

不同基肥及施用量对设施大棚土壤养分和微生物的影响

夏 枫^{1,2}, 刘一宁¹, 路 旭¹, 傅慧珍¹, 陈贻诵³, 王小娟³, 汪志伟¹, 邓 勤^{1*}, 成善汉^{1*}

1. 海南省热带园艺作物品质调控重点实验室/海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 四川省农业科学院园艺研究所, 四川成都 610066; 3. 海南省农业科学院蔬菜研究所, 海南海口 571100

摘 要: 有机肥能有效提高设施栽培土壤肥力、微生物多样性及其代谢活性, 能有效缓解设施大棚生产存在的水热失衡、土壤次生盐渍化、酸碱失调、微生物多样性降低、养分供应不足等问题, 然而, 目前有机肥研究对象多为露地和大田作物, 且多使用动物粪便有机肥。本研究选用海南椰糠有机肥和生物酵素·活性菌肥为底肥, 利用高通量测序技术, 研究不同底肥及其用量对设施大棚土壤养分和微生物变化的影响, 以筛选土壤改良的有效施肥方法。结果表明: (1) 14 286 kg/hm²椰糠有机肥施用量在提升土壤 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾方面效果显著; 生物酵素·活性菌肥在土壤全氮、有效磷和速效钾等指标上具有改善作用, 但整体效果弱于椰糠有机肥; CK 的各项指标普遍低于种植前水平。(2) 种植后的土壤细菌 OTUs 数量普遍下降, 但有机肥处理, 尤其是生物酵素处理可部分恢复或提升微生物多样性, 椰糠有机肥更利于根瘤菌目 (Rhizobiales)、拟青霉属 WSH L07 (*Paecilomyces* sp. WSH L07) 等有益菌群增殖; 生物酵素·活性菌肥对鞘氨醇单胞菌目 (Sphingomonadales)、红螺菌目 (Rhodospirillales) 及土曲霉 (*Aspergillus terreus*) 的丰度提升效果更好。总体而言, 不同基肥及施用量对土壤微生物的基本种类影响不大, 但对丰度的影响较明显, 椰糠有机肥及施用量为 14 286 kg/hm²时, 对设施大棚土壤肥力的改良效果较好。

关键词: 16S rRNA; 土壤微生物; 基肥; 椰糠有机肥; 设施大棚

中图分类号: S626 文献标志码: A

Effects of Different Base Fertilizers and Application Rates on Soil Nutrients and Microorganisms in Facility Greenhouses

XIA Feng^{1,2}, LIU Yining¹, LU Xu¹, FU Huizhen¹, CHEN Yisong³, WANG Xiaojuan³, WANG Zhiwei¹, DENG Qin^{1*}, CHENG Shanhan^{1*}

1. Key Laboratory for Quality Regulation of Tropical Horticultural Crops of Hainan Province / School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Horticulture Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; 3. Vegetable Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: Organic fertilizer can effectively improve soil fertility and microbial diversity, as well as metabolic activity, in facility cultivation. It can also alleviate problems such as water-heat imbalance, soil secondary salinization, acid-base imbalance, reduced microbial diversity, and insufficient nutrient supply in facility greenhouses. Currently, however, research on organic fertilizers mostly focuses on open fields and field crops, and most studies use animal manure as the organic fertilizer. This study selected Hainan coir organic fertilizer and bio-enzyme-active bacterial fertilizer as bottom fertilizers. High-throughput sequencing technology was used to study how different bottom fertilizers and their dosages affect soil nutrient and microbial changes in facility greenhouses. The goal was to identify effective fertilization methods for improv-

收稿日期 2025-02-26; 接受日期 2025-03-21

基金项目 海南省冬季瓜菜产业技术体系营养与栽培岗 (No. HNARS-05-G03); 海南大学南繁学院创新创业训练项目 (No. NFCX2024-25)

作者简介 夏 枫 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蔬菜育种与栽培。*通信作者 (Corresponding author): 成善汉 (CHENG Shanhan), E-mail: 990865@hainanu.edu.cn; 邓 勤 (DENG Qin), E-mail: dengqin_e@yeah.net。

ing soil. The results showed that: (1) The application of 14 286 kg/hm² of coir organic fertilizer effectively improved soil pH, organic matter, total nitrogen, effective phosphorus, and quick-acting potassium. The bio-enzyme-activated bacterial fertilizer improved the soil's total nitrogen, effective phosphorus, and quick-acting potassium levels, but the effect was weaker than that of the coir organic fertilizer. The CK indicators were generally lower than the pre-planting levels. (2) The number of soil bacterial OTUs generally decreased after planting. However, organic fertilizer treatments, especially bioenzyme treatments, could partially restore or enhance microbial diversity. Coconut coir organic fertilizer was more conducive to the proliferation of beneficial bacterial flora, such as Rhizobiales and *Paecilomyces* spp. WSH L07. Bioenzyme-activated bacterial fertilizers had an effect on Sphingomonadales, Rhodospirillales, and *Aspergillus terreus*.

Keywords: 16S rRNA; soil microorganisms; basal fertilizer; coir organic fertilizer; facility greenhouse

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.024

土壤是作物赖以生存的基础,是作物高效、优质、安全、可持续生产的保证,其质量直接关乎农业生态系统的可持续发展。在集约化农业背景下,化学投入品滥用引发的土壤退化问题日益凸显,包括微生物区系失衡、盐渍化加剧及土传病害频发等。因此,提高土壤肥力、改善土壤质量是当前土壤改良的重要方向之一。土壤改良的方法很多,如减少化肥和农药的使用,采用合理的耕作、灌溉制度等。其中,施用生物有机肥是最重要的改良措施之一。研究表明,有机-无机协同调控策略可有效改善土壤健康,如化肥减量30%配施生物有机肥可使土壤速效养分提升17%~24%,同时显著优化细菌/真菌比值^[1]。有机肥配施生物菌肥能显著提升土壤中速效养分和酶活性,改善土壤微生物结构,丰富细菌多样性,有助于降低设施蔬菜土传病害的发生^[2]。蒋永梅等^[3]研究发现,不同施肥处理下土壤微生物生物量与微生物数量存在一定程度的正相关关系,70%化肥+微生物肥料对青梗花椰菜生长具有良好的促进效果。骆晓声等^[4]研究发现,在华北冬小麦和夏玉米轮作农田中施用炭基肥,可以显著提高土壤有机碳和全氮含量,并提高土壤酶活性和多数优势真菌门类的相对丰度,从而对作物产量的提高起到积极作用。同样,国外也有很多关于施肥对土壤微生物多样性影响的相关研究^[5-7]。

大多数的有机肥研究是基于露地和大田作物,而且是对动物粪便有机肥的研究。随着我国设施农业的快速发展,动物粪肥连续施用带来的如重金属、抗生素等危害被发现^[8],植物源有机肥因其有规避动物粪肥风险的优势,逐渐成为土壤改良研究的焦点。周勋勋等^[9]用不同比例的烟沫有机肥替代化肥,发现烟沫有机肥可以显著改变土壤微生物结构,增加土壤中硝化细菌和氨化细菌的数量,从而促进玉米生长。利用当地特色

植物制成的有机肥,不仅能够有效调节土壤结构,提升土壤肥力,还能充分挖掘植物的潜在价值,实现资源高效利用和可持续发展。因此,本研究选用海南椰糠有机肥、活性生物菌肥为底肥,研究不同底肥种类和用量对设施大棚土壤养分和土壤微生物变化的影响,以筛选海南设施大棚土壤改良的有效方法。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点为海南省三亚市天涯区凤凰镇妙林洋设施蔬菜基地。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 选用生物酵素·活性菌肥(A,河北承德磐丰酵素菌有限公司)、海南椰糠有机肥(B,海南文昌腾达生物科技有限公司)2种有机肥作基肥,以复合肥(N-P₂O₅-K₂O 配比为15-15-15)为对照,共7个处理:(1)复合肥405 kg/hm²(CK);(2)生物酵素·活性菌肥9524 kg/hm²(A1);(3)生物酵素·活性菌肥14 286 kg/hm²(A2);(4)生物酵素·活性菌肥19 048 kg/hm²(A3);(5)椰糠有机肥9524 kg/hm²(B1);(6)椰糠有机肥14 286 kg/hm²(B2);(7)椰糠有机肥19 048 kg/hm²(B3)。

1.2.2 取样 采用多点法分别取前茬休耕后基肥施用前土壤和种植豇豆采收后0~20 cm深各处理土壤样本,于-80℃下保存,备用。

1.2.3 土壤基本养分分析 土壤有机质(OM)含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定;碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)含量采用Bray-1法(0.03 mol/L 氟化铵-0.025 mol/L 盐酸提取)-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)含量采用NH₄OAc浸提-火焰光度计法测定^[10]。

1.2.4 土壤 DNA 提取、PCR 扩增及测序 采用高通量测序的方式对土壤细菌与真菌进行测定分析。分别称取各处理土壤样本,按照土壤基因组 DNA 提取试剂盒 HiPure Soil DNA Kits 说明书提取土壤中的 DNA。

以 341F (5'-CCTAYGGGRBGCASCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACNNGGGTATCTAAT-3') 为引物,扩增土壤细菌 16S rRNA 的 V3+V4 区;以 ITS1F (5'-GATGAAGAACGYAGYRAA-3') 和 ITS2R (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') 为引物,扩增土壤真菌 ITS 序列的 ITS2 区域。PCR 扩增体系:KOD 酶扩增体系 (50 μ L)。然后通过 2% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物的纯度及浓度。采用 illumina MiSeq 测序仪与 illumina 建库试剂盒对得到的片段建库测序,测序策略为 PE250。

1.2.5 Illumina 数据分析 采用高通量测序技术检测细菌基因 V3+V4 区域、真菌基因 ITS 区域。对 PCR 产物进行测序,拼接成 tag,采用 Mothur (v.1.34.0) 软件在 0.03 距离 (相似度为 97%) 进行 OTU 聚类、Alpha 多样性分析和 Beta 多样性分析,采用 R 语言进行典型相关分析 (CCA)。

1.3 数据处理

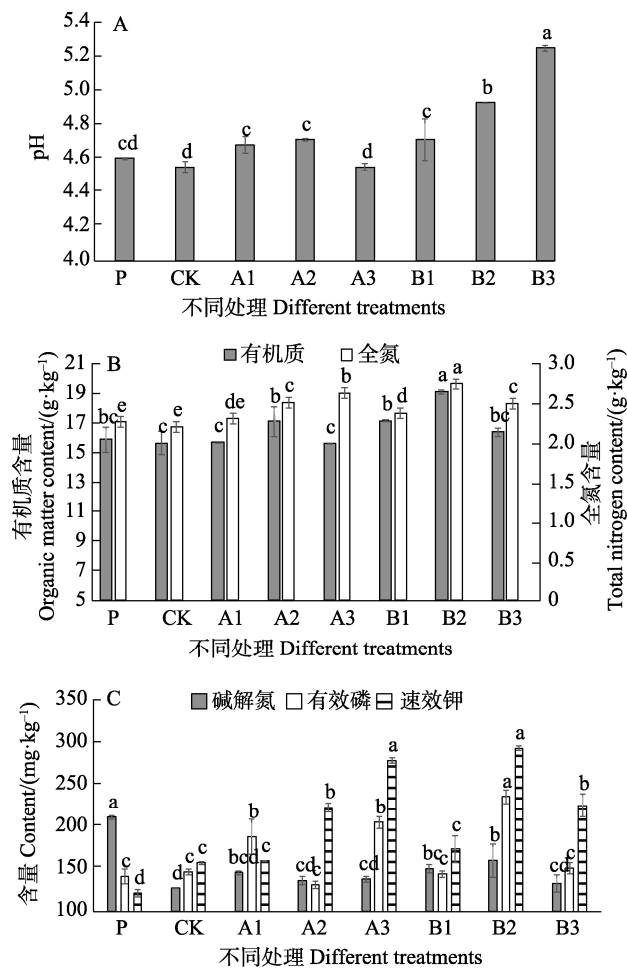
采用 Microsoft Excel 2013 软件对土壤基本养分数据进行整理。利用 SPSS Statistics 21.0 软件,采用 LSD 法对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 及基本养分分析

土壤养分测定结果表明,种植后施用椰糠有机肥的各处理土壤 pH 相较于种植前土壤 (P) 及 CK 均有所升高,且 B2、B3 与 P、CK 均达显著差异;而施用生物酵素·活性菌肥的各处理与 P 均无显著差异,但 A1、A2 显著高于 CK;CK 相较于 P 有所降低,但二者间未达显著差异 (图 1A)。

施用椰糠有机肥的处理中,B2 处理的土壤有机质含量极显著高于 P,B1、B2 显著高于 CK;施用生物酵素·活性菌肥 A1、A2、A3 处理的土壤有机质含量均与 P、CK 无显著差异;CK 相较于 P 降低 1.57%,且 CK 与 P 无显著差异;B1、B2、A2 处理的土壤有机质含量显著高于 CK,其他处理组与 CK 无显著差异。施用椰糠有机肥 B1、B2、B3 处理的全氮含量相较于 P 及 CK 均显著提高;施用生物酵素·活性菌肥的处理 A2、A3 的全氮含量显著高于 P 及 CK,而 A1 与 P、CK 无显著差



P 代表种植前土壤;不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

P indicates the pre-plant soil; Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

图 1 种植前及种植后不同处理土壤 pH 和养分变化
Fig. 1 pH and nutrient changes in soil of before planting and different treatments after planting

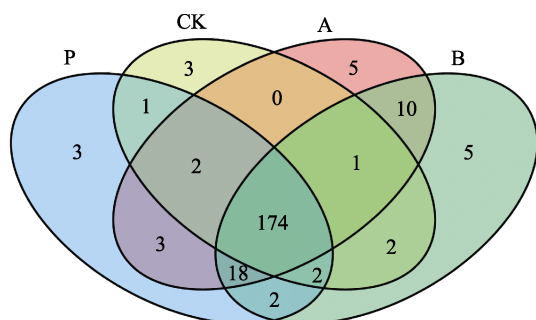
异;另外,CK 相较于 P 全氮含量下降 2.43%,但二者间无显著差异 (图 1B)。

相较于 P,种植后各处理的碱解氮含量显著降低,但均高于 CK,其中 B1、B2 处理与 CK 达显著差异。施用椰糠有机肥的各处理中,B2 处理的有效磷含量与 P、CK 均达显著差异,B1、B3 处理与 P、CK 间无显著差异;施用生物酵素·活性菌肥的各处理中,A1、A3 处理的有效磷含量均显著高于 P、CK,而 A2 与 P、CK 间均无显著差异,B2 显著高于 A1、A3,P 与 CK 无显著差异。种植后各处理的速效钾含量均显著高于 P,施用椰糠有机肥的各处理中,B1 处理的速效钾含量与 CK 无显著差异,B2、B3 处理均显著高于 CK,其中 B2 处理的速效钾含量最高;施用生物酵素·活性菌肥的各处理中,A1 处理的速效钾含量

与 CK 差异不显著, A2、A3 处理显著高于 CK, B2 处理与 B3、A2 处理均存在显著差异, 而与 A3 处理无显著差异, 但含量略高于 A3 处理(图 1C)。

2.2 Illumina MiSeq 测序基本信息

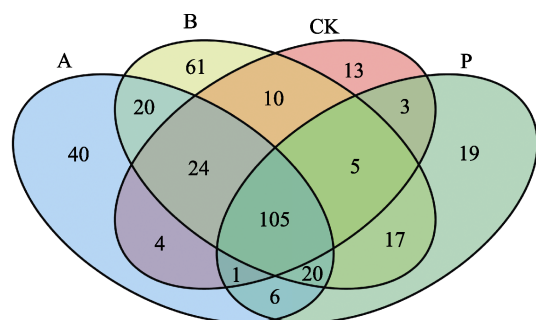
从土壤样本中提取 DNA 后, 采用带有 barcode 的特异引物 341F/806R (细菌 16S rRNA)、ITS1F/ITS2R (真菌 ITS rRNA) 进行扩增, 经过扩增产物回收与定量、文库构建、测序, 并对原始测序数据进行过滤、PE reads 拼接等。基于 0.03 距离 (即相似度为 97%), 将 tags 进行 OTU (operating taxonomic unit) 聚类, 在目水平共发现 231 个细菌 OTUs, 在种水平有 348 个真菌 OTUs。其中, 种植前土壤 (P) 与 3 种肥料处理土壤样本中, 在目水平共有 174 个细菌 OTUs (图 2), 在种水平共有 105 个真菌 OTUs (图 3)。



P 代表种植前土壤, A 代表 A1、A2、A3, B 代表 B1、B2、B3。
P indicates the pre-plant soil, A stands for A1, A2, A3, and B stands for B1, B2, B3.

图 2 不同处理土壤中的细菌群落 OTUs

Fig. 2 OTUs in bacterial community of soil in different treatments



P 代表种植前土壤, A 代表 A1、A2、A3, B 代表 B1、B2、B3。
P indicates the pre-plant soil, A stands for A1, A2, A3, and B stands for B1, B2, B3.

图 3 不同处理土壤中的真菌群落 OTUs

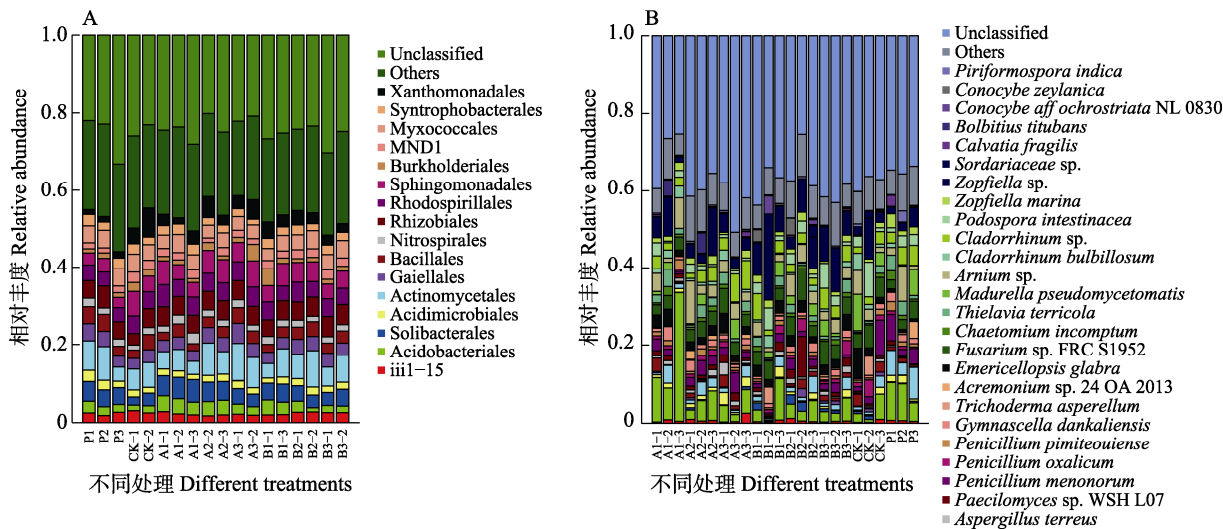
Fig. 3 OTUs in fungal communities of soil in different treatments

2.3 土壤微生物群落组成

在目水平上, 不同基肥处理土壤样本的细菌组成相似, 但有些细菌的组成比例存在较为明显

的变化 (图 4A)。如所有处理的黄单胞菌目 (Xanthomonadales) 相对丰度均高于种植前土壤 (P), 而生物酵素·活性菌肥处理 (A) 和椰糠有机肥处理 (B) 的相对丰度均低于 CK; 鞘氨醇单胞菌目 (Sphingomonadales) 的丰度呈相似变化趋势, 且在生物酵·活性菌肥处理中表现明显富集现象, 其中 A2 与 A3 处理的增幅尤为突出。在种水平上, 不同基肥处理的土壤真菌组成群落相似, 但有些真菌的相对丰度变化较为明显 (图 4B)。与 CK 相比, *Paecilomyces* sp. WSH L07 与土曲霉 (*Aspergillus terreus*) 在施肥处理中的相对丰度表现出明显富集趋势; 毛壳菌属 (*Chaetomium incomptum*) 的相对丰度在 A3 和 B2 处理中维持较高水平; 草酸青霉 (*Penicillium oxalicum*) 在椰糠有机肥处理 (B) 中的丰度明显上升, 而 CK 中几乎不可见。

与种植前土壤 (P) 相比, 生物酵素·活性菌肥处理 (A1~A3) 与椰糠有机肥作基肥处理 (B1~B3) 的鞘氨醇单胞菌目 (Sphingomonadales) 和红螺菌目 (Rhodospirillales) 细菌的相对丰度均明显增加, 其中 A2、A3 处理的鞘氨醇单胞菌目相对丰度明显高于其他处理, 而红螺菌目以 A3 处理的相对丰度最高, 另外, B3 处理的根瘤菌目 (Rhizobiales) 相对丰度明显高于其他处理, 而 A1 处理硝化螺旋菌目相对丰度明显高于其他处理; CK 的鞘氨醇单胞菌目、红螺菌目相对丰度增加, 而根瘤菌目、硝化螺旋菌目相对丰度降低。与 CK 相比, A2、A3 处理的鞘氨醇单胞菌目相对丰度明显增加, 其他处理则表现为不同程度的降低; A1、A2、A3、B2 处理的红螺菌目相对丰度增加, 而 B1、B3 处理则表现为降低; 所有有机肥处理中的根瘤菌目、硝化螺旋菌目相对丰度均增加, 其中以 B3 处理的根瘤菌目相对丰度最大, A1 处理硝化螺旋菌目相对丰度最大。与种植前土壤相比, A2、A3、B2 处理的放线菌目 (Actinomycetales) 相对丰度增加, 并且 A3>B2>A2, 而 CK、A1、B1、B3 处理的相对丰度下降; 种植后各处理的黄单胞菌目 (Xanthomonadales) 相对丰度明显增加, CK、A2、A3、B1 处理的伯克霍尔德菌目 (Burkholderiales) 相对丰度增加, 而 A1、B2、B3 处理的基本不变; 与 CK 相比, A1、B1 处理放线菌目的相对丰度明显下降。各有机肥处理的



各土壤样本中仅展示至少有 1 个表达丰度高于 2% 的物种，其余物种统一归类到 Others，无法注释到该水平的 tags 则归类到 Unclassified。
Only species with at least one expression abundance higher than 2% are shown for each soil sample, the rest of the species are uniformly classified as Others, and tags that could not be annotated to that level are classified as Unclassified.

图 4 不同土壤样本微生物物种分布堆叠图

Fig. 4 Stacked distribution of microbial species in different soil samples

黄单胞菌目相对丰度均明显降低，其中以 B3 最低；除 A3、B1 处理的伯克霍尔德菌目相对丰度明显增加外，A1、A2、B2、B3 处理均表现为降低，其中以 A1、B2 最低（图 5A）。
相较于种植前的土壤，种植后各处理土壤中简毛壳菌（*Chaetomium incomptum*）的相对丰度明显降低，但施用有机肥处理的相对丰度高于 CK；种植后各处理 CK 的棘孢木霉（*Trichoderma*

asperellum）、草酸青霉（*Penicillium oxalicum*）、拟青霉属 WSH L07（*Paecilomyces* sp. WSH L07）、土曲霉（*Aspergillus terreus*）的相对丰度有所提高，有机肥处理的棘孢木霉、草酸青霉的相对丰度均低于 CK，但拟青霉属 WSH L07、土曲霉的相对丰度高于 CK，其中，B2 处理的拟青霉属 WSH L07 相对丰度最高，而 A3 处理的土曲霉相对丰度最高（图 5B）。

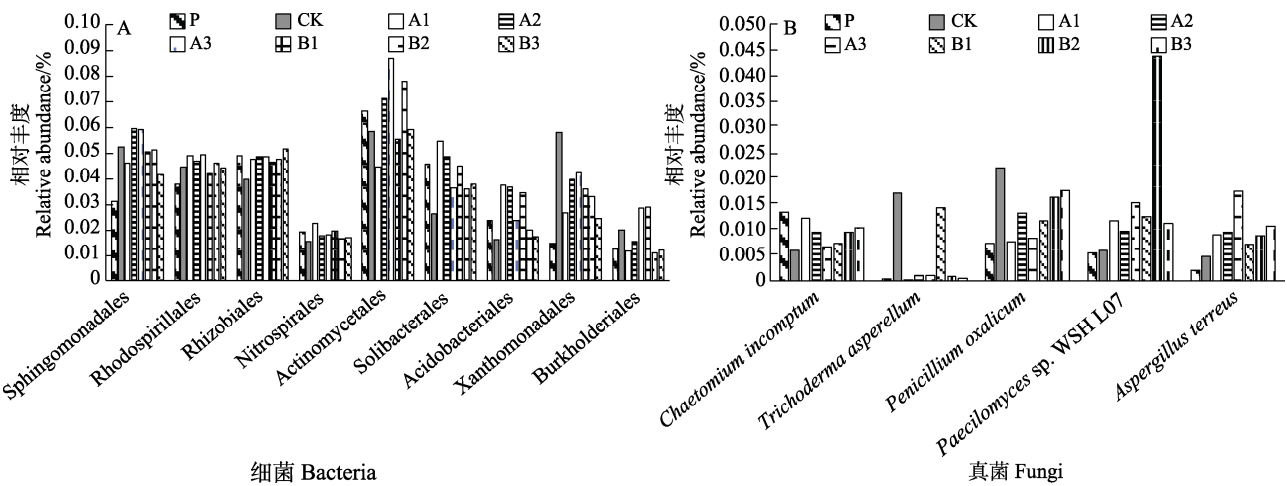


图 5 不同处理对土壤细菌和真菌群落相对丰度的影响
Fig. 5 Effects of different treatments on relative abundance of soil bacterial and fungal communities

2.4 土壤微生物群落的丰富多样性

种植后各处理土壤细菌 OTUs 数量相较种植前均有不同程度的降低，与 CK 相比，生物酵素·活

性菌肥处理的细菌 OTUs 数量均增加，尤以 A3 处理的 OTUs 数最大，而椰糠有机肥处理中的 B2 略有减少。Chao1 指数、ACE 指数均以 A3 处理

的最高，而 B2 处理则最低。Shannon 指数能较好地反映样本中的细菌 OTUs 丰富程度，其中以种植前土壤中的细菌丰富程度最高，而以生物酵素·活性菌肥 A3 处理中的细菌丰富度最低；种植后生物酵素·活性菌肥处理组 A1、A2 和椰糠有机肥处理 B2、B3 均高于 CK（表 1）。

与种植前相比，种植后各处理土壤的真菌 OTUs 数量变化不一，其中 B2 处理的增幅最大；

除 A1 处理外，其余处理的 Shannon 指数均增加。与 CK 相比，生物酵素·活性菌肥处理 A1、A2、A3 的真菌 OTUs 数量分别降低 28.86%、3.72%、16.20%；椰糠有机肥组中 B1 降低，B2、B3 分别增加 24.95%、16.01%；除 A1、B1 处理的 Shannon 指数稍有下降外，其余处理均增加。Chao1 指数与 ACE 指数均以 B2 处理最高，A1 处理最低（表 2）。

表 1 不同处理的土壤细菌 OTUs 数量和 Alpha 多样性
Tab. 1 Number of OTUs and Alpha diversity of soil bacteria in different treatments

处理 Treatment	OTUs 数量 Number of OTUs	Chao1 指数 Chao1 index	ACE 指数 ACE index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Coverage 指数 Coverage index
P	14 435	35 770	58 577	8.38	0.0012	0.8146
CK	12 723	33 530	55 210	8.21	0.0013	0.8160
A1	13 091	35 449	60 811	8.28	0.0013	0.8059
A2	13 962	37 124	62 803	8.26	0.0016	0.8114
A3	14 422	37 694	63 741	8.13	0.0018	0.8325
B1	12 982	33 688	56 599	8.15	0.0016	0.8251
B2	12 659	33 364	54 830	8.21	0.0013	0.8128
B3	13 875	37 005	61 458	8.34	0.0012	0.8073

表 2 不同处理的土壤真菌 OTUs 数量和 Alpha 多样性
Tab. 2 Number of OTUs and Alpha diversity of soil fungi in different treatments

处理 Treatment	OTUs 数量 Number of OTUs	Chao1 指数 Chao1 index	ACE 指数 ACE index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Coverage 指数 Coverage index
P	434	612	616	4.20	0.0318	0.9958
CK	537	838	868	4.29	0.0304	0.9927
A1	382	586	577	4.00	0.0596	0.9932
A2	517	816	863	4.51	0.0250	0.9923
A3	450	650	691	4.44	0.0232	0.9917
B1	511	801	755	4.26	0.0383	0.9922
B2	671	1085	1373	4.32	0.0308	0.9959
B3	623	1012	1072	4.36	0.0281	0.9944

2.5 土壤微生物群落组成与土壤营养成分的相关性分析

通过对土壤微生物与土壤营养成分进行 CCA 分析显示，速效钾（AK）对土壤细菌群落分布变化的影响最大，尤其对 B2 处理影响较大，且二者呈正相关（图 6A）。碱解氮（AN）对土壤真菌群落分布变化的影响最大，尤其对 A1 处理影响较大，且二者呈正相关（图 6B）。

3 讨论

3.1 施肥对土壤营养成分的影响

本研究结果表明施用有机肥有助于补充土壤有机质，与高萍^[11]、周瑞春等^[12]的研究结果一致。化肥不含有机质，施用化肥并不能直接增加土壤

有机质，但张爱君等^[13]研究表明施用化肥在一定程度上基本可维持土壤有机质含量的稳定。因此，与种植前相比，CK 的土壤有机质含量并未显著下降。而本研究中生物酵素·活性菌肥处理组的土壤有机质增减不一，可能受其中微生物作用的影响，而微生物活动又受土壤酸碱度等其他因素的影响，其影响机理还需进一步研究与探索。彭先容等^[14]研究表明，施用有机肥能增加土壤的碱解氮、有效磷和速效钾含量。王望等^[15]则研究表明，在未施有机肥的条件下，施用较低量的无机氮，可能无法完全补偿植物根际土壤因作物吸收而流失的碱解氮。本研究中种植后各处理的土壤碱解氮含量均低于种植前，可能是豇豆生产中对氮的需求量大，土壤中可吸收氮素消耗过多，而有机

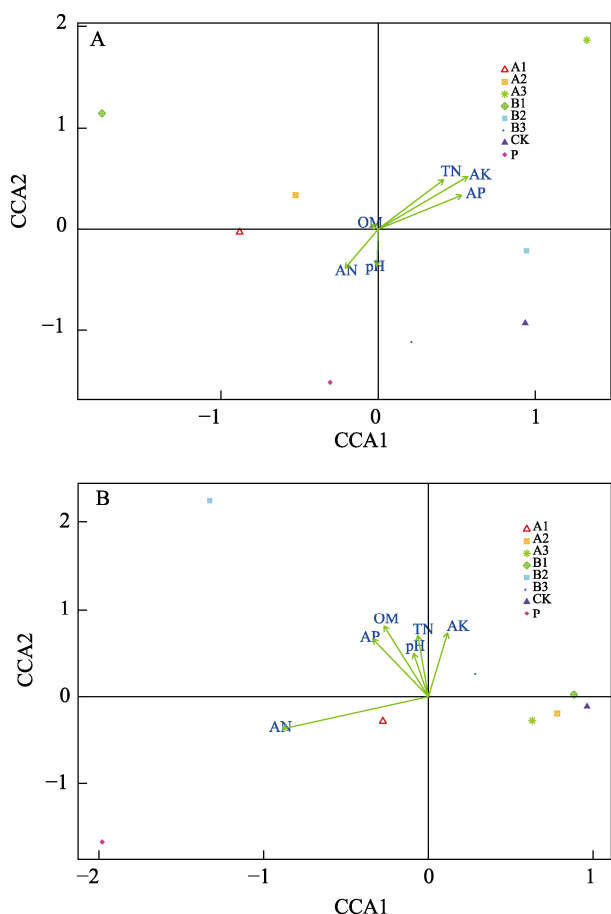


图 6 细菌 (A)、真菌 (B) 与土壤营养成分 CCA 分析

Fig. 6 CCA analysis of bacteria (A), fungi (B) and soil nutrients

肥矿化率不足以满足其需求所致。另外，与种植前相比，种植后有机肥处理的土壤有效磷和速效钾含量均有不同程度上升，表明施用有机肥有助于增强土壤中的速效成分^[16]。种植后土壤 pH 的变化有差异，但椰糠有机肥处理组的 pH 均高于种植前，说明椰糠有机肥对改善土壤酸性有一定作用。这与郭慧婷等^[17]、邹刚华等^[18]的研究结果一致。综合种植后 7 个处理看，除 pH 外，B2 处理的其他土壤营养指标均优于 CK，表明椰糠有机肥施用量为 14 286 kg/hm²时对土壤养分的提高作用最大。

3.2 施肥对土壤微生物群落的影响

土壤中的微生物群落结构复杂，不同群落都有其不同的作用，是土壤生态系统中最为活跃的组成部分，前人研究发现 90% 左右的土壤反应过程均有土壤微生物的参与，可见土壤微生物对土壤生态系统有着不可替代的作用^[19-20]。自然环境的变化与人为的农业耕作、施肥等均对土壤中的

微生物群落多样性产生一定的影响^[21-25]。研究表明，与化肥相比，施用有机肥可以显著提高土壤微生物多样性和优势度，且施用有机肥可以显著改变土壤微生物结构^[26-28]，抑制某些有害菌群的积累^[29-30]。

在本研究中，各处理的土壤微生物群落结构表现出不同程度的差异，表明施用有机肥对土壤优势菌群结构比例有一定影响。与施用化肥相比，施用椰糠有机肥与生物酵素·活性菌肥均有利于提高土壤中鞘氨醇单胞菌目、红螺菌目、根瘤菌目及硝化螺旋菌目的相对丰度，其中以施用生物酵素·活性菌肥 9524 kg/hm² (A1) 及施用椰糠有机肥 14 286 kg/hm² (B2) 的综合表现最好；而可能在一定程度上抑制黄单胞菌目相对丰度的增加。鞘脂单胞菌、红螺菌、根瘤菌及硝化螺旋菌均参与土壤中的生物固氮过程，在土壤生态系统氮循环中起着十分重要的作用。而黄色单胞菌是一种土壤致病菌，研究发现黄单胞菌属 (*Xanthomonas*) 能感染包括水稻、大豆等在内的 400 多种植物，导致重大经济损失^[31-32]。

与施用化肥相比，施用有机肥较大程度提高了土壤中有益真菌拟青霉属 WSH L07、土曲霉的相对丰度，在简毛壳菌相对丰度的保持上也表现较好，其中以施用生物酵素·活性菌肥 19 048 kg/hm² (A3) 及施用椰糠有机肥 14 286 kg/hm² (B2) 的效果较为突出。拟青霉属 WSH L07 可用于漆酶的生产^[33]。漆酶参与木质素的降解及腐殖质的转化^[34]，并在土壤污染修复中发挥重要作用^[35]。很多种类的曲霉对植物都有一定的致病性，而土曲霉对一些植物病原菌具有一定的抑制作用^[36]。另外，毛壳菌属 (*Chaetomium*)、棘孢木霉均为生防菌类^[37-38]，草酸青霉具有溶解土壤中的难溶磷的作用^[39]，这些真菌对维持土壤健康具有重要意义。

3.3 土壤微生物群落分布与土壤养分的相关性

土壤中微生物群落结构受土壤养分的影响，且不同的土壤养分可能通过正向或负向影响微生物群落结构的变化。本研究结果表明，速效钾对土壤细菌群落分布的变化具有显著影响，尤其是 B2 处理中，速效钾含量与细菌群落分布呈正相关。已有研究也证明，速效钾是塑造土壤细菌群落结构的关键因素。如在针叶林土壤中，细菌群落与速效钾呈正相关^[40]；在柑橘园土壤中，细菌丰度与速效钾呈显著正相关^[41]。本研究中，碱解氮对土壤真菌群落的影响更为突出，尤其对 A1

处理的影响最大,二者呈正相关。程跃扬等^[42]的研究也证明,在农田土壤中,碱解氮与真菌功能类群呈显著正相关,且碱解氮被确定为影响真菌功能类群的最主要生态因子。在盐碱地里,碱解氮也是土壤真菌群落变化的核心因素^[43]。

对不同土壤养分作用的评估还需要结合具体的环境背景。已有研究显示,碱解氮对真菌群落的重要性会被其他因子覆盖。在干旱区灌溉试验中,速效钾对真菌群落的影响($r^2=0.804$)超过碱解氮^[44];西双版纳土壤中碱解氮对微生物影响显著,而鼎湖山土壤中速效钾的作用更突出^[45]。土壤养分对土壤微生物群落分布的影响,不仅取决于其种类与浓度,还与养分比例、输入方式及环境条件密切相关。这些因素的共同作用使得不同养分对微生物类群产生差异性甚至相反的调控效应,最终形成复杂的群落结构动态。

4 结论

本研究结果表明,施用有机肥可显著提升土壤养分含量并优化微生物群落结构。在土壤养分方面,有机肥可有效补充有机质,提升速效磷、速效钾含量,并通过微生物活动维持氮素平衡,其中椰糠有机肥施用量为 14 286 kg/hm²时,综合效果最佳,且对缓解土壤酸化具有积极作用。化肥虽能维持有机质稳定,但无法直接补充有机质或速效养分。

在微生物群落方面,有机肥可显著提高有益菌群丰度,抑制致病菌,如黄单胞菌目。同时促进有益真菌的增殖,优化土壤微生态功能。土壤养分与微生物群落存在显著互作关系,速效钾是调控细菌群落的核心因子,而碱解氮对真菌群落的影响更突出。然而,养分对微生物的作用受环境背景、养分输入方式及养分比例的复杂调控,需结合具体条件进行分析。

综上,合理施用椰糠有机肥不仅能提升土壤肥力,还可通过调控微生物群落增强土壤生态功能,为可持续农业实践提供科学范式。

参考文献

- [1] 张迎春, 颜建明, 李静, 牛天航, 夏国栋, 毛振宇, 王庆玲, 陈艺易. 生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 196-205.
- [2] 金珊, 刘雪, 陈卓昂, 李路瑶, 陈雪, 耿兵. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1995-2003.
- [3] 蒋永梅, 姚拓, 田永亮, 李建宏, 刘婷, 高亚敏, 张建贵, 张标. 微生物肥料对青梗花椰菜生长和土壤微生物特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 465-471.
- [4] 骆晓声, 寇长林, 张济世, 吕金岭, 李太魁. 炭基肥对麦-玉轮作农田土壤酶活性和真菌群落及作物产量的影响[J/OL]. 环境科学, 1-17. (2024-08-20)[2024-11-27]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405297>.
- [5] LUO X S, KOU C L, ZHANG J S, LYU J L, LI T K. Effect of biochar-based fertilizer application on soil enzyme activity, fungal community, and crop yield in winter wheat-summer maize rotation farmland[J/OL]. Environmental Science, 1-17. (2024-08-20)[2024-11-27]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405297>. (in Chinese)
- [6] SENEVIRATNE G. Collapse of beneficial microbial communities and deterioration of soil health: a cause for reduced crop productivity[J]. Current Science, 2009, 96(5): 633.
- [7] PAPATHEODOROU E M, EFTHIMIADOU E, STAMOU G P. Functional diversity of soil bacteria as affected by management practices and phenological stage of *Phaseolus vulgaris*[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(4): 429-436.
- [8] BIRKHOFFER K, BEZEMER T M, BLOEM J, BONKOWSKI M, CHRISTENSEN S, DUBOIS D, EKELUND F, FLIEBBACH A, GUNST L, HEDLUND K, MÄDER P, MIKOLA J, ROBIN C, SETÄLÄ H, TATIN-FROUX F, PUTTEN W H V, SCHEU S. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2297-2308.
- [9] ZHANG Y C, XIE J M, LI J, NIU T H, XIA G D, MAO Z Y, WANG Q L, CHEN Y Y. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on *Asparagus lettuce* and soil physical-chemical properties and microorganisms[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 196-205. (in Chinese)
- [10] JIN S, LIU X, CHEN Z B, LI L Y, CHEN X, GENG B. Effects of organic fertilizer containing biofertilizer on soil improvement of vegetables in facilities[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(9): 1995-2003. (in Chinese)

- [8] 杨松花, 代良羽, 黄宇, 吴长友, 张涛, 史登林. 牛粪对土壤重金属累积及污染修复作用的研究进展[J]. 农技服务, 2024, 41(6): 77-81.
YANG S H, DAI L Y, HUANG Y, WU C Y, ZHANG T, SHI D L. Research progress on the role of cattle manure on soil heavy metal accumulation and pollution remediation[J]. Agricultural Technology Service, 2024, 41(6): 77-81. (in Chinese)
- [9] 周勋勋, 程永豪, 于雪娇, 叶文玲, 鲁洪娟, 张国漪. 烟沫有机肥部分替代化肥对玉米生长和根系分泌物及土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1440-1452.
ZHOU X X, CHENG Y H, YU X J, YE W L, LU H J, ZHANG G Y. Effect of partial substitution of chemical fertilizer with tobacco foam organic fertilizer on corn growth, microbial community structure and root exudates[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1440-1452. (in Chinese)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 高萍. 增施有机肥对土壤养分、玉米生长及产量的影响试验[J]. 南方农业, 2024, 18(5): 91-93.
GAO P. Experiment on the effects of increasing organic fertilizer application on soil nutrients, corn growth and yield[J]. South China Agriculture, 2024, 18(5): 91-93. (in Chinese)
- [12] 周瑞春, 官会林, 刘奎, 王豪吉, 赵芳, 陈鹏奎, 徐武美. 施用生物有机肥对旱地红壤保水性及细菌群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 153-160.
ZHOU R C, GUAN H L, LIU K, WANG H J, ZHAO F, CHEN P Y, XU W M. Effects of applying bio-organic fertilizer on water retention and bacterial community of dryland red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7): 153-160. (in Chinese)
- [13] 张爱君, 张明普. 黄潮土长期轮作施肥土壤有机质消长规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2002, 29(1): 60-63.
ZHANG A J, ZHANG M P. Study on regularity of growth and decline of soil organic matter under long-term fertilization for yellow fluvo aquic soil[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2002, 29(1): 60-63. (in Chinese)
- [14] 彭先容, 王帅, 曾卓华, 王佳乐, 王妍, 冯蓉, 秦梦婵, 赵敬坤, 卢明, 张跃强. 有机肥替代化肥比例对红心柚产量和品质及土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(11): 110-119.
PENG X R, WANG S, ZENG Z H, WANG J L, WANG Y, FENG R, QIN M C, ZHAO J K, LU M, ZHANG Y Q. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on the yield and fruits qualities of red pomelo and soil properties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(11): 110-119. (in Chinese)
- [15] 王望, 于泽, 崔晶晶, 宋柏权, 王秋红. 施氮对甜菜根际土壤化学性质的影响及相关性分析[J]. 中国农学通报, 2024, 40(22): 88-93.
WANG W, YU Z, CUI J J, SONG B Q, WANG Q H. Effect of nitrogen application on chemical properties of sugar beet rhizosphere soil and correlation analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(22): 88-93. (in Chinese)
- [16] 张继东, 张亚雄, 程伟, 蒲莉, 柳路行, 王亚明. 生物质炭和有机肥配施对苹果重茬育苗地土壤理化性质和微生物群落特征的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(8): 213-222.
ZHANG J D, ZHANG Y X, CHENG W, PU L, LIU L H, WANG Y M. Effects of combined application of biochar and organic fertilizer on soil physicochemical properties and microbial community characteristics in apple recropping field[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(8): 213-222. (in Chinese)
- [17] 郭慧婷, 高静, 张强, 李建华, 靳东升, 徐明岗. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(3): 496-503.
GUO H T, GAO J, ZHANG Q, LI J H, JIN D S, XU M G. Differences and reasons for the effects of organic fertilizer on the pH of acidic and alkaline soils in China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(3): 496-503. (in Chinese)
- [18] 邹刚华, 赵凤亮, 兰雪成, 吴天昊. 不同水分条件下椰壳炭施用对稻田土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 525-532.
ZOU G H, ZHAO F L, LAN X C, WU T H. Effects of coconut shell biochar on enzyme activities and microbial community in tropical paddy soil under different water conditions[J]. Soils, 2024, 56(3): 525-532. (in Chinese)
- [19] COLEMAN D C, CROSSLEY D A, HENDRIX P F. Fundamentals of soil ecology[M]. London: Academic Press, 1996: 48-77.
- [20] PANKHURST C E, OPHEL-KELLER K, DOUBE B M, GUPTA V V S R. Biodiversity of soil microbial communities in agricultural systems[J]. Biodiversity and Conservation, 1996, 5(2): 197-209.
- [21] AMANTE G, WEDAJO M. Impacts of climate change on soil microbial diversity, distribution and abundance[J]. International Journal on Food, Agriculture, and Natural Resources, 2024, 5(2): 158-168.
- [22] MENCEL J, MOCEK-PLÓCINIĄK A, KRYSZAK A. Soil microbial community and enzymatic activity of grasslands under different use practices: a review[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1136.
- [23] TOWN J R, GREGORICH E G, DRURY C F, LEMKE R,

- PHILLIPS L A, HELGASON B L. Diverse crop rotations influence the bacterial and fungal communities in root, rhizosphere and soil and impact soil microbial processes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 169: 104241.
- [24] FAN Z, LI R, GUAN E X, CHEN H Q, ZHAO X N, WEI G H, SHU D T. Fertilization regimes affect crop yields through changes of diazotrophic community and gene abundance in soil aggregation[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161359.
- [25] LORI M, HARTMANN M, KUNDEL D, MAYER J, MUELLER C R. Soil microbial communities are sensitive to differences in fertilization intensity in organic and conventional farming systems[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2023, 99: 1-13.
- [26] 伍少福, 韩科峰, 吴良欢. 生物有机肥加专用肥对葡萄园土壤养分、微生物和产量的影响[J]. *园艺学报*, 2024, 51(5): 1099-1112.
- WU S F, HAN K F, WU L H. Effects of biological-organic fertilizer combined with specialized fertilizer on soil nutrients, microbial diversity and yield in vineyards[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2024, 51(5): 1099-1112. (in Chinese)
- [27] 蒋小瞳, 黄立华, 刘伯顺, 黄广志, 杨璨, 梁燕萍. 长期不同施肥措施对盐碱地稻田土壤微生物数量和群落结构的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(8): 1786-1795.
- JIANG X T, HUANG L H, LIU B S, HUANG G Z, YANG C, LIANG Y P. Effects of long-term fertilization on soil microbial quantity and community structure in saline-sodic paddyfields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1786-1795. (in Chinese)
- [28] 仲连青, 黄炳旭, 李彦慧, 李红姣, 任士福. 施用生物有机肥对仁用杏园土壤微生物结构及杏仁品质的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2024, 47(3): 93-104.
- ZHONG L Q, HUANG B X, LI Y H, LI H J, REN S F. Effects of bio-organic fertilizer on soil microbial structure and almond quality in almond orchard[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2024, 47(3): 93-104. (in Chinese)
- [29] 常健玮, 刘国群, 颜雯婷, 刘洋, 徐铖, 陈俊辉, 秦华. 不同有机肥替代比例对橘园土壤及果实品质影响研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(5): 78-88.
- CHANG J W, LIU G Q, YAN W T, LIU Y, XU C, CHEN J H, QIN H. Effects of different organic fertilizer substitution ratio on soil and fruit quality of citrus[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(5): 78-88. (in Chinese)
- [30] 耿顺军, 许木果, 刘忠妹, 陈桂良, 杨丽萍. 化肥减量配施有机肥对橡胶园土壤细菌群落及其功能的影响[J]. *热带农业科技*, 2024, 47(4): 54-60.
- GENG S J, XU M G, LIU Z M, CHEN G L, YANG L P. Effects of reducing chemical fertilizer combined with organic fertilizer on community structure and functional groups of soil bacteria in rubber plantation[J]. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2024, 47(4): 54-60. (in Chinese)
- [31] LEYNS F, CLEENE M D, SWINGS J, LEY J D. The host range of the genus *Xanthomonas*[J]. *The Botanical Review*, 1984, 50(3): 308-356.
- [32] TIMILSINA S, POTNIS N, NEWBERRY E A, LIYANAPATHIRANAGE P, IRUEGAS-BOCARD F, WHITE F F, GOSS E M, JONES J B. *Xanthomonas* diversity, virulence and plant-pathogen interactions[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18: 415-427.
- [33] 刘志钰. 拟青霉漆酶发酵调控、分离纯化及性质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- LIU Z Y. Production, purification and characterization of laccase from *Paecilomyces* species[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010. (in Chinese)
- [34] 赵兵, 徐智, 李兰, 马丽婷, 邓亚琴, 王宇蕴. 二次发酵过程外源添加漆酶强化堆肥腐殖化作用的研究[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6): 1372-1383.
- ZHAO B, XU Z, LI L, MA L T, DENG Y Q, WANG Y Y. Composting humification enhanced by exogenous addition of laccase during the secondary fermentation of composts[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6): 1372-1383. (in Chinese)
- [35] 兴勤鑫, 包月瑶, 彭静, 时翔宇, 王新. 漆酶在环境保护中的应用研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2024, 44(4): 17-21.
- XING Q X, BAO Y Y, PENG J, SHI X Y, WANG X. Progress of research on the application of laccase in environmental protection[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2024, 44(4): 17-21. (in Chinese)
- [36] 王凤婷, 王岩, 孙颖, 崔文婧, 乔凯彬, 潘洪玉, 刘金亮. 耐盐碱土曲霉 SYAT-1 的分离鉴定及抑制植物病原真菌特性研究[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(2): 203-210.
- WANG F T, WANG Y, SUN Y, CUI W J, QIAO K B, PAN H Y, LIU J L. Isolation and identification of saline-alkali tolerant *Aspergillus terreus* SYAT-1 and its activities against plant pathogenic fungi[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(2): 203-210. (in Chinese)
- [37] 钱宁, 程亚普, 叶丰源, 徐志波, 白清圆, 赵文生. 绿肥作物紫云英和苕子中毛壳科真菌的鉴定及其生防潜力探索[C]//中国植物病理学会 2024 年学术年会论文集. 吉林, 2024.
- QIAN N, CHENG Y P, YE F Y, XU Z B, BAI Q Y, ZHAO W S. Identification of *Trichoderma* fungi in the green manure crops *Zoysia* and *Camas* and exploration of their bio-control potentials[C]//Proceedings of the 2024 Annual Meeting of the Chinese Society of Plant Pathology. Jilin,

2024. (in Chinese)
- [38] 杨萍. 棘孢木霉(*Trichoderma asperellum*)MAPK 家族基因的克隆及生物防治功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- YANG P. Cloning and biological control function of MAPKs gene from *Trichoderma asperellum*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [39] 蒋逸凡. 解磷真菌 *Penicillium oxalicum* 溶解难溶性磷酸盐的代谢机制研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
- JIANG Y F. The study of metabolic mechanism on insoluble phosphate solubilization process by *Penicillium oxalicum*[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [40] CUI J Y, SUN Z H, WANG Z X, GONG L F. Effects of the application of nutrients on soil bacterial community composition and diversity in a *Larix olgensis* plantation, northeast China[J]. Sustainability, 2022, 14(24): 16759.
- [41] JIN Y B, FANG Z, ZHOU X B. Variation of soil bacterial communities in a chronosequence of citrus orchard[J]. Annals of Microbiology, 2022, 72: 21.
- [42] 程跃扬, 靳振江, 王晓彤, 贾远航, 袁武, 周军波. 土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4294-4304.
- CHENG Y Y, JIN Z J, WANG X T, JIA Y H, YUAN W, ZHOU J B. Effect of land-use on soil fungal community structure and associated functional group in Huixian karst wetland[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4294-4304. (in Chinese)
- [43] 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓. 汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4342-4352.
- CHEN F, YU G, SUN Y B, ZHANG H L, TIAN X, XIA B. Characteristics of microbial community structure in the surrounding farmlands of a mercury mining area and its environmental driving factors[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4342-4352. (in Chinese)
- [44] DENG Q Z, WU Y, ZHAO X, QIU C S, XIA S, LIU H L. Influence of different irrigation methods on the alfalfa rhizosphere soil fungal communities in an arid region[J]. PLoS One, 2022, 19(7): e0307318.
- [45] 范臻旭. 根际微生物群落组成与多样性: 植物与土壤的影响[D]. 北京: 北京师范大学, 2020.
- FAN Z X. Composition and diversity of rhizosphere microbial community: the role of plant and soil[D]. Beijing: Peking Normal University, 2020. (in Chinese)