

# 不同微生物菌剂对辣椒疫病防控效果及土壤细菌群落结构的影响

杜公福<sup>1</sup>, 黄永<sup>3</sup>, 黄大野<sup>2</sup>, 倪征平<sup>3</sup>, 李晓亮<sup>1</sup>, 彭家丽<sup>1</sup>, 刘维侠<sup>1</sup>, 戚志强<sup>1\*</sup>

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/儋州菜田土壤海南省野外科学观测研究站, 海南海口 571101; 2. 湖北省生物农药工程研究中心/国家生物农药工程技术研究中心, 湖北武汉 430064; 3. 成都特普生物科技股份有限公司, 四川成都 610097

**摘要:** 明确不同微生物菌剂对辣椒疫病的防控及其对根际土壤细菌群落结构的影响, 为辣椒疫病的绿色防治技术的研发提供依据。采用盆栽试验方法, 以枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)、哈茨木霉菌 (*Trichoderma harzianum*)、荧光假单胞杆菌 (*Pseudomonas fluorescens*)、淡紫褐链霉菌 (*Streptomyces enissocaeslis*) 等 6 种微生物菌剂为研究对象, 通过高通量测序研究这些微生物菌剂对辣椒疫病的防控效果及其对根际土壤细菌群落结构的影响。结果表明, A<sub>1</sub> (1×10<sup>8</sup> CFU/g 枯草芽孢杆菌微囊剂)、A<sub>2</sub> (1×10<sup>8</sup> CFU/g 哈茨木霉菌水分散剂) 处理的防效最好, 防治效果分别为 85.58% 和 81.97%; A<sub>3</sub> (5×10<sup>8</sup> CFU/g 荧光假单胞杆菌颗粒剂)、A<sub>4</sub> (4×10<sup>9</sup> CFU/g 淡紫褐链霉菌 NBF715 粉剂)、A<sub>5</sub> (1×10<sup>10</sup> CFU/g 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂)、A<sub>6</sub> (3×10<sup>8</sup> CFU/g 哈茨木霉菌可湿性粉剂)、A<sub>7</sub> (50% 多菌灵可湿性粉剂) 的防治效果分别为 47.17%、49.12%、30.60%、39.86%、25.83%。基于高通量测序分析, 辣椒根际土壤细菌群落组成在门水平上, 不同微生物菌剂处理均提高了变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidota) 的占比, 尤其是 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理显著提高了变形菌门、拟杆菌门的丰富度; 在科水平上, 微生物菌剂处理均提高了噬几丁质菌科 (Chitinophagaceae)、类固醇杆菌科 (Steroidobacteriaceae) 和微球菌科 (Micrococcaceae) 的丰富度, 其中 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理的提高幅度均达显著差异。通过 Venn 图分析 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>7</sub>、A<sub>8</sub> (接种辣椒疫霉菌) 处理和 CK (清水) 的辣椒根际土壤中细菌总 OTU 数量和特有细菌 OTU 数量, 结果表明, A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 处理增加了辣椒根际土壤中细菌总 OTU 数量和特有的优势细菌数量, 而 A<sub>7</sub> 处理降低了土壤细菌丰富度和多样性。综上, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理的辣椒疫病防治效果均达 80% 以上, 而且增加了辣椒根际土壤中特有优势细菌的丰富度和多样性, 增强了辣椒抵抗辣椒疫霉菌侵染的能力, 可用于防治辣椒疫病。同时化学药剂多菌灵 (A<sub>7</sub>) 降低了土壤细菌的丰富度和多样性, 使病原菌能够更加快速地入侵辣椒根系。

**关键词:** 微生物菌剂; 辣椒疫病; 防控效果; 土壤细菌群落

中图分类号: S436.418.1 文献标识码: A

## Control Efficacy of Different Microbial Agent on Pepper Phytophthora Blight and Effects on Soil Bacterial Community

DU Gongfu<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>, HUANG Daye<sup>2</sup>, NI Zhengping<sup>3</sup>, LI Xiaoliang<sup>1</sup>, PENG Jiali<sup>1</sup>, LIU Weixia<sup>1</sup>, QI Zhiqiang<sup>1\*</sup>

1. Tropical Crops Germplasm Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Field Soil Scientific Research Station in Danzhou of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Hubei Biopesticide Engineering Research Center / National Biopesticide Engineering Research Center, Wuhan, Hubei 430064, China; 3. Chengdu Tepu Biothch Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610097, China

收稿日期 2022-09-02; 修回日期 2022-09-28

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 321QN319); 湖北省重点研发计划项目 (No. 2021BGD011)。

作者简介 杜公福 (1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 蔬菜病害防治。\*通信作者 (Corresponding author): 戚志强 (QI Zhiqiang), E-mail: adu209209@163.com。

**Abstract:** This paper aimed to clarify the effect of different microbial agents on pepper blight and the influence of rhizosphere soil bacterial community structure, and to provide a green prevention technical basis for reducing the occurrence of pepper blight. Six microbial agents, including *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens* and *Streptomyces enissocaesllis* were selected as the main research objects to study the effects on the control of pepper blight and the bacterial community structure in rhizosphere soil under pot experiment by high-throughput sequencing. A<sub>1</sub> (1×10<sup>8</sup> CFU/g of *B. subtilis* microcapsule) and A<sub>2</sub> (1×10<sup>8</sup> CFU/g of *T. harzianum* water-dispersed granule) had the best control effect, and the control effect was 85.58% and 81.97%, respectively, and others the control effects of A<sub>3</sub> (5×10<sup>8</sup> CFU/g *Pseudomonas fluorescence* granules). The best control effect of A<sub>4</sub> (4×10<sup>9</sup> CFU/g *S. enissocaesllis* NBF715 powder), A<sub>5</sub> (1×10<sup>10</sup> CFU/g *B. subtilis* wettable powder), A<sub>6</sub> (3×10<sup>8</sup> CFU/g *T. harzianum* wettable powder) and A<sub>7</sub> (50% carbendazim wettable powder) was 47.17%, 49.12%, 30.60%, 39.86%, 25.83%, respectively. Based on the high-throughput sequencing analysis, the bacterial community composition of pepper rhizosphere soil at phylum level, different microbial agents increased the proportion of Proteobacteria and Bacteroidota, especially A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> significantly increased the richness of Proteobacteria and Bacteroidetes. At the family level, the richness of Chitinophagaceae, Steroidobacteriaceae and Micrococcaceae were improved by microbial agent treatment, and significant difference was found between A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> treatments. The total number of bacterial OTUs and the number of unique bacterial OTUs in the rhizosphere soil of Capsicum treated with A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>7</sub>, A<sub>8</sub> (treatment of inoculated *P. capsici*) and CK (water) were analyzed by Venn diagram. The total number of bacterial OTUs and the number of unique dominant bacteria in the rhizosphere soil of capsicum increased in the A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> treatments, while the richness and diversity of soil bacteria decreased in the A<sub>7</sub> treatment. In conclusion, the control effect of A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> on pepper blight was more than 80%, and the richness and diversity of unique dominant bacteria in the rhizosphere soil of pepper increased, and the ability of pepper to resist *P. capsici* infection was enhanced. A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> could be used as agents to control pepper *Phytophthora* blight. At the same time, the use of carbendazim reduced the richness and diversity of soil bacteria, and the pathogen could invade the root of pepper more quickly after the reduction of microbial diversity.

**Keywords:** microbial agent; pepper blight; control effect; soil bacterial community

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.015

辣椒疫病是由辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici*) 引起的一种毁灭性的土传病害<sup>[1]</sup>, 自该病在我国被发现以来, 在有辣椒种植的省份均有发生与危害, 可为害辣椒茎秆、果实、叶片等部位, 常造成全株萎蔫死亡, 一般可造成 20%~30% 的产量损失, 严重时甚至绝收, 辣椒疫病的防控已成为辣椒生产中亟需解决的重大难题<sup>[2-3]</sup>。辣椒是海南主要冬季瓜菜之一, 种植面积约 4×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 占冬季瓜菜种植面积的 20%<sup>[4]</sup>, 其产品主要在“两节”期间销往国内各大城市, 因此, 在农产品质量安全方面实行最严格的规定, 为了杜绝农药残留超标, 在 2021 年海南省印发的《海南省化学农药化肥减量实施总体方案》中指出, 到 2025 年化学农药使用量较 2020 年减少 15%, 在此背景下, 寻找能够减少化学农药施用的高效防控辣椒疫病的手段成为辣椒产业可持续健康发展的关键。

目前, 化学农药、轮作、嫁接等常规措施均能在辣椒疫病防控中起到一定的效果, 但受到抗药性、农药残留与环境污染、土地因素、生产成本等问题的影响, 在实际生产中均存在一定的限制<sup>[5-6]</sup>, 而有益微生物的应用将不受这些因素的限

制, 是一种高效、绿色、环境友好的防控技术, 符合产业发展的需求。因此, 有效微生物菌剂的筛选和应用是辣椒疫病绿色防治的重要工作。近年来, 许多研究表明, 多种有益微生物对辣椒疫病具有生物防治作用, 包括芽孢杆菌、木霉菌及放线菌等<sup>[7-10]</sup>。芽孢杆菌和木霉菌繁殖速度快、生命力强, 在与栖居微生物竞争时, 因有较强的定殖能力而具有明显的优势, 并能产生有机酸、酶以及抗菌肽等丰富的代谢物, 从而有效抑制病原菌生长<sup>[11-14]</sup>。韩永琴等<sup>[15]</sup>利用 10<sup>9</sup> CFU/g 多黏类芽孢杆菌可湿性粉剂、25% 噬菌酯悬浮剂和 68% 精甲霜·锰锌水分散粒剂对辣椒疫病进行防效试验, 防效分别为 74.35%、71.54% 和 76.30%; 胡建坤等<sup>[16]</sup>利用 50% 烯酰吗啉可湿性粉剂、687.5 g/L 氟菌·霜霉威悬浮剂和 15% 木霉可湿性粉剂对辣椒疫病进行田间防效试验, 防效分别为 65.08%、68.99% 和 67.04%, 这些研究结果说明多黏类芽孢杆菌、木霉菌已经达到与化学农药同等的防治效果。

目前用于防治辣椒疫病的微生物菌剂较多, 但防治效果的稳定性存在不确定性<sup>[17]</sup>, 导致种植户选择困难; 另外, 已有的研究大多关注防病效

果、地上部性状和基于传统方法可培养微生物群落分析<sup>[18]</sup>。而运用高通量测序技术可对辣椒根际中的细菌群落进行全面地鉴定分析,可更精准地挖掘出影响辣椒疫病防控效果的关键土壤微生物群落。基于本课题组前期收集、筛选获得对辣椒疫霉菌有较好抑制作用的枯草芽孢杆菌、哈茨木霉菌等 6 种微生物菌剂,为了探究其对辣椒疫病的防控效果及其对土壤细菌群落结构的变化,本研究拟通过盆栽试验开展 6 种微生物菌剂对辣椒疫病的防控效果研究,通过高通量测序技术分析辣椒根际土壤细菌群落结构的变化,以期明确不同微生物菌剂的防治效果及其对辣椒根际土壤微生物种群的影响,为应用微生物菌剂绿色防治辣椒疫病提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试微生物菌剂和化学药剂共 7 种(表 1)。

表 1 各处理及所用药剂来源

Tab. 1 Origin of test sample in different treatments

编号 No.	处理 Treatment	含量 Content	剂型 Form	来源 Origin
A <sub>1</sub>	枯草芽孢杆菌	1×10 <sup>8</sup> CFU/g	微胶囊剂	成都特普生物科技股份有限公司
A <sub>2</sub>	哈茨木霉菌	1×10 <sup>8</sup> CFU/g	水分散剂	成都特普生物科技股份有限公司
A <sub>3</sub>	荧光假单胞杆菌	5×10 <sup>8</sup> CFU/g	颗粒剂	成都特普生物科技股份有限公司
A <sub>4</sub>	淡紫褐链霉菌 NBF715	4×10 <sup>9</sup> CFU/g	粉剂	武汉楚强生物科技有限公司
A <sub>5</sub>	枯草芽孢杆菌	1×10 <sup>10</sup> CFU/g	可湿性粉剂	德强生物股份有限公司
A <sub>6</sub>	哈茨木霉菌	3×10 <sup>8</sup> CFU/g	可湿性粉剂	中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所
A <sub>7</sub>	多菌灵	50%	可湿性粉剂	四川润尔科技有限公司
A <sub>8</sub>	辣椒疫霉菌	孢子浓度 1×10 <sup>6</sup> 个/mL		中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所
CK	等量清水, 不接菌			

1.2.2 病情调查与样品采集 接种后 15 d 进行病情指数调查,辣椒疫病调查分级<sup>[19]</sup>。0 级: 无病; 1 级: 幼苗根茎部轻微水渍状变褐, 叶片不萎蔫或可恢复性萎蔫; 2 级: 幼苗根茎部变水渍状褐色, 发病部位长度 1~2 cm, 叶片不可恢复性萎蔫, 下部叶片偶有脱落; 3 级: 幼苗根茎部变水渍状褐色, 发病部位长度超过 2 cm, 叶片明显萎蔫或落叶明显; 4 级: 幼苗根茎部变水渍状褐色, 并且茎秆有缢缩现象, 除生长点外全部落叶或植株萎蔫; 5 级: 植株枯死。

辣椒幼苗移栽 30 d 后采集土样。采集 9 个处理辣椒根际土壤, 每个重复取 3 株混合土样为 1 个样本, 每个处理取 3 个样本, 共 27 个样本, 分

供试菌株辣椒疫霉菌分离保存于中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所冬季瓜菜研究中心。供试辣椒品种为海椒 309, 购于海南琼研瓜菜良种开发有限公司。

### 1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2021 年 11—12 月在中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所五队科研基地大棚内进行。试验设 9 个处理(表 1), 设 3 次重复, 每次重复 4 株。将苗龄一致, 4~5 叶期健壮的辣椒幼苗移栽至装有土的栽培盆(14.8 cm×13.5 cm)中, 移栽当天进行药剂灌根, A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> 处理的药剂均稀释 300 倍液, A<sub>7</sub> 处理的药剂稀释 500 倍液, 进行均匀灌根, 每次每株灌根 300 mL 药水, A<sub>8</sub>、CK 处理等量清水, 每隔 5 d 灌根 1 次, 连续 2 次。待第 2 次灌根后 3 d 采用伤根法接种辣椒疫霉菌, A<sub>1</sub>~A<sub>8</sub> 处理接种辣椒疫霉菌游动孢子悬浮液 10 mL/株(浓度 10<sup>6</sup> 个/mL), 等量清水不接菌为对照(CK)。

别用无菌袋封装, 做好标记带回实验室, 置于 -40 °C 保存备用。将采集的 27 个土样送至上海美吉生物医药科技有限公司, 并采用高通量测序技术完成细菌群落的结构分析。

### 1.3 数据处理

1.3.1 计算发病率及病情指数 采用 Excel 2003 软件对试验数据进行基本处理, 计算发病率和病情指数。

$$\text{发病率} = \frac{\text{发病株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\%$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{各病级值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级值}} \times 100$$

1.3.2 土壤细菌群落数据分析 采用 DPS 软件

进行方差分析。利用上海美吉生物医药科技有限公司提供的云数据分析平台 I-sanger 进行辣椒根际土壤细菌多样性分析, 构建物种组成群落图。细菌多样性指数选用 Ace 指数、Chao 1 指数、Shannon 指数及 Simpson 指数。Ace 指数和 Chao 1 指数是衡量物种丰富度的指数, 数值的大小表示物种丰富度的高低, 指数越大, 说明物种的丰富度越高; Shannon 指数用于衡量物种多样性, 而 Simpson 指数表示在群落中随机抽样的个体属于同一物种的概率, 也用来衡量物种多样性, Shannon 指数越大, Simpson 指数越小, 说明样品的物种多样性越高<sup>[20-23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同微生物菌剂对辣椒疫病的防控效果

在接种后第 15 天进行发病情况调查 (表 2), A<sub>1</sub> 处理的辣椒植株病情指数为 13.33, 防治效果为 85.58%; A<sub>2</sub> 处理的病情指数为 16.67, 防治效果为 81.97%; A<sub>3</sub> 处理的病情指数为 48.33, 防治效果为 47.17%; A<sub>4</sub> 处理病情指数 46.67, 防治效果为 49.12%; A<sub>5</sub> 处理病情指数为 63.33, 防治效果为 30.60%; A<sub>6</sub> 处理病情指数为 55.00, 防治效果为 39.86%; A<sub>7</sub> 处理的病情指数为 68.33, 防治效果为 25.83%。结果表明, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理具有较好的防治效果, 防效均达 80% 以上。

表 2 不同微生物菌剂对辣椒疫病的防控效果  
Tab. 2 Control effects of different microbial agents on pepper *Phytophthora* blight

处理 Treatment	发病率 Disease incidence/%	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%
A <sub>1</sub>	16.67	13.33	85.58±5.81
A <sub>2</sub>	16.67	16.67	81.97±5.25
A <sub>3</sub>	50.00	48.33	47.17±2.74
A <sub>4</sub>	50.00	46.67	49.12±1.40
A <sub>5</sub>	66.67	63.33	30.60±2.58
A <sub>6</sub>	58.33	55.00	39.86±2.72
A <sub>7</sub>	66.67	68.33	25.83±2.13
A <sub>8</sub>	100.00	91.67	
CK	0.00	0.00	

### 2.2 不同微生物菌剂对根际土壤细菌群落结构的影响

2.2.1 根际土壤细菌多样性 A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> 处理的辣椒根际土壤的细菌 Ace 指数、Chao 1 指数和 Shannon

指数显著高于 A<sub>7</sub> 处理 (多菌灵), 而 Simpson 指数显著低于 A<sub>7</sub> 处理, 并且其他微生物菌剂处理之间无显著差异 (表 3)。本次测序各样本文库的覆盖率 (coverage) 均大于 97%, 因此, 研究结果可以代表样本中微生物的真实情况, 表明利用微生物菌剂对辣椒疫病进行防控不仅有助于显著提高辣椒根际土壤细菌的多样性, 而且也有利于显著提高土壤细菌的丰富度。

2.2.2 基于门分类水平的优势菌群分析 基于门分类水平分析发现, A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> (微生物菌剂)、A<sub>7</sub> (多菌灵)、A<sub>8</sub> (辣椒疫霉菌)、CK 处理的辣椒根际土壤中共有的优势细菌门有 12 个 (图 1)。其中, 变形菌门 (Proteobacteria) 细菌占比最高, 幅度在 31.72%~37.73% 之间; 其他优势细菌中放线菌门 (Actinobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、蓝藻菌门 (Cyanobacteria) 在各处理间的占比差异不大。但不同微生物菌剂处理均提高了变形菌门、拟杆菌门 (Bacteroidota) 的占比, 尤其是 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理显著提高了变形菌门、拟杆菌门的丰富度; 同时 A<sub>7</sub> 处理改变了髌骨细菌门 (Patescibacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、拟杆菌门、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota)、粘细菌门 (Myxococcota) 的占比, 其中髌骨细菌门的丰度显著升高, 而绿弯菌门 (Chloreflexi)、厚壁菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门、粘细菌门的丰度明显降低。

2.2.3 基于科分类水平的优势菌群分析 基于科分类水平分析发现 (图 2), A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> (微生物菌剂)、A<sub>7</sub> (多菌灵)、A<sub>8</sub> (辣椒疫霉菌)、CK 处理的辣椒根际土壤中组成占比大于 1% 的优势细菌科有 16 个, 还有占比小于 1% 的未知菌科 (以 others 表示)。其中黄色杆菌科 (Xanthobacteraceae) 占比最高, 幅度在 5.36%~7.80% 之间。而且黄色杆菌科、高温单孢菌科 (Thermo monosporaceae)、微单孢菌科 (Micromonosporaceae)、Rhizobiales\_Incertae\_Sedis、芽单胞菌科 (Gemmatimonadaceae)、Devosiaceae、热微菌科 (Thermomicrobiaceae)、罗丹诺杆菌科 (Rhodanobacteraceae)、生丝微菌科 (Hyphomicrobiaceae)、鞘脂单孢菌科 (Sphingomonadaceae)、类诺卡氏菌科 (Nocardioideae) 在 A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>、A<sub>8</sub>、CK 处理之间的占比差异不大。

A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> 与 A<sub>7</sub>、A<sub>8</sub>、CK 处理相比, 在噬几丁

表 3 不同微生物菌剂对辣椒根际土壤细菌多样性指数的影响

Tab. 3 Effect of different microbial agents on soil bacterial diversity index in pepper rhizosphere

处理 Treatment	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao 1 index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	覆盖范围 Coverage/%
A <sub>1</sub>	3322.33±116.84 <sup>ab</sup>	3261.57±83.04 <sup>a</sup>	6.18±0.05 <sup>a</sup>	0.006±0.0004 <sup>b</sup>	97.5
A <sub>2</sub>	3268.24±31.32 <sup>ab</sup>	3232.75±17.93 <sup>a</sup>	6.19±0.08 <sup>a</sup>	0.006±0.0006 <sup>b</sup>	97.5
A <sub>3</sub>	3269.54±84.19 <sup>ab</sup>	3296.51±113.25 <sup>a</sup>	6.15±0.09 <sup>a</sup>	0.006±0.0006 <sup>b</sup>	97.6
A <sub>4</sub>	3112.49±242.46 <sup>ab</sup>	3103.11±243.69 <sup>ab</sup>	6.12±0.11 <sup>a</sup>	0.006±0.0007 <sup>b</sup>	97.6
A <sub>5</sub>	3118.66±95.33 <sup>ab</sup>	3100.89±79.07 <sup>ab</sup>	6.07±0.09 <sup>a</sup>	0.007±0.0006 <sup>b</sup>	97.6
A <sub>6</sub>	3368.92±107.56 <sup>a</sup>	3335.44±31.51 <sup>a</sup>	6.20±0.04 <sup>a</sup>	0.006±0.0010 <sup>b</sup>	97.4
A <sub>7</sub>	2908.68±143.39 <sup>c</sup>	2909.65±82.68 <sup>b</sup>	5.73±0.17 <sup>b</sup>	0.013±0.0046 <sup>a</sup>	97.6
A <sub>8</sub>	3257.20±131.05 <sup>ab</sup>	3264.96±229.18 <sup>a</sup>	6.21±0.07 <sup>a</sup>	0.006±0.0004 <sup>b</sup>	97.4
CK	3314.82±29.59 <sup>ab</sup>	3314.78±51.77 <sup>a</sup>	6.14±0.06 <sup>a</sup>	0.006±0.0011 <sup>b</sup>	97.5

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 between treatments ( $P < 0.05$ ).

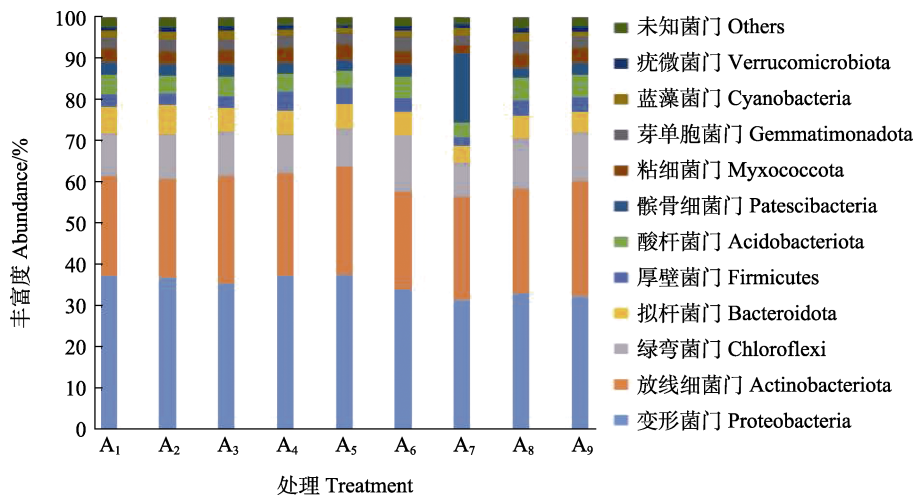


图 1 细菌门分类水平结构分布图

Fig. 1 Bacterial structure distribution at phylum level

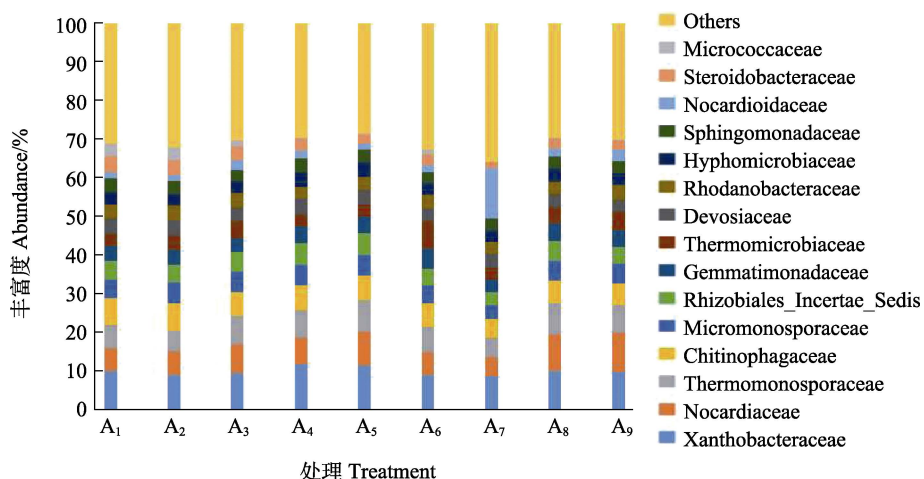


图 2 细菌科分类水平结构分布图

Fig. 2 Bacterial structure distribution at family level

质菌科 (Chitinophagaceae)、类固醇杆菌科 (Steroidobacteraceae) 和微球菌科 (Micrococcaceae) 的

丰富度均有提高, 尤其是 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 处理, 显著提高微球菌科、噬几丁质菌科和类固醇杆菌科的丰

富度； $A_1\sim A_6$  与  $A_8$ 、CK 处理相比，降低了诺卡氏菌科 (Nocardiaceae) 和类诺卡氏菌科的丰富度。 $A_7$  处理改变了类诺卡氏菌科的占比，与其他处理相比，提高了类诺卡氏菌科的丰富度，而黄色杆菌科、诺卡氏菌科、高温单孢菌科、噬几丁质菌科、微单孢菌科、Rhizobiales\_Incertae\_Sedis、芽单孢菌科、热微菌科、罗丹诺杆菌科、生丝微菌科、鞘脂单孢菌科、类固醇杆菌科的丰度均明显降低。

**2.2.4 基于 OTU 水平的 Venn 图分析** Venn 图主要用于统计多个样本中所共有和独有的可操作分类单元 (operational taxonomic units, OTU) 数量。由图 3 可知， $A_1$  (枯草芽孢杆菌)、 $A_2$  (哈茨木霉菌)、 $A_7$  (多菌灵)、 $A_8$  (辣椒疫霉菌) 和 CK 处理的辣椒根际土壤中细菌总 OTU 数量分别为 3366、3379、2994、3406 和 3365 个。其中，共有的 OTU 有 2032 个， $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_7$ 、 $A_8$  和 CK 处理的辣椒根际土壤中特有的细菌 OTU 数分别为 112、128、70、118 和 100 个。由此结果表明，经过  $A_1$ 、 $A_2$  处理增加了辣椒根际土壤中特有的优势细菌数量，特有优势细菌丰富度和多样性的提高可能是辣椒抗性提高的主要机制。 $A_7$  处理降低了土壤细菌丰富度和多样性，长期使用可能会造成土壤细菌的丰富度和多样性持续降低，土壤微生物生态失衡，进而可能引起土壤向易感病土壤发展的趋势。 $A_8$  处理也增加了特有的细菌数量，这些增加的菌群可能是引起细菌菌群稳态失调，与辣椒疫霉菌协同引起辣椒疫病持续发病的原因。

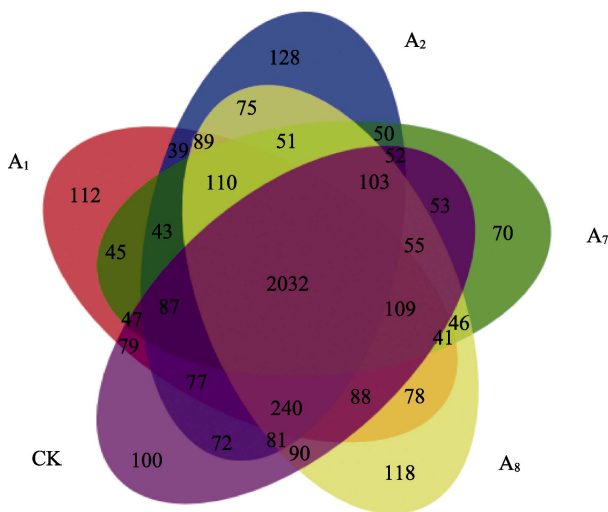


图 3 不同处理细菌 OTU 分类水平 Venn 图  
Fig. 3 Diagram of Venn on OTU level of bacteria in different treatment

### 3 讨论

微生物菌剂药效的稳定性一直是研发者和使用者重点关注的问题，生防菌的活菌数、制剂加工、使用方法以及田间环境因素等都可能影响微生物菌剂的作用效果<sup>[24-27]</sup>。肖小露<sup>[28]</sup>利用枯草芽孢杆菌 BS193 防治辣椒疫病，BS193 发酵液灌根后间隔 0、24、48、72 h 后接种病原菌，9 d 后各处理的防治效果分别为 23.43%、41.25%、49.41%、51.44%，间隔 48、72 h 后接种的防病效果均显著高于灌根后立即接种病原菌的处理。结果表明微生物菌剂需要一定时间进行定殖、繁殖或诱导作物产生抗性，才能更高效地防治靶标病菌。本研究采用灌根 2 次后间隔 72 h 接种病原菌，使供试的 6 种微生物菌剂有充分的时间进行定殖和繁殖。但是，供试的 6 种微生物菌剂对辣椒疫病的防治效果仍有较大差异， $A_1$  ( $1\times 10^8$  CFU/g 枯草芽孢杆菌微囊剂) 和  $A_2$  ( $1\times 10^8$  CFU/g 哈茨木霉菌水分散剂) 处理的防效较好，防治效果分别为 85.58% 和 81.97%； $A_3$  ( $5\times 10^8$  CFU/g 荧光假单胞杆菌颗粒剂)、 $A_4$  (淡紫褐链霉菌 NBF715 粉剂)、 $A_5$  ( $1\times 10^{10}$  CFU/g 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂)、 $A_6$  ( $3\times 10^8$  CFU/g 哈茨木霉菌可湿性粉剂) 的防治效果分别为 47.17%、49.12%、30.60%、39.86%。这些微生物菌剂对辣椒疫病防效的差异性可能与其生防遗传特性和药剂剂型有关。席亚东等<sup>[17]</sup>收集了 30 株木霉菌并对辣椒疫霉菌进行防控研究，其中 17 株菌为同一菌种 (钩状木霉菌)，平板对峙 3 d 后抑菌率为 0.09%~68.99%，施用木霉菌后 30 d 盆栽防控效果为 17.90%~71.70%，该研究结果表明，相同菌种不同菌株的生防效果存在差异，这可能与其生防遗传特性等有关。并且剂型对于生防菌的活性至关重要，起着保护、稀释或缓释有效成分，优化使用效果以及扩大使用范围等作用，虽然生防菌具有生防效果，但其不溶于水将会使其丧失生防效力，因此，生防菌需辅以助剂以保持其在分散或储藏过程中的活性状态<sup>[29]</sup>。相关研究表明，枯草芽孢杆菌在水剂和可湿性粉剂中，芽孢会随着储存期的延长，其存活率也逐渐降低，导致田间防效不稳定<sup>[30]</sup>。MA 等<sup>[31]</sup>研究表明，微胶囊剂型的枯草芽孢杆菌在室温条件下贮藏 540 d 后，其存活率为 87.53%，显著高于其可湿性粉剂的存活率 (47.06%)。微胶囊剂是当前农药新剂型中技术含量最高的一种，具有抑制因多种环境因素 (如光、热、空气、

雨水、土壤)和其他化学物质等造成的分解和流失,提高药剂的稳定性和控制药效释放等功能,从而提高药剂的利用率,延长其持效期<sup>[32-33]</sup>。裴文亮等<sup>[34]</sup>开展了木霉菌水分散粒剂热储稳定试验,以可湿性粉剂木霉菌作为对照,经过热贮处理后(54℃、14d),木霉菌可湿性粉剂的存活率仅为50%,而木霉菌水分散粒剂的存活率高达90%,由此可见,水分散粒剂对木霉菌孢子有很好的保护作用,增加了药效的稳定性。水分散粒剂是一种可在水中迅速分散的剂型,工艺技术含量也比可湿性粉剂高,其药剂粒径更小,在施用到作物或者是防治靶标上时,水分散粒剂更容易进入作物体内或抑制防治靶标<sup>[29]</sup>。笔者就我国已登记的枯草芽孢杆菌和木霉菌的剂型种类(截至2022年9月有效的单剂)<sup>[35]</sup>进行统计分析,可湿性粉剂占比为79.8%,水分散粒剂占7.1%,悬浮剂占6.1%,颗粒剂占2.0%,其他占5.0%(微囊剂、水剂、水乳剂等),与有益微生物的其他研究领域(如生防机理、生防菌筛选、生防菌培养等)相比,国内有关剂型的研究相对较薄弱,微生物菌剂杀菌剂剂型比较单一,主要为可湿性粉剂。因此,建议加强农用微生物杀菌剂剂型的相关基础研究,并通过新剂型的研发和原有剂型技术的优化,提高微生物杀菌剂的防治效果,降低其生产成本。本研究中,A<sub>1</sub>(1×10<sup>8</sup>CFU/g 枯草芽孢杆菌微囊剂)和A<sub>2</sub>(1×10<sup>8</sup>CFU/g 哈茨木霉菌水分散粒剂)处理相对于其他4种微生物菌剂处理的药效稳定性更好,这跟生防菌较好的生防特性和药剂剂型有一定的相关性。A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>处理具有较好的防治效果,防效均达80%以上,A<sub>1</sub>处理与黄大野等<sup>[36]</sup>利用1×10<sup>12</sup>CFU/g 枯草芽孢杆菌水分散粒剂通过盆栽试验对辣椒疫病进行防治,防效为86.67%的结果相当。A<sub>2</sub>处理的防效与张量<sup>[37]</sup>利用5.43×10<sup>10</sup>CFU/g 木霉菌可湿性粉剂对辣椒疫病的防治效果为83.89%的结果相当。

优良的微生物菌剂不仅具有良好的药效稳定性,应还具有影响土壤微生物多样性的能力,其作为外源功能微生物可以通过改变土壤原有微生物群落的组成和优势种群的数量继而达到防控病害的效果<sup>[38-39]</sup>。叶旻硕等<sup>[18]</sup>、涂璇等<sup>[40]</sup>在盆栽条件下,发现施用微生物菌剂和拮抗放线菌能影响辣椒根系微生物数量并控制辣椒疫霉菌的生长繁殖,从而降低辣椒疫霉菌对根系的侵染。这些研究均与本研究结果一致,经微生物菌剂处理的发

病率均低于接种处理,同时本研究分析了A<sub>1</sub>(枯草芽孢杆菌)、A<sub>2</sub>(哈茨木霉菌)、A<sub>7</sub>(多菌灵)和CK处理的辣椒根际土壤中细菌门、科水平的丰富度,土壤细菌总OTU和特有的细菌OTU,发现经A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>处理后,在门水平明显提高了变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)的丰富度,ZHANG等<sup>[41]</sup>发现植物根系吸收了较高比例的变形菌(Proteobacteria)和拟杆菌(Bacteroidota),它们在抑制病原菌和对环境胁迫的耐受性中发挥关键作用;在科水平显著提高微球菌科(Micrococcaceae)、噬几丁质菌科(Chitinophagaceae)和类固醇杆菌科(Steroidobacteraceae)的丰富度;与CK处理相比,降低诺卡氏菌科(Nocardiaceae)和类诺卡氏菌科(Nocardioidaceae)的丰富度;土壤细菌总OTU数量和特有的OTU数量均高于A<sub>7</sub>、CK处理,结合这2个处理的防治效果,细菌总OTU和特有的OTU丰富度和多样性的提高,增强了辣椒抵抗辣椒疫霉菌侵染的能力。此外,A<sub>7</sub>处理,明显降低了土壤细菌总OTU和特有的OTU丰富度和多样性,这与ANDREOTE等<sup>[42]</sup>的研究结果相似,农业系统中,化学农药的使用使农田中土壤微生物的生物多样性降低,对植物产生不利影响,微生物多样性降低后,病原菌能够更加快速入侵植物根系。

#### 4 结论

1×10<sup>8</sup>CFU/g 枯草芽孢杆菌微囊剂和1×10<sup>8</sup>CFU/g 哈茨木霉菌水分散粒剂对辣椒疫病有较好的防治效果,防治效果分别为85.58%和81.97%,使用后增加了辣椒根际土壤中特有的优势细菌数量,特有优势细菌丰富度和多样性的提高可能是辣椒抗性提高的主要机制。使用化学药剂多菌灵后降低了土壤细菌的丰富度和多样性,长期使用可能会造成土壤细菌丰富度和多样性持续降低,土壤微生态失衡,进而可能引起土壤向易感病土壤发展的趋势。本研究仅在盆栽条件下开展,今后将开展枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌微生物菌剂在田间复杂土壤生态环境中的应用研究,以进一步提升病害防控效果和明确相关防控机理。

#### 参考文献

- [1] 席亚东,陈国华,谢丙炎,彭化贤.辣椒疫霉菌全球传播与危害及生物学特性研究进展[J].北方园艺,2016(11):

- 199-203.
- XI Y D, CHEN G H, XIE B Y, PEN H X. Research progress of global spread, damage and biological characteristics of *Phytophthora capsici*[J]. Northern Horticulture, 2016(11): 199-203. (in Chinese)
- [2] 李萍, 江涛, 高智谋, 戚仁德, 汪涛. 辣椒疫霉 (*Phytophthora capsici*)对辣椒的致病力分化研究[J]. 植物病理学报, 2012, 42(4): 431-435.
- LI P, JIANG T, GAO Z M, QI R D, WANG T. Pathogenicity differentiation of isolates of *Phytophthora capsici* to pepper [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2012, 42(4): 431-435. (in Chinese)
- [3] 彭玉梅, 黄玲芝, 裴冬丽, 韩霜, 刘冬梅, 周庆峰, 朱晓琴. 辣椒疫病致病因子及防治研究进展[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(9): 7-11.
- PENG Y M, HUANG L Z, PEI D L, HAN S, LIU D M, ZHOU Q F, ZHU X Q. Pathogenic factors and integrative control of pepper *Phytophthora* blight[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(9): 7-11. (in Chinese)
- [4] 海南省统计局, 国家统计局调查总队编. 海南省统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Hainan Provincial Bureau Statistics, Survey Office of National Bureau of Statistics in Hainan. Hainan Statistics Year Book 2021[M]. Beijing: China Statistic Press, 2021. (in Chinese)
- [5] KIM K D, NEMEC S, MUSSON G. Effects of composts and soil amendments on soil microflora and *Phytophthora* root and crown rot of bell pepper[J]. Crop Protection, 1997, 16(2): 165-172.
- [6] JANG Y A, YANG E Y, CHO M C, UM Y C, KO K D, CHUN C H. Effect of grafting on growth and incidence of *Phytophthora* blight and bacterial wilt of pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2012, 53(1): 9-19.
- [7] 关晓溪, 隋常玲, 李金红, 陈志峰, 吴维, 冉灿. 生物农药防治辣椒疫病研究进展[J]. 农药, 2020, 59(7): 473-476.
- GUAN X X, SUI C L, LI J H, CHEN Z F, WU W, RAN C. Research progress on biological pesticides for control of pepper *Phytophthora* disease[J]. Agrochemicals, 2020, 59(7): 473-476. (in Chinese)
- [8] 叶旻硕, 马艳, 黄有军. 生防芽孢杆菌防控辣椒疫病研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 123-129.
- YE M S, MA Y, HUANG Y J. The control of pepper blight by *Bacillus* spp.: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(15): 123-129. (in Chinese)
- [9] 杨万荣, 邢丹, 蓬桂华, 张爱民, 付文婷. 木霉菌生物防治辣椒疫病的研究进展[J]. 现代农业科技, 2015(19): 127-129.
- YANG W R, XING D, PENG G H, ZHANG A M, FU W T. Research advances on biocontrol to *Phytophthora capsici* of pepper with *Trichoderma*[J]. 现代农业科技, 2015(19): 127-129. (in Chinese)
- [10] 周成萍, 曾会才. 1株对辣椒疫霉具高抑菌活性放线菌 WZ60 的田间防治试验[J]. 热带作物学报, 2008, 29(1): 106-108.
- ZHOU C P, ZENG H C. Field control test of an Actinomycetes strain WZ60 against *Capsicum* blight[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2008, 29(1): 106-108. (in Chinese)
- [11] 徐文, 黄媛媛, 黄亚丽, 贾振华, 宋水山. 木霉—植物互作机制的研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(3): 408-414.
- XU W, HUANG Y Y, HUANG Y L, JIA Z H, SONG S S. Advances on mechanism of *Trichoderma*-plant interaction[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2017, 33(3): 408-414. (in Chinese)
- [12] 赵兴丽, 陶刚, 娄璇, 顾金刚. 钩状木霉在辣椒根际定殖动态及其对辣椒疫病的生物防治[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(5): 106-114.
- ZHAO X L, TAO G, LOU X, GU J G. Colonization dynamics of *Trichoderma hamatum* in pepper rhizosphere and its biological control against pepper *Phytophthora* blight[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(5): 106-114. (in Chinese)
- [13] YANG M M, XU L P, XUE Q Y, YANG J H, XU Q, LIU H X, GUO J H. Screening potential bacterial biocontrol agents towards *Phytophthora capsici* in pepper[J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 134(4): 811-820.
- [14] 刘青, 李升, 梁才康, 张红辉, 吴静, 王嘉福, 冉雪琴. 贵州地区木霉菌分离鉴定及对辣椒疫霉的拮抗作用[J]. 微生物学通报, 2019, 46(4): 741-751.
- LIU Q, LI S, LIANG C K, ZHANG H H, WU J, WANG J F, RAN X Q. Isolation and identification of *Trichoderma* spp. against *Phytophthora capsici*[J]. Microbiology China, 2019, 46(4): 741-751. (in Chinese)
- [15] 韩永琴, 陈新建, 罗路, 金德才, 刘勇, 张卓, 张德咏. 生防菌剂多黏类芽孢杆菌对辣椒根际土壤细菌群落的影响[J]. 植物保护, 2020, 46(2): 135-142.
- HAN Y Q, CHEN X J, LUO L, JIN D C, LIU Y, ZHANG Z, ZHANG D Y. Effects of the biocontrol agent *Bacillus polymyxa* on the bacterial community in the rhizosphere of pepper[J]. Plant Protection, 2020, 46(2): 135-142. (in Chinese)
- [16] 胡建坤, 黄蓉, 黄瑞荣, 朱植银, 王玉, 曾钦华. 2种化学杀菌剂与木霉及其组配制剂对辣椒疫病防控效果研究[J]. 生物灾害科学, 2021, 44(4): 460-464.

- HU J K, HUANG R, HUANG R R, ZHU Z Y, WANG Y, ZENG Q H. Study on control effects of two chemical fungicides and *Trichoderma* spp. as well as their combinations on pepper blight[J]. Biological Disaster Science, 2021, 44(4): 460-464. (in Chinese)
- [17] 席亚东, 陈国华, 谢丙炎, 彭化贤. 不同木霉菌株对辣椒疫霉菌的防控作用[J]. 北方园艺, 2016(21): 115-119.
- XI Y D, CHEN G H, XIE B Y, PENG H X. Control effect of different *Trichoderma* spp. isolates on *Phytophthora capsici*[J]. Northern Horticulture, 2016(21): 115-119. (in Chinese)
- [18] 叶旻硕, 俞键烽, 马艳, 黄有军. 不同微生物菌剂对辣椒疫病的防控效果及对土壤性状的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 811-817.
- YE M S, YU J F, MA Y, HUANG Y J. Effects of different microbial inoculants on pepper blight suppression and soil properties[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(4): 811-817. (in Chinese)
- [19] 何烈干, 周银生, 陈学军, 方荣, 马辉刚. 辣椒种质资源抗病性及发病速度分析[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(4): 691-698.
- HE L G, ZHOU Y S, CHEN X J, FANG R, MA H G. An analysis on resistance of pepper germplasm to *Phytophthora* blight and disease rate[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(4): 691-698. (in Chinese)
- [20] 刘洪, 韦本辉, 党柯柯, 彭俊伟, 李建刚, 董元华. 粉垄耕作对甘蔗土壤微生物群落的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(3): 597-605.
- LIU H, WEI B H, DANG K K, PENG J W, LI J G, DONG Y H. Effect of deep vertical rotary tillage on microbial community in sugar cane soil[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(3): 597-605. (in Chinese)
- [21] 庞师婵, 郭霜, 任奎瑜, 王帅帅, 杨尚东. 番茄/茄子嫁接对其根际土壤生物学性状及细菌群落结构的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(2): 253-263.
- PANG S C, GUO S, REN K Y, WANG S S, YANG S D. Impact of grafting on soil microbial properties and bacterial community structure in tomato rhizosphere[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(2): 253-263. (in Chinese)
- [22] 马古兰 A E, 麦吉尔 B J. 生物多样性: 测量与评估前沿[M]. 韩博平, 官昭英, 杨阳, 译. 北京: 科学出版社, 2019: 49-50.
- MAGURRAN A E, MCGILL B J. Biological diversity: frontiers in measurement and assessment[M].//HAN B P, GUAN Z Y, YANG Y (Translated). Beijing: Science Press, 2019: 49-50. (in Chinese)
- [23] CHAO A, WANG W H, CHEN Y C. Estimating the number of shared species in two communities[J]. Statistica Sinica, 2000, 10(1): 227-246.
- [24] 赵旖森, 张亮, 盛浩, 袁红, 周清. 辣椒疫霉菌生防细菌的筛选鉴定及其防效[J]. 中国蔬菜, 2019(1): 65-69.
- ZHAO Y S, ZHANG L, SHENG H, YUAN H, ZHOU Q. Screening, identification and control effect of a biocontrol bacteria for pepper *Phytophthora* blight[J]. China Vegetables, 2019(1): 65-69. (in Chinese)
- [25] 张爱民, 邢丹, 杨万荣, 杨红. 辣椒疫病生物防治技术研究进展[J]. 长江蔬菜, 2013(8): 1-4.
- ZHANG A M, XING D, YANG W R, YANG H. Research progress on biological control technology for pepper *Phytophthora* blight[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2013(8): 1-4. (in Chinese)
- [26] 邱思鑫, 阮宏春, 宋美仙, 胡方平. 内生解淀粉芽孢杆菌 TB2 菌株活性物质诱导辣椒果抗疫病的生化机理[J]. 热带作物学报, 2010, 31(10): 1813-1820.
- QIU S X, RUAN H C, SONG M X, HU F P. Biochemical mechanisms of the resistance induced by metabolites of endophytic *Bacillus amyloliquefaciens* strain TB2 to suppress pepper fruit *Phytophthora* blight[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(10): 1813-1820. (in Chinese)
- [27] BERENDSEN R L, PIETERSE C M J, BAKKER P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478-486.
- [28] 肖小露. 枯草芽孢杆菌 BS193 对辣椒疫病的生防作用及其抗菌机制初探[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- XIAO X L. Biological control and mechanism of *Bacillus subtilis* BS 193 against pepper *Phytophthora* blight (*Phytophthora capsici*)[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [29] 刘振华, 罗远婵, 张道敬, 李元广. 农用微生物杀菌剂剂型研究进展[J]. 农药学报, 2014, 16(5): 497-507.
- LIU Z H, LUO Y C, ZHANG D J, LI Y G. Research progress and prospects of microbial pesticide formulation for plant disease control[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2014, 16(5): 497-507. (in Chinese)
- [30] 李秀明. 生防木霉菌和枯草芽孢杆菌制剂的研制及田间试验[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- LI X M. Studies on the formulation of biocontrol agents *Trichoderma harzianum* T4 and *Bacillus subtilis* B99-2 and biocontrol in the green house[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [31] MA X, WANG X B, CHENG J, NIE X, YU X X, ZHAO Y T, WANG W. Microencapsulation of *Bacillus subtilis* B99-2 and its biocontrol efficiency against *Rhizoctonia solani* in tomato[J]. Biological Control, 2015, 90: 34-41.
- [32] 李北兴, 张大侠, 张灿光, 管磊, 王凯, 刘峰. 微囊化技术研究进展及其在农药领域的应用[J]. 农药学报, 2014,

- 16(5): 483-496.
- LI B X, ZHANG D X, ZHANG C G, GUANG L, WANG K, LIU F. Research advances and application prospects of microencapsulation techniques in pesticide[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2014, 16(5): 483-496. (in Chinese)
- [33] 高德霖. 微胶囊技术在农药剂型中的应用[J]. 现代化工, 2000, 20(2): 10-14.
- GAO D L. Applications of microencapsulation technologies in pesticide formulations[J]. Modern Chemical Industry, 2000, 20(2): 10-14. (in Chinese)
- [34] 裴文亮, 王伟. 木霉菌厚垣孢子水分散粒剂的研制及田间应用效果[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(2): 241-248.
- PEI W L, WANG W. Preparation and field efficacy of chlamydospore water dispersible granule of *Trichoderma harzianum*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(2):241-248. (in Chinese)
- [35] 中华人民共和国农业农村部农药检定所. 中国农药信息网有效成分查询[DB/OL]. [2022-09-27]. <http://www.chinapesticide.org.cn/>.
- Institute Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, the People's Republic of China. The effective components query on Chinese pesticide information network[DB/OL]. [2022-09-27]. <http://www.chinapesticide.org.cn/>. (in Chinese)
- [36] 黄大野, 姚经武, 朱志刚, 曹春霞, 龙同, 杨妮娜, 胡洪涛, 杨自文. 枯草芽孢杆菌水分散粒剂防治辣椒疫病的效果及其对辣椒的促生作用[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4737-4739.
- HUANG D Y, YAO J W, ZHU Z G, CAO C X, LONG T, YANG N N, HU H T, YANG Z W. Controlling effect of *Bacillus subtilis* water dispersible granule *Phytophthora* blight and its growth - promoting effect on pepper[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(19): 4737-4739. (in Chinese)
- [37] 张量. 防治辣椒疫病的木霉拮抗化合物筛选及其生防制剂制备[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- ZHANG L. Antagonistic compound screening and biocontrol agent preparation of *Trichoderma* spp. for controlling pepper blight[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [38] 王辉, 刘丽, 黄宇飞, 邹春蕾, 赵颖, 王琦, 刘长远. 黄柄曲霉 ASD 对辣椒疫病根际真菌菌群结构及土壤功能的影响[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(4): 796-803.
- WANG H, LIU L, HUANG Y F, ZOU C L, ZHAO Y, WANG Q, LIU C Y. Effects of *Aspergillus flavipes* ASD on the structure of rhizosphere fungi and function of soil infected by *Phytophthora capsici* in pepper[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2021, 37(4): 796-803. (in Chinese)
- [39] RIMÉ D, NAZARET S, GOURBIÈRE F, CADET F, MOËNNE-LOCCOZL Y. Comparison of sandy soils suppressive or conducive to ectoparasitic nematode damage on sugarcane[J]. Ecology and Population Biology, 2003, 93(11): 1437-1444.
- [40] 涂璇, 薛泉宏, 张宁燕, 牛晓磊. 辣椒疫病生防放线菌筛选及其对辣椒根系微生物区系的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 141-146.
- TU X, XUE Q H, ZHANG N Y, NIU X L. Screening bio-control actinomycetes to control pepper phytophthora blight and the impact of microbial population of pepper's rhizosphere[J]. Journal of North west Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2007, 35(6): 141-146. (in Chinese)
- [41] ZHANG Z Y, XIAO Y S, ZHAN Y B, ZHANG Z Q, LIU Y Z, WEI Y Q, XU T, LI J. Tomato microbiome under long-term organic and conventional farming[J]. iMeta, 2022, 1(3). <https://doi.org/10.1002/imt2.48>.
- [42] ANDREOTE F D, PEREIRA e SILVA M de C. Microbial communities associated with plants: learning from nature to apply it in agriculture[J]. Current Opinion in Microbiology, 2017, 37(7): 29-34.