

有机蔬菜生产中天敌昆虫应用的经济收益评价*

程森弟^{1**} 王晓晶^{2,3} 郭荣⁴ 张帆³ 王甦³ 梁玉勇^{5***}

(1. 江西生物科技职业学院, 南昌 330200; 2. 贵州大学精细化工研究中心, 贵阳 550025; 3. 北京市农林科学院植物保护研究所, 北京 100097; 4. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 5. 江西省农业科学院植物保护研究所, 南昌 330200)

摘要 【目的】应用天敌昆虫可以部分替代化学杀虫剂的使用, 有效减少因“3R”问题造成的生态问题, 但天敌昆虫因无法长期维持种群而导致控害周期短, 应用成本增加, 这大大限制了天敌昆虫在实际生产中的应用与推广。为探究基于储蓄植物系统的天敌昆虫实际应用效果, 本研究在有机番茄温室中系统评价了丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 储蓄植物系统控制番茄上烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的效果与经济效益。

【方法】在 2020 年和 2021 年, 围绕设施番茄生产中的烟粉虱防控, 本研究分别进行了丽蚜小蜂储蓄植物系统和常规有机植保管理 (植物源杀虫剂-除虫菊素), 通过比较两个不同植保技术应用场景间在控害效果、作物产量、不同因素环节的经济成本以及最终经济收益, 明确天敌昆虫生物防治与常规有机植保管理的经济效益差异。【结果】通过储蓄植物系统辅助释放的丽蚜小蜂可以发挥与喷施除虫菊素相同的烟粉虱抑制效果。应用丽蚜小蜂可以显著降低番茄的损失系数、保持番茄的单位产量, 并且和喷施除虫菊素处理间无显著差异。此外, 丽蚜小蜂储蓄植物系统应用的 Reichelderfer 经济效益变量与喷施除虫菊素间也无显著差异。【结论】本研究发现利用有机植保药剂和天敌昆虫释放, 均可以对烟粉虱发挥同样的控害功效, 且两者在番茄植株保护、生产能力等方面没有显著的差异影响。这不但为我们系统评价天敌昆虫生物防治应用的收益度提供了技术方法, 也为我们推进天敌昆虫产业化应用和精准评价奠定了基础。

关键词 丽蚜小蜂; 烟粉虱; 储蓄植物; 损失系数; 经济收益变量

Economic benefits of using natural enemies to control pest insects in organic vegetable production

CHENG Sen-Di^{1**} WANG Xiao-Jing^{2,3} GUO Rong⁴
ZHANG Fan³ WANG Su³ LIANG Yu-Yong^{5***}

(1. Jiangxi Biotech Vocational College, Nanchang 330200, China; 2. Center for Research and Development of Fine Chemicals of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Institute of Plant Protection of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 5. Institute of Plant Protection, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the practicality and economic benefits of using *Encarsia formosa* to control *Bemisia tabaci* in organic tomato greenhouses. 【Methods】The practicality and effectiveness of using *E. formosa* to control *B. tabaci* in greenhouse tomato production using the plant storage system was compared to conventional organic plant protection (the botanical insecticide-pyrethrum) in 2020 and 2021. The economic benefits of using biological control vs conventional organic plant protection was determined by comparing the control effect, crop yield, economic cost, and final economic benefit of the two different control methods. 【Results】*E. formosa* released within a banker plant system exerted the same inhibitory effect on *B. tabaci* as spraying pyrethrin. The application of *E. formosa* significantly reduced the crop loss coefficient, and maintained unit yield; there was no significant difference between the application of *E. formosa* and spraying pyrethrin. In addition, there was no significant difference in Reichelderfer economic benefit variables between *E. formosa* and spraying

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金面上项目 (32072479); 江西省重点研发计划一般项目 (20212BBF63043); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0201006)

**第一作者 First author, E-mail: 649618935@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lyuyiong@163.com

收稿日期 Received: 2022-10-17; 接受日期 Accepted: 2023-03-23

pyrethrin. 【Conclusion】 Both organic pesticides and *E. formosa* exerted the same level of control on *B. tabaci* in organic tomato crops; there was no significant difference in tomato damage and production between these two control methods. These results not only provide a method for comparing the relative benefits of biological control agents and conventional pest control, but also a foundation for promoting the application and accurate evaluation of biological control.

Key words *Encarsia formosa*, *Bemisia tabaci*, banker plant, loss coefficient, economic beneficial variable

利用天敌昆虫对农林害虫进行生物防治,是现代有害生物综合防治(Integrated pest management, IPM)技术中的核心,也是推动现代绿色农业生产中化学农药使用零增长的重要技术手段(Hoddle, 2015)。近年来,随着天敌昆虫品种资源的不断挖掘(张礼生和陈红印, 2016),规模饲养技术不断提升(曾凡荣, 2018)、生态调控增效技术的不断完善(Jaworski *et al.*, 2019),天敌昆虫越来越受到一线农业生产从业者的接纳。而进入 21 世纪初,商业化天敌生产销售企业成为了产业发展的新兴力量,通过商业流通领域和其它植物保护技术产品实现非项目支撑式推广应用,将会是未来天敌昆虫生物防治应用的发展方向(Mace-Hill, 2015)。一直以来,天敌昆虫控害应用的相关研究多半是集中于生物学、生理学和生态学范畴,对于其控害效果的评价较多以单位时间或单位面积的害虫虫口减退数,以及天敌昆虫捕食量、寄生率等以生物学特性为基准的评价指标(Hoddle, 2015)。但是随着天敌昆虫商业化应用规模的快速提升,如何评价反映天敌昆虫在实际应用中的投入成本、实现害虫防治中的经济效益与生态效益核算,以及基于生产方系统管理和农产品销售中的投入产出净收益等,已经成为天敌昆虫商品化推广中亟待解决的问题。

农业生产特别是植物保护产品/技术规模化应用中的经济学评价,一直以植物保护技术应用投入品成本和农业生产的直接经济收益作为评价基准,以靶标害虫减退程度和种群峰值系数为偏差修正(包建中和古德祥, 1998)。而对于天敌昆虫来说,现有的文献报道多关注于天敌昆虫与害虫种群的伴生动态,以害虫种群峰值的减少和稳定来评价天敌昆虫的防控效果(张继红等, 2022)。而天敌昆虫自身生产成本较高,生产、运输和储存模式对天敌投入成本的影响显著。因

此,依托实际生产应用中的各项经济相关参数,系统评价天敌昆虫生产与应用成本、最终作用靶标农产品的经济效益,对终端用户直观了解天敌昆虫对农业生产的贡献度,量化评价生物防治作用效果有着极为重要的意义。

尽管现有的研究报道中,用于天敌昆虫生物防治的经济评价模型或方法十分有限,但是Reichelderfer(1984)系统地提出了基于生物防治的直接用户净收益为基础的分析方法,比较了生物防治与其它防治手段应用后的收益差异。尽管影响生物防治控害效果的因素很多,但是这一比较方法基本涵盖了天敌昆虫应用时在基本投入成本、目标害虫的理论损失率、控害效能和作物的产量与价值等因素,对于生物防治产生的经济效益影响可以实现较为精准的定位分析(万方浩, 1991)。为了系统描述和比较天敌昆虫生物防治与有害生物综合防治技术在实际有机蔬菜生产应用产生的经济效益差异,我们在北京地区选择有机农场,围绕设施番茄生产中的烟粉虱防控,分别于 2020 和 2021 年的 4-8 月间进行天敌昆虫控害和常规有机杀虫管理(有机植保/植物源杀虫管理),通过比较两个不同植保技术应用场景间在控害效果、作物产量、不同因素环节的经济成本以及最终经济效益,明确天敌昆虫生物防治与常规防治技术的经济效益差异。本研究不但为我们系统评价天敌昆虫生物防治应用的收益度提供了技术方法,也为我们推进天敌昆虫产业化应用和精准评价奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 研究地点的选择与作物定植管理

本研究选择北京诺亚有机农场作为试验地点(北京市昌平区马场营镇, E117.02, N40.14)。

诺亚有机农场以云打路为分界线,地理上隔离为西区 and 东区两个独立的生产区域。分别在东区和西区各选择 3 个同样规格的生产温室(共 6 个,规格皆为:净种植面积约 1 200 m²/温室,宽 8 m×长 140 m)。本研究分别于 2020 年和 2021 年的 4-8 月间展开,并用塑料棚膜将两区域中的 6 个温室分别间隔为两个相同大小的地块,分别作为生物防治应用区和有机 IPM 防治应用区($n=6$,

图 1)。所用番茄(仙客 8 号,国家蔬菜工程技术研究中心提供)于育苗车间内培育至有五片真叶时,在 4 月最后一周按照图 1 所示分布进行移栽定植。在东西区 6 温室共 12 个试验区域内,在 5 月 10 日于奇数行奇数株上均匀接种新羽化的烟粉虱成虫(30 对/株),作为试验防治对象。不同试验区域(图 1)依照后述试验处理进行相关虫害防治技术应用。

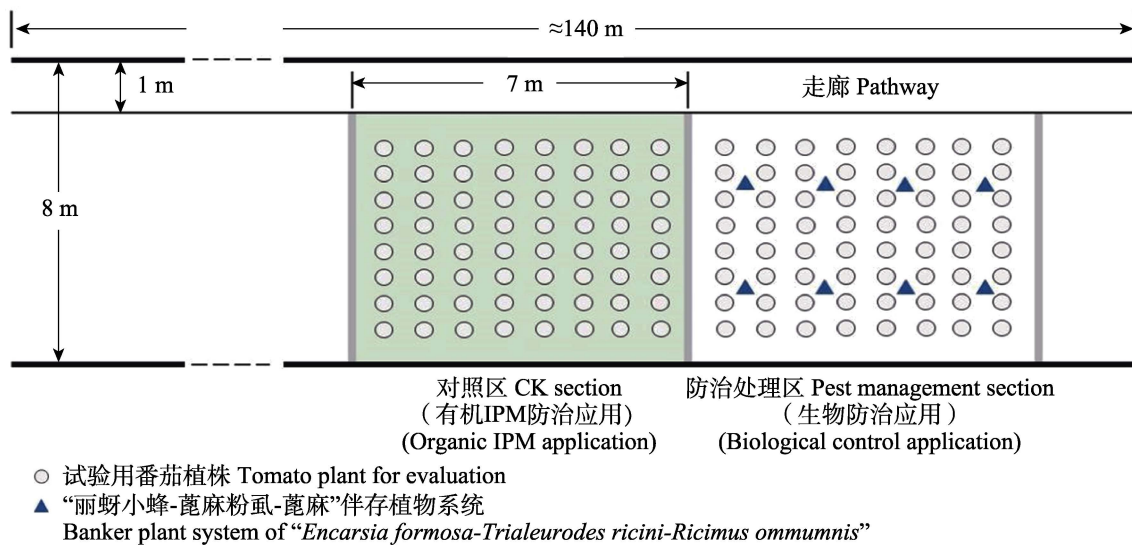


图 1 试验布局图

Fig. 1 Experimental design of different pest control management in the commercial greenhouse

本研究中以害虫生物防治作为主要评估内容,其它农事操作管理及病害植保管理均依照欧盟有机认证温室番茄生产规程(Ecocert OSE V-05.3)中所述操作内容和植保投入品管理方案进行。天敌生防区和常规有机植保区仅在害虫防治方案方面有所差异。

1.2 害虫防治方法试验设计

如图 1 所示,每一温室重复中共包含两个独立隔离的试验区域,每一区域面积相同且定植番茄植株数量相同,并于同一时间接种同样数量的烟粉虱虫量。本研究中一个区域为对照区(有机 IPM 防治应用区,下同),区域内实行基于欧盟有机标准许可的杀虫剂定期应用来抑制烟粉虱种群的发展为害。所用药剂选择除虫菊素(1.5%除虫菊素水乳剂,云南南宝生物科技有限责任公司)。依照园区生产实际需求和欧盟有机相关标

准,采取预防性定期施药,自 5 月 21 日起每 10 d 施用一次至 8 月底。所有试验温室内对照区采用同样频次用量施用,并折合为相应的杀虫成本计量(基准用量为 150 元/次/棚)。而在生物防治处理区(生物防治应用区,下同)内,我们基于前期烟粉虱种群动态监测历史数据和当年气象数据预测,采用烟粉虱爆发前期接种试释放由“丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* + 蓖麻粉虱 *Trialeurodes ricini* + 蓖麻 *Ricinus communis*”组成的储蓄植物系统对靶标害虫种群加以控制(Chen *et al.*, 2022)。单个储蓄植物系统包含:丽蚜小蜂雌成虫 25 头、蓖麻粉虱 100 头和带有 >5 片真叶的蓖麻 1 株。在本研究中,于当年的 5 月 21 日,6 月 21 日,7 月 21 日共释放 3 次。总释放基准量为[2 000 头丽蚜小蜂/667 m²/次 ≈ 250 元/667 m²/次(含储蓄植物和替代猎物成

本)]。试验中所投放的储蓄植物数量依照图 1 所示的布设方式和用量折算后, 按时投放至防治处理区。

1.3 数据收集与防治效果评价

本研究以系统比较常规有机植保管理和天敌昆虫应用对害虫生物防治在防效以及经济效益方面的差异作为主要研究内容。首先我们于试验各年 5 月 20 日、6 月 20 日、7 月 20 日和 8 月 20 日, 分别于各试验区域内随机调查 15 株番茄植株, 统计其所有叶片上烟粉虱若虫总量作为有害生物的种群密度, 并以 5 月 20 日所得烟粉虱种群数量作为基准, 计算每一时间点的烟粉虱降低率以及总生产周期的烟粉虱种群降低率。与此同时, 调查区域内每一株番茄植株并确认其是否受到烟粉虱侵害, 并计算区域内害虫个体为害导致的潜在损失的产量损失系数 (D =被危害植株数/全部植株数); 在每一观测时间点统计每株番茄的单位产量 (kg), 并计算实际的产值收益以及全生产期的总收益。

在本研究中, 我们依照 Reichelderfer (1995) 提出的经济效益变量 B 来评价比较相同作物与初始害虫发生情况下, 施用杀虫剂和释放天敌控害后在不同时间点和同生产周期内经济效益的差异。经济效益变量 B 计算如式 (1) 所述:

$$B = P(Q - (DN)(1 - E))C - g(V)$$

式中: P 为每一单位产量的价值 (以基地实际出售价格为准, 2020 年和 2021 年分别为 44 元/kg 及 49 元/kg); Q 为区域内番茄的单位产量 (kg/株); D 为害虫个体为害导致的潜在损失的产量损失系数; N 为有害生物 (本研究为烟粉虱) 的种群密度; E 为防治方法 (本研究中为有机 IPM 防治和天敌生物防治, 下同) 所达到的害虫种群减少率; C 为防治方法投入的直接费用成本; $g(V)$ 为环境变量等影响的变异性测量的风险效益修正函数 (在本研究中拟认定所有其它风险效益不存在, 因此 $g(V)$ 计为 0)。

1.4 统计分析

本研究中所得各组观测数据经 K-S 检验均

符合正态分布。本研究中我们以不同害虫防治处理作为独立变量, 不同观测时间点为协变量, 通过一般线性模型 (General linear model, GLM) 分别比较两变量及两变量交互对烟粉虱种群动态, 和各 Reichelderfer 经济效益变量涉及的各主要参数的影响。并利用独立样本 t 检验比较两害虫防治处理间在 Reichelderfer 经济效益变量上的差异度 ($P < 0.05$)。统计分析均在 R-code v4.1.1 (R-Project, 2021) 完成。

2 结果与分析

应用丽蚜小蜂储蓄植物系统和常规有机植保管理对温室番茄上烟粉虱的防治效果存在显著差异 (图 2)。以观测时间为协变量, 不同害虫防治方法为独立变量的多因素方差分析表明: 有机 IPM 处理和天敌生物防治处理对番茄上烟粉虱的控制能力没有显著差异 (2020: $F=0.12$, $df=1$, $P=0.62$; 2021: $F=3.186$, $df=1$, $P=0.133$); 而烟粉虱种群密度随着两种控制方法的应用随时间显著下降 (2020: $F=122.13$, $df=3$, $P < 0.001$; 2021: $F=166.31$, $df=3$, $P < 0.001$); 最终不同虫害防治处理和观测时间对烟粉虱密度的交互作用未见显著差异 (2020: $F=1.32$, $df=3$, $P=0.11$; 2021: $F=2.778$, $df=3$, $P=0.061$)。

基于不同观测点的数据采集结果, 我们可以获得各用于计算 Reichelderfer 经济效益变量的主要参数, 如表 2 所示。其中产量损失系数 D 在两不同害虫防治处理中均随着观测时间的增加显著下降, 而不同害虫防治处理对产量损失系数却没有显著影响, 且害虫防治处理和观测时间对产量损失系数也未见显著交互作用。而对于单位产量参数 Q 而言, 无论是不同害虫处理、不同观测时间还是两因素的交互作用都对本试验中番茄的单位产量未产生显著影响。在本研究中, 我们采用的是同质化的害虫处理方法, 因此 2020 和 2021 年于同一处理不同观测时间点时的方法投入成本 C 基本相同。在有机 IPM 处理中, 每一观测重复的平均烟粉虱防治投入成本为 22.3 元, 同一重复中的累计投入成本为 67.2 元。

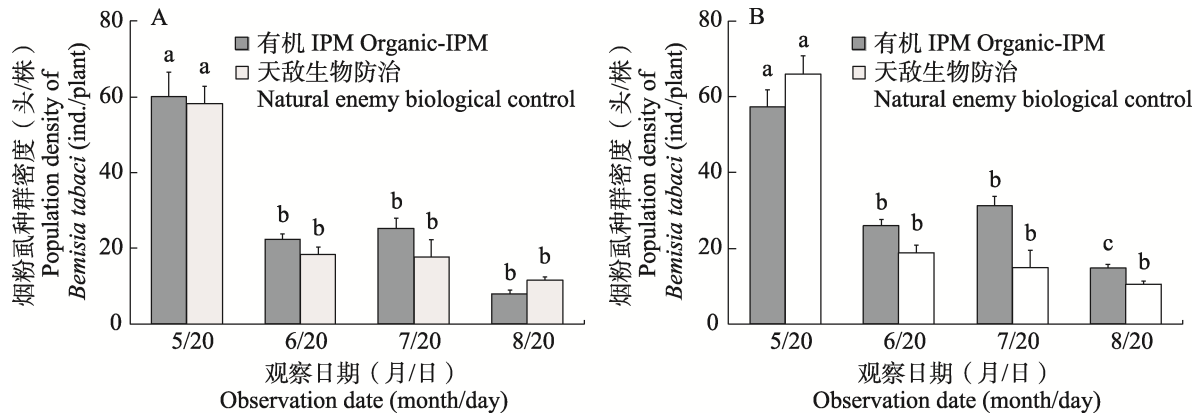


图2 2020年(A)和2021年(B)不同虫害防治技术处理区烟粉虱种群密度变化

Fig. 2 The population density of *Bemisia tabaci* suppressed by two different pest management methods in the year of 2020 (A) and 2021 (B)

图中同色柱子上方不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏多重检验)。下图同。

The different letters above bars in same color indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

表1 用于 Reichelderfer 经济效益变量计算的主要参数

Table 1 The key indexes for calculating the Reichelderfer economic beneficial variable

观测时间 (月/日) Observation time points (month/day)	2020					
	D		Q (kg/株) (kg/plant)		C (元) (yuan)	
	IPM*	BCA**	IPM	BCA	IPM	BCA
5/20	0.42±0.04 a	0.45±0.02 a	—	—	—	—
6/20	0.32±0.04 a	0.36±0.07 a	4.1±0.2 a	5.3±0.1 a	22.3	21
7/20	0.26±0.05 b	0.21±0.08 b	4.6±0.4 a	4.8±0.3 a	22.3	21
8/20	0.17±0.07 c	0.11±0.40 c	4.5±0.7 a	5.6±0.2 a	22.3	21
总试验期 Total test period	0.31±0.06	0.28±0.07	4.2±0.6	4.6±0.1	67.2	63
	2021					
	D		Q (kg/株) (kg/plant)		C (元) (yuan)	
	IPM*	BCA**	IPM	BCA	IPM	BCA
5/20	0.54±0.08 a	0.51±0.06 a	—	—	—	—
6/20	0.36±0.08 b	0.38±0.04 b	3.6±0.1 a	4.1±0.3 a	22.3	21
7/20	0.29±0.05 b	0.33±0.07 b	4.0±0.2 a	4.8±0.3 a	22.3	21
8/20	0.19±0.06 c	0.24±0.02 c	4.2±0.3 a	3.9±0.2 a	22.3	21
总试验期 Total test period	0.35±0.07	0.37±0.05	4.3±0.3	4.7±0.3	67.2	63

本表中各数据为平均值±标准误。同一处理数据后标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏多重检验)。

The values showed in present table are mean±SE. The values in same treatment followed with different letters indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test).

*IPM = 有机 IPM 防治 Organic IPM, **BCA = 天敌生物防治 Natural enemy biological control.

与有机 IPM 处理相比天敌生物防治投入由于释放次数减少, 成本相对较低。每观测时间点的投入成本为 21 元, 而总试验期内的累计成本为 63 元。

基于本试验所得烟粉虱密度变化数据和表 1

所示主要参数中的总试验期结果, 以每一试验区块为重复, 我们分别计算 Reichelderfer 经济效益变量 B 。2020 年和 2021 年所用基准单位番茄产量的价值依照当年基地出产的平均价格, 分别为 44 元/kg 和 46 元/kg。结合烟粉虱种群密度变化

计算的最终害虫种群减退率 E 和其它主要参数, 计算所得 2020 和 2021 年不同害虫防治处理下的最终经济效益变量 B 如图 3 所示。在 2020 年中, 有机 IPM 处理和天敌生物防治处理下的经济效益变量 B 分别为 9696.2 ± 665.7 和 10774.2 ± 482.5 ; 以不同害虫防治处理为独立变量的独立样本 t 检验表明两种处理间在经济效益变量上未见显著差异 ($t = -2.437$, $df = 10$, $P = 0.071$)。同样地, 两处

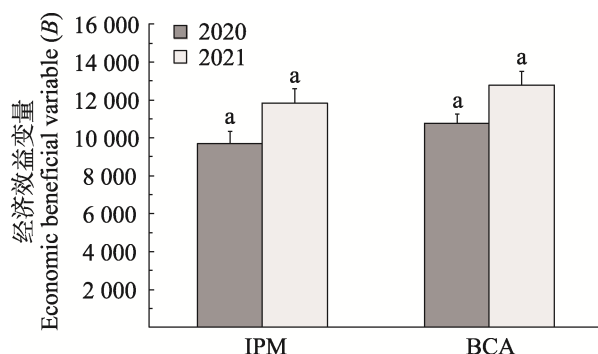


图 3 不同害虫防治技术试验周期内的 Reichelderfer 经济效益变量比较

Fig. 3 The comparison of Reichelderfer economic beneficial variable (B) during whole experimental period between organic IPM treatment and natural enemy biological control treatment

图中 IPM 表示有机 IPM 处理,

BCA 表示天敌生物防治处理。

The IPM in the chart represents organic IPM treatment, BCA represents natural enemy treatment.

理在 2021 年的经济效益变量分别为 $11\ 841.18 \pm 765.2$ 和 $12\ 791.65 \pm 694.7$, 且经独立样本 t 检验未见处理间显著差异 ($t = -4.314$, $df = 10$, $P = 0.065$)。

3 讨论

随着现代绿色农业的发展与国民环保意识的增强, 农产品质量安全和食品安全已经成为影响人民生活水平的重中之重。与之相对应, 如何减少在农业病虫害防止中化学杀虫剂的投入, 更是成为现代植物保护产品技术研发的核心(光映霞和魏忠华, 2015)。在过去 60 年间, 随着天敌昆虫资源开发的不断深入和规模化饲养技术的持续提升, 天敌昆虫对农业害虫的生物防治应用规模越来越大, 并且在一定程度上替代减少了化

学杀虫剂的滥用(林乃铨, 2010)。但是随着产业需求的不断加大, 如何评价天敌昆虫控害效果, 特别是结合实际生产的经济效益评价, 却一直缺乏相应的研究。这就使得天敌昆虫和其它农业病虫害防治技术之间在产业应用的量化反馈和管理上存在着一定的短板。在本研究中, 我们以易于管理和数据收集的有机设施蔬菜农业生态系统为研究对象, 通过构建单一的“作物-害虫-防控技术”研究系统, 直观又准确地反映出常规有机 IPM 施药防治和天敌昆虫生物防治之间在控害效果、农产品收获水平以及抽象经济效益变量等方面的差异。研究结果表明, 利用有机植保药剂和通过接种式释放天敌昆虫, 可以对烟粉虱发挥同样的控害功效, 且两者在番茄植株保护、生产能力等方面没有显著的差异影响。最终, 应用天敌昆虫在替代杀虫剂施用的同时, 并未造成显著的经济效益下降。

本研究结果表明, 应用接种式并辅助以储蓄植物系统定期释放丽蚜小蜂, 可以对烟粉虱种群增长产生显著的抑制作用, 并且和喷施有机 IPM 许可的杀虫剂效果相同。更为有效的是, 天敌昆虫并没有表现出阶段性控害的滞后性。虽然天敌昆虫施用的次数(3 次)远小于杀虫剂喷施的次数(11 次), 但是在每一试验观测时间点上两处理间对烟粉虱种群的抑制作用均未见显著差异, 且防治处理和观测时间的交互作用也未达到显著水平。现有的大量研究已经证明天敌昆虫在防控害虫上的可行性, 而如何提升其控害的效率、持续效果和投入成本是目前推动天敌昆虫广泛应用的关键问题(张帆等, 2015)。在害虫爆发早期寻找控害最佳的释放机会窗口期(Opportunity window period), 以接种式释放(Inoculative releasing)替代淹没式释放(Inundative releasing)可以减少天敌昆虫的初期投入成本(王甦等, 2007)。而利用“蓖麻粉虱+蓖麻”作为支撑植物和替代寄主与丽蚜小蜂组成储蓄植物天敌释放增殖系统时, 尽管单次投入天敌昆虫的数量十分有限, 但是依靠替代寄主和支撑植物的辅助与庇护, 可以让天敌在靶标生态系统内顺利定殖(Chen et al., 2022)。可以在

害虫种群被抑制的同时,让天敌依然停留在靶标生态系统内,实现持续控害。精细化调整天敌昆虫投入释放方法,以少投入、自增殖、长控害为目的的保护型生物防治一改传统和杀虫剂施用相似的投入策略,在大幅减少天敌投入数量和频次的同时,保证了天敌昆虫持续稳定的控害效果,是将来天敌昆虫生物防治应用的核心技术之一 (Gardarin *et al.*, 2018)。

与使用杀虫剂相比,应用天敌昆虫显然可以带来更高的生态收益和环境收益。应用生态服务效率和生态系统稳定评价方法可以帮助我们系统评价天敌昆虫生物防治在生态安全上的收益 (Rodriguez-Saona, 2020)。但是与之相比较,天敌昆虫应用对于靶标作物收获以及随后产生的经济效益缺乏系统研究。以至于目前对于天敌昆虫的作用评价多停留在是否可以实现害虫防治这一初级层面,无法向一线生产者提供精准直观的控害经济收益数据 (Hodel, 2015)。而在产业层面,让更多一线农业生产者明了天敌昆虫控害在实现大幅提升生态收益的同时,是否会影响其最终经济收益是推动天敌昆虫推广应用的重中之重 (万方浩等, 2008)。在本研究中,我们综合评价了不同害虫防治处理对作物生产的影响。与对烟粉虱的抑制作用相似,天敌昆虫生物防治应用并没有造成更为严重的害虫危害。个体危害导致的番茄潜在损失的产量损失系数 D 在两处理间,在两年的重复内未见显著差异。这说明天敌昆虫完全可以实现与杀虫剂同样的整体作物保护水平。而在番茄产量方面,天敌昆虫的应用并未影响番茄的实际产量,其单位面积产量和有机 IPM 杀虫剂应用处理未见显著差异,甚至在总试验期平均产量略高于杀虫剂处理。而统计有机 IPM 处理和天敌生物防治处理的成本可以看出,合理应用高效助增释放技术可以使得天敌昆虫应用成本降低至与杀虫剂施用相同得水平。本研究结果直接证明了合理利用天敌昆虫保护型生物防治技术在成本平衡上的优势。最终的 Reichelderfer 经济效益变量比较更进一步证明了天敌昆虫生物防治与有机 IPM 控害技术在经济效益上的同效性。考虑到天敌昆虫应用后番茄产

量略高这一因素,经济效益变量在生物防治处理内还略高于有机 IPM 处理。综合考虑天敌昆虫带来生态效益和经济效益,其在设施农业中的收益将显著大于杀虫剂的使用。但是本研究在进行经济效益评价时,设定各植保技术应用的风险效益 $g(V)$ 不存在。而在实际生产中由于天敌昆虫在生产、储存、运输环节存在一定的随机损失,而天敌自身的保育增殖也存在着环境影响变数,因此风险效益会在某种程度上大于杀虫剂。因此我们需要延伸我们的研究体系至天敌昆虫生产应用的全部环节,才能做出更为精准的评价。

总而言之,本研究以设施番茄上烟粉虱的周期性防治为试验体系载体,以经济效益评价为核心研究了有机 IPM 杀虫剂和天敌生物防治控害技术在防控效果、作物产量以及其它经济参数的影响差异,并最终经济效益变量评价了天敌昆虫在实际应用中的经济收益水平。我们希望通过本研究推动天敌昆虫应用的量化评价和经济学评价,为进一步推广应用天敌昆虫奠定理论基础。

参考文献 (References)

- Bao JZ, Gu DX, 1998. Biological control in China. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press. 664. [包建中, 古德祥, 1998. 中国生物防治. 太原: 山西科学技术出版社. 664.]
- Chen X, Jaworski CC, Dai HJ, Liang YY, Guo XJ, Wang S, Zang LS, Desnoux N, 2022. Combining banker plants to achieve long-term pest control in multi-pest and multi-natural enemy cropping systems. *Journal of Pest Science*, 95(1): 685–697.
- Gardarin A, Plantegenest M, Bischoff A, Valantin-Morison M, 2018. Understanding plant-arthropod interactions in multitrophic communities to improve conservation biological control: Useful traits and metrics. *Journal of Pest Science*, 91(3): 943–955.
- Guang YX, Wei ZH, 2015. Pesticide Residues and Agricultural Product Safety. Kunming: Yunnan University Press. 322. [光映霞, 魏忠华. 2015. 农药残留与农产品安全. 昆明: 云南大学出版社. 322.]
- Hoddle MS, 2015. Arthropod Biological Control in Support of Conservation: A prescient Approach for Invasive Species Management. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 125.
- Jaworski CC, Xiao D, Xu QX, Ramirez-Romero R, Guo XJ, Wang S, Desnoux N, 2019. Varying the spatial arrangement of synthetic herbivore-induced plant volatiles and companion plants to

- improve conservation biological control. *Journal of Applied Ecology*, 56(5): 1176–1188.
- Lin NQ, 2010. Biological Control of Pest Insect. Beijing: Science Press. 384. [林乃铨. 2010. 害虫生物防治. 北京: 科学出版社. 384.]
- Mace-Hill KC, 2015. Understanding, using, and promoting biological control: From commercial walnut orchards to school gardens. Doctor dissertation. Berkeley: University of California.
- Reichelderfer K, 1984. Factors affecting the economic feasibility of the biological control of weeds. VI International Symposium on Biological Control of Weeds. Vancouver, Canada. 135–144.
- Rodriguez-Saona C, 2020. Biological control, ecology and application. *Conservation Biology*, 34(5): 1318.
- R-Project, 2021. The R manuals, CRAN: Manuals (www. r-project. org).
- Wan FH, 1991. Scientific and Economic evaluation of biological control projects. Transactions of the Ecological Society of Chinese Youth. Vol. 1. 304–307. [万方浩. 1991. 生物防治计划的科技及经济评价. 青年生态学者丛论(一). 304–307.]
- Wan FH, Li BP, Guo JJ, 2008. Biological Invasions: Biological Control Theory and Practice. Science Press. 596. [万方浩, 李保平, 郭建英, 2008. 生物入侵: 生物防治篇. 北京: 科学出版社. 596.]
- Wang S, Zhang RZ, Zhang F, 2007. Research progress on biology and ecology of *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(9): 2117–2126. [王甦, 张润志, 张帆, 2007. 异色瓢虫生物生态学 研究进展. 应用生态学报, 18(9): 2117–2126.]
- Zeng FR, 2018. Research of insect artificial diet. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(2): 184–197. [曾凡荣, 2018. 昆虫人工 饲料研究. 中国生物防治学报, 34(2): 84–197.]
- Zhang JH, Guo L, Miao L, Meng Q, Zhang H, Tong Y, Wang HT, Li X, Lü P, Wang JP, Yin SQ, Qin QL, 2022. Evaluation of the effectiveness, environmental benefit and cost-effectiveness, of using *Trichogramma dendrolimi* as a biological control for sorghum pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 689–696. [张继红, 郭力, 苗麟, 孟茜, 张寰, 佟岩, 王红托, 李瑄, 吕芑, 王金萍, 殷三强, 秦启联, 2022. 松毛虫赤眼蜂 对高粱害虫的防效及生态经济效益评估. 应用昆虫学报, 59(3): 689–696.]
- Zhang F, Li S, Xiao D, Zhao J, Wang R, Guo XJ, Wang S, 2015. Progress in pest management by natural enemies in greenhouse vegetables in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(17): 3463–3476. [张帆, 李姝, 肖达, 赵静, 王然, 郭晓军, 王甦, 2015. 中国设施蔬菜害虫天敌昆虫应用研究进展. 中国农业 科学, 48(17): 3463–3476.]
- Zhang LS, Chen HY, 2016. Achievements and prospects in introduction of natural enemy insects and biocontrol Microbial agents in China over the last three decades. *Plant Protection*, 42(5): 24–32. [张礼生, 陈红印, 2016. 我国天敌昆虫与生防 微生物资源引种三十年成就与展望. 植物保护, 42(5): 24–32.]