

绿农林®41 复合微生物菌肥对番茄枯萎病发生和根际土壤真菌群落的影响

汪 军¹, 李晓霞², 刘 建³, 李得铭¹, 邓 涛¹, 郭立佳¹, 黄俊生¹, 杨 扬¹,
杨腊英^{1*}, 周 游^{1*}, 符红文⁴

1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所/国家肥料微生物种质资源库(海南), 海南海口 571101; 2. 中国热带农业科学院科技信息研究所, 海南海口 571101; 3. 中华人民共和国菏泽海关, 山东菏泽 274000; 4 海南宝绿春农业开发有限公司, 海南海口 571100

摘 要: 探究绿农林®复合微生物菌肥、番茄枯萎病发生和土壤真菌群落结构的关系, 为合理应用微生物制剂绿色防控番茄枯萎病提供理论依据。以往年番茄枯萎病严重发生地块为试验地, 分别设置 4 个处理, 清水对照(CK)、绿农林®41 复合微生物菌肥(LNL41)、菌肥营养基质(NS)和复合微生物(CM), 测定根际土壤养分含量、植株生长、土壤呼吸速率、枯萎病发病率; 采用 18S rDNA 测序技术, 探究施用 LNL41 条件下番茄枯萎病发生及根际土壤真菌群落结构的差异。结果表明: 各处理中以 LNL41 处理效果最显著。LNL41 和 CM 处理的番茄根际土壤中有机质和速效磷含量显著高于其他处理; 与对照比较, LNL41、CM 和 NS 处理的株高、茎围、叶面积、光合作用、叶绿素、产量和水溶性糖增幅分别达 8.87%~34.71%、15.93%~67.62%、13.37%~52.88%、3.17%~12.55%、3.20%~20.49%、4.38%~19.53%、0.46%~8.79%; LNL41 处理的采收期番茄根系土壤呼吸速率提高 59.52%, 不同生长期的发病率达 2.33%~16.33%, 防效达 80.50%~90.83%; 根际土壤真菌属水平 Ace 指数和 Chao1 指数分别提高了 26.97%~57.71%、24.89%~56.00%, CM 处理的多样性指标 Simpson 指数和 Shannon 指数明显提高了 25.75%~29.45%、39.04%~49.13%, 而 NS 处理的多样性指标有所下降; LNL41 处理的肉座菌科和木霉属分别为排名前 5 的优势科和属(丰度均为 8.56%); 4 个处理中 *Trichoderma* 分别与 *Cladosporium*、*Uwebraunia*、*Aureobasidium* 和 *Fusarium* 丰度相似, 与 *Aspergillus* 和 *Alternaria* 呈正相关。LNL41 处理的 Chao1 指数与有机质、速效磷、速效钾和土壤呼吸速率呈显著正相关关系, 与盐度和发病率呈显著负相关关系。LNL41 处理的腐生营养型功能类群丰度增加了 0.92~11.15 个百分点, plant pathogen 下降了 2.55 个百分点, endophyte 下降了 7.95 个百分点, 而施用 NS 和 CM 的处理只有 2 个功能类群丰度上升。LNL41 能显著改善土壤养分比例, 进而改善土壤真菌群落结构和功能特性, 激发真菌群落腐生营养型功能, 促进番茄生长, 减少枯萎病的发病率。

关键词: 绿农林®复合微生物菌肥; 番茄枯萎病; 土壤真菌群落结构; 功能

中图分类号: S432.4 文献标志码: A

Effects of Lvnonglin® 41 Compound Microbial Fertilizer on the Occurrence of Tomato *Fusarium* Wilt and Soil Fungal Community of Tomato Rhizosphere

WANG Jun¹, LI Xiaoxia², LIU Jian³, LI Deming¹, DENG Tao¹, GUO Lijia¹, HUANG Junsheng¹, YANG Yang¹,
YANG Laying^{1*}, ZHOU You^{1*}, FU Hongwen⁴

1. Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / National Fertilizer Microbial Germplasm Resource Bank (Hainan), Haikou, Hainan 571101, China; 2. Institute of Scientific and Technical Information, Chinese

收稿日期 2024-08-09; 修回日期 2024-08-17

基金项目 海南省自然科学基金项目(No. 321RC618, No. 721RC631); 江西重点研发计划项目(No. 20223BBF61015)。

作者简介 汪 军(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 植物病害生物防治。*通信作者(Corresponding author): 杨腊英(YANG Laying), E-mail: layingyang1980@163.com; 周 游(ZHOU You), E-mail: zy563696@163.com。

Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Heze Customs, People's Republic of China, Heze, Shandong 274000, China; 4. Hainan Baolvchun Agricultural Development Co., Ltd., Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: The purpose of the study was to explore the relationship between Lvnonglin® 41 compound microbial fertilizer (LNL41) and the occurrence of tomato *Fusarium* wilt and soil fungal communities and to provide theoretical basis for the prevention and control of tomato *Fusarium* wilt and the rational application of nitrogen fertilizers. Using plots with severe occurrence of tomato *Fusarium* wilt in previous years as experimental plots, four treatments were designed in field: water control (CK), LNL41, bacterial fertilizer nutrient substrate (NS), compound microbial (CM). The effects of different treatments on the concentrations of main soil nutrients of rhizosphere soil, plant growth, soil respiration rate, incidence of *Fusarium* wilt disease were analyzed. Using 18S rDNA sequencing technology, the differences in the occurrence of tomato *Fusarium* wilt and the fungal community structure in rhizosphere soil under LNL41 were investigated. Compared with other treatments, the LNL41 treatment is the best. The treatments with LNL41 and CM had higher contents of organic matter and available phosphorus in tomato rhizosphere soil than other two treatments. Compared with the control, the plant height, stem circumference, leaf area, photosynthesis, chlorophyll, yield and water-soluble sugar treated by LNL41, CM and NS all increased by 8.87%–34.71%, 15.93%–67.62%, 13.37%–52.88%, 3.17%–12.55%, 3.20%–20.49%, 4.38%–19.53%, 0.46%–8.79% respectively. The soil respiration rate increased by 59.52% in LNL41. The incidence and control effect of tomato *Fusarium* wilt disease in different growth stages reached 2.33%–16.33% and 80.50%–90.83% in LNL41, respectively. The Ace index and Chao1 index at the fungal genus level in the rhizosphere soil increased by 26.97%–57.71% and 24.89%–56.00%, respectively. The diversity indicators of the Simpson index and Shannon index of the CM treatment increased by 25.75%–29.45% and 39.04%–49.13%, while the diversity indicators of the NS treatment decreased. Hypocreaceae and *Trichoderma* treated with LNL41 were among the top five dominant families and genera (both abundances were 8.56%); *Trichoderma* was similar to *Cladosporium*, *Uwebraunia*, *Aureobasidium* and *Fusarium* in the four treatments, and was positively correlated with *Aspergillus*, *Uwebraunia* and *Alternaria* respectively. Chao1 index treated with LNL41 was significantly positively correlated with organic matter, available phosphorus, available potassium and soil respiration rate, and was significantly negatively correlated with salinity and disease incidence. The abundance of saprophytic functional groups treated with microbial fertilizer increased by 0.92–11.15 percentage, plant pathogen decreased by 2.55 percentage, and endophyte decreased by 7.95 percentage, while only two functional groups treated with NS and CM increased in abundance. LNL41 can significantly improve the ratio of soil nutrients, thereby improving the structure and functional characteristics of soil fungal communities, stimulating saprophytic functions of the fungal communities, promoting tomato growth, and reducing the rate of blight.

Keywords: Lvnonglin® 41 compound microbial fertilizer; tomato *Fusarium* wilt; soil fungal community structure; function

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.11.020

由尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 番茄枯萎病 (tomato *Fusarium* wilt) 是一种最具破坏性的土传病害之一^[1], 具有危害损失大、防治困难等特点, 还可危害瓜类、茄类、豆类等多种作物^[2]。我国南方热区高温多雨, 化学肥料和化学药剂过度使用, 极易导致土壤酸化、养分和有益微生物失衡, 导致枯萎病等土传病害频发。木霉 (*Trichoderma* spp.) 和芽孢杆菌 (*Bacillus* spp.) 等是防控土传病害和改良土壤的优良生防菌, 防病机制主要为营养和空间位点竞争、分泌抗菌物质、溶菌作用、诱导植物抗病性等几种方式共同作用的综合效果^[3-5]。由于受土壤理化性质和缺乏有机质等营养载体的影响, 菌株在土壤中很难成功定

殖, 其菌群数量会快速降低, 严重影响防病效果, 通过优良菌剂与有机质等营养载体复合制备微生物菌肥, 具有增加土壤肥力、增强作物抗病能力、改善连作土壤理化性状、优化土壤微生物菌群的作用^[6-7]。因此, 研究微生物菌肥对植物枯萎病发生和根际土壤真菌群落的影响, 对保障番茄产业健康发展至关重要。

TANG 等^[8]发现接种生防微生物 *Erythrobacter* sp. YH-07 的有机牛粪肥 (BF) 通过改变土壤微生物群落和土壤理化性质有效抑制番茄枯萎病的发生。BF 处理还引起了土壤微生物群落组成和土壤化学性质的变化。ZHOU 等^[9]发现健康番茄比患病番茄含有明显更多的微生物种群, 包括

一些众所周知的生防因子芽孢杆菌等,是番茄枯萎病菌的入侵潜在抑制因子。ZHANG 等^[10]发现施生物有机肥改变了西瓜土壤微生物群落组成,提升有益微生物如芽孢杆菌(8.5%)、木霉相对丰度(13.5%),微生物种群多样性增加而镰刀菌相对丰度较低,枯萎病发病率从而降低。XUE 等^[11]发现施用生物有机肥重构了西瓜枯萎病土壤中的抗病微生物菌群。HUANG 等^[12]应用生物肥与酸性土壤改良剂配合施用香蕉枯萎病盆栽防效达 73.3%,同时改善土壤酸碱条件,pH 从 4.50 提高到 5.57。WANG 等^[13]发现与轮作防控香蕉枯萎病相比,施用生物肥料对细菌和真菌群落组成的影响更大。TAO 等^[14]应用 *T. guizhouense* NJAU4742 防治香蕉枯萎病的盆栽试验中,发病率降低,证明了对真菌群落组成和真菌群落内特定相互作用可能是抑制香蕉枯萎病和维持植物健康的重要驱动因素。由于单一生防菌株制剂存在功能有限,因此选用不同功能的生防菌构建微生物菌群,与特定营养基质复配制备微生物菌肥,融合生防菌防病和有机肥促生功能,既克服单一菌株的功能单一的局限,又为菌肥产品中的功能菌株提供有效营养,保障施用后的活性,又利于增产提质^[3-5],具有广阔应用前景。

生防菌株与营养基质复配防控番茄枯萎病的研究尚不多见。绿农林[®]41 复合微生物菌肥(LNL41)是本团队研发的正式登记产品,由优良的生防菌长枝木霉(*T. longibrachiatum* H02)、专利菌株绿色木霉(*T. viride* H06)和枯草芽孢杆菌(*B. subtilis* BLG010)与氨基酸粉等营养复配制备,但田间应用稳定性和防病促生作用尚不明确。本研究选取往年番茄枯萎病严重发生地块为试验地,应用 LNL41 处理番茄的根际土壤,测定番茄根际土壤养分、植株生长、枯萎病发病率,采用 18S rDNA 测序技术分析 LNL41 处理下番茄根际土壤真菌群落结构的差异,探究 LNL41 与番茄枯病发生、根际土壤理化性质及土壤真菌群落之间的关系,为有效利用微生物菌肥绿色防控番茄枯萎病提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株:生防菌长枝木霉 H02,专利菌株绿色木霉 H06 和枯草芽孢杆菌 BLG010 由中国热带农业科学院环境与植物保护研究所/国家肥料

微生物种质资源库(海南)提供。

供试复合物微生物(CM):由生防菌长枝木霉 H02、专利菌株绿色木霉 H06(ZL2012103 23738.2)和枯草芽孢杆菌 BLG010(ZL2012102 48300.2)分别经活化、发酵、离心、去除代谢物,收集沉淀的高浓度菌体并干燥复配获得干粉,总有效活菌数为 5×10^9 CFU/g,其中 H02 活菌数为 8×10^8 CFU/g, H06 活菌数为 14×10^8 CFU/g, BLG010 活菌数为 28×10^8 CFU/g。

供试氨基酸粉:氨基酸含量为 35.6%,购自四川世宏科技有限公司。

供试绿农林[®]41 复合微生物菌肥(LNL41),微生物肥(2019)准字(7527)号,由中国热带农业科学院环境与植物保护研究所研制,海南宝绿春农业开发有限公司生产。取长枝木霉 H02、专利菌株绿色木霉 H06 和枯草芽孢杆菌 BLG010 的高浓度菌体干粉、氨基酸粉和复合肥(15-15-15)复配制备获得。有效成分包括:有机质 $\geq 40\%$, $N+P_2O_5+K_2O=12\%$,总有效活菌数为 5×10^9 CFU/g,其中 H02 活菌数为 8×10^8 CFU/g, H06 活菌数为 14×10^8 CFU/g, BLG010 活菌数为 28×10^8 CFU/g。

供试菌肥营养基质(NS):取 LNL41 水溶后,在 121 °C, 20 min 条件下湿热灭菌。养分指标与 LNL41 相同(有效成分包括:有机质 $\geq 40\%$, $N+P_2O_5+K_2O=12\%$)。

供试番茄品种:海南千禧番茄。

1.2 方法

1.2.1 番茄苗种植 时间:2023 年 10 月 12 日至 2023 年 12 月 22 日。地点:海南省琼海市桥头村番茄基地,常年番茄枯萎病严重发生。土壤以砖红壤为主,该土种土体深厚,质地多为砂质壤土。试验开始前耕层土壤基本理化性质:有机质 10.09 g/kg、铵态氮 39.42 mg/kg、速效磷 102.70 mg/kg、速效钾 123.50 mg/kg、pH 5.50。

1.2.2 试验设计 田间试验在在常规施肥的基础上,分别设置 4 个处理,清水对照(CK)、绿农林[®]复合微生物菌肥(LNL41)、菌肥营养基质(NS)和复合微生物(CM)。不同处理间开沟间隔约 40 cm,随机区组排列,2023 年 10 月 12 日定植,种植行距 60 cm、株距 40 cm,共 4 行,2 个相邻行为 1 组处理,每处理各 200 株,各处理 3 个重复。在常规施肥的基础上。在定植时分别取 LNL41、CM 和 NS 稀释至 500 倍浇灌于番茄根部,然后每 3 周浇灌 1 次,共 5 次。

1.2.3 土壤养分测定 在番茄采收期，采用五点取样法选取 5 株番茄的 10~20 cm 根围土壤 200 g，混匀、去除石块和植物残体、风干，过 200 目筛后，利用灼烧法测量土壤有机质，利用 HM-TYA 型土壤肥料养分速测仪对速效氮、速效磷、速效钾进行测定，利用 TR-8D 盐度检测仪测定盐度，利用 pH 计测定酸碱度。

1.2.4 番茄植株生长测定 番茄收获时，在晴朗的天气下，测定时大气 CO₂ 浓度保持在(380±6.0) μmol/mol，气温 26 ℃，相对湿度(60±4.0)%，每组随机选取 3 株，分别从每株上、下部分选取 3 片健康叶，光合作用采用 LCPRO-SD 便携式光合测定仪，测定时间为 120 s；在自然光下分别从每株上、下部分选取健康叶片，用叶绿素测定仪 TYS-4N 测定叶片叶绿素相对含量（SPAD 值）；从每株上、下部分选取 5 片健康完整叶，用 YMJ-CH 型智能叶面积测定仪测定叶面积；果实成熟，选取番茄的第 1、2 穗果称重进行单株产量的测定；用具有温度自动补偿功能的 MSDR-P1 高精度数显糖度计进行水溶性总糖测定。

1.2.5 土壤呼吸速率 采用 SoilBox-FMS 便携式土壤呼吸测量系统，参考汪军等^[5]的方法测定采收期番茄根际土壤呼吸速率。

1.2.6 田间病害调查 调查番茄枯萎病在苗期、花期、结果期和采收期的发病率，计算不同处理对番茄枯萎病的防治效果。发病率=发病株数/调查总株数×100%；防治效果=(对照发病率-处理发病率)/对照发病率×100%。

1.2.7 土壤真菌微生物多样性测定 取 1.2.3 中采集后经混合、拌匀、去除石块和植物残体土样，委托北京百迈客生物科技有限公司提取土壤总 DNA，基于 Illumina NovaSeq 测序平台，对真菌 ITS1 rDNA 的 ITS1 区进行测序。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016、SAS 9.0、GraphPad Prism 8

软件对试验数据进行统计分析，采用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性水平检验。测序结果使用北京百迈客生物科技有限公司云平台的 Us-earch、QIIME2、R、Python、FUNGuild 等软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对番茄根际土壤养分含量的影响

与 CK 比较，各处理对土壤养分的改善作用表现为 LNL41>CM>NS：各处理间有机质和速效磷含量差异显著；CM 和 NS 处理的铵态氮含量差异不显著，LNL41 和 CM 处理的速效钾含量差异不显著；CK、NS 和 CM 处理间 pH 差异不显著，LNL41 与 CM 处理的 pH 差异不显著；CK 与 NS、LNL41 与 CM、NS 与 CM 处理的盐度差异不显著，但均显著低于 CK（表 1）。

2.2 不同处理对番茄生长的影响

与 CK 比较，各处理促生长作用依次表现为 LNL41>CM>NS：株高、茎围、叶面积、光合作用、叶绿素、产量和水溶性糖增幅分别为 8.87%~34.71%、15.93%~67.62%、13.37%~52.88%、3.17%~12.55%、3.20%~20.49%、4.38%~19.53%、0.46%~8.79%；CK 与 LNL41 处理的各指标间具有显著性差异；CK 和 NS 处理的仅茎围差异显著，其他指标无显著性差异；CK 和 CM 处理的产量和水溶性糖指标差异不显著，其他指标差异显著；LNL41 和 NS 的处理各指标差异显著；LNL41 和 CM 处理的光合作用、叶绿素和水溶性糖差异不显著，其他指标差异显著；NS 和 CM 处理的叶面积、产量和水溶性糖差异不显著，其他指标差异显著（表 2）。

2.3 不同处理对根际土壤呼吸速率的影响

在采收期，与 CK 比较，LNL41、CM、NS 各处理之间根际土壤呼吸速率差异显著，LNL41 处理效果最为显著，其次 CM 处理，NS 次之，土壤呼吸速率分别增加了 59.52%、33.33%和 14.29%（图 1）。

表 1 不同处理番茄根部的土壤养分含量
Tab. 1 Soil nutrient content in tomato roots under different treatments

组别 Group	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	pH	盐度 Salinity/%
CK	10.69±0.75 ^c	36.83±1.35 ^c	113.09±4.12 ^d	237.20±6.14 ^c	5.53±0.15 ^b	0.17±0.02 ^a
LNL41	15.53±0.85 ^a	50.72±2.17 ^a	176.67±5.13 ^a	316.11±12.94 ^a	6.27±0.12 ^a	0.12±0.02 ^c
NS	12.93±0.67 ^b	42.91±3.23 ^b	137.99±6.87 ^c	276.54±11.77 ^b	5.70±0.26 ^b	0.16±0.01 ^{ab}
CM	13.57±1.56 ^b	43.17±1.04 ^b	151.34±5.77 ^b	315.68±14.25 ^a	5.93±0.25 ^{ab}	0.14±0.01 ^{bc}

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

表 2 不同处理对番茄生长特性的影响
Tab. 2 Effect of different treatments on the growth of tomato plant in the field

组别 Group	株高 Plant height/ cm	茎围 Stem circumference/ cm	叶面积 Leaf area/ mm ²	光合作用 Photosynthesis /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	叶绿素 (SPAD) Chlorophyll	产量 Yield/ (kg·plant ⁻¹)	水溶性糖 Water-soluble sugar/%
CK	129.53±3.72 ^c	12.77±0.67 ^d	23.47±1.75 ^c	11.69±0.29 ^b	46.13±1.06 ^b	2.13±0.15 ^b	4.32±0.18 ^b
LNL41	174.50±6.50 ^a	21.40±0.53 ^a	35.88±0.82 ^a	13.16±0.14 ^a	55.59±3.35 ^a	2.55±0.05 ^a	4.70±0.02 ^a
NS	140.80±3.02 ^c	14.80±0.72 ^c	26.60±2.69 ^{bc}	12.06±0.14 ^b	47.61±0.87 ^b	2.22±0.09 ^b	4.34±0.24 ^b
CM	159.73±9.60 ^b	18.10±1.10 ^b	29.50±2.29 ^b	12.86±0.39 ^a	52.91±1.16 ^a	2.26±0.13 ^b	4.47±0.15 ^{ab}

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

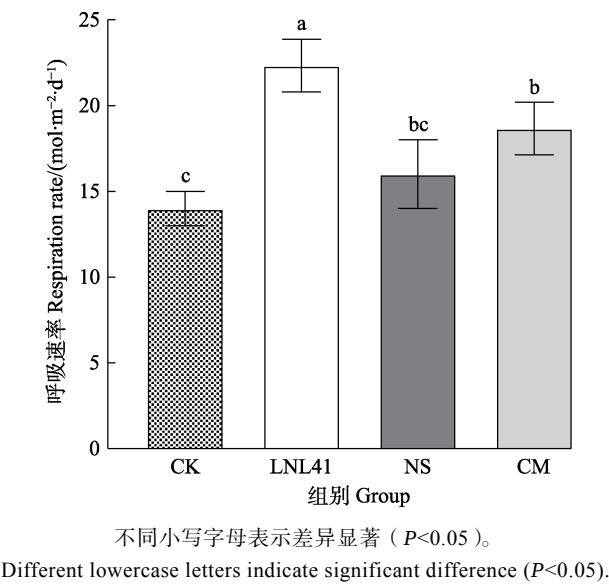


图 1 不同处理对番茄根际土壤呼吸速率的影响
Fig. 1 Effects of different treatments on soil respiration rate in tomato rhizosphere

2.4 不同处理对田间发病率的影响

调查不同处理对不同生长期番茄枯萎病发病率的影响发现（表 3），与 CK 比较，各处理控病作用表现为 LNL41>CM>NS。在苗期，LNL41 与 CM 处理的发病率和防效无显著性差异，但与 NS 处理差异显著；在花期、结果期和采收期各处理

的发病率和防效差异显著；4 个时期的发病率控制在 2.33%~11.67%、7.00%~26.33%、12.67%~40.33%和 16.33%~52.00%，防效分别达 53.25%~90.83%、47.25%~86.04%、45.72%~82.98%和 37.97%~80.50%。

2.5 不同处理对番茄根际土壤真菌群落的影响

2.5.1 α 多样性 由表 4 可知，与 CK 比较，LNL41、NS、CM 处理的物种丰度指标 Ace 指数和 Chao1 指数分别提高了 26.97%~57.71%、24.89%~56.00%，LNL41、CM 处理的多样性指标 Simpson 指数和 Shannon 指数提高了 25.75%~29.45%、39.04%~49.13%，而 NS 处理的 Simpson 指数和 Shannon 指数则分别降低了 24.73%和 32.68%。
2.5.2 科和属水平上的真菌菌群结构组成分析 科水平丰度相对含量（OTU 数相对丰度前 20）排名前 5 的真菌科中（图 2A），Unclassified 为各处理优势科；Hypocreaceae、Nectriaceae 为 LNL41、NS 和 CM 的共有优势科，丰度分别为 7.10%~8.56%、1.77%~1.94%和 7.93%~11.52%。

进一步对各分组样品在属水平（OTU 数相对丰度前 20）的相对丰度进行研究，结果（图 2B）表明，不同处理真菌群落结构存在明显差异，排名前 5 的真菌属中，Unclassified 为各处理共有优

表 3 不同处理对不同生育期番茄枯萎病发病率及防治效果的影响
Tab. 3 Effects of different treatments on the incidence and control effect of tomato *Fusarium* wit at different growth stages

组别 Group	苗期 Seedling stage		花期 Flower stage		结果期 Fruit stage		采收期 Harvest stage	
	发病率 Disease incidence/%	防效 Control efficiency/%	发病率 Disease incidence/%	防效 Control efficiency/%	发病率 Disease incidence/%	防效 Control efficiency/%	发病率 Disease incidence/%	防效 Control efficiency/%
CK	25.33±3.06 ^a		50.33±2.08 ^a		74.33±3.21 ^a		84.00±4.36 ^a	
LNL41	2.33±0.58 ^c	90.83±1.51 ^a	7.00±1.00 ^d	86.04±2.49 ^a	12.67±1.15 ^d	82.98±0.81 ^a	16.33±2.52 ^d	80.50±3.45 ^a
NS	11.67±1.53 ^b	53.25±9.83 ^b	26.33±0.58 ^b	47.25±2.66 ^c	40.33±2.08 ^b	45.72±2.47 ^c	52.00±4.00 ^b	37.97±6.15 ^c
CM	4.67±0.58 ^c	81.34±3.74 ^a	12.33±1.53 ^c	75.36±2.44 ^b	26.67±2.52 ^c	64.17±2.17 ^b	38.33±2.08 ^c	54.21±4.64 ^b

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

表 4 Alpha 多样性指数统计
Tab. 4 Alpha diversity index statistics

组别 Group	特征数 Feature	ACE	Chao1	Simpson	Shannon
CK	91	118.1638	118.5000	0.7137	3.3044
LNL41	177	186.3607	184.8571	0.9239	4.9278
NS	141	150.0294	148.0000	0.5372	2.2244
CM	164	182.8191	171.2000	0.8975	4.5946

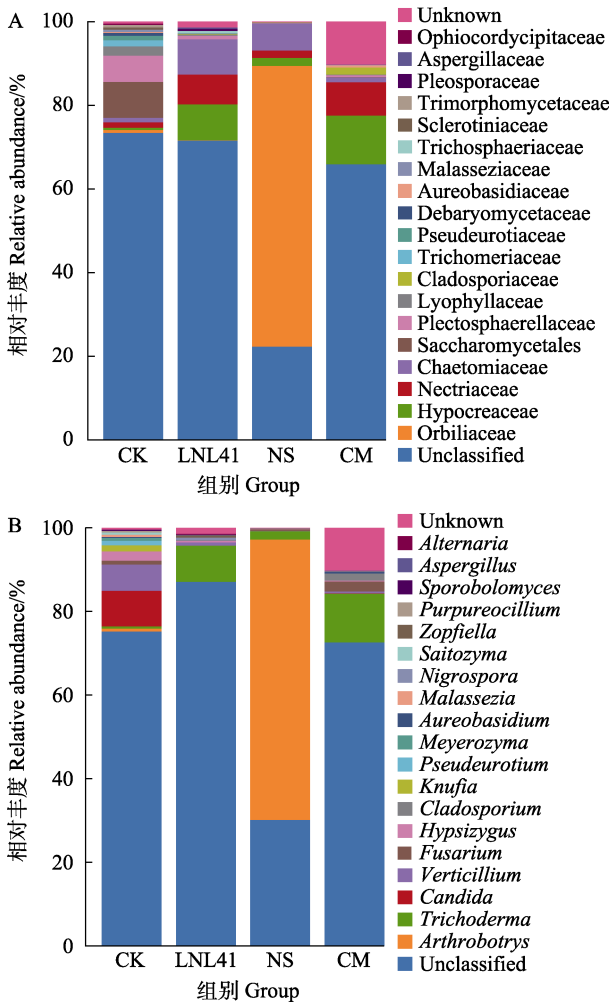


图 2 土壤真菌群落在科水平 (A) 和属水平 (B) 上的相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of soil bacterial communities at family (A) and genus (B) level

势属；*Verticillium* 为 CK 和 LNL41 的共有优势菌属；*Hypsizygus* 为 CK 和 NS 的共有优势属；*Trichoderma* 为 LNL41、NS 和 CM 的共有优势属，丰度分别为 8.56%、1.94%和 11.52%，说明 LNL41 和 CM 的木霉菌株在根际土壤较好定殖。*Fusarium* 为 NS 和 CM 的共有优势属，丰度分别为 0.40%和 2.41%，在 CK 中排名第 7，丰度为 0.93%；在 LNL41 处理中相对丰度排名为第 14，

丰度仅为 0.001%，说明施用 LNL41 降低了 *Fusarium* 在根际土壤中定殖量。

2.5.3 物种丰度聚类热图 图 3 结果显示，纵向聚类表示不同物种在 LNL41 与 NS 枝长较短，2 个处理间丰度相似；横向聚类表示 4 个处理中 *Fusarium* 与 *Aureobasidium* 丰度相似；*Trichoderma* 分别与 *Cladosporium*、*Uwebraunia*、*Aureobasidium* 和 *Fusarium* 丰度相似。

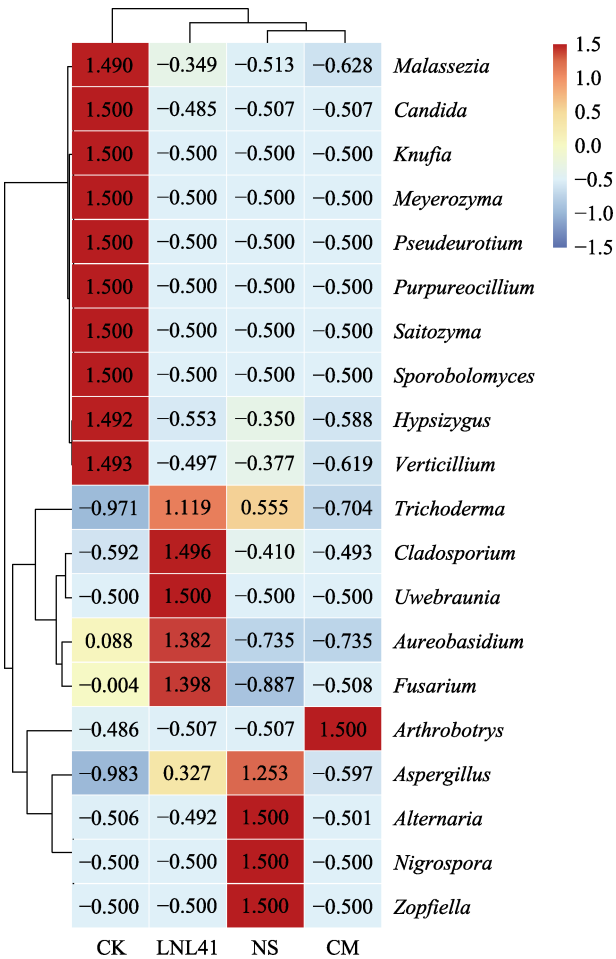


图 3 属水平物种丰度聚类热图
Fig. 3 Cluster heat map of species abundance at genus level

2.5.4 相关性网络图 基于 R 语言绘制相关性最高的前 20 属的网络图 (图 4)，*Trichoderma* 与 *Aspergillus* 和 *Alternaria* 呈正相关。

2.5.5 根际土壤真菌群落 α 多样性指数与土壤理化性质和枯萎病间的相关性分析 由表 5 可知，Chao1 指数与有机质、速效磷、速效钾呈显著正相关关系，与盐度呈显著负相关关系；由表 6 可知，Chao1 指数与土壤呼吸速率呈显著正相关关系，与发病率呈显著负相关关系。

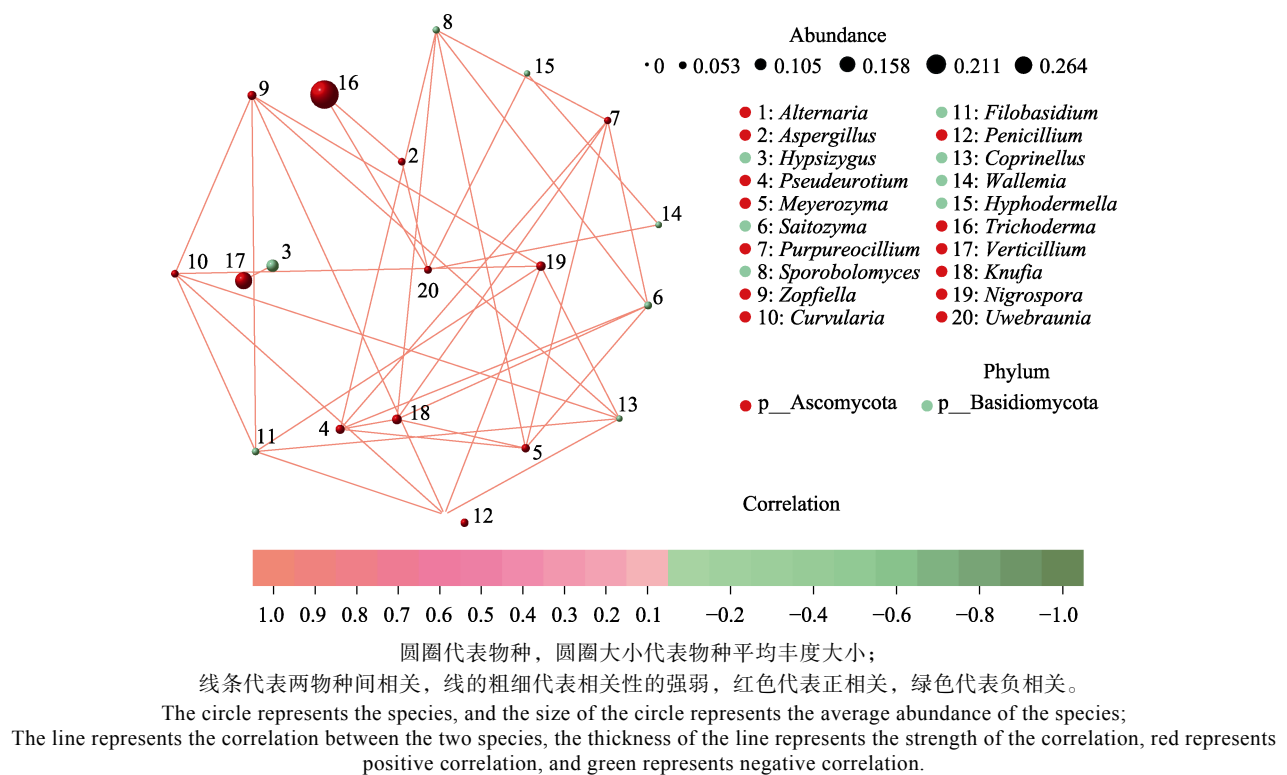


图 4 属水平各物种网络图

Fig. 4 Network map of species at the genus level

表 5 根际土壤真菌群落 α 多样性指数与土壤理化性质间的 Pearson 相关系数

α 多样性指数 α diversity index	有机质 Organic matter	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	pH	盐度 Salinity
Chao1	0.9725*	0.9116	0.9785*	0.9823*	0.9512	-0.9577*
Simpson	0.5658	0.4841	0.6357	0.6569	0.7391	-0.7818

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$).

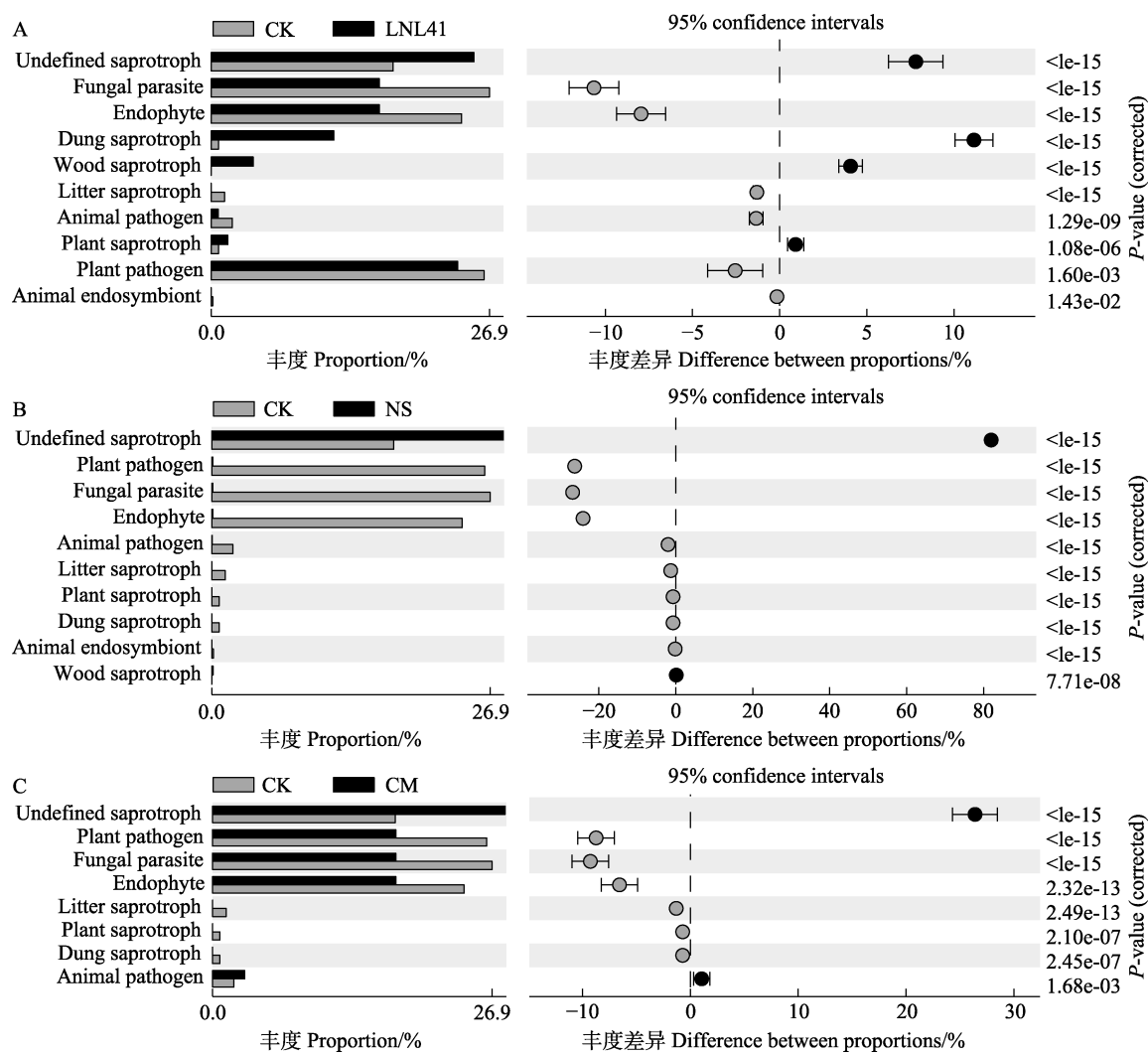
表 6 根际土壤真菌群落 α 多样性指数与发病情况为主要菌属相对丰度间的 Pearson 相关系数

α 多样性指数 α diversity index	木霉属 <i>Trichoderma</i>	镰刀菌属 <i>Fusarium</i>	土壤呼吸速率 Oil respiration rate	发病率 Incidence rate
Chao1	0.8613	-0.0015	0.9574*	-0.9897*
Simpson	0.8268	0.2968	0.7399	-0.5952

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$).

2.5.6 土壤真菌群落功能预测 基于 FUNGuild 预测真菌功能，与 CK 相比，LNL41、NS 处理的功能差异显著有 10 类包括 undefined saprotroph、fungal parasite、endophyte、dung saprotroph、wood

saprotroph、litter saprotroph、animal pathogen、plant saprotroph、plant pathogen、animal endosymbiont。LNL41 处理出现 4 个功能类群丰度上升，NS 和 CM 处理只有 2 个功能类群丰度上升。LNL41 处理的 dung saprotroph、undefined saprotroph、wood saprotroph 和 plant saprotroph 丰度分别增加了 11.15、7.81、4.07、0.92 个百分点，plant pathogen 下降了 2.55 个百分点，endophyte 下降了 7.95 个百分点；NS 处理的 undefined saprotroph、wood saprotroph 丰度分别增加了 81.96、0.12 个百分点，plant pathogen 下降了 26.28 个百分点，endophyte 下降了 24.11 个百分点；CM 处理的 undefined saprotroph、animal pathogen 丰度分别增加了 26.40、1.05 个百分点，plant pathogen 下降了 8.74 个百分点，endophyte 下降了 6.57 个百分点（图 5）。



A、B 和 C 分别为 LNL41、NS 和 CM 处理与 CK 的显著差异功能。
A, B and C showed the significant difference between LNL41, NS, CM and CK, respectively.

图 5 真菌 FUNGuild 功能类群预测

Fig. 5 Fungal FUNGuild function prediction.

3 讨论

微生物菌肥具有改善土壤养分、平衡微生物种群、防控土传病害和增产提质多种功效。郭立佳等^[15]、邵雪凤等^[16]研究发现氨基酸作为营养基质促进芽孢杆菌菌体增值、分泌抑菌物质和促生长物质。土壤养分是土壤肥力的重要特征，微生物菌肥在提高土壤养分方面具有重要作用^[17-18]。本研究应用氨基酸与长枝木霉、绿色木霉和枯草芽孢杆菌制备的复合微生物菌肥，施用到番茄根际后发现对番茄根际土壤养分提升作用表现为 LNL41 最为显著，其次为 CM 和 NS，与 YANG 等^[19]和杨皓等^[20]应用微生物肥缓解土壤酸化，提高土壤速效钾和有机质含量的研究结果相似，由此说明微生物菌肥中的功能菌株利用氨基酸营养

基质增殖，促进根际难溶养分的分解，增加了土壤有效养分的含量。

LIU 等^[21]研究表明，含有芽孢杆菌微生物肥不仅增加了植株根长、根表面积、根体积，还提高了叶片的光合作用速率、相对叶绿素含量等指标。ZHOU 等^[3]施用含有木霉和芽孢杆菌的微生物制剂提升了番茄株高、株重和叶绿素含量，诱导 D-果糖积累。本研究也发现促生作用表现为 LNL41>CM>NS，株高、茎围、叶面积、光合作用、叶绿素、产量和水溶性糖均增幅明显，说明微生物菌肥田间具用良好增产效果，在番茄生产中具有较好的应用前景。

微生物菌肥制剂通过改善土壤生态环境，增加有益微生物数量，改善土壤呼吸等根际生态指

标^[22-23]。CHEN 等^[24]发现施用含有芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis* (X-1) 和 *B. methylotrophicus* (Z-1) 的生物有机肥后, 盆栽草莓枯萎病发病率降低 80.00%; 汪军等^[5, 25]应用含有淡紫拟青霉 E16 和枯草芽孢杆菌 BLG010 的菌肥后, 盆栽和田间香蕉枯萎病发病率分别下降至 26.67% 和 1.10%。本研究中 LNL41 控制土壤呼吸速率提高 59.52%, 各生长期的发病率控制在 2.33%~16.33% 之间, 防效维持在 80.50%~90.83% 之间, 而单独施用 CM 和 NS 处理的从苗期至采收期降幅均较大, 采收期防效仅 54.21% 和 37.97%。由此推断微生物菌群需要利用营养基质提供的关键营养繁殖和分泌拮抗物质, LNL41 施用后在根际形成了有利于复合微生物菌群存活的环境, 从而降低土壤及根系病原菌丰度, 恢复根际有益微生物种类及数量, 提升土壤微生物、根系呼吸速率, 从而提高根系和微生物活性。

施用木霉、芽孢杆菌等生防制剂可增加根际土壤等有益微生物的种群丰度, 诱导土壤中土壤真菌群落丰富度和多样性增加来抑制土传病害香蕉枯萎病和菠萝心腐病^[14, 26]。本研究施用 LNL41、NS 和 CM 后土壤真菌属水平 Ace 指数和 Chao1 指数分别提高了 26.97%~57.71%、24.89%~56.00%, LNL41、CM 处理的多样性指标 Simpson 指数和 Shannon 指数分别提高了 25.75%~29.45%、39.04%~49.13%, 而 NS 处理的多样性指标有所下降。由此推测上述 3 种处理提高了土壤中部分真菌种类丰度, 抑制部分菌群的定殖, 因此多样性指标有所降低。

CHEN 等^[27]施用含有多类芽孢杆菌的生物有机肥提高了菊花根际真菌 α 多样性, *Fusarium* 和 *Glycomyces* 下降, 而 *Cladosporium*、丛植菌根和内生菌水平上升, 与菊花枯萎病发病率呈负相关。健康土壤的真菌群落中, α 多样性始终较大。YUAN 等^[28]分析病区和健康土壤样本发现健康土壤真菌群落中 α 多样性更高, 含有较多慢生根瘤科、丛枝菌科、被孢霉和非致病镰刀菌, 揭示了枯萎病土壤微生物组的关键生物学指标和共同特征, 有助于预测由尖孢镰刀菌引起的枯萎病发生。木霉和芽孢杆菌是防控枯萎病等土传病害的优势生防菌^[3-5], 本研究发现 LNL41 处理后肉座菌科和木霉属丰度均为 8.56%, 分别为丰度排名前 5 的优势科和优势属, 木霉属 (*Trichoderma*) 与 *Aspergillus* 和 *Alternaria* 呈正相关; Chao1 指数与

有机质、速效磷、速效钾和土壤呼吸速率呈显著正相关关系, 与盐度和发病率呈显著负相关关系, 说明微生物菌肥施用后对番茄根际土壤中优势真菌群落具有显著影响。

Funguild 广泛用于土壤真菌功能群预测^[29], 马东旭等^[30]发现指数施肥后 N、P 促进腐生营养性真菌类群逐渐占据主导地位, HUANG 等^[31]发现施用微生物有机肥后烟草根际土壤腐生真菌营养型类群增加。DU 等^[32]发现施用有机肥后提高了土壤中腐生真菌比例和促进药用植物浙贝母的产量。腐生型真菌具有分解植物残体、动物粪便等重要生态作用, 对植物生长具有重要促进作用^[33]。本研究也发现施用微生物菌肥后 4 个功能类群丰度上升, 腐生营养型功能类群 (dung saprotroph、undefined saprotroph、wood saprotroph 和 plant saprotroph) 丰度增加了 0.92~11.15 个百分点, plant pathogen 下降了 2.55 个百分点, endophyte 下降了 7.95 个百分点, 而施用 NS 和 CM 的处理只有 2 个功能类群丰度上升。因此推断施用微生物菌肥后土壤中腐生营养型真菌为土壤中优势功能类群, 加速了对有机质、铵态氮、有效磷和速效钾等养分的分解和循环利用, 改善了土壤养分环境, 同时通过营养竞争和分泌拮抗物质, 抑制了植物病原菌的繁殖, 提高了番茄根系对土壤养分的吸收, 最终有利于番茄植株的抗病、增产和提质。本研究说明施用 LNL41 改变土壤腐生营养型真菌比例, 调控根际抗病性土壤微生物群落形成的作用是显著的。

4 结论

绿农林[®]41 复合微生物菌肥可改善番茄根际养分有机质、铵态氮、速效磷、盐度和 pH, 促进株高、茎围、叶面积、光合作用、叶绿素、水溶性糖和产量生长指标, 提高土壤呼吸速率, 控制番茄枯萎病发病率, 改善土壤真菌群落结构, 提升腐生营养型功能类群等有益微生物丰度, 表明绿农林[®]41 复合微生物菌肥根际施用防病促生作用显著, 应用前景良好。

参考文献

- [1] MANDAL S, MALLICK N, MITRA A. Salicylic acid-induced resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(7): 642-649.

- [2] 申云鑫, 李铭刚, 施竹凤, 赵江源, 王楠, 李者芬, 杨佩文. 贝莱斯芽孢杆菌 SH-1471 可湿性粉剂研制及其对番茄枯萎病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(4): 904-914.
SHEN Y X, LI M G, SHI Z F, ZHAO J Y, WANG N, LI Z F, YANG P W. Development of wettable powder of *Bacillus velezensis* SH-1471 and its control effect on tomato *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(4), 904-914. (in Chinese)
- [3] ZHOU Y, YANG L Y, WANG J, GUO L J, HUANG J S. Synergistic effect between *Trichoderma virens* and *Bacillus velezensis* on the control of tomato bacterial wilt disease[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 1-14.
- [4] CHEN P, ZHANG J L, LI M, FANG F, HU J D, SUN Z W, ZHANG A S, GAO X X, LI J. Synergistic effect of *Bacillus subtilis* and *Paecilomyces lilacinus* alleviating soil degradation and improving watermelon yield[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1-11.
- [5] 汪军, 周游, 杨腊英, 刘磊, 符红文, 黄俊生. 施用复合菌肥与套作对香蕉枯萎病控病作用的影响[J]. 中国果树, 2019(6): 69-72.
WANG J, ZHOU Y, YANG L Y, LIU L, FU H W, HUANG J S. Effects of compound microbial fertilizer application and intercropping on controlling *Fusarium* wilt of banana[J]. Chinese Fruit, 2019(6): 69-72. (in Chinese)
- [6] 杜婵娟, 杨迪, 潘连富, 叶云峰, 张晋, 付岗. 香蕉枯萎病生防菌肥的优化及其防病促生效果研究[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(3): 396-404.
DU C J, YANG D, PAN L F, YE Y F, ZHANG J, FU G. Bio-fertilizer optimization and its control effect on banana *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(3): 396-404. (in Chinese)
- [7] 贺字典, 武春成, 沈江洁, 高玉峰, 常连生, 高增贵. 棘孢木霉菌肥对黄瓜枯萎病的防治效果及对连作黄瓜根际土壤微生物种群的影响[J]. 植物保护学报, 2018; 45(3): 528-535.
HE Z D, WU C C, SHEN J J, GAO Y F, CHANG L S, GAO Z G. Effects of *Trichoderma asperellum* bio-fertilizer on cucumber *Fusarium* wilt and microbial population in continuous cucumber cropping rhizosphere soil[J]. Journal of Plant Protection, 2018, 45(3): 528-535. (in Chinese)
- [8] TANG T T, SUN X, LIU Q, DONG Y H, ZHA M F. Treatment with organic manure inoculated with a biocontrol agent induces soil bacterial communities to inhibit tomato *Fusarium* wilt disease[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1-11.
- [9] ZHOU X, WANG J T, WANG W H, TSUI C K, CAI L. Changes in bacterial and fungal microbiomes associated with tomatoes of healthy and infected by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*[J]. Microbial Ecology, 2021, 81(4): 1004-1017.
- [10] ZHANG X, XUE C, FANG D, HE X, WEI M, ZHUO C, SHEN Q. Manipulating the soil microbiomes during a community recovery process with plant beneficial species for the suppression of *Fusarium* wilt of watermelon[J]. AMB Express, 2021, 11(1): 87.
- [11] XUE C, SHEN Z, HAO Y, YU S, LI Y, HUANG W, SHEN Q. Fumigation coupled with bio-organic fertilizer for the suppression of watermelon *Fusarium* wilt disease re-shapes the soil microbiome[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 140: 49-56.
- [12] HUANG J, PANG Y, CHENG G, WU T, HUANG Q, HUANG X, LI P. Biofertilizer made from a mixed microbial community can enhance the suppression of *Fusarium* wilt of banana when combined with acid soil ameliorant[J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 165(2): 333-348.
- [13] WANG B, SUN M, YANG J, SHEN Z, OU Y, FU L, SHEN Q. Inducing banana *Fusarium* wilt disease suppression through soil microbiome reshaping by pineapple-banana rotation combined with biofertilizer application[J]. Soil, 2022, 8(1): 17-29.
- [14] TAO C, WANG Z, LIU S, LYU N, DENG X, XIONG W, KOWALCHUK G A. Additive fungal interactions drive biocontrol of *Fusarium* wilt disease[J]. New Phytologist, 2023, 238(3): 1198-1214.
- [15] 郭立佳, 汪军, 杨腊英, 梁昌聪, 周游, 刘磊, 黄俊生. 含氨基酸水溶肥料对 2 株芽孢杆菌的激活作用[J]. 热带作物学报, 2020, 41 (3): 549-555.
GUO L J, WANG J, YANG L Y, LIANG C C, ZHOU Y, LIU L, HUANG J S. Activation of two *Bacillus* strains by an amino acids-containing water-soluble fertilizer[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(3): 549-555. (in Chinese)
- [16] 邵雪凤. 防控土传病害的绿农林®41 号菌肥田间激活技术研究与应用[D]. 2020, 武汉: 华中农业大学.
SHAO X F. Research and application of LVnoglin® 41 bacterial fertilizers field activation technology to prevent and control soil-borne diseases[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [17] 韦中, 沈宗专, 杨天杰, 王孝芳, 李荣, 徐阳春, 沈其荣. 从抑病土壤到根际免疫: 概念提出与发展思考[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 814-824.
WEI Z, SHEN Z Z, YANG T J, WANG X F, LI R, XU Y C, SHEN Q R. From suppressive soil to rhizosphere immunity: towards an ecosystem thinking for soil-borne pathogen control[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 814-824. (in Chinese)
- [18] YU X, ZHANG Y, SHEN M, DONG S, ZHANG F, GAO Q, HE P, SHEN G, YANG J, WANG Z, BO G. Soil conditioner affects tobacco rhizosphere soil microecology[J]. Microbial

- Ecology, 2023, 86(1): 460-473.
- [19] YANG W, GONG T, WANG J, LI G, LIU Y, ZHEN J, CHEN G. Effects of compound microbial fertilizer on soil characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20: 2740-2748.
- [20] 杨皓, 庄家尧, 郑康, 孙永涛. 不同载体菌肥对刺槐光合特性及土壤养分、细菌群落的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(4): 844-853.
- YANG H, ZHUANG J Y, ZHENG K, SUN Y T. Effects of different carrier bacterial fertilizers on photosynthetic characteristics, soil nutrients and bacterial communities of *Robinia pseudoacacia* L.[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(4): 844-853. (in Chinese)
- [21] LIU J, LI H, YUAN Z, FENG J, CHEN S, SUN G, HU T. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112553.
- [22] 胡哲伟, 金淑, 应蓉蓉, 刘国强. 蚓粪和益生菌配施对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(11): 201-207.
- HU Z W, JIN S, YING R R, LIU G Q. Effects of combined application of earthworm manure and probiotics on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2021, 49(11): 201-207. (in Chinese)
- [23] 黄璐璐, 王站付, 邱韩英, 杨业凤, 王振旗, 薄玉华. 施用稻秸沼渣肥料对西蓝花产量及土壤环境的影响[J]. 北方园艺, 2022(20): 76-83.
- HUANG L L, WANG Z F, QIU H Y, YANG Y F, WANG Z Q, BO Y H. Effects on broccoli production and soil environmental quality by applying qiogas residue-based fertilizers of rice straw[J]. Northern Horticulture, 2022(20): 76-83. (in Chinese)
- [24] CHEN Y, XU Y P, ZHOU T, AKKAYA M S, WANG L L, LI S Y, LI X Y. Biocontrol of *Fusarium* wilt disease in strawberries using bioorganic fertilizer fortified with *Bacillus licheniformis* X-1 and *Bacillus methylotrophicus* Z-1[J]. 3 Biotech, 2020, 10: 1-14.
- [25] 汪军, 梁昌聪, 周游, 王国芬, 杨腊英, 刘磊, 黄俊生. 复合微生物肥料对香蕉枯萎病防控作用研究[J]. 热带农业科学, 2017, 37(8): 36-41.
- WANG J, LIANG C C, ZHOU Y, WANG G F, YANG L Y, LIU L, HUANG J S. Effect of compound microbial fertilizer on controlling of *Fusarium* wilt of banana[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(8): 36-41. (in Chinese)
- [26] 胡英宏, 赵艳, 任泽广, 杨妹钰, 唐浩真, 张晓波, 王蓓蓓, 吕烈武. 生物有机肥对菠萝根际真菌群落及心腐病发生率的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(9): 1678-1690.
- HU Y H, ZHAO Y, REN Z G, YANG S Y, TANG H Z, ZHANG X B, WANG B B, LYU L W. Effects of bio-organic fertilizers on rhizospheric fungal community and occurrence of heart rot disease in pineapple[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(9): 1678-1690. (in Chinese)
- [27] CHEN H, ZHAO J, JIANG J, ZHAO Z, GUAN Z, CHEN S, ZHAO S. Effects of inorganic, organic and bio-organic fertilizer on growth, rhizosphere soil microflora and soil function sustainability in chrysanthemum monoculture[J]. Agriculture, 2021, 11: 1-14.
- [28] YUAN J, WEN T, ZHANG H, ZHAO M, PENTON C R, THOMASHOW L S, SHEN Q. Predicting disease occurrence with high accuracy based on soil macroecological patterns of *Fusarium* wilt[J]. The ISME Journal, 2020, 14(12): 2936-2950.
- [29] 阚海明, 陈超, 马晓东, 徐恒康, 庞卓, 张国芳, 武菊英. 华北退化荒地建植豆类和禾本植物人工草地对土壤真菌群落结构和功能的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10092-10103.
- KAN H M, CHEN C, MA X D, XU H K, PANG Z, ZHANG G F, WU J Y. Effects of artificial grassland establishment via legume and grass plants on the structure and function of soil fungal community in a degraded wasteland of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10092-10103. (in Chinese)
- [30] 马东旭, 王佳琪, 蓝伟立, 陈垚明, 李茂, 叶义全, 林开敏. 指数施肥对杉木容器育苗基质真菌群落及功能类群的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(2): 388-396.
- MA D X, WANG J Q, LAN W L, CHEN K M, LI M, YE Y Q, LIN K M. Response of fungal communities in container seedling substrates of *Cunninghamia lanceolata* to exponential fertilization[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(2): 388-396. (in Chinese)
- [31] HUANG B, CHEN Y, PEI Z, JIANG L, ZHANG Y, WANG J, WANG J. Application of microbial organic fertilizers promotes the utilization of nutrients and restoration of microbial community structure and function in rhizosphere soils after dazomet fumigation[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1-16.
- [32] DU J, YU Y, TANG C, ZONG K, ZHANG Q, LI Y. Organic fertilizers increase the proportion of saprotrophs favoring soil nitrification under medicinal plants *Fritillaria thunbergii*[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 219: 1-10.
- [33] 朱文娟, 任月梅, 杨忠, 郭瑞锋, 张绶, 任广兵. 谷子土壤微生物群落结构及功能预测分析[J]. 作物杂志, 2023(5): 170-178.
- ZHU W J, REN Y M, YANG Z, GUO R F, ZHANG S, REN G B. Structure and predicted functional analysis of microbial community of millet soil[J]. Crops, 2023(5): 170-178. (in Chinese)