

不同药剂种类对甜瓜苗期根结线虫的防治效果

杨甜¹, 马和芳¹, 王香¹, 翁爱群², 张万², 马建祥¹

(1. 西北农林科技大学园艺学院 陕西杨凌 712100; 2. 泾阳县蔬菜产业服务中心 陕西泾阳 713700)

摘要:为筛选出防治根结线虫效果优良的药剂,选取4种类型的8种药剂对感染根结线虫的甜瓜苗进行处理;以正常灌溉不使用药剂为对照(CK),比较其生长指标、叶片抗氧化系统酶活性、虫口减退率以及根结指数的变化。结果表明,与CK相比,药剂处理可有效缓解根结线虫对甜瓜苗生长的危害,增强叶片中过氧化物酶(POD)与超氧化物歧化酶(SOD)活性,同时使过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量、过氧化氢(H₂O₂)含量及超氧阴离子(O²•⁻)产生速率下降。其中,41.7%氟吡菌酰胺处理的甜瓜幼苗虫口减退率达到92.87%,根结防治效果达到60.79%。综合比较,41.7%氟吡菌酰胺每株甜瓜苗施用量为2.5×10⁻³ mL效果最优,其次为蜡样芽孢杆菌(有效活菌数1×10¹⁰ CFU·g⁻¹),每株用量0.125 g,再次为哈茨木霉菌(有效活菌数1×10¹⁰ CFU·g⁻¹),每株用量0.125 g。试验结果可为生产实践中药剂的选择提供参考依据。

关键词:甜瓜;生物防治;根结线虫

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)05-116-09

Control effect of different pesticide types on root-knot nematode in melon seedlings

YANG Tian¹, MA Hefang¹, WANG Xiang¹, WENG Aiqun², ZHANG Wan², MA Jianxiang¹

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Jingyang County Vegetable Industry Service Center, Jingyang 713700, Shaanxi, China)

Abstract: In order to screen out excellent pesticides for controlling root-knot nematodes, eight pesticides from four different types were selected for treatment of melon seedlings infected with root-knot nematodes. Growth index, the enzyme activity of leaf antioxidant system, the reduction rate of insect mouth and the change of root knot index were measured and compared, using normal irrigation and no pesticide application as the control group (CK). The results showed that compared to CK, pesticide treatment effectively alleviated the damage caused by root-knot nematode to melon seedling growth, enhanced the activity of peroxidase and superoxide dismutase in the leaves, while reducing the activity of catalase, as well as the content of malondialdehyde, hydrogen peroxide and the rate of superoxide anion production. Among the treatments, the 41.7% fluxamide treatment achieved a nematode reduction rate of 92.87% and a root-knot control effect of 60.79%. Comprehensive comparison showed that the optimal dosage for each melon seedlings was 2.5×10⁻³ mL of 41.7% fluxamide, followed by *Bacillus cereus* (effective 1×10¹⁰ CFU·g⁻¹) at 0.125 g, and *Trichoderma harzianum* (effective 1×10¹⁰ CFU·g⁻¹) at 0.125 g. The results of this study can provide a reference for pesticide selection in production practices.

Key words: Melon; Biological control; Root-knot nematode

甜瓜(*Cucumis melo*)是重要的经济作物,在中国水果生产和消费中有重要的地位^[1];有栽培周期短、投入产出比高、增加农民收入效果显著等优点,目前我国甜瓜种植的主产区以设施栽培为主,其中连作模式占据大部分^[2],由此加重了根结线虫病的发生。根结线虫在设施大棚适宜的温度下可快速

生长,并产生世代重叠现象,给农户带来严重的经济损失^[3]。根结线虫病的发生和危害呈逐年加重趋势,不仅造成甜瓜植株矮化甚至死亡,而且使品质、产量和商品率严重下降,减产高达50%^[4],对甜瓜产业可持续发展已构成严重威胁。

根结线虫病在生产中主要采用化学防治,因为

收稿日期:2024-11-28;修回日期:2025-02-26

基金项目:陕西省西瓜产业技术体系建设(省创新驱动40);陕西省重点研发计划(2023-YBNY-010);陕西省省级农业科技创新专项

作者简介:杨甜,女,在读硕士研究生,主要从事甜瓜病虫害防治方面的研究。E-mail: 141823442@qq.com

通信作者:马建祥,男,研究员,主要从事西瓜甜瓜育种和栽培技术研究。E-mail: majianxiang@126.com

化学药剂见效快,而农药的滥用和连年使用,势必会造成水、土壤、环境大气等方面的污染,引起食物中农药的残留^[5],对人类健康构成直接或潜在的危害风险。而生物防治方法主要利用微生物及其代谢物对根结线虫病进行防治,尽管对环境伤害小并且不会对人体健康造成威胁,可是见效慢的缺点也较为明显。为了实现根结线虫的有效生物防治,大量的生物防治微生物及其代谢物被不断发现和鉴定。因此,笔者通过对侵染根结线虫的幼苗期甜瓜使用4种不同类型的8个药剂,从甜瓜幼苗期的生长、生理指标以及对线虫的防治效果进行综合比较,以期筛选出防效好的制剂,为生产实践中根结线虫的防治提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试甜瓜品种为千玉6号,属于杂交薄皮型甜瓜,种子由杨凌千普农业开发有限公司提供。供试真菌生物菌剂为淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)(有效活菌数 1×10^{10} CFU $\cdot$ g $^{-1}$)、哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)(有效活菌数 1×10^{10} CFU $\cdot$ g $^{-1}$),细菌生物菌剂包括蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)(有效活菌数 1×10^{10} CFU $\cdot$ g $^{-1}$)和苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)(有效活菌数 1×10^{10} CFU $\cdot$ g $^{-1}$),均由潍坊佳淇生物科技有限公司提供;放线菌生物菌

剂包括密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*)(有效活菌数 2×10^9 CFU $\cdot$ g $^{-1}$)和娄彻氏链霉菌(*Streptomyces rochei*)(有效活菌数 2×10^9 CFU $\cdot$ g $^{-1}$),由陕西博秦生物工程有限公司提供。化学药剂主要包括1.8%阿维菌素乳油(由山东绿德地生物科技有限公司提供)、41.7%氟吡菌酰胺(由德国拜耳有限公司提供)。供试病根来自西北农林科技大学蔬菜实验基地塑料大棚。

1.2 方法

1.2.1 根结线虫二龄幼虫的准备 根结线虫分离自发病南瓜根组织,参考周冬梅等^[6]方法收集并在显微镜下确定二龄幼虫数量,用无菌水将其配制成150条 $\cdot$ mL $^{-1}$ 的线虫悬浮液备用。

1.2.2 盆栽试验与药剂处理 于2023年11月24日将甜瓜种子进行温汤浸种,然后放置在28℃培养箱中进行催芽,待种子露白之后播于50孔穴盘中育苗。试验采取随机区组设计,共设9个处理,以清水灌溉为CK,每个处理设3次重复,每个重复10株,待幼苗长至3叶1心时移栽;于2024年1月6日在西北农林科技大学温室大棚进行盆栽试验,将甜瓜苗定植在直径为150mm的圆形花盆中,每株加入1500条根结线虫。接虫后12h,根据药剂使用说明对幼苗进行药剂灌根处理,每株幼苗施药50mL,如表1所示。对甜瓜幼苗植株进行常规管理,药剂处理后30d进行生长指标、叶片生理指标、

表1 供试药剂用量
Table 1 Scale for test agents

处理 Treatment	药剂名称 Nematocide name	药剂种类 Nematocide types	稀释倍数 Dilution ratio	稀释后单株用量 Amount per plant/mL
T1	淡紫拟青霉 <i>Paecilomyces lilacinus</i>	真菌 Fungus	300	50
T2	哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	真菌 Fungus	300	50
T3	蜡样芽孢杆菌 <i>Bacillus cereus</i>	细菌 Bacteria	300	50
T4	苏云金芽孢杆菌 <i>Bacillus thuringiensis</i>	细菌 Bacteria	300	50
T5	密旋链霉菌 <i>Streptomyces pactum</i>	放线菌 Actinomycetes	300	50
T6	娄彻氏链霉菌 <i>Streptomyces rochei</i>	放线菌 Actinomycetes	300	50
T7	1.8%阿维菌素乳油 1.8% Abamectin EC	化学药剂 Emulsifiable concentrate	400	50
T8	41.7%氟吡菌酰胺 41.7% Fluopyram	化学药剂 Emulsifiable concentrate	3000	50
CK	清水 Purified water		0	50

根结指数以及虫口密度的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标的测定 药剂处理后30d每个处理选取4株甜瓜幼苗,共3次重复,使用卷尺和游标卡尺对幼苗地上生长指标进行测定。采用植物根系分析系统对甜瓜幼苗根系进行扫描测定总根长、总根表面积、根系平均直径以及根尖数。

1.3.2 叶片理化指标的测定 采用氮蓝四唑(NBT)还原法测定甜瓜叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[7];采用四氯化钛法^[8]测定过氧化氢(H₂O₂)含量,使用刘碧容等^[9]的方法测定超氧阴离子(O²⁻·)产生速率,采用王学奎^[10]的方法测定丙二

醛(MDA)含量。

1.3.3 根结线虫数量的测定 采用离心浮选法对土壤中线虫数量进行统计^[11]。在原基础上进行了改良,称取 10 g 供试土样置于 50 mL 离心管内,加水至 50 mL 并充分摇匀,置于离心机内以 2000 r·min⁻¹ 离心 5 min,弃去上清液,加入配好的浓度为 35% 的蔗糖溶液摇匀。再次以 2000 r·min⁻¹ 离心 5 min,用 300 目和 500 目网筛套在一起,将离心管内的溶液倒入筛网,并用水冲洗,最后将筛网里的线虫分别洗到带平行横纹的塑料培养皿中,置于显微镜下计数,计算虫口减退率及防效^[12]。

虫口减退率/%=(处理前虫口数-处理后虫口数)/处理前虫口数×100;

虫口防效/%=(处理虫口减退率-CK 虫口减退率)/(100-CK 虫口减退率)×100。

1.3.4 根结指数的评定 试验结束后将甜瓜根系洗净,根据分级标准:0 级单株根瘤数量 0 个;1 级单株根瘤数量 1~10 个;2 级单株根瘤数量 11~30 个;3 级单株根瘤数量 31~70 个;4 级单株根瘤数量 71~150 个;5 级单株根瘤数量 150 个以上;对根系发病情况进行分级统计,计算根结指数^[13]。

根结指数/%=Σ(各级植株数×级数)/(调查总株数×5)×100;

根结防治效果/%=(CK 根结指数-处理根结指数)/CK 根结指数×100。

1.3.5 不同药剂对甜瓜苗期防治效果的综合评价 分别使用主成分分析法和模糊数学隶属函数分析法对甜瓜苗期的生长指标和生理指标进行综合评估,得到综合分析值进行排序,选出防治效果

最优的处理药剂。隶属函数分析法的计算公式为^[14]:

指标与防治效果呈正相关时,

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}); \quad (1)$$

指标与防治效果呈负相关时,

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})。 \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个处理第 j 个指标的测定值; X_{imin} 为 j 指标中的最小值; X_{imax} 为 j 指标中的最大值; U_{ij} 为第 i 个处理 j 指标的隶属函数值。

通过隶属函数公式计算出各个处理的综合评价价值,综合评价价值越大表明防治效果越好,综合评价价值计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n \frac{U_{ij}}{n}, i=1,2,3,\dots,n。 \quad (3)$$

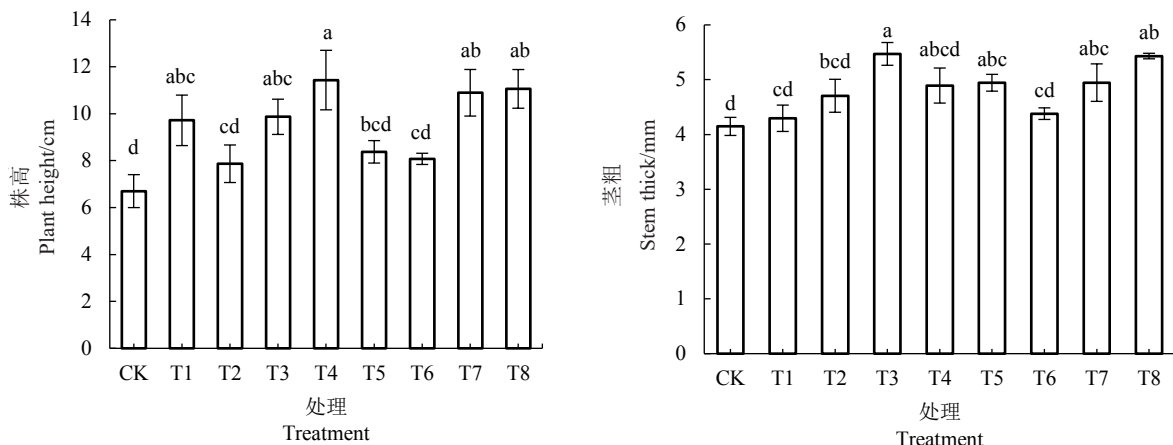
1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理与隶属函数值计算,使用 SPSS 23 软件进行方差分析及主成分分析,采用 Duncan 氏多重比较法进行差异显著性检验,使用 Origin Pro2022 作图。

2 结果与分析

2.1 不同药剂处理对甜瓜生长指标的影响

2.1.1 地上生长指标 从图 1 来看,使用 8 种药剂对甜瓜进行处理后在株高与茎粗方面与 CK 相比部分存在显著差异。经过药剂处理的甜瓜幼苗与 CK 相比株高都有不同程度提高,其中 T4 处理表现最为优异,相比 CK 显著提高 70.64%,T7 与 T8 两种化学药剂次之,分别显著提高 62.53%和 62.14%。



注:不同小写字母代表处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

图 1 不同药剂处理下甜瓜地上生长指标比较

Fig. 1 Ground growth index of melon seedlings treated with different agents

从茎粗方面来看,使用药剂处理后的幼苗茎粗相比 CK 更粗,其中 T3 处理最高,比 CK 显著提高了 32.13%;其次是两种化学药剂 T8 与 T7,分别提高了 31.16%和 19.57%,处理 T5 与 CK 也存在显著差异,相比 CK 提高 19.21%,其余处理与 CK 之间并无显著差异。

2.1.2 地下生长指标 甜瓜幼苗经过 8 种药剂处理后的根系生长指标与 CK 相比部分存在显著差异(表 2)。从总根长方面来看,处理 T3、T5 和 T8 与 CK 相比存在显著差异,分别显著提高 112.32%、56.33%和 120.41%,其余处理与 CK 相比总根长有所提高但无显著差异。总根表面积中,

处理 T2、T3、T5、T8 与 CK 之间差异显著,分别提高 82.82%、209.11%、84.85%、161.81%,其余处理与 CK 之间无显著差异。根系平均直径中,处理 T6 最高,相比 CK 提高了 19.19%,但差异未达到显著水平,其余处理与 CK 相比根系平均直径都有一定量的减少。在根尖数方面,处理 T8 和 T2 与 CK 相比存在显著差异,分别增加 130.75%和 107.50%;除处理 T4 与 T6 外,其余处理与 CK 相比根尖数都有所增加,但是与 CK 的差异不显著。以上结果表明,使用这 8 种药剂对甜瓜幼苗进行灌根处理,均可以缓解根结线虫对根系的危害。

表 2 不同药剂处理下甜瓜幼苗地下生长指标比较

Table 2 Comparison of underground growth indicators of melon seedlings under different reagent treatments

处理 Treatment	总根长 Total root length/cm	总根表面积 Total root surface area/cm ²	根系平均直径 Mean diameter of root system/mm	根尖数 Root point number
CK	307.51±15.90 c	22.18±1.11 c	0.99±0.01 ab	760.81±70.92 cd
T1	433.88±69.63 bc	26.31±6.12 bc	0.72±0.03 cd	1 049.75±228.63 abcd
T2	356.99±26.95 bc	40.55±4.88 b	0.67±0.05 d	1 578.67±477.46 ab
T3	652.91±74.63 a	68.56±8.49 a	0.91±0.10 bc	1 357.25±136.65 abc
T4	391.94±31.91 bc	33.70±5.44 bc	0.87±0.04 bcd	721.25±135.12 cd
T5	480.74±15.91 b	41.00±2.22 b	0.88±0.04 bcd	1 080.81±119.34 abcd
T6	361.80±29.20 bc	35.37±4.47 bc	1.18±0.15 a	605.42±194.73 d
T7	381.87±27.75 bc	35.32±2.07 bc	0.84±0.03 bcd	921.25±97.44 bcd
T8	677.78±62.22 a	58.07±2.62 a	0.87±0.03 bcd	1 755.58±222.52 a

注:同列数字后不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters after the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 不同药剂处理对甜瓜苗期叶片抗氧化特性的影响

图 2 显示,经过 8 种药剂处理的甜瓜苗期叶片 CAT 活性与 CK 相比都有一定程度的下降,除处理 T8 外,其余处理与 CK 之间都有显著差异。从 SOD 活性来看,各处理与 CK 相比均有一定程度提高,除处理 T8 外,其余处理与 CK 均存在显著差异,其中 T2、T5 和 T6 处理提高最为显著,分别比 CK 显著提高 18.51%、20.22%、20.87%。从 POD 活性来看,所有处理与 CK 相比均有显著差异,不同的药剂处理酶活性都有不同程度提高,其中处理 T4 表现最为突出,比 CK 显著提高 250.74%。

从图 2 可知,使用药剂处理的甜瓜幼苗叶片中超氧阴离子产生速率和 MDA 含量与 CK 相比均有下降的趋势。其中,所有处理 MDA 含量与 CK 之间均有显著差异,处理 T3 和 T8 分别显著下降 27.39%和 29.84%;除处理 T5 与 T6 外,其余处理超氧阴离子产

生速率与 CK 之间存在显著差异,其中处理 T7 下降了 46.07%,表现最为优异。在 H₂O₂ 含量中,除处理 T1 与 T2 之外,其余处理与 CK 之间存在显著差异,与 CK 相比均有一定程度下降,其中以处理 T3 的下降趋势最为显著,与 CK 相比,H₂O₂ 含量下降 13.48%,处理 T2 与 CK 相比差异不显著且比 CK 有所增加。以上结果表明,与 CK 相比,8 种药剂对甜瓜幼苗期叶片中 CAT 活性、超氧阴离子产生速率及 MDA 含量都有降低的作用,除处理 T2 之外其余各处理对 H₂O₂ 含量均有降低的作用;同时可以使 SOD 活性和 POD 活性增强,提高甜瓜对根结线虫的抗性。

2.3 不同药剂处理后甜瓜苗期的根结线虫减退与根结防治效果

由表 3 可知,甜瓜苗期使用 8 种药剂后与 CK 相比虫口减退率都有所提升。其中,处理 T4、T5 和 T8 虫口减退率最高,与 CK 呈显著差异,虫口防效分别达到 72.43%、68.32%和 84.80%,表明使

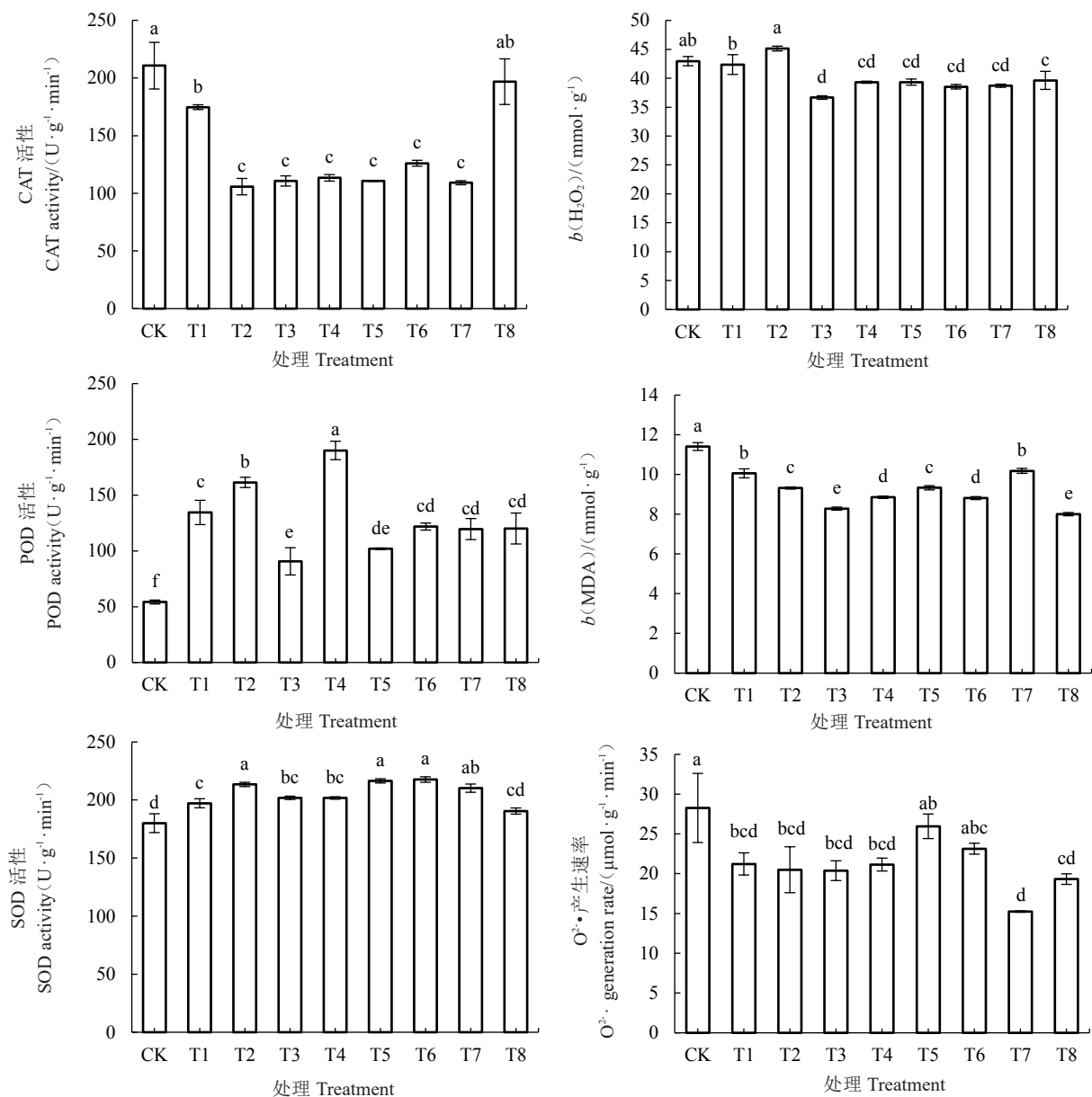


图 2 不同药剂处理下甜瓜幼苗期叶片的抗氧化特性比较

Fig. 2 Antioxidant properties of melon seedling stage under different agent treatments

表 3 不同药剂处理对甜瓜根结线虫防治效果

Table 3 Efficacy of different treatments on melon root knot nematodes

处理 Treatment	虫口减退率 Insect dropping rate/%	虫口防效 Insect control effect/%	根结指数 Root-junction index/%	根结防治效果 Root-knot control effect/%
CK	53.09±4.16 d		70.83±4.81 a	
T1	81.62±1.09 ab	60.81±2.34 ab	52.78±7.34 bc	25.48±10.38 cd
T2	80.83±3.65 ab	59.12±7.79 ab	41.67±2.40 cd	41.17±3.39 bc
T3	69.80±5.99 bc	35.62±12.77 bc	63.89±3.67 ab	9.81±5.19 de
T4	87.06±0.24 a	72.43±0.51 a	41.67±7.22 cd	41.17±10.19 bc
T5	85.14±4.67 a	68.32±9.97 a	54.17±4.81 bc	23.53±6.79 cd
T6	82.25±3.23 ab	62.16±6.89 ab	63.89±1.39 ab	9.80±1.96 de
T7	65.05±6.57 cd	25.48±14.01 cd	19.44±1.39 e	72.55±1.96 a
T8	92.87±2.84 a	84.80±6.06 a	27.78±5.01 de	60.79±7.07 ab

用不同药剂对减少根结线虫数量均有作用。

从根结指数来看,经过药剂处理后的甜瓜,在苗期根结的形成均有所减少,除处理 T3 和 T6 与 CK 相比并没有显著差异外,其余处理均与 CK 有显著差异。从根结防治效果方面比较,可以看出,处理 T7 和 T8 的防治效果表现最为优异,分别达到 72.55%和 60.79%,而这 2 种处理均为化学药剂,由此可见,化学药剂在根结线虫的防治方面表现更为突出。

2.4 不同药剂处理下甜瓜生长指标与生理指标的相关性和主成分分析

2.4.1 相关性分析 为了研究甜瓜苗期的生长指

标、生理指标以及对根结线虫的减退率和根结防治效果之间的关系,采用 Pearson 相关系数对 14 个指标的相关性进行分析。由表 4 可知,茎粗与总根长、总根表面积之间存在极显著正相关,相关系数分别为 0.840 和 0.902;总根长与总根表面积之间存在极显著正相关,相关系数为 0.886;总根表面积与 MDA 含量之间存在极显著负相关,相关系数为-0.801;根尖数与 CAT 活性之间存在显著正相关,相关系数为 0.739。

2.4.2 主成分分析 由表 5 可知,这 4 个综合指标的方差贡献率分别为 42.461%、21.900%、16.024%和 9.057%,累计方差贡献率达 89.442%,基本包含所

表 4 各指标的相关系数
Table 4 Correlation coefficient of each parameter

指标 Index	茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	总根长 Total root length	总根表面积 Total root surface area	根系平均直径 Mean diameter of root system	根尖数 Root point number	CAT 活性 activity	SOD 活性 activity	POD 活性 activity	MDA 含量 content	H ₂ O ₂ 含量 content	O ²⁺ · 产生速率 O ²⁺ ·genera- tion rate
茎粗 Stem diameter	1											
株高 Plant height	0.632	1										
总根长 Total root length	0.840**	0.494	1									
总根表面积 Total root surface area	0.902**	0.368	0.886**	1								
根系平均直径 Mean diameter of root system	-0.173	-0.261	-0.090	-0.034	1							
根尖数 Root point number	0.624	0.192	0.676*	0.678*	-0.577	1						
CAT 活性 CAT activity	0.121	0.123	0.297	0.192	-0.519	0.739*	1					
SOD 活性 SOD activity	0.106	-0.012	-0.148	0.105	0.023	-0.093	-0.109	1				
POD 活性 POD activity	0.103	0.509	-0.130	-0.066	-0.417	0.056	0.350	0.398	1			
MDA 活性 MDA activity	-0.747	-0.505	-0.724*	-0.801**	-0.060	-0.477	-0.326	-0.330	-0.396	1		
H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ content	-0.585	-0.509	-0.524	-0.540	-0.511	0.176	0.498	-0.222	0.130	0.523	1	
O ²⁺ ·产生速率 O ²⁺ ·generation rate	-0.514	-0.753*	-0.288	-0.361	0.399	-0.342	-0.291	-0.252	-0.472	0.371	0.265	1

测指标的全部信息。因此可提取第一主成分(F1)、第二主成分(F2)、第三主成分(F3)及第四主成分(F4),其余主成分可忽略不计。12 个指标根据表 6 可归为四类主成分,其中主成分 F1 的代表指标主要有茎粗、总根表面积、总根长、MDA 含量、株高、根尖数和 O²⁺·产生速率;主成分 F2 的代表指标有 H₂O₂ 含量、根系平均直径和 CAT 活性;主成分 F3 代表指标为 POD 活性;主成分 F4 代表指标为 SOD 活性。

2.5 不同药剂处理对甜瓜苗期根结线虫防治效果的综合评价

2.5.1 利用主成分分析法计算综合得分 结合相

关性分析与主成分分析将 12 个指标降维简化成 4 个综合指标。根据表 6 中的特征值计算出每个主成分与指标之间的表达式,分别为:

$$F1=0.41X1+0.31X2+0.38X3+0.39X4-0.12X5+0.31X6+0.17X7+0.07X8+0.13X9-0.38X10-0.21X11-0.29X12; \quad (4)$$

$$F2=-0.13X1-0.01X2-0.12X3-0.15X4-0.50X5+0.30X6+0.47X7-0.06X8+0.29X9+0.10X10+0.51X11-0.14X; \quad (5)$$

$$F3=0.06X1-0.31X2+0.30X3+0.21X4+0.03X5+0.34X6+0.16X7-0.45X8-0.53X9+0.07X10+0.14X11+$$

表 5 各指标的特征值及贡献率
Table 5 Eigenvalues and contribution rates of each indicator

指标 Index	第一 主成分 Factor 1	第二 主成分 Factor 2	第三 主成分 Factor 3	第四 主成分 Factor 4
茎粗 Stem diameter	0.928	-0.203	0.088	-0.053
总根表面积 Total root surface area	0.878	-0.251	0.297	0.181
总根长 Total root length	0.860	-0.194	0.413	-0.061
MDA 含量 MDA content	-0.851	0.170	0.098	-0.356
株高 Plant height	0.710	-0.015	-0.432	-0.525
根尖数 Root point number	0.705	0.482	0.472	0.148
O ² ·产生速率 O ² · generation rate	-0.651	-0.221	0.473	0.286
H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ content	-0.483	0.836	0.199	0.117
根系平均直径 Mean diameter of root system	-0.280	-0.817	0.040	0.179
CAT 活性 CAT activity	0.392	0.765	0.222	0.180
POD 活性 POD activity	0.298	0.463	-0.736	0.101
SOD 活性 SOD activity	0.149	-0.103	-0.619	0.673
特征值 Characteristic value	5.095	2.628	1.923	1.087
贡献率 Contribution rate/%	42.461	21.900	16.024	9.057
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	42.461	64.361	80.385	89.442

0.34X12; (6)

$$F4=-0.05X1-0.5X2-0.06X3+0.17X4+0.17X5+0.14X6+0.17X7+0.65X8+0.10X9-0.34X10+0.11X11+0.27X12.$$

(7)

把每个原始指标的数据标准化后代入到公式

表 6 主成分分析法综合得分
Table 6 Comprehensive score of principal component analysis method

处理 Treatment	F1	F2	F3	F4	综合得分 Composite score	排序 Rank
T1	-0.91	1.79	-0.15	-0.72	-0.08	4
T2	0.08	3.06	-0.11	1.41	0.82	3
T3	2.76	-1.85	1.06	-0.04	0.93	2
T4	0.27	-0.17	-2.03	-0.76	-0.32	6
T5	-0.30	-0.97	0.29	1.06	-0.20	5
T6	-1.35	-1.79	-1.01	1.48	-0.99	8
T7	0.23	-0.30	-1.60	-1.18	-0.33	7
T8	3.47	0.64	1.50	-0.40	1.82	1
CK	-4.24	-0.42	2.04	-0.85	-1.64	9

(4)~(7)中,可得到对应的 4 个主成分的值,再分别以 4 个主成分所对应的贡献率为各自的权重,从而得到基于主成分分析法的不同药剂对甜瓜苗期根结线虫防治效果的综合评价模型,即加权值计算公式为:

$$Z=0.424\times F1+0.22\times F2+0.160\times F3+0.0905\times F4.$$

(8)

将 9 个处理的 F1、F2、F3、F4 数据分别代入公式(8)中计算综合得分。由表 6 可知,对甜瓜苗期的生长指标和生理指标进行评估得出排名前三的处理依次为:T8、T3、T2,其中包含化学类药剂以及细菌类、真菌类药剂。

2.5.2 利用模糊数学隶属函数分析计算综合得分如表 7 所示,采用模糊数学隶属函数法对生长指标与生理指标的 12 个指标进行数据分析,根据相关性分别对指标选择相应的公式(1)或公式(2),计算

表 7 隶属函数分析法综合评价值
Table 7 Comprehensive evaluation value of membership function analysis method

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	总根长 Total root length	总根表面积 Total root surface area	根系平均直径 Mean diameter of root system	根尖数 Root point number	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity	SOD 活性 SOD activity	MDA 含量 MDA conten	H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ content	O ² ·产生速率 O ² · generation rate	平均隶属函数值 Average membership function values	排序 Rank
T1	0.112	0.637	0.341	0.089	0.890	0.386	0.657	0.591	0.456	0.397	0.326	0.540	0.452	7
T2	0.423	0.246	0.134	0.604	1.000	0.846	0.868	0.789	0.887	0.614	0.000	0.596	0.584	3
T3	1.000	0.669	0.933	0.000	0.533	0.654	0.047	0.269	0.581	0.918	1.000	0.605	0.601	2
T4	0.564	1.000	0.228	0.752	0.598	0.101	0.073	1.000	0.577	0.750	0.687	0.546	0.573	4
T5	0.602	0.354	0.468	0.594	0.576	0.413	0.047	0.352	0.969	0.610	0.684	0.177	0.487	6
T6	0.176	0.290	0.147	0.716	0.000	0.000	0.194	0.498	1.000	0.763	0.778	0.393	0.413	8
T7	0.604	0.886	0.201	0.717	0.663	0.275	0.032	0.481	0.802	0.360	0.758	1.000	0.565	5
T8	0.970	0.921	1.000	0.226	0.605	1.000	1.000	0.485	0.278	1.000	0.649	0.687	0.735	1
CK	0.000	0.000	0.000	1.000	0.362	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000	0.257	0.000	0.146	9

各指标的隶属函数值。通过公式(3)对各个指标的隶属函数值进行累加,并计算其平均值。平均值越大,表明防治效果越好。分析排名结果如表7所示,综合评价排名前三的处理分别为T8、T3、T2,平均隶属函数值分别为0.735、0.601、0.584,这与主成分分析法所得到的综合评价结果一致。

3 讨论与结论

近年来,根结线虫病频发,推动了生物防治菌的研究与应用^[15],然而,面对众多药剂,农民常难以选择。与以往单一药剂研究不同,笔者对现有的4种类型药剂各选取2个药剂进行试验。结果表明,各类型药剂处理均能有效减轻根结线虫对幼苗的危害,这与黄大野等^[16]和Fan等^[17]的研究结果一致。具体而言,蜡样芽孢杆菌(T3)在茎粗、根长及总根表面积方面显著优于清水对照,与Zhao等^[18]关于蜡样芽孢杆菌等5种细菌对番茄促生长和防病效果的研究相符。化学药剂阿维菌素与氟吡菌酰胺也可以保护甜瓜幼苗和根系免受线虫的侵害,其中氟吡菌酰胺效果显著,这与其速效性及前期防控优势有关^[19]。相比之下,真菌类和放线菌类药剂虽有一定作用,但效果不显著。根据李许真等^[20]的研究发现,放线菌可使黄瓜鲜质量增加,病害防效达到40%,但仍略低于化学药剂。

植物在逆境或病虫害胁迫下会积累活性氧(ROS),引发膜脂过氧化,破坏膜系统。植物体为免受活性氧伤害而形成了相应的抗氧化保护酶系统,主要包括SOD、CAT和POD,三者协同作用可维持ROS低水平,保护细胞免受损伤^[21]。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的关键产物,其含量可反映膜损伤程度及植物抗逆性^[22]。笔者研究发现,药剂处理的甜瓜幼苗POD活性显著升高,表明药剂灌根处理可增强植株对线虫的抗性,这与Amor等^[23]的研究结果一致。此外,线虫侵染30 d后,药剂处理组的CAT活性低于对照,与王冰林等^[24]在茄子中的研究结果相符。本研究结果表明,与CK相比,使用药剂对甜瓜进行处理后,叶片中的SOD活性上升。李青青等^[25]在研究中表明,豇豆在接种线虫20 d后叶片中SOD活性比健康叶片中低,与本试验结果相似。对于 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和MDA含量的比较,本研究表明,药剂处理的甜瓜叶片中MDA含量均显著低于对照, $O_2^{\cdot-}$ 产生速率各处理都有所下降,除处理T5、T6与对照差异不显著外,其余各处理与对照之间均存在显著差异。这与叶德友等^[26]在线虫侵

染黄瓜中的发现一致。除处理T1与T2外,其他处理叶片中 H_2O_2 含量与对照相比均下降且存在显著差异。总体来看,8种药剂处理显著影响了甜瓜叶片的抗性酶活性。处理组与对照组的差异可能源于线虫侵染程度不同,促使植物活性氧清除系统自我调节,使SOD、POD、CAT等保护酶协同作用,维持氧化平衡。

笔者比较了真菌、细菌、放线菌和化学药剂4类共8种药剂对甜瓜根结线虫的防控效果,结果表明,化学药剂中氟吡菌酰胺效果最佳,这与路洪宝^[27]关于南方根结线虫对其敏感性高于阿维菌素的研究一致;其次细菌类药剂中苏云金芽孢杆菌表现较为优异,Chen等^[28]认为其强杀线虫活性可能与3-(甲硫基)丙酸有关;放线菌类密旋链霉菌和娄彻氏链霉菌虫口减退率也比较高,这与其产生多种次级代谢产物有关^[29],Sousa等^[30]证实这些代谢产物可杀灭成虫并抑制虫卵孵化;真菌类淡紫拟青霉效果相对较弱但仍具防治作用,类似地,Abhi等^[31]发现木霉菌和紫霉菌的代谢产物也能显著提高线虫死亡率。

本研究结果表明,8种不同药剂在根结线虫防治方面都具有良好的表现,生物药剂与化学药剂之间对甜瓜生长与生理指标方面存在不同程度的影响,不同种类的生物药剂之间也存在显著差异。通过主成分分析法和隶属函数分析综合评分得出,T8处理41.7%氟吡菌酰胺效果最优,其次是处理T3蜡样芽孢杆菌,排在第三的是处理T2哈茨木霉菌。以上药剂不仅对甜瓜幼苗期有促生作用还能使虫口减退率提高,同时减少根结的形成,在增强甜瓜叶片中POD与SOD活性的同时使CAT活性、MDA含量、 H_2O_2 含量及 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率下降,从而使甜瓜幼苗免受根结线虫的伤害。综上所述,在甜瓜设施生产中苗期阶段推荐使用41.7%氟吡菌酰胺对根结线虫进行防治。

本试验设计与实际生产密切相关,所选甜瓜品种在当地生产中种植面积较大,研究结果可为甜瓜苗期生产中根结线虫病的药剂防治提供参考依据。为了使药剂的使用更合理化,还需进一步从甜瓜的产量及品质等方面进行研究。

参考文献

- [1] 王娟娟,李莉,尚怀国.我国西瓜甜瓜产业现状与对策建议[J].中国瓜菜,2020,33(5):69-73.
- [2] 徐小军,王瑞,张桂兰,等.连作对设施甜瓜生长和光合作用以及养分吸收和产量品质的影响[J].果树学报,2018,35(4):

- 449-457.
- [3] 崔鑫,岳向国,李斌,等.蔬菜作物根结线虫病防治研究进展[J].中国蔬菜,2017(10):31-38.
- [4] 包敏辉.北海地区设施栽培甜瓜根结线虫病绿色防控综合技术[J].长江蔬菜,2020(3):50-52.
- [5] 孙霞霞.蔬菜中农药残留及危害分析[J].现代农业,2020(9):64-66.
- [6] 周冬梅,何亮亮,李伟山,等.荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)MF11对根结线虫病的防效评价[J].江苏农业学报,2021,37(2):326-332.
- [7] 孔祥生,易现峰.植物生理学实验原理与技术[M].北京:中国农业出版社,2012.
- [8] GAY C, GEBICKI J M. A critical evaluation of the effect of sorbitol on the ferric-xylene orange hydroperoxide assay[J]. Analytical Biochemistry, 2000, 284(2):217-220.
- [9] 刘碧容,甄畅迪,萧洪东,等.硼对草坪草超氧化物歧化酶活性、超氧阴离子产生速率和丙二醛含量的影响[J].华中农业大学学报,2008,27(3):378-381.
- [10] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 毛小芳,李辉信,陈小云,等.土壤线虫三种分离方法效率比较[J].生态学杂志,2004,23(3):149-151.
- [12] 白全江,李玉民,霍宏丽,等.41.7%氟吡菌酰胺悬浮剂不同施药时期对黄瓜根结线虫的防治效果[J].植物保护,2021,47(5):314-319.
- [13] 刘伟中,王宏宝,毛佳,等.黄瓜根结线虫病病情指数分级方法研究[J].福建农业学报,2014,29(9):887-890.
- [14] 叶康,陈伯祥,杜武武,等.3个玉兰材料对水涝胁迫的响应与耐涝性评价[J].西北植物学报,2023,43(6):940-947.
- [15] 易希,廖红东,郑井元.植物内生真菌防治根结线虫研究进展[J].生物技术通报,2023,39(3):43-51.
- [16] 黄大野,叶良阶,刘晓艳,等.苏云金芽孢杆菌 NBIN863 菌株对番茄根结线虫的防治效果和促生作用[J].中国蔬菜,2015(10):57-60.
- [17] FAN H Y, YAO M L, WANG H M, et al. Isolation and effect of *Trichoderma citrinoviride* Sneh1910 for the biological control of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*[J]. BMC Microbiology, 2020, 20(1):299.
- [18] ZHAO D, ZHAO H, ZHAO D, et al. Isolation and identification of bacteria from rhizosphere soil and their effect on plant growth promotion and root-knot nematode disease[J]. Biological Control, 2018, 119:12-19.
- [19] 梁丽萍,周善华,赵云成,等.不同防治剂对白菜根结线虫病防控效果筛选试验[J].云南农业科技,2020(增刊1):75-77.
- [20] 李许真,杨晓沛,苑鑫,等.3种放线菌剂对黄瓜根结线虫病的防治效果[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):69-76.
- [21] MA X B, WANG Z B, LIU R, et al. Effect of powdery mildew on interleaf microbial communities and leaf antioxidant enzyme systems[J]. Journal of Forestry Research, 2023, 34(5):1535-1547.
- [22] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [23] AMOR N B, JIMENEZ A, MEGDICHE W, et al. Response of antioxidant systems to NaCl stress in the halophyte *Cakile maritima*[J]. Physiologia Plantarum, 2006, 126(3):446-457.
- [24] 王冰林,韩太利,李媛媛.根结线虫侵染对茄子苗期生理生化反应的影响[J].北方园艺,2012(23):139-142.
- [25] 李青青,漆永红,曹素芳,等.南方根结线虫侵染对豇豆叶部和根系部分生理生化指标的影响[J].西北农业学报,2014,23(2):49-54.
- [26] 叶德友,钱春桃,王暄.南方根结线虫侵染对黄瓜植株生长和抗氧化系统的影响[J].植物保护学报,2012,39(4):321-326.
- [27] 路洪宝.滴灌施用氟吡菌酰胺防治黄瓜根结线虫病应用技术研究[D].山东泰安:山东农业大学,2018.
- [28] CHEN L, WANG Y Y, ZHU L, et al. 3-(Methylthio)propionic acid from *Bacillus thuringiensis* berliner exhibits high nematocidal activity against the root knot nematode *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) chitwood[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(3):1708.
- [29] DONG L L, ZHANG J J. Research progress of avermectin: A minireview based on the structural derivatization of avermectin[J]. Advanced Agrochem, 2022, 1(2):100-112.
- [30] SOUSA C, SOARES A C, GARRIDO M S, et al. *Streptomyces* no controle da meloidoginose em mudas de tomateiro *Streptomyces* in the control of *Meloidogyne incognita* in tomato plants[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2006, 41(12):1759-1766.
- [31] ABHI R, SHARMA M K, MEENA M, et al. Bio efficacy of different fungal bio-agents on juvenile mortality of root knot nematode, *Meloidogyne incognita* under laboratory condition[J]. Journal of Advances in Biology and Biotechnology, 2024, 27(10):10-18.