

作物土传病害的危害及防治技术

曹勔程, 刘晓漫, 郭美霞, 王秋霞, 李园, 欧阳灿彬, 颜冬冬

(中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要 近20年来,保护地在中国有了较大的发展,而保护地的发展和作物的连年栽培,导致土传病害和根结线虫发生越来越重,连续栽培3~5年后,作物产量和品质受到严重的影响,已成为生产中的突出问题。本文简述了我国重要作物如玉米、小麦、棉花、大豆、油菜的土传病害种类,以及高附加值作物黄瓜、番茄、茄子、辣椒、瓜类等作物的土传病害种类和20年来的变化。介绍了土传病害的防治方法,如农业防治包括轮作、抗性品种、嫁接、有机质补充、生物熏蒸、厌氧消毒;物理防治技术如太阳能消毒、蒸汽消毒、热水消毒、火焰消毒;化学防治技术如氯化苦、棉隆、威百亩、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯、硫酰氟;生物防治技术如木霉、枯草芽孢杆菌、荧光假单胞菌、植物促生菌,以及预防为主的综合防治技术。种子、种苗消毒技术在本文中也进行了介绍。

关键词 土传病害; 农业防治; 物理防治; 化学防治; 生物防治

中图分类号: S 432.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2017.02.002

Incidences of soil-borne diseases and control measures

Cao Aocheng, Liu Xiaoman, Guo Meixia, Wang Qiuxia, Li Yuan, Ouyang Canbin, Yan Dongdong

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract In recent 20 years, the area of protected land expanded very rapidly in China. Because of rapid development of protected agriculture and intensive cultivation, the occurrence of soil-borne diseases and nematodes are getting more and more serious. Crop yield and quality are affected after 3—5 years' cultivation. In past 20 years, the occurrence and succession of soil-borne diseases in major crops, such as maize, wheat, cotton, soybean, oil-seed rape as well as high-value crops, such as cucumber, tomato, eggplant, pepper, and melons were described in this paper. Strategies and measures for control of soil-borne diseases, including agricultural methods such as rotation, resistant cultivars, grafting, soil amendment, biofumigation, and anaerobic soil disinfestation, physical methods such as solarization, steam, hot water treatment, and flaming, soil fumigation such as chloropicrin, dazomet, metham sodium, DMDS, AITC, sulfuryl fluoride, etc., biological control agents, such as *Trichoderma*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, etc., as well as integrated pest management and technologies of seed and seedling treatment were also summarized in the paper.

Key words soil-borne disease; agricultural control; physical control; chemical control; biological control

我国人多地少,平均每户耕地仅1 300~2 000 m²。由于劳动力成本的不断上升,传统种植大田作物如水稻、小麦、玉米、大豆、棉花很难取得好的经济效益。近20年来,保护地的发展和高附加值作物的栽培,大幅度增加了农民的收入,实现了由传统农业向现代农业的转变。目前我国保护地种植面积已超过380万hm²。高附加值作物草莓10.5万hm²、蔬菜2 035.26万hm²、鲜切花59 381.8 hm²[1],生姜仅山东安丘和莱芜种植面积达2.4万hm²[2]。我国重要

的中药材如人参、三七、山药的种植面积均居世界首位。随着保护地的发展和高附加值作物的连年栽培,造成土壤中病原菌、虫卵积累,毁灭性土传病害如枯萎病、根腐病、黄萎病、青枯病及根结线虫病等连年发生,逐年加重,通常栽种3~5年后,作物产量和品质受到严重影响,一般造成减产20%~40%,严重的减产60%以上甚至绝收[3]。

在我国,由于采用集约化种植和保护地栽培,土传病害发生严重的蔬菜有:番茄、黄瓜、茄子、辣椒、

芹菜;高附加值作物有:草莓、西瓜、甜瓜、生姜、山药、花卉、烟草以及人参、三七等中药材;根茎类作物:魔芋、马铃薯、甘薯、胡萝卜;果树再植也是一重大难题。在保护地,通常连年栽种 3~5 年,作物的产量即有明显的下降,表现在作物生长瘦弱,早衰,严重时绝产。因此,土传病害已成为我国农业生产可持续发展的制约因素。

作物连茬障碍通常与三方面的因素有关,一是病虫害的积累,二是作物营养失调,三是连茬种植作物产生一些自毒物质,而土传病害是连茬障碍最为重要的因素^[4]。

引起土传病害的病原菌有:病原真菌如镰刀菌 *Fusarium* spp.、疫霉 *Phytophthora* spp.、轮枝孢菌 *Verticillium* spp.、核盘菌 *Sclerotinia* spp.、丝核菌 *Rhizoctonia* spp.、腐霉 *Pythium* spp.、炭疽菌 *Colletotrichum* spp.、尾孢菌 *Cercospora* spp.;病原细菌如茄青枯病菌 *Ralstonia solanacearum*、欧文氏菌 *Erwinia* spp.、假单胞菌 *Pseudomonas* spp.、土壤杆菌 *Agrobacterium* spp. 等;线虫如根结线虫 *Meloidogyne* spp.;土传病毒如烟草花叶病毒 *Tobacco mosaic virus* 等。

1 《中国农作物病虫害》1979 年版和 2015 年版记录的我国重要作物土传病害比较

《中国农作物病虫害》是至今为止记录我国发生的农作物病虫害最为全面的著作。比较该书 1979 年版(第 2 版)^[5]和 2015 年版(第 3 版)^[3],土传病害的记录均有不同程度的增加,以玉米、瓜类、果树增加最多。玉米土传病害大幅度增加可能与近年来要求秸秆还田和机械化作业造成土传病害的传播有关。玉米土传病害的不断加重,有可能对我国玉米生产造成严重影响。

我国玉米土传病害在《中国农作物病虫害》1979 年版中只报道了 4 种:玉米丝黑穗病(玉米丝黑穗病菌 *Sphacelotheca reiliana*)、玉米黑粉病(玉蜀黍黑粉菌 *Ustilago maydis*)、玉米穗茎腐病(禾谷镰刀菌 *Fusarium graminearum*、瓜果腐霉 *Pythium aphanidermatum*)、玉米纹枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)。而在 2015 年版中增加了 20 种以上:玉米褐斑病(玉蜀黍节壶菌 *Physotherium maydis*)、玉米顶腐病(胶孢镰孢 *Fusarium subglutinans*)、玉米瘤黑粉病(玉蜀黍黑粉菌 *Ustilago maydis*)、玉米镰孢穗腐

病(拟轮枝镰孢 *F. verticillioides*、禾谷镰孢 *F. graminearum*)、玉米黄曲霉穗腐病(黄曲霉 *Aspergillus flavus*)、玉米其他穗腐病(青霉穗腐病:草酸青霉 *Penicillium oxalicum*、黑曲霉穗腐病:黑曲霉 *A. niger*、木霉穗腐病:绿色木霉 *Trichoderma viride*、黑球孢穗腐病:稻黑孢 *Nigrospora oryzae*)、玉米疯顶病(大孢指梗霉 *Sclerospora macrospora*)、玉米腐霉茎腐病(肿囊腐霉 *Pythium inflatum*、禾生腐霉 *P. graminicola*、瓜果腐霉 *P. aphanidermatum*)、玉米镰孢茎腐病(拟轮枝镰孢 *F. verticillioides* 等)、玉米鞘腐病(层出镰孢 *Fusarium proliferatum*)、玉米黑束病(直枝顶孢 *Acremonium strictum*)、玉米腐霉根腐病(肿囊腐霉 *Pythium inflatum* 等)、玉米苗枯病(拟轮枝镰孢菌 *Fusarium verticillioides* 等)、立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*、玉米生平脐蠕孢 *Bipolaris zeicola*)、玉米细菌性顶腐病(铜绿假单胞杆菌 *Pseudomonas aeruginosa*)、玉米细菌性茎腐病(成团泛菌 *Pantoea agglomerans*)、玉米细菌性叶斑病(泛菌叶斑病:菠萝泛菌 *P. ananas*、芽胞杆菌叶斑病:巨大芽胞杆菌 *Bacillus megaterium*、细菌性褐斑病:稻叶假单胞菌 *Pseudomonas oryzae*)。

1979 年报道的麦类土传病害有 22 种:麦类赤霉病(禾谷镰刀菌 *Fusarium graminearum*)、小麦纹枯病(禾谷丝核菌 *Rhizoctonia cerealis*、立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani* 的 AG-4 和 AG-5 融合组)、小麦全蚀病(禾顶囊壳小麦变种 *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*)、小麦腥黑穗病(网腥黑穗病菌 *Tilletia caries*、光腥黑穗病菌 *T. foetida*、小麦矮腥黑穗病菌 *T. controversa*)、小麦秆黑粉病(小麦条黑粉菌 *Urocystis tritici*)、小麦雪霉叶枯病(无性世代:雪腐格氏霉 *Gerlachia nivalis*,有性世代:*Monographella nivalis*)、小麦雪霉病(黑点雪霉病菌 *Typhula ishikariensis*)、小麦根腐病(小麦根腐病菌 *Bipolaris sorokiniana*)、小麦白秆病(小麦壳月孢 *Selenophoma tritici*)、小麦霜霉病(大孢指疫霉 *Sclerophthora macrospora*)、小麦秆枯病(禾谷绒座壳 *Gibberinia cerealis*)、小麦梭条斑花叶病(小麦梭条斑花叶病毒 *Wheat spindle streak mosaic virus*)、土传小麦花叶病(小麦花叶病毒 *Soil-borne wheat mosaic virus*)、小麦孢囊线虫病(小麦禾谷孢囊线虫 *Heterodera avenae*、菲利普孢囊线虫 *H. filipjevi*)、小麦粒

线虫病(小麦粒线虫 *Anguina tritici*)、小麦蜜穗病(小麦蜜穗病菌 *Corynebacterium tritici*)、小麦卷曲病(双冠羽胞菌 *Dilophospora alopecuri*)、大麦黄花叶病(大麦黄花叶病毒 *Barley yellow mosaic virus*)、麦类麦角病(紫麦角菌 *Claviceps purpurea*)。

2015 年增补的土传病害是小麦黑胚病(链格孢 *A. alternata*、麦根腐平脐蠕孢 *B. sorokiniana*、镰孢属 *Fusarium* spp.、芽枝孢霉 *Cladosporium herbarum*)。

我国甘薯土传病害在 1979 年版中报道了 5 种:甘薯黑斑病(甘薯长喙壳 *Ceratocystis fimbriata*)、甘薯根腐病(无性阶段:腐皮镰孢甘薯专化型 *Fusarium solani* f. sp. *batatas*, 有性阶段:血红丛赤壳菌 *Nectria haematococca*)、甘薯瘟病(青枯假单胞菌 *Pseudomonas solanacearum*)、甘薯糠腐茎线虫病(甘薯糠腐线虫 *Ditylenchus destructor*)、甘薯南方根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*)。在 2015 年版中又新增加了甘薯紫纹羽病(桑卷担菌 *Helicobasidium mompa*)、甘薯黑痣病(薯毛链孢 *Monilochaetes infuscans*)、甘薯干腐病(尖镰孢 *Fusarium oxysporum* 等)、甘薯蔓割病(尖镰孢甘薯专化型 *F. oxysporum* f. sp. *batatas*、球茎状镰孢甘薯变种 *F. bulbigenum* var. *batatas*)和甘薯细菌性黑腐病(达旦迪基氏菌达旦亚种 *Dickeya dadantii* subsp. *dadantii*)。

1979 版收录的我国马铃薯土传病害有:马铃薯晚疫病(致病疫霉 *Phytophthora infestans*)、马铃薯青枯病(青枯假单胞菌 *Pseudomonas solanacearum*)、马铃薯黑胫病(黑胫病欧文氏菌 *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*)、马铃薯软腐病(胡萝卜欧文氏菌胡萝卜亚种 *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*、菊欧文氏菌 *E. chrysanthemi*)。2015 版新增马铃薯黑痣病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)、马铃薯枯萎病(尖镰孢 *Fusarium oxysporum* 等)、马铃薯银色粗皮病(茄长蠕孢 *Helminthosporium solani*)和马铃薯根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、繁峙根结线虫 *M. fanzhiensis*、中华根结线虫 *M. sinensis*、北方根结线虫 *M. hapla*)。

2 个版本记录的我国油菜土传病害有:油菜菌核病(核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum*)、油菜霜霉病(寄生霜霉 *Peronospora parasitica*)、油菜白锈病(白锈菌 *Albugo candida*)、油菜黑腐病(油菜黄单胞菌油菜致病变种 *Xanthomonas campestris* pv.

campestris)、油菜细菌性黑斑病(丁香假单胞菌斑生致病变种 *Pseudomonas syringae* pv. *maculicola*)、油菜根肿病(芸薹根肿菌 *Plasmidiophora brassicae*)、油菜猝倒病(瓜果腐霉 *Pythium aphanidermatum*)、油菜枯萎病(尖镰孢黏团专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*)、油菜立枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)、油菜黄萎病(长孢轮枝孢 *Verticillium longisporum*)、油菜淡叶斑病(芸薹硬座盘菌 *Pyrenopeziza brassicae*)、油菜白绢病(齐整小核菌 *Sclerotium rolfsii*)。

1979 年记录的我国大豆土传病害有:大豆胞囊线虫病(大豆胞囊线虫 *Heterodera glycines*)、大豆根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* 等)、大豆菌核病(核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum*)、大豆纹枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)和大豆立枯病(立枯丝核菌 *R. solani* AG-4 和 Ag1-IB 菌丝融合群)。2015 年新增加了大豆疫霉根腐病(大豆疫霉 *Phytophthora sojae*)、大豆纹枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)、大豆根腐病(镰孢菌 *Fusarium* spp.、腐霉 *Pythium* spp.、大豆疫霉 *Phytophthora sojae*、立枯丝核菌 *R. solani*)。

1979 年记录的我国大白菜土传病害有:白菜霜霉病(寄生霜霉 *Peronospora parasitica*)、白菜软腐病(胡萝卜果胶杆菌胡萝卜亚种 *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*)、十字花科蔬菜根肿病(芸薹根肿菌 *Plasmidiophora brassicae*)、十字花科蔬菜菌核病(核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum*、小核盘菌 *S. minor*)、十字花科蔬菜白锈病(白锈菌 *Albugo candida*、大孢白锈菌 *A. macrospora*)。2015 年增加了十字花科蔬菜黑腐病(油菜黄单胞菌油菜变种 *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*)、十字花科蔬菜霜霉病(寄生霜霉 *Peronospora parasitica*)。

1979 年记录的我国番茄土传病害有:番茄青枯病(青枯假单胞菌 *Pseudomonas solanacearum*)、番茄早疫病(茄链格孢 *Alternaria solani*)、番茄晚疫病(致病疫霉 *Phytophthora infestans*)、番茄叶霉病(褐孢霉 *Fulvia fulva*)、番茄枯萎病(*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*)。2015 年增加 3 种:番茄细菌性斑点病(丁香假单胞菌番茄变种 *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*)、番茄细菌性髓部坏死病(皱纹假单胞菌 *Pseudomonas corrugata*)和番茄

灰叶斑病(茄葡柄霉 *Stemphylium solani*)。

1979 年记录的茄土传病害有:茄绵疫病(寄生疫霉 *Phytophthora parasitica*)、茄黄萎病(大丽轮枝孢 *Verticillium dahliae*)、茄枯萎病(尖镰孢菌茄专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *melongenae*)。2015 年又增加了茄黑枯病(山扁豆生棒孢 *Corynespora cassicola*)和茄子褐色圆星病(茄生假尾孢 *Pseudocercospora solani-melongenicola*)。

1979 年记录辣椒土传病害 2 种:辣椒疫病(辣椒疫霉 *Phytophthora capsici*)和辣椒枯萎病(*Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*)。2015 年新增 3 种:辣椒根腐病(腐皮镰孢 *F. solani*)、辣椒湿腐病(瓜笄霉 *Choanephora cucurbitarum*)和辣椒褐斑病(辣椒尾孢 *Cercospora capsici*)。

1979 年记录的黄瓜土传病害有:黄瓜霜霉病(古巴假霜霉 *Pseudoperonospora cubensis*)、黄瓜枯萎病(尖镰孢黄瓜专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*)、黄瓜蔓枯病(瓜类黑腐小球壳菌 *Mycosphaerella melonis*)、黄瓜炭疽病(葫芦科刺盘孢 *Colletotrichum lagenarium*)、黄瓜疫病(*Phytophthora melonis*)、黄瓜黑星病(瓜疮痂枝孢霉 *Cladosporium cucumerinum*)、黄瓜细菌性角斑病(丁香假单胞杆菌黄瓜角斑病致病型 *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans*)、黄瓜菌核病(核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum*)。2015 年新增 1 种:黄瓜褐斑病(山扁豆生棒孢 *Corynespora cassicola*)。

2 个版本记录的棉花土传病害有:棉苗炭疽病(棉炭疽菌 *Colletotrichum gossypii*)、棉苗红腐病(镰刀菌属病原菌,以串珠镰刀菌 *Fusarium moniliforme* 为主)、棉苗疫病(苎麻疫霉 *Phytophthora boehmeriae*)、棉苗立枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)、棉苗猝倒病(主要致病种是瓜果腐霉 *Pythium aphanidermatum*)、棉轮纹叶斑病(常见种:大孢链格孢菌 *Alternaria macrospora*)、棉褐斑病(马尔科夫叶点霉 *Phyllosticta malkoffii*)、小棉叶点霉 *P. gossypina*)、棉枯萎病(尖孢镰刀菌萎蔫专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*)、棉黄萎病(大丽轮枝孢 *Verticillium dahliae*)、棉茎枯病(棉壳二孢菌 *Ascochyta gossypii*)、棉角斑病(黄极毛杆菌 *Xanthomonas malvacearum*)、棉黑根腐病(根串珠霉 *Thielaviopsis basicola*)、棉根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、高粱根结线虫 *M. acronea*)、棉肾形线虫病(普通肾形线虫 *Roty-*

lenchulus reniformis、微小肾形线虫 *R. parvus*)、棉纽带线虫病(塞氏纽带线虫 *Hoplolaimus seinhorsti*、哥伦比亚纽带线虫 *H. columbus*)、棉铃疫病(苎麻疫霉 *Phytophthora boehmeriae*)、棉铃红腐病(常见为串珠镰孢菌 *Fusarium moniliforme*)、棉铃曲霉病(曲霉属真菌 *Aspergillus* spp.)。

1979 年记录的烟草土传病害有:烟草炭疽病(烟草炭疽刺盘孢 *Colletotrichum nicotianae*)、烟草猝倒病(瓜果腐霉 *Pythium aphanidermatum*、德巴利腐霉 *P. debaryanum*、终极腐霉 *P. ultimum*)、烟草黑胫病(烟草疫霉 *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae*)、烟草蛙眼病(烟草尾孢菌 *Cercospora nicotianae*)、烟草根黑腐病(基生根串珠霉 *Thielaviopsis basicola*)、烟草低头黑病(辣椒炭疽菌烟草专化型 *Colletotrichum capsici* f. sp. *nicotianae*)、烟草青枯病(青枯假单胞菌 *Pseudomonas solanacearum*)、烟草空茎病(胡萝卜欧文氏菌胡萝卜亚种 *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*)、烟草普通花叶病毒病(*Tobacco mosaic virus*)、烟草根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*)。2015 年新增 3 种:烟草角斑病(丁香假单胞菌烟草致病变种 *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci*)、烟草野火病(丁香假单胞菌烟草致病变种 *P. syringae* pv. *tabaci*)、烟草靶斑病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)。

1979 版《中国农作物病虫害》中未记录梨的土传病害,2015 年记录了 4 种:梨疫腐病(恶疫霉 *Phytophthora cactorum*)、梨白纹羽病(白纹羽束丝菌 *Dematophora necatrix*)、梨根朽病(阻碍蜜环菌 *Armillaria tabescens*)、梨根癌病(根癌土壤杆菌 *Agrobacterium tumefaciens*)。

1979 年记录的葡萄土传病害只有葡萄霜霉病 *Plasmopara viticola* 一种。2015 年增加了 2 种:葡萄蔓割病(葡萄拟茎点霉 *Phomopsis viticola*)、葡萄根癌病(土壤杆菌属细菌 *Agrobacterium* spp.)。

2015 年还新增加了西甜瓜土传病害:西瓜、甜瓜细菌性角斑病(丁香假单胞菌流泪致病变种 *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans*)、西瓜、甜瓜猝倒病(瓜果腐霉 *Pythium aphanidermatum*)、西瓜、甜瓜立枯病(立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*)、甜瓜霜霉病(古巴假霜霉 *Pseudoperonospora cubensis*)、西瓜、甜瓜叶枯病(瓜链格孢菌 *A. cucumerina*)、西瓜、甜瓜炭疽病(圆孢炭疽菌 *Colletotrichum*

orbiculare)、西瓜、甜瓜红粉病(粉红单端孢 *Trichothecium roseum*)、西瓜、甜瓜蔓枯病(蔓枯亚隔孢壳 *Didymella bryoniae*)、西瓜、甜瓜菌核病(核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum*)、西瓜、甜瓜疫病(甜瓜疫霉 *Phytophthora melonis*)、西瓜、甜瓜枯萎病(尖镰孢西瓜专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *nivenum*、尖镰孢甜瓜专化型 *F. oxysporum* f. sp. *melonis*)、西瓜、甜瓜根腐病(腐皮镰孢瓜类变种 *F. solani* var. *cucubita*)。

1979 年记录的香蕉土传病害只有香蕉镰刀菌枯萎病(尖镰孢古巴专化型 *F. oxysporum* f. sp. *cubense*)1 种。2015 年增加了 1 种:香蕉根结线虫病(南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、爪哇根结线虫 *M. javanica* 和花生根结线虫 *M. arenaria*)。

以上结果可见,土传病害在我国多种作物上均有危害,而且呈现增长趋势。但以上记录还不是完整的土传病害统计。随着高附加值作物的连年栽培,土传病害急剧上升。

2 土传病害发生的特点

土传病原真菌通常以分生孢子、菌丝体随病残体在土壤中越冬,或分生孢子附着在种子表面或以菌丝潜伏于种皮内越冬、成为翌年的初侵染源;温度、湿度条件适宜时,病菌在田间引起初侵染;越冬以及新产生的分生孢子通过气流、水流、雨水、农事操作传播,从气孔、伤口或从表皮直接侵入寄主。

土传病害具有隐蔽性。土传病害危害早期和较轻时,只是局部作物的产量降低,生长受到影响。通过增施有机肥有一定的缓解作用。

土传病害具有很强的传染性。农事操作、浇水、都易造成土传病害的传播,远距离传播主要通过种苗传播。这一特点决定了土传病害防治的艰巨性。如果一个地块绝大部分无土传病害的危害,但局部有土传病害的发生,随着水流和农事操作,也会引起土传病害的流行。

土传病害具有暴发性和毁灭性。如青枯菌引起的姜瘟病,一旦温湿度适宜病菌的发生,短期内能快速流行,大量病菌随水传播和扩散,造成多次再侵染,很难控制。

土传病害治理困难。土传病害一旦发生,治疗效果有限。而治疗的主要措施是药剂灌根或基部喷药。土传病原菌在土壤病残体或粪肥中存活时间长,通常能存活 3~6 年。短期轮作效果有限,3 年

以上的水旱轮作效果较好。

土传病害的发生与根结线虫和地下害虫的发生有一定的关系,当根结线虫危害后,土传病害也发生严重。

3 土传病害防治技术

由于土传病害具有很强的传染性,很难根治,因此,事先预防极为重要。首先应避免土传病害随种子、种苗的远距离传入,再者要注意农事操作,避免农机具、浇水和农事操作将土传病害传入。

3.1 农业防治技术

3.1.1 抗病品种

抗病品种是治理土传病害的首选措施^[6-9]。抗病品种的产品涉及公司特定的抗性 or 耐性基因以及园艺上可接受的植物种类的选择性基因。利用植物育种来开发作物的抗病性是农业中传统的方法。如果作物受到一种或少数几种土传病原菌的危害,可采取栽培抗病品种的方法进行防治。番茄 *Mi* 基因品种对根结线虫有优异的抗性,只需栽种或作为砧木即可有效控制根结线虫的危害。

尽管植物育种工作通过分子技术在最近几年得到极大的发展,但很难培育出抗多种土传病害的作物品种,而大多数连茬种植的作物,经常被重要和次要的病原菌复合侵染。一个有效和可行的选育抗性品种的方法是,在土传病害发生严重的地块,对少数存活的植株进行繁殖或组织培养,在不断的筛选中,获得高抗当地土传病害的品种。

由于抗性品种具有环境友好的特点,将抗性品种用于土传病害的防治是有害生物综合防治体系中的理想方法之一。大多数作物都存在抗性品种,包括对根结线虫、病原菌如疫霉、镰刀菌、轮枝菌和常见细菌的抗性品种。

3.1.2 嫁接

使用抗性砧木嫁接来保护易感病的一年生和多年生植物,以抵抗土传病害,对于防治根结线虫和真菌性病害如镰刀菌、轮枝菌(蔬菜和水果作物)和疫霉(辣椒、果树、柑橘)的效果非常好。目前,西瓜、黄瓜、番茄、茄子、辣椒均有抗土传病害的砧木^[10-11]。嫁接的植株在太阳能消毒、生物消毒以及化学处理的土壤比非嫁接植物生长得更健壮^[10]。

3.1.3 轮作

轮作,特别是水旱轮作,可有效防治土传病害。在掌握多种高附加值作物栽培技术并且有良好市场

销路时,采用 3 年以上的轮作,可有效地控制土传病害。由于集约化种植,土地和水源有限,以及经济可行性低,因此轮作较难实施。

3.1.4 有机质补充

利用当地的废弃物如动物粪便、植物残体、草炭、污泥、工业废物等堆肥后,加入土壤中,可促进作物生长,达到增加产量,增加土壤有机碳,提高微生物活力,减轻盐渍化和控制土传病害的目的^[12-14]。该技术通常与太阳能消毒、生物熏蒸、嫁接等技术配合使用^[15-16]。

在土壤中添加生物炭或沸石,可显著减轻土传病害^[17]。

3.1.5 深翻

深翻即将表土层土壤翻入土壤深层,而将深土层翻于表土层。相比客土法,此法更为经济、简便。将土层开挖后,每 667 m² 埋入玉米秸秆 2 500~3 000 kg、菌种 7~8 kg、麦麸 140~160 kg、饼肥 70~80 kg。秸秆厚度 20~30 cm,覆土厚度 25~30 cm 可获得更良好的效果。由于深翻将底层生土翻到土表面,因此表土需要加入一些有机肥。有机肥可用腐熟的堆肥、绿肥、动物的粪便、农业或林业副产品。加入有机肥还能降低土壤病原菌如腐霉 *Pythium ultimum* 的种群。

3.1.6 无土栽培

无土栽培是一种不使用土壤栽培作物的措施,这样可以避免很多土传病害的发生。无土栽培基质有椰糠、草炭、珍珠岩、蛭石、树皮、海产品废弃物等,也有高科技的岩棉栽培模式。

水培、半水培、雾培技术近年来也取得非常大的进展,应用范围也越来越广泛。水培和雾培的方法除有效防治土传病害外,还可避免地下害虫的危害。

3.2 物理防治技术

3.2.1 蒸汽消毒技术

蒸汽消毒技术是通过高压密集的蒸汽,杀死土壤中的病原生物。此外,蒸汽消毒还可使病土变为团粒,提高土壤的排水性和通透性。蒸汽消毒具有:①消毒速度快,均匀有效,只需用高压蒸汽持续处理土壤,使土壤保持 70℃ 30 min 即可达到杀灭土壤中病原菌、线虫、地下害虫、病毒和杂草的目的,冷却后即可栽种;②无残留药害;③对人畜安全;④无有害生物的抗药性问题。因此,蒸汽消毒法是一种良好的甲基溴替代技术^[18-20],在欧洲广泛使用。根据蒸汽管道输送方式,蒸汽消毒可分为:(1)地表覆膜蒸

汽消毒法,即在地表覆盖帆布或抗热塑料布,在开口处放入蒸汽管,但该法效率较低,通常低于 30%;(2)管道法,即在地下埋一个直径 40 mm 的网状管道,通常埋于地下 40 cm 处,在管道上,每 10 cm 有一个 3 mm 的孔,该法效率较高,通常为 25%~80%;(3)负压蒸汽消毒法:即在地下埋设多孔的聚丙烯管道,用抽风机产生负压将空气抽出,将地表的蒸汽吸入地下。该方法在深土层中的温度比地表覆膜高,热效率通常为 50%;(4)冷蒸汽消毒法:一些研究人员认为:85~100℃ 的蒸汽通常杀死有益生物如菌根,并产生对作物有害的物质,因此,提出将蒸汽与空气混合,使之冷却到需要温度,较为理想的温度是 70℃,30 min。

意大利开发出一种新的蒸汽消毒机械并商业化应用。该机械具有一系列蒸汽注射管,用一块 3 m×4 m 的不锈钢包裹,能保证让蒸汽均匀注射到土壤中。该蒸汽机采用激光制导行进,以保证机械消毒覆盖所有地点。

温度与杀死病原菌的关系见图 1^[21]:

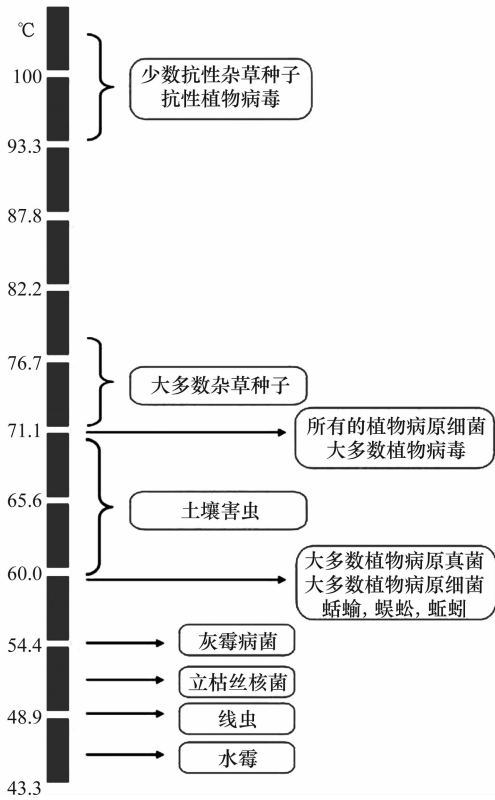


图 1 杀死有害生物所需温度

Fig. 1 Desired temperature for killing harmful organisms

3.2.2 热水消毒技术

热水消毒是将过滤的 70~95℃ 热水,以 200 L/m² 的速度通过热水管或喷孔施于土壤表面^[22]。研究表

明,该技术可有效控制多种土传病害。热水消毒由于改变了土壤的理化性质,如脱盐和氮的矿化作用,可使作物产量增加 30%,该技术在韩国和日本广泛使用^[23]。

3.2.3 火焰消毒技术

火焰消毒是将天然气、丁烷或煤油喷射在一个特定的面罩下,土壤以匀速流过面罩,在火焰的高温下杀死地下害虫、线虫、杂草和病原菌。该技术由中国开发并逐渐商业化应用。该技术的优点是:(1)成本低;(2)不用塑料布;(3)无水污染问题;(4)无地域限制;(5)消毒后即可种植下茬作物。

3.2.4 太阳能消毒技术

太阳能土壤消毒是指在高温季节通过较长时间覆盖塑料薄膜来提高土壤温度,借以杀死土壤中包括病原菌在内的许多有害生物。由于它具有操作简单、

经济适用、对生态友好等诸多优点,其研究和应用日益受到人们的重视^[24]。技术要点是:(1)在气温较高的夏季进行;(2)旋耕土壤,安装耐热的滴灌带;(3)覆盖较薄的透明塑料薄膜,建议厚度为 25~30 μm ;(4)滴水 30~40 L/m^2 ,保持土壤湿润以增加病原休眠体的热敏性和热传导性能;(5)如果可能,在夏季将温室或大棚整个棚用塑膜覆盖,以增加效果;(6)结合耐热生防菌可取得更好的效果。如果无耐热滴灌设施,可以先将土壤浇透,当土壤相对湿度为 65%~70%时,进行旋耕,然后覆盖透明塑料薄膜。在夏季保持太阳能消毒 4~6 周,对土传病害有较好的防治效果^[25]。

实际生产中,受气候的影响,太阳能消毒的效果经常不稳定,特别是 10 cm 以下的土壤温度很难达到 50℃(见图 2),因而效果有限。

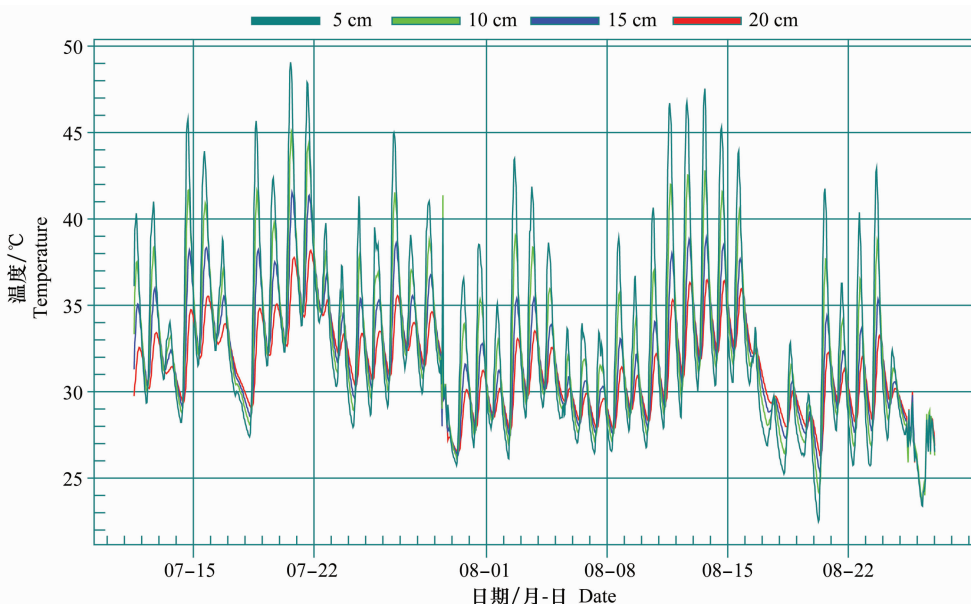


图 2 2009 年北京通州太阳能消毒不同深度土壤实测温度

Fig. 2 Soil temperature in different soil depths treated with solarization, Beijing in Tongzhou in 2009

3.2.5 土壤循环消毒技术

该方法是荷兰开发的一种新型热力消毒技术。通过对土壤旋转翻耕,将土壤与高温洁净干燥的空气混合进行消毒。与传统的物理和化学消毒技术比较其优点在于:(1)没有任何化学药剂的使用,不受化学药剂使用的限制;(2)不会造成土壤养分和水分的流失;(3)使用过程中不受外在天气因素的影响,节能,高效;(4)不易造成病虫害抗性的产生。

3.3 生物防治技术

3.3.1 生物熏蒸技术

生物熏蒸是利用来自十字花科或菊科的有机物释放的有毒气体杀死土壤害虫、病菌^[26-27]。葡糖异

硫氰酸酯是十字花科或菊科植物中的一大类含硫化合物,经分解后产生异硫氰酸甲酯、二甲基二硫等物质,对有害生物有非常高的生物活性^[28-29]。含氮量高的有机物和畜禽粪便能产生氨杀死根结线虫和病原菌。几丁质含量高的海洋物品也能产生氨,并能刺激微生物区系活动,这些微生物能促进根结线虫体表几丁质的溶解,导致线虫死亡。另外,一些绿色植物覆盖土壤,能分泌异株克生物质,抑制杂草生长^[30]。因此,生物熏蒸的科学利用,可以杀死土壤中的有害病原菌、害虫和杂草等,并且环境友好,可用于有机农业、绿色食品的生产。

生物熏蒸的应用方法比较简单,一般有两种方

法。一是在农田空闲期,栽种十字花科植物,芸薹属芥菜是优良的生物熏蒸植物,当芥菜长到离下茬作物栽种还有 1.5~2 个月时,提前 3~5 d 浇水,然后将土地连同栽种的植物一同旋耕,盖上塑料薄膜 4~6 周,揭膜后栽种下茬作物。二是在下茬作物栽种前至少 2 个月,将家畜粪便、海产品、作物秸秆按一定比例混合均匀撒在土壤表面,旋耕,然后浇足量的水,覆盖透明塑料薄膜 6 周以上。为了取得对病害较好的控制效果,要考虑以下因素,最好在夏天环境温度高时操作,这样利于反应。要有一定湿度,以利于植物残渣等的水解。粪肥要适量,根据土壤肥沃程度,选择好粪肥量,以防出现烧苗等情况,生物熏蒸结合太阳能消毒,可取得更好的效果。

太阳能生物熏蒸在西班牙得到广泛的应用。其经验是:在草莓种植农场,采用了鲜鸡粪 $1.25 \text{ kg/m}^2 + 2.5 \text{ kg/m}^2$ 牛粪+甜菜酿酒之后的残渣 1.5 kg/m^2 ; Mercaos Rivera S. L. 公司的商业小雏菊、康乃馨种植园采用沤制过的橄榄渣、康乃馨残体与鸡粪配合进行土壤消毒; Torres 农场的番茄温室采用甜菜残汁 2 L/m^2 消毒和 50% 发酵枝叶+50% 新鲜粪熏蒸; 西班牙农村发展研究中心的青椒研究基地用 1.5 L/m^2 甜菜渣和鲜牛粪消毒。以上技术均利用当地现有的残体为原料,消毒成本低廉,试验结果表明,生物消毒的效果与传统溴甲烷消毒效果相当,甚至优于溴甲烷,而且可以沃土、节肥、节水、减少 50% 的农用化学品。

可见,采用生物熏蒸技术,不仅可以有效防治土壤病虫害,而且可以合理利用农业废弃物,节约成本,保护环境,是未来土壤病虫害防治发展的重要方向。

3.3.2 厌氧消毒技术(ASD)

厌氧消毒技术包含了碳源的添加,然后安装滴灌和覆盖不渗透膜,通过滴灌施入 1%~2% 乙醇,使之处于一个厌氧的环境,促进了土壤微生物的生长和繁殖^[31-33]。3 周后在膜上戳洞使土壤恢复有氧环境。该技术对于土传病害、线虫和杂草的防治非常有效,近年来受到广泛的关注,并得到商业化应用^[34]。

3.3.3 土传病害的生物防治

生物防治因其环境友好的特点,近年来研究较多。主要是利用一些拮抗菌如木霉 *Trichoderma* spp.、枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis*、荧光假单胞菌

Pseudomonas fluorescence 等来控制病原菌的危害,或将这些生防菌与太阳能结合使用,能获得比单独使用生防菌更显著的效果和增加作物产量^[35-36]。

木霉是防治土传病害使用最广泛的生防菌之一,在木霉与病原菌的互作过程中,寄主菌丝分泌的一些物质诱导木霉平行或缠绕在寄主菌丝上生长,在该过程中木霉分泌胞外酶溶解寄主细胞壁,穿透寄主菌丝,吸取病原菌细胞内的营养物质,使病原菌菌丝溶解或菌丝断裂。

生防菌使用的方法有:浸种、蘸根、灌根、滴灌施用、混土等^[37]。

3.4 化学土壤熏蒸消毒技术

3.4.1 氯化苦

氯化苦对多种土传病原真菌、细菌、地下害虫均有优异的防治效果。氯化苦在常温下为液体,具有极强的刺激性气味,因此需要专用的机械将其注射到土壤中,通常使用量为 $15 \sim 50 \text{ g/m}^2$ 。由于毒性高,需要由受过专门培训的专业人员操作。氯化苦对难以防治的土传病害具有独到的防治效果,并且效果稳定。氯化苦还具有一定的除草效果,但对线虫的效果较差,因此,在土传病害和根结线虫同时发生时,需要配合杀线虫剂使用。

3.4.2 棉隆

棉隆在常温下为固体,毒性较低,可自己按照说明书使用。98% 棉隆微粒剂通常用量为 $15 \sim 50 \text{ g/m}^2$ 。使用棉隆,需要浇足水分,并且温度较高,效果较好。棉隆对土传真菌、细菌、根结线虫、杂草、地下害虫均有良好的防治效果。

3.4.3 威百亩

威百亩在常温时为液体,毒性较低,可自己按说明书使用。35%~42% 威百亩水剂通常用量为 $25 \sim 100 \text{ g/m}^2$ 。建议通过滴灌使用,也可沟施。与太阳能消毒配合使用效果更好。

3.4.4 氰铵化钙

氰铵化钙对土传病害、根结线虫以及杂草均具有一定效果,特别是联合肥料和太阳能消毒时,效果显著提高。

3.4.5 异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate, AITC)

异硫氰酸烯丙酯是一种从芥菜、山葵、辣根等十字花科蔬菜中提取的物质,用异硫氰酸烯丙酯 $20 \sim 30 \text{ g/m}^2$,可防治十字花科蔬菜、芦笋、菜花、生菜、茄子、番茄、辣椒、草莓等多种作物的土传病害及

线虫^[38-40]。

3.4.6 二甲基二硫

目前已有研究发现,二甲基二硫是一种广谱性的土壤熏蒸剂,可以有效防治根结线虫和土传病原菌,用量 40~80 g/m²,采用注射或滴灌的方法,防治根结线虫的效果与甲基溴相当^[41-43]。

3.4.7 硫酰氟

硫酰氟在常温下为气体,毒性中等。99%硫酰氟通常用量为 25~75 g/m²,对根结线虫和地下害虫有优异的防治效果^[44]。使用硫酰氟前 3~7 d,应先将土壤浇透,待土壤湿度为 60%左右时,旋耕土壤,覆膜熏蒸。施用硫酰氟需要专门的分布带,并在专业人员的指导下施用。

采用化学熏蒸消毒技术,首先要确保施药均匀,不能有漏施药的地方,以免未施药地区发病,并成为传染源。为了保证施药均匀,最好采用专用施药机械,由经过培训的人员按照操作规程施药。

采用土壤熏蒸消毒需要覆盖质量好的塑料薄膜,普通 PE 膜推荐厚度为 0.04 mm 以上,如果能使用高阻隔膜效果更好,以减少熏蒸剂渗漏降低熏蒸效果,不推荐使用旧膜或再生膜。塑料薄膜连接处应采用反埋法,上面不能覆盖未消毒的土壤。如果需要土壤压实,应将消毒过的土壤装入塑料袋中,扎实袋口,压于膜的连接处。

3.5 综合防治技术

综合防治技术包括农业、物理、生物、化学等技术的综合利用。将熏蒸剂与太阳能消毒结合,可减少熏蒸剂的用量。在生物熏蒸中加入少量的棉隆或威百亩,可提高生物熏蒸的效果。将嫁接与杀线虫剂或杀菌剂联合使用,能获得更好的效果和更高产量。

通常土壤消毒后,所有生物被杀死,形成“生物真空”,如果添加有益微生物,如木霉、枯草芽孢杆菌,可预防土传病害的扩散和蔓延,延长熏蒸剂防治土传病害的效果。同时,采用洁净水浇灌,并保持田园卫生,可达到土壤消毒一次,保持 3 年或更长的效果。

土传病害的防治应实行预防为主、综合防治的植保方针。但一旦发病,防治药剂只是补救措施,并且效果有限,长期使用,土壤微生物会将其降解或有害生物产生抗药性。常用防治土传真菌病害的药剂有:恶霉灵、甲霜灵、异菌脲、敌磺钠、多菌灵、甲基硫菌灵、嘧菌酯、代森锰锌等。五氯硝基苯是使用较多的一种保护性杀菌剂,但五氯硝基苯有环境和健康

问题,并且在土壤中残留期长^[45-46],在很多国家已禁用,我国应高度注意。防治细菌土传病害的药剂有:铜制剂、硫酸链霉素、春雷霉素、中生菌素、氨基寡糖素、叶枯唑等。防治根结线虫的药剂有:阿维菌素、噻唑膦、氟吡菌酰胺等。

4 土传病害防治注意事项

4.1 种子、种苗消毒及无病种苗的培育

种子、种苗是传播土传病害的重要途径。带病的种子和种苗将导致作物生长不良,并将随农事操作和水流传播土传病害。为了避免土传病害传入已处理过的土壤中,应确保种子和种苗清洁生产,无病。

种子消毒:播种前进行种子消毒,如温汤浸种、高温干热消毒、药剂拌种、药液浸种等方法,能够减轻或抑制病害发生。温汤浸种是广泛使用的一种种子消毒方法,即用 55℃温水浸泡种子并不断搅拌,随着温度降低加入热水使水温稳定在 53~56℃之间,维持 15~30 min,防治种子传带的真菌性病害。酸处理是一种可防治种传带细菌性病害的方法,即用 1%盐酸溶液或 1%柠檬酸溶液浸泡种子 40~60 min 后用清水洗净。碱处理可防治种传病毒病,方法是用 10%磷酸三钠溶液或 2%氢氧化钠溶液浸泡种子 30 min 后用清水洗净。

种子干热消毒是国外广泛使用的一种种子消毒技术。据日本经验,黄瓜绿斑驳病毒(CGMMV)种子处理,首先预烘干处理 1 h,将温度设定为 40℃,在湿度为 55%时吸气排气口均关闭,处理 12~24 h;再预烘干处理 2 h,将温度设定为 40℃,在湿度为 5%时吸气排气口均打开,处理 12~24 h;当确认种子含水量为 5%以下时,开始预烘干处理 3 h,即将温度设定为 65℃,在湿度为 55%时吸气排气口均关闭,处理 3~5 h;然后排除水蒸气,当湿度为 5%时,吸气排气口均打开约 1 h;最后开始正式烘干处理,即在 72℃时,湿度为 55%时,吸气排气口均关闭,处理 72 h。按此程序,可有效杀灭葫芦科和茄科种子内的 CGMMV。

苗床消毒,种子消毒无菌后,还需要确保苗床种植的土壤无菌。土壤可用蒸汽消毒、化学熏蒸剂消毒,也可采用基质栽培,市场上有商品化的基质出售。在种苗种植区,应有严格的操作规范,确保无病虫害传入。

种子、种苗生产应有检测措施,并颁发无病种苗证书。

4.2 土壤熏蒸后的管理

施药后,不同药剂在不同土壤和不同温度、湿度下的降解速率不一致。为防止种植后出现药害,种植前应作发芽试验。方法为:取表土下 10 cm 处消毒过和未消毒过的土壤,分别装入两个罐头瓶或透明的玻璃容器至一半的位置。用镊子将一块湿的棉花平铺在瓶中的土壤上部,在其上放置 20 粒莴苣等易萌发的种子,然后盖上罐头瓶盖,置于无直接光照、25℃下培养 2 ~ 3 d,记录种子发芽数,并观察发芽状态。当未消毒的土壤种子萌发正常时,如消毒土壤种子发芽率在 75%以上,且种苗根尖无烧根现象,即可以安全种植作物。

土壤熏蒸后,避免病虫害的再引入是至关重要的,因为熏蒸后,土壤处于“生物真空”状态。病菌很易在熏蒸过的土壤中发生,特别是腐霉造成的土传病害的再次流行。因此,首先要确保使用无病种苗,在种苗上浸蘸木霉和枯草芽胞杆菌有利于防止病菌感染。将木霉+枯草芽胞杆菌+阿维菌素浸种浸根,有利于预防和减轻真菌、细菌和线虫病害。在农事操作和浇水过程中,很可能会无意地将病原菌带入处理过的土壤。因此,建议使用清洁的农机具,避免鞋子或衣服将未处理的土壤带入已处理的田地中。建议浇灌井水或经处理过的灌溉水。避免水流通过可能污染过的水渠,建议采用管道将灌溉水直接接入田间。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 213-232.
- [2] 徐坤, 尚庆文, 孔祥波, 等. 生姜生产关键技术问答[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 101-109.
- [3] 中国农业科学院植物保护研究所, 中国植物保护学会主编. 中国农作物病虫害(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [4] 许华, 蒋梦娇, 魏宇昆, 等. 连作对植物的危害及形成原因[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(5): 870-872.
- [5] 中国农业科学院植物保护研究所主编. 中国农作物病虫害(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [6] Christos I R, Ebrahim M K, Naved S. Response of local and commercial tomato cultivars and rootstocks to *Meloidogyne javanica* infestation[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(11): 1388-1395.
- [7] Fang X, Phillips D, Verheyen G, et al. Yields and resistance of strawberry cultivars to crown and root diseases in the field, and cultivar responses to pathogens under controlled environment conditions [J]. Phytopathologia Mediterranea, 2012, 51(1): 69-84.
- [8] Ogai R, Kanda-Hojo A, Tsuda S. An attenuated isolate of *Pepper mild mottle virus* for cross protection of cultivated green pepper (*Capsicum annuum* L.) carrying the L3 resistance gene [J]. Crop Protection, 2013, 54: 29-34.
- [9] Pérez-Jiménez R M, De Cal A, Melgarejo P, et al. Resistance of several strawberry cultivars against three different pathogens [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(2): 502-512.
- [10] Keinath A P, Hassell R L. Control of *Fusarium* wilt of watermelon by grafting onto bottle gourd or interspecific hybrid squash despite colonization of rootstocks by *Fusarium* [J]. Plant Diseases, 2014, 98: 255-266.
- [11] King S R, Davis A R, Liu W, et al. Grafting for disease resistance [J]. Hortscience, 2008, 43: 1673-1676.
- [12] Nuñez-Zofio M, Larregla S, Garbisu C. Application of organic amendments followed by soil plastic mulching reduces the incidence of *Phytophthora capsici* in pepper crops under temperate climate [J]. Crop Protection, 2011, 30: 1563-1572.
- [13] Nuñez-Zofio M, Larregla S, Garbisu C, et al. Application of sugar beet vinasse followed by solarisation reduces the incidence of *Meloidogyne incognita* in pepper crops while improving soil quality [J]. Phytoparasitica, 2013, 41(2): 181-191.
- [14] 李洪连, 黄俊丽, 袁红霞. 有机改良剂在防治植物土传病害中的应用[J]. 植物病理学报, 2002, 32(4): 289-295.
- [15] Klein E, Katan J, Gamliel A. Soil suppressiveness to *Fusarium* disease following organic amendments and solarisation[J]. Plant Disease, 2011, 95: 1116-1123.
- [16] Klein E, Katan J, Gamliel A. Soil suppressiveness to *Meloidogyne javanica* as induced by organic amendments and solarisation in greenhouse crops [J]. Crop Protection, 2012, 39: 26-32.
- [17] 马艳, 王光飞. 生物炭防控植物土传病害研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 14-20.
- [18] Fennimore S, Miller T, Goodhue R, et al. Evaluation of an automatic steam applicator in strawberry: 2012-13 results[C]// Annual International Research Conference on Methyl Bromide alternatives and Emissions Reductions, San Diego, California 11, 2013.
- [19] Gelsomino A, Petrovicová B, Zaffina F, et al. Chemical and microbial properties in a greenhouse loamy soil after steam disinfection alone or combined with CaO addition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42: 1091-1100.
- [20] Samtani J B, Gilbert C, Ben Weber J, et al. Effect of steam and solarisation treatments on pest control, strawberry yield, and economic returns relative to methyl bromide fumigation [J]. Hortscience, 2012, 47: 64-70.
- [21] 曹勘程, Jose A G. 中国甲基溴土壤消毒替代技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 172-176.
- [22] Gyoutoku Y, Eguchi T, Moriyama M, et al. Integrated pest management on autumn-winter muskmelon by using physical

- and biological control agents [J]. Research Bulletin of the Kumamoto Prefectural Agricultural Research Center, 2007, 14: 111 - 127.
- [23] Fujinaga M, Kobayashi H, Komatsu K, et al. Control of *Fusarium* yellows on celery by soil sterilization with hot water injection using a portable boiler [R]. Annual Report of the Kanto Tosan Plant Protection Society, 2005, 52: 25 - 29.
- [24] Katan J. Integrated pest management in connection with soil disinfestation [J]. Acta Horticulturae, 2014, 1044: 19 - 28.
- [25] Katan J, Gamliel A. Soil solarisation: theory and practice [M]. St. Paul, MN, USA: APS Press, 2012: 1 - 266.
- [26] Oka Y. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments-A review [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 44: 101 - 115.
- [27] Oka Y, Shuker S, Tkachi N, et al. Nematicidal activity of *Ochradenus baccatus* against the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* [J]. Plant Pathology, 2014, 63: 221 - 231.
- [28] Argento S, Raccuia S A, Melilli M G, et al. Brassicas and their glucosinolate content for the biological control of root-knot nematodes in protected cultivation [J]. Acta Horticulturae, 2013, 1005: 539 - 544.
- [29] Hansen Z R, Keinath A P. Increased pepper yields following incorporation of biofumigation cover crops and the effects on soilborne pathogen populations and pepper diseases [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 63: 67 - 77.
- [30] Morales-Rodriguez C, Picon-Toro J, Palo C, et al. *In vitro* inhibition of mycelial growth of *Phytophthora nicotianae* Breda de Haan from different hosts by Brassicaceae species. Effect of the developmental stage of the biofumigant plants [J]. Pest Management Science, 2012, 68: 1317 - 1322.
- [31] Momma N, Momma M, Kobara Y. Biological soil disinfestation using ethanol: effect on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and soil microorganisms [J]. Journal of General Plant Pathology, 2010, 76(5): 336 - 344.
- [32] Hong J, Rosskoph E, Martin K, et al. Insight onto anaerobic soil disinfestation through the lens of molecular biology [C]// Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emission Reductions, Maitland, Florida USA. 2012.
- [33] 刘亮亮, 黄新琦, 朱睿, 等. 强还原土壤对尖孢镰刀菌的抑制及微生物区系的影响 [J]. 土壤, 2016, 48(1): 88 - 94.
- [34] Momma N, Kobara Y, Uematsu S, et al. Development of biological soil disinfestations in Japan [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 3801 - 3809.
- [35] Babalola O O. Beneficial bacteria of agricultural importance [J]. Biotechnology Letters, 2010, 32(11): 1559 - 1570.
- [36] 刘波, 唐建阳, 朱育菁, 等. 重要土传病害(青枯病、枯萎病、线虫病)生防制剂的创制与应用 [J]. 中国科技成果, 2013, 19: 76 - 79.
- [37] Mancini V, Romanazzi G. Seed treatments to control seed-borne fungal pathogens of vegetable crops [J]. Pest Management Science, 2014, 70(6): 860 - 868.
- [38] Alpizar Y A, Boonen B, Gees M, et al. Allyl isothiocyanate sensitizes TRPV1 to heat stimulation [J]. Pflügers Archiv-Europan Journal of Physiology, 2014, 466: 507 - 515.
- [39] Avato P, D'Addabbo T, Leonetti P, et al. Nematicidal potential of Brassicaceae [J]. Phytochemistry Reviews, 2013, 12: 791 - 802.
- [40] Bangarwa S K, Norsworthy J K, Gbur E E. Allyl Isothiocyanate as a methyl bromide alternative for weed management in polyethylene-mulched tomato [J]. Weed Technology, 2012, 26: 449 - 454.
- [41] Belova A, Narayan T, Olkin I. Methyl bromide alternatives for strawberry and tomato pre-plant uses: A meta-analysis [J]. Crop Protection, 2013, 54: 1 - 14.
- [42] Zanon M J, Guitierrez L A, Myrta A. Spanish experiences with dimethyl disulfide (DMDs) on the control of root-knot nematodes, *Meloidogyne* spp., in fruiting vegetables in protected crops [J]. Acta Horticulturae, 2014, 1044: 421 - 425.
- [43] Curto G, Dongiovanni C, Sasanelli N, et al. Efficacy of dimethyl disulfide (DMDs) in the control of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* and the cyst nematode *Heterodera carotae* on carrot in field conditions in Italy [J]. Acta Horticulturae, 2014, 1044: 405 - 410.
- [44] Cao Aocheng, Guo Meixia, Yan Dongdong, et al. Evaluation of sulfuryl fluoride as a soil fumigant in China [J]. Pest Management Science, 2014, 70: 219 - 227.
- [45] 宋莉莉, 金明华, 刘晓梅, 等. 五氯硝基苯对小鼠脑 AChE 的影响及多器官氧化损伤研究 [J]. 环境化学, 2006, 25(4): 462 - 465.
- [46] 张雪辉, 陈建民, 张曙明, 等. 23 种中药材中农药残留量的研究 [J]. 药学报, 2002, 37(11): 904 - 907.

(责任编辑: 田 喆)