

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.04.009

基于微生态调控的蔬菜根结线虫病 绿色防控技术研究

——以番茄根结线虫病为例

魏周玲¹, 张琳丽¹, 王丹², 杜霞¹,
李石力¹, 况觅³

1. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;

2. 重庆西农植物保护科技开发有限公司, 重庆 400715;

3. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121

摘要: 蔬菜根结线虫病是一种由南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)侵染引起的土传病害, 具有寄主种类多、分布范围广、危害严重等特点, 严重威胁蔬菜产业的可持续发展。研究基于土壤酸碱平衡、土壤微生态平衡、土壤营养平衡、病原菌与寄主抗性平衡四个平衡理论, 集成并应用以牡蛎钾调酸技术、增施有机肥技术、中微量元素补充技术、抗性诱导技术和精准用药技术为核心的根结线虫绿色防控技术体系。研究发现: 该技术体系能显著提升土壤 pH 值, 降低土壤交换性酸; 提高土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、交换性钙和交换性镁等含量, 与对照相比分别提高了 0.35 倍、0.24 倍、0.30 倍、0.12 倍、0.48 倍、0.23 倍和 0.36 倍; 能显著提升土壤的酶活性; 对根结线虫病的防控效果显著, 相对防效达到 82.94%。综上, 以微生态调控为主的绿色防控技术体系能有效防控蔬菜根结线虫病, 具有很好的推广应用价值。

关键词: 微生态调控; 蔬菜根结线虫病;

四个平衡; 绿色防控

中图分类号: S433

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)04-0074-08

Study of Green Control Technology on Vegetable Root-knot

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 重庆市农业产业技术体系“蔬菜创新团队”项目(CQMAITS202306); 2024 年市农业农村委特色经济作物全域提质增效项目(2024 年山地设施蔬菜绿色高效生产技术集成示范)。

作者简介: 魏周玲, 硕士, 主要从事植物病害绿色防控技术研究。

通信作者: 况觅, 研究员。

Nematode Disease Based on Microbial Regulation ——Take Tomato Root-knot Nematode Disease as an Example

WEI Zhouling¹, ZHANG Linli¹, WANG Dan²,
DU Xia¹, LI Shili¹, KUANG Mi³

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. ChongqingXinong PlantProtection Technology Development Co. Ltd., Chongqing 400715, China;

3. Chongqing General Station of Agricultural Technology Extension, Chongqing 401121, China

Abstract: Vegetable root knot nematode disease is a soilborne disease caused by the infection of *Meloidogyne incognita*. It has the characteristics of many host species, wide distribution, and serious harm, which seriously threatens the sustainable development of vegetable production. This study based on the “four balances” theory of soil acid-base balance, soil microecological balance, soil nutrient balance, and pathogen and host resistance balance, to construct the green control technology system of root nematode by integrating and applying the technologies of acid regulation with oyster silicon powder, organic fertilizer application, microelement supplement, resistance inducing and precise application pesticides. The study showed that this technology system can significantly increase the soil pH value and reduce soil exchangeable acids. The content of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkaline dissolved nitrogen, available potassium, exchangeable calcium and magnesium was increased by 0.35, 0.24, 0.30, 0.12, 0.48, 0.23 and 0.36-fold, respectively, compared with control treatment. It can significantly improve the enzyme activity of soil and significantly control the root knot nematode disease. The relative control effect was 82.94%. In conclusion, the green control technology system based on micro-ecological regulation can effectively prevent and control vegetable root knot nematode disease, and has good application value.

Key words: microecological regulation; vegetable root knot nematode disease; four equilibria; green prevention and control

植物根结线虫病是导致农作物减产的重要病害之一,每年造成的损失超过1 500亿美元,被列为危害全球的十大植物类寄生线虫病之首^[1]。根结线虫是线虫门(Nematodo)侧尾腺口纲(Secernentea)垫刃目(Tylenchida)异皮线虫科(Heteroderidae)根结线虫属(*Meloidogyne*)的专化寄生农作物的一种病原线虫^[2],具有分布广泛,种类繁多,侵染寄主种类多等特点^[3]。根结线虫在种间、种内、群体间遗传变异较大,加剧了防治难度,导致作物受害后的产量损失一般为10%~30%,严重时可达50%以上,甚至绝收^[4]。在侵害过程中造成的植物伤口导致病原菌更易侵入,形成复合侵染,进一步加重病害发生。根结线虫在植株的每个时期都可以侵染,其中在幼苗期侵染危害较大。发病中后期,植物生长严重受阻,叶片出现不规则斑点,甚至穿孔,导致作物产量降低和品质下降^[5]。

根结线虫病是连作蔬菜区最主要的病害,在绝大多数蔬菜种植区都会发生并造成严重损失,近年来在我国主要蔬菜产区发生猖獗、危害严重,如番茄根结线虫对番茄产业种植造成了巨大的经济损失。由于根结线虫侵染的特殊性、危害的隐蔽性,对根结线虫难以取得理想的防治效果。同时,土壤酸化、营养元素和微生态失衡容易造成蔬菜根结线虫病的爆发^[6]。因此,

本研究基于“四个平衡”绿色生态防控理念,集成并应用以牡蛎钾调酸技术、增施有机肥技术、中微量元素补充技术、抗性诱导技术和精准用药技术为核心的根结线虫绿色防控技术体系,以期达到有效防控蔬菜根结线虫病害的目标。

1 材料与方法

1.1 试验地情况

试验地安排在重庆市潼南区,选择番茄根结线虫常年发病地块,其中示范区共设置 0.2 hm²,并以周边未进行处理的地块作为对照区。试验所用苗子均采用漂浮育苗,品种为番茄(合作 903 番茄),示范区均按照标准大田管理模式进行田间管理。

1.2 试验材料

30 亿/g 根茎康复合菌剂、牡蛎钾土壤调理剂[$\omega(\text{CaO}) \geq 10\%$, $\omega(\text{SiO}_2) \geq 4\%$, $\omega(\text{MgO}) \geq 1\%$]、希植美 1 号(30-10-10+1.1%TE)均购自重庆西农植物保护科技开发有限公司;精制有机肥购自重庆动植微农业科技有限公司;25%阿维·丁硫水乳剂购自四川百事东旺生物科技有限公司;0.5%氨基寡糖素水剂购自海南正业中农科技股份有限公司。

1.3 试验方法

试验设置处理区和常规处理区,常规处理区按当地生产和种植习惯进行大田管理,处理区在常规管理基础上,采用微生态调控防控根结线虫的绿色防控技术体系,具体包括如下技术要点:①调理土壤酸碱度,补充中微量元素:每 667 m² 施用牡蛎钾 100 kg。②增施微生物菌肥平衡土壤微生态:每 667 m² 增施 100 kg 精制有机肥,每 667 m² 施用 1 kg 根茎康,与有机肥混合均匀,条施可调控土壤微生态,创造不利于根结线虫发生的环境条件。③抗性诱导、补充元素:蔬菜移栽后 20~30 d 的,叶面喷施抗性诱导剂(每 667 m² 施 0.05 g),以及希植美 1 号,稀释 800~1 200 倍,每 667 m² 用量 50~200 g/次,7~10 d/次,施用 1~2 次。④早期预警、精准用药:在线虫病常发区应在菜苗移栽时采用 25%阿维·丁硫水乳剂 3 000 倍液进行灌根处理,每株 200 mL。综上,蔬菜根结线虫病害微生态调控核心技术详见表 1。

表 1 微生态调控蔬菜根结线虫病害技术措施一览表

处理	使用方法及用量	作用
牡蛎钾	移栽前每 667 m ² 条施牡蛎钾 100 kg	调节土壤酸碱度,补充中微量元素
增施有机肥	移栽前条施精制有机肥 100 kg 和根茎康 1 kg,按照 100:1 比例进行混配,现配现用	使用根茎康菌剂活化有机肥,促进有益微生物增殖,可调控土壤微生态
25%阿维·丁硫水乳剂+0.5%氨基寡糖素水剂	移栽时,线虫病常发区每 667 m ² 使用 25%阿维·丁硫水乳剂 60 mL+0.5%氨基寡糖素 200 mL,与定根水混合均匀后浇灌,每株 200 mL	降低土壤病原的数量
希植美 1 号+抗性诱导剂	移栽后 20~30 d,叶面喷施抗性诱导剂(每 667 m ² 施 0.05 g)+希植美 1 号,稀释 800~1 200 倍,每 667 m ² 用量 50~200 g/次	提升烟株抵抗力;补充营养,生根壮苗,减少因缺元素引起的植物黄化、僵苗、小叶

1.4 调查内容

1.4.1 土壤理化性质和酶活测定

在处理后 90 d, 采用五点取样法, 每点选取 4 株番茄植株并采取根际土, 于室内风干过 60 目网筛。土壤理化性质参照《土壤农业化学分析方法》^[7]和《土壤环境检测技术》^[8]进行检测, pH 值测定采用电位法; 交换性氢、交换性铝采用中和滴定法; 交换性钙、交换性镁采用原子吸收光度计法。

土壤的脲酶(S-UE)、蔗糖酶(S-SC)、过氧化氢酶和中性磷酸酶(S-NP)均采用试剂盒(北京盒子生工科技有限公司)测定。土壤脲酶用苯酚-次氯酸钠法, 以每天每克土样生成 1 μg $\text{NH}_3\text{-N}$ 定义为一个酶活力单位。土壤蔗糖酶采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法, 以每天每克土样中生成 1 mg 还原糖为一个酶活力单位。土壤中性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法, 以 37 $^{\circ}\text{C}$ 中每克土壤每天释放 1 nmol 酚为一个酶活力单位。土壤过氧化氢酶采用比色法, 以每天每克风干土样催化 1 mmol H_2O_2 降解为一个酶活力单位。所有操作根据试剂盒说明书。

1.4.2 根结线虫发生情况调查

在番茄成熟期时, 调查不同处理区的病害发生情况。首先将番茄根系冲洗干净, 然后参考以下的分级标准^[9]进行分级, 计算每个品种的发病率和病情指数: 0 级, 根系完好且无根结; 1 级, 可见极少数小根结; 2 级, 侧根出现清晰可见的小根瘤; 3 级, 出现一些较大根瘤和大量小根瘤, 根功能受损; 4 级, 75% 根系严重结瘤, 根系丧失功能; 5 级, 主根全部出现根结, 变色枯黄。

调查后按照下列公式计算发病率和病情指数:

$$\text{发病率}(\%) = \frac{\text{发病株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\%$$
$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{相应级数值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高病级}} \times 100$$

1.4.3 番茄产量和品质的测定

番茄进入成熟期后, 每个区采用五点取样法, 每点选取一株番茄, 每株随机选取 2 个番茄, 每个区共调查 10 个番茄, 用游标卡尺测量番茄横径, 用天平测量番茄单果重, 并计算整株产量。取处理区和对照区番茄植株的中部成熟果实测定可溶性固形物、可溶性糖、总酸、维生素 C 等品质指标, 折射仪法测定可溶性固形物, 蒽酮比色法测定可溶性糖, 滴定法测定总酸含量, 抗坏血酸分光光度法测定维生素 C 含量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2020 对试验数据进行分析, 计算病情指数和相对防效, 采用 SPSS 进行方差分析并利用 Prism 软件作图。

2 结果与分析

2.1 微生态调控技术对土壤理化性质的影响

微生态调控技术能有效改善土壤理化性质。其中, 增施牡蛎钾可以提升土壤酸碱度, 处理区的土壤酸碱度为 6.05, 极显著高于对照区的 5.34; 同时处理区的交换性氢离子和铝离子分别为 0.34 cmol/kg 和 1.69 cmol/kg, 总量为 2.03 cmol/kg, 显著低于对照区总量的 5.56 cmol/kg

(表2)。增施牡蛎钾和有机肥能有效提升土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、交换性钙和交换性镁等指标,与对照区相比,分别提高了0.35倍、0.24倍、0.30倍、0.12倍、0.48倍、0.23倍和0.36倍(表3)。

表2 微生态调控技术对土壤酸碱度、交换性酸的影响

组别	pH	交换性酸/($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
		交换性氢离子	交换性铝离子	总量
处理区	$6.05 \pm 0.02^{**}$	$0.34 \pm 0.03^{**}$	$1.69 \pm 0.06^{**}$	$2.03 \pm 0.09^{**}$
对照区	5.34 ± 0.06	0.55 ± 0.05	5.01 ± 0.19	5.56 ± 0.24

注: **表示相关性极显著($p < 0.01$), 后同。

表3 微生态调控技术对土壤理化性质的影响

组别	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性钙/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性镁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
处理区	$46.12 \pm 0.38^{**}$	$0.97 \pm 0.08^{**}$	$0.92 \pm 0.06^{**}$	$159.90 \pm 2.59^{**}$	$266.44 \pm 3.89^{**}$	$1\ 002.71 \pm 11.21^{**}$	$81.85 \pm 3.11^{**}$
对照区	34.06 ± 0.42	0.78 ± 0.04	0.71 ± 0.01	143.07 ± 6.08	180.41 ± 10.66	817.95 ± 11.03	60.08 ± 1.49

2.2 微生态调控技术对土壤酶活性的影响

微生态调控技术能促进土壤酶活性。其中,脲酶是参与土壤有机质循环的关键酶之一,处理区的土壤脲酶为1 255 U/g,极显著高于对照区的927 U/g。土壤蔗糖酶的活性与土壤有机质、氮、磷的含量以及微生物数量等因子密切相关,处理区的土壤蔗糖酶为12.36 U/g,显著高于对照区的4.81 U/g。土壤磷酸酶是土壤生物磷代谢的关键酶,在土壤磷循环中起重要的作用,处理区的土壤磷酸酶活性为1 120 U/g,显著高于对照区的498 U/g。土壤过氧化氢酶活性直接与土壤氮、磷、钾的有效性以及土壤微生物呼吸量和总生物量相关,在一定程度上可以反映土壤微生物分解代谢能力的强弱,通过微生态调控处理的土壤过氧化氢酶为6.59 U/g,显著高于对照区的4.34 U/g(表4)。

表4 微生态调控技术对土壤酶活性的影响

组别	脲酶(U/g)	蔗糖酶(U/g)	磷酸酶(U/g)	过氧化氢酶(U/g)
处理区	$1\ 255 \pm 38.24^{**}$	$12.36 \pm 0.15^{**}$	$1\ 120 \pm 25.73^{**}$	$6.59 \pm 0.04^{**}$
对照区	927 ± 26.62	4.81 ± 0.17	498 ± 16.04	4.34 ± 0.03

2.3 微生态调控技术对番茄根结线虫的防控效果

通过牡蛎钾调酸、增施有机肥、补充微量元素和抗性诱导以及精准用药等微生态调控技术,能有效改善土壤理化性质、促进土壤酶活性,同时对番茄根结线虫有很好的防控效果。系统调查发现,微生态调控技术能有效降低番茄根结线虫病的发生:其处理区的发病率为24.15%,显著低于对照区的78.17%;病情指数为5.98,显著低于对照区的35.06,相对防效能达到82.94%(图1)。

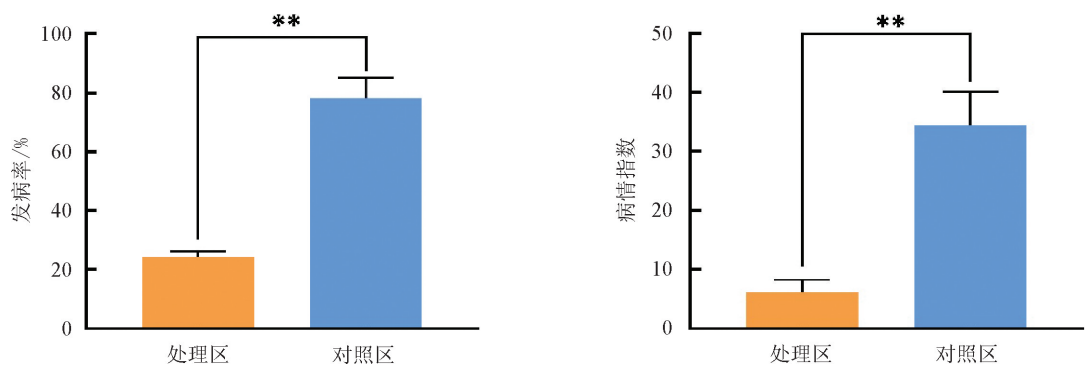


图 1 微生态调控技术对蔬菜根结线虫病发病的影响

2.4 微生态调控技术防控根结线虫对番茄品质及产量的影响

微生态调控技术能提升番茄的果实大小和产量。其中，处理区的单果横径为 7.15 cm，极显著高于对照区的 6.07 cm；处理区的单果重和单株产量分别为 249.96 g 和 1.69 kg，极显著高于对照区的 207.82 g 和 1.41 kg(表 5)。同时，微生态调控技术通过叶面补充中微量元素及土壤调理等措施，促进了番茄的品质，提升了果实的可溶性糖、维生素 C 等指标，相对于对照区，分别提升了 0.24 倍和 0.06 倍，而不影响可溶性固形物和总酸等指标(表 5)。

表 5 微生态调控技术对番茄品质及产量的影响

组别	单果横径/ cm	单果重/ g	单株产量/ (kg/株)	可溶性固 形物/%	可溶性糖/ %	总酸/ %	维生素 C/ (mg/100 g)
处理区	7.15±0.31 **	249.96±2.17 **	1.69±0.22 **	4.78±0.03	4.97±0.01 **	0.67±0.01	25.68±0.89 **
对照区	6.07±0.22	207.82±4.26	1.41±0.30	4.62±0.06	4.02±0.03	0.61±0.02	24.19±1.11

3 讨论与结论

蔬菜根结线虫病是一种根结线虫主导的土传性病害，其发生与土壤理化性质和植物自身密切相关。土壤微生物和土壤酶共同营造了土壤的微生态环境，并影响着植株生长以及根际周围有益和有害生物的种群动态^[10]。研究发现，根际土壤蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶及脲酶等活性与根结线虫发病呈负相关^[11-12]；禾本科作物伴生番茄根系可以提高番茄根区土壤脲酶、蛋白酶和蔗糖酶的活性^[13]，微生物菌肥可以提高罗汉果根系土壤脲酶和过氧化氢酶的活性，降低土壤根结线虫及其卵的数量^[14]。土壤根际微生物是植物土传病害的第一道保护屏障，有研究表明，部分根际微生物丰富的抑制性土壤可以不使用杀虫剂也能保持植株健康^[15]；Adam 等^[16]研究发现，未灭菌土壤里根结线虫数量比灭菌土壤中的数量少 93%，且形体较小，这直接说明了土壤中存在微生物可以抑制线虫的生长及存活。江其朋等^[17]发现土壤中的芽单胞菌属、镰刀菌属与根结线虫病发生密切相关。黄阔等^[18]发现外源施用淡紫拟青霉、枯草芽孢杆菌、哈茨木霉、荧光假单胞菌等微生物菌剂对根结线虫病可以起到较好的防治效果。王金峰等^[19]发现施用天然活性物质牡蛎粉可以缓解烟草根结线虫病的发生以及促进烟株生长。另外，根际微生物能够产生一些抑制根结线虫活性的物质，如 NH₃ 和 NO₂，这些物质能改变根系分泌物，影

响线虫卵孵化,抑制线虫侵染活性,诱导植物产生系统抗线虫能力^[20]。有研究表明,生物有机肥携带的“将军型”功能微生物不仅可以抑制病原菌,降低其生存力,还能够重塑根际土壤细菌群落,激发土著有益菌群,并与其协同增强植物抗病能力^[21],最终提高作物产量与品质。

本研究通过集成微生态调控关键技术体系,集成了以牡蛎钾土壤调酸技术、增施有机肥技术、中微量元素补充、抗性诱导技术和精准用药技术为核心的根结线虫绿色防控技术体系,处理区有效提升了土壤 pH 值、降低土壤交换性酸,提升了土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、交换性钙和交换性镁等指标。研究表明,通过牡蛎钾调酸、增施有机肥等技术措施,能有效改善土壤酸碱度和土壤理化性质。土壤酸化与作物病害发生密切相关,因此,调酸技术需根据土壤酸化程度进行调节。通过前期研究发现,针对 pH 值在 4.5~5.5 的地块每 667 m² 施用牡蛎钾 200 kg, pH 值在 5.5~6.0 的地块每 667 m² 施用牡蛎钾 100 kg, pH 值在 6.0~6.5 的地块每 667 m² 施用牡蛎钾 30~50 kg,均匀撒施后翻地,可有效改良土壤,提高 pH 值,补充钙、镁离子和微量元素,是避免线虫病发生的重要技术措施。同时,与对照区相比,处理区的脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶和过氧化氢酶等指标均极显著提升。整体而言,以微生态调控为核心的根结线虫绿色防控技术能有效改善土壤理化性质和促进土壤酶活性,塑造了健康的土壤环境,有效促进了土壤有益菌的定殖,抵御了根结线虫的侵染和定殖,但该技术体系落实后是否能有效改善土壤微生态有待进一步研究。

蔬菜根结线虫病在蔬菜连作种植区发生尤为严重,近年来在重庆蔬菜种植基地也有发生危害。本研究通过集成微生态调控为核心的根结线虫绿色防控技术体系,技术落实后能有效防控番茄根结线虫病发生,其中处理区的发病率仅为 24.15%,病情指数为 5.98,显著低于对照区的发病率 78.17%和病情指数 35.06,相对防效能达到 82.94%。另外,微生态调控技术能有效促进番茄果实大小和产量,处理区的单株产量能达到 1.69 kg,显著高于对照区的 1.41 kg;同时,综合处理区的番茄可溶性糖、维生素 C 等品质指标显著提升。以微生态调控为核心的根结线虫绿色防控技术体系能有效防控根结线虫病,促进番茄产量和品质提升,值得进一步大面积推广应用。本研究为蔬菜根结线虫病防治提供了可行的解决办法和理论基础。然而,根结线虫侵染寄主植物是一个复杂的过程,未来仍可从影响蔬菜根结线虫病发生的关键因子入手,寻找有效控制根结线虫病的新方法,尤其是将多种病害防控措施及蔬菜健康管理的方法相结合,构建并优化蔬菜根结线虫病的综合健康维护体系。

参考文献:

- [1] 王丽菲,武小斌,朱晓峰,等. 南方根结线虫生防真菌的筛选鉴定及防效研究[J]. 植物保护, 2024, 50(6): 62-70,125.
- [2] 金娜,陈永攀,刘倩,等. 我国蔬菜根结线虫发生、致害和绿色防控研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 424-438.
- [3] 胡倩茹. 南方根结线虫侵染后番茄根系分泌物的变化及根际普通变形杆菌 BX 的响应[D]. 昆明: 云南大学, 2022.
- [4] 陈晶伟,黄泓品,李硕,等. 寄生番茄的拟禾本科根结线虫的鉴定及对番茄不同品种的趋性[J]. 植物保护, 2024, 50(5): 63-71.
- [5] 赵春,翟辉建. 设施蔬菜根结线虫病绿色高效综合防治技术[J]. 河南农业, 2024(17): 58.
- [6] 刘勇鹏,张涛,王秋岭,等. 生物菌剂防治设施蔬菜根结线虫研究进展[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(10): 9-14.

- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [8] 中国环境监测总站. 土壤环境监测技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [9] 徐文东, 计克有, 成志荣, 等. 不同药剂对生菜根结线虫的防效试验[J]. 云南农业科技, 2024(S1): 53-54.
- [10] 卢英昊, 孙艳洁, 史庆华, 等. 黄瓜秸秆原位还田施用不同菌剂对土壤理化性质、黄瓜生长及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(9): 116-121.
- [11] 王宏宝, 毛佳, 曹凯歌, 等. 设施黄瓜根结线虫病发生危害与土壤酶活相关性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 621-625.
- [12] 王宏宝, 曹凯歌, 毛佳, 等. 不同深度土壤肥力指标与黄瓜根结线虫病相关性分析[J]. 福建农业学报, 2019, 34(10): 1197-1202.
- [13] 杨瑞娟, 王腾飞, 周希, 等. 禾本科作物伴生对番茄根区土壤酶活性、微生物及根结线虫的影响[J]. 中国蔬菜, 2017(3): 38-42.
- [14] 冯世鑫, 蒋妮, 陈乾平, 等. 微生物菌肥对罗汉果根结线虫和土壤酶活性的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(4): 73-78.
- [15] RAAIJMAKERS J M, WELLER D M. Natural Plant Protection by 2, 4-Diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas* spp. in Take-all Decline Soils [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 1998, 11(2): 144-152.
- [16] ADAM M, WESTPHAL A, HALLMANN J, et al. Specific Microbial Attachment to Root Knot Nematodes in Suppressive Soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(9): 2679-2686.
- [17] 江其朋, 江连强, 龚杰, 等. 影响四川凉山地区烟草根结线虫病发生的关键因子分析[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(6): 89-98.
- [18] 黄阔, 李石力, 张永强, 等. 不同微生物菌剂对烟草根结线虫病控制效果研究[J]. 植物医生, 2019(6): 28-33.
- [19] 王金峰, 江连强, 刘东阳, 等. 牡蛎粉对烟草根结线虫病的防控效果研究[J]. 植物医学, 2022, 1(4): 31-37.
- [20] 刘晓艳, 闵勇, 黄大野, 等. 根结线虫病害的发生与土壤微生物群落的关系研究进展[J]. 长江蔬菜, 2015(24): 32-36.
- [21] TAO C, LI R, XIONG W, et al. Bio-Organic Fertilizers Stimulate Indigenous Soil *Pseudomonas* Populations to Enhance Plant Disease Suppression[J]. Microbiome, 2020, 8(1): 137.

责任编辑 杨光明