

特 约 稿 件

Invited Paper

天敌产业化是全链条的系统工程

吕佳乐, 王恩东, 徐学农*

(中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要 天敌昆虫及捕食螨在害虫害螨等的防控中发挥着重要作用, 而其产业化在其中起着重要的支撑作用。天敌产业化受到多种因素的影响, 包括技术、服务、理念、政策等多个层面。它是全链条式的, 各个环节紧紧相扣, 任何一个环节的断裂都会影响到整个产业化发展。本文着重技术及服务等层面的分析与思考, 强化全产业链理念, 希望对我国天敌产业化发展起到一定的推动作用。

关键词 天敌昆虫及捕食螨; 产业化; 全链条; 系统工程

中图分类号: S 476 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2017.03.001

Industrialization of natural enemies is a whole chain of system engineering

Lü Jiale, Wang Endong, Xu Xuenong

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

Abstract Natural enemies play an essential role in controlling pest insects and mites. This function should be strongly supported and guaranteed by commercialized production. The industrialization of natural enemies is affected by many factors, including production techniques, customer services, public ideas and governmental policies, etc. It is a full chain with all the links closely connected. Any loose link in the chain will greatly injure the industry. In this article, we discussed major links of techniques and services in this chain, especially emphasizing the integrity of whole production chain, and hope to push the development of the industrialization of natural enemies in China.

Key words insect natural enemies and predatory mites; industrialization; full chain; system engineering

近年来,随着化学农药大量滥用导致的害虫抗性 & 农产品与环境安全性等问题日渐突出,化学农药减量使用的观点早已深入人心。而生物防治作为化学防治的重要替代之一,其概念即使是农民种植户也并不陌生。然而,在实际病虫害防控中,这些生产者往往仍然表现出对化学农药的强烈依赖,与之相对的则是对采用释放天敌等生物防治方法表现得极度的保守。

对于生物防治的有效性,即使在专业人士中也不乏质疑者。Collier 和 van Steenwyk 综述了在美国释放天敌进行生物防治的现状,认为其只有在不到 15% 的应用中是成功的^[1-2]。这一观点虽然遭到荷兰瓦赫宁根大学资深生物防治研究专家 van Lenteren 的反对^[3],但其本人也在几年后承认,虽然国际上已经有较多的天敌品种达到了工厂化生产的水

平,但生物防治应用总体发展缓慢^[4]。他认为,农民、农药生产商及政府部门等方方面面都存在对于生物防治的消极态度。而未来可能转变这些态度的条件则包括:害虫对化学农药的抗性致使化学防治效果下降,食品产业链对农残标准提高限制化学农药使用,普通民众对农残问题的关注度提高等。van Lenteren 所在的荷兰是世界上生物防治最为发达的国家之一,拥有世界最大的天敌公司。因此,以上关于生物防治所面临的挑战与机遇的总结,是以发达国家天敌产业本身已经相对成熟为基础提出的。而对于发展中国家如中国,在思考如何真正推动生物防治发展时,首先更需要回答的是,我们是否已经形成足够优秀的天敌产品和足够成熟的生防天敌产业,以改变民众的观点,支撑技术的落地?

收稿日期: 2017-04-15 修订日期: 2017-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2013CB127602);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2016PT13)

* 通信作者 E-mail: xnxu@ippcaas.cn

1 我国天敌产业现状

目前,世界上生产的天敌种类超过 150 种,然而年产量达到 500 万头以上的仅有 60 余种^[4],占整个天敌生产种类的 40%。我国的天敌资源丰富,具有成为天敌产品的潜力物种很多,已先后开发出一些优良的天敌品种与种类。然而,目前我国能够年产能达到一定水平、真正开展较大规模田间应用的天敌品种仍相当有限,仅赤眼蜂 *Trichogramma* spp.^[5]、捕食螨^[6-7]、平腹小蜂 *Anastatus japonicus* Ashmead^[8]、白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang^[9]、烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead^[10]等为数不多的几种。一些被认为是“产品”或者具有产品潜力的天敌,实际上仅仅是可以在实验室养虫笼中进行饲养,产量有限,仅能满足科研需求与极少量的示范应用。一些优势天敌的规模化生产虽然早已具备理论可行性,但是实际产业化程度仍然不高。以小花蝽 *Orius* spp. 这类重要的多食性天敌为例,其作为天敌,从 20 世纪 70 年代起已经引起关注^[11-12],90 年代开始关注大量饲养的可能性^[13],至今已经陆续开发出了多项连续生产相关技术。然而,仍缺少一条十分成熟或全链条的生产线,离成为一个产业还有一定的距离。

尽管 Yang 等^[14]报道我国当时共有 7 家天敌企业,共生产 21 种天敌。但实际上,时至今日,在淘宝等大型交易平台上,即使在世界范围内相当成熟的天敌产品(如赤眼蜂、捕食螨等)也乏善可陈,仅有的商品成交量也很低。与海量的化学农药商品类型及成交量不成比例。可见这些产品的应用仍然停留在由科研和推广单位扶持并主导推广的层面,并未真正成功地打入市场。

2 天敌产业化落后的原因

天敌产业化落后的原因,我们认为主要是从实验室到工厂再到市场之间存在断层,即产学研用未能有效结合。我们不缺乏天敌相关的科研团队,但在评价天敌物种的生物防治潜力时,科研人员往往着眼于寻找理论上的最优解(如最大捕食量、发育最适温度等等),而忽略思考这些最优解在实际应用中是否易于实现。一种天敌产品能够最终为用户所接受,必须有较高且稳定的防效、相对低的生产成本、简单易操作的应用方法等。而与之比较,以科研为

目的的饲养往往不计成本,以试验为目的的田间应用能够取得较好的效果通常依赖于科研人员的高技术水平。这些都是最终用户所难以接受或做到的。

基础生物学研究固然重要,但仅仅是天敌产品在早期开发过程中的环节之一。要形成真正的天敌产业,从筛选、规模化生产、产品包装、存储、运输、田间应用等必须环环相扣,形成一个完整的链条。任何一个环节上的缺失都会导致整个链条的断裂,从而阻碍天敌产业化发展。综观我国目前现状,大多天敌产业链条或多或少是不完整的,在许多环节都存在薄弱点。

正是由于这些薄弱点或断层存在,使得即使人人都知道生物防治是一个很好的理念,也难以改变用户对不少生防产品“效果差、价格贵、使用麻烦”的诟病。要推动生物防治产业的发展,科研工作者应努力调整视角,在天敌研发的起始阶段就得思考从产前到产后整个产业化路线及应用路线,真正做到把有潜力的天敌物种转化为实实在在的天敌产品。

3 天敌产业化过程中应解决的问题

3.1 产前:以实现产业化目标去筛选天敌

3.1.1 室内筛选与田间评价相结合

我们需要什么样的天敌,答案是比较明确的:针对靶标害虫能够有效防控的天敌。但何为有效?如何判断一种天敌是否有效?通常的做法是通过评价其捕食量或寄生率、功能反应、以靶标猎物或寄主为食的发育繁殖等生物学参数、抗逆性等等。然而,过去许多对于天敌的生物学生态学评价停留在室内试验,其结果往往不适用于田间实际情况。在室内试验,尤其是一些在小室等较小环境中开展的捕食量或寄生率试验中,天敌的行为与在田间自然条件下的行为完全不同。以这类试验结果预测防治效果,简单推定捕食量大或寄生率高的天敌会具有较高的防效往往失之偏颇。

例如,多种瓢虫的幼虫与成虫都能够大量捕食蚜虫而被认为是重要的天敌,但不少研究显示瓢虫释放到田间后成虫会在很短的时间内扩散消失、难以定殖^[15-17],不仅无法起到良好的防治作用,而且,如异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (Pallas)等竞争与扩散能力很强的品种甚至在欧美国家成为外来入侵种^[18-19]。针对这一问题,国外已有不少研究关注无翅、无飞行能力的瓢虫的选育与应用,以增加其定殖

的可能性,以及减少扩散可能造成的生态风险^[20-25]。可见,科研人员在筛选天敌品种、评价防控潜力时,需要全面考虑扩散等在室内试验中容易被忽略的因素,并针对性地寻求解决方法。

实际上,在天敌的筛选评价过程中,田间评价是最终无法回避的。但田间环境不确定性较强,田间评价往往需要根据实际情况设计试验,很难形成一种标准化流程。Furlong 和 Zalucki^[26]汇总了 2003—2008 年期间,发表在昆虫学及应用生态学 11 本顶级杂志中的 54 项有关鳞翅目害虫捕食性天敌田间评价的相关研究,认为其中 76% 的研究未能在真正适当的生态环境中评价天敌的防治潜力及 IPM 决策的合理性。总体来说,我们认为在田间评价时应该“通盘考虑,各个击破”。首先全面考虑天敌在田间应用时可能面临的环境影响,然后以可以获得指导实际应用的结论为出发点设计试验,在可能的情况下减少变量,从最重要的影响因子开始,逐一分析其影响,避免贪多糅杂过多因子。

3.1.2 强化抗性品系筛选

农药目前仍然是害虫防治中最有效且难以舍弃的方法。化学农药抗性是害虫防治过程中让人头痛的问题,但高抗性的天敌品种或品系,却可以有效提高其与化学农药的兼容性。我国目前在天敌产品的筛选与开发中,更多注重物种的挖掘,而对于在物种内进一步细分、开发具有不同生物学性状(如不同抗性能力)的产品的重视程度略低。同一物种间不同品系对于药物的抗性等生物学学习性无疑存在差异,而这种差异很可能直接影响到生物防治成功与否。我们在评价天敌与化学农药兼容性时,必须考虑同种天敌的不同品系可能存在抗性差异,需要分别评价。而应用天敌前,首先考虑该环境中常用的、不可避免的农药是什么,而优先选择对此类农药具有较高抗性的天敌品系^[27-28]。

Bielza^[29]报道,根据美国密歇根州立大学节肢动物农药抗性数据库(APRD, Arthropod Pesticide Resistance Database, Michigan State University)的数据统计,截至 2015 年 8 月,共有 593 种昆虫和螨类(13 627 例)被报道对至少一种化学农药存在抗性。其中有 336 种(8 916 例)为农业害虫,仅 38 种(304 例)为天敌。总体来说,世界范围内对于天敌昆虫抗性的关注度和相关研究都少于对于害虫抗性相关研究。在我国的天敌产品研发与应用中,对于

抗性天敌的开发力度尤其亟待加强。

植绥螨科 Phytoseiidae 捕食螨是最早有抗性品系相关报道的天敌类群,也是目前国际上报道的抗性物种最多、最具有选育潜力的天敌。在 APRD (2015)中所统计的 38 种存在抗性品系的天敌物种中,有 17 种是植绥螨,约占 45%。在 82 例抗性报道中,出现最多的前 8 种天敌中,有 6 种是植绥螨。美国最早选育并应用的就是抗有机磷的西方静走螨 *Galendromus occidentalis* (Nesbitt),它也是我国最早引进的抗性捕食螨品种。

我国近年来捕食螨相关研究虽然发展较快,但抗性品系相关报道仅 10 例左右,且大部分是 20 世纪八、九十年代的报道^[30-35]。近年来,仅陈霞等^[36]开展了胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans)抗阿维菌素品系的筛选工作,西南大学筛选出抗高效氯氰菊酯和毒死蜱 500 倍的巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* (Hughes)抗药品系^[37]。加快、加大力度开展天敌抗性品种与品系选育,在天敌的筛选中就显得尤为重要了。

3.2 产中:以实现产业化目标去生产天敌

对于有高防控潜力的天敌,就需要进一步考虑实现大量饲养的可能性:首先要弄清楚饲养有几个基本环节,每一个环节是否可以环环相扣、无缝链接——食料是否易低成本取得?操作是否简单易行?饲养环境是否能保持长期稳定?等等。实验室养虫笼中的饲养成功与产业化相去甚远。一种成功的产业化天敌,其整个生育期必须能够在较低的成本下连续饲养,形成易于放大且可复制的生产流水线。在这一过程中,科研人员应重点突破成本高、难度大的技术瓶颈,避免“短板”效应。

3.2.1 发掘替代猎物或人工饲料,简化饲养流程,降低饲养成本

替代猎物或寄主的发现,有效降低了天敌的生产成本。植绥螨科的多食性捕食螨过去曾主要通过“寄主植物—靶标猎物—捕食螨”的生产链条进行饲养。Schliesske^[38]发现胡瓜新小绥螨和巴氏新小绥螨能够采用替代猎物粉螨饲养后,这两种捕食螨的生产成本降为原来的几十分之一,使其在田间的大量释放成为可能,并在国际上迅速成为了规模化程度最高的天敌产品。这种规模化生产方式的革新也为后续其他种类的多食性捕食螨产业化饲养提供了新思路。

国内利用柞蚕 *Antheraea pernyi* Gnérin-Méneville 卵饲养赤眼蜂是世界天敌昆虫规模化生产中的一大创举。20 世纪 70 年代起应用中间寄主柞蚕卵繁育赤眼蜂, 繁蜂效率大大提高, 防控范围在国内迅速扩大, 涉及 26 省市多种农林害虫。我国由此成为世界上赤眼蜂应用最广的国家^[39]。而以易于生产的人工饲料作为天敌的食物, 则是在利用替代猎物饲养天敌的基础上又更进了一步。如人工卵繁殖赤眼蜂^[40]及微胶囊剂型的人工卵^[41]饲养小花蝽技术等。

在降低生产成本方面, 还有一些其他的办法。小花蝽的规模化饲养中, 产卵基质一直是一个技术难点, 目前大部分饲养仍然需要寄主植物。De Puyssseleyr 等^[42]尝试采用蜡膜包裹湿棉花作为产卵基质, 得以在无植物基质的环境中连续饲养小花蝽, 亦使其生产成本大大降低。只有在饲养的每一个环节都形成这样成本低、操作简单的技术或方法, 才能避免优秀的天敌只能在实验室饲养, 始终无法真正成为产品的困境。

3.2.2 天敌粗产品成为田间可直接应用的终产品

一个优秀产品除了天敌能被成功饲养外, 还需关注与包装、贮存、运输、应用相关的产品形式。科研人员往往过于关注天敌繁育本身, 仅考虑如何实现天敌扩繁, 而忽视后续的包装贮存等程序。如果没有将天敌简单方便地应用到田间的产品形式, 产品依然不是真正意义上的产品, 而只能说是粗产品。

以天敌包装为例, 大量繁殖的天敌, 通常会与生产介质、猎物等混在一起。田间应用时, 可能并不需要这些成分。因此, 天敌的分离技术是天敌产业化方面的重要课题。另一方面, 天敌之间多数存在自相残杀行为, 尤其在缺乏猎物的情况下。因此在分离纯品的同时, 还需要考虑如何减少天敌自残——如捕食螨、小花蝽、草蛉等产品通过包装中添加粗蛭石、荞麦壳或直接制成小室单独包装, 不仅可以通过减少天敌个体间遭遇的机会来减少自残、增加存活率, 也利于田间撒放或相对定量释放。

此外, 还需要深入挖掘、开发有可能提高天敌利用效率、降低劳动力成本等多方面优化产品的包装形式。如为了实现天敌单次释放达到多次释放的效果, 并在田间持续发挥作用, 会将天敌包装成自繁育体系、或将不同发育阶段的天敌包装在一起。如前者的产品挂放到田间后, 形成一个微型的天敌生产车间, 会在一段时间内不断产生新的天敌个体, 并从

繁育体系中逸出及向外扩散, 如捕食螨的缓释袋产品形式。后者根据发育生态学规律, 把不同发育阶段的同种天敌包装在一起, 会起到同样的效果。如德国的一种寄生蜂产品, 把不同发育阶段的寄生蜂包装在一起, 释放后会在不同时间羽化, 同样起到了缓释作用。

又如, 针对田间几种不同的靶标害虫, 把不同种天敌包装在一起应用, 起到同时控制多种害虫的目的。如 Koppert 公司的天敌产品 ENERMIX, 将丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* (Gahan) 与紫角蚜小蜂 *Eretmocerus eremicus* Rose & Zolnerowich 包装在一起, 可同时有效防控白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) 和烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius)。这种包装的另一优势还在于, 可以避免因害虫鉴定错误而导致天敌应用错误。

赤眼蜂释放经历了从卵卡到“赤眼蜂释放球”的转变。这种释放球基于自身重心的巧妙设计, 在抛入田间后可如不倒翁一般保证出蜂口向上, 特别适合于水田中的应用, 在确保出蜂的前提下大大节约了劳动力^[43]; 在德国, 一些赤眼蜂释放球甚至由纤维素制成 (TRICHOSAFE® Biocare), 在田间完全可生物降解, 连环保都想到了!

3.2.3 规划生产规模及开发生产调控技术

天敌产品作为活体产品, 保质期受到天敌寿命的局限。生产不适时, 会造成人力、物力及财力的大量浪费。如何应对需求上存在的旺季与淡季或害虫突然暴发带来的需求量上涨? 首先需要正确评价市场的常规需求, 形成针对性的生产规模。如近年来我国捕食螨生产中形成的三级规模化繁育体系, 将其生产规模分为: 一级母种纯化保种复壮 (原种), 二级继代扩繁 (小规模生产), 三级产品化生产 (定单式大规模生产)。然后需要从生物学角度出发, 研发可确保不同生产规模之间的及时切换的相关技术。如通过调控天敌滞育的诱导与解除, 保存滞育期个体以延长产品货架期^[44]; 或在淡季通过调节饲养环境条件延长天敌的发育期、降低产卵量, 如在低温下饲养天敌等, 而在需求上升时采用最适条件恢复其快速增殖。

3.3 产后: 以实现产业化为目标的天敌质量管理、售后服务及应用与其他措施配合使用技术等

3.3.1 天敌的质量是产业化生产与应用的生命线, 需要配套的生产与质量检验标准

一种天敌产品能够成功, 不仅在技术上需要生

产业链的完整,还需要从制度上保证其标准化。从生产方法到产品质量检测到应用方法都需要形成相应的规程与标准,使生产者和用户有据可依。这也是我国目前天敌产业中所缺乏的。

目前我国尚没有任何天敌产品生产与应用相关的国家标准。仅在农业行业标准中有寄生蜂的饲养方法准则 3 项、防治技术规程 3 项,以及瓢虫的饲养方法准则、防治技术规程各 1 项,在林业行业标准中有个别寄生蜂繁育及应用技术规程。此外,还有一些捕食螨及寄生蜂等类群的地方标准。而在用户尤其关注的天敌产品质量标准方面则是接近空白,同时亦缺乏专业的评价鉴定机构。

与之比较,发达国家在标准制定方面有更专门的机构和更丰富的经验。例如,国际生物防治组织 (IOBC) 在 20 世纪 70 年代就成立了规模化饲养与质量保证工作组 (Mass rearing and quality assurance working group, MRQA),从 1982 年起每 2~4 年组织一次工作组研讨会。IOBC 在 2002 年已经形成包括捕食螨、寄生蜂、食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani)、捕食性螨等近 20 种天敌的质量检验标准,2004 年出版专著《生防作用物质质量控制与生产:理论与测试程序》(Quality control and production of biological control agents. Theory and testing procedures)^[45],成为本领域的权威指导书目。美国测试材料协会 (ASTM, American Society of Testing Materials) 是美国最老、最大的非盈利性的标准学术团体之一,已经制定了针对捕食螨、寄生蜂、瓢虫、捕食螨等多种天敌类型的多项产品质量标准。明确的产品质量标准以及由此派生的可靠的产品检验机构,是用户能够放心购买使用一种产品的先决条件。在我国天敌产业未来发展中,各类相关标准的制定与完善也应该成为一项重要的工作内容。这是天敌产业化发展的基石。

3.3.2 良好的售后服务,是天敌产品应用效果的重要保证

天敌是特殊的活产品,产品生产出来到完成其实际价值事实上才完成一半工作。没有良好的售后服务,给用户以科学及时的指导,往往会事倍功半,甚至以失败而告终。同样的产品,不同的用户使用可能会产生完全不同的结果。科研人员需要始终牢记于心的是天敌产品的最终使用者是农民和种植户,他们需要操作简便、细节明确的应用方法。但田

间环境复杂、多变,而天敌作为活体产品其本身受到环境影响的不确定性也较高。这就意味着天敌产品的开发者需要帮助他们的用户找到在效果稳定性与应用可操作性之间的平衡。此外,在如今高度信息化的时代,我们还应该思考如何在科研人员、推广人员、生产者和用户之间建立起高效便捷的交流平台,以便更好地关联在天敌产业中所涉及的不同角色,使得科研人员等能够更好地了解客户的需求,提供高时效性、高针对性的应用指导。只有这样,天敌产品才能更好地发挥其应有的作用。

3.3.3 多技术及措施集成配套助推天敌产业化发展

仅仅依靠释放天敌是不能解决田间所有问题的,事实上,多数情况下,仅能解决目标害虫的部分问题。在作物全程病虫害治理的思路下,需要考虑的是,除了前述的防治害虫应与化学防治联合应用外,还需要与其他防治方法或技术联合,因为天敌昆虫或螨类对于可能出现的植物病害等往往无能为力。天敌产品应用必须整合到病虫害全程综合治理中去以实现最大的防效,也是研发者在天敌产品推广时需要考虑的问题,如果这一问题得不到合理解决,势必会反制天敌的应用,从而进一步影响到天敌的产业化进程。

3.3.4 开发天敌应用的辅助产品提高天敌应用效率

利用天敌昆虫及捕食螨对害虫进行防控,通常在害虫低密度时释放更加有效。而一旦害虫种群达到高密度时,天敌就难以发挥作用。生产上,往往会在害虫刚开始发生时,甚至害虫尚未发生时,就释放天敌。为了低成本、高效并迅速建立天敌种群,可能在天敌释放的同时使用一些辅助产品,如在释放捕食螨的同时喷撒一些狭叶香蒲 *Typha angustifolia* 花粉,不仅可促进捕食螨田间种群的建立并迅速发挥作用,还可减少人力及财力成本^[46]。比利时的 Biobest 公司已开发出相应的产品 Nutrimite™ 以及辅助盲蝽 *Macrolophus pygmaeus* (Rambur) 与 *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) 建立种群的基于丰年虾卵制成的产品 Artemac 等。

而开发机械化释放等节约人力、提高效率、易于标准化的释放方式将始终是天敌产业化发展的大趋势。如澳大利亚开始尝试使用无人机释放捕食螨,我国近来也开展了利用无人机在高秆作物上释放赤眼蜂等的相关尝试^[47]。此外,荷兰 Koppert 公司还开发出 Airbug、Rotabug 等辅助捕食螨释放的轻简

化器具。国内也急需相关辅助天敌释放与应用的产品开发。

3.4 算清生物防治的经济账

生物防治能否在植物保护中发挥应有的作用、天敌产业能否成功,最终是一笔经济账。可以简单表达为:最终效益=中长期效益+短期效益-生产成本-应用成本。

在传统评价化学防治效果的病虫害防控中,中长期效益往往是被忽视的。这也正是化学防治最大的短板。比之化学农药带来的 3R 等问题,生物防治的中长期效益优势显著。减少化学农药的使用有助于恢复农业生态系统的多样性,降低害虫大暴发的可能。而天敌如果能够多次释放建立自然种群,更能够对靶标猎物形成长效抑制机制,降低后期的防治成本。然而,对于实际生产者来说,这一部分效益显得过于遥远和不明确而往往被忽视。科研工作者和政策制定者需要建立更为量化的评价方法与标准,并通过成功案例的数据去说服受众,使其愿意把“中长期效益”纳入对于防治效益的评价体系。

这是一项任重而道远的工作,需要科研单位、推广单位以及决策者联手推进。以科研单位为主建立更合理的评价体系,由推广单位主导宣传与科普,而决策者需要理解这一过程是漫长的,并从政策与经济上给予长期支持。这是强化天敌产业链极为关键的一环。

而在此之前,要推动生物防治产业的发展,首先需要有一些优秀产品在短期的直接效益上至少能够接近化学防治所带来的效益。从目前的现状来看,生物防治的唯一优势在于应用生物防治等绿色防控方法所产生的农产品附加值较高,因此挽回损失的单位价值较高。而单纯从短期防治效果、生产成本、应用成本来看,大部分的天敌产品与化学防治相比都处于劣势。如果某一种天敌能够在以上三方面中任何一方面较化学防治形成优势,都可能在有天敌的产业化进程中形成巨大的推动。

4 结语

从 1962 年《寂静的春天》出版发行开始,人们对化学农药的反思日益深刻,而生物防治的概念在半个多世纪里不断升温。从 1968 年第一个商品化天敌产品问世,到目前数百个产品的广泛应用。与之对比,我国的天敌产业发展却相对滞后。诚然这是一个“概念先行”的产业,但若以此为借口而忽略如

何将概念落地的实际措施,那么概念终归是一张空头支票。只有政府部门、科研机构、天敌生产商、推广部门通力合作,通过政策、技术、推广等多渠道去消除天敌产品从研发、生产到应用之间的断层,才能最终推动天敌的产业化发展及规模化应用,并服务于农业与生态环境的安全。

参考文献

- [1] Collier T, van Steenwyk R. A critical evaluation of augmentative biological control [J]. *Biological Control*, 2004, 31: 245–256.
- [2] Collier T, van Steenwyk R. How to make a convincing case for augmentative biological control [J]. *Biological Control*, 2006, 39: 119–120.
- [3] van Lenteren J C. How not to evaluate augmentative biological control [J]. *Biological Control*, 2006, 39: 115–118.
- [4] van Lenteren J C. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake [J]. *BioControl*, 2012, 57: 1–20.
- [5] Wang Zhenying, He Kanglai, Zhang Fan, et al. Mass rearing and release of *Trichogramma* for biological control of insect pests of corn in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 136–144.
- [6] Niu Jinzhi, Hull-Sanders H, Zhang Yanxuan, et al. Biological control of arthropod pests in citrus orchards in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 15–22.
- [7] Zhou Hangxu, Yu Yi, Tan Xiumei, et al. Biological control of insect pests in apple orchards in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 47–56.
- [8] Li Dunsong, Liao Chunyan, Zhang Baoxin, et al. Biological control of insect pests in litchi orchards in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 23–36.
- [9] Yang Zhongqi, Wang Xiaoyi, Zhang Yinan. Recent advances in biological control of important native and invasive forest pests in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 117–128.
- [10] Wei Jianing, Li Tianfei, Kuang Rongping, et al. Mass rearing of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphididae) for biological control of *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2010, 13: 87–97.
- [11] 华中农学院棉虫天敌研究组. 棉田害虫捕食性天敌——小花蝽的初步研究[J]. *昆虫知识*, 1978 (1): 140–144.
- [12] 湖北省农业科学院植保系. 红铃虫天敌小花蝽的初步观察[J]. *湖北农业科学*, 1978(6): 17–19.
- [13] 王方海, 周伟儒, 王韧. 东亚小花蝽人工饲养方法的研究[J]. *中国生物防治*, 1996, 12(2): 49–51.
- [14] Yang Nianwan, Zang Liansheng, Wang Su, et al. Biological pest management by predators and parasitoids in the greenhouse vegetables in China [J]. *Biological Control*, 2014, 68: 92–102.
- [15] Brakefield P M. Ecological studies on the polymorphic ladybird *Adalia bipunctata* in the Netherlands. 2. Population dynam-

- ics, differential timing of reproduction and thermal melanism [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1984, 53: 775 - 790.
- [16] Obrycki J J, Kring T J. Predaceous Coccinellidae in biological control [J]. *Annual Review of Entomology*, 1998, 43: 295 - 321.
- [17] Obrycki J J, Harwood J D, Kring T J, et al. Aphidophagy by Coccinellidae: application of biological control in agroecosystems [J]. *Biological Control*, 2009, 51: 244 - 254.
- [18] Koch R L. The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: A review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts [J]. *Journal of Insect Science*, 2003, 3(1): 1 - 16.
- [19] Roy H E, Wajnberg E. From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species [J]. *BioControl*, 2008, 53(1): 1 - 4.
- [20] Ferran A, Giuge L, Tourniaire R, et al. An artificial non-flying mutation to improve the efficiency of the ladybird *Harmonia axyridis* in biological control of aphids [J]. *BioControl*, 1998, 43: 53 - 64.
- [21] Tourniaire R, Ferran A, Gambier J, et al. Locomotor behavior of flightless *Harmonia axyridis* Pallas (Col., Coccinellidae) [J]. *Journal of Insect Behavior*, 1999, 12: 545 - 558.
- [22] Ueno H, de Jong P W, Brakefield P M. Genetic basis and fitness consequences of winglessness in the two-spot ladybird beetle, *Adalia bipunctata* [J]. *Heredity*, 2004, 93: 283 - 289.
- [23] Seko T, Yamashita K, Miura K. Residence period of a flightless strain of the ladybird beetle *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae) in open fields [J]. *Biological Control*, 2008, 47: 194 - 198.
- [24] Ohde T, Masumoto M, Morita-Miwa M, et al. Vestigial and scalloped in the ladybird beetle: a conserved function in wing development and a novel function in pupal ecdysis [J]. *Insect Molecular Biology*, 2009, 18: 571 - 581.
- [25] Lommen S T, Holness T C, van Kuik A J, et al. Releases of a natural flightless strain of the ladybird beetle *Adalia bipunctata* reduce aphid-born honeydew beneath urban lime trees [J]. *BioControl*, 2013, 58(2): 195 - 204.
- [26] Furlong M J, Zalucki M P. Exploiting predators for pest management: the need for sound ecological assessment [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2010, 135(3): 225 - 236.
- [27] Bielza P, Fernández E, Grávalos C, et al. Testing for non-target effects of spiromesifen on *Eretmocerus mundus* and *Orius laevigatus* under greenhouse conditions [J]. *BioControl*, 2009, 54: 229 - 236.
- [28] Poletti M E, Omoto C. Susceptibility to deltamethrin in the predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus macropilis* (Acari: Phytoseiidae) populations in protected ornamental crops in Brazil [J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2012, 58(4): 385 - 393.
- [29] Bielza P. Insecticide resistance in natural enemies [M]// Horowitz A R, Ishaaya I, eds. *Advances in insect control and resistance management*. Springer International Publishing Switzerland, 2016: 313 - 329.
- [30] 黄明度, 熊锦君, 杜桐源. 尼氏钝绥螨抗亚胺硫磷品系的筛选及遗传分析 [J]. *昆虫学报*, 1987, 30(2): 133 - 139.
- [31] 杜桐源, 熊锦君, 黄明度. 尼氏钝绥螨抗亚胺硫磷品系生物学特性观察 [J]. *昆虫天敌*, 1987, 9(3): 173 - 176.
- [32] 杜桐源, 田肇东, 熊锦君, 等. 尼氏钝绥螨抗有机磷自然种群的研究 [J]. *昆虫天敌*, 1991, 13(2): 61 - 65.
- [33] 杜桐源, 熊锦君, 田肇东. 尼氏钝绥螨抗有机磷赣州种群的遗传分析 [J]. *昆虫天敌*, 1993, 15(1): 6 - 9.
- [34] 柯励生, 杨琰云, 忻介六. 拟长毛钝绥螨抗乐果品系的筛选及遗传分析 [J]. *昆虫学报*, 1990, 33(4): 393 - 397.
- [35] 田肇东, 杜桐源, 黄明度. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对尼氏钝绥螨抗多虫畏性状的诱导及其他生物学效应 [J]. *动物学研究*, 1993, 14(4): 347 - 353.
- [36] 陈霞, 张艳璇, 季洁, 等. 胡瓜钝绥螨抗阿维菌素品系的筛选及抗性稳定分析 [J]. *福建农业学报*, 2011, 26(5): 793 - 797.
- [37] 徐学农, 吕佳乐, 王恩东. 捕食螨在中国的研究与应用 [J]. *中国植保导刊*, 2013, 33(10): 26 - 34.
- [38] Schlieske J. Ueber die Technik der Massenanzucht von Raubmilben (Acari: Phytoseiidae) unter kontrollierten Bedingungen [On the technique for mass rearing of predatory mites (Acari: Phytoseiidae) under controlled conditions] [J]. *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent*, 1981, 46: 511 - 517.
- [39] 张俊杰, 阮长春, 臧连生, 等. 我国赤眼蜂工厂化繁育技术改进及防治农业害虫应用现状 [J]. *中国生物防治学报*, 2015, 31(5): 638 - 646.
- [40] 王素琴. 利用人工卵繁育赤眼蜂的研究进展 [J]. *植保技术与推广*, 2001, 21(5): 40 - 41.
- [41] 谭晓玲, 王魁, 李修炼, 等. 东亚小花蝽人工饲料微胶囊剂型的研制及饲养效果评价 [J]. *昆虫学报*, 2010, 53(8): 891 - 900.
- [42] De Puyssseleyr V, Hofte M, De Clercq P. Continuous rearing of the predatory anthocorid *Orius laevigatus* without plant materials [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2014, 138: 45 - 51.
- [43] Albert R, Maier G, Dannemann K. Maiszünslerbekämpfung-Bekämpfung und neue Entwicklungen beim *Trichogramma brassicae*-Einsatz [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2008, 60(2): 41 - 54.
- [44] Corley J C, Bruzzone O A. Delayed emergence and the success of parasitoids in biological control [J]. *Biological Control*, 2009, 51(3): 471 - 474.
- [45] van Lenteren J C. Quality control and production of biological control agents: theory and testing procedures [M]. Wallingford (UK), 2004: 1 - 327.
- [46] Pijnakker J, Vangansbeke D, Wäckers F, et al. Building a "standing army" of beneficials: A reality in greenhouse crops [C]// AFPP-6e Conférence sur les moyens alternatifs de protection pour une production intégrée lille-21, 22 et 23 Mars 2017.
- [47] 李敦松, 袁曦, 张宝鑫, 等. 利用无人机释放赤眼蜂研究 [J]. *中国生物防治学报*, 2013, 29(3): 455 - 458.