



徐晨伟,袁玉娟,李亚.根结线虫病害综合防治研究进展[J].黑龙江农业科学,2023(12):136-141.

根结线虫病害综合防治研究进展

徐晨伟,袁玉娟,李亚

(南通科技职业学院 环境与生物工程学院/江苏省农业农村污染防治技术与装备工程研究中心,
江苏 南通 226007)

摘要:根结线虫病是设施蔬菜栽培中常见的重要病害,严重影响作物的产量和品质。本文从农业防治、物理防治、化学防治和生物防治等方面综述根结线虫病害防治的研究进展。通过对各种防治方法的优缺点和应用效果的总结和比较,指出采取综合防治技术是降低农药使用量、改善土壤微生态,是兼顾经济、高效、绿色、环保的有效措施,以期对蔬菜根结线虫病害防治提供参考和借鉴。

关键词:蔬菜;根结线虫病害;综合防治

根结线虫(*Meloidogyne* spp.)是种类最多、寄主范围最广、危害最严重的一类世界性分布的植物寄生线虫^[1]。作为一种高度专业化型的杂食性植物病原线虫,其主要侵染植物的根系,侵袭后的典型根系症状如形成串珠状、瘤状的根结或虫瘿,根分支过多,根毛减少,根尖受伤等。由于根系发育不良影响植株吸收水分和养分的能力,地上部分表现为叶片萎蔫、变黄,植株长势矮小,出现早衰、枯死等症状。根结线虫可侵染的寄主 3 000 余种,分属于 114 科,对茄科、十字花科、葫芦科作物的侵害更为严重^[2]。根结线虫会与其他土传病害和弱寄生病原物引起复合侵染^[3]。根结线虫侵入根系时产生的伤口是其他病原物侵染植株的重要途径,会加剧根腐病、枯萎病等土传真菌病害的发生^[4-5]。同时,线虫侵染后作物长势衰弱,抗逆境能力下降,导致弱寄生菌侵染,对作物产量和品质造成更大危害。根结线虫病害常导致作物减产 10%~75%,严重时甚至绝收^[6]。近年来,随着设施蔬菜产业的迅速发展,栽培面积不断扩大,由于连作重茬严重、复种指数高、田间管理不当等栽培原因,根结线虫病害逐年加重^[7-8]。

目前,根结线虫病害防治难度高,施药难度大,是一个世界性的农业难题。研究人员和农业工作者一直致力于探索综合防治策略,力求充分利用不同防治手段的优势,减少线虫病害发生的风险,降低对化学农药的依赖,减少农药残留污

染,推动农业绿色高效可持续发展。本文从农业防治、物理防治、化学防治、生物防治等方面开展论述,以期探索高效的综合防治措施,为设施蔬菜产业的绿色发展提供科学依据和技术支持。

1 根结线虫病害的农业防治

农业防治是指采用耕作、田间管理、品种筛选等方式改善作物生长的土壤环境及植株对根结线虫的抗性,以达到防控根结线虫的效果。

1.1 轮作

根结线虫寄主广泛,常危害西瓜、黄瓜、番茄、四季豆、小青菜等 30 多种瓜果蔬菜。利用根结线虫寄生范围局限性原理,将易侵染作物与其他非寄主作物、抗病作物进行轮作,打破根结线虫的传播途径和生命周期,减少土壤中病原虫卵的积累,大幅降低土壤根结线虫丰度,从而降低病害传播的风险^[9]。例如与大蒜、葱、韭菜等抗病作物轮作有较好的根结线虫防控效果^[10]。同时,不同作物对土壤养分和酸碱度也有不同的需求和影响,通过轮作改换茬口可以平衡土壤养分,改良土壤理化性质,达到减轻病害的效果。对于病害严重的地块,水旱轮作可有效抑制根结线虫的发生,如设施栽培中与水生蔬菜慈姑、荸荠等轮作可有效防治根结线虫^[11]。耕作时要及时清理作物秸秆及残根,并进行适当的深耕以破坏残留的虫卵,降低根结线虫的存活和传播概率。但由于根结线虫寄主范围广的特性,可用于轮作的作物选择面较小,或所选的轮作作物经济效益低导致种植户的轮作意愿不强,或因农业栽培设施条件的限制不适合水旱轮作等,在实际生产中,轮作虽然作为一种经济有效的防治手段却往往得不到大规模应用。

收稿日期:2023-07-16

基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助项目;南通市科技计划项目(JC2021155)。

第一作者:徐晨伟(1989—),男,硕士,讲师,从事连作障碍土壤修复相关研究。E-mail:ntkycw@163.com。

1.2 抗病品种筛选

抗性育种是绿色、有效的根结线虫防治措施。常规育种方法为回交转育,通过对植株进行抗病性鉴定,筛选根结线虫抗性良好的品种作为亲本,从杂种一代起与亲本继续杂交,从而获得有利性状的转育。随着分子生物学技术发展,将抗线虫基因引入植物体内,培育抗病能力强的作物新品种已成为可能。首个根结线虫抗性基因 *Mil2* 来源于秘鲁番茄,随后应用于番茄、烟草等作物^[12]。相关试验表明抗病品种较易感病品种在产量上可提高 50%,具有广阔的应用前景^[13]。但抗病品种资源稀缺,主要集中在番茄、辣椒、甜菜等作物上,且抗病品种的线虫抗性往往比较单一,对根结线虫并不具备普适性。因此,基因工程在抗线品种培育方面目前主要停留在实验室阶段,生产应用较少。

1.3 施用有机肥

施用有机肥是根结线虫防治的一种重要措施。常用的有机肥主要有甲壳素肥料、粪肥、动植物残体和绿肥等。有机肥可以改善土壤团粒结构,提高土壤保水保肥性能,促进植物根系生长,增强作物对根结线虫的抵抗力^[14]。同时,有机肥在分解过程中又可以产生氨、脂肪酸等杀线物质,可抑制根结线虫的代谢活性。Akhtar 等^[15]研究发现印楝油渣饼能有效抑制植物寄生线虫,且抑制效果随施用量的增加而增强,对根结线虫的抑制率可达 50%。陈飞等^[16]研究发现以烟草废弃物堆肥可有效缓解根结线虫病害。但施用有机肥不能彻底杀死根结线虫,因此,在生产过程中常常将有机肥与生防菌株搭配组合,制备具有防病增产功能的复合菌肥。

2 根结线虫病害的物理防治

物理防治是指采用日光暴晒、蒸汽消毒、强还原土壤消毒等技术,迅速恶化土壤根结线虫的生存环境,从而降低其数量,削弱其致病力的方法。根结线虫的活动区域主要为土壤耕作层,通过改变耕作层土壤的生存环境来防治根结线虫就显得尤为重要。

2.1 高温闷棚

高温闷棚是在田间铺设塑料薄膜,利用光能加热土壤的一种作物种植前土壤消毒方式。由于根结线虫对高温较为敏感,55℃下 5 min 就会死亡,49℃下 10~15 min 几乎可杀死所有线虫,而

40℃下完全杀灭线虫需要 75 d^[17]。为保障日晒时间及土壤温度,该方法一般选择在夏季进行,同时通过覆膜达到增温保温效果。冯推紫等^[18]研究表明,通过覆膜暴晒对土壤根结线虫抑制率可达 65.9%。漆永红等^[19]研究发现,高温闷棚的杀线作用随土层的加深而减弱,30 cm 土层根结线虫的致死效果显著低于 10 cm 土层。由于日光暴晒处理的时间较长,对深层土壤的线虫致死率无法保障,因此该技术常与其他防治技术综合应用。

2.2 蒸汽消毒

蒸汽消毒是通过导管将密集的水蒸气导入塑料薄膜下面,使土壤保持 70℃以上的湿热状态 30 min,从而杀死土壤表面及一定深度的病原菌、虫卵以及杂草种子等,具有高效、清洁、稳定、无毒、处理后短期内即可播种等优点。该方法在美国国家的温室和苗床消毒中广泛应用,在使用方式上又可分为 3 种。第一种为传统的地膜覆盖蒸汽消毒法,该方法对浅层土壤的消杀效果较好,但对超过 30 cm 的深层土壤消杀作用极为有限。第二种为负压蒸汽消毒法,通过抽气机创造土壤负压环境,让高温蒸汽能顺利进入深层土壤提高消杀效果。第三种为 Hoddeson 管道法,在土壤 40 cm 深度预埋管道,高温蒸汽从管道上的小孔渗出对土壤进行自下而上的消杀,该方法对线虫的消杀率可达 80%。但由于投入成本较高,需要昂贵的蒸汽发生器及其配套设施,且运行能耗较高,该技术在我国农村未能有效推广。

2.3 强还原土壤消毒

土壤强还原处理(Reductive Soil Disinfestation, RSD)是一种作物种植前的土壤处理方法,即在高温条件下向土传病害土壤中添加大量易降解的有机物料,然后灌溉至田间最大持水量,覆盖薄膜阻隔与大气进行气体交换,通过创造极端厌氧环境达到短期内快速杀灭土壤根结线虫的目的^[20]。该方法适宜在设施环境最高气温 $\geq 25^\circ\text{C}$ 、最低气温 $\geq 15^\circ\text{C}$ 时进行,尤其是夏季高温天气最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 、最低气温 $\geq 25^\circ\text{C}$ 时的处理效果最佳,仅需覆膜 21 d 就可完成消毒处理。对于添加的固体型有机物料如水稻、玉米秸秆等,需风干后粉碎至 $\leq 4\text{ mm}$ 小段,然后通过旋耕机与耕层土壤充分混匀,一般添加量为 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而对于液体型有机物料如糖蜜等,可直接溶解于灌溉水添加,添加量为 $3\sim 6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。RSD 具有操作简便、广谱

杀菌和生态环保的优点,同时该方法还能有效缓解土壤酸化、次生盐渍化,改良土壤团粒结构^[21]。郭晨曦等^[22]以紫花苜蓿为有机物料开展 RSD 修复,发现 RSD 处理对番茄根结线虫病的防治效果可达 91.11%。朱佳双^[23]研究发现 RSD 处理能有效杀灭土壤根结线虫,改善土壤线虫群落结构,其中食细菌线虫相对丰度显著上升,为 66.2%~88.1%,而植食性线虫相对丰度显著降低,根结线虫的杀线率达 88.7%~94.6%。需要特别注意的是,RSD 处理不同于高温闷棚和单独淹水厌氧处理,添加的易降解有机碳源是保障 RSD 效果的关键,研究表明物料中总有机碳含量与杀线效果呈显著正相关。

3 根结线虫病害的化学防治

化学防治是通过化学药剂来防治线虫病害,具有操作简便、效果稳定、见效快的优点,也是实际生产中绝大多数种植户首选的方法,在根结线虫的防治中占有重要的地位。传统的化学杀线剂多数为卤代烃类或有机硫类熏蒸剂,如溴甲烷、氯化苦、D-D 混剂等,杀虫效果显著,但普遍存在毒性大、高残留、环境污染严重等缺点。随着公众环保意识的增强,消费者越来越重视果蔬安全问题,该类杀线剂已被限制使用或禁用。因此,开发一种低毒、高效的农药取代高毒农药是根结线虫病害防控的关键。

3.1 熏蒸性杀线剂

棉隆($C_5H_{10}N_2S_2$)是一种化学微粒制剂,是广谱性土壤熏蒸消毒剂,其遇水分解可产生异硫氰酸甲酯有毒气体,可有效杀灭土壤线虫、病原菌、杂草等。作为新型化学熏蒸剂,棉隆具有高效、低毒、无残留的优点,目前广泛应用于高附加值经济作物土传病害的防治。棉隆的使用方法与强还原土壤消毒较为相似,清洁园土后进行翻耕(≥ 30 cm),平整土地,灌溉至土壤含水率 60%~70%时开始施药,旋耕机混匀后覆膜处理 28 d。刘春艳等^[24]研究发现 98%棉隆使用量 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,处理 30 d 后根结线虫 2 龄幼虫虫口减退率为 92.05%,线虫防治效果达 89.34%,显著高于 10%灭线磷颗粒剂 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理。Eo 等^[25]研究发现棉隆熏蒸处理后土壤中线虫数量迅速降低,84 d 后线虫数量开始缓慢恢复,说明熏蒸过程线虫会产生抗药性,后期土壤仍可能被线虫二次侵染。棉隆在应用中还存在一些不足,比如棉

隆的杀灭效果不具有针对性,有益线虫及微生物都会被杀灭,会破坏土壤微生物多样性。熏蒸过程棉隆使用量大,杀线物质的完全挥发对作业时间、土壤温度、空气温度等环境因素要求较高,一般要求在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,杀线物质若有残留易对后期作物产生危害。同时,棉隆熏蒸操作复杂,人工成本较高。为达到棉隆减量、增效的目的,张洁等^[26]研究发现使用低剂量 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的棉隆熏蒸,联合施用 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 根结线虫生防菌甲基营养型芽孢杆菌生物菌肥可有效杀灭根结线虫。

3.2 非熏蒸性杀线剂

目前,农业生产中对根结线虫病害的防治多以非熏蒸性杀线剂为主,在作物种植前、播种期及生长期均可使用,可通过种子处理、撒施、穴施、灌根等多种方式施药。根据化学结构非熏蒸性杀线剂又可分为有机磷类、氨基甲酸酯类及其他类别。其中前两者中大部分药剂因高毒性、高残留被限制使用,包括灭线磷、克百威等^[27]。其他类别主要有阿维菌素、氟吡菌酰胺等。目前,阿维菌素、氟吡菌酰胺及有机磷类杀线剂噻唑膦等是根结线虫病害防治的主要登记药剂^[28]。非熏蒸性杀线剂可通过内吸、触杀、胃毒等方式作用于根结线虫,而不会危害其他有益线虫,通过影响线虫的取食、发育、繁殖,从而延缓线虫对作物的侵袭时间和危害高峰期进而保护作物。阿维菌素是防治根结线虫最主要的药剂,它是从链霉菌(*S. avermitilis*)中提取到的大环内酯类化合物,作为一种神经性毒剂,阿维菌素通过释放 γ -氨基丁酸(GABA)抑制目标生物的正常神经冲动传导,使线虫麻痹、拒食以至死亡^[29]。研究发现阿维菌素容易被土壤微生物降解,持效期较短,远低于黄瓜、番茄等作物 90~120 d 的生长周期^[30]。同时,阿维菌素的水溶性低,在土壤中随水移动性能严重不足,而与土壤有机质结合能力强,导致阿维菌素在土壤中发挥杀线作用的区域极为有限,仅在 0~5 cm 深度范围内杀线效果显著。因此,阿维菌素常与其他药物复配使用以强化杀线效果。当病害较重时,常把 1 000 倍的 1.8%阿维菌素与淡紫拟青霉复配使用,而病情较轻时则可以与水溶肥混合使用,一般 10~15 d 用药 1 次,连续使用 2 次。如何提高阿维菌素的土壤稳定性和土壤迁移能力是今后研究的一个重点。同时,研究发现部分非熏蒸性杀线剂不能很好地抑制线虫卵的孵化,线虫麻醉复苏后亦能产生抗药性和耐药性。

4 根结线虫病害的生物防治

生物防治是利用活体生物或其代谢产物来抑制或杀死特定病害线虫的一类方法,具有环保、安全、持久性强的优点,也是近年来研究的热点。目前,主要利用微生物或杀线虫植物的次级代谢产物来进行生物防治^[31]。

4.1 真菌

全世界已报道的食线虫真菌有 700 多种。食线虫真菌分泌的几丁质酶、胶原蛋白酶可以降解线虫体壁和卵壳中的蛋白质及几丁质成分,在侵染线虫过程中发挥着重要的作用。根据其作用方式的差异,可分为捕食真菌、内寄生真菌、机会性真菌和产毒真菌^[32]。捕食真菌通过营养菌丝特化的捕捉器来捕捉线虫,主要有节丛孢属(*Arthrobotrys*)、小隔指孢霉属(*Dactylella*)、单顶孢霉属(*Monacrosporium*)等^[33]。内寄生真菌的菌丝穿透线虫或虫卵后,以粘性或非粘性孢子寄生于线虫,吸收线虫营养致其死亡^[34]。机会性真菌是一类专性或兼性寄生于线虫卵、胞囊和雌虫体内的一类真菌。如淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinu*)是一种卵寄生菌,对线虫卵的寄生率高达 60%~70%,也能侵染线虫幼虫和雌虫。研究表明,淡紫拟青霉孢子液能有效抑制南方根结线虫二龄幼虫的活性和幼虫的孵化,对番茄根结线虫的抑制率可达 58.8%^[35]。现已成功开发为商用制剂,广泛应用于番茄、茄子、黄瓜等蔬菜的根结线虫防治。木霉菌(*Trichoderma* spp.)是重要的根结线虫生防资源,既可产生次级代谢产物对线虫进行毒杀或拮抗,又可侵染线虫进行重寄生作用。同时,木霉定殖在植物根系又可诱导植物产生抗性,产生的次级代谢产物又可改善植物根系微生物群落,提高养分利用率,促进植物生长,达到综合防治线虫病害的目的^[36]。

4.2 细菌

细菌是线虫生物防治的重要组成部分。目前研究较多的主要有巴氏杆菌(*Pasteuria* spp.)、假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)、苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)、链霉菌(*Streptomyces*)等^[37]。其中,巴氏杆菌侵染的靶标线虫广泛,穿刺巴氏杆菌(*Pasteuria penetrans*)作为研究较多的一种,通过其内生孢子能有效侵染番茄、豆类等作物根结线虫,抑制幼虫活动能力,减少根结线虫数量^[38]。芽孢杆菌和假单胞菌是一类研究较多

的根际促生细菌(Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR),均具有较好的线虫抑制能力。随着生物有机肥研究的不断深入,通过向腐熟物料中添加功能性微生物菌剂进行 2 次发酵制备的功能性微生物肥料在作物病害防控、促进作物生长等方面表现出一定的优势。高旭利等^[39]研究发现以枯草芽孢杆菌 BS-1 复配的生物有机肥对根结线虫的防治效果显著高于 10% 噻唑膦颗粒剂处理。李小艳等^[40]通过大棚试验发现以“夏季高温闷棚+施用解淀粉芽孢杆菌 B1619”的物理和生物综合防治方法效果最佳,对黄瓜根结线虫的防治效果达 85.17%。

4.3 植物源化合物

植物源化合物是植物的次级代谢产物,其驱虫杀虫作用是植物在进化过程中对病虫害形成的自我保护机制。目前,大约有 300 余种作物被报道具有杀线虫或抑制线虫的活性。与化学杀虫剂相比,植物次级代谢产物更易降解,具有更好的环境相容性,将其制备成杀线剂对于线虫防治以及绿色农药的开发都具有重要意义。常见的植物源农药包括烟碱、鱼藤酮、苦参碱、印楝素、乙蒜素等^[41]。印楝素是从印楝树中分离得到的天然产物,是世界公认的活性最强的植物源农药,不仅具有广谱杀虫活性,而且还不易产生抗药性。研究发现,生物碱类、酚类、硫代葡萄糖苷类等都具有一定的杀线活性。虽然,我国具有杀线虫活性的植物资源丰富,但目前的研究主要局限于粗提取物,针对活性小分子化合物的研究相对较少,且尚未有专门的植物源杀线虫农药品种获准登记,从基础理论研究到商品化植物源农药应用还有很长的路要走。

综合来看,根结线虫的生防资源较为丰富,应用情景广阔。但大多停留在实验室研究阶段,能在线虫病害严重的土壤中发挥稳定生防效果的商品化制剂较少,普遍存在田间防治效果稳定性差、持效期短、易受外界因素影响、成本高等问题。在推广应用过程中,各区域的气候条件、土壤的理化性质、土著微生物群落特征以及栽培作物类型等因素都不尽相同,是现阶段推广应用的难点。

5 结语与展望

全球气候变暖和设施栽培的大面积推广为根结线虫病害的发生提供了适宜环境。在未来相当长的时间内,根结线虫病害常态化爆发依然是作

物生长的最大威胁之一。目前,根结线虫病害防治仍然面临着线虫抗药性增强,线虫和病原菌复合侵染危害加剧,安全、高效、经济的杀线剂缺乏等一系列挑战。随着社会对生态环境的重视、对绿色农业的关注,探索一种成本低、易操作、防治效果好、生态友好型的新型防治手段也必定是今后研究的方向。

根结线虫病害的发生受多种因素的影响,包括土壤温度、土壤湿度、土壤质地、土壤 pH、作物品种抗性和耕作方式等,在兼顾生态安全、防治效果、农业生产成本的前提下,传统的单一防治方法难以彻底解决根结线虫病害问题。因此,在制定根结线虫防治方案时,要综合考虑土壤的实际情况、实施条件,做到“因地制宜、取长补短”。由于当前根结线虫化学防治成本较高,建议使用“以农业防治为基础,生物防治与物理防治相结合,抗病品种和化学防治交替使用”的防治策略,做到预防为主,防治结合。综合农业、物理、化学、生物防治的优势,探索多种手段结合应用,提高整体防治效果。如棉隆熏蒸会破坏土壤微生物群落多样性,熏蒸后可以施用根结线虫生防菌甲基营养型芽孢杆菌生物有机肥加快功能性微生物群落的重建,强化根结线虫防治效果。可充分利用生防菌对线虫病害防治的协同效应,优化组分及配比,开发新型生防型菌肥以激发菌肥的防控潜力等。

化学杀线剂在速效性方面具有独特的优势,要加强对高效、低毒、低残留化学杀线剂的研究,可加强纳米技术在农药领域的研究应用,提高药剂的溶解度、控制药剂的精准释放,增加药剂的生物利用度和药剂稳定性。在目前杀线剂品种短缺的情况下,要充分优化现有品种的使用方法,将农药对环境的影响减小到最低。就生物菌肥开发存在的功能菌品种少、活菌数量低、田间效果不稳定、产品价格高等问题,亟需加强对多功能复合型生物菌肥的研究。植物源杀线剂具有靶向性强、环境友好的优势,要加强对杀线植物次级代谢产物的活性成分、杀虫机理的研究,为植物源杀线虫农药的开发提供科研支撑。

在应用推广上,各地植保站、耕保站要加强实践研究,要依据区域土壤和温度条件、种植品种及作物价值,制定科学适宜、简便安全、可持续地根结线虫病害治理技术方案并形成农业新模式、新方法进行示范推广,让新技术在田间落地。

参考文献:

- [1] 王泊理,赵江克,王孟玺. 氨基寡糖素和噻唑膦防治哈密瓜根结线虫的效果[J]. 植物医生,2017,30(1):64-66.
- [2] 刘维志. 植物线虫志[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [3] LA MONDIA J, TIMPER P. Interactions of microfungi and plant-parasitic nematodes[J]. Biology of Microfungi, 2016: 573-614.
- [4] HUA G K H, TIMPER P, JI P S. *Meloidogyne incognita* intensifies the severity of Fusarium wilt on watermelon caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2019, 41(2): 261-269.
- [5] WESEMAEL W M L, VIAENE N, MOENS M. Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in Europe[J]. Nematology, 2011, 13(1): 3-16.
- [6] 刘霆,李永峰,陈立杰,等. 菌线克防治北方根结线虫病研究[J]. 长江蔬菜, 2007(2): 48-49.
- [7] 范志伟. 保护地栽培及存在问题[J]. 现代农业, 2016(6): 50-51.
- [8] 席先梅,白全江,张庆萍,等. 设施黄瓜根结线虫化学防治技术研究[J]. 植物保护, 2017, 43(2): 235-240.
- [9] 王秋霞,颜冬冬,王献礼,等. 土壤熏蒸剂研究进展[J]. 植物保护学报, 2017, 44(4): 529-543.
- [10] 陈志杰,张锋,梁银丽,等. 陕西设施蔬菜根结线虫病流行因素与控制对策[J]. 西北农业学报, 2005, 14(3): 37.
- [11] 孙世伟,桑利伟. 根结线虫防治研究进展[J]. 现代农业科技, 2008(11): 181-182, 184.
- [12] 崔鑫,岳向国,李斌,等. 蔬菜作物根结线虫病害防治研究进展[J]. 中国蔬菜, 2017(10): 31-38.
- [13] ROBERTS P A, MAY D. *Meloidogyne incognita* resistance characteristics in tomato genotypes developed for processing[J]. Journal of Nematology, 1986, 18(3): 353-358.
- [14] OKA Y. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 44(2): 101-115.
- [15] AKHTAR M. Biological control of plant-parasitic nematodes by neem products in agricultural soil[J]. Applied Soil Ecology, 1998, 7(3): 219-223.
- [16] 陈飞,杜龙龙,常瑞雪,等. 添加烟草废弃物对堆肥腐熟度及抑制线虫作用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 102-106.
- [17] 曹勘程,郭美霞. 土壤根结线虫防治技术[J]. 中国蔬菜, 2002(6): 60-61.
- [18] 冯推紫,裴月令,孙燕芳,等. 阳光消毒防治海南冬季辣椒根结线虫病效果评价[J]. 福建农业学报, 2018, 33(11): 1172-1175.
- [19] 漆永红,杜蕙,曹素芳,等. 日光高温消毒方式对土壤根结线虫的防治效果[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 122-127.
- [20] 蔡祖聪,张金波,黄新琦,等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 469-476.
- [21] 夏青,罗晨,曾粮斌,等. 强还原土壤处理对再植龙牙百合生长不利因子的消减作用[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 183-193.

[22] 郭晨曦,周桂芳,陈碧华,等. 强还原土壤灭菌法(RSD)对大棚连续三茬蔬菜生长、产量和病虫害的影响[J]. 河南农业科学,2020,49(11):98-109.

[23] 朱佳双. 强还原土壤处理对根结线虫的抑制作用研究[D]. 南京:南京师范大学,2020.

[24] 刘春艳,王万立,霍建飞,等. 98%棉隆微粒剂防治黄瓜根结线虫田间药效试验[J]. 北方园艺,2011(23):128-130.

[25] EO J, PARK K C. Effects of dazomet on soil organisms and recolonisation of fumigated soil[J]. *Pedobiologia International Journal of Soil Biology*,2014,57(3):147-154.

[26] 张洁,夏明聪,刘红彦,等. 低剂量棉隆熏蒸联合生物菌肥防治黄瓜根结线虫病的应用效果[J]. 植物保护学报,2019,46(4):824-831.

[27] 王猛. 我国线虫防治现状及非熏蒸性杀线虫剂研究进展[J]. 广西植保,2017,30(2):31-34.

[28] 刘广. 阿维菌素纳米囊的制备及对黄瓜根结线虫病防治作用[D]. 泰安:山东农业大学,2020.

[29] PAYNE G T, SODERLUND D M. Actions of avermectin analogs on γ -aminobutyric acid (GABA)-sensitive and GABA-insensitive chloride channels in mouse brain[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*,1993,47(3):178-184.

[30] DIONISIO A C, RATH S. Abamectin in soils: analytical methods, kinetics, sorption and dissipation[J]. *Chemosphere*,2016,151:17-29.

[31] 祝明亮,李天飞,张克勤,等. 根结线虫生防资源概况及进展[J]. 微生物学通报,2004,31(1):100-104.

[32] 周春娜,吴仕豪,邵庆华,等. 浅谈植物寄生线虫生物防治研究进展[J]. 中国植保导刊,2004,24(8):12-14.

[33] AZAD THAKUR N S, DEVI G. Management of *Meloidogyne incognita* attacking okra by nematophagous fungi, *Arthrobotrys oligospora* and *Paecilomyces lilacinus* [J]. *Agricultural Science Digest*,2007,27(1):50-52.

[34] 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.

[35] 高倩圆,胡飞龙,祝红红,等. 蓖麻提取物和淡紫拟青霉对南方根结线虫的防治作用[J]. 生态学杂志,2011,30(10):2250-2256.

[36] 罗宁,焦阳,茆振川,等. 木霉菌对根结线虫和孢囊线虫防治机理研究进展[J]. 生物技术通报,2023,39(2):35-50.

[37] SIDDQUI I A, HAAS D, HEEB S. Extracellular protease of *Pseudomonas fluorescens* CHA0, a biocontrol factor with activity against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*,2005,71(9):5646-5649.

[38] 董炜博,石延茂,迟玉成,等. 穿刺巴氏杆菌防治植物根结线虫病的研究现状及其应用前景[J]. 中国生物防治,1999,15(2):89-93.

[39] 高旭利,李永腾,刘文宝,等. 利用生防细菌防治黄瓜根结线虫病研究[J]. 山东农业科学,2018,50(8):116-119.

[40] 李小艳,倪畅,刘旭. 不同防治方法对设施黄瓜根结线虫的防治效果[J]. 中国农学通报,2022,38(25):130-133.

[41] 余露. 我国生物农药产品登记占农药登记总数超十成[J]. 农药市场信息,2017,2(30):37-38.

Research Progress on Comprehensive Control Methods of Root-Knot Nematode

XU Chenwei, YUAN Yujuan, LI Ya

(Faculty of Environment and Bioengineering, Nantong College of Science and Technology / Jiangsu Province Engineering Research Center of Agricultural and Rural Pollution Prevention Technology and Equipment, Nantong 226007, China)

Abstract: Root-knot nematode disease is a common and important disease in facility vegetable cultivation, which seriously affects crop yield and quality. This paper reviewed the research progress of root-knot nematode disease control from the aspects of agricultural control, physical control, chemical control and biological control. Through the study and comparison of the advantages and disadvantages of various control methods and application effects, it was pointed out that the comprehensive control technology was an effective measure to reduce the use of pesticides and improve the soil microecology. It was an effective measure of economy, efficiency, green and environmental protection, in order to provide reference for the control of vegetable root-knot nematode disease.

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

欢迎订阅