

我国设施园艺病虫害发生特点与绿色防控策略

吴圣勇¹, 张梦迪¹, 徐进¹, 王恩东¹, 崔丽¹, 雷仲仁¹, 史晓斌², 谢学文³, 王少丽³,
王甦⁴, 魏书军⁴, 马中正⁴, 何莉梅⁵, 高玉林^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所/植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 湖南省农业科学院植物保护研究所, 长沙 410125;
3. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; 4. 北京市农林科学院植物保护环境保护研究所, 北京 100097; 5. 中国农业科学院都市
农业研究所, 成都 610218)

摘要: 我国设施园艺发展迅速, 对促进农业现代化、乡村振兴和都市农业发展具有重要作用。本文结合我国设施园艺产业的发展现状, 总结设施环境下病虫害发生特点, 并从农业防治、物理防治、生物防治、生态调控、生物技术和科学用药等方面概述了病虫害防治技术, 最后对设施园艺病虫害防治提出建议, 以期为我国设施园艺的健康可持续发展提供参考。

关键词: 园艺产业; 保护地栽培; 病虫害; 绿色防控

中图分类号: S476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9261(2024)05-1169-12

The Characteristic of Plant Diseases and Insect Pests in Greenhouse Horticulture and Its Green Control Strategy of China

WU Shengyong¹, ZHANG Mengdi¹, XU Jin¹, WANG Endong¹, CUI Li¹, LEI Zhongren¹, SHI Xiaobin², XIE
Xuewen³, WANG Shaoli³, WANG Su⁴, WEI Shujun⁴, MA Zhongzheng⁴, HE Limei⁵, GAO Yulin^{1*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests/Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Institute of Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China;
3. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Institute of Plant and Environment Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 5. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610218, China)

Abstract: Greenhouse horticulture has been rapid development in China, playing an important role in promotion agricultural modernization and rural revitalization. Based on the current trajectory of the horticulture industry in China, we first summarized the characteristic of plant diseases and insect pests and its control strategies, including the agricultural control, physical control, biological control, ecological regulation, biotechnology and science-based application of chemical pesticides. Finally, we put provide suggestions on the control of horticultural diseases and insect pests under protected conditions, providing baseline references for the sustainable development of horticultural industry.

Key words: horticulture industry; cultivations under protected conditions; diseases and insect pests; green control

设施农业是农业现代化的重要标志, 发展设施农业是农业现代化的重要任务。“十四五”规划明确提出要积极发展设施农业。设施农业包括设施园艺、设施养殖、设施水产三个领域。设施园艺作为设施农业的重要组成部分, 对增强农业综合生产能力、提高农民收入、促进乡村振兴、助力美丽乡村建设发挥着越来越重要的作用。设施园艺, 就是利用特定的保护设施和工程装备, 人为地创造作物生长发育所要求的最

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目(Y2022XK18); 中央级科研院所基本科研业务费(S2022XM18)

作者简介: 吴圣勇, 副研究员, E-mail: sywu@ippcaas.cn; *通信作者, 研究员, E-mail: gaoyulin@caas.cn.

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2022.01.022

佳环境条件,有计划地生产安全、高效、优质、稳产的蔬菜、花卉、水果、食用菌等园艺产品的一种综合农业生产体系。设施环境在为园艺作物提供适宜的生长条件的同时,也为病虫害提供了良好场所。近年来,随着设施园艺产业的快速发展,病虫害现象也越来越严重,而且呈现出种类多、抗性水平强、发生频率高、为害面积大、扩散速度快的特点,成为制约设施园艺可持续发展的重要因素之一,严重威胁设施园艺作物的产量和品质^[1]。本文总结了设施园艺病虫害的发生特点及设施环境对病虫害的影响,并从绿色防控的角度,归纳了农业防治、物理防治、生物防治、生态调控、生物技术和科学用药等防治手段,为有效防控设施园艺病虫害,促进我国设施园艺产业的健康发展提供参考。

一、我国设施园艺产业发展现状

随着我国农业产业结构调整的不断深入,设施园艺产业得到迅猛发展,在农业中所占比重不断提高,全国大中拱棚的设施面积达 370 万 hm^2 ,占世界设施园艺面积的 80.43%,位居世界第一。连栋温室面积 99.9 万 hm^2 ,占全国设施面积的 27%。玻璃温室被称为装备水平最高的温室,我国有 9000 hm^2 ,仅次于荷兰(10800 hm^2),位居世界第二。从栽培作物上看,蔬菜播种面积占设施园艺总面积的 85%以上,以番茄、黄瓜、茄子、甜椒等为主;其次为鲜切花和盆栽花卉,栽培作物已从单一的蔬菜扩展到瓜果、食用菌、中草药、花卉等多种经济作物领域。其中,设施蔬菜播种面积 400 万 hm^2 ,占蔬菜播种面积的 17%,产量近 3 亿吨,占蔬菜总产量的 38%,产值 9800 亿元,占农业总产值的 17.9%,就业人员 7000 万人,人均增收 993 元。设施花卉面积 11.6 万 hm^2 ,占花卉种植面积的 8.7%。设施果树 6.7 万 hm^2 ^[2]。栽培地域也不断扩大,目前我国所有省(区、市)都有设施园艺生产,不同地区设施形态也各具特点。北方主要发展高效节能日光温室,南方则以塑料大棚及简易设施栽培为主。

二、设施园艺病虫害发生特点

(一) 主要病虫害种类

设施农业生产处于相对密闭的空间环境中,高温高湿、低温高湿和低温弱光等逆境条件使得设施栽培作物更易遭受有害生物的伤害。此外,设施栽培条件下的高复种指数、规模化生产和重茬连作,更加有利于土壤中病原微生物的累积,枯萎病、青枯病和根结线虫等根茎类土传病害的发生日趋严重,成为蔬菜产业发展制约瓶颈之一^[2]。蔬菜、花卉、食用菌等设施园艺上病虫害种类繁多,在设施条件下的发生为害程度重,导致重大损失。以设施蔬菜为例,根据郑建秋^[3]编著的《现代蔬菜病虫害鉴别与防治手册》,记载蔬菜病虫害 1323 种,病虫害对蔬菜造成的损失可达 20%~30%,严重的可达 50%以上。其中,被称为“超级害虫”的烟粉虱,能传播多种病毒,还很容易暴发成灾,并导致 50%~60%的作物产量损失,是设施园艺上的危险性害虫。此外,被称为番茄“埃博拉病毒”的番茄潜叶蛾,严重发生时可导致 80%~100%的番茄产量损失。该虫于 2017 年 8 月入侵我国,目前已在新疆、云南、贵州、四川、重庆、广西、湖南、江西等地发生为害,且具有继续扩散的趋势,严重威胁我国番茄及其他蔬菜产业的可持续健康发展^[4]。细菌病害在江苏等蔬菜产区发生日趋严重,其中瓜类以角斑病 *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans* 为主,还有斑点病 *Xanthomonas campestris* pv. *cicirbitae*、缘枯病 *P. marginalis* pv. *marginalis* 等。这几种叶部病害病株率为 20%~80%,重棚可达 100%,产量损失为 10%~20%。菜豆细菌性疫病 *X. campestris* pv. *phaseoli* 是秋延后棚室生产的重要病害。此外,多种蔬菜软腐病也会造成明显的经济损失^[5]。表 1 列举了设施园艺上常见且重要的病虫害。

(二) 设施栽培条件对病虫害发生的影响

设施园艺是一种通过人工手段创造出的一种小气候环境,因此它不仅是防寒保温的设施,同时亦可作为降温、防涝的设施。设施栽培,打破了环境原有的季节属性,因此有利于作物的季节性生产。同时设施园艺的小气候环境也为设施园艺植物病虫害的发生提供了有利的生态条件,虫卵、病菌积累较多,易于出现严重的病虫害,致使病虫周年活动、发生和流行频繁,为害方式和分布格局发生变化,老病害有加重的趋势,同时出现了一些新的病虫害,并成为露地作物的重要侵染源^[6]。病虫害已成为制约设施农业可持续发展的因素之一^[7]。

表1 设施园艺上主要病虫害

Table 1 The main plant diseases and insect pests on greenhouse horticultures

作物部位 Crop area	主要病害 The main plant diseases	主要虫害 The main insect pests
叶部 Leaf	霜霉病、灰霉病、白粉病、疫病、病毒病、炭疽病、煤污病、 菌核病、角斑病、叶斑病	斑潜蝇、粉虱、蚜虫、叶螨、蓟马、夜蛾、麦蛾、 叶甲、叶蝉
果实 Fruit	果腐病、白粉病、软腐病、日灼病、疮痂病、果实疫病	食心虫、螟蛾、烟青虫、棉铃虫、实蝇、豆象
茎根部 Stem and Root	根腐病、枯萎病、猝倒病、茎基腐病、根结线虫病、溃疡病、 立枯病、青枯病	小地老虎、金针虫、蝼蛄、蛴螬、线虫、韭蛆、 种蝇

1 相对稳定的温湿度环境导致病虫害持续发生

设施内环境相对稳定,温湿度较高,空气流动性差,为病虫害的繁殖和越冬提供了场所,棚室内土壤和空气的湿度较露地大,有时棚内还产生雾气和水滴,十分有利于病虫害的发生传播。尤其是霜霉病、灰霉病、白粉病、晚疫病等气流传播的病害都可随着棚室内温湿度的升高而发生为害,发病时间均比露地早。此外高温、高湿的设施生态条件造成有害昆虫繁殖速度加快,生活周期缩短,世代增多,蔓延速度加快,导致设施内的某些病虫害较露地发生严重,给设施农业病虫害的综合防治带来了困难。

2 单一连作周年种植导致病虫害累积和暴发

在设施栽培上,大棚、温室一旦建成,便难以移动,加之一个棚室内常种植单个或少数几个品种,尤其是果树,生产周期较长,使某些病害病原物和越冬虫源不断积累增多,病虫害基数逐年累积,造成更为严重的为害。另外,蔬菜上的灰霉病、霜霉病、白粉病、晚疫病、蚜虫、飞虱、蓟马、美洲斑潜蝇等,果树上的根癌病、细菌性穿孔病、桃小食心虫、粉蚧等,为害蔬菜和果树种类多,一旦发生,在设施的特定系统中,都会造成严重的经济损失。

随着设施园艺作物连作年限的增加,棚室内多茬次的栽培与利用,影响了地力恢复^[8]。尤其是茄果类、瓜类蔬菜的多年连作种植,以及大棚覆盖阻隔,土壤雨水淋溶少,导致盐分不能被雨水冲刷淋洗而残留在耕层内,使土壤盐碱化加重,连作障碍加剧,导致农产品质量低下。一些土传病害的发生一直高居不下,疫病、枯萎病、根腐病、蔓枯病等在设施蔬菜中常年发生。重茬连作,不注重中微量元素的补充,常造成大量元素过剩而中微量元素不足,导致黄瓜花打顶,番茄脐腐病、缺素症等生理性病害呈明显加重趋势,制约了设施蔬菜的效益和可持续发展。

随着设施农业的发展,设施栽培植物种类不断增加,害虫食性发生了变化,为一些偶发性(次要)害虫提供了丰富的食源,使害虫繁殖数量增多,导致短期内次要害虫暴发成灾,并演替为主要害虫。如蓟马、美洲斑潜蝇,不仅为害各种蔬菜的叶和花,造成落叶落花,也为害设施鲜切花,目前已成为影响玫瑰、康乃馨等切花品质的主要因素。

3 化学农药频繁使用导致病虫害抗性提高

设施内具有特殊的小气候环境,易造成病虫害的发生和流行。设施园艺病虫害问题日益严重,而菜农又缺乏科学的防治办法,只是盲目加大药量,频繁使用各种化学农药。不合理地使用化学农药,在削弱天敌种群的同时又诱导病虫产生抗药性,导致抗药群体数量增加,抗药性程度提高,防治效果下降。同时,由于设施园艺常年连作造成致病力强的生理小种大量繁殖,群体增加,病原菌致病性发生变异,导致栽培品种抗病性丧失。

4 生态系统脆弱导致天敌的自然控害作用下降

从生态的角度出发,设施园艺属于相对“封闭”的人工生态系统,单一的设施农业生态体系系统稳定性较差,组分单一,结构简单,生物种类少,自控能力差。设施环境在隔离一些大型害虫的同时,也隔离了一些天敌。再加上不合理使用化学农药,致使天敌种类缺失或数量下降,从而导致天敌的自然控害作用下降。

三、设施园艺病虫害绿色防治策略

(一) 农业防治

1 种子的选取、消毒及壮苗移栽

根据不同园艺作物特点和品种特性,选择抗病或耐病的主栽品种^[9]。

播种前可用 55 ℃温开水浸泡种子 0.25 h 左右,去除种子表面的病原菌和黏液,并用 10%的磷酸三钠溶液浸种 0.5 h 左右,进行种子消毒,捞出后用清水冲洗 3 次后播种。

定植前进行低温炼苗,炼苗温度控制在 2~8 ℃之间,持续 7 d。苗期全程用 60 目防虫网覆盖,以防治烟粉虱、蓟马、蚜虫等小型害虫。

选用健康壮苗移栽。

2 栽培管理

育苗及定植前彻底清除土壤中和温室周边的枯枝落叶、杂草和自生苗等,深耕土壤,并进行土壤消毒,以彻底清除病原菌和虫卵^[10]。将设施园艺的栽培温度控制在适宜范围内,可有效减少虫害发生^[11,12]。及时摘除病叶,拔除病株、病叶,将病株移至远离种植田的地方处理。保持田间清洁,在嫁接、移栽、绑蔓、整枝、打杈等农事操作过程中,对手和工具等进行消毒处理,尽量减少对作物的机械损伤,防止人为交叉感染和传播病害。

3 水肥管理

合理施肥和浇水,科学施用氮、磷、钾肥,避免大水漫灌和氮肥过量;氮肥施用量是氮肥生产力偏低的主要原因,通过采取“大配方、小调整”区域配肥技术、土壤测试与植株营养诊断相结合的氮肥推荐方案、新型肥料和有机肥配施的施肥方式,是实现减氮增效的有效技术途径^[13]。

可采用水肥一体化技术,根据不同园艺作物需水需肥规律随时供给,以满足园艺作物生长发育的需要。

4 合理轮作和间作

合理布局和轮作,有顺序地在季节间或年间轮换种植不同的作物或复种组合,合理间作套种,把一茬有两种或两种以上生育季节相近的作物,在同一地块上成行或成带间隔种植,可有效防治土传病害和连作障碍、重茬病^[14]。在常年发病较为严重的田间可实行水旱轮作。

5 典型案例

在设施蔬菜病毒病及媒介昆虫的防控中,农业防控作为最基本的防控措施,是保证绿色防控技术开展的重要基础,是各项行业标准和地方标准中必不可少的一项^[15]。

杂草是蚜虫、蓟马和烟粉虱传播病毒病的重要中间媒介^[16]。清除杂草是有效防控蔬菜病毒病的重要措施,需要在播种或定植前将苗床和地块周围 50 m 以内的带毒杂草全部清除,以此为基础的防控措施在湖南、山东、内蒙古、江苏、湖北、广东、云南等 14 个蔬菜主产省区进行了大面积推广示范,取得了显著的经济效益、社会效益和生态效益^[17]。

(二) 物理防治

1 高温闷棚防治设施园艺作物土传病害

土传病害是一种由病原体从作物根部或茎部侵害而引起的病害,一般通过土壤、灌溉水或流水进行传播。他们往往能够侵害植物根部,引起作物根部以至全株发病。由于病原菌在土壤中存活时间长、分布范围广,田间有土的地方即有病原菌,导致病原菌很难被消除,且保护地内温度适宜,病原菌可以安全越冬,造成土传病害的周年发生。

利用越夏休茬期高温季节进行土壤消毒,棚内土壤灌水后,在旋耕机进地操作前施用未腐熟的作物秸秆或者粪肥,利用旋耕机充分翻耕土壤,将有机物和土壤充分混合均匀,土壤覆膜后密闭温室,利用太阳能充分提高棚温和地温,处理过程中棚温可以达到 70 ℃以上,地温可以达到 50 ℃以上,同时未腐熟的有机物在发酵过程中可以提高部分地温,土壤相对含水量达到 80%以上,利用高温高湿的环境连续处理 10~15 d,可以显著杀灭土壤中的有害微生物。

2 土壤蒸汽消毒防治设施园艺作物土传病害

土壤蒸汽消毒法经过了装备引进、开发，目前在部分地区有一定的应用面积。通过专用设备产生高温蒸汽，利用地表覆膜蒸汽消毒、真空深层蒸汽消毒和综合蒸汽消毒等方法，在4~5 h内将25~30 cm的土层温度升高到85℃以上。土壤采用蒸汽消毒处理前需要进行深松，表层颗粒、深层块状的土壤结构有利于达到理想的土壤消毒效果^[18]。

3 土壤火焰消毒防治设施园艺作物土传病害

火焰土壤消毒是利用火焰高温杀菌、除草，与整齐消毒相比，操作简单，不需要铺设管道或者覆膜，目前国内设施专用的火焰消毒机技术成熟，通过旋土部分，将耕层土壤以薄层方式抛向加热部分，持续75 s左右将土壤温度保持在60℃以上，可以有效杀灭土壤病原菌、线虫、各类虫卵及杂草^[18]。

4 土壤化学消毒

土壤化学消毒目前在设施园艺作物土传病害防控方面应用比较成熟，目前已登记的土壤熏蒸剂包括50%氰氨化钙颗粒剂、42%威百亩水剂、98%棉隆颗粒剂、99.8%硫酰氟气体制剂等。在设施蔬菜主产区应用比较广的是50%氰氨化钙颗粒剂。氰氨化钙又叫石灰氮，作为一种古老的农用化学肥料，已经有100年的使用历史。2004年期陆续作为土壤消毒剂在设施蔬菜主产区进行示范推广，结合有机物增施、日光消毒等方式可以有效维持土壤有害菌类与有益菌类的微生态平衡，显著降低土壤有害生物种群^[19]；威百亩和棉隆作为成熟的土壤熏蒸剂，在设施园艺作物主产区也有较大应用面积，可以根据各地土壤状况选择应用。

（三）生物防治

我国设施园艺病虫害生物防控技术的研发与应用呈现蓬勃发展趋势，天敌昆虫资源得到更广泛的挖掘和开发利用，研发的微生物农药、植物源农药、生物化学农药等产品更加丰富，相应的联合应用技术、配套技术也不断优化完善。近年来，设施园艺病虫害的生物防治应用面积逐渐扩大，在病虫害防治中也取得明显防效，但还应关注在生产中如何因地制宜、因时制宜用好配套技术。

1 天敌昆虫

天敌昆虫资源挖掘与利用已取得显著进展，其中以寄生蜂、捕食螨、小花蝽、草蛉、瓢虫等为代表的多种天敌昆虫产品，已形成较成熟的规模化生产体系，并不同程度地应用于设施园艺生产中，如粉虱、叶螨、蓟马、蚜虫等小型刺吸式有害生物的种群调控。作为全球生物防治的典范，丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 防控温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 和烟粉虱 *Bemisia tabaci* 不同隐种在我国北方温室内应用普遍^[20,21]，也形成了现行农业农村部行业标准“丽蚜小蜂使用规范”（NY/T 3265.1-2018）；以智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* 为代表的捕食螨防控叶螨、粉虱、蓟马等害虫已在多地应用，也形成了农业农村部行业标准“释放捕食螨防治害虫（螨）技术规程设施蔬菜”（NY/T 3635-2020）和山东省地方标准（DB37/T 3575.4-2019），有效指导实际应用，适时释放对设施草莓二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 防控效果可达80%以上^[22]，与联苯肼酯、丁氟螨酯等低毒安全药剂联合使用，可提升防控效果^[23,24]。胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris*、斯氏钝绥螨 *Amblyseius swirskii* 在温室辣椒、茄子、甜椒、番茄、花卉等园艺作物上可不同程度地应用于蓟马等害虫防控。作物特性也会影响其对害虫的防控效果^[25]。同时，多天敌昆虫联合释放也表现出优于单种释放的防效^[26,27]，但需要更多深入的应用基础研究。

2 微生物农药

苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* (Bt)、昆虫病原真菌、病原线虫、病毒等为可用于害虫防控的微生物农药。在我国，Bt和枯草芽胞杆菌产量高，生产中用量大，占据微生物农药的前两位^[28]。苏云金芽胞杆菌 G033A 对新害虫南美番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 的低龄幼虫防效可高达89.1%~100%^[29]。枯草芽胞杆菌应用广泛，且可以增强作物的系统抗病性^[30]。厚孢轮枝菌穴施对温室黄瓜根结线虫病的防效可达88.1%^[31]，表明微生物农药使用得当可达到与化学药剂相当的防效。白僵菌、绿僵菌、拟青霉等昆虫病原真菌在自然界广泛分布，已在害虫防治上获得成功^[32]。目前我国已登记的白僵菌和绿僵菌产品接近50个，成为调节田间昆虫种群的重要因子。另外，颗粒体病毒和核型多角体病毒主要侵染鳞翅目害虫，环境适宜时可取得良好防效。

3 植物源农药

植物源农药是指有效成分直接来源于植物体的农药,如苦参碱、印楝素、鱼藤酮、除虫菊素等,此类药剂在我国已有很多产品登记,其中苦参碱和鱼藤酮在植物源农药中分别排名第1位和第3位^[28]。植物源农药可与化学农药、微生物农药等一起混配使用,以提升其防效、广谱性和速效性,如苦参碱与球孢白僵菌混剂对烟粉虱的毒力和防效(药后5 d防效70%以上)高于其两种单剂^[33],添加纳米助剂则能提升其对西花蓟马10%的防效^[34]。

4 生物化学农药

生物化学农药是一类对防治靶标对象没有直接毒性,而是具有调节植物生长,或干扰害虫交配,或引诱等特殊作用,主要原料在生物体内已经存在的化合物,如性信息素、诱虫烯、芸苔素内酯、赤霉素、氨基寡糖素等。研究发现,氨基寡糖素处理黄瓜叶片后,可显著抑制白粉病菌的发生^[35],外源喷施芸苔素内酯、氨基寡糖素等均可诱导作物抗逆性,提升其生长势^[36]。此类药剂应在作物未发病或发病初期应用,防控效果更优。

(四) 生态调控

1 调节温湿度

设施温室相对封闭、高温高湿、作物种植密度高的环境极易造成作物病虫害发生与发展^[37-39]。因此,调节室内温湿度,有助于减少病虫害发生,并降低其暴发为害程度^[19,40]。目前可以通过选择优质棚膜、覆膜栽培、操作行铺设覆盖物、人工开放式放风等途径调节室内温湿度^[41,42]。

选择黑膜覆盖,不仅保水除草,还可以降低室内湿度,棚膜若出现滴露现象,可在棚膜内侧喷上一层有机硅助剂来减少滴露;采用膜下灌水或滴灌技术、操作行铺设如稻壳、粉碎的玉米秸秆、草炭土、草木灰等覆盖物,可降低室内湿度^[42]。管理好株距行距,勤疏枝、打老叶,保证田间较好的通风透光条件,合理灌溉,增强植株长势,提高抗病能力^[41]。此外,根据室内温度的变化,做到迅速通风,可以选择中午关闭温室,当大棚的温度持续2 h高于50℃后,可以有效消灭细菌。同时,还请注意水管理,不能雨天浇水^[43]。

2 间作

间作是我国传统农业的精髓,已有研究表明其不仅能够大幅度提高作物产量,而且能够控制病虫害,强化农田生态系统服务功能^[44,45]。目前,间作已广泛用于设施园艺作物的病虫害防治^[46-48]。

在黄瓜种植系统中,小麦 *Triticum aestivum*、毛苕子 *Vicia villosa* 与黄瓜间作,降低了黄瓜角斑病、白粉病、霜霉病和枯萎病的病情指数和尖孢镰刀菌的数量,并提高黄瓜根际土壤微生物群落多样性和黄瓜产量^[49];采用大豆 *Glycine max*、燕麦 *Avena sativa* 与黄瓜间作,均明显改善了土壤微生物的区系组成,使细菌和放线菌数量增加,土传病菌数量降低,促进了黄瓜生长,提高黄瓜产量^[50];黄瓜与西芹 *Apium graveolens* 间作,增加了土壤细菌群落多样性,降低了黄瓜枯萎病的发病率^[51]。在番茄种植系统中,番茄与架豆 *Phaseolus vulgaris* 间作,番茄株高显著增加并增产15.7%^[52];生菜 *Lactuca sativa* 和芹菜 *Apium graveolens* 分别与番茄间作,可以显著增加连作土壤中微生物总量,显著降低真菌数量,同时提高土壤中过氧化氢酶活性,从而减轻连作对番茄生长的影响,提高番茄产量^[47]。此外,辣椒与玉米 *Zea mays* 间作可较好控制辣椒疫病,显著提高单位土地面积的生产能力和经济效益^[53]。分蘖洋葱 *Allium cepa* 与菜豆间作显著降低菜豆细菌性疫病的发病率,提高菜豆出苗势、出苗率,增产8%~9%^[54]。

间作对设施园艺作物上的害虫及虫传病毒具有良好的防治效果。如辣椒田以8:1(每8行辣椒间作1行芹菜)、3:1的比例间作芹菜 *A. graveolens*, 烟粉虱虫口减退率最高分别可达62.45%、86.67%;黄瓜田以3:1密度间作芹菜,烟粉虱虫口减退率最高可达42.86%;番茄田以5:1间作芹菜,烟粉虱虫口减退率最高可达75.49%^[48]。在辣椒田一端集中种植5行薄荷 *Mentha haplocalyx*, 另一端种植5行芹菜,15 d后辣椒上烟粉成虫数量较对照下降29%以上^[55]。番茄间作玉米 *Z. mays* 对烟粉虱有驱避效应,能抑制番茄黄化曲叶病毒病的发生,玉米株距为10 cm时,烟粉虱虫口数比单作减少88.7%,对病毒病的抑制作用呈减弱趋势,间作病情指数显著降低67.3%,有利于番茄植株生长和坐果,可提升番茄产量^[56]。

3 功能植物

生物多样性与生态平衡是维系生物发展进化的自然规律之一,增加农田中生物多样性水平是绿色防控的有效措施^[45,57,58]。目前,通过种植功能植物调控土壤微生物群落、害虫和天敌种群的措施已广泛用于设施园艺作物病虫害的生态调控中,如伴生植物、蜜源植物、储蓄植物和驱避植物等。

3.1 伴生植物

利用作物根系分泌物的化感作用合理安排伴生植物,可以减少设施主栽植物病害发生^[59]。高羊茅 *Festuca arundinacea*、薄荷 *M. haplocalyx*、芥菜 *Lolium perene*、高丹草 *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* 和万寿菊 *T. erecta* 所伴生的番茄及伴生植物总根结线虫卵数均有下降的趋势,且番茄地上白粉虱数量显著降低^[60]。普通白菜 *Brassica rapa*、分蘖洋葱 *A. cepa*、薄荷 *M. haplocalyx*、茴香 *Foeniculum vulgare* 等4种植物伴生能够显著降低番茄根结数量和根结指数,相对防效为 58.7%~82.8%,且对番茄生长无显著抑制作用^[61]。大蒜 *A. sativum* 伴生提高了番茄根结线虫的防治效果、根际土壤微生物数量和土壤酶活性^[62]。

3.2 蜜源植物

利用蜜源植物为天敌提供栖境和营养的生物防治增效技术已广泛应用。金盏菊 *Calendula officinalis* 是目前温室使用较多的蜜源植物类型。已有研究表明,番茄温室内金盏菊对东亚小花蝽 *Orius sauteri*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 定殖及控害效果均有增效作用^[63,64]。在设施番茄内布设金盏菊,可以接种式释放初期辅助异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和龟纹瓢虫 *Propylea japonica*,同时建立稳定的天敌种群,并且可以在相当长的一段时间内持续对两种瓢虫进行有效的营养支持,避免两种瓢虫因为种间竞争造成捕食者群落规模的下降,从而实现了靶标桃蚜 *Myzus persicae* 的可持续控制^[65]。

3.3 储蓄植物

储蓄植物,也称载体植物、银行植物,其能预先准备和储存备选天敌,维持天敌连续增殖来有效控制靶标害虫^[66]。储蓄植物系统目前主要应用于温室,且有一些储蓄植物系统已经商业化生产^[67,68]。例如,张文庆等^[69]建立烟草-烟蚜-菜蚜茧蜂储蓄植物系统,能够获得较佳的繁蜂效果,既能保证一定出蜂量应用于田间目标害虫的防治,又能有足够烟蚜剩余,用于菜蚜茧蜂的持续繁殖,减少化学农药使用量,对蔬菜的害虫防治具有相当大的作用。刘同先等^[70]构建了小麦-麦长管蚜-烟蚜茧蜂储蓄植物系统,防治温室内蔬菜蚜虫种群。宋月芹等^[71]构建了水稻-稻粉虱-浅黄恩蚜小蜂储蓄植物系统,防治十字花科、茄科等蔬菜上的烟粉虱及温室白粉虱。李姝等^[72]建立了蚕豆苗-豌豆修尾蚜-七星瓢虫储蓄植物系统,防治温室西兰花上的桃蚜。储蓄植物有利于在害虫发生前期天敌的增殖和保护,在害虫大量暴发前有效抑制害虫,与直接释放瓢虫相比,天敌昆虫定殖率增加 50% 以上,且长期维持。

3.4 驱避植物

利用非嗜好植物对害虫的驱避作用控制害虫,是目前害虫绿色防控普遍使用的措施。迷迭香 *Rosmarinus officinatis*、茴香 *Foeniculum vulgare*、薄荷 *Mentha haplocalyx* 等3种芳香草本植物与蔬菜间作种植,蔬菜虫害明显减少,且随着蔬菜的生长,3种驱避植物的防虫效果更加显著^[73]。在甘蓝大棚入口处种植大蒜、薄荷后,甘蓝上蚜虫发生量分别减少了 58.35% 和 56.17%,小菜蛾 *Plutella xylostella* 发生量分别减少了 52.04% 和 40.52%;种植大蒜和紫娇花 *Tulbaghia violacea* 后,菜青虫 *Pieris rapae* 发生量分别减少了 55.36% 和 41.52%;大蒜对菜青虫的有效驱避距离为 3.0 m,对甘蓝上蚜虫为 1.0 m,对小菜蛾为 0.5 m;薄荷对甘蓝上蚜虫的有效驱避距离为 3.0 m,对菜青虫为 1.0 m^[74]。辣椒田间作芹菜,辣椒植株上烟粉虱成虫数量显著下降^[48,55]。在温室通风口处分别种植驱避植物薄荷和绿豆 *Vigna radiata*,能够显著降低辣椒整个生长期的桃蚜密度,芹菜和香菜 *Coriandrum sativum* 能够显著降低茄子主要采收期的桃蚜密度^[75]。

(四) 生物技术

现代生物技术的迅速发展,为更环保、更安全的病虫害防控策略的开发打开了新的大门。

利用转基因植物表达 Bt 在棉花和大田作物等害虫防治中发挥了重要作用,并在一定程度上取代了化学杀虫剂^[76,77]。

RNA 干扰 (RNA interference, RNAi) 因其高度的序列特异性,被认为是当下更环保,更安全的防治手段之一^[78]。以 RNAi 为核心的害虫防治措施有望通过转基因植物、叶面喷施、种子包衣、树干注射

和灌根等途径来实现^[79]。通过针对某一病毒序列设计双链 RNA 结构,并通过转基因技术导入植物体内,使其可以表达针对该病毒的特异性 dsRNA (double-stranded RNA) 或 hpRNA (hairpin RNA),从而诱发植物的抗病毒反应^[80,81]。Baum 等^[82]首次构建了能够表达 *vacuolar ATPase A* (VATPase A) 双链 RNA 的转基因玉米,并在玉米根叶甲 *Diabrotica virgifera virgifera* 中起到了良好的防治效果。使用工程菌大量表达马铃薯甲虫 *mesh* 基因的 dsRNA 并直接喷洒在土豆叶片上,取食该土豆叶片的马铃薯甲虫死亡率超过 90%^[83]。

近年来,已有几种昆虫种群遗传调控技术在害虫防治中被广泛研究和应用,这些技术包括持续释放不育昆虫的不育调控技术 (Sterile insect technique, SIT)^[84]、昆虫显性致死释放技术 (Release of insects with a dominant (female) lethal, RIDL and fs RIDL)^[85,86]、沃尔巴克氏体介导的病原体干扰技术 (Pathogen interference, PI)^[87]、沃尔巴克氏体介导的昆虫不相容技术 (Incompatible insect technique, IIT)^[88]以及极具应用前景的基因驱动技术。

随着基因编辑技术的迅速发展,基因驱动在害虫防治领域表现出巨大的应用潜力。在亚洲疟疾传播者——斯氏按蚊 *Anopheles stephensi* 中,利用基因编辑技术同样实现了疟原虫抗性基因在实验室种群内的迅速传播,传播效率可达 99.5%^[89]。基因驱动可作为设施园艺作物害虫综合防控策略中的一部分,与其他防治策略结合使用,达到防控害虫的目的。

(五) 科学用药

现阶段,在设施园艺作物栽培过程中,化学防治仍然是最常用的防治措施。选择高效、低风险的农药可以及时有效地防治病虫害,但需要注重不同作用机制的农药品种的合理轮换使用,连续使用单一农药品种防治病虫害,会加快抗性的发展速度,增加防治难度。由于设施栽培相对封闭,面积小,因此要做到均匀喷洒农药,彻底防治,有效遏制侵染源。而且,设施病虫害蔓延速度快,需坚持预防为主、治理为辅的原则,注意保护性杀菌剂和内吸性杀菌剂的交替使用,科学选择施药器械和施药方式,结合实际情况把握最佳时机进行针对性防治^[90]。

蚜虫、粉虱、蓟马和叶螨等是设施园艺作物生产中的常发性有害生物,这类害虫(螨)种类多,田间常混合发生;体型微小,常隐匿于叶片背面取食植物汁液,影响作物的光合作用,田间发生初期肉眼难以识别鉴定,常常延误早期防治时机。更为严重的是,蚜虫、粉虱、蓟马等害虫也是传播植物病毒病的媒介,成为设施园艺产业健康发展的重要阻碍因子^[91]。这类害虫种群数密度高,繁殖速度快,防治难度大,早期施药是化学防治成功的关键。通常在粉虱等害虫种群数量较低、发生株率达 5%~10%时应及时进行防治,可选用噻虫嗪、噻虫啉或啉啉虫胺等。蓟马可用乙基多杀菌素、溴虫腈或苦参碱等喷雾。蚜虫可喷施啉啉虫脒、甲维盐、氟啶虫胺腈或氟啶虫酰胺等。叶螨可喷施浏阳霉素、印楝素或联苯肼酯等。

在害虫和害螨混合发生时,可用联苯菊酯或甲氰菊酯等进行兼治。棚室内害虫种群数量大,错失防控时机时,可采用熏烟的应急措施。每 667 m² 棚室选用 22% 敌敌畏烟剂 250 g,或 20% 异丙威烟剂 250 g,于傍晚收工时密闭棚室,把烟剂分成几份点燃熏烟以杀灭成虫。值得注意的是,必须严格按照烟剂推荐剂量使用,不可随意增施药量。熏烟对成虫外的其他虫态基本无效,种群数量大的棚室可在熏烟 3 d 后结合喷施防治害虫若虫和卵的杀虫剂,如吡丙醚、螺虫乙酯等^[92]。在设施西瓜栽培中,西瓜定植 2 d 后,用 25% 噻虫嗪水分散粒剂 3000 倍液灌根,每株药液量为 50 mL,同时在西瓜生长期释放智利小植绥螨 2 次,噻虫嗪灌根的化学防控与释放智利小植绥螨的生物防控的协同使用技术可显著压低蚜虫、烟粉虱、蓟马和截形叶螨的田间种群数量,对烟粉虱和蓟马的防效分别达 79.17% 和 78.10%,对瓜蚜的防效达到 93.33%,对截形叶螨的防效超过 92.72%,实现协同控制效果^[91]。

由于设施内环境相对稳定,棚室内土壤和空气的湿度较露地大,导致霜霉病、灰霉病、白粉病、晚疫病等气流传播的病害频繁发生,常造成大幅度减产。20 世纪 90 年代,中国农业科学院植物保护研究所开展的“防治保护地蔬菜病虫害的粉尘法施药技术体系”,成功研制了设施蔬菜专用粉剂。2017 年,中国农业科学院蔬菜花卉研究所开始采用弥粉法施药技术防治设施蔬菜病害,陆续形成了新型的微粉剂剂型和施药设备。弥粉法施药技术不需兑水,不会增加棚室湿度,施药量小,且微粉剂通过静电吸附作用沉积在植株叶片正反面,对设施蔬菜病害有较好的防治效果。使用弥粉法施药技术模式,能够显著控制主要病害的

发生。对黄瓜霜霉病的防效达到 85.74%;对黄瓜白粉病的防效达到 86.7%;对黄瓜灰霉病的防效可达 80.91%。使用弥粉法施药技术模式防治黄瓜主要病害,可实现化学农药减量增效的目的。

四、问题与展望/建议与展望

在农业绿色发展的时代背景下,随着设施园艺产业的快速发展和病虫害问题的日益凸显,设施园艺病虫害综合治理应顺应时代发展,以绿色防控策略为指导思路,针对不同的设施作物,研究建立相应的病虫害绿色技术,研发绿色防控产品,并建立可集成推广的应用模式。

(一) 建立病虫害周年绿色防控模式(时间)

设施园艺作物经济价值高,生长周期相对较短,相对稳定的光照和温湿度环境,提高了作物产量和土地利用效率。设施环境条件在保证作物周年生产的同时,也为病虫害提供了稳定的寄主/食物来源。即使在前一茬作物收获至下一茬作物定植的间隔期间内,病虫害也可在土壤、缝隙上存活,并成为为害下一茬作物的潜在病虫害。在作物连作和大肥大水等栽培模式下,土壤中的病菌更容易累积。此外,设施环境条件,也让很多在北方露地条件下不能越冬的害虫能够完成越冬。因此,在时间上,针对设施环境下,园艺作物的周年栽培模式,从每一茬作物育苗、定植、管理、收获等整个过程,建立全程病虫害绿色防控模式,最大程度地恶化病虫害生存环境。

(二) 建立作物健康生长的立体化管理模式(空间)

设施环境下,往往是多种病虫害同时混合发生。目前的绿色防控技术主要是针对单一的病虫害进行防控,当多种病虫害同时发生时,通过单一技术的简单叠加或任意组合,尽管能在一定程度上控制病虫害,但所付出的成本相对较高。此外,作物安全生产是涉及土壤健康、科学管理和病虫害有效防控等的系统工程,单一病虫害绿色防控仅是这项工程的一个环节。因此,在空间上,一是需要加强多种绿色防控技术的兼容性和协同性研究,建立病虫害绿色防控技术集成模式,二是建立土壤、肥水管理、植物病虫害诊断、科学防治等立体化综合管理模式。

(三) 建立不同作物病虫害绿色防控操作标准

园艺作物种类多,设施环境下不同作物的病虫害发生种类和危害程度不同。目前的单一绿色防控技术,针对的靶标主要是某一类病虫害,很少对不同作物上的使用技术有所区分。同一技术在不同作物上使用或者不同操作者使用,其效果不同,有时甚至会表现出很大的差异。因此,为了提高病虫害防治效果,针对不同作物上的生长特点,一是需要明确各自的病虫害发生规律,二是需要建立相应的绿色防控技术操作标准。

参 考 文 献

- [1] Daughtrey M, Buitenhuis R. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals[M]. Plant Pathology in the 21st Century, 2020.
- [2] 骆飞,徐海斌,左志宇,等.我国设施农业发展现状、存在不足及对策[J].江苏农业科学,2020(10):57-62.
- [3] 雷仲仁,吴圣勇,王海鸿.我国蔬菜害虫生物防治研究进展[J].植物保护,2016,42(1):1-6.
- [4] 陆永跃.警惕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick)在我国持续扩散入侵[J].环境昆虫学报,2021,43(2):526-528.
- [5] 樊平声,陈罡,冯伟民,等.江苏省设施蔬菜病虫害综合防治技术[J].江苏农业科学,2016,44(10):189-191.
- [6] 瞿晓苍.设施蔬菜面临的污染问题及对策[J].中国种业,2005(1):36-37.
- [7] 顾沛雯,覃强,王萍,等.宁夏设施园艺病虫害发生特点、发展趋势及绿色防治技术[J].农业科学研究,2008,29(4):30-32,59.
- [8] 赵秀芬,房增国,韩猛.设施蔬菜连作障碍的原因剖析及对策研究[J].安徽农学通报,2007,13(7):117-118.
- [9] 徐进,朱杰华,杨艳丽,等.中国马铃薯病虫害发生情况与农药使用现状[J].中国农业科学,2019,52(16):2800-2808.
- [10] 吴圣勇.设施辣椒害虫生物防治技术[M].北京:中国农业出版社,2020,1-82.
- [11] Cao Y, Li C, Yang W J, et al. Effects of temperature on the development and reproduction of thrips hawaiiensis (Thysanoptera: Thripidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(2): 755-760.
- [12] Reitz S R, Gao Y L, Kirk W D J, et al. Invasion biology, ecology, and management of western flower thrips[J]. Annual Review of Entomology, 2020,

- 65(1): 17-37.
- [13] 于静, 汤浩, 董道峰, 等. 中国马铃薯不同产区氮肥利用率的比较分析[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 43-50.
- [14] 高玉林, 徐进, 刘宁, 等. 我国马铃薯病虫害发生现状与防控策略[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 106-111.
- [15] 刘勇, 国家进, 王茂昌, 等. 番茄褪绿病毒病综合防控技术规程[S]. NY/T 3262-2018.
- [16] Tang X, Shi X B, Zhang D Y, *et al.* Detection and epidemic dynamic of ToCV and CCYV with *Bemisia tabaci* and weed in Hainan of China[J]. *Virology Journal*, 2017, 14(1): 169.
- [17] 史晓斌, 张战泓, 欧阳娴, 等. 蔬菜主要病毒病绿色防控技术[J]. 中国蔬菜, 2020(3): 90-93.
- [18] 杨雅婷, 胡松, 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.
- [19] 李宝聚, 陈立芹, 孟伟军, 等. 温湿度调控对番茄灰霉病菌产生的细胞壁降解酶的影响[J]. 植物病理学报, 2003(3): 209-212.
- [20] 王娟, 王孟卿, 刘晨曦, 等. 丽蚜小蜂的粉虱寄主选择性及后代蜂发育适合度[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(2): 159-166.
- [21] He Y Y, Liu Y C, Wang K, *et al.* Development and fitness of the parasitoid, *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae), on the B and Q of the Sweetpotato Whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae)[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112(6): 2597-2603.
- [22] 郝建强, 姜晓环, 庞博, 等. 释放智利小植绥螨防治设施栽培草莓上二斑叶螨[J]. 植物保护, 2015, 41(4): 196-198.
- [23] 宫亚军, 金桂华, 崔宝秀, 等. 联苯腈酯对智利小植绥螨的安全性及二者对二斑叶螨的联合控制作用[J]. 应用昆虫学报, 2015, 52(6): 1459-1465.
- [24] 乔岩, 张正伟, 张涛, 等. 联合应用智利小植绥螨与丁氟螨酯防治草莓二斑叶螨[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(4): 514-519.
- [25] 徐学农, 王恩东. 基于生物防治的西花蓟马治理及思考[J]. 环境昆虫学报, 2010, 32(1): 96-105.
- [26] Bouagga S, Urbaneja A, Pérez-Hedo M. Combined use of predatory mirids with *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) to enhance pest management in sweet pepper[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(3): 1112-1120.
- [27] 王恩东, 吕佳乐, 张博, 等. 智利小植绥螨商品化生产与应用[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(4): 651-654.
- [28] 郭明程, 王晓军, 苍涛, 等. 我国生物源农药发展现状及对策建议[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 755-758.
- [29] 张桂芬, 张毅波, 张杰, 等. 苏云金芽胞杆菌 G033A 对新发南美番茄潜叶蛾的室内毒力及田间防效[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(2): 175-183.
- [30] 乔俊卿, 张心宁, 梁雪杰, 等. 枯草芽孢杆菌 PTS-394 诱导番茄对灰霉病的系统抗性[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(2): 219-225.
- [31] 王洪山, 李少龙, 王宾, 等. 新型微生物农药厚孢轮枝菌微粒剂对温室黄瓜根结线虫的防治效果[J]. 中国蔬菜, 2019(12): 88-89.
- [32] 葛银银, 王滨. 湿度调控对球孢白僵菌和玫烟色虫草田间防治棉蚜效果的影响[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 172-179.
- [33] 谢婷, 姜灵, 洪波, 等. 球孢白僵菌与苦参碱混配对烟粉虱的毒力与田间防效[J]. 西北农业学报, 2019, 28(5): 830-836.
- [34] 呼倩, 杜相革. 纳米助剂对防治西花蓟马五种植物源农药的增效作用[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(3): 459-463.
- [35] 唐洪杰, 魏萍, 姚夕敏, 等. 2 种生物制剂对有机黄瓜白粉病的防治效果[J]. 农学学报, 2015, 5(6): 42-44.
- [36] 朱立保, 刘海河, 张彦萍, 等. 芸苔素内酯对厚皮甜瓜果节间叶片衰老及叶绿素荧光特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(4): 58-62.
- [37] 国淑梅, 牛贞福. 温湿度对黄瓜霜霉菌病斑产孢和孢子囊萌发的影响[J]. 北方园艺, 2012(13): 151-153.
- [38] 张帆, 李姝, 肖达, 等. 中国设施蔬菜害虫天敌昆虫应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3463-3476.
- [39] 张豫超, 杨肖芳, 许关桐, 等. 设施内温湿度生态调控对草莓灰霉病发生的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(9): 1850-1853.
- [40] 王洪山. 控制日光温室温湿度防控黄瓜霜霉病技术[J]. 中国农技推广, 2013, 29(8): 45-46.
- [41] 凤舞剑. 剖析温湿度与温室蔬菜病虫害的相关性及应对措施[J]. 现代化农业, 2009(10): 7-8.
- [42] 葛华. 温湿度与设施蔬菜病虫害发生的相关性及对策研究[J]. 现代化农业, 2019(9): 4-6.
- [43] 成文华. 浅谈大棚蔬菜病虫害发生特点及防治对策[J]. 农业开发与装备, 2017(3): 159.
- [44] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415.
- [45] 朱书生, 黄惠川, 刘屹湘, 等. 农业生物多样性防控作物病害的研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 42-57.
- [46] 崔雄维, 吴伯志. 间作蔬菜研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(1): 128-132.
- [47] 张海春, 张浩, 胡晓辉. 不同间作模式对温室连作番茄产量、土壤微生物和酶的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(8): 1218-1223.
- [48] 衡森, 周福才, 陈学好, 等. 芹菜不同种植方式对 3 种蔬菜田烟粉虱的控制作用[J]. 植物保护, 2017, 43(3): 110-113, 135.
- [49] 吴凤芝, 周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 899-906.
- [50] 王玉彦, 吴凤芝, 周新刚. 不同间作模式对设施黄瓜生长及土壤环境的影响[J]. 中国蔬菜, 2009(16): 8-13.

- [51] 秦立金, 徐峰, 刘永胜, 等. 黄瓜与西芹间作土壤细菌多样性及其对黄瓜枯萎病发生的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1180-1189.
- [52] 代会会, 胡雪峰, 曹明阳, 等. 豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 911-918.
- [53] 孙雁, 周天富, 王云月, 等. 辣椒玉米间作对病害的控制作用及其增产效应[J]. 园艺学报, 2006(5): 995-1000.
- [54] 刘守伟, 赵索, 吴凤芝, 等. 伴生分蘖洋葱对菜豆出苗、病害及产量的影响[J]. 北方园艺, 2015(18): 44-47.
- [55] 陆海锋, 石英跃, 胡军明, 等. 间作芹菜和薄荷对设施辣椒烟粉虱的控制作用[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(4): 779-783.
- [56] 魏佩瑶, 李英梅, 刘晨, 等. 番茄玉米间套作对烟粉虱的屏障效应及控制番茄黄化曲叶病毒病的效果[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1125-1130.
- [57] 初炳瑶, 陈法军, 马占鸿. 农业生物多样性控制作物病虫害的方法与原理[J]. 应用昆虫学报, 2020, 57(1): 28-40.
- [58] 杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 等. 功能植物的作用原理、方式及研究展望[J]. 应用昆虫学报, 2020, 57(1): 41-48.
- [59] Zhou X G, Yu G B, Wu F Z. Effects of intercropping cucumber with onion or garlic on soil enzyme activities, microbial communities and cucumber yield[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47: 279-287.
- [60] 王孝莹, 白光瑛, 吴林林, 等. 利用植物多样性控制南方根结线虫 (*Meloidogyne incognita*) 的初步探讨[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1233-1239.
- [61] 杨帆, 辛月岩, 吴凤芝. 减轻番茄根结线虫病的伴生植物筛选[J]. 中国蔬菜, 2020(1): 44-47.
- [62] 刘素慧, 尉辉, 孙淼, 等. 伴生大蒜对日光温室连作番茄根结线虫及根际微生态环境的影响[J]. 中国蔬菜, 2021(9): 58-62.
- [63] Zhao J, Guo X J, Tan X L, et al. Using *Calendula officinalis* as a floral resource to enhance aphid and thrips suppression by the flower bug *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae)[J]. Pest Management Science, 2016, 73(3): 515-520.
- [64] 马亚云, 张帆, 王甦, 等. 功能植物金盏菊对七星瓢虫温室定殖控害的增效作用研究[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(2): 276-282.
- [65] Liang Y, Chen X, Dai H, et al. Flower provision reduces intraguild predation between predators and increases aphid biocontrol in tomato[J]. Journal of Pest Science, 2022, 95: 461-472.
- [66] 陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 等. 害虫天敌的植物支持系统[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(1): 1-12.
- [67] 潘明真, 刘同先. 载体植物在温室作物害虫生物防治中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(5): 917-926.
- [68] 李姝, 王杰, 黄宁兴, 等. 捕食性天敌储蓄植物系统研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3975-3987.
- [69] 张文庆, 沈嘉炜, 蔡允俊. 菜蚜茧蜂载体植物系统及其构建方法. 中国: CN201410350755.4[P]. 2014.
- [70] 刘同先, 康志伟, 潘明真. 一种载体植物系统及其构建方法. 中国: CN201611007876.4[P]. 2016.
- [71] 宋月芹, 孙会忠, 陈庆霄, 等. 用于繁殖浅黄恩蚜小蜂的载体植物系统及构建方法、繁殖方法及防治粉虱类害虫的方法. 中国: CN201910735936.1[P]. 2019.
- [72] 李姝, 马亚云, 邸宁, 等. 一种利用七星瓢虫载体植物系统对待防治区域内进行西兰花害虫防治的方法. 中国: CN201810729396.1[P]. 2018.
- [73] 叶珺琳, 郭国保, 潘春香, 等. 间种芳香植物对蔬菜生长及虫害的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(8): 143-145.
- [74] 孙梅梅, 湛江华, 姚红燕, 等. 七种非寄主植物对甘蓝主要害虫的田间驱避作用[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1374-1380.
- [75] Wang J, Li S, Fang Y, et al. Enhanced and sustainable control of *Myzus persicae* by repellent plants in organic pepper and eggplant greenhouses[J]. Pest Management Science, 2022, 78: 428-437.
- [76] Wu K M, Lu Y H, Feng H Q, et al. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in china in areas with Bt toxin-containing cotton[J]. Science, 2008, 321(5896): 1676-1678.
- [77] Dively G P, Venugopal P D, Bean D, et al. Regional pest suppression associated with widespread Bt maize adoption benefits vegetable growers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(13): 3320-3325.
- [78] Zhu K Y, Palli S R. Mechanisms, applications, and challenges of insect RNA interference[J]. Annual Review of Entomology, 2020, 65(1): 293-311.
- [79] Yan S, Ren B, Zeng B, et al. Improving RNAi efficiency for pest control in crop species[J]. Bio Techniques, 2020, 68(5): 283-290.
- [80] Waterhouse P M, Graham M W, Wang M B. Virus resistance and gene silencing in plants can be induced by simultaneous expression of sense and antisense RNA[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1998, 95(23): 13959-13964.
- [81] Wang M B, Abbott D C, Waterhouse P M. A single copy of a virus-derived transgene encoding hairpin RNA gives immunity to barley yellow dwarf virus[J]. Molecular Plant Pathology, 2000, 1(6): 347-356.
- [82] Baum J A, Bogaert T, Clinton W, et al. Control of coleopteran insect pests through RNA interference[J]. Nature Biotechnology, 2007, 25(11): 1322-1326.

- [83] Petek M, Coll A, Ferenc R, *et al.* Validating the potential of double-stranded RNA targeting colorado potato beetle *mesh* gene in laboratory and field trials[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1250.
- [84] Alphey L. Genetic Control of Mosquitoes[J]. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59(1): 205-224.
- [85] Harris A F, McKemey A R, Nimmo D, *et al.* Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes[J]. *Nature Biotechnology*, 2012, 30(9): 828-830.
- [86] Facchinelli L, Valerio L, Ramsey J M, *et al.* Field cage studies and progressive evaluation of genetically-engineered mosquitoes[J]. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2013, 7(1): e2001.
- [87] Walker T, Johnson P H, Moreira L A, *et al.* The wMel *Wolbachia* strain blocks dengue and invades caged *Aedes aegypti* populations[J]. *Nature*, 2011, 476(7361): 450-453.
- [88] Zheng X, Zhang D, Li Y, *et al.* Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes[J]. *Nature*, 2019, 572(7767): 56-61.
- [89] Gantz V M, Jasinskiene N, Tatarenkova O, *et al.* Highly efficient Cas9-mediated gene drive for population modification of the malaria vector mosquito *Anopheles stephensi*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(49): E6736-6743.
- [90] 陈光, 许会会. 设施农业发展与蔬菜病虫害防治策略[J]. *农业开发与装备*, 2021(8): 173-174.
- [91] 张妍, 王培, 张友军, 等. 噬虫嗉灌根和捕食螨释放对设施西瓜刺吸类害虫的种群抑制作用[J]. *中国蔬菜*, 2021(3): 78-82.
- [92] 王少丽, 张友军. 北方设施西甜瓜常见害虫及全程绿色防控技术[J]. *中国蔬菜*, 2017(7): 95-96.

(责任编辑: 张莹)