

放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤生态结构的影响

贾云鹤¹, 王喜庆¹, 闫 闻¹, 付永凯¹, 尤海波¹, 王丽冬¹, 刘晓飞², 刘 超¹

(1. 黑龙江省农业科学院园艺分院 哈尔滨 150069; 2. 哈尔滨商业大学 哈尔滨 150028)

摘 要: 为探索西瓜连作土壤改良方法, 采用放线菌秸秆降解液处理西瓜连作土壤, 设置清水(CK)、秸秆(J)、放线菌(F)、秸秆+放线菌(JF)等 4 个处理, 测定分析不同处理对土壤化学性质、酶活性、微生物含量及西瓜幼苗生长发育的影响, 并对不同处理土壤进行高通量测序, 研究其微生物群落结构变化。结果表明, 与 CK 相比, JF 处理土壤的 pH、有机质含量、氧化还原酶(脲酶、转化酶、过氧化氢酶)活性和细菌数量显著提高, 真菌数量显著降低。与 CK 相比, J、F、JF 处理显著提升了土壤微生物群落丰富度, 4 个处理的真菌、细菌群落区分度较为明显。与 CK、J、F 处理相比, JF 处理显著提高了西瓜幼苗的壮苗指数。推测枝孢菌、毛壳菌及芽孢杆菌、放线菌等共同作用改良了西瓜连作土壤生态结构。研究结果为西瓜连作土壤改良及西瓜产业健康可持续发展提供了理论依据和实践支持。

关键词: 西瓜; 放线菌; 秸秆; 连作; 土壤

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)08-101-10

Effects of *Trichoderma* straw degradation solution on soil ecological structure of watermelon continuous cropping

JIA Yunhe¹, WANG Xiqing¹, YAN Wen¹, FU Yongkai¹, YOU Haibo¹, WANG Lidong¹, LIU Xiaofei², LIU Chao¹

(1. Horticulture Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150069, Heilongjiang, China; 2. Harbin Commercial University, Harbin 150028, Heilongjiang, China)

Abstract: To explore the soil improvement methods for continuous watermelon cropping, the soil for continuous watermelon cropping was treated with actinomycetes straw degradation solution. Four treatments, namely CK, straw (J), actinomycetes (F), and straw+actinomycetes (JF), were set up. The effects of different treatments on soil chemical properties, enzyme activities, microbial content, and the growth and development of watermelon seedlings were determined and analyzed. High-throughput sequencing was conducted on different treated soils to study the changes in their microbial community structure. The results showed that compared with CK, the pH, organic matter content, REDOX enzyme (urease, invertase, catalase) activity and bacterial count of the soil treated with JF were significantly increased, while the fungal count was significantly decreased. Compared with CK, treatments J, F and JF significantly enhanced the richness of soil microbial communities, and the differentiation of fungal and bacterial communities in the four treatments was relatively obvious. Compared with the CK, J and F treatments, the JF treatment significantly increased the strong seedling index of watermelon seedlings. It is speculated that *Cladosporium*, *Trichoderma*, *Bacillus* and actinomycetes work together to improve the soil ecological structure of watermelon continuous cropping. The research results provide theoretical basis and practical support for soil improvement in continuous watermelon cropping and the healthy and sustainable development of the watermelon industry.

Key words: Watermelon; Actinomycetes; Straw; Continuous cropping; Soil

收稿日期: 2025-01-09; 修回日期: 2025-03-30

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目(SC2022ZX02C0202); 黑龙江省省属科研业务费项目(CZKYF2025-1-B016); 国家西甜瓜产业技术体系哈尔滨综合试验站(CARS-25); 黑龙江省西甜瓜现代农业产业技术协同创新推广体系项目

作者简介: 贾云鹤, 女, 副研究员, 主要从事西瓜育种与栽培技术研究。E-mail: 800530jyh@163.com

通信作者: 王喜庆, 男, 研究员, 主要从事西瓜育种与栽培技术研究。E-mail: xiqingwang100@163.com

刘晓飞, 女, 教授, 主要从事农业废弃物综合利用研究。E-mail: liuxiaofei72@163.com

西瓜是世界范围内广泛种植的经济作物,2021年中国西瓜产量达6 101.4万t,占全世界的60%以上,种植面积常年保持在140万hm²左右,占全球种植面积的46%^[1]。近年来,我国设施西瓜面积逐年增加,重茬种植不可避免,连作障碍成为制约我国西瓜产业可持续发展的重要因素。

连作改变土壤理化性质,土壤团粒结构遭到破坏,板结严重,通气透水性降低。西瓜对特定养分的持续吸收导致钾、钙等元素匮乏;土壤酸化加剧,磷素固定作用增强,有效养分含量下降。Pervaiz等^[2]研究发现,连作5a(年)以上的西瓜田,土壤有机质含量下降12%,有效磷含量降低20%以上。连作打破土壤微生物群落平衡,有益微生物数量锐减,有害微生物大量繁殖。放线菌、枯草芽孢杆菌等促生有益菌在连作土壤中丰度显著降低,而镰刀菌、链格孢菌等病原微生物富集。Gu等^[3]通过高通量测序发现,连作西瓜土壤中真菌病原菌相对丰度增加35%,细菌群落多样性下降22%,微生物生态功能趋向单一化。西瓜根系分泌及残体分解产生的酚酸类、黄酮类等自毒物质,会抑制连作植株生长。Wang等^[4]研究发现,连作土壤分离的自毒物质对西瓜幼苗根系生长抑制率在30%以上;连作导致西瓜产量与品质明显下降^[5]。调查发现,连作3a以上的西瓜田,枯萎病发病率达40%,严重地块甚至绝收,防治成本增加30%以上,连作导致病害发生率显著提高^[6]。

秸秆可以改善土壤理化性质,调节土壤微生物群落结构,抑制土传病害,增加土壤有机质含量,促进团粒结构形成,提高土壤保水保肥能力,缓解土壤板结与酸化,从而缓解连作障碍^[7]。放线菌是土壤中重要的生防微生物,能分泌抗生素、酶类等活性物质,从而抑制病原菌生长和繁殖。部分放线菌还可通过竞争营养和空间,抑制病原菌定殖。Dong等^[8]从西瓜根际土壤中筛选出链霉菌属菌株,其产生的伊枯草菌素对西瓜枯萎病病菌抑制率达78%,显著降低病害发生率。放线菌能产生吲哚乙酸、赤霉素等植物激素,促进西瓜根系生长。放线菌还可增强植株对养分的吸收能力,提高肥料利用率^[9-10]。胡琴琴^[11]研究发现,接种放线菌的西瓜幼苗,根长增加25%,根系活力提升30%,植株生物量显著增加。

前人有过采用秸秆或放线菌(单一方法)缓解连作障碍的研究,但二者结合使用对西瓜连作土壤生态结构的影响还未见报道。鉴于此,笔者采用放线菌秸秆降解液处理西瓜连作土壤(复合方法),测

定分析其对土壤化学性质、微生物含量及酶活性的影响,并对不同处理土壤进行高通量测序,研究其微生物群落结构变化,以期西瓜连作土壤改良及西瓜产业健康可持续发展提供理论依据和实践支持。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为黑龙江省农业科学园园艺分院连作20a的西瓜重茬土壤,2024年9月,采用五点取样法从333.5m²的大棚中取旋耕后土壤表层下5~20cm的土壤2kg装入口径20cm、高20cm的花盆中。放线菌为哈尔滨商业大学提供的复合特殊菌株,可产生纤维素酶和果胶酶,组分DPA-3-18、GS-30体积比为1:1。

1.2 试验设计

土样测定试验设2个处理,每个处理3次重复。将200mL清水倒入盛有2kg土壤的花盆中,搅拌均匀,作为对照(CK);JF(秸秆+放线菌)处理将200mL放线菌秸秆降解液(含有5mL放线菌和5g粉碎后直径0.5cm灭菌干秸秆)倒入盛有2kg土壤的花盆中,搅拌均匀;覆盖地膜保湿。将6个花盆置于室温下,1个月后测土样。

高通量测序试验设4个处理,每个处理3次重复;CK和JF处理同土样测定试验;J(秸秆)处理将5g粉碎后直径0.5cm灭菌干秸秆与水配制成200mL溶液倒入盛有2kg土壤的花盆中,搅拌均匀,F(放线菌)处理将5mL放线菌溶于水中配制成200mL溶液倒入盛有2kg土壤的花盆中,搅拌均匀。将12个花盆置于室温下,1个月后测土样。剩余土壤用于后续西瓜育苗试验。

1.3 土样测定

将土样送至青岛德检检测技术服务有限公司检测。pH和有机质含量采用NY/T 1121.2—2006方法检测^[12],电导率采用LY/T 1251—1999方法检测^[13],碱解氮含量采用LY/T 1228—2015方法检测^[14],速效磷含量采用NY/T 1121.7—2014方法检测^[15],速效钾含量采用NY/T 889—2004方法检测^[16],细菌总数、真菌总数、尖孢镰刀菌含量、放线菌含量采用GB 4789.2—2022方法检测^[17];转化酶活性、碱性磷酸酶活性、脲酶活性采用比色法检测,过氧化氢酶活性采用滴定法检测^[18]。

1.4 DNA提取和高通量测序

使用E.Z.N.A. Soil DNA Kit (Omega Bio-tek,

Inc., USA)试剂盒提取土壤样本的基因组 DNA,以质检合格的 DNA 为模板进行 PCR 扩增,使用通用引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 扩增细菌 16Sr RNA 的 V3-V4 区。在上游引物和下游引物的 5'末端各添加 8 bp 的 barcode 序列,以区分不同的样本,最后合成带有 barcode 序列的通用引物在 ABI 9700 PCR 仪 (Applied Biosystems, Inc., USA)上扩增。真菌 ITS 基因的 ITS1 区域扩增上游引物序列为 1737F: 5'-CTTGTCATTAGAG-GAAGTAA-3',下游引物序列为 2043R: 5'-GCTGC-GTTCTTCATCGATGC-3'。PCR 扩增体系:95 °C 预变性 5 min;95 °C 45 s,55 °C 45 s,72 °C 45 min,共 28 个循环;72 °C 延伸 10 min,4 °C 结束反应。对 PCR 反应产物进行检测、回收和纯化,检测合格的样品送至森蓝生物科技有限公司采用 Illumina Miseq/Nextseq2000/Novaseq 6000 (Illumina, Inc., USA)平台测序,测序策略为 PE250/PE300。

1.5 不同处理土壤对西瓜幼苗生长发育的影响

选用西瓜品种为龙盛佳美(高品质中抗西瓜枯萎病),2024 年 11 月 21 日播种于黑龙江省农业科学院园艺分院西瓜试验温室,每个花盆播种 12 粒种子,常规管理。播种后第 8~25 天,每间隔 4 d 统计出芽情况,计算出苗率。播种后第 41 天,西瓜幼苗长至适宜定植(2 叶 1 心)时,每个重复随机选取西瓜苗样本 3 株,用直尺测定株高;用游标卡尺测

定茎粗;去除幼苗根部基质,用蒸馏水冲洗干净,吸干表面水分,105 °C 下杀青 15 min 后,在 75 °C 下烘干至恒质量,称干质量。出苗率/%=(规定发芽测定天数内正常发芽的种子数/供试种子数)×100;根冠比=地下部干质量/地上部干质量;壮苗指数=茎粗/株高×全株干质量。

1.6 数据处理

下机数据根据 barcode 序列拆分为不同样本。使用 Pear (v0.9.6) 软件对测序数据进行过滤、拼接。使用 Vsearch 去除嵌合体,采用 uparse 算法对优质序列进行 OTU 聚类,序列相似性阈值为 97%。基于 OTU 及其丰度结果,使用 QIIME (v1.8.0) 软件计算 α 多样指数和 β 多样性距离矩阵,并使用 R (v3.6.0) 软件绘图。使用 Python (v2.7) 软件进行 LEfSe 分析。

采用 WPS 软件整理数据和制图,使用邓肯法 (Duncan) 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤化学性质、酶活性及微生物含量的影响

2.1.1 放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤化学性质的影响 由表 1 可知,与 CK(清水处理)相比,JF (秸秆+放线菌)处理西瓜连作土壤的 pH 显著提高 2.91%,有机质含量显著提高 3.36%,电导率显著降低 12.31%,碱解氮含量提高 4.94%,速效磷含量显

表 1 不同处理土壤化学性质差异
Table 1 Differences of soil chemical properties under different treatments

处理 Treatment	pH	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)	w(碱解氮) Alkali-hydrolyzed nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效磷) Rapidly available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Rapidly available potassium content/ (mg·kg ⁻¹)
JF	5.66±0.41 a	40.0±2.38 a	5.7±0.98 b	233.6±13.56 a	845.4±19.72 b	1043±25.03 a
CK	5.50±0.32 b	38.7±3.54 b	6.5±1.25 a	222.6±15.87 a	952.4±21.23 a	1074±38.94 a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

著降低 10.29%,速效钾含量降低 2.89%。

2.1.2 放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤酶活性的影响 由表 2 可知,与 CK 相比,JF 处理西瓜连

作土壤的脲酶活性显著提高 127.27%,碱性磷酸酶活性显著降低 16.41%,转化酶活性显著提高 7.02%,过氧化氢酶活性显著提高 20.33%。

表 2 不同处理土壤酶活性差异
Table 2 Differences of soil enzyme activities under different treatments (mg·g⁻¹·d⁻¹)

处理 Treatment	脲酶活性 Urease activity	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity	转化酶活性 Invertase activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity
JF	2.5±0.03 a	10.7±2.11 b	38.1±3.27 a	0.793±0.01 a
CK	1.1±0.02 b	12.8±3.43 a	35.6±5.76 b	0.659±0.03 b

2.1.3 放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤微生物含量的影响 由表 3 可知,与 CK 相比,JF 处理西瓜连作土壤的细菌总数显著提高 14.29%,真菌总数

显著降低 24.68%,细菌/真菌显著提高 52.21%,放线菌含量显著提高 89.47%,尖孢镰刀菌含量显著降低 80.00%。

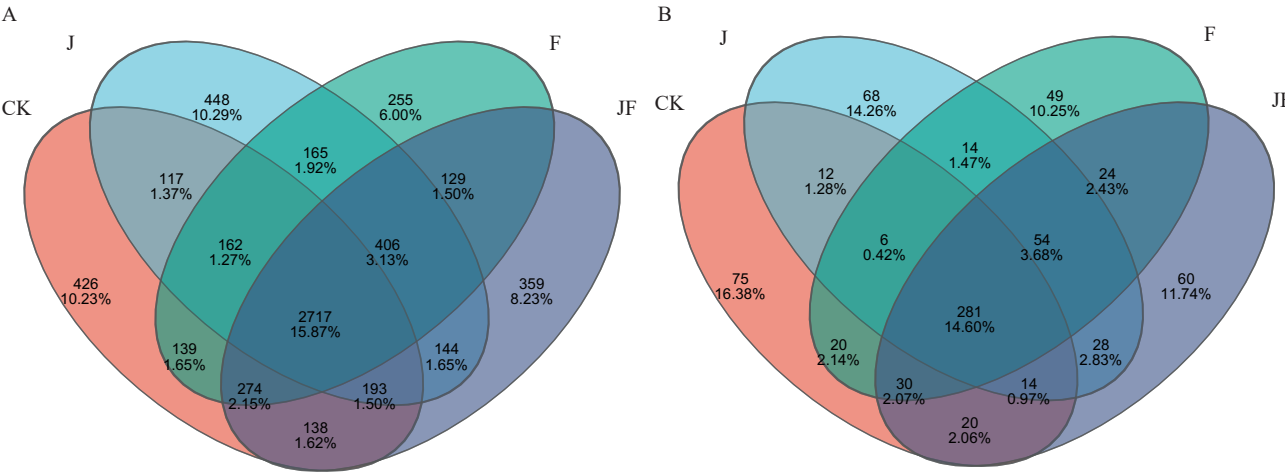
表 3 不同处理土壤微生物群落差异
Table 3 Differences of soil microbial communities under different treatments

处理 Treatment	细菌总数 Total bacterial count/(CFU·g ⁻¹)	真菌总数 Total fungal count/ (CFU·g ⁻¹)	细菌真菌比 Bacteria/fungal	放线菌含量 Actinomycetes content/ (CFU·g ⁻¹)	尖孢镰刀菌含量 <i>Fusarium oxysporum</i> content/ (CFU·g ⁻¹)
JF	12.0×10 ⁴ ±1.59 a	5.8×10 ⁴ ±2.61 b	2.07±0.04 a	3.6×10 ³ ±1.32 a	20±4.60 b
CK	10.5×10 ⁴ ±2.65 b	7.7×10 ⁴ ±3.51 a	1.36±0.11 b	1.9×10 ³ ±2.21 b	100±6.52 a

2.2 放线菌秸秆降解液对西瓜连作土壤微生物菌群结构的影响

2.2.1 OTU 数量的变化 如图 1-A 所示,CK、J 处理、F 处理和 JF 处理的特有细菌 OTU 数量分别为

426、448、255、359 个,四者共有数量为 2717 个,占 4 个处理 OTU 总数的 15.87%。由图 1-B 可知,CK、J 处理、F 处理和 JF 处理的特有真菌 OTU 数量分别为 75、68、49、60 个,4 个处理共有真菌 OTU 数



注:A. 细菌;B. 真菌。
Note: A. Bacteria; B. Fungi.

图 1 不同处理的土壤细菌 OTU 和真菌 OTU 水平的韦恩图
Fig. 1 Venn diagram of OTU level of soil bacterial and fungal under different treatments

量为 281 个,占 OTU 总数的 14.60%。
2.2.2 α 多样性变化 根据 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数分析了 4 个处理土壤细菌和真菌的多样性(表 4)。与 CK 相比,J、JF 处理的细菌 ACE 指数和 Chao1 指数及真菌 ACE 指数和 Chao1 指数显著升高,F 处理的真菌 ACE 指数显著升高。其他细菌和真菌多样性指数均不存在显著差异,表明放线菌秸秆降解液可以提高土壤细菌和真菌群落丰富度。
2.2.3 β 多样性变化 通过非度量多维尺度(NMDS)分析了 4 个处理间土壤微生物群落的差异(图 2)。J 处理的土壤细菌群落分布在第 4 象限,F 处理的土壤细菌群落分布在第 1、2 象限,JF 处理的

土壤细菌群落分布在第 3 象限,CK 的土壤细菌群落则主要分布在第 1、2 象限,β 多样性应力值 Stress=0.065, r=0.392, p=0.027,说明 4 个处理的细菌群落区分度较为明显,4 个处理间细菌菌群存在显著差异。
对于真菌群落来说,多样性应力值 Stress=0.029, r=0.567 9, p=0.003,说明 4 个处理的真菌群落结构存在极显著差异。上述结果说明,JF 处理对土壤微生物菌群的定向选择和培育作用较为明显。
2.2.4 对细菌群落组成的影响 4 个处理土壤样品中细菌群落相对丰度较高的前 10 个菌属相同(图 3),其中 *Bacillus* 为芽孢杆菌,相对丰度较高,平均丰度为 8.37%;其后依次为热微菌目 Thermomicrobiales 未

表 4 不同处理土壤微生物 α 多样性指数

Table 4 Soil microbial α diversity index under different treatments

项目 Item	处理 Treatment	ACE 指数 ACE index	Chao1 指数 Chao1 index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index
细菌 Bacteria	J	3 625.50±36.75 a	3 522.60±39.70 a	6.57±0.05 a	0.004 2±0.000 2 a
	F	3 524.30±144.96 b	3 478.10±131.57 b	6.63±0.09 a	0.003 8±0.000 6 a
	JF	3 654.50±77.91 a	3 578.90±53.01 a	6.68±0.05 a	0.003 7±0.000 3 a
	CK	3 526.00±16.67 b	3 457.60±65.53 b	6.60±0.13 a	0.004 2±0.001 2 a
真菌 Fungi	J	358.43±15.08 a	352.18±9.99 a	3.23±0.29 a	0.11±0.04 a
	F	343.76±3.80 b	343.15±3.47 b	3.69±0.19 a	0.06±0.01 a
	JF	380.59±41.87 a	375.93±46.52 a	3.75±0.74 a	0.05±0.01 a
	CK	376.17±23.82 c	370.92±22.72 b	3.74±0.09 a	0.05±0.01 a

注:同列不同小写字母表示同一项目的不同处理在 0.05 水平差异显著。
Note: Different small letters in the same column indicate significant differences among different treatments of the same item at the 0.05 level.

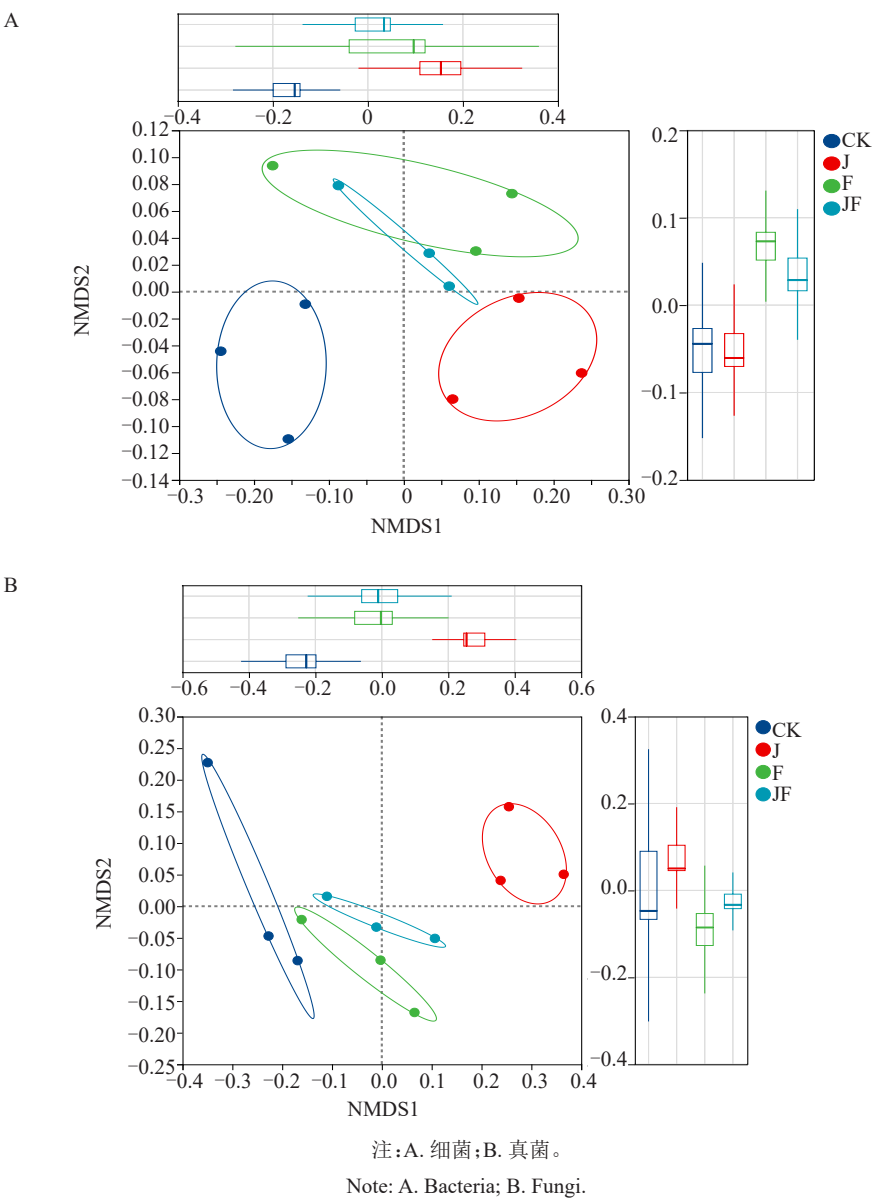


图 2 土壤细菌和真菌菌群的 NMDS 分析

Fig. 2 NMDS analysis of soil bacterial communities and fungal communities

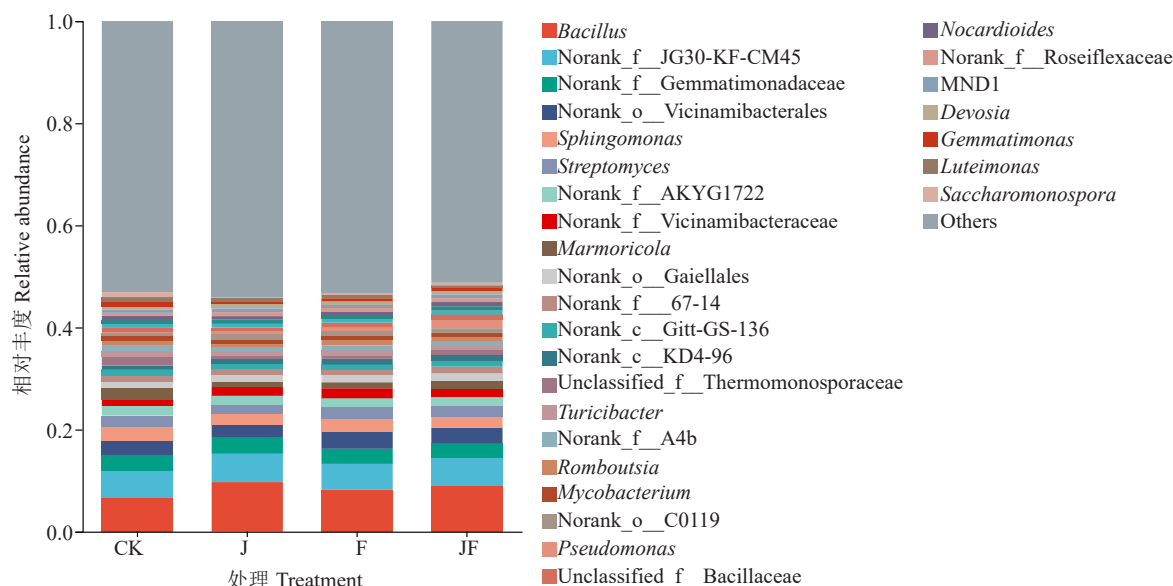


图3 不同处理的土壤细菌属水平群落组成

Fig. 3 Bacteria community composition at genus level under different treatments

分类科(Norank_f_JG30-KF-CM45)、芽单胞菌目未分类科(Norank_f_Gemmatimonadaceae)、嗜酸菌纲未分类目(Norank_o_Vicinamibacterales)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、链霉菌属(*Streptomyces*)、未分类(Norank_f_AKYG1722)、嗜酸菌目未分类科(Norank_f_Vicinamibacteraceae)、马杜拉放线菌属(*Marmoricola*)和盖氏菌纲未分类目(Norank_o_Gaiellales)。与CK相比,J、F、JF处理的*Bacillus*属和嗜酸菌目未分类科(Norank_f_Vicinamibacteraceae)的相对丰度显著增加($p<0.05$),增幅分别为46.15%、22.78%、35.90%和38.21%、58.54%、28.46%;马杜拉放线菌属(*Marmoricola*)相对丰度降低,但差异不显著。由此可见,J、F、JF处理会对土壤细菌群落构成造成属水平的显著差异。

2.2.5 对真菌群落组成的影响 4个处理土壤中优势真菌属也基本相同(图4),其中毛壳菌科未分类属(Unclassified_f_Chaetomiaceae, 14.86%)和毛壳菌科*Stolonocarpus*属(12.77%)相对丰度较高,占总序列的27.63%;然后依次为金孢菌属(*Chrysosporium*)、钩果菌属(*Uncinocarpus*)、曲霉菌属(*Aspergillus*)、顶孢霉属(*Acremonium*)、被孢霉属(*Mortierella*)、短梗蠕孢属(*Trichocladium*)、火丝菌科未定属(*Pyronemataceae_gen_Incertae_sedis*)、枝孢菌属(*Cladosporium*)等。与CK相比,J、F、JF处理显著增加了毛壳菌科未分类属(Unclassified_f_Chaetomiaceae)、顶孢霉属(*Acremonium*)和枝孢菌属

(*Cladosporium*)的相对丰度,其中毛壳菌科未分类属增幅最大,分别为587.83%、67.55%、145.64%;显著降低了钩果菌属(*Uncinocarpus*)的相对丰度,降幅分别为97.01%、90.36%、88.31%。由此可以看出,J、F、JF处理会对土壤真菌群落组成造成属水平的显著差异。

2.3 放线菌秸秆降解液处理连作土壤对西瓜幼苗生长发育影响

由表5和图5可知,与CK相比,JF处理土壤对西瓜幼苗的出苗率、根冠比、壮苗指数有显著的促进作用。JF处理土壤培育的西瓜幼苗出苗率显著高于CK、J处理和F处理;J处理出苗率高于F处理,但差异不显著;J处理和F处理的出苗率显著高于CK。JF处理和F处理土壤培育的西瓜幼苗根冠比显著高于CK及J处理;JF处理的根冠比高于F处理,但差异不显著。JF处理土壤培育西瓜幼苗的壮苗指数显著高于CK、J处理和F处理;J处理壮苗指数高于F处理,但差异不显著;J处理和F处理的壮苗指数显著高于CK。

3 讨论与结论

研究表明,秸秆生物反应堆能显著提高连作土壤的有机质含量^[19],秸秆生物炭对黄壤的改良效果显著,能够增加土壤pH,提高有机质和氮磷钾含量^[20]。本试验结果表明,使用放线菌秸秆降解液处理西瓜连作土壤,能显著提高土壤pH及有机质含

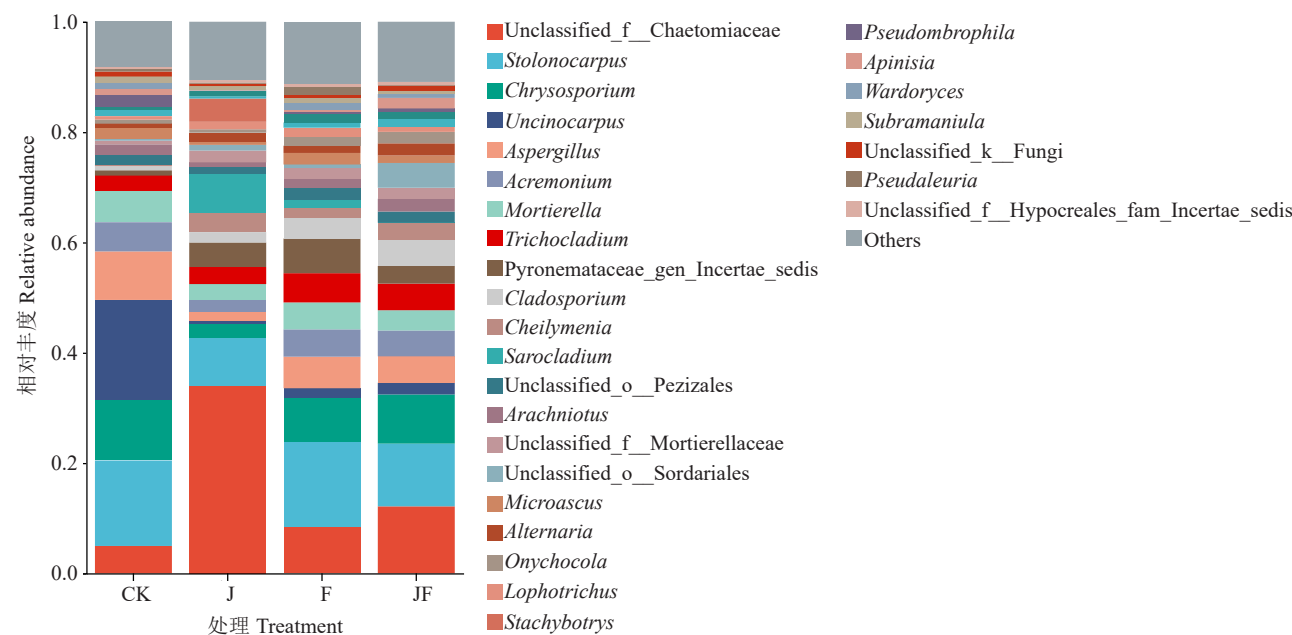


图 4 不同处理的土壤真菌属水平群落组成

Fig. 4 Fungal community composition at genus level under different treatments

表 5 不同处理土壤对西瓜幼苗生长发育的影响

Table 5 Effects of different treatments on seedling growth and development of watermelon							
处理 Treatment	出苗率 Emergence rate/%	茎粗 Stem diameter/ cm	株高 Plant height/ cm	根干质量 Root mass/ g	地上部分干质量 Aboveground dry mass/g	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数 Seedling strength index
J	90.73±1.82 b	0.30±0.07 b	6.6±1.24 a	0.12±0.02 a	0.16±0.03 a	0.750 0±0.07 b	0.012 72±0.002 b
F	87.12±2.63 b	0.32±0.08 b	6.8±1.51 a	0.12±0.02 a	0.14±0.03 a	0.857 1±0.07 a	0.012 23±0.002 b
JF	95.25±0.46 a	0.38±0.11 a	7.1±1.79 a	0.13±0.02 a	0.15±0.03 a	0.866 7±0.08 a	0.014 99±0.002 a
CK	67.89±3.42 c	0.28±0.04 b	6.2±1.02 b	0.08±0.01 b	0.11±0.02 b	0.727 3±0.06 c	0.008 58±0.001 c



图 5 不同处理土壤对西瓜幼苗生长发育的影响

Fig. 5 Effects of different soil treatments on growth and development of watermelon seedlings

量,与前人的研究结果相符。但土壤电导率及速效磷和速效钾含量有所降低,可能是因为放线菌和其他土壤微生物在分解秸秆时,会消耗土壤中的磷和钾来支持其生长和代谢,这种微生物活动可能导致土壤中可溶性磷和钾含量的暂时降低;也可能是秸秆分解过程中产生的有机物质可以与土壤中的磷和钾暂时形成不易溶解的复合物,从而降低土壤中磷和钾的有效性;磷和钾含量降低会导致土壤中可溶性盐含量降低,因此导致土壤电导率降低。

研究表明,连作西瓜会导致土壤酶活性的变化,如脲酶活性呈下降趋势,蔗糖酶活性呈上升趋势等^[21]。本试验结果表明,使用放线菌秸秆降解液处理西瓜连作土壤,显著提高了土壤中脲酶、转化酶及过氧化氢酶活性,但显著降低了碱性磷酸酶活性。土壤中的酶主要来源于微生物,土壤中微生物菌群的变化是酶活性变化的主要原因^[22]。脲酶的作用是催化尿素分解,微生物群落多样性增加使脲酶活性提高,进而提高了土壤中氮素含量。而碱性磷酸酶的作用是催化有机磷化合物的分解,从而提高土壤中磷素的有效性^[23],而本试验证明了磷酸酶活性的下降导致了土壤磷含量的降低。本试验中和对照相比,转化酶活性显著提高,是因为微生物数量增加,需要利用更多的碳源,所以分泌了更多的转化酶催化多糖物质的水解。过氧化氢酶在土壤中参与氧化还原反应,分解有害的过氧化物,可以间接缓解连作障碍,本试验中过氧化氢酶活性显著提高,也是微生物群落多样性增加的缘故。

研究表明,施用放线菌制剂能显著增加西瓜根际土壤中有益微生物的数量,如细菌和木霉菌,同时有效抑制尖孢镰刀菌数量,减弱连作障碍的根际微生态效应^[24-25]。特别是在发病高峰期,创造一个不利于病原菌生存的土壤环境,从而间接减少病害的发生^[26]。研究表明,施用放线菌制剂能有效抑制西瓜枯萎病的病原菌尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)的生长,通过竞争、重寄生作用及产生抗生物物质等方式,阻止或减缓病原菌的生长和扩展,从而减少病害的发生^[27-28]。放线菌秸秆降解物的施用可以显著增加土壤团聚体的数量和大小,以及多糖含量,这有助于改善土壤结构和增加生物多样性^[29]。本试验结果表明,使用放线菌秸秆降解液处理西瓜连作土壤,能显著增加土壤中细菌总数和放线菌含量,显著降低土壤中真菌总数和尖孢镰刀菌含量,显著提高细菌真菌比,从而改善西瓜连坐土壤的微生物群落环境,验证了前人的研究结果。

芽孢杆菌属(*Bacillus*)的细菌种类繁多、抗逆性强、繁殖快、代谢产物丰富、生防机制宽泛,常被用作生防菌^[30-31]。曾鲸津等^[32]研究表明,贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)MS06可能通过分泌几丁质酶和纤维素酶,溶解尖孢镰刀菌的细胞壁和菌丝,使其失去侵染能力,进而抑制病原菌的生长。在本研究中,与对照相比,处理土壤的芽孢杆菌属 *Bacillus* 含量显著增加,JF 处理土壤的尖孢镰刀菌含量显著降低,推测 JF 处理土壤通过增加芽孢杆菌含量抑制了尖孢镰刀菌的生长。芽孢杆菌同时兼具平衡土壤酸碱度^[33]、提高土壤氧化还原酶活性^[34]等功能,在本试验中都得到了验证。*JG30-KF-CM452* 属能够降解化学杀虫剂和除草剂^[35],*Gaiella* 和 *Streptomyces* 属于放线菌门,在土壤中具有促进植物残体降解和抑制病原菌传播的作用,连作后相对丰度的提升与土壤生态健康水平的提升密切相关^[36-37]。萨如拉等^[38]研究显示,秸秆还田后增加了有益细菌 *Gaiella* 属相对丰度,*Gaiella* 属被证明为抑制番茄枯萎病的关键微生物类群^[39]。链霉菌属具备良好的木质纤维素降解能力^[40],可产生活性代谢产物拮抗部分病原菌,具有明显的抑制效果^[41]。

4 个处理土壤中,毛壳菌科未分类属(*unclassified_f_Chactomiaceae*)和毛壳菌科 *Stolonocarpus* 属相对丰度较高,占总序列的 27.63%。毛壳菌可以通过产生抗菌等活性物质对土壤中的有害病原菌产生拮抗作用;还可以提高植物对土壤氮的利用效率,促进光合作用,调节植物激素的合成和代谢,进而促进植物生长;使植物产生诱导型系统抗性(*induced systemic resistance, ISR*);也通过生态位、营养物质竞争作用及重寄生等方式对植物起到生防作用^[42]。研究表明,球毛壳菌小麦秸秆发酵产物可以抑制辣椒疫霉菌^[43];毛壳菌几丁质酶液能抑制立枯丝核菌和烟草赤星病菌的菌丝生长^[44];球毛壳菌 ND35 显著提高了苦瓜幼苗的相对含水量、可溶性蛋白质含量和抗氧化酶活性,显著降低了脯氨酸和丙二醛含量,提高苦瓜幼苗抗旱性^[45];球毛壳 ND35 菌株的菌丝在黄瓜品种津研 4 号根部从表皮细胞之间的缝隙侵入,在表皮细胞和外皮层细胞中定殖,可与植物建立共生关系,并显著提高了黄瓜产量^[46]。在本研究中,与 CK 相比,J、F、JF 处理土壤的毛壳菌丰度显著增加,尖孢镰刀菌含量减少,幼苗壮苗指数增加,说明毛壳菌对西瓜连作土壤起到了拮抗有害病原菌、促进植物生长的作用。顶孢霉^[47]和枝孢菌^[48]都曾被用于生防菌。在本研究中,与

CK 相比,除 J 处理外(显著降低),F 处理和 JF 处理土壤的顶孢霉丰度均无显著变化,推测 J 处理中顶孢霉丰度的变化是由微生物之间的拮抗互作导致的。研究表明,绿头枝孢菌 LS1 可以防治香蕉枯萎病^[48]。在本研究中,与 CK 相比,J、F、JF 处理的枝孢菌属丰度显著升高,尖孢镰刀菌含量下降,可能是枝孢菌、毛壳菌等真菌及芽孢杆菌、放线菌等细菌共同作用的结果。

综上所述,与 CK 相比,JF 处理土壤的 pH、有机质含量、氧化还原酶(脲酶、转化酶、过氧化氢酶)活性和细菌数量显著提高;真菌数量显著降低;J、F、JF 处理显著提升了土壤微生物群落丰富度,4 个处理的真菌、细菌群落区分度较为明显;与 CK、J 处理、F 处理相比,JF 处理显著提高了西瓜幼苗的壮苗指数,推测枝孢菌、毛壳菌及芽孢杆菌、放线菌等共同作用改良了西瓜连作土壤的生态结构。

参考文献

- [1] 张磊,武竞春,张海英,等.西瓜重要性状功能基因研究进展[J].园艺学报,2023,50(12):2748-2764.
- [2] PERVAIZ Z H, IQBAL J, ZHANG Q M, et al. Continuous cropping alters multiple biotic and abiotic indicators of soil health[J]. Soil Systems, 2020, 4(4): 59.
- [3] GU X, YANG N, ZHAO Y, et al. Long-term watermelon continuous cropping leads to drastic shifts in soil bacterial and fungal community composition across gravel mulch fields[J]. BMC Microbiol, 2022, 22(1): 189.
- [4] WANG C, LIU Z, WANG Z C, et al. Effects of autotoxicity and allelopathy on seed germination and seedling growth in *Medicago truncatula*[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 908426.
- [5] 文芳芳,于兆国.北京西瓜主产区养分管理与连作障碍因子分析[J].中国土壤与肥料,2024(6):142-148.
- [6] XI H, SHEN J, QU Z, et al. Effects of long-term cotton continuous cropping on soil microbiome[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 18297.
- [7] 黎妍妍,彭五星,张婷,等.万寿菊秸秆堆肥在缓解烟草连作障碍中的作用[J].南方农业学报,2022,53(2):451-459.
- [8] DONG D, LI M Y, ZHANG T T, et al. Antagonistic activity of *Streptomyces alfalfae* 11F against *Fusarium* wilt of watermelon and transcriptome analysis provides insights into the synthesis of phenazine-1-carboxamide[J]. Plants- Basel, 2023, 12(22): 3796.
- [9] ZHANG Q, ACUÑA J J, INOSTROZA N G, et al. Endophytic bacterial communities associated with roots and leaves of plants growing in Chilean extreme environments[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 4950.
- [10] 赵梓鉴.放线菌肥对拱棚辣椒连作障碍的调控效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2024.
- [11] 胡琴琴.生防放线菌筛选及对西瓜连作障碍修复机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [12] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定:NY/T 1121.2—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [13] 国家林业局.森林土壤水溶性盐分分析:LY/T 1251—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [14] 国家林业局.森林土壤氮的测定:LY/T 1228—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [15] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定:NY/T 1121.7—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [16] 中华人民共和国农业部.土壤速效钾和缓效钾含量的测定:NY/T 889—2004[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定:GB 4789.2—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [18] GUAN S Y, ZHAN G D, ZHAN G Z. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 275-337.
- [19] 杨彦明,周祎,张兴隆,等.秸秆有机肥交替施用对黑土理化特性及菌群结构的影响[J].中国土壤与肥料,2021(4):1-10.
- [20] 宋尚成,朱凤霞,刘润进,等.秸秆生物反应堆对西瓜连作土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J].微生物学通报,2010,37(5):696-700.
- [21] 赵萌,李敏,王淼焱,等.西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J].微生物学通报,2008,35(8):1251-1254.
- [22] REARDON C L, KEIN A M, MELLE C J, et al. Enzyme activities distinguish long-term fertilizer effects under different soil storage methods[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 177: 104518.
- [23] BYUN E, MULLER C, PARISSE B, et al. A global dataset of gross nitrogen transformation rates across terrestrial ecosystems[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 1022.
- [24] 孙子淼,吴慧玲,张涛涛,等.5406 放线菌对西瓜的促生作用及对西瓜枯萎病的防控[J].科学技术与工程,2021,21(15):6242-6248.
- [25] 甘良,蓝星杰,戴蓬博,等.放线菌混合菌剂对西瓜枯萎病的防治作用研究[J].中国生物防治学报,2015,31(4):516-523.
- [26] 田程.哈茨木霉 T2-16 防控西瓜枯萎病的微生态机制初探[D].长沙:湖南大学,2019.
- [27] 张丽荣,李鹏,康萍芝,等.压砂西瓜枯萎病生防木霉菌筛选及其拮抗机制研究[J].河南农业科学,2018,47(5):75-78.
- [28] 陆楚月.绿色木霉 TV41 防控西瓜枯萎病的效果和机理研究[D].南京:南京农业大学,2015.
- [29] 台少华,扈进冬,位绍文,等.低温降解秸秆放线菌的筛选、鉴定及功能评价[J].山东科学,2023,36(2):50-58.
- [30] HUSNA, KIM B E, WON M H, et al. Characterization and genomic insight of surfactin-producing *Bacillus velezensis* and its biocontrol potential against pathogenic contamination in lettuce hydroponics[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(58): 121487-121500.
- [31] SANKARASUBRAMANIAN H. Bio-prospecting of endospore-based formulation of *Bacillus* sp. BST18 possessing antimicrobial genes for the management of soil-borne diseases of tomato[J]. Current Microbiology, 2022, 79(12): 380.
- [32] 曾鲸津,赵浩宇,刘江,等.番茄根际生防菌的分离鉴定及对镰

- 刀菌根腐病的生防潜力评价[J]. 山东农业科学, 2025, 57(2), 141-149.
- [33] 彭喜之, 王涛辉, 马琰怡, 等. 微生物菌剂对土壤酸碱性的改良研究[J]. 天津科技, 2021, 48(1): 42-45.
- [34] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 477-487.
- [35] 邓维琴, 刘书亮, 姚开, 等. 3-苯氧基苯甲酸降解菌 *Sphingomonas* sp. SC-1 降解苯酚环境条件及其降解中间产物的研究[J]. 微生物学通报, 2015, 42(3): 497-503.
- [36] LAUBER C L, STRICKLAND M S, BRAFORD M A, et al. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2407-2415.
- [37] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法 科技综合[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [38] 萨如拉, 杨恒山, 高聚林, 等. 西辽河平原区免耕秸秆还田方式对土壤微生物群落组成的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1067-1078.
- [39] ZHAO F Y, ZHANG Y Y, DONG W G, et al. Vermicompost can suppress *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* via generation of beneficial bacteria in a long-term tomato monoculture soil[J]. Plant and Soil, 2019, 440(1/2): 491-505.
- [40] GONG X J, YU Y, HAO Y B, et al. Characterizing corn-straw-degrading actinomycetes and evaluating application efficiency in straw-returning experiments[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1003157.
- [41] 鲍莹, 严梦圆, 吴萌, 等. 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(12): 2772-2778.
- [42] 冯超红, 李丽娟, 张姣姣, 等. 球毛壳菌促生防病机制及应用研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(4): 961-969.
- [43] 廖宏娟, 谭佳思, 张志斌, 等. 球毛壳菌小麦秸秆发酵产物抑制辣椒疫霉的稳定性及机制[J]. 中国农业科学, 2024, 57(3): 500-513.
- [44] 孙辉, 杨金奎, 张克勤. 毛壳菌几丁质酶的酶学性质及抑菌活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 168-173.
- [45] 李玲, 尹成林, 田叶韩, 等. 球毛壳菌 ND35 对干旱胁迫下苦瓜幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2018(3): 16-21.
- [46] 辛雅芬, 米士伟, 张淑玲, 等. 球毛壳菌在黄瓜上的侵染定殖及其对黄瓜生长和产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(4): 450-456.
- [47] 苏琴, 谢玲, 陈艳露, 等. 香蕉枯萎病生防菌绿头枝孢菌 LS1 的筛选鉴定[J]. 微生物学通报, 2019, 46(12): 3248-3256.
- [48] 路鹏鹏, 陈锐, 孙晓宇, 等. 枝顶孢霉制剂防治根结线虫过程中土壤酶活性和微生物数量的变化[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 277-280.