



李琳,刘薇,张倩倩,等.设施蔬菜根结线虫的综合防治研究进展[J].黑龙江农业科学,2024(11):114-120.

设施蔬菜根结线虫的综合防治研究进展

李琳¹,刘薇²,张倩倩²,菅彦军³,岳洋⁴,岳鹏武⁵,易江慧²

(1. 吉林省农业广播电视学校,吉林 长春 130033; 2. 重庆三峡学院 生物与食品工程学院,重庆 万州 404020; 3. 吉林省榆树市农机技术推广服务总站,吉林 榆树 130400; 4. 吉林农业大学 植物保护学院,吉林 长春 130118; 5. 吉林省种子管理总站,吉林 长春 130031)

摘要:蔬菜根结线虫严重影响我国蔬菜生产。随着高品质、无污染的蔬菜农产品成为新时代农产品市场的主流,对蔬菜根结线虫病致病机理及防治手段的深入研究愈加重要。本文通过对设施蔬菜根结线虫病害的发生规律、致病机理及影响病害产生的因素等几个方面问题的研究,对目前蔬菜根结线虫的农业防治、物理防治、化学防治及生物防治等具体防治方法进行了梳理总结,并对未来防治设施蔬菜根结线虫的研究方向作出展望。

关键词:蔬菜;根结线虫;致病机理;综合防治

根结线虫作为重要的植物线虫之一,严重危害全国各地的蔬菜生产,造成的经济损失巨大。近年来,设施蔬菜的产量及种植面积已成为蔬菜体系中重要的组成部分,是我国蔬菜市场的主力军^[1]。我国自然资源十分丰富,设施蔬菜种类包括番茄、黄瓜、辣椒等,但由于设施蔬菜的大面积种植连作,根结线虫病发生逐年加重,并与其他细菌、真菌形成联合侵染,严重危害设施蔬菜生产。根结线虫主要通过二龄幼虫先侵入植物根尖,寄生在根部的皮层中,用口针获取发育繁殖的营养,使地下部根结异常增多,地上部叶片变小、失绿,植株矮小生长缓慢,最终对蔬菜种植造成严重危害导致产量损失,严重时甚至绝收^[2]。随着根结线虫危害程度的日益加重,引起广泛研究关注,化学防治为现阶段防治根结线虫的主要手段,但部分防治药品容易产生较大的污染,而且根结线虫对许多化学药剂已产生抗性,因此选育抗线品种十分重要。但目前抗性品种单一、根结线虫迅速变异,所以单一的物理、农业防治与采用抗线品种无法有效全面防治根结线虫。生物防治因其安全有效、无残留、作用时间长且对环境友好的特点,近年来得到越来越多的关注与研究。本文通过对设施蔬菜根结线虫的发生规律、致病机理,以及目前蔬菜根结线虫的农业防治、物理防治、抗线品种选育、化学防治及生物防治等进行梳理总结,为未来设施蔬菜根结线虫防治提供研究基础和思路。

1 根结线虫

1.1 为害现状

设施蔬菜主要是利用人工建设厂房及棚室融入人工技术及专业化设备对蔬菜生长环境进行调配,以达到最适宜的培育条件。该模式的种植技术和栽培模式在我国发展已较为成熟,各省均有分布,也是我国蔬菜种植大省的重要栽培模式。根结线虫作为蔬菜作物中重要的土传病害之一,不仅直接危害蔬菜生长,还与其他细菌、真菌形成联合侵染^[3]。蔬菜根结线虫病的发生具有危害持续时间长、危害范围广泛、对作物损害极大的特点,蔬菜根结线虫病害的防治问题是农业人不断探索研究的重要问题之一。目前我国南方仍大约每年有超过 40 万 hm^2 的亚热带农作物及其种植用地受到根结线虫的侵害,对北方蔬菜造成的产值损失每年高达 30 亿元以上^[4]。防治蔬菜根结线虫的方法主要有利用土壤熏蒸、高温消毒等物理防治手段^[5],利用噻唑磷、氟吡菌酰胺和棉隆等的化学防治手段^[6]和利用淡紫拟青霉菌、芽孢杆菌、木霉菌等生物防治手段^[7]。

1.2 种类与分布

根结线虫(*Meloidogyne* spp.)属于线虫门、侧尾腺纲、垫刃目、异皮科、根结线虫属,是一类高度专业化型的杂食性定居内寄生植物病原害虫^[8]。目前国际文献上报道过的根结线虫已知有效新种只有 100 多个,我国有记录的有效新种达 58 个^[9],并

收稿日期:2024-04-03

基金项目:重庆市教育委员会科研项目资助(KJQN202201222)。

第一作者:李琳(1987—),女,硕士,高级农艺师,从事植物保护和农技推广工作。E-mail: 15043046900@163.com。

且目前还在国内外不断报道发现根结线虫有效新种。根结线虫已知可寄生侵染全国 114 科 3 000 多种常见植被,对番茄科、葫芦科、十字花科植物等双子叶植物病害的侵染危害影响尤其严重。因此,高效经济无污染安全的新根结线虫高效防治方法和新技术及相关生防制剂的应用研究工作都具有很重要的影响。

由根结线虫病害造成损失的统计中,90%以上是分别由南方根结线虫(*M. incognita*)、花生根结线虫(*M. arenaria*)、爪哇根结线虫(*M. javanica*)、北方根结线虫(*M. hapla*) 4 个中国常见种所致。从全国区域的分布特点来看,根结线虫病害一般广泛分布在北半球温带、亚热带、热带季风气候等大部分区域,以南方部分省区和东北地区、华北地区影响尤为突出^[10-11]。

1.3 影响根结线虫发生的因素

根结线虫生长发育所需的环境条件与大多数蔬菜培育的所需条件相似,这也是造成其防治困难的原因之一。首先,温度因素。温度是影响蔬菜根结线虫发育最重要的因素,适合根结线虫的生长活动的温度在 25℃左右,在环境温度 30℃时,活动能力将明显下降;当温度达到 55℃并持续 10 min 时,线虫活性将完全消失^[12]。秋冬季温度降低时,根结线虫病害的发生也会减少。其次,土壤湿度和土壤质地。根结线虫具有好气性强的特点,喜湿润平坦、质地松软、有利于其通气的土壤环境^[13],如砂质土壤。但随着根结线虫的病发时间推移,其会造成种植土地的板结,因而根结线虫也将进行土壤内迁移,进而增加虫害面积。最后,土壤 pH。根结线虫的繁殖和孵化过程都需要在合适的土壤酸碱度条件下进行,通常 pH 在 4~8 之间最适宜线虫生长。

2 蔬菜根结线虫的危害

2.1 危害作物种类及主要病害症状

根结线虫危害种类及范围极广,包括单子叶植物、双子叶植物和草本植物,对粮食作物、经济作物、蔬菜、果树、花卉、杂草等都有严重危害^[14]。其病症特征主要体现在两个维度,一方面在地上部分可能不易察觉异样,另一方面在地下部分则体现得尤为明显。在发病之初,植物的地下根系会在侧根和细根部位逐步生成形态各异的根结,这些瘤状肿块往往是球形或圆锥形,大小不一。随着时间推移,病情恶化,病害不仅局限于侧根和

须根,还会逐渐波及主根部分,形成大面积的结瘤现象,严重影响植物的正常生长和发育^[15]。同时随着植株地下病情的日益加重,植物的根部系统已受到一定破坏,导致其不能有效地吸收养分和水分,植物营养物质的正常运输也受到阻碍,植物生长发育变得缓慢^[16]。植物地上部分逐渐呈现出生长发育萎缩、枝叶变干发黄等一系列症状,果实数量急剧减少且呈现出畸形。到病情后期,植株发黄萎蔫,落叶落果,最终整株衰亡^[17]。

2.2 发生规律及传播途径

根结线虫的整个生长发育过程可分为卵、幼虫、成虫 3 个主要阶段,主要活动在 3~10 cm 的表层土壤中,在适宜的土壤环境中最多可存活 3 年,主要以二龄幼虫危害寄主^[18]。在温室大棚的蔬菜种植周期中,根结线虫每年通常会完成 5~6 次生命周期循环,即发生约 5~6 代的繁殖侵染^[13]。这一过程通常始于每年 3 月,此时根结线虫开始对蔬菜造成损害;5 月至 6 月,迅速繁衍,完成第一代至第三代的生活史阶段,从而形成全年中的第一个严重为害高峰期。随后,进入秋季,特别是在 8 月下旬至 10 月这段时间内,根结线虫会迎来第五代至第六代的繁殖高峰,这构成了年内的第二个主要为害阶段。越冬虫卵常在来年温度升高到适宜条件时才孵化,成长为幼虫,幼虫不断发育靠近寄主植物并侵染其根部^[19]。幼虫发育到 4 龄时开始进行交尾产卵,随后雄虫死亡。卵则先在寄主植物组织内孵化发育,到 2 龄时离开卵壳,继续侵染寄主植物或越冬^[4]。

因根结线虫在土壤内活动范围较小,其传播需借助外部媒介,主要随带病土壤及植株迁移;随灌溉水流动传播;随携带染病土壤的农具农机进行传播;同时染病植物处理不当也会造成根结线虫病害的进一步传播^[16]。

2.3 致病机理

根结线虫导致寄主植株发病并死亡现状研究发现,其致病过程主要可分为根结线虫侵染和根结线虫侵染植株根部造成机械性损伤,从而导致复合病害的发生^[20]。根结线虫的二龄虫体入侵植株,通过头部口针穿透植物表皮及植物细胞壁,并向其中注入具有刺激性的咽部分泌物,分泌物主要为生物酶和植物生长类激素^[21],此类物质刺激寄主细胞发生有丝分裂,并形成巨型细胞,进而在根部形成根结,导致植株地上部营养发育失调,

生物学性状发生变化。土壤二次感染病原菌的主要种类包括疫霉菌、棒形杆菌^[10],较多研究证明,根结线虫能显著加剧由茄青枯菌引发的烟草、番茄、辣椒青枯病等^[22]。二次感染的病菌与根结线虫的侵染相促进,加剧植物感病过程,增大病害程度和防治难度,同时大大增加作物投入成本,造成巨大经济损失。

3 蔬菜根结线虫的防治方法

设施蔬菜根结线虫病害的防治以“预防为主,综合防治”为方针,综合利用农业防治、抗性品种选育、物理防治、化学防治、生物防治,实现对蔬菜根结线虫的长期可持续控制。

3.1 农业防治

农业防治通常为简单有效的防治手段。如采用轮作套作间作,减少作物连作障碍,破坏线虫的有利生存环境,优化土壤环境,提高作物根系的抗病能力^[23]。其次,对苗床的消杀也可有效阻断根结线虫的发生和传播^[21]。对根结线虫发病比较严重的棚室或地块,可以先采用无土栽培的方式进行调控。平日需要加强棚室管理,尤其是茬口开始前首先要对棚室进行彻底清理,特别是对植物残体一定要及时清理,并将根系用石灰水进行杀菌,防止虫卵到处传播,降低虫口密度。同时需定期整地深翻^[22]。

研究发现轮作万寿菊并粉碎还田能有效控制芹菜根结线虫数量,并与施加 20% 噻唑膦水乳剂的防治效果相当^[24]。山西省姚孟村大棚蔬菜根结线虫发生严重,多年来坚持种两年番茄,种一年大葱和生菜的轮作倒茬模式,基本控制了根结线虫病害^[25];辽宁丹东地区采用番茄与辣椒、黄瓜与辣椒、茄子与辣椒,水旱轮作的方法防治根结线虫病,效果非常明显^[26]。

3.2 物理防治

物理防治主要包括阳光消毒、土壤熏蒸、土壤热水处理、石灰氮、臭氧处理等措施。如利用蒸汽消毒杀死根结线虫,或者利用根结线虫电耐受性弱的特点,对其进行电流除杀^[27]。还有应用最为广泛的闷棚防治法,即利用夏季休棚季节,通过覆盖地膜、浇水、翻地等一系列技术措施,使大棚内 10 cm 的地温达到 55℃ 以上,进行高温闷棚,可有效降低虫口基数^[28]。研究发现换新棚膜、覆盖地膜、夜间覆盖草帘三层覆盖的条件下,将温室大棚中的土壤表面温度提高到 55℃ 以上,且时间持

续 8 h 以上,可以有效杀灭土壤中的根结线虫,对同一块地前后茬的黄瓜和番茄根结线虫防效分别达 100% 和 87.5%^[29]。零下 5℃ 的低温冻地冷棚也可迅速将线虫及虫卵很快冻死^[30]。通过田间试验,发现低温胁迫后起垄处理的 50 cm 土层以上及平地处理后 30 cm 土层以上均未监测到根结线虫二龄幼虫^[31]。

3.3 抗性品种选育

选育和利用抗根结线虫品种是一种经济、安全、有效防治根结线虫的措施。抗根结线虫基因 *Mi* 被人们最早发现并广泛用于番茄种苗的商业化生产。通过对番茄抗病分子标记的筛选研究,发现 *Mi* 基因可调控多种番茄品种对南方根结线虫产生抗性,但缺乏对象耳豆根结线虫、北方根结线虫的抗性^[32]。引入抗性基因的番茄品种“牟番一号”,果实可高抗根结线虫病,抗花叶病毒病,抗叶霉病^[33];双抗 228“牟番二号”品种的果实可高抗 TY 病毒病、根结线虫病,抗花叶病毒病、叶霉病等^[34]。马铃薯抗线品种有“1002-1”“丽薯 6 号”“合作 88”等 15 种,其中“1002-1”对马铃薯南方根结线虫病免疫,其余 14 种对爪哇根结线虫病均免疫^[35]。东北农业大学通过收集北方地区保护地主栽的辣椒品种,筛选出 11 个对南方根结线虫表现高抗的品种,3 个中抗品种和 7 个抗病品种^[36]。

在我国,抗根结线虫病的作物育种工作近年来虽然取得了显著进展,但总体来看,这一领域的研究起步相对较晚,尤其是在早期阶段,市场上可供农民选择的抗性优良品种较为有限,其抗病效果往往不尽如人意。目前存在的问题主要有:一是,抗性品种的数量不足以满足市场需求;二是,现有品种的抗性基因来源相对单一,容易因线虫种群的进化而产生抗性失效;三是,由于线虫毒性的复杂性和易变性,使得一些已培育出的抗性品种在田间表现出来的抗性不稳定,难以持久有效。应加大投入力度,加快对具有多重抗性和优良品质的抗根结线虫蔬菜品种的筛选和培育,尤其是要注重发掘和整合更多不同的抗性基因资源,通过现代生物技术手段,如转基因技术,将多种抗性基因有效地导入,形成复合抗性,以提高大棚蔬菜抵抗根结线虫的能力。另外,研究根结线虫毒性的变异机制及其与蔬菜抗性之间的互作关系也至关重要,这有助于更好地理解抗性丧失的原因,进而开发出更为持久、广泛有效的抗性品

种。进而才能从根本上解决根结线虫带来的农业生产问题,切实提升蔬菜的产量和品质,确保我国农业生产的可持续发展。

3.4 化学防治

化学防治也称作药剂防治,是一套简便、快速、高效防治根结线虫的综合性措施。目前在我国境内登记生产的有效防治土地根结线虫病害的常规化学药剂有 20 多种,分为熏蒸剂和非熏蒸剂。常用的非熏蒸化学药剂包括 10% 噻唑磷、吡菌酰胺、阿维菌素;熏蒸剂包括硫酰氟、1,3-二氯丙烯、威百亩和棉隆。研究证明,大多化学药剂对根结线虫的防治效果通常可达 70% 以上,一些熏蒸剂的防治效果最高可达 97%。广西大学的相关研究表明,化学农药对番茄根结线虫均有一定的防治效果,使用的 3 种有机磷农药中噻唑磷防效最高,显著优于灭线磷和硫线磷,且阿维菌素的防效优于甲维盐^[37]。虽然化学药剂防治具有防治效率高、操作简便、成本低等优点,但针对蔬菜根结线虫的专一性农药较少,长期大量使用化学农药会造成土壤生态紊乱、土地板结等问题,同时植株抗药性的增强也是不可忽视的问题。在大力提倡环保、无公害的绿色食品时代,未来低毒高效、环境友好的化学杀线制剂的研发和利用将会是化学防治根结线虫的重要方向。

3.5 生物防治

设施蔬菜逐渐成为中国农业的主导产业之一,与此同时,设施大棚蔬菜产业的诸多问题也随之出现,其中以根结线虫引起的病害问题呈现日趋加重现象。目前,随着人们对环境和健康意识的增强以及传统防治自身存在的局限性,科研工作者将目光转移到了生物防治。生物防治方法在应对蔬菜根结线虫问题时,优先倚赖的是自然界中存在的有益生物资源,诸如特定的植物种类、活性微生物以及产生的次生代谢物质,以此来安全、有效地控制害虫。这一策略因其环境友好、高效节能的特点,尤为符合现代农业对可持续发展目标的追求。在防治蔬菜根结线虫的过程中,生物防治手段聚焦的微生物类别主要有三大类:一类是具有防控效能的真菌;另一类是能抑制或杀死根结线虫的有益细菌;还有一类则是同样具备防治潜能的放线菌^[38]。这些生物防治手段的运用,既减少了对化学农药的依赖,又促进了农田生态系统平衡的维护。同时已有研究发现多种植物中

提取出具有杀线作用的物质,并用于植物源农药的开发和使用。

3.5.1 微生物菌剂 目前在蔬菜根结线虫的防治上应用较多的微生物菌剂主要有淡紫拟青霉菌(*Paecilomyces lilacinus*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)及木霉菌(*Trichoderma* spp.)等。

淡紫拟青霉菌作为一种内寄生性生物防治真菌,栖息于土壤和植物根部系统中,具有独特的生活习性,能够同时寄生在根结线虫的不同生活阶段,包括其卵、幼虫和成虫雌体,特别是在线虫生命周期的早期阶段最容易实现感染^[39]。当淡紫拟青霉菌遭遇线虫卵时,它的菌丝体系会全方位地缠绕绕卵体,紧接着菌丝尖端部分会显著膨胀,进而释放出几丁质酶及蛋白酶等多种代谢产物,这些产物专门用于分解和侵蚀卵壳表面结构,促使卵壳发生破裂。此后,淡紫拟青霉菌会趁势渗透进卵囊内部,并快速在卵内扩展其菌丝网络,直至整个卵内充满菌体,从而导致线虫卵彻底死亡^[7]。张永涛等^[40]研究表明,淡紫拟青霉菌颗粒剂对大棚番茄根结线虫防治效果较好,可以用于设施蔬菜生产中。为评估淡紫拟青霉对茄子(*Solanum melongena* L.)根结线虫的防效,Khan 等^[41]通过体外实验发现淡紫拟青霉穿透南方根结线虫卵囊,直接接触幼虫,寄生于南方根结线虫,降低茄子上南方根结线虫卵孵化率及 J2 存活率,显著提高茄子植株的各项生长指标与茄子的叶绿素和类胡萝卜素含量。

同时淡紫拟青霉菌产生的植物激素,可促进植物根系的生长,对植物发育进行一定程度的补偿。淡紫拟青霉菌制剂在农业生产中,可依据土壤及作物情况,在种子处理、育苗和移栽时使用。可在播种前将菌剂与种子进行拌种或浸泡,在病害发生时可将淡紫拟青霉菌与细土混合拌匀,并按比例添加到农用粉料中进行土壤撒施,也可以将菌剂兑水稀释一定浓度后,对作物进行灌根处理,在施药周期内要保证作物土壤环境的湿润程度。

芽孢杆菌是防治农业病虫害重要的生防因子,利用芽孢杆菌和假单胞菌防治植物根结线虫病具有重要的研究价值。有番茄盆栽试验表明,芽孢杆菌根际细菌在处理 60 d 后,根结线虫对番茄根结线虫防效可达到 55.88%^[42];坚强芽孢杆菌(*Bacillus firmus*)对南方根结线虫(*Meloido-*

gyne incognita) 具有较好的杀伤活性,能抑制线虫卵的孵化,减少根结线虫的数量;蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)能够有效抑制爪哇根结线虫(*M. javanica*)对番茄根系的侵染,减少病害的发生^[43]。苏云金芽孢杆菌(*B. thuringiensis*)是目前研究最多的一种生防细菌,除了对根结线虫具有较好的防效外,也表现出了对植株的促生作用^[44]。Chen 等^[45]研究发现苏云金芽孢杆菌 NBIN-863 中 N-甲基甲酰胺、丙烯酸酰胺、3-(甲硫基)丙酸和苯基丙二酸 4 种挥发性有机化合物对南方根结线虫具有较高的灭杀活性。也有研究发现,枯草芽孢杆菌 AR11 菌株对番茄根部根结和卵块的形成有明显的抑制作用,对番茄的生长也有促进作用^[46]。枯草芽孢杆菌 Bs-1 菌株对南方根结线虫卵孵化具有抑制和驱避作用,并能显著减少黄瓜根系的根结线虫并促进黄瓜植株生长^[47]。芽孢杆菌类制剂在农业中的施用过程与淡紫拟青霉制剂的施用方法类似,但需注意在与细土混合施用后要进行盖土处理,在作物移栽前进行种植穴施或种植沟施防治效果会更好。

木霉菌是一种重要生防真菌,国内外运用木霉菌制成林业及农业生防剂的技术已较成熟。对于根结线虫的防治,施用木霉菌制剂后,会迅速分解消耗侵染位点附近的各种营养物质,从而阻碍病原菌的生长和侵染过程,同时木霉菌通过分泌酶类消融病原菌的细胞壁,进而清除病原菌菌丝体,同时木霉菌可对病原菌进行再寄生,寄生根结线虫的卵囊,并分泌发酵液杀死根结线虫幼虫,直至杀死病原^[48]。研究发现桔绿木霉 Snef1910 对南方根结线虫具有显著防治效果,其代谢产物显著降低土壤中二龄幼虫、卵囊数量,并显著促进番茄植株生长^[49]。此外,木霉菌与植物生长具有协同促进作用,可促进植物的生长发育,同时分泌物可诱导激活植株自身的防控机制,进而提高寄主植物的抗病能力。施用木霉菌制剂的一般思路是使让木霉菌均匀地分布于植物根部、表面与土壤组织中,具体施药方法包括兑水稀释喷雾、拌种或浸种、蘸根处理、与作物粉料混合施用等。

3.5.2 杀线虫植物提取物 杀线植物是指具有毒杀线虫的植物化合物的植物,如曼陀罗、大蒜、薄荷、蓖麻、万寿菊等都具有杀线活性。已有研究证明,万寿菊属植物在其根部释放的天然化合物以及从叶片中提取的生物活性物质,对于根结线

虫的生命活动展现出明显的抑制效能,这些来自万寿菊植物的根部渗出物和叶片提取物含有的生物活性成分,可能通过干扰线虫的生理机能、破坏其外壁结构或者抑制其生长激素合成等途径,达到对根结线虫的有效控制。此外,针对特定物种野红花(*Cephalanoplos segetum*),进一步的研究显示其全株和叶片经过水浸提工艺得到的提取液,对南方根结线虫的卵孵化具有显著的抑制效果。这意味着野红花不仅可以通过其整体植株的化学信号影响根结线虫,即便是单独使用其叶片的部分,也能够有效阻止根结线虫卵正常发育为幼虫,从而打断根结线虫的生活周期,降低其对农作物的危害程度。同时,研究发现黄花蒿和野古草等蒿属植物对番茄根结线虫具有显著杀线虫活性,并从中提取 13 种主要化学物质,其中异东莰萜素、芹菜素能显著抑制南方根结线虫二龄幼虫和卵孵化率,具有较高的杀线虫活性^[50]。

4 展望

新时代背景下,生态化种植模式已经是未来大趋势,新技术、新方法的研究和应用是影响其发展进程的关键因素。在未来,人们将对设施大棚蔬菜的品质及产量提出更高的要求,对蔬菜具有巨大影响的根结线虫也仍将是未来研究关注的核心问题。

通过对我国根结线虫防治手段的研究及梳理可以发现,化学防治仍是现阶段设施大棚蔬菜根结线虫防治的主要手段,但其对于土壤环境的破坏,对人类及其他生物的危害需要引起人们高度重视,单一传统的物理防治及农业防治手段也不足以有效全面地防控根结线虫病害。面对根结线虫防治在设施大棚蔬菜生产实践中显现的处理周期冗长、效果缓慢等现实难题,推动根结线虫化学防治技术升级的关键路径之一,是研发兼具高效与低毒特性的新型药剂,并同步改良施药方式与策略。同时,积极探索现有杀线虫剂的优化组合使用方案,力求通过协同效应提高药剂的整体功效。此外,提倡将化学防治手段与农业管理措施、生物防治方法有机融合,旨在既能有效减轻化学农药的用量,又能提升防治效率,从而实现化学防治技术的绿色转型与可持续发展。同时加强微生物制剂的研发和使用,利用微生物制剂防治根结线虫具有很强的环境友好性,将其与化学防治的药剂结合使用,在提高杀线效果的同时,尽可能地

降低对生态环境的影响,并不断改进完善农业及物理防治技术中存在的不足,是未来根结线虫综合防治的关键。

参考文献:

- [1] 卢志权,姜爽,包妍妍,等.我国设施蔬菜产业发展现状与改进对策探析[J].新农业,2023(11):19.
- [2] NGUYEN L T T, JANG J Y, KIM T Y, et al. Nematicidal activity of verrucarins A and roridin A isolated from *Myrothecium verrucaria* against *Meloidogyne incognita* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2018, 148: 133-143.
- [3] HUANG Y, MA L, FANG D H, et al. Isolation and characterisation of rhizosphere bacteria active against *Meloidogyne incognita*, *Phytophthora nicotianae* and the root knot-black shank complex in tobacco[J]. Pest Management Science, 2015, 71(3): 415-422.
- [4] 王素真.不同生物杀线虫剂不同浓度对番茄根结线虫防效和植株促长作用的研究[D].郑州:河南农业大学,2015.
- [5] 何伟,罗文芳,于镇华,等.高温闷棚对设施蔬菜根结线虫的防治效果及土壤微生物群落结构的影响[J].新疆农业科学,2022,59(1):179-189.
- [6] 吴超群,杨泽茂,吴才君,等.设施蔬菜根结线虫危害及其防控机制研究进展[J].北方园艺,2018(11):164-172.
- [7] 周春霞.蔬菜根结线虫无公害防治技术[J].河南农业,2018(35):24-25.
- [8] 卢志军.根结线虫病综合治理研究[M].北京:中国农业出版社,9787109163720.
- [9] 顾建锋,方亦午,马欣欣.再议根结属线虫中国种和非中国种[J].植物检疫,2023,37(2):21-27.
- [10] 邹雅新.不同杀线剂对南方根结线虫的作用方式与田间防效[D].保定:河北农业大学,2009.
- [11] 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.
- [12] 冷鹏,张玉燕,刘延刚,等.设施果菜类蔬菜根结线虫病绿色防控综合技术[J].长江蔬菜,2019(9):64-65.
- [13] 陆惠光,陈恩发,范成平,等.贵州安顺地区烟草根结线虫病发生动态与分布[J].贵州农业科学,2018,46(6):76-79.
- [14] 罗佳,杭晓宁,汝学娟,等.重庆番茄根结线虫病的病原种类鉴定[J].分子植物育种,2024,22(2):512-516.
- [15] 董梓慧,刘海龙,王阳,等.设施蔬菜根结线虫的发生与绿色防控技术[J].陕西农业科学,2020,66(11):94-95.
- [16] 巩相景.蔬菜根结线虫病的防治现状及生物酶防治效果探析[J].现代农业科技,2020(11):135,137.
- [17] 宋忠献.蔬菜根结线虫病发生危害及综合防治技术分析[J].农家参谋,2018(14):72.
- [18] 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.
- [19] 董莹,周厚发,夏振远,等.云南省耿马县烟草根结线虫病发病因素调查[J].西南农业学报,2014,27(2):670-675.
- [20] 张绍升.植物线虫病诊断与治理[M].福州:福建科学技术出版社,1999.
- [21] 路雪君,廖晓兰,成飞雪,等.根结线虫的生物防治研究进展[J].中国农业科技导报,2010,12(4):44-48.
- [22] 苑杰勇.蔬菜根结线虫病的绿色防治[N].河北科技报,2021-05-20(005).
- [23] 张宗锦,闫芳芳,孔垂旭,等.烤烟蒴麻间作对烟草根结线虫防效及烟叶产质量的影响[J].中国烟草科学,2019,40(2):52-56.
- [24] 王丹,刘存辉,石朝鹏,等.轮作万寿菊对芹菜根结线虫病的防控效果[J].中国植保导刊,2020,40(12):46-48.
- [25] 何淑青,吕继康.山西省设施蔬菜根结线虫病综合治理对策[J].山西农业科学,2008,36(10):35-37.
- [26] 赵磊,段玉玺,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.
- [27] 孙维红,罗光耀.蔬菜根结线虫的防与治[J].西北园艺(综合),2021(6):48-49.
- [28] 旺珍.西藏高原根结线虫的发生与防治[J].西藏农业科技,2021,43(4):58-60.
- [29] 徐生海,唐峻岭,魏建荣,等.“三覆盖”高温闷棚对温室蔬菜根结线虫防效初探[J].中国植保导刊,2021,41(3):57-62.
- [30] 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,2024,49(1):424-438.
- [31] 魏佩瑶,潘嵩,彭德良,等.低温胁迫对南方根结线虫存活的影响及在北方温室的应用[J].应用生态学报,2023,34(7):1981-1987.
- [32] REGMI H, DESAEGER J. Integrated management of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) in *Florida* tomatoes combining host resistance and nematicides [J]. Crop Protection, 2020, 134: 105170.
- [33] 邵秀丽,张曙光,张慎璞,等.抗根结线虫病番茄新品种‘牟番1号’的选育[J].中国瓜菜,2016,29(7):22-24.
- [34] 杨红丽.抗病番茄新品种牟番2号[J].农村百事通,2021(13):29.
- [35] 武超,刘贤文,张炜,等.马铃薯不同品种(系)和稻、薯轮作模式对根结线虫病的防治效果[J].作物学报,2020,46(9):1456-1463.
- [36] 刘大伟,孙萌萌,刘秀杰,等.不同辣椒品种对南方根结线虫的抗性评价[J].中国蔬菜,2015(5):42-44.
- [37] 万宇力,陆秀红,黄金玲,等.9种药剂对番茄根结线虫的盆栽防治试验[J].广西植保,2014,27(4):17.
- [38] 梁建根,郑经武.设施栽培中蔬菜根结线虫生物防治研究进展[J].中国农学通报,2010,26(19):290-293.
- [39] 王波.淡紫拟青霉对南方根结线虫卵孵化的影响及其与放线菌代谢物复配对南方根结线虫生物防治的研究[D].南京:南京农业大学,2009.
- [40] 张永涛,刘林,焦圣群,等.防治设施蔬菜根结线虫病的生物药剂筛选试验[J].浙江农业科学,2013,(11):1468-1469.
- [41] KHAN M, TANAKA K. *Purpureocillium lilacinum* for plant growth promotion and biocontrol against root-knot nematodes infecting eggplant [J]. PLoS ONE, 2023, 18(3): e283550.
- [42] GUO J H, QI H Y, GUO Y H, et al. Biocontrol of tomato wilt by plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Biological

Control, 2004, 29(1): 66-72.

[43] OKA Y, CHET I, SPIEGEL Y. Control of the rootknot nematode *Meloidogyne javanica* by *Bacillus cereus* [J]. Biocontrol Science and Technology, 1993, 3(2): 115-126.

[44] 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.

[45] 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.

[46] 丁国春, 付鹏, 李红梅, 等. 枯草芽孢杆菌 AR11 菌株对南方根结线虫的生物防治[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(2): 46-49.

[47] CAO H Y, JIAO Y, YIN N, et al. Analysis of the activity and biological control efficacy of the *Bacillus subtilis* strain Bs-1 against *Meloidogyne incognita* [J]. Crop Protection, 2019, 122: 125-135.

[48] 李登辉. 钩状木霉诱导植物抗根结线虫作用机理初步研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.

[49] FAN H Y, YAO M L, WANG H M, et al. Isolation and effect of *Trichoderma citrinoviride* Snef1910 for the biological control of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*[J]. BMC Microbiology, 2020, 20(1): 299.

[50] KHAN R, NAZ I, HUSSAIN S, et al. Phytochemical management of root knot nematode (*Meloidogyne incognita*) kofoid and white chitwood by *Artemisia* spp. in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. Brazilian Journal of Biology, 2020, 80(4): 829-838.

Research Progress on Comprehensive Control of Root-Knot Nematodes in Facility Vegetables

LI Lin¹, LIU Wei², ZHANG Qianqian², JIAN Yanjun³, YUE Yang⁴, YUE Pengwu⁵, YI Jianghui²

(1. Jilin Agricultural Radio and Television School, Changchun 130033, China; 2. School of Biology and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou 404020, China; 3. Yushu Agricultural Machinery Technology Extension Service Station of Jilin Province, Yushu 130400, China; 4. College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 5. Jilin Seed Management Station, Changchun 130031, China)

Abstract:Root-knot nematode (RKN) is a devastating pest affecting Chinese vegetable production. As the demand for high-quality and eco-friendly vegetable productions, research on the pathogenesis and controlling measures of RKN becomes crucial. The view summarizes the control methods such as agricultural control, physical control, chemical control and biological control of RKN through the research on regularity of outbreak, pathogenesis and influence factors of RKN, and made an outlook on the future research direction for the control of RKN in facility vegetables.

Keywords:vegetable; root-knot nematode; pathogenesis; comprehensive control

著作权使用声明

本刊已许可中国知网、维普网、万方数据、博看网、长江文库、超星、龙源期刊网、中邮阅读网、新华网学术中国等知识服务平台以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

黑龙江农业科学编辑部