

设施番茄根结线虫病综合防治技术研究进展

刘念, 董文阁, 董莉, 欧勇, 孟庆林

(辽宁省旱地农林研究所, 辽宁 朝阳 122000)

摘要:目前我国大部分地区均有根结线虫病发生,且发生趋势日趋严峻。根结线虫病是番茄种植过程中常见病害,严重制约番茄植株生长及生产。为此,文中对番茄根结线虫病害的病原种类、危害症状、致病因子及防治措施等方面的相关研究进展予以综述,以期为番茄根结线虫病的有效防控提供参考。

关键词:设施番茄;根结线虫;综合防治;综述

中图分类号:S641.2

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)06-0109-06

The Current Situation of Protected Tomato Integrated Control Techniques of Root-Knot Nematode Disease

LIU Nian, DONG Wenge, DONG Li, OU Yong, MENG Qinglin

(Liaoning institute of Agriculture & Forestry in Arid Areas, Chaoyang 122000, China)

Abstract: The root-knot nematode disease has been occurred in most areas of China presently, and the occurrence trend is increasingly serious. Root-knot nematode disease is a common disease in tomato planting process restricting the growth and production. For that, the research progress of pathogen types, hazard symptoms, pathogenic factors and control measures of root-knot nematode disease in tomato were reviewed in this paper. We hope this will help to provide reference for the effective prevention and control of tomato root-knot nematode diseases.

Key words: Protected tomato; Root-knot nematode; Integrated control; Review

植物根结线虫(*Meloidogyne* spp.)病是一种分布广泛的世界性病害,在实际生产中,对很多农作物都造成了严重威胁^[1]。据统计,线虫可危害的作物有3 000多种,全球每年因线虫造成的农作物经济损失超过1 000亿美元,包括粮食作物、经济作物、蔬菜、果树及观赏植物和杂草等^[2-3]。根结线虫也是造成多种作物产生连作障碍的重要原因之一^[4]。

伴随我国农业产业结构的不断优化及调整,设施农业正朝着优质高效及集约化、规模化和标准化的方向发展,高附加值的设施蔬菜产业快速发展的同时也会面临诸多问题^[5-6]。番茄是根结线虫的易感作物,随着设施栽培规模的不断扩大和周年生产及连作年限延长,受到根结线虫病的危害也愈发严重,对于根结线虫病防控措施的研究与推广利用就更显迫切^[7-8]。

1 番茄根结线虫病原种类

番茄根结线虫归类于线形动物门(Nemto-de)线虫纲(Secernentea)垫刃目(Tryenchida)异皮总科(Hetenoderidea)根结线虫属(*Meloidodrynae*)^[9-10]。危害我国番茄的根结线虫以南方根结线虫为主,其次为爪哇根结线虫和花生根结线虫,北方根结线虫比例较少。东北三省内的设施蔬菜根结线虫优势种群皆是南方根结线虫^[11-12]。

2 番茄根结线虫病的危害症状及致病因子

番茄的主根和侧根都易受线虫侵染,侧根受害尤为严重。初期地上部症状不明显,后期地上部生长变缓,植株矮小瘦弱,叶片易黄化脱落或萎蔫,类似缺肥缺水症状,病情加重后植株会逐渐枯死^[13]。线虫在侵入寄主过程中会对寄主造成机械损伤,感病植株在幼虫取食点的韧皮部或临近薄壁组织上产生巨型细胞,线虫周围的根组织增生变厚,逐渐呈现出明显的根结表型^[14]。根结线虫背部及侧腹的咽腺分泌物含有多种物质,能

收稿日期:2020-03-27

基金项目:“兴辽英才计划”省级科技特派团项目(2018103047)

作者简介:刘念(1986-),男,助理研究员,硕士,研究方向为设施蔬菜栽培研究与推广应用。

刺激宿主细胞病变并利于线虫从中汲取养分,导致植株产生代谢障碍,最终对植株整体的生长发育形成伤害^[15]。线虫侵染后的伤口利于其他土传病原微生物的侵入,常与蔬菜枯萎病、黄萎病、立枯病等多种土传病害共同发生,形成复合病害,致使损失加重^[16]。在实际生产中应尽可能考虑多方因素,采用多种有效措施相结合的方式控制根结线虫病的发生和发展。

3 番茄根结线虫病的防治策略

防治根结线虫病的发生多有以下几种措施:农业措施防治、物理防治、化学防治、生物防治或诱导抗病等多种方式联合使用。

3.1 农业措施防治

主要有轮作、休耕、嫁接栽培、改良土壤或抗病育种等方法。如番茄与大葱、大蒜、韭菜、分蘖洋葱等具有抗线虫功能的蔬菜轮作、套种或伴生等^[17];也可采用种植菠菜、叶用莴苣、生菜、小白菜、茼蒿等短期速生叶菜诱集或抑制根结线虫^[18-19]。禾本科植物伴生可以有效缓解番茄根结线虫病害,尤以大麦伴生栽培的防治效果最显著^[20],大麦、小麦、水稻伴生番茄栽培 50 d 时,对土壤中根结线虫 2 龄幼虫的虫口数量减退率分别达到 74.81%、42.64% 和 45.74%,虫卵密度减退率为 51.29%、35.57% 和 29.86%^[21]。目前国内应用较多的农业措施之一是通过改良土壤来抑制或减轻根结线虫病给番茄生产上带来的危害和损失,通过利用动植物残体、农业废弃物或其发酵产物等改善土壤的理化性质^[22]、根际环境和土壤生物群落的组成及丰度,产生对根结线虫抑杀的物质及作用^[23-24]。生产上还有选育抗病品种^[25-26]或选用抗病砧木嫁接栽培^[27-28]等方法。

3.2 物理防治

物理防治措施多集中在夏季高温时实施,通过土壤热处理,利用高温将线虫和卵杀死。主要方法有蒸汽消毒、地膜覆盖、高温闷棚、暴晒土壤、热水灌溉消毒等^[29-30]。对土壤进行火焰高温消毒,土壤中的生物有机体会被高温杀灭,对土壤病原菌、线虫及虫卵灭杀率在 85% 以上^[31-32]。臭氧水对抑制南方根结线虫各生命周期的活动能力效果明显,以 1.0 mg/kg 臭氧水分 4 次处理浇灌,对番茄根结线虫病的相对防治效果为 72.1%^[33]。红光照射可以诱导提高番茄对根结线虫的抗性并降低病害程度^[34-35],在实际应用中可作为提高作物抗病能力的有效辅助手段。物理方法防治根结线虫病

害多应用于番茄绿色或有机生产中,可有效减少化学药物的投入比例,提高产品安全质量等级。

3.3 化学防治

施用化学药剂目前仍是防治根结线虫的常用方法。熏蒸性杀线虫剂主要包括卤代烃类化合物和异硫氰酸甲酯类^[36],这类药物具有高毒、易残留、难降解的特点,对农业生态环境及土壤微生态环境会产生不利影响^[37]。非熏蒸性杀线虫剂主要包括有机磷类、氨基甲酸酯类和阿维菌素等,当前防治根结线虫主要有阿维菌素、甲维盐、伊维菌素^[38]和噻唑磷等,其中用 10% 噻唑磷处理效果相比于 0.5% 阿维菌素、1% 甲维盐表现要好^[39],新型杀线虫剂 41.7% 氟吡菌酰胺悬浮液 138 倍液灌根要比 1.8% 阿维菌素乳油 1 000 倍液灌根、10% 噻唑磷颗粒剂 22.5 kg/hm² 拌土处理防效要好,防效依次为 76.0%、44.0%、52.0%^[40]。在以二氧化氯、液体石灰氮为土壤处理剂防治根结线虫病的效果上,二氧化氯的防效可达 85.6%,石灰氮的最低防效也达到了 72%,效果明显^[41]。

3.4 生物防治

广义上是指包括利用根结线虫的天敌或其他动植物和微生物及其次级代谢产物来抑制或消灭线虫防治病害的措施。根结线虫天敌生物的作用机制有捕食、寄生、拮抗和毒杀^[42-43]。根结线虫的天敌包含多种形式的生物体^[44]和杀线虫植物等。在利用根际微生物防治根结线虫时发现,其在植物与根结线虫互作中有着重要作用^[45-46],番茄根际微生物群能有效抑制南方根结线虫带来的危害。在针对不同根际微生物对南方根结线虫抑制效果的研究中,厚垣普奇尼亚菌(*Pochonia chlamydosporia*)能产生抗逆性很强的厚垣孢子且易于培养及在土壤中定殖,还能诱导植物产生抗性^[47],是极具开发价值的生防真菌之一^[48-49]。厚垣普奇尼亚菌 HDZ-9 和淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)(YES-2)在番茄盆栽试验中都表现出对根结线虫病的良好防效^[50]。使用微生物菌剂淡紫拟青霉防治番茄根结线虫病相比于路富达、苦参碱及厚垣轮枝菌的效果最有优势,以 15.0 kg/hm² 的处理效果最好,其根结防效接近 40%,增产效果在 40% 左右,在改善番茄品质上也有很好的效果^[51]。粉红螺旋聚孢霉(*Clonostachys rosea*)(NF-06)固体发酵物能有效降低土壤中线虫数量和番茄根结指数,在室内盆栽防效试验中,每株 5 g 穴施处理对线虫的减退率和防效分别为 67.9% 和 69.6%^[52]。在对木霉菌(*Trichoderma*)中的哈茨木霉(*T. har-*

zianum)、绿色木霉(*T. virens*)的研究中发现,它们的发酵滤液对根结线虫的卵孵化及2龄幼虫的抑制率在40%~92%,哈茨木霉的抑制效果更好^[53]。康宁木霉(*T. koningii*)(T2)菌株与秸秆粉及乳酸混合施用情况下,盆栽试验中对番茄根结线虫病的防效达76.4%^[54]。经过少孢节丛孢菌(*Arthrobotrys oligospora*)处理过的番茄植株与对照相比,根结数、幼苗死亡率、病变长度、病情指数等都显著降低,能够起到很好的生物保护作用,应用中需对诱导其捕食器官的快速形成做进一步研究^[55]。

细菌资源中,以根际细菌和植物内生细菌应用较多。蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)可产生非蛋白质类物质毒杀害虫,经蜡样芽孢杆菌X5菌株处理的番茄根结数比对照降低了73.17%,与苏云金芽孢杆菌(*B. thuringiensis*)的防效80.49%差异不显著,经过二者分别处理的虫卵孵化率分别为43.97%和51.86%^[56]。定殖于番茄根部的蜡样芽孢杆菌BCM2能大大减少根结线虫的危害,因为该菌株的接种增加了根系分泌物的成分数量,其中2,4-二叔丁基苯酚、正十三烷和3,3-二甲基辛烷的分泌量明显增多,显现出对2龄幼虫的趋避作用^[57]。多黏芽孢杆菌(*B. polymyxa*)不同浓度的培养过滤液能致电线虫的2龄幼虫和抑制虫卵孵化,抑制根结线虫对番茄带来的危害^[58]。在抗病番茄根际土壤及根中分离获取的简单芽孢杆菌(*B. simplex*)和内生芽孢杆菌(*B. endophyticus*)对根结线虫的校正死亡率均超过90.0%,对卵的孵化抑制率达96.0%^[59]。根际细菌中的假单胞菌(*Pseudomonas sp.*)及其发酵液处理番茄根部后,幼根被线虫侵入的数目分别减少33%和87%,用菌株预处理根部的单位根重卵块数减少了38%^[60]。用经过人工培养的穿刺巴氏杆菌(*Pasteuria penetrans*)孢子粉2g的用量拌入盆栽番茄消毒土壤中后,对南方根结线虫的平均防效为79.60%,根结线虫的发病等级均在0~1级,病情指数仅为15.87%^[61]。

具有杀线虫作用的植物资源丰富,开发成杀线虫药剂或其他添加剂,对于线虫防治及开发绿色农药具有重要意义^[62-63]。从植物中分离获取的杀线虫活性物质有生物碱类、异硫氰酸酯类、萜类、硫代葡萄糖苷类、酚类、甾体类、聚乙炔类和脂类等^[64]。植物源农药中具有杀线虫活性的主要有印楝素^[65]、藜芦碱^[66]、苦参碱^[52]、莨菪碱^[67]、茶皂素^[68]等。苘麻^[69]、蓖麻^[70]等的提取物对南方根结线虫也有良好的防治效果,如苘麻提取物中的生物碱,蓖麻精提物中的蓖麻碱、蓖麻水提液和蓖麻

叶植物粉等都具有杀线虫的有效成分,商品化推广还需进一步研究利用。像大蒜秸秆^[71-72]、菊芋秸秆^[73]、小麦秸秆^[74]、茵陈蒿秸秆^[75]等对抑制或缓解番茄根结线虫病的发生有相似的功效^[76-77]。粉碎的辣椒秸秆作土壤改良也具有生物熏蒸剂的作用,可有效降低南方根结线虫数量和虫瘿量^[78]。植物源熏蒸剂竹醋液和辣根素对番茄根结线虫试验处理,在前期防治根结线虫效果上较对照药剂氯化苦稍差,但其优点在于防效期长,作物生长后期对根结线虫也能起到良好的防控作用^[79]。

3.5 综合防治及诱导抗病

多种防控方法相结合对防治根结线虫病的危害会更有效。如在夏季休耕期,用石灰氮+太阳能消毒+生物熏蒸(麦秆)+淡紫拟青霉联合处理对维持土壤养分、降低土壤线虫效果较为明显^[80]。棉隆熏蒸和淡紫拟青霉菌剂联合使用可显著降低线虫数量,还可促进植株生长并提高产量,增产效果比对照、棉隆熏蒸和生防菌剂单独处理分别提高了22.1%、9.5%和2.4%,地块内线虫数量始终处于各处理的最低水平^[81]。在使用土壤药剂结合阳光消毒防治番茄根结线虫的探索中,使用98%棉隆微粒剂450 kg/hm²或10%噻唑磷颗粒剂30 kg/hm²的用量,结合阳光照射高温消毒,能有效降低番茄根结线虫数量,减轻病害程度,使用成本低且经济效益高^[82]。石灰氮与阿维菌素混用在防治效果及增产作用上也较为明显^[83]。有机质添加剂芝麻渣与杀线虫剂噻唑磷复配可使噻唑磷用量减半,田间试验结果表明其防治效果达66.99%,对维持土壤微生物群体动态和群落的稳定显著优于单独使用噻唑磷的效果^[84]。当利用EM生物菌肥+土壤调理剂防治番茄根结线虫病时,防效达到了33.24%,具有一定的加成效应^[85]。

植物诱导抗病性是指植物本身受到外界因子的诱导或激活,自身产生对有害病原菌的抗性现象。对番茄叶片喷施外源激素或信号物质能诱导并提高易感根结线虫病害的作物本身产生对该病害的抵抗能力^[86],例如叶面喷施100 μmol/L茉莉酸、2000 μmol/L水杨酸和250 μmol/L一氧化氮后均能诱导提高植株对根结线虫病害胁迫的抗性,其中茉莉酸处理与对照相比根结减少了55%,后两者的处理均减少33%,通过对植株生物量、番茄Pn、Fv/Fm、根系电解质渗透率及膜脂过氧化水平等数据的检测对比,表明外源添加抗性信号物质可以有效缓解根结线虫对番茄造成的系统伤害^[87]。适宜浓度的油菜素内酯(BRs)在诱导番茄

对根结线虫的田间抗性评价中表现出能维持番茄在根结线虫胁迫下多种保护酶的高活性,通过调控植株自身次级代谢来实现对根结线虫的抗性^[88-89]。当水溶肥中添加0.30%BRs后,番茄植株叶绿素、株高、茎粗等指标都好于对照,对根结线虫的防效为38.00%。对生防菌诱导番茄抑制根结线虫的机理研究发现,受到恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)(Sneb821)诱导后,番茄差异基因富集并通过苯丙烷类代谢、植物激素信号途径、糖酵解和糖质新生代谢及淀粉和蔗糖代谢等途径,共同发挥出抗根结线虫的重要作用,从分子层面揭示了生防细菌诱导番茄抵抗根结线虫的机制^[90],这也为今后挖掘植物自身对根结线虫病害产生抗性提供了更多可能和参考。

4 问题与展望

单一的防控措施在当前设施农业生产条件下对根结线虫的防治效果有限,而见效快、效率高的化学药剂防治方式长期使用会使根结线虫产生抗药性,对生态环境危害较大^[91-92],与生防微生物制剂兼容性差。因此采用既安全高效又环境友好的其他多种措施联合防控将是今后防治根结线虫的发展方向。如从根结线虫自身、作物本身、土壤及生物群落等各个环节入手,充分考虑各种因素,改良土壤性状、提升作物本身免疫反应能力、加强农业生态系统的持续稳定性和多样性等,将会对预防和控制根结线虫病害的发生起到更好效果。

微生物制剂、抑杀线虫植物和植物源杀线虫活性化合物的开发利用,对保障果蔬产品质量安全、土地和生态安全可持续性也具有重大意义,活性物质的精提取技术、杀线虫机理及其有效靶点的确定和生态安全风险评估仍将是今后的研发重点。深入研究系统调控植物抗性信号分子在植物自身抗病胁迫中的响应机理,评判诱导因子参与植物对线虫产生抗性所能起到的作用及内在机制,将会为治理根结线虫病提供更多的可能性,对研制培育高效抗线虫作物品种等也具有重要的实践意义。

参考文献:

- [1] Sasser J N. Root-knot nematodes: a global menace to crop production[J]. Plant Disease, 1980, 64(1): 36-41.
- [2] Perry R N, Moens M, Starr J L. Root-Knot Nematodes[M]. Cambridge, MA: CABI Books, 2009: 1-17.
- [3] J N Sasser, J D Eisenback, C C Carter, et al. The International Meloidogyne Project-Its Goals and Accomplishments[J]. Annual Review of Phytopathology, 1983, 21(1): 271-288.
- [4] 孙文荣. 根结线虫复合侵染番茄规律初探及番茄品种对南方根结线虫抗性鉴定[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [5] 张震, 刘学瑜. 我国设施农业发展现状与对策[J]. 农业经济问题, 2015, 36(5): 64-70, 111.
- [6] 辛焱, 孙振营, 张波. 设施蔬菜土壤连作障碍及治理措施[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(6): 100-102.
- [7] 马灿, 王明友. 设施番茄连作对土壤理化性状、微生物数量及病虫害的影响[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(4): 22-25.
- [8] 丁永川. 设施番茄连作障碍及防控农艺技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [9] Rolandn. Perry, Mauricemoens. 植物线虫学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 68-69.
- [10] 赵鸿, 彭德良, 朱建兰. 根结线虫的研究现状[J]. 植物保护, 2003(6): 6-9.
- [11] 赵磊, 段玉玺, 白春明, 等. 辽宁省保护地蔬菜根结线虫发生规律及防治对策[J]. 植物保护, 2011, 37(1): 105-109.
- [12] 梁剡赫. 东北地区设施蔬菜根结线虫发生情况与种类鉴定研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [13] 彭德良. 蔬菜病虫害的综合治理(十) 蔬菜线虫病害的发生和防治[J]. 中国蔬菜, 1998(4): 59-60.
- [14] Carolina Escobar, Marta Barcala, Javier Cabrera. Chapter One-Overview of Root-Knot Nematodes and Giant Cells[J]. Advances in Botanical Research, 2015, 73: 1-32.
- [15] Williamson V M, Danquah W B, Schroeder F. Root-knot Nematode Behavior in Response to Plant and Nematode Semiochemicals[J]. Journal of Nematology, 2015, 47(3): 277-278.
- [16] 刘维信, 曲士松, 王秀峰, 等. 番茄根结线虫病抗源材料的筛选[J]. 山东农业科学, 2000(1): 39.
- [17] 白晶芝, 于洪杰, 安冬梅, 等. 不同分蘖洋葱品种伴生对番茄生长及根结线虫的影响[J]. 北方园艺, 2018(18): 1-8.
- [18] 杜惠, 漆永红, 申培增, 等. 种植诱集植物对土壤中根结线虫种群数量的影响[J]. 中国蔬菜, 2011(20): 84-87.
- [19] Linlin Dong, Chengdong Huang, Li Huang, et al. Screening plants resistant against *Meloidogyne incognita* and integrated management of plant resources for nematode control[J]. Crop Protection, 2012, 33: 34-39.
- [20] 蔡加星. 番茄南方根结线虫防控技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [21] 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.
- [22] 李敏. 秸秆与化肥配施对菜园地土壤理化性状的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(4): 28-32.
- [23] 王博. 农业废弃物堆肥对根结线虫的抑制作用[J]. 环境科学动态, 2005(1): 12-14.
- [24] 霍凯丽, 贾军涛, 赵恒宇, 等. 辣椒废弃物堆肥对番茄根结线虫拮抗作用研究[J]. 天津农业科学, 2019, 25(9): 38-40, 62.
- [25] 王新荣, 郑静君, 汪国平, 等. 华南地区主要番茄品种对南方根结线虫的抗性评价[J]. 植物保护, 2009, 35(1): 124-126.
- [26] 白春明, 段玉玺, 陈立杰, 等. 番茄品种对南方根结线虫的抗性评价[J]. 中国蔬菜, 2010(6): 33-37.
- [27] 陈振德, 王佩圣, 周英, 等. 不同砧木嫁接对番茄产量、品质及南方根结线虫防治效果的影响[J]. 中国蔬菜, 2012

- (20):83-87.
- [28] 杨国栋. 番茄砧木抗根结线虫特性及其根系分泌物的化感作用研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.
- [29] 黄三文, 张宝玺, 郭家珍, 等. 辣(甜)椒根结线虫的危害、防治和抗病育种[J]. 园艺学报, 2000(S1):515-521.
- [30] 贺超兴, 张志斌, 王怀松. 高温热水处理防治温室番茄土壤根结线虫的研究[J]. 北方园艺, 2009(5):140-142.
- [31] 许光辉, 赵奇龙, 高 宇. 火焰高温消毒技术防治农田土壤病虫害研究与试验[J]. 农业工程, 2014, 4(S1):52-54.
- [32] 杨雅婷, 胡 桢, 赵奇龙, 等. 土壤物理消毒装备研究进展[J]. 农业工程, 2015, 5(S1):43-48.
- [33] 胡安东, 梁 晨, 于维霞, 等. 臭氧水对番茄根结线虫病的防治效果[J]. 蔬菜, 2019(11):55-59.
- [34] Mutar S S, Fattah F A. Red Light-Induced systemic resistance to Root knot Nematodes in Tomato[J]. Journal of Biology Agriculture & Healthcare, 2013(3): 110.
- [35] You-Xin Yang, Meng-Meng Wang, Yan Ren, et al. Light-induced systemic resistance in tomato plants against root-knot nematode *Meloidogyne incognita*[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 76(2): 167-175.
- [36] 郭永霞, 金永玲. 蔬菜根结线虫综合防治研究进展[J]. 中国农学通报, 2007(3):376-379.
- [37] 陈绵才, 谢圣华, 肖彤斌, 等. 海南岛冬季蔬菜根结线虫病的发生及其防治研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2001(3):186-188.
- [38] 刘晓芸, 王彩芬, 臧少先, 等. 几种杀线虫剂对番茄根结线虫的田间药效试验[J]. 北方园艺, 2010(14):156-158.
- [39] 刘 磊, 吕令华, 葛福柱, 等. 几种药剂防治番茄根结线虫病的效果研究[J]. 蔬菜, 2019(5):54-58.
- [40] 刘晓宇, 陈立杰, 姚美玲, 等. 新型农药氟吡菌酰胺对番茄根结线虫的田间防效[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(8):75-77.
- [41] 刘文宝. 土壤处理剂对设施番茄连作土壤特性及根结线虫的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2016.
- [42] 田宝玉, 黄 薇, 江贤章, 等. 植物寄生线虫生防细菌及其作用机制研究[J]. 生物技术, 2009, 19(4):90-93.
- [43] Perry R N, Moens M, Starr J L. Root-Knot Nematodes[M]. Cambridge, MA: CABI Books, 2009: 380-411.
- [44] 金 娜, 刘 倩, 简 恒. 植物寄生线虫生物防治研究新进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5):789-800.
- [45] Roeland L Berendsen, Corn   M J Pieterse, Peter A H M Bakker. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8):478-486.
- [46] 路 杨, 佟雨航, 隋 丽, 等. 恶臭白色真菌在植物病害生物防治中的研究进展[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(6):37-42.
- [47] N Escudero, L V Lopez-Llorca. Effects on plant growth and root-knot nematode infection of an endophytic GFP transformant of the nematophagous fungus *Pochonia chlamydosporia*[J]. Symbiosis, 2012, 57(1): 33-42.
- [48] 陈立杰, 王媛媛, 朱晓峰, 等. 大豆胞囊线虫病生物防治研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4):393-398.
- [49] 宋 洁. 大豆胞囊线虫抑制性土壤及其抑制因子研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012.
- [50] Aminuzzaman F M, Xie H Y, Duan W J, et al. Isolation of nematophagous fungi from eggs and females of *Meloidogyne* spp. and evaluation of their biological control potential[J]. Biocontrol Science & Technology, 2013, 23(2): 170-182.
- [51] 刘勇鹏. 不同杀线虫剂对日光温室番茄根结线虫病防效研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2018.
- [52] 张 洁, 郭雪萍, 夏明聪, 等. 粉红螺旋聚孢霉 NF-06 固体发酵条件优化及对南方根结线虫的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(1):105-112.
- [53] 焦 俊, 韩冰洁, 王媛媛, 等. 毒杀南方根结线虫的木霉种类鉴定及活性研究[J]. 植物保护, 2015, 41(2):64-69.
- [54] 王智学, 于 森, 方 新, 等. 康宁木霉 *T₂* 菌株防治根结线虫的应用方法研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3):1412-1414.
- [55] Singh U B, Sahu A, Sahu N, et al. *Arthrobotrys oligospora*-mediated biological control of diseases of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) caused by *Meloidogyne incognita* and *Rhizoctonia solani*[J]. Journal of Applied Microbiology, 2013, 114(1):196-208.
- [56] 肖同建, 陈 芳, 朱 震, 等. 不同根际细菌对南方根结线虫抑制效果的研究[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(4):59-64.
- [57] Li Xia, Hu Hai-Jing, Li Jing-Yu, et al. Effects of the endophytic bacteria *Bacillus cereus* BCM2 on tomato root exudates and *Meloidogyne incognita* Infection[J]. Pubmed, 2019, 103(7):1551-1558.
- [58] Z K han, S G Kim, Y H Jeon, et al. A plant growth promoting rhizobacterium, *Paenibacillus polymyxa* strain GBR-1, suppresses root-knot nematode[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8):3016-3023.
- [59] 王进福, 文才艺, 刘伟成, 等. 根结线虫生防细菌的筛选及鉴定[J]. 北方园艺, 2016(9):121-124.
- [60] 聂国媛. 江苏省根结线虫病调查及其拮抗微生物的筛选[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- [61] 贾本凯. 海南岛茄果类蔬菜根结线虫病病原鉴定及穿刺巴氏杆菌防效测定[D]. 海口:海南大学, 2012.
- [62] 李继平, 漆永红, 陈书龙, 等. 利用杀线植物资源防治植物寄生线虫的研究进展[J]. 草业学报, 2013, 22(3):297-305.
- [63] 王 佳, 曾广智, 汪 哲, 等. 杀线虫植物以及植物源杀线虫活性化合物研究与应用进展[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(3):469-479.
- [64] Chitwood David J. Phytochemical based strategies for nematode control[J]. Annual Review of Phytopathology, 2002, 40: 221-249.
- [65] N Javed, S R Gowen, S A El-Hassan, et al. Efficacy of neem (*Azadirachta indica*) formulations on biology of root-knot nematodes(*Meloidogyne javanica*) on tomato[J]. Crop Protection, 2008, 27(1): 36-43.
- [66] 王宏宝, 赵桂东, 刘伟中, 等. 不同药剂对黄瓜根结线虫病防治效果研究[J]. 福建农业学报, 2012, 27(11):1242-1245.
- [67] 漆永红, 胡冠芳, 曹素芳, 等. 莨菪生物碱类对南方根结线虫卵囊、卵孵化及其2龄幼虫存活的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(S1):272-277.
- [68] 栗少卿. 茶皂素颗粒剂及复配剂对根结线虫病的防治研究[D]. 广州:华南农业大学, 2016.
- [69] 谢 宁, 苏秀荣, 王金信. 苘麻提取物对南方根结线虫的活

- 性[J]. 农药, 2011, 50(10): 764-766.
- [70] 高倩圆, 胡飞龙, 祝红红, 等. 蓖麻提取物对南方根结线虫的防治作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3033-3038.
- [71] 巩彪, 张丽丽, 隋申利, 等. 大蒜秸秆对番茄根结线虫病及根际微生态的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 933-941.
- [72] 徐金强, 刘素慧, 刘庆涛, 等. 大蒜秸秆还田对温室番茄连作土壤微生物及根结线虫病的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(7): 91-93, 97.
- [73] 王诗雯, 杨媛, 林娜, 等. 菊芋秸秆对连作番茄幼苗生长及根结线虫的影响[J]. 北方园艺, 2018(8): 73-78.
- [74] 曹志平, 周乐昕, 韩雪梅. 引入小麦秸秆抑制番茄根结线虫病[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 765-773.
- [75] 江春, 张谨华, 方果. 不同生长期茵陈蒿提取液对根结线虫的抑制活力研究[J]. 北方园艺, 2015(9): 102-105.
- [76] 张燕. 不同作物秸秆对连作番茄幼苗及土壤微生物的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [77] 李增亮. 不同植物秸秆对连作番茄生长及土壤微生物群落的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [78] A Piedra Buena, A García-Álvarez, M A Díez-Rojo, et al. Use of pepper crop residues for the control of root-knot nematodes[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(15): 2846-2851.
- [79] 卢志军. 蔬菜根结线虫病生物熏蒸控制作用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [80] 张雪艳, 石彦龙, 王彦刚, 等. 不同土壤处理措施对番茄土壤养分、酶活性和线虫数量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 16-22.
- [81] 聂海珍, 孙漫红, 李世东, 等. 棉隆与淡紫拟青霉联合防治番茄根结线虫病的效果评价[J]. 植物保护学报, 2016, 43(4): 689-696.
- [82] 张卓, 彭德良, 黄文坤, 等. 土壤药剂处理结合阳光消毒防治番茄根结线虫技术评价[J]. 植物保护, 2011, 37(3): 161-164.
- [83] 冯明祥, 王佩圣, 姜瑞德, 等. 农药混用进行土壤消毒防治番茄根结线虫技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2007(S2): 643-646.
- [84] 马骏. 有机质添加剂在防治番茄根结线虫病中的应用[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [85] 王胜楠, 王广印, 李敏, 等. 生物菌剂及土壤调理剂对大棚秋番茄生长及2种病虫害的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(7): 1029-1034.
- [86] Taketo Fujimoto, Yasuhiro Tomitaka, Hiroshi Abe, et al. Expression profile of jasmonic acid-induced genes and the induced resistance against the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) after foliar treatment with methyl jasmonate[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(10): 1084-1097.
- [87] 贾飞飞. 植物抗性信号物质缓解番茄根结线虫的效应及其机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [88] 李艳楠. 油菜素内酯处理对番茄根结线虫的防治效果研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- [89] 宋刘霞. 油菜素内酯调控番茄对南方根结线虫抗性的机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [90] 赵丹. 假单胞菌诱导番茄抗根结线虫的机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [91] 张博. 山东省不同地区蔬菜根结线虫的抗性差异与化学防治研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [92] 吴青松. 南方根结线虫对噻唑膦的抗药性分析及其抗性治理策略初探[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

(责任编辑: 刘洪霞)

(上接第105页)

- [3] 苏世闻, 陈先知. 不同南瓜砧木品种对嫁接黄瓜长势及产量的影响[J]. 蔬菜, 2018(2): 12-15.
- [4] 董明伟, 李晓慧. 嫁接对蔬菜抗逆性影响的研究进展[J]. 长江蔬菜, 2009(20): 9-12.
- [5] 孙世君, 付崇毅, 宋阳, 等. 根区低温对嫁接的黄瓜幼苗根系生长和¹⁵N吸收分配的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(8): 1545-1552.
- [6] 苏胜宇, 韩靖玲, 李聪晓, 等. 冬春茬温室黄瓜嫁接育苗技术[J]. 蔬菜, 2015(11): 39-41.
- [7] 张红梅, 金海军, 刘秀云, 等. 大棚自然高温对黄瓜嫁接植株生理特性及果实品质的影响[J]. 上海农业学报, 2018, 34(4): 69-73.
- [8] 刘青, 邹苑眉, 郑略, 等. 黄瓜嫁接技术的优势及管理要点[J]. 现代园艺, 2016(11): 75.
- [9] 尚小红, 周生茂, 郭元元, 等. 黄瓜异根嫁接植株抗逆性变化研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2017, 39(3): 364-372.
- [10] 石晓华, 王冰寒, 张洪举. 长春地区保护地黄瓜春茬模式化高产栽培技术[J]. 吉林农业科学, 2006, 31(5): 28-30.
- [11] 张铨哲, 赵博. SOL生物农药防治黄瓜白粉病药剂浓度的筛选[J]. 东北农业科学, 2016, 41(5): 67-71.
- [12] 程群柱, 张广臣, 闫若楠, 等. 温光胁迫对黄瓜产量和品质的影响[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(5): 59-61.
- [13] 李红丽. 嫁接对黄瓜果实品质影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [14] 乔宏宇, 周艳丽, 高红春. 低温弱光对不同砧木甜瓜嫁接苗生理指标的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(2): 84-87.
- [15] 谭占明, 轩正英, 张娟, 等. 不同砧木嫁接对黄瓜产量和品质的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(2): 679-686.
- [16] 韩晓燕, 林道元, 肖春雷, 等. 嫁接对黄瓜品质及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2014(17): 88-89, 91.
- [17] 裴孝伯, 解静, 王跃, 等. 嫁接处理对黄瓜果实Vc·可溶性糖和蛋白质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(2): 557-558, 607.

(责任编辑: 王昱)