 李泽楠, 王梅仙, 鲁海琴. 生物炭对设施大棚土壤改良和小白菜产量品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(5): 1139-1142.
LI G S, LI Z N, WANG M X, LU H Q. Effects of biochar on soil improvement and yield and quality of Chinese cabbage in greenhouses[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(5): 1139-1142. (in Chinese)
- [10] 杨世伟, 王建平, 刘帅, 苗育铭, 张宇辰. 土壤改良剂对黄土高原旱作苹果园土壤理化性质及经济效益的影响[J]. 节水灌溉, 2023(1): 40-46.
YANG S W, WANG J P, LIU S, MIAO Y M, ZHANG Y C. Effects of soil amendments on soil physical and chemical properties of dryland apple orchards and economic efficiency in the Loess Plateau[J]. Water Saving Irrigation, 2023(1): 40-46. (in Chinese)
- [11] 张素娥, 邹文华, 雷春松, 罗小平, 赖丽芬, 雷晶, 邬建红, 姜培坤. 生物质炭基肥对茶园土壤肥力和茶叶产量与品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 486-494.
ZHANG S E, ZOU W H, LEI C S, LUO X P, LAI L F, LEI J, WU J H, JIANG P K. Impact of biochar-based fertilizers on soil fertility in tea plantations and their effects on tea yield and quality[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2025, 42(3): 486-494. (in Chinese)
- [12] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 薛建辉. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 689-701.
WANG H K, WU Y B, LIU J P, XUE J H. A review of research advances in the effects of biochar on soil nitrogen cycling and its functional microorganisms[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(6): 689-701. (in Chinese)
- [13] 宋祥云, 宋春燕, 柳新伟, 李妍, 孔祥平, 李旭霖, 崔德杰. 小麦玉米轮作条件下不同生物质炭对土壤腐殖物质的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 610-618.
SONG X Y, SONG C Y, LIU X W, LI Y, KONG X P, LI X L, CUI D J. Effects of application of biochar on soil humic substances in cropland under wheat-corn rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 610-618. (in Chinese)
- [14] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 任树鹏, 陈静, 王琳玲. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 886-897.
ZHAO Z Z, WANG X L, LI H B, REN S P, CHEN J, WANG L L. Slow-release property and soil remediation mechanism of biochar-based fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 886-897. (in Chinese)
- [15] 吴立东, 刘亚婷, 林淑婷, 廖承树, 钟金仙. 生物炭与化肥配施对辣椒产量、品质及肥料利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(8): 144-151.
WU L D, LIU Y T, LIN S T, LIAO C S, ZHONG J X. Effects of combined application of biochar and chemical fertilizer on yield, quality and fertilizer utilization of pepper[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(8): 144-151. (in Chinese)
- [16] MUHAMMAD A, RAN T S, AROCKIAM S G P J, HAN R X, LI H, ABDELRAHMAN H, SHAHEEN S M, ZHU Y G, LI G. Biochar-derived dissolved organic matter (BDOM) and its influence on soil microbial community composition, function, and activity: a review[J]. Critical Reviews in Envi-

- ronmental Science and Technology, 2023, 53(21): 1912-1934.
- [17] RIZWAN M, AII S, ABBAS T, ADREES M, ZIA-UR-REHMAN M, IBRAHIM M, ABBAS F, QAYYUM M F, NAWAZ R. Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) under Cd stress with different water conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 206: 676-683.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [19] 吴珍珍, 舒增年, 黄健. 以菇渣和猪粪为调理剂的城市污泥堆肥效果研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(12): 2171-2176.
- WU Z Z, SHU Z N, HUANG J. Effect of mushroom residue and pig manure as conditioner on aerobic composting of sewage sludge[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(12): 2171-2176. (in Chinese)
- [20] 魏云辉, 刘益仁, 李菁, 刘毅, 胡中娥, 熊小文, 彭波. 食用菌菌渣有机肥中试与肥效试验[J]. 江西农业学报, 2014, 26(9): 44-46.
- WEI Y H, LIU Y R, LI J, LIU Y, HU Z E, XIONG X W, PENG B. Pilot test and fertilizer efficiency test for organic fertilizer made of edible fungi residue[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2014, 26(9): 44-46. (in Chinese)
- [21] 王莹, 马宏伟. 食用菌废渣改良土壤理化性质的研究[J]. 吉林农业, 2013(1): 59-60.
- WANG Y, MA H W. Research on the improvement of soil physical and chemical properties by edible fungus waste residue[J]. Agriculture of Jilin, 2013(1): 59-60. (in Chinese)
- [22] 栗方亮, 王煌平, 张青, 王秋营, 罗涛. 稻田施用菌渣土壤团聚体的组成及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3): 340-345.
- LI F L, WANG H P, ZHANG Q, WANG Q Y, LUO T. Effect of application of mushroom residue on composition of soil aggregates in paddy field and its evaluation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(3): 340-345. (in Chinese)
- [23] 黄东风, 王利民, 李卫华, 邱孝煊, 罗涛. 菌渣废弃物循环利用技术模式及研究展望[J]. 科技创新导报, 2015, 12(26): 134-135, 138.
- HUANG D F, WANG L M, LI W H, QIU X X, LUO T. Technology models and research prospects on the cyclic utilization of fungus-residue castoff[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(26): 134-135, 138. (in Chinese)
- [24] 王海霞, 张学青, 沈甜, 冯学梅, 李阿波, 杜慧莹. 食用菌菌渣资源化循环利用的研究进展[J]. 江西农业学报, 2024, 36(7): 26-32.
- WANG H X, ZHANG X Q, SHEN T, FENG X M, LI A B, DU H Y. Research progress in edible fungus residue resource recycling[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2024, 36(7): 26-32. (in Chinese)
- [25] 赵群喜, 王海霞, 王磊元, 宋颜志, 李许, 杨池, 李凤娟. 菌渣与化肥配施对水稻田土壤养分及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 191-197.
- ZHAO Q X, WANG H X, WANG L Y, SONG Y Z, LI X, YANG C, LI F J. Effects of combined application of bacterial residue and chemical fertilizer on soil nutrients and enzyme activities in paddy field[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 191-197. (in Chinese)
- [26] 孟祥海, 王佰成, 张星哲, 王延锋, 李玉梅, 任萍, 王伟, 李洪亮, 刘畅. 不同处理方式食用菌菌渣微生物多样性鉴定及其环境因子关联分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 200-209.
- MENG X H, WANG B C, ZHANG X Z, WANG Y F, LI Y M, REN P, WANG W, LI H L, LIU C. Identification of microbial diversity and correlation analysis of environmental factors of edible fungi residue with different treatment methods[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(4): 200-209. (in Chinese)
- [27] 于海洋, 王延锋, 史磊, 王金贺, 盛春鸽, 刘姿彤, 张鹏, 万里, 赵静, 王菲. 食用菌菌渣综合利用研究综述[J]. 食用菌, 2024, 46(4): 6-9.
- YU H Y, WANG Y F, SHI L, WANG J H, SHENG C G, LIU Z T, ZHANG P, WAN L, ZHAO J, WANG F. Review on comprehensive utilization of edible fungus residue[J]. Edible Fungi, 2024, 46(4): 6-9. (in Chinese)
- [28] JOSHUA O I, CHINEMEREM R O, VICTOR E O, MUTIAT O, WASIM A S, JAYANTA K B, CHANDRA S S, GANESH B M M, SAM A C, SELVASEMBIAN R. Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: from production to action of the black gold[J]. iScience, 2025, 28(1): 111524-111524.
- [29] 王庆阳, 曹殿云, 王迪, 詹增意, 贺婉莹, 孙强, 陈温福, 兰宇. 长期施用生物炭对棕壤养分及腐殖质组分的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(13): 2612-2622.
- WANG Q Y, CAO D Y, WANG D, ZHAN Z Y, HE W Y, SUN Q, CHEN W F, LAN Y. Effects of long-term application of biochar on nutrients, fractions of humic in brown soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(13): 2612-2622. (in Chinese)
- [30] ZHUANG W L, ZHAO C C, ZHANG Y J, YANG Z L, LI G Y, LEI S, ZHANG S X. Synergistic application of biochar with organic fertilizer positively impacts the soil micro-food

- web in sandy loam soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2024, 123: 103680.
- [31] XUE J, YANG B, MUHAMMAD R U K, KANG X J, PAN K, WU F Z, THOMAS P, ZHOU X G, ZHONG W. Biochar stimulates tomato roots to recruit a bacterial assemblage contributing to disease resistance against *Fusarium* wilt[J]. *iMeta*, 2022, 1(3): e37.
- [32] 根力多生物科技股份有限公司. 枯草芽孢杆菌 N24 及其应用: 202110394139.9[P]. 2022-05-27. Genlido Biotechnology Co., Ltd. *Bacillus subtilis* N24 and its applications: 202110394139.9[P]. 2022-05-27. (in Chinese)
- [33] 黄静, 盛下放, 何琳燕. 具溶磷能力的植物内生促生细菌的分离筛选及其生物多样性[J]. *微生物学报*, 2010, 50(6): 710-716. HUANG J, SHENG X F, HE L Y. Biodiversity of phosphate-dissolving and plant growth-promoting endophytic bacteria of two crops[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2010, 50(6): 710-716. (in Chinese)
- [34] 肖通奋. 类芽孢杆菌属基因组学研究[D]. 福州: 福州大学, 2017. XIAO T F. Researches on genomics and comparative genomics of the genus *Paenibacillus*[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)
- [35] JIA A Y, SONG X J, LI S P, LIU Z P, LIU X T, HAN Z X, GAO H Z, GAO Q Q, ZHA Y, LIU Y, WU X P, WANG G. Biochar enhances soil hydrological function by improving the pore structure of saline soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 306: 109170.
- [36] LUO P Y, ZHANG W K, XIAO D, HU J J, LI N, YANG J F. Biochar-based fertilizers: advancements, applications, and future directions in sustainable agriculture: a review[J]. *Agronomy*, 2025, 15(5): 1104.
- [37] XIANG Y Z, DENG Q, DUAN H L, GUO Y. Effects of biochar application on root traits: a meta - analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(10): 1563-1572.
- [38] PALANSOORIYA K N, DISSANAYAKE P D, EL-NAGGAR A, GAYESHA E, WIJESEKARA H, KRISHNAMOORTHY N, CAI Y J, CHANG S X. Biochar-based controlled-release fertilizers for enhancing plant growth and environmental sustainability: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2025, 61(4): 701-715.