我国蔬菜害虫生物防治技术研究进展*

林 威[1,2**] 肖正坤[1,2] 高艳军[1,2] 高佳骏[1,2] 黄国华[1,2***]

（1. 湖南农业大学植物保护学院，植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室，长沙 410128；
2. 湖南农业大学，岳麓山实验室，长沙 410128）

摘 要 近年来，随着我国蔬菜种植规模的不断扩大，害虫问题已成为影响蔬菜产量与品质的主要制约因素之一。传统的化学防治所引发的害虫抗性、农药残留以及环境安全等问题，极大地推动了以生物防治为核心的绿色防控技术的研发与应用。本文综述了近年来我国在蔬菜害虫生物防控领域的理论研究与技术进展，涵盖了捕食性与寄生性天敌、昆虫病原微生物（包括真菌、细菌、病毒）、昆虫病原线虫等主要生防因子的应用现状、技术优化以及多种生防因子的综合应用。并探讨了蔬菜害虫生物防治技术在规模化推广过程中所面临的主要挑战，进而对未来的研究重点进行了展望，旨在为推动蔬菜害虫防控策略的优化升级提供理论参考与科学依据。

关键词 蔬菜害虫；生物防治；综合防控

Progress in research on the biological control of vegetable pests in China

LIN Wei[1,2**] XIAO Zheng-Kun[1,2] GAO Yan-Jun[1,2] GAO Jia-Jun[1,2] HUANG Guo-Hua[1,2***]

(1. Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Yuelushan Laboratory, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract The sustained expansion of vegetable cultivation in China in recent years has led to crop pests emerging as a critical constraint on both crop productivity and quality. Traditional chemical control methods are increasingly facing multifaceted challenges, including resistance, pesticide residues, and environmental safety concerns, all of which have collectively spurred the rapid development of biological control methodology. This paper systematically reviews recent research and technological progress in the biological control of vegetable crop pests in China, with a focus on three key areas: the current application status, technological refinements, and integrated deployment strategies of major biological control agents. These agents encompass predatory and parasitic species, entomopathogenic microorganisms (including fungi, bacteria, and viruses), and entomopathogenic nematodes. Furthermore, persistent challenges in scaling up biological control for vegetable pests are identified and further research priorities are outlined. By integrating these insights, this study, aims to provide a robust theoretical framework and scientific foundation for optimizing and upgrading integrated pest management (IPM) strategies in vegetable production systems.

Key words vegetable pests; biological control; integrated pest management

我国蔬菜产业的持续发展正面临传统害虫治理模式的严峻挑战。长期以来，以化学防治为主导的策略虽然在一定程度上保障了蔬菜的产量和品质，但其引发害虫抗药性、农药残留以及生态环境破坏等问题日益凸显，这对产业的可持续发展构成了潜在的风险。因此寻求环境友好、可持续的害虫治理方案已成为推动蔬菜产业高质量发展的必然选择。

*资助项目 Supported project：国家大宗蔬菜产业技术体系生物防治与综合防控岗位项目（CARS-23-C08）

**第一作者 First author，E-mail：linwei9806@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：ghhuang@hunau.edu.cn

收稿日期 Received：2025-03-10；接受日期 Accepted：2025-07-09

在此背景下，生物防治作为根植于生态学原理的治理策略，其重要性已从单一的技术选项，上升为现代植保体系的关键组成部分，逐渐成为害虫综合治理（Integrated pest management，IPM）的核心组成。我国在该领域的研究已取得系统性进展，初步构建起一个涵盖了天敌利用、微生物制剂开发和农田生态工程调控的多元化技术框架。从优势天敌与病原微生物资源的筛选评价与产业化，到利用功能植物构建稳定的“天敌涵养区”，再到探索多营养级互作的内在机理，这些研究共同构成了我国蔬菜害虫生物防控的科学基础，并与国家农业可持续发展的战略方向高度契合。

鉴于此，本文旨在系统综述我国近年来在蔬菜害虫生物防治领域取得的主要研究进展，深入解析各类核心技术的应用现状、瓶颈与挑战，并对未来发展方向进行展望，以期为构建具有中国特色的蔬菜害虫绿色防控体系提供科学参考。

1　寄生性和捕食性天敌的研究与应用

1.1　寄生性天敌

寄生性天敌作为生物防治的重要组成部分，在蔬菜害虫防控中发挥关键作用。当前，多种寄生蜂已被广泛研究或应用于生产实践（表 1）。例如，丽蚜小蜂 *Encarsia formosa*、烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 与多种赤眼蜂等在国内已实现规模化生产，对多种农业害虫控制效果优异（李现道等, 2016; 王庆雨等, 2023; 王勇等, 2023）。此外，部分种类如菜蚜茧蜂 *Diaeretiella rapae*、潜蝇姬小蜂 *Diglyphus* spp.等（张帆等, 2015; 王金彦等, 2020），虽然尚未实现大规模商业化生产，但大量的研究表明它们作为特定害虫的优势

表 1　国内应用或研究较为广泛的蔬菜害虫代表性寄生性天敌
Table 1　Representative parasitic natural enemies of vegetable pests more widely used or studied in China

目 Order	科 Family	种 Species	主要寄生对象 Main hosts of parasites
膜翅目 Hymenoptera	蚜小蜂科 Aphelinidae	丽蚜小蜂 *Encarsia formosa*	粉虱类害虫 Whitefly pests
		浅黄恩蚜小蜂 *Encarsia sophia*	粉虱类害虫 Whitefly pests
		海氏桨角蚜小蜂 *Eretmocerus hayati*	粉虱类害虫 Whitefly pests
	茧蜂科 Braconidae	烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis*	多种蚜虫，烟蚜适合度最高 Multiple aphid species, with the highest fitness on the tobacco aphid (*Myzus nicotianae*)
		菜蚜茧蜂 *Diaeretiella rapae*	多种蚜虫，萝卜蚜适合度最高 Multiple aphid species, with the highest fitness on the turnip aphid (*Lipaphis erysimi*)
		棉蚜茧蜂 *Lysiphlebia japonica*	多种蚜虫，棉蚜适合度最高 Multiple aphid species, with the highest fitness on the cotton aphid (*Aphis gossypii*)
		菜蛾绒茧蜂 *Cotesia vestalis*	多种鳞翅目害虫，小菜蛾适合度最高 Multiple lepidopteran pests, with the highest fitness on the diamondback moth (*Plutella xylostella*)
		斯氏侧沟茧蜂 *Microplitis similis*	多种鳞翅目害虫，甜菜夜蛾适合度最高 Multiple lepidopteran pests, with the highest fitness on the beet armyworm (*Spodoptera exigua*)
		瓜螟绒茧蜂 *Apanteles taragamae*	多种鳞翅目害虫，瓜绢野螟适合度最高 Multiple lepidopteran pests, with the highest fitness on the cucumber moth (*Diaphania indica*)

续表 1 (Table 1 continued)

目 Order	科 Family	种 Species	主要寄生对象 Main hosts of parasites
膜翅目 Hymenoptera	姬小蜂科 Eulophidae	芙新姬小蜂 *Neochrysocharis formosa*	多种斑潜蝇类害虫 Multiple *Liriomyza* species
		万氏潜蝇姬小蜂 *Diglyphus isaea*	多种斑潜蝇类害虫 Multiple *Liriomyza* species
		菜蛾啮小蜂 *Oomyzus sokolowskii*	小菜蛾 *Plutella xylostella*
	赤眼蜂科 Trichogrammatidae	螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis*	多种鳞翅目害虫 Multiple lepidopteran pests
		玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae*	多种鳞翅目害虫 Multiple lepidopteran pests

天敌，具有巨大的应用潜力。

1.1.1 典型代表丽蚜小蜂 自 1978 年丽蚜小蜂从英国引入我国以来，其应用技术与商品化生产工艺均已发展成熟（张帆等, 2015; 张礼生和陈红印, 2016）。目前，多家单位和企业（如北京市农林科学院、北京中捷四方生物科技股份有限公司等）的规模化生产，极大地推动了田间应用模式的创新与完善。大量田间应用示范证明，成功的丽蚜小蜂防治并非简单的“以虫治虫”，而是一套基于精准监测的综合管理体系。例如在北京顺义、房山等地，采用低量释放（约 30 000 头/hm^2）协同黄板等物理防治手段，能有效控制害虫并降低成本（张帆等, 2011）。这一“综合施策”的理念在多篇研究论文中同样得到了共识，例如，将丽蚜小蜂与无公害农药等手段结合，其防治效果最高可达 90%以上，经济效益也显著提升；同时使用丽蚜小蜂协同爪哇虫草菌 *Cordyceps javanicus* 进行烟粉虱 *Bemisia tabaci* 防控效果同样理想，且爪哇虫草菌几乎不会对丽蚜小蜂的寄生率、孵化率等指标产生影响（李洪安等, 2007; Liu *et al*., 2015; 李现道等, 2016）。

然而，作为一种活体生物制剂，丽蚜小蜂的田间效能面临三大制约。其一，环境耐受性差，尤其对高温极为敏感，35 ℃以上的高温可在短时间内造成其种群崩溃（尹园园等, 2019; 龙佳芝等, 2023）。其二，其自主扩散能力有限，为保证防治覆盖率，必须采取多点、均匀的释放策略（张振宇等, 2012; 赵静等, 2018）；其三，商业化贮运与田间活性的矛盾，低温贮藏技术虽能延长货架期，却会降低其田间扩散能力，这对产品研发与应用提出了新的挑战（Hoddle *et al*., 1998; 赵静等, 2019）。综上所述，丽蚜小蜂是一种高效且成熟的生物防治产品，但其成功应用取决于对“时机、环境、方法”三要素的精准把握。这要求在实践中必须选择在害虫种群建立初期的低密度窗口介入，规避夏季高温等不利环境，并遵循适量、多次、均匀的释放原则，同时将其深度融合于多手段协同的综合管理体系之中，方能实现其生态与经济效益的最大化。

1.1.2 典型代表烟蚜茧蜂 烟蚜茧蜂同样是我国生物防治产业化的代表，尤其是在烟草种植中，已成为一项关键植保措施。根据国家烟草专卖局国烟办综〔2018〕82 号文件（https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5438408.htm）所述，推广应用蚜茧蜂是重要工作目标，要求全国多个省份持续保持 100%的覆盖率。在云南烟区的实践堪称典范，长达 10 余年的大规模应用（累计超 1.33×10^4 hm^2），不仅田间防效超 80%，还带来了减少农药（>1 600 吨）、提升效益（>44 亿元）和改善生态等多重收益（谷星慧等, 2015）。其应用成功的核心技术在于“尽早释放，多次补充”，即在蚜虫发生初期（如桃蚜 *Myzus persicae*）以足够的蜂蚜比（如 1∶200）介入，并通过在长周期作物上（如温室黄瓜）的规律性补充释放（如每 5 d 1 次，连续 7 次），来确保寄生蜂种群的有效建立与长期控害（李学荣等, 2002）。

与丽蚜小蜂相似，环境因子的多变性同样制

约着烟蚜茧蜂田间应用效果的稳定性。除温度外，光周期和相对湿度也是关键因素，研究表明，14 L∶10 D 光周期和 70%相对湿度下其寄生能力、繁殖能力以及后代雌性比例等关键生物学指标均可达最优（吴珂珂等, 2022）。此外，低温和短日照的交互作用会诱导其滞育，这既可能导致其与早春的蚜虫种群动态不符错失最佳防治的窗口期，也可反向应用于人工繁育的精准调控（余玲等, 2016）。标准化的繁育技术是烟蚜茧蜂产业化的基石，目前精细化的研究已深入到寄主选择层面，例如，用特定品种的萝卜饲养的萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 作为寄主，可使雌性比例最大化（76.67%），这直接关系到田间释放后种群的增长潜力和控制效率（李太美等, 2020）。总的来说，未来的优化方向需贯穿“繁育-贮存-释放”全链条，以确保每个释放的天敌都具有极强的环境适应性和最高的防治效能。

1.1.3　典型代表赤眼蜂　赤眼蜂是一类重要的卵寄生蜂，在多种鳞翅目害虫生物防治中发挥关键作用。我国自 20 世纪 30 年代利用以来，当前已将其发展成为生物防治领域的一项重要技术。在玉米、水稻等大田作物上，大规模释放已成为防治玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、二化螟 *Chilo suppressalis* 等害虫的常规防治技术，年应用面积高达数百万公顷，对害虫的防治效果可稳定在 70%左右，生态与经济效益极为显著（王庆雨等, 2023; 张古忍等, 2024）。然而，赤眼蜂因受限于蔬菜作物害虫群落复杂、栽培模式多变以及蔬菜市场高标准等因素制约，尚未直接平移至蔬菜生产体系中，但仍是未来蔬菜害虫综合治理体系的关键因子之一。为推动其对在蔬菜生产中的有效应用，当前的研究主要集中在两个层面，在应用技术层面，核心是筛选对特定蔬菜害虫（如小菜蛾 *Plutella xylostella*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*）具高寄生效率的优势种或品系。研究发现，螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 和稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum* 可用于小菜蛾的防治，其中螟黄赤眼蜂 Tc-1 品系对小菜蛾卵的寄生能力、寄生后羽化率和孵化后雌性比率均为最高，此外，稻螟赤眼蜂对甜菜夜蛾卵也具有寄生能力（王金彦等, 2023; 周淑香等, 2025）。在产业化支撑技术层面，关键在于繁育技术的革新。当前，赤眼蜂的大规模繁育主要以米蛾 *Corcyra cephalonica*、麦蛾 *Sitotroga cerealella*、蓖麻蚕 *Philosamia cynthia* 和柞蚕 *Antheraea pernyi* 作为替代寄主，其中以柞蚕卵的综合繁育效果最佳（王勇等, 2023）。基于此，利用共寄生技术，可在柞蚕卵上同步扩繁玉米螟赤眼蜂、黏虫赤眼蜂 *Trichogramma leucaniae* 以及松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 等多个品系（李树英等, 2013; 田春雨等, 2019）。此外，更前沿的人工卵繁育技术（基于昆虫血淋巴或无昆虫介质）虽然取得一定进展，但距离商业化使用仍有一定距离（Consoli *et al*., 2010; Lü *et al*., 2014）。

1.1.4　其他寄生蜂　除上述几种应用广泛的寄生蜂外，一些其他寄生蜂种类也在特定蔬菜害虫的生物防治中展现出潜力。潜蝇姬小蜂在防治多种入侵的斑潜蝇 *Liriomyza* spp.时表现出较好效果（贺静等, 2022），近期张楠等（2023）描述了 2 个中国新纪录种：安纳潜蝇姬小蜂 *Diglyphus anadolucus* 和卡布潜蝇姬小蜂 *Diglyphus chabrias*。本土寄生蜂斯氏侧沟茧蜂主要寄生鳞翅目害虫，在蔬菜害虫防治中主要针对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和甜菜夜蛾，其防治效果已被证实（路子云等, 2014; Li *et al*., 2015, 2016; Chen *et al*., 2017; 陈壮美等, 2019; Yi *et al*., 2020; 张彤瑶等, 2024）。另外，菜蛾绒茧蜂 *Apanteles plutellae* 和菜蛾啮小蜂 *Oomyzus sokolowskii* 作为小菜蛾的主要寄生性天敌，在单独使用时防效极佳，但两者同时会出现种间竞争的现象，进而影响整体效果（黄莹莹, 1992; 施祖华和刘树生, 2003）；研究发现，菜蛾绒茧蜂可以精妙的操控宿主的免疫和营养平衡，其伴生杆状病毒（CvBV）产生的 miRNA 能够通过多种方式进入宿主体内，并抑制宿主发育（Wang *et al*., 2018; Wu *et al*., 2023）。

1.2　捕食性天敌的研究与应用

我国蔬菜害虫生物防治体系中，捕食性天敌作为核心生物调控因子，在害虫种群动态平衡中具有不可替代的生态功能。其主要隶属于昆虫纲和蛛形纲等节肢动物，还包括鸟类、蛙类等其他

动物。昆虫纲中以鞘翅目瓢甲科 Coccinellidae、半翅目花蝽科 Anthocoridae、脉翅目草蛉科 Chrysopidae 以及双翅目食蚜蝇科 Syrphidae 等类群最具生物防治价值（王红托等, 2012; 段宇杰等, 2021; 张古忍等, 2024）；蛛形纲则以蜱螨目植绥螨科 Phytoseiidae 捕食螨的生物控害作用最为突出，其在实际防控应用中已形成规模化技术体系（宫亚军等, 2015; 侯飞等, 2023）。各主要类群通过特异性捕食作用，可有效抑制菜蚜、粉虱、蓟马等典型蔬菜害虫的种群扩张（表 2）。

表 2　国内应用或研究较为广泛的蔬菜害虫捕食性天敌

Table 2　Predatory natural enemies of vegetable pests widely used or studied in China

纲 Phylum	目 Order	科 Family	主要种类 Major species	主要捕食对象 Main prey
昆虫纲 Insecta	鞘翅目 Coleoptera	瓢虫科 Coccinellidae	七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 六斑月瓢虫 *Cheilomenes sexmaculata*	蚜虫、粉虱、蓟马、叶螨等小型害虫 Aphids, whiteflies, thrips, spider mites , and other small pests
	半翅目 Hemiptera	花蝽科 Anthocoridae	微小花蝽 *Orius minutus* 东亚小花蝽 *Orius sauteri* 南方小花蝽 *Orius similis*	蚜虫、粉虱、蓟马等小型害虫 Aphids, whiteflies, thrips, and other small pests
		盲蝽科 Miridae	烟盲蝽 *Cyrtopeltis tenuis*	蚜虫、粉虱、螨类、斑、潜蝇、鳞翅目幼虫和卵等 Aphids, whiteflies, mites, leafminers, lepidopteran larvae and eggs, etc.
		蝽科 Pentatomidae	蠋蝽 *Arma custos* 益蝽 *Picromerus lewisi*	可捕食膜翅目、鞘翅目、鳞翅目等 Preys on Hymenoptera, Coleoptera, Lepidoptera, etc.
		猎蝽科 Reduviidae	红彩真猎蝽 *Harpactor fuscipes*	鳞翅目幼虫、蚜虫等 Lepidopteran larvae, aphids, etc.
			环斑猛猎蝽 *Sphedanolestes impressicollis*	喜食鳞翅目害虫 Prefers lepidopteran pests
	脉翅目 Neuroptera	草蛉科 Chrysopidae	中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* 大草蛉 *Chrysopa pallens* 丽草蛉 *Chrysopa formasa*	蚜虫、粉虱、螨虫、蓟马、鳞翅目小幼虫和卵等 Aphids, whiteflies, mites, thrips, small lepidopteran larvae and eggs, etc.
	双翅目 Diptera	食蚜蝇科 Syrphidae	黑带食蚜蝇 *Episyrphus balteatus* 细腹食蚜蝇 *Sphaerophoria* sp.	蚜虫 Aphids
		瘿蚊科 Cecidomyiidae	食蚜瘿蚊 *Aphidoletes abietis*	蚜虫 Aphids
蛛形纲 Arachnida	蜱螨目 Arachnoidea	植绥螨科 Phytoseiidae	巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* 加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* 胡瓜钝绥螨 *Amblyseius cucumeris* 剑毛帕厉螨 *Stratiolaelaps scimitus* 东方钝绥螨 *Amblyseius brientalis*	蓟马、螨类等小型害虫 Thrips, mites, and other small pests

1.2.1　捕食性天敌昆虫　捕食性天敌昆虫在农业生态系统中至关重要，它们凭借捕食习性可有效抑制害虫种群，维护生态平衡，在蔬菜害虫生物防治中至关重要。常见的种类有七星瓢虫

Coccinella septempunctata、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*、黑带食蚜蝇 *Episyrphus balteatus*、南方小花蝽 *Orius similis*、中华大刀螳 *Tenodera sinensis*、中华婪步甲 *Harpalus sinicus*、黄足猎蝽 *Sirthenea flavipes*、日本蠼螋 *Labidura japonica* 等。下面简要介绍部分代表性类群。

（1）瓢虫在生物防治中有巨大应用价值在全球范围内得到了印证。其中，澳洲瓢虫 *Rodolia cardinalis* 成功控制吹绵蚧 *Icerya purchasi* 并挽救全球柑橘产业，是生物防治史上最经典的范例之一（张古忍等, 2024）。在此背景下，我国已将瓢虫作为蔬菜害虫生物防治体系的核心类群，其规模化应用已形成从基础研究到产业实践的完整链条。以异色瓢虫、龟纹瓢虫和七星瓢虫为代表的本土优势物种，凭借其广谱捕食特性与成熟的人工繁育技术，成功实现了商品化生产，并由以北京中捷四方生物科技股份有限公司、河南省济源白云实业有限公司等企业实现了市场化推广，在上海、西宁等地的试验示范中，使用瓢虫卵卡防治温室蚜虫，在蚜虫始发期以 40 卡/棚放置可达到 90%的防治效果（李育静等, 2013; 葛立傲等, 2020）; 另外在我国的瓢虫生物防治应用中，广东、福建等地通过引进孟氏隐唇瓢虫 *Cryptolaemus montrouzieri* 防治农林蚧虫，取得了巨大的成功，自引进后已在国内建立了稳定的自然种群，对多种害虫展现出持久的防治潜力（张古忍等, 2024）。为实现害虫的精准防控水平，当前的研究重点是量化与比较不同瓢虫的控害效能。例如，异色瓢虫展现出广谱的捕食特性，对多种蚜虫、鳞翅目卵或低龄幼虫均具有高效的控害能力，且雌性控害能力强于雄性（杨桂群等, 2022; 任爱景等, 2024）；龟纹瓢虫对蚜虫控害效果更为高效，但是对温室白粉虱、鳞翅目害虫等防效有限；气候模型预测龟纹瓢虫潜在适生区将逐渐扩大，预示着其未来应用范围的增加（刘万学等, 2008; 王甦等, 2012; 徐扬等, 2024）；七星瓢虫同样以蚜虫为主要猎物，同样可取食鳞翅目卵或低龄幼虫，但控害能力一般，长日照条件可显著提升其觅食效率（邹运鼎等, 1999; Pathak, 2006; Berkvens *et al*., 2008; 程英, 2018）。在产业化繁育技术上，替代性食物的开发与标准化生产工艺的建立是两大核心。研究证实地中海粉螟 *Ephestia kuehniella* 的卵是异色瓢虫大规模饲养的理想食物来源，瓢虫具有取食花粉的能力，而花粉等非猎物性食物作为添加剂亦可提升其关键生命表参数（Li *et al*., 2024a, 2024b）; 在生产工艺上，基于甜菜夜蛾低龄幼虫或东方粘虫 *Mythimna seperata* 卵的工厂化生产工艺已趋于成熟，配合 10 ℃低温储运技术可保障瓢虫卵的存活率，其中七星瓢虫和异色瓢虫卵表现出更优的耐受性（王红托等, 2012; 马润国等, 2024）。然而，目前的人工繁育技术仍面临关键瓶颈，即便是使用最优的替代饲料或人工饲料饲养，瓢虫种群在存活率、发育速率及繁殖力等关键生命表参数上，仍无法完全比肩以天然猎物饲养的种群，其生理学机制在于，非天然饲料可能因缺乏特定营养物质，导致雌虫卵黄生成过程受阻或速率减缓，进而影响其总繁殖力，最终限制了天敌的综合质量（陈鹏, 2021）。因此，如何通过优化饲料配方来解决这一生理瓶颈，是未来提升瓢虫生物防治经济可行性的核心研究方向。

（2）花蝽科昆虫是蓟马、粉虱、蚜虫等小型害虫的重要捕食性天敌，已在温室作物害虫防治中得到应用。当前针对微小花蝽 *Orius minutus*、东亚小花蝽 *Orius sauteri* 等优势物种的研究，主要围绕评估其田间控制效能与优化其规模化繁育两大核心问题展开。在捕食效能方面，微小花蝽的高龄若虫展现出强大的捕食潜力，其中对小菜蛾卵、豌豆蚜若蚜和蓟马的最大日捕食量分别可达 41.3、41.84 和 55.25 头（孙丽娟等, 2017; 崔晓宁等, 2025）；而东亚小花蝽成虫对茶棍蓟马 *Dendrothrips minowai*、豆蚜 *Aphis craccivora*、茶小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 卵、番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 卵的日捕食量最高可达 30.50、181.40、22.30 和 64.10 头（朱正阳等, 2022; 崔晓宁等, 2025）。温度等环境因子也显著影响其捕食效率，研究表明东亚小花蝽在 26 ℃条件下对多种害虫捕食效果最佳（张治科等, 2023）。在规模化繁育层面，技术优化的重点在于替代食物的开发和

产卵基质的筛选上。食物来源方面，虽然干果斑螟 *Cadra cautella* 卵、地中海粉斑螟卵、米蛾卵、小菜蛾低龄幼虫等作为替代品，可满足规模化繁殖的需求（孙丽娟等, 2017; 张昌容等, 2023）。但替代饲料需经过三级营养过程，转化效率较低，成本较高，因此开发人工饲料成为重要方向。例如，早期使用奶粉、鸡蛋液等作为主要原料辅以蔗糖、蜂蜜、花粉等添加物，东亚小花蝽成虫获得率为 20%；后续优化饲料配方并采用微胶囊技术基本可以满足东亚小花蝽的营养需求，但仍存在发育历期延长、产卵量降低等问题（Tan *et al*., 2013）。在提升繁殖效率方面，选择合适的产卵基质尤为重要，研究表明芸豆荚和龙豆荚因其能显著提高东亚小花蝽的单雌产卵量和孵化率，且具备易获取、低成本的优势，被认为是东亚小花蝽规模化繁育的理想产卵基质（李成军等, 2022a）。另外，四季豆茎和紫红豇豆是适合海岛小花蝽 *Orius maxidentex* 大量繁殖的产卵基质（Richards and Schmidt, 1996; Lundgren and Fergen, 2006）。同时，优化饲养密度（如将东亚小花蝽控制在 100-400 头/瓶）有利于提高成虫存活率，是保障商品质量的关键措施之一（李成军等, 2022b）。

（3）脉翅目昆虫绝大多数幼虫阶段为肉食性，是生物防治中一类重要的广谱捕食性天敌，其中草蛉科物种的应用较为广泛。在使用黄玛草蛉 *Mallada basalis* 控制蚜虫时，按照益害比 1∶60 释放，防治效果可达到 89.27%（周兴苗和雷朝亮, 2002; 海飞等, 2023）。另外，多项研究表明，草蛉幼虫的龄期和寄主植物类型均会影响其捕食效率，其中黄玛草蛉 3 龄幼虫比 2 龄幼虫具有更强的捕食效率，对于大草蛉（*Chrysopa pallens*）3 龄幼虫的捕食能力和搜寻效率均显著高于 2 龄幼虫（李萍等, 2020）；寄主植物类型亦是影响大草蛉对害虫捕食能力的重要因素，3 龄幼虫在烟草、棉花、辣椒上对烟粉虱卵的捕食量呈现显著性差异，分别为 7.6-28.4、5.4-23.2、6.0-18.8 粒，瞬时攻击频率在烟草上最大（王然等, 2016）。

（4）双翅目中食蚜蝇和食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* 作为蚜虫的天敌，在生物防治中也具有较大的潜力。研究表明，食蚜瘿蚊对低龄若蚜的捕食能力和搜寻效率较高，且偏好捕食低龄若蚜，但存在种内干扰的问题，最佳益害比为 1∶10 和 1∶15（朱绪立等, 2024），使用食蚜蝇防治麦长管蚜 *Sitobion avenae* 益害比为 1∶29 时，仅 24 h 百株蚜量由 2 190 头下降至 305 头，有蚜株率由 100%下降到 15%（田径和任炳忠, 2019）。此外，江珊珊等（2023）探讨了 3 种蚜虫（豆蚜、桃蚜、豌豆修尾蚜 *Megoura crassicauda*）对黑带食蚜蝇生长发育、繁殖和飞行能力的影响，研究发现，在人工繁育黑带食蚜蝇时，以豌豆修尾蚜为饲料的效果最佳。

（5）除了专食性的捕食性天敌，烟盲蝽 *Cyrtopeltis tenuis*、蠋蝽 *Arma custos* 等作为杂食性昆虫也具有生物防治潜力。烟盲蝽雌雄成虫及 5 龄若虫均能捕食烟粉虱各龄若虫和成虫（曹璐等, 2024）；以蝽蛾比 1∶15 的比例在田间释放蠋蝽防治瓜绢野螟 *Diaphania indica* 时，10 d 后的防控效果达 52.5%，30 d 后的防控效果可达 65%（王桦等, 2024）。鉴于其杂食性特点，烟盲蝽若虫仅以芝麻、小白菜作为食物源即可完成发育；蠋蝽仅以蚕豆苗、豌豆苗作为食物源时，尽管发育期显著缩短，但存活率可达 83%以上，一旦添加猎物，其发育速度即明显加快（廖平等, 2020; 田艳丽等, 2024）。

1.2.2 捕食螨 捕食螨是控制叶螨、蓟马、粉虱等微小害虫的核心生防因子，得益于其高效的捕食能力和成熟的繁育技术，以斯氏钝绥螨 *Amblyseius swirskii*、巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri*、智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* 等为代表的多种捕食螨产品已由北京中保绿农科技集团有限公司、福建艳璇生物防治技术有限公司等企业实现商业化生产与销售。田间应用效果方面，捕食螨展现出比拟化学农药的控制潜力。例如，在草莓田中以 300 头/m^2 的密度释放智利小植绥螨，14 d 后对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 的防效可达 99.66%；在茄子田中，益害比达到 1∶10 左右 10 d 后防效即可达到 100%（宫亚军等, 2015; 武雯等, 2015）。此外，在海南豇豆田

的示范表明，释放巴氏新小绥螨不仅能有效控制蓟马种群，还能显著提升田间的物种丰富度，其生态效益是化学防治无法比拟的。然而，捕食螨的防治效果同样受到其自身生物学特性和环境因子的精密调控。而温度作为最重要的调控因子，是影响其捕食效率的关键变量，不同的捕食螨均存在一个最适的温度区间，如草栖钝绥螨 *Amblyseiopsis largoensis* 和加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* 分别在 28 和 30 ℃时对二斑叶螨的捕食能力达到峰值（侯飞等, 2023; 汪维华等, 2024）。种群密度同样关键，如草栖钝绥螨存在明显的种内干扰，其捕食效率会随自身密度的增加而下降，因此在田间的实际应用时需精确控制释放量（侯飞等, 2023）。除了这些局部环境因子，宏观的气候变化也在重塑捕食螨的地理分布格局。模型预测显示，胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris* 在我国的适生区未来将向北扩张，高适生区面积也将增加，预示着其在北方地区的应用潜力也将不断提升（李玉闯等, 2024）。

1.3　功能植物对寄生性和捕食性天敌的影响

构建“害虫天敌植物支持系统”，其核心在于向作物种植体系中定向引入特定功能植物（亦称“储蓄植物”），以营造结构复杂、功能多样的生境，从而增强天敌的定殖、存续与持续控害能力（古丽扎尔·阿不都克力木和玛依努尔·吾斯曼, 2017; 张文慧等, 2024）。其核心生态机制在于这些功能植物的多重作用，它们能够为天敌提供替代性食物资源（如花粉、花蜜）、额外的猎物或寄主、以及规避不利环境和农事操作的庇护所，当主载作物害虫密度较低时，维持一个稳定有效的天敌存续区域（Huang *et al*., 2011）。该策略在多种栽培系统中的有效性已得到了证实。研究表明，在温室中，与仅种植番茄作物相比，将金盏菊 *Calendula officinalis* 作为番茄等蔬菜作物的伴生植物，可显著提升七星瓢虫和东亚小花蝽的种群个体数量，并减少虫害发生数量和频次（马亚云等, 2019; 徐庆宣等, 2024）。田间调查也发现，蓝蓟 *Echium vulgare*、芥菜 *Brassica juncea*、硫华菊 *Cosmos sulphureus*、荞麦 *Fagopyrum esculentum*、紫花苜蓿 *Medicago sativa*、红麻 *Hibiscus cannabinus* 和陆地棉 *Gossypium hirsutum* 上存在大量小花蝽（李姝等, 2020）。此外，间作非寄主植物（如在花椰菜田间种植番茄）能通过改变生境结构，显著提高天敌种群数量，对菜蚜 *Brevicoryne brassicae*、黄曲条跳甲 *Phyllotreta striolata* 和小菜蛾等害虫有显著控制作用（夏咛等, 2015）。除涵养天敌外，功能植物还可通过植物挥发物的释放来调控天敌与害虫的行为，不同功能植物对害虫和天敌的调控作用也存在差异。在一项对比研究中发现蛇床草 *Cnidium monnieri* 的挥发物对天敌表现出显著的吸引作用，而薄荷 *Mentha canadensis* 和罗勒 *Ocimum basilicum* 则能有效驱避棉蚜 *Aphis gossypii*，因此合理搭配功能植物可显著增加害虫防控效果（彭雪凡等, 2024）。为最大化其生态功能和经济效益，功能植物的优化配置策略也是当前研究的重点。研究证实，空间布局（如集中种植或间隔排列）以及功能植物的多样性，均会显著影响天敌群落的丰富度与控害范围，这对维持生态系统的稳定性至关重要（Jaworski *et al*., 2019; Chen *et al*., 2022; Li *et al*., 2023）。综上，通过科学设计来利用功能植物，是实现害虫生态治理、构建可持续农业的关键路径。

2　昆虫病原微生物的研究与应用

2.1　昆虫病原真菌

昆虫病原真菌作为一类重要的微生物杀虫剂，资源丰富、种类繁多，主要隶属于子囊菌门 Ascomycota、担子菌门 Basidiomycota、接合菌门 Zygomycota 和壶菌门 Chytridiomycota 等多个类群。在众多类群中，以白僵菌属 *Beauveria* spp.、绿僵菌属 *Metarhizium* spp.、虫草属 *Cordyceps* spp.、轮枝菌属 *Lecanicillium* spp.、虫霉属 *Entomophthora* spp.和野村菌属 *Nomuraea* spp.等的研究和应用最为广泛。在我国蔬菜害虫生物防治实践中，应用较普遍的菌种主要是球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*、爪哇虫草菌和蜡蚧轮枝菌 *Lecanicillium lecanii* 等。

（1）球孢白僵菌作为一种广谱性的昆虫病原真菌，是研究和应用历史最悠久、产业化程度最高的微生物杀虫剂之一。其寄主谱极其广泛，可侵染超过 700 种昆虫和螨类，这为其在多种害虫治理中的应用奠定了坚实基础（况再银等, 2023）。在我国，其产业化进程尤为成熟，目前已授权相关专利 2 300 余项，涵盖应用方法、生产发酵、菌剂制备等多个方面。截至目前，我国共有 19 家公司登记生产球孢白僵菌产品，登记注册用于防治蛾类、蓟马、粉虱等多种蔬菜害虫的产品共 33 个，剂型涵盖可湿性粉剂、水分散粒剂、可分散油悬浮剂等多种类型，形成了完整的技术与产品体系。

在田间应用中，球孢白僵菌可直接侵染并杀死靶标害虫，且防治效果可比拟化学药剂。例如，特定浓度的球孢白僵菌可湿性粉剂对辣椒上西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的防效可达 74% 以上（王海鸿等, 2020）；1×10^7 孢子/mL 的孢子悬浮液对竹茎扁蚜 *Pseudoregma bambusicola* 的防效可达 90.8%（孙品雷等, 2007）；Bb06 菌株孢子悬浮液浓度为 1×10^{11} cfu/L 时，玉米螟感染后死亡率为 92.0%（徐艳聆等, 2010）。其次，球孢白僵菌还可与天敌协同增效，如巴氏新小绥螨、螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂等可作为其传播媒介，实现了“以虫治虫”和“以菌治虫”的结合（王海鸿等, 2020; 杨芷, 2020; 赵宇等, 2023; 刘明秀等, 2024）。不仅如此，球孢白僵菌还可内生定殖于部分植物，使得植物对害虫的抗性增加，当其定殖于豇豆或玉米植株体内后能够显著抑制美洲斑潜蝇 *Liromyza sativa*、玉米螟等害虫的种群数量，并抑制害虫的取食和生长（谢敏等, 2023; 钟绍忆等, 2025）；在特定条件下（CO_2 浓度升高），其定殖甚至能促进植物光合作用与生长，展现出作为“植物生长促进剂”的功能（文欢等, 2025）。尽管应用前景广阔，但仍有许多因素制约其能力的发挥，对环境条件敏感、速效性不足、菌种易退化等问题，是限制其广泛应用的瓶颈（况再银等, 2023）。在综合治理体系中，还必须考虑其与化学农药的兼容性，研究表明，多数杀菌剂对球孢白僵菌有较强的抑制作用；而一些杀虫剂（如双丙环虫酯）与球孢白僵菌相容性良好（谢梅琼等, 2023）。因此，未来的研究方向将继续聚焦于高毒力、高抗逆性菌株的选育与改造，优化发酵工艺与剂型以提升产品稳定性，以及制定与其他防治措施科学协同的应用方案，从而最大限度地发挥其多重生态功能。

（2）除球孢白僵菌外，其他一些昆虫病原真菌在蔬菜害虫生物防治中也发挥着重要作用。其中，金龟子绿僵菌和爪哇虫草菌已分别拥有 18 和 4 个登记注册的农药产品，在产业化程度上仅次于球孢白僵菌。当前，研究工作一方面致力于从自然界筛选和评价更具价值的新菌株，如近期筛选的菌株金龟子绿僵菌 F2-M18-8-4，不仅在室内实验中具有极强的杀虫活性，在田间施用该菌株 15 d 后，对花生上的西花蓟马防治效果也显著优于化学农药，且保叶和增产效果最佳（裴松松等, 2021），另一菌株 CQMa421 同样可作为西花蓟马优异的防治药剂（葛文超等, 2018），在轮枝孢属的研究中，已筛选并鉴定出多个高毒力菌株，如对桃蚜具有较强致病力的蚧轮枝菌 V4 菌株，以及对桃蚜和温室白粉虱有较强致病性的长孢蜡蚧菌 JL-006 和蜡蚧轮枝菌 JL-007，这些均为新型微生物制剂的开发提供了宝贵的菌种资源（蔡春霞等, 2018; 孙大平等, 2021）。此外，莱氏野村菌 *Nomuraea rileyi* Nr0815 菌株对斜纹夜蛾具有极高的致病性（苏锦尧等, 2018）。而虫霉目的多种真菌中，许多是蚜虫生物防治的重要材料，可寄生于十字花科蔬菜上的多种蚜虫（李宏科和康霄文, 1989）。另一方面，基于基因功能的探索为菌株改良开辟了新路径。例如敲除绿僵菌特定基因 *MaAfrIV* 后无法再次产孢，但可显著提升其杀死害虫的速度（Guo *et al*., 2020），这种改造策略，有望解决传统微生物杀虫剂见效慢的问题，为未来昆虫病原真菌的应用开辟了新的方向。

2.2 昆虫病原细菌

在国内蔬菜害虫防治中，昆虫病原细菌的应用以苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*（Bt）最为广泛和成功。其他病原细菌包括金黄杆菌属

Chryseobacterium spp.、沃尔巴克氏体属 *Wolbachia* spp.以及沙雷氏菌属 *Serratia* spp.等因研究有限，目前仍未广泛推广。Bt 的核心杀虫活性源于其伴孢晶体蛋白（Cry 蛋白），主要用于防治多种鳞翅目害虫，包括小菜蛾、甜菜夜蛾、菜青虫 *Pieris rapae* 等蔬菜害虫，部分菌株及其毒素对鞘翅目害虫和飞虱等表现出极高的杀虫活性（雷仲仁等, 2016; Liu *et al*., 2018; 孙晓妮等, 2023），目前其产业化生产主要依赖于成熟的液体深层发酵或固态发酵工艺，其效率受发酵条件和培养基组分的精密调控（常明等, 2010）。

然而，传统的 Bt 制剂在田间应用时存在稳定性差、持效期短等问题。为克服这些缺陷，剂型创新是突破其应用效能的关键途径。例如以海藻酸钠为壁材，在优化的工艺条件下制备的 Bt 微胶囊具有较高的产率和活菌率，而微胶囊化显著提高了 Bt 的抗紫外能力和热储稳定性，并在水和土壤中表现出不同的释放特性。Bt 微胶囊对蛴螬 *Holotrichia diomphalia* 的持效杀虫效果显著优于未包埋的 Bt 菌液（陈蔚燕等, 2024）。而通过分子生物学技术，构建 Bt 工程菌株（如导入新的杀虫基因或修饰原有基因）也成为提高防治效果的重要途径。这些工程菌株对一些已对传统 Bt 制剂产生抗性的害虫（如小菜蛾）具有防治潜力（彭琦等, 2015; 邱德文, 2015）。这种从改良剂型到基因改造的技术迭代，代表了 Bt 的研究与应用不断向精准化、高效化发展的必然趋势。

2.3　昆虫特异性病毒

昆虫病毒作为特异性强、安全性高的生防因子，在蔬菜害虫生物防治中具有重要应用潜力，包括杆状病毒科 Baculoviridae、裸露病毒科 Nudiviridae、囊泡病毒科 Ascoviridae、痘病毒科 Poxvirinae、虹彩病毒科 Iridoviridae、细小病毒科 Parvoviridae、呼肠孤病毒科 Reoviridae 等科的成员（张忠信, 2021）。其中，目前应用最为广泛的是核型多角体病毒（*Nuclepolyhedrovirus*, NPV）和颗粒体病毒（*Granulovirus*, GV），国内已登记核型多角体病毒农药产品 70 种，主要包括棉铃虫 NPV（HearNPV）、斜纹夜蛾 NPV（SpltNPV）、甜菜夜蛾 NPV（SeNPV）、苜蓿银纹夜蛾 NPV（AcMNPV）和甘蓝夜蛾 NPV（MbNPV）等；颗粒体病毒也有 5 个登记农药产品，包括菜青虫 GV（PiraGV）和小菜蛾 GV（PlxyGV）等。

昆虫病毒制剂的田间应用效能已在多种场景下得到了验证，其主要作用机理是通过消化道感染，在细胞内复制增殖，最终导致害虫死亡（张忠信, 2015; 黄昱栋等, 2022）。如使用 PlxyGV 悬浮剂防治甘蓝田间小菜蛾，7 d 后的防效可达 74.58%（矫振彪, 2023）；使用 SeNPV 水剂和悬浮剂防治不同作物上的甜菜夜蛾，防效可超过 90%（徐树兰, 2011; 章金明等, 2019）；此外，部分病毒则主要通过寄生蜂的产卵行为传播，如囊泡病毒，害虫感染后接近 95%的致死率也使其成为一种极具潜力的生防资源（Yu *et al*., 2021; Yang *et al*., 2022），但因其无法口服感染的特性，目前的研究多处于理论阶段。

与其他微生物杀虫剂类似，环境稳定性仍是病毒杀虫剂类产品存在的共性问题，为突破这些限制，当前的研究主要集中在增效技术和剂型的创新，如几丁质酶、荧光增白剂等破坏害虫的物理屏障或增强病毒的感染能力，从而显著提升其杀虫活性（葛少彬等, 2015）。微胶囊制剂同样尝试应用于病毒制剂的研究，例如以海藻酸钠为包埋材料，采用喷雾干燥法制备 SeNPV 颗粒剂，与未包埋的 SeNPV 相比，颗粒剂显著提高了病毒的热稳定性和抗紫外能力，且不影响其对甜菜夜蛾幼虫的致病力，并具有缓释特性（胡素楠等, 2024）。这些技术的突破，正推动着昆虫病毒从传统制剂向高效、稳定的新型生物农药方向发展。

3　昆虫病原线虫的研究与应用

昆虫病原线虫（Entomopathogenic nematodes, EPNs）是一类重要的专性寄生天敌，具有自主搜寻寄主、杀虫速度快等优点，是一类重要的害虫生防因子。目前，部分斯氏线虫属 *Steinernema* spp.和小杆线虫属 *Heterorhabditis* spp.的 EPNs 已

被开发为商品化杀虫剂在全球销售（Torres-Barragan *et al*., 2011）。在田间应用中，EPNs 展现出极高的防治潜力。例如，斯氏线虫的特定品系（如 ALL 品系）对小白菜上的黄曲条跳甲具有高效的控制能力；而在烟草田，施用其粉剂亦能有效防治小地老虎 *Agrotis ipsilon*，显著减少烟苗的死亡率（杨凤丽等, 2020; 谷星慧等, 2021）。EPNs 的田间防治效果，高度依赖于物种/品系的选择、环境条件的调控以及应用技术的优化。在品系选择上，不同 EPNs 对靶标害虫的致病力存在显著差异，如小卷蛾斯氏线虫的多个品系对甜菜夜蛾蛹的致病力均优于异小杆线虫（刘敏等, 2025）；而较高的土壤湿度和适宜的温度（如 25 ℃）同样能显著提高斯氏线虫对害虫的致死率（姚红燕等, 2015）。在应用技术层面，通过优化施用剂量和频率（如低剂量、多次施用），或添加诱食剂、增效剂（如 d-柠檬烯）等助剂，并辅以提高环境或土壤湿度均能显著提升其防治效果（杨凤丽等, 2020; 陈向荣等, 2021）。EPNs 的致病机制，实际上是其与体内共生的致病杆菌属 *Xenorhabdus* 和 *Photorhabdus* 细菌协同作用的结果。其中嗜线虫致病杆菌 *Xenorhabdus nematophila* HB310 菌株对小菜蛾幼虫具有较强的胃毒杀虫活性和拒食活性，且杀虫活性成分主要存在于菌体细胞和≥50 kD 的上清液组分中；亚致死剂量的菌液处理可显著影响小菜蛾的生长发育和繁殖，并降低其种群增长（杨云艳等, 2012）。这一系列的研究成果揭示了 EPNs 的共生菌是一个待开发的、潜力巨大的新型微生物杀虫剂资源库。

4 多种生物防治的联合应用

为了提高生物防治的效果、克服单一措施的局限性，多种防治措施的联合应用已成为研究的热点，其核心目标在于利用不同因子在作用机理、靶标、速效性等方面的互补性，实现协同增效或相加作用，从而获得更稳定、更广谱的害虫控制效果。其中寄生性和捕食性天敌与其他生防因子的联合应用是常见的策略。例如，捕食螨（巴氏新小绥螨和剑毛帕厉螨 *Stratiolaelaps scimitus*）与球孢白僵菌联合使用时，防治效果强于单独使用其中任意一种方式（王恩东等, 2024）。同样，昆虫病原线虫与白僵菌联合应用对烟草蛴螬有极佳的控制效果，室内和田间试验均表明，二者联合使用具有显著的协同增效作用（余佳敏等, 2019）。寄生性和捕食性天敌还可作为病原微生物的传播媒介，从而进一步提高整体防治效果。例如，使用捕食螨作为球孢白僵菌孢子的传播媒介，可有效扩大其覆盖范围（吴圣勇等, 2014）。而实现这种协同应用的前提是两者具有良好的相容性，多项研究已证实低浓度白僵菌孢子悬浮液对东亚小花蝽、智利小植绥螨等天敌无不良影响，且白僵菌与二者联合应用时效果均显著增加（陈亚丰等, 2021; 徐华苹等, 2021）。

除寄生性和捕食性天敌与其他防治方式联用外，不同类型的生物源杀虫剂之间的复配，也展现出巨大的增效潜力。将昆虫病原真菌与植物源杀虫剂或昆虫病原细菌进行复配，已被证明能够对菜青虫、棉蚜、烟粉虱等多种害虫产生协同或相加毒力（李蕾等, 2022; 刘芬等, 2025）。同样，将苏云金芽孢杆菌与阿维菌素等不同作用机理的其他农药类型按特定比例复配，对小菜蛾的联合毒力也远超单一制剂，这为应对害虫抗性问题和扩大防治谱提供了有效的解决方案（林德锋等, 2012）。

5 问题与展望

近年来，我国蔬菜害虫生物防治的研究与应用虽取得了显著进展，但其规模化推广仍面临着从技术到市场的系统性挑战。

当前制约生物防治技术广泛应用的核心瓶颈主要体现在三个层面。（1）经济效益与应用成本的失衡问题：生物防治产品的单位成本相对较高，而其效果的缓效性和环境依赖性又增加了应用风险，加之有机或绿色蔬菜市场较小，导致生产者的经济回报存在不确定性。（2）技术体系与生产实践脱节问题：当前多数蔬菜设施简陋，难以满足环境的精准调控，加之生产者技术整合能力不足，共同制约了生物防治策略在田间的应用效果，导致技术供给与现实需求存在差距。

（3）生物防治理念与现实需求的差异：生物防治并非孤立的技术，而是 IPM 体系中的核心组成部分，其成功应用要求将害虫种群维持在经济损害阈值之下，而非追求彻底的清除，这种观念与依赖化学防治的传统模式存在冲突，限制了其应用空间。

为系统性地应对上述挑战，未来的研究与实践需在以下几个方向寻求重点突破。（1）在生防因子层面，应从资源筛选向精准改良深化。在持续挖掘优异本土资源的基础上，应综合运用传统育种与现代分子技术，在严格的生物安全评估框架下，定向提升天敌或病原微生物的环境耐受性、繁殖力与靶向性。（2）在应用技术层面，应从单一策略向集成化方案演进。制定在不同生产区或不同作物的多因子协同应用方案，并与自动化、精准释放技术相结合，以降低应用门槛，提升防治效果的可预测性。（3）生产技术层面，应聚焦于降本增效与质量保障。对于天敌昆虫，核心是突破人工饲料瓶颈，优化营养配方以降低繁育成本并保证其田间效能。对于病原微生物，则需优化发酵工艺以提高产量与活性，并发展新型制剂技术以增强产品的稳定性与环境耐受性，从而增强生防产品的市场竞争力。

综上所述，推动我国蔬菜害虫生物防治的发展，不仅需要技术本身的持续创新，更需要经济、技术、理念多维度的协同并进，最终实现从“技术可行”到“市场可行”的跨越。

参考文献 (References)

Berkvens N, Bonte J, Berkvens D, Tirry L, De Clercq P, 2008. Influence of diet and photoperiod on development and reproduction of European populations of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). *BioControl*, 53(1): 211–221.

Cai CX, Li MY, Chen DX, Pan J, Liu MK, Qi YZ, Xiao LN, Ren CY, Diao CQ, Xu CT, Shen XX, Deng SY, 2018. Biological characteristics of eight *Verticillium lecanii* and their effects on the pathogenicity against *Myzus persicae*. *China Tobacco Science*, 39(5): 86–93. [蔡春霞, 李茂业, 陈德鑫, 潘敬, 刘明科, 齐禹哲, 肖丽娜, 任春燕, 刁朝强, 徐传涛, 沈祥祥, 邓双跃, 2018. 八株蜡蚧轮枝菌的生物学特性及其对烟蚜致病性的影响. 中国烟草科学, 39(5): 86–93.]

Cao L, Hou QH, Liu SS, Liu YQ, 2024. Predation and preference of *Nesidiocoris tenuis* for different stages of whitefly *Bemisia tabaci*. *Journal of Environmental Entomology*, 46(3): 737–743. [曹璐, 侯启华, 刘树生, 刘银泉, 2024. 烟盲蝽对不同虫态烟粉虱的捕食作用及捕食偏好性. 环境昆虫学报, 46(3): 737–743.]

Chang M, Sun QH, Zhou SG, Ni JR, 2010. Factors analysis and process selection for the production of *Bacillus thuringiensis* based biopesticides. *Ecology and Environmental Sciences*, 19(6): 1471–1477. [常明, 孙启宏, 周顺桂, 倪晋仁, 2010. 苏云金芽孢杆菌生物杀虫剂发酵生产的影响因素及其工艺选择. 生态环境学报, 19(6): 1471–1477.]

Chen P, 2021. The effect of artificial diet on the reproduction of *Harmonia axyridis*. Doctor dissertation. Tai’an: Shandong Agricultural University. [陈鹏, 2021. 人工饲料对异色瓢虫生殖的影响. 博士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]

Chen WY, Gao MH, Chen YT, Xin LL, Zheng GL, Xu XQ, Qu TL, Zhang BH, 2024. Process optimization and performance evaluation of B.t. microcapsule prepared by spray drying. *Agrochemicals*, 63(7): 494–499, 531. [陈蔚燕, 高明惠, 陈泳汀, 辛露露, 郑桂玲, 徐晓庆, 曲田丽, 张保华, 2024. B.t.微胶囊的喷雾干燥制备工艺优化及性能评价. 农药, 63(7): 494–499, 531.]

Chen X, Jaworski CC, Dai HJ, Liang YY, Guo XJ, Wang S, Zang LS, Desneux 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(2): 685–697.

Chen XR, Xu CX, Han DB, Zhao M, Zhou FC, 2021. Control of *Bemisia tabaci* in pepper by *Steinernema carpocapsae*. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(1): 110–116. [陈向荣, 徐彩霞, 韩杜斌, 赵明, 周福才, 2021. 小卷蛾斯氏线虫对辣椒烟粉虱的控制作用. 中国生物防治学报, 37(1): 110–116.]

Chen XY, Hopkins RJ, Zhao YP, Huang GH, 2017. A place to grow? Host choice and larval performance of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae) in the host *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology*, 46(3): 642–648.

Chen YF, Wang S, Di N, Jin DC, 2021. Evaluation of the effects of *Beauveria bassiana* on the predation of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) by *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae) using functional response model. *Acta Entomologica Sinica*, 64(8): 967–975. [陈亚丰, 王甦, 邸宁, 金道超, 2021. 利用功能反应模型评价球孢白僵菌对东亚小花

蝽捕食二斑叶螨的影响. 昆虫学报, 64(8): 967–975.]

Chen ZM, Zhao LC, Liu H, Liao YX, Wang X, 2019. Parasitic behavior and effect of *Microplitis similis* on larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Plant Protection*, 45(5): 71–74, 90. [陈壮美, 赵琳超, 刘航, 廖用信, 王星, 2019. 斯氏侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫的寄生行为及寄生效应. 植物保护, 45(5): 71–74, 90.]

Cheng Y, 2018. Optimization and evaluation of the artificial diet of *Coccinella septempunctata* L. Doctor dissertation. Guiyang: Guizhou University. [程英, 2018. 七星瓢虫人工饲料的优化和评价. 博士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]

Consoli FL, Parra JRP, Zucchi RA, 2010. Egg Parasitoids in Agroecosystems with Emphasis on Trichogramma. New York: Springer Science & Business Media. 315–340.

Cui XN, Xi BX, Peng B, Chang FM, Li HG, Shi XQ, Meng XS, 2025. Predatory functional response of *Orius minutus* to *Acyrthosiphon pisum* and *Odontothrips loti* at different temperatures. *Chinese Journal of Biological Control*, 41(2): 276–283. [崔晓宁, 席驳鑫, 彭斌, 常逢美, 李宏刚, 史薛强, 孟祥书, 2025. 不同温度下微小花蝽对豌豆蚜和牛角花齿蓟马的捕食作用. 中国生物防治学报, 41(2): 276–283.]

Duan YJ, He HG, Pu DQ, Yang H, Chen Q, Lu QC, 2021. Basic research status of *Coccinella septempunctata*. *Journal of Biosafety*, 30(1): 20–28. [段宇杰, 何恒果, 蒲德强, 杨慧, 陈琪, 陆秋成, 2021. 七星瓢虫基础研究现状. 生物安全学报, 30(1): 20–28.]

Ge LA, Ni XC, Liu XY, Huang J, Li Y, Liao CG, 2020. A study on the application of *Harmonia axyridis* to control aphids on eggplant. *Shanghai Vegetables*, 2020(6): 52–53. [葛立傲, 倪玺超, 刘小英, 黄俭, 李叶, 廖长贵, 2020. 异色瓢虫在茄子上防治蚜虫的应用研究. 上海蔬菜, 2020(6): 52–53.]

Ge SB, Liang Q, Zheng CG, Xu SL, Tang L, 2015. Research progresses on *Spodoptera exigua* nucleopolyhedrovirus. *China Plant Protection*, 35(9): 16–20. [葛少彬, 梁卿, 郑常格, 徐树兰, 汤历, 2015. 甜菜夜蛾核型多角体病毒研究进展. 中国植保导刊, 35(9): 16–20.]

Ge WC, Du GZ, Zhao YX, Zhang LY, Hu YX, Sun JW, Chen B, 2018. Searching for highly virulent entomopathogenic fungi of the western flower thirps, *Frankliniella occidentalis* (Pergande) and their potential applications in biocontrol. *Journal of Biosafety*, 27(4): 240–248. [葛文超, 杜广祖, 赵永鑫, 张凌英, 户艳霞, 孙军伟, 陈斌, 2018. 西花蓟马高毒力虫生真菌筛选及其生防应用潜力的研究进展. 生物安全学报, 27(4): 240–248.]

Gong YJ, Wang ZH, Wang S, Zhu L, Shi BC, Wei SJ, 2015. Biological control of the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) by the predatory mite *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae) on eggplant. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(5): 1123–1130. [宫亚军, 王泽华, 王甦, 朱亮, 石宝才, 魏书军, 2015. 智利小植绥螨对茄子二斑叶螨控制效果研究. 应用昆虫学报, 52(5): 1123–1130.]

Gu XH, Cui YH, Ruan WB, Cao L, Xue D, Li JZ, Tu YL, Hang DF, Han RC, 2021. Protection efficacy of tobacco seedings by entomopathogenic nematodes. *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1529–1535. [谷星慧, 崔永和, 阮维斌, 曹莉, 薛丹, 李江舟, 屠娅玲, 杭德发, 韩日畴, 2021. 昆虫病原线虫对烟苗的保护效果. 环境昆虫学报, 43(6): 1529–1535.]

Gu XH, Yang SY, Yu YB, Ji SG, Yang HL, Zhao JL, Zhang LM, Zhang HR, 2015. Application of biological control technology of *Myzus persicae* with *Aphidius gifuensis* in Yunnan Province. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(1): 1–7. [谷星慧, 杨硕媛, 余砚碧, 计思贵, 杨海林, 赵进龙, 张立猛, 张宏瑞, 2015. 云南省烟蚜茧蜂防治桃蚜技术应用. 中国生物防治学报, 31(1): 1–7.]

Gulizar·Abudukelimu, Mayinur·Wusiman, 2017. Pest control mechanism and sustainable utilization of natural enemy insects. *Jiangxi Agriculture*, 2017(17): 129, 136. [古丽扎尔·阿不都克力木, 玛依努尔·吾斯曼, 2017. 天敌昆虫控害机制与可持续利用. 江西农业, 2017(17): 129, 136.]

Guo HY, Wang HJ, Keyhani NO, Xia YX, Peng GX, 2020. Disruption of an adenylate-forming reductase required for conidiation, increases virulence of the insect pathogenic fungus *Metarhizium acridum* by enhancing cuticle invasion. *Pest Management Science*, 76(2): 548–558.

Hai F, Jiang YL, Wu YQ, Li T, 2023. Control effect of *Mallada basalis* (Walker, 1853) on aphids, and its influence on photosynthetic characteristics and quality of strawberry. *Journal of Environmental Entomology*, 45(3): 770–777. [海飞, 蒋月丽, 武予清, 李彤, 2023. 黄玛草蛉对蚜虫的防治效果及对草莓光合特性与品质的影响. 环境昆虫学报, 45(3): 770–777.]

He J, Ye FY, Du SJ, Cheng XF, Pan LT, Guo JY, Wang FL, Liu WX, 2022. Supplementary non-host food sources significantly enhance the biocontrol potential of the thelytokous strain of *Diglyphus wani* (Hymenoptera: Eulophidae) against *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(2): 218–227. [贺静, 叶福宇, 杜素洁, 程鑫斐, 潘立婷, 郭建洋, 王福莲, 刘万学, 2022. 补充非寄主源食物显著提高万

氏潜蝇姬小蜂孤雌产雌品系对美洲斑潜蝇的控害潜力. 昆虫学报, 65(2): 218–227.]

Hoddle MS, Van Driesche RG, Sanderson JP, 1998. Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Annual Review of Entomology*, 43: 645–669.

Hou F, Zou MT, Ni ZH, Yi TC, Guo JJ, Jin DC, 2023. Predation of two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* by predaceous mite *Amblyseius herbicolus*. *Journal of Plant Protection*, 50(2): 530–537. [侯飞, 邹梦婷, 倪召红, 乙天慈, 郭建军, 金道超, 2023. 草栖钝绥螨对二斑叶螨的捕食作用. 植物保护学报, 50(2): 530–537.]

Hu SN, Zhan YY, Chen YT, Wang SH, Zheng GL, Zhang BH, 2024. Preparation of SeNPV granules and evaluation of their stress resistance. *World Pesticides*, 46(4): 58–64. [胡素楠, 战映妤, 陈泳汀, 王淑涵, 郑桂玲, 张保华, 2024. 甜菜夜蛾核型多角体病毒颗粒剂制备及其抗逆性能评价. 世界农药, 46(4): 58–64.]

Huang NX, Enkegaard A, Osborne LS, Ramakers PMJ, Messelink GJ, Pijnakker J, Murphy G, 2011. The banker plant method in biological control. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(3): 259–278.

Huang YD, Sun K, Lu HX, Yu XP, 2022. Research progress on insect virus discovery and its application in pest management. *Chinese Journal of Virology*, 38(3): 757–768. [黄昱栋, 孙凯, 路惠馨, 俞晓平, 2022. 昆虫病毒资源的开发及其应用进展. 病毒学报, 38(3): 757–768.]

Huang YY, 1992. Artificial rearing and field releases of *Apanteles plutellae*. *Journal of Fujian Agricultural College*, 21(1): 47–51. [黄莹莹, 1992. 菜蛾绒茧蜂的人工繁殖与田间放蜂. 福建农学院学报, 21(1): 47–51.]

Jaworski CC, Xiao D, Xu QX, Ramirez–Romero R, Guo XJ, Wang S, Desneux N, 2019. Improving conservation biological control through varying the spatial arrangement of synthetic herbivore-induced plant volatile and companion plants. *Journal of Applied Ecology*, 56(5): 1176–1188.

Jiang SS, Li H, He LM, Wu KM, 2023. Population fitness of the Hoverfly, *Episyrphus balteatus* (De Geer) (Diptera: Syrphidae) fed on different aphid species. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(2): 254–263. [江珊珊, 李慧, 何莉梅, 吴孔明, 2023. 取食不同种类蚜虫黑带食蚜蝇的种群适合度. 中国生物防治学报, 39(2): 254–263.]

Jiao ZB, 2023. Field efficacy of *Plutella xylostella* granulosis virus against *Plutella xylostella* in alpine cabbage. *Hubei Plant Protection*, 2023(6): 13–14, 18. [矫振彪, 2023. 小菜蛾颗粒体病毒防治高山甘蓝小菜蛾田间药效试验. 湖北植保, 2023(6): 13–14, 18.]

Kuang ZY, Tong W, Sun P, Zeng HL, Ye PS, Zhao XY, Long YM, 2023. Research progress in infection characteristics and application of *Beauveria bassiana*. *Microbiology China*, 50(7): 3187–3197. [况再银, 童文, 孙佩, 曾华兰, 叶鹏盛, 赵馨怡, 龙艳梅, 2023. 球孢白僵菌的侵染特性及应用研究进展. 微生物学通报, 50(7): 3187–3197.]

Lei ZR, Wu SY, Wang HH, 2016. Progresses in biological control of vegetable insect pests in China. *Plant Protection*, 42(1): 1–6, 25. [雷仲仁, 吴圣勇, 王海鸿, 2016. 我国蔬菜害虫生物防治研究进展. 植物保护, 42(1): 1–6, 25.]

Li CJ, Li J, Zhao J, Cheng YY, Chen YG, Bai JK, Liu LZ, He XB, Li SJ, 2022a. Effects of rearing density on growth and development of nymphs and adult harvest rate of *Orius sauteri*. *Tobacco Science & Technology*, 55(8): 35–40. [李成军, 李娟, 赵钧, 程玉渊, 陈玉国, 白静科, 刘林州, 何晓冰, 李淑君, 2022a. 饲养密度对东亚小花蝽若虫生长发育及成虫获得率的影响. 烟草科技, 55(8): 35–40.]

Li CJ, Liu C, Sun YL, He L, Niu LL, Zhao J, Chen YG, He XB, Li SJ, 2022b. Suitability study of different oviposition substrates for *Orius sauteri*. *Acta Tabacaria Sinica*, 28(6): 127–132. [李成军, 刘畅, 孙与伦, 何雷, 牛莉莉, 赵钧, 陈玉国, 何晓冰, 李淑君, 2022b. 东亚小花蝽产卵基质适合性研究. 中国烟草学报, 28(6): 127–132.]

Li GN, Chen PT, Chen ML, Chen TY, Huang YH, Lü X, Li HS, Pang H, 2024a. Effect of *Ephestia kuehniella* eggs on development and transcriptome of the ladybird beetle *Propylea japonica*. *Insects*, 15(6): 407.

Li GN, Huang YH, Cai LQ, Mou Q, Liang YS, Sun YF, Li H, Yang KY, Li HS, Pang H, 2024b. Gut bacteria facilitate pollinivory of the ladybird beetle *Micraspis discolor*. *Frontiers in Microbiology*, 15: 1475985.

Li HA, Wang X, Li X, Guo R, Zhang YF, 2007. Integrated control technology of greenhouse whitefly. *China Plant Protection*, 27(11): 41–42. [李洪安, 王萱, 李响, 郭锐, 张远芳, 2007. 温室粉虱综合防治技术. 中国植保导刊, 27(11): 41–42.]

Li HK, Kang XW, 1989. A survey on the entomophthorales fungi on vegetable aphids in Changsha area. *Chinese Bulletin of Biological Control*, 5(2): 82–83. [李宏科, 康霄文, 1989. 长沙地区蔬菜蚜虫上虫霉菌研究初报. 生物防治通报, 5(2): 82–83.]

Li L, Zhang L, Zhao ZX, Wang MR, Li SG, 2022. Compatibility of *Metiarium flavoride* with trans-anethole and their cotoxicity to

Pieris rapae. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(2): 349–359. [李蕾, 张雷, 赵宗祥, 王梦茹, 李世广, 2022. 黄绿绿僵菌与反式茴香脑的相容性及其对菜青虫的联合毒力. 中国生物防治学报, 38(2): 349–359.]

Li P, Li YY, Xiang M, Wang MQ, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2020. Predation capacity of *Chrysopa pallens* larvae to young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(4): 513–519. [李萍, 李玉艳, 向梅, 王孟卿, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2020. 大草蛉幼虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食能力评价. 中国生物防治学报, 36(4): 513–519.]

Li S, Wang J, Huang NX, Jin ZY, Wang S, Zhang F, 2020. Research progress and prospect on banker plant systems of predators for biological control. *Scientia Agricultura Sinica*, 53(19): 3975–3987. [李姝, 王杰, 黄宁兴, 金振宇, 王甦, 张帆, 2020. 捕食性天敌储蓄植物系统研究进展与展望. 中国农业科学, 53(19): 3975–3987.]

Li SJ, Huang JP, Chang YY, Quan SY, Yi WT, Chen ZS, Liu SQ, Cheng XW, Huang GH, 2015. Development of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae) on two candidate host species, *Spodoptera litura* and *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomologist*, 98(2): 736–741.

Li SJ, Hopkins RJ, Zhao YP, Zhang YX, Hu J, Chen XY, Xu Z, Huang GH, 2016. Imperfection works: Survival, transmission and persistence in the system of Heliothis virescens ascovirus 3h (HvAV-3h), *Microplitis similis* and *Spodoptera exigua*. *Scientific Reports*, 6: 21296.

Li SY, Wang XY, Zhang B, 2013. Comprehensive utilization of *Antheraea pernyi* (Ⅰ): Technology of using *Antheraea pernyi* eggs to propagate *Trichogramma dendrolimi* to control *Ostrinia furnacalis*. *China Sericulture*, 34(1): 93–96. [李树英, 王学英, 张波, 2013. 柞蚕综合利用(Ⅰ)——利用柞蚕卵繁殖赤眼蜂防治玉米螟的技术. 中国蚕业, 34(1): 93–96.]

Li TM, Zhao RN, Guo F, Luo Y, Qin R, Chen WL, 2020. On four radish varieties as banker plants for *Aphidius gifuensis*. *Journal of Southwest China Normal University* (*Natural Science Edition*), 45(10): 42–48. [李太美, 赵如娜, 郭峰, 罗优, 覃韧, 陈文龙, 2020. 4 种萝卜品种作为烟蚜茧蜂载体植物的研究. 西南师范大学学报(自然科学版), 45(10): 42–48.]

Li XD, Dong YH, Liu YJ, Zhang GC, Li JL, Liu M, Bao ZC, Du CY, 2016. Preliminary study on control effects of *Encarsia formosa* Gahan on tobacco whitefly. *Shandong Agricultural Sciences*, 48(11): 113–115. [李现道, 董勇浩, 刘永杰, 张国超, 李建磊, 刘敏, 包自超, 杜传印, 2016. 利用丽蚜小蜂控制烟田烟粉虱效果研究初报. 山东农业科学, 48(11): 113–115.]

Li XR, Xin YF, Zhang MW, Cong B, 2002. Study on industrialized vegetable peach aphid control by *Aphidius gifuensis*. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 33(4): 262–265. [李学荣, 忻亦芬, 张明伟, 丛斌, 2002. 烟蚜茧蜂控制工厂化蔬菜桃蚜的研究. 沈阳农业大学学报, 33(4): 262–265.]

Li YC, Guo QQ, Liu H, Li GY, 2024. Prediction of the potential distribution of introduced predatory mite *Neoseiulus cucumeris*. *Acta Ecologica Sinica*, 44(12): 5219–5229. [李玉闯, 郭倩倩, 刘怀, 李广云, 2024. 引种捕食螨胡瓜新小绥螨在中国的适生区分布预测. 生态学报, 44(12): 5219–5229.]

Li YJ, 2013. Preliminary report on the control effect of *Coccinella septempunctata* on greenhouse aphids in Xining area. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2013(12): 149–151. [李育静, 2013. 西宁地区七星瓢虫防治温室蚜虫试验效果初报. 农业科技通讯, 2013(12): 149–151.]

Li Z, Chang CY, Yuan YY, Zhang XR, Ge F, 2023. Functional plant, *Cnidium monnieri*, facilitates the conservation and the biocontrol performance of natural enemies. *The Innovation Geoscience*, 1(3): 100045.

Liao P, Jiang L, Yin YF, Zhu YJ, Li YY, Mao JJ, Wang MQ, Chen HY, Zhang LS, Liu CX, 2020. Influence of leguminous host plants on growth, development and fecundity of *Arma chinensis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(4): 539–544. [廖平, 江兰, 殷焱芳, 朱艳娟, 李玉艳, 毛建军, 王孟卿, 陈红印, 张礼生, 刘晨曦, 2020. 不同豆科寄主植物对蠋蝽生长发育的影响. 中国生物防治学报, 36(4): 539–544.]

Lin DF, Liao JY, Wu SZ, Zeng JX, 2012. Study on virulence of abamectin and *Bacillus thuringiensis* mixed pesticides for *Plutella xylostella*. *Guangdong Agricultural Sciences*, 39(16): 78–80. [林德锋, 廖金英, 吴顺章, 曾建兴, 2012. 阿维菌素与苏云金芽孢杆菌复配剂对小菜蛾毒力研究. 广东农业科学, 39(16): 78–80.]

Liu F, Gu KP, Wen JQ, Liu H, Zhang K, Hu QB, Weng QF, 2025. Mixing *Beauveria bassiana* with natural pyrethrins and the application in pest control. *Journal of South China Agricultural University*, 46(1): 97–105. [刘芬, 古开平, 温嘉祺, 刘辉, 张珂, 胡琼波, 翁群芳, 2025. 球孢白僵菌与天然除虫菊素混配及防治害虫的应用. 华南农业大学学报, 46(1): 97–105.]

Liu M, Lin Y, Zhang JM, 2025. Pathogenicity evaluation of four pathogenic nematodes on pupal stage *Spodoptera exigua*. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 66(4):1001–1004. [刘敏, 林雅, 章金明, 2025. 四种病原线虫对蛹期甜菜夜蛾的致病力评价. 浙江农业科学, 66(4):1001–1004.]

Liu MX, Nima YZ, Feng XT, Li XL, Yang H, Zhang KJ, Xiang D,

Chen HQ, Li YY, Liu H, 2024. The effect of short-term high temperature stress on the biological characteristics of *Neoseiulus barkeri* (Hughes) carrying *Beauveria bassiana* (Vuillemin). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(3): 606–614. [刘明秀, 尼玛玉珍, 冯小天, 李宣良, 杨瑒, 张开军, 相栋, 陈翰秋, 李亚迎, 刘怀, 2024. 短时高温胁迫对携带球孢白僵菌的巴氏新小绥螨的生物学特性的影响. 应用昆虫学报, 61(3): 606–614.]

Liu TX, Stansly PA, Gerling D, 2015. Whitefly parasitoids: Distribution, life history, bionomics, and utilization. *Annual Review of Entomology*, 60: 273–292.

Liu WX, Zhang YB, Wan FH, 2008. Preference and fitness of *Propylea japonica* (Thunberg) feeding cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover, and cotton whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Chinese Journal of Biological Control*, 24(4): 293–297. [刘万学, 张毅波, 万方浩, 2008. 龟纹瓢虫对烟粉虱和棉蚜取食选择及适合度比较研究. 中国生物防治学报, 24(4): 293–297.]

Liu YL, Wang YL, Shu CL, Lin KJ, Song FP, Bravo A, Soberón M, Zhang J, 2018. Cry64Ba and Cry64Ca, two ETX/MTX2-type *Bacillus thuringiensis* insecticidal proteins active against hemipteran pests. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(3): e01996–17.

Long JZ, Guo WX, Ji M, Song YY, Li LL, Men XY, Cui HY, Yu Y, Liu CZ, 2023. Effect of high temperature stress on mortality and protective enzymes of *Encarsia formosa*. *Grassland and Turf*, 43(4): 130–136. [龙佳芝, 郭文秀, 季敏, 宋莹莹, 李丽莉, 门兴元, 崔洪莹, 于毅, 刘长仲, 2023. 高温胁迫对丽蚜小蜂死亡率和保护酶系的影响. 草原与草坪, 43(4): 130–136.]

Lü X, Han SC, De CP, Dai JQ, Li LY, 2014. Orthogonal array design for optimization of an artificial medium for in vitro rearing of *Trichogramma dendrolimi*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 152(1): 52–60.

Lu ZY, Ran HF, Liu WX, Qu CG, Liu XX, Li JC, Zhang QW, 2014. Effects of photoperiod and temperature on diapause induction in *Microplitis tuberculifer* (Hymenoptera: Braconidae) and the cold storage of its diapause pupae. *Acta Entomologica Sinica*, 57(10): 1206–1212. [路子云, 冉红凡, 刘文旭, 屈振刚, 刘小侠, 李建成, 张青文, 2014. 温度和光周期对管侧沟茧蜂滞育诱导及滞育茧的低温冷藏. 昆虫学报, 57(10): 1206–1212.]

Lundgren JG, Fergen JK, 2006. The oviposition behavior of the predator *Orius insidiosus*: Acceptability and preference for different plants. *BioControl*, 51(2): 217–227.

Ma RG, Jin JH, Yuan F, Chou LF, Shi JH, Zhang LY, Wang LL, 2024. Effects of storage temperature and time on egg hatching of *Harmonia axyridis*, *Propylaea japonica* and *Menochilus sexmaculatus*. *Acta Entomologica Sinica*, 68(4): 509–514. [马润国, 靳江华, 袁菲, 仇兰芬, 施俊伟, 张丽媛, 王利利, 2024. 存储温度和时间对七星瓢虫、异色瓢虫和龟纹瓢虫卵孵化的影响. 昆虫学报, 68(4): 509–514.]

Ma YY, Zhang F, Wang S, Di N, 2019. Synergistic effect of functional plant *Calendula officinalis* (Asterales: Asteraceae) to the colonization of *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) in greenhouse. *Journal of Environmental Entomology*, 41(2): 276–282. [马亚云, 张帆, 王甦, 邸宁, 2019. 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. 环境昆虫学报, 41(2): 276–282.]

Pathak S, 2006. Effects of different photoperiods and wavelengths of light on the life-history traits of an aphidophagous ladybird, *Coelophora saucia* (Mulsant). *Journal of Applied Entomology*, 130(1): 45–50.

Pei SS, Wu X, Li RJ, Zhao D, Lu XJ, Guo W, 2021. Screening of efficient *Metarhizium anisopliae* strains for *Frankliniella occidentalis* and its application in peanut field. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(4): 732–739. [裴松松, 吴轩, 李瑞军, 赵丹, 陆秀君, 郭巍, 2021. 对西花蓟马高效金龟子绿僵菌菌株筛选及在花生田间的应用效果. 中国生物防治学报, 37(4): 732–739.]

Peng Q, Zhou ZS, Zhang J, 2015. Research prospects in insecticidal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 712–722. [彭琦, 周子珊, 张杰, 2015. 苏云金芽胞杆菌杀虫晶体蛋白研究进展. 中国生物防治学报, 31(5): 712–722.]

Peng XF, Zhou XT, Weiner MHM, Shangguan YL, Ge F, Zhang JP, Cai ZP, 2024. Effects of different functional plants on cotton aphids and their predatory natural enemies. *Journal of Plant Protection*, 51(1): 39–49. [彭雪凡, 周晓通, 维尼热·买合木提, 上官一磊, 戈峰, 张建萍, 蔡志平, 2024. 不同功能植物对棉花蚜虫及其捕食性天敌的影响. 植物保护学报, 51(1): 39–49.]

Qiu DW, 2015. Analysis of the development situation and trends of biological pesticides in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 679–684. [邱德文, 2015. 生物农药的发展现状与趋势分析. 中国生物防治学报, 31(5): 679–684.]

Ren AJ, Shi L, Wang SJ, Han XH, Yan JL, 2024. Comparison of feeding preference of *Harmonia axyridis* to different species of aphids and its functional response to predation of 4th instar larvae. *China Plant Protection*, 44(2): 49–52, 64. [任爱景, 史磊,

王书军, 韩晓辉, 颜金龙, 2024. 异色瓢虫对不同蚜虫的喜食性及高龄幼虫的捕食功能反应. 中国植保导刊, 44(2): 49–52, 64.]

Richards PC, Schmidt JM, 1996. The effects of selected dietary supplements on survival and reproduction of *Geocoris punctipes* (Hemiptera: Lygaeidae). *The Canadian Entomologist*, 128(2): 171–176.

Shi ZH, Liu SS, 2003. Interspecific interactions between *Cotesia plutellae* and *Oomyzus sokolowskii*, two major parasitoids of diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(6): 949–954. [施祖华, 刘树生, 2003. 小菜蛾主要寄生性天敌——菜蛾绒茧蜂与菜蛾啮小蜂间的相互作用. 应用生态学报, 14(6): 949–954.]

Su JY, Liu SY, Yin XB, Zi LY, Hu YX, Du GZ, Chen B, 2018. The virulence of *Nomuraea rileyi* Nr0815 against the different instars of *Spodoptera litura* larvae. *Journal of Yunnan Agricultural University* (*Natural Sciences*), 33(3): 416–421. [苏锦尧, 刘思雨, 尹晓波, 字良语, 户艳霞, 杜广祖, 陈斌, 2018. 莱氏野村菌 Nr0815 对不同龄期斜纹夜蛾幼虫的毒力. 云南农业大学学报(自然科学), 33(3): 416–421.]

Sun DP, Lu Q, Wang P, Bai QR, Zang LS, 2021. Pathogenicity of four pathogenic fungi to *Myzus persicae* and *Trialeurodes vaporariorum*. *Journal of Jilin Agricultural University*, 43(6): 664–672. [孙大平, 路茜, 王鹏, 白庆荣, 臧连生, 2021. 4 种病原真菌对桃蚜和温室白粉虱的致病力. 吉林农业大学学报, 43(6): 664–672.]

Sun LJ, Yi WX, Zheng CY, 2017. Predatory and control ability of *Orius minutus* to the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(10): 3403–3408. [孙丽娟, 衣维贤, 郑长英, 2017. 微小花蝽对小菜蛾捕食控制的能力. 应用生态学报, 28(10): 3403–3408.]

Sun PL, Lu G, Chen WM, Huang ZG, Xue WY, 2007. Field trials of emulsifiable suspensions of *Beauveria bassiana* conidia for control aphid in shoot bamboo. *Journal of Zhejiang University* (*Agriculture and Life Sciences*), 33(2): 197–201. [孙品雷, 卢钢, 陈为民, 黄照岗, 薛文岳, 2007. 白僵菌孢子悬乳剂对笋竹蚜虫的田间控制效果研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 33(2): 197–201.]

Sun XN, Cao BB, Shu CL, Geng LL, Wang ZY, Zhang J, 2023. Advances in Bt insecticidal proteins against hemipteran pests. *Plant Protection*, 49(5): 390–398, 409. [孙晓妮, 曹蓓蓓, 束长龙, 耿丽丽, 王泽宇, 张杰, 2023. 对半翅目害虫具有活性的 Bt 杀虫蛋白研究进展. 植物保护, 49(5): 390–398, 409.]

Tan XL, Wang S, Zhang F, 2013. Optimization an optimal artificial diet for the predatory bug *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae). *PLoS ONE*, 8(4): e61129.

Tian CY, Hou YY, Zang LS, Ruan CC, 2019. Rearing *Trichogramma ostriniae* on the eggs of Chinese oak silkworm, *Antheraea pernyi* through multiparasitism with *Trichogramma dendrolimi*. *Journal of Plant Protection*, 46(2): 451–457. [田春雨, 侯洋旸, 臧连生, 阮长春, 2019. 利用松毛虫赤眼蜂共寄生柞蚕卵繁育玉米螟赤眼蜂. 植物保护学报, 46(2): 451–457.]

Tian J, Ren BZ, 2019. A conspectus of Syrphidae. *Journal of Jilin Agricultural University*, 41(1): 1–10. [田径, 任炳忠, 2019. 食蚜蝇研究概述. 吉林农业大学学报, 41(1): 1–10.]

Tian YL, Yang YX, Zhang YL, Wang XW, Liu YQ, 2024. Effects of host plant and prey on nymphal survival and development of the omnivorous predator, *Nesidiocoris tenuis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(3): 542–549. [田艳丽, 杨亦心, 章雨璐, 王晓伟, 刘银泉, 2024. 寄主植物及猎物对杂食性天敌烟盲蝽若虫存活和发育的影响. 中国生物防治学报, 40(3): 542–549.]

Torres-Barragan A, Suazo A, Buhler WG, Cardoza YJ, 2011. Studies on the entomopathogenicity and bacterial associates of the nematode *Oscheius carolinensis*. *Biological Control*, 59(2): 123–129.

Wang ED, Ming M, Liu ZL, Xie YH, Zhang B, Xu XN, 2024. Field application of the combination of predatory mites *Neoseiulus barkeri* and *Stratiolaelaps scimitus* as well as entomogenous fungus *Beauveria bassiana* to control of western flower thrips *Frankliniella occidentalis* in the tobacco field. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(6): 1243–1249. [王恩东, 明蒙, 刘正玲, 谢永辉, 张博, 徐学农, 2024. 巴氏新小绥螨和剑毛帕厉螨与球孢白僵菌田间联合应用防治烟草西花蓟马. 中国生物防治学报, 40(6): 1243–1249.]

Wang H, Wang YN, Wang K, Fang L, Su HH, 2024. Predation of *Diaphania indica* larvae by *Arma chinensis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(4): 813–819. [王桦, 王遥宁, 王凯, 方玲, 苏宏华, 2024. 蠋蝽若虫对瓜绢螟幼虫的捕食作用. 中国生物防治学报, 40(4): 813–819.]

Wang HH, Liu S, Wang SY, Lei ZR, 2020. Research and development of wettable powder of *Beauveria bassiana* and its control and application to *Frankliniella occidentalis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(6): 858–861. [王海鸿, 刘胜, 王帅宇, 雷仲仁, 2020. 150 亿孢子/g 球孢白僵菌可湿性粉剂的研发及对西花蓟马的防治应用. 中国生物防治学报, 36(6): 858–861.]

Wang HT, Zhang WD, Chen XZ, Zheng JF, Miao L, Qin QL, 2012.

Mass rearing the multicolored Asian lady beetle on beet armyworm larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(6): 1726–1731. [王红托, 张伟东, 陈新中, 郑建峰, 苗麟, 秦启联, 2012. 异色瓢虫规模化生产技术及瓢虫工厂的建立. 应用昆虫学报, 49(6): 1726–1731.]

Wang JY, Wan NF, Fan NN, Jiang JX, 2020. Functional response of *Microplitis pallidipes* to *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1319–1325. [王金彦, 万年峰, 范能能, 蒋杰贤, 2020. 淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾的寄生功能反应. 应用昆虫学报, 57(6): 1319–1325.]

Wang JY, Zhang H, Ji XY, 2023. Functional response of three *Trichogramma* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) to parasitizing *Spodoptera exigua* and *Plutella xylostella* eggs. *Journal of Environmental Entomology*, 45(4): 1046–1053. [王金彦, 张浩, 季香云, 2023. 3 种赤眼蜂对甜菜夜蛾和小菜蛾卵的寄生功能反应. 环境昆虫学报, 45(4): 1046–1053.]

Wang QY, Song CC, Shan CF, Yang CL, Bie XT, Lan YB, 2023. Research status and the prospect of biological control technology based on *Trichogramma*. *Chinese Journal of Agricultural Mechanization*, 44(5): 71–80. [王庆雨, 宋灿灿, 单常峰, 杨承磊, 别晓婷, 兰玉彬, 2023. 基于赤眼蜂的生物防治技术研究现状与展望. 中国农机化学报, 44(5): 71–80.]

Wang R, Wang S, Qu C, Li JH, Chen ZQ, Zhang F, 2016. The predatory functional response and searching effect of *Chrysopa pallens* larvae to *Bemisia tabaci* eggs on different host plants. *Journal of Plant Protection*, 43(1): 149–154. [王然, 王甦, 渠成, 李济航, 陈支芹, 张帆, 2016. 大草蛉幼虫对不同寄主植物上烟粉虱卵的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护学报, 43(1): 149–154.]

Wang S, Tan XL, Xu HX, Zhang F, 2012. Interspecific competition among three predacious ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae). *Scientia Agricultura Sinica*, 45(19): 3980–3987. [王甦, 谭晓玲, 徐红星, 张帆, 2012. 三种捕食性瓢虫的种间竞争作用. 中国农业科学, 45(19): 3980–3987.]

Wang WH, Zheng LJ, Ye ZP, Fu YG, Zhang F, Chen JY, 2024. Predation efficacy of the *Neoseiulus longispinosus* on the *Tetranychus cinnabarinus* at different temperatures. *Journal of Environmental Entomology*, 47(3): 984–992. [汪维华, 郑丽旧, 叶政培, 符悦冠, 张方, 陈俊谕, 2024. 不同温度下长刺新小绥螨对朱砂叶螨的捕食效能. 环境昆虫学报, 47(3): 984–992.]

Wang Y, Li TH, Wang XY, Zang LS, 2023. Recent advances in parasitism ecology, mass production and applications of *Trichogramma* in China. *Plant Protection*, 49(5): 399–409. [王勇, 李天昊, 王汐亚, 臧连生, 2023. 中国赤眼蜂寄生生态学与工厂化繁殖应用新进展. 植物保护, 49(5): 399–409.]

Wang ZZ, Ye XQ, Shi M, Li F, Wang ZH, Zhou YN, Gu QJ, Wu XT, Yin CL, Guo DH, Hu RM, Hu NN, Chen T, Zheng BY, Zou JN, Zhan LQ, Wei SJ, Wang YP, Huang JH, Fang XD, Strand MR, Chen XX, 2018. Parasitic insect-derived miRNAs modulate host development. *Nature Communications*, 9(1): 2205.

Wen H, Zhang ZK, Li QY, Lu Y, Sui L, 2025. Effects of *Beauveria bassiana* colonization on the growth and photosynthesis of maize plants under elevated CO_2. *Acta Ecologica Sinica*, 45(2): 974–983. [文欢, 张正坤, 李启云, 路杨, 隋丽, 2025. 大气 CO_2 浓度升高球孢白僵菌定殖对玉米植株生长及光合的影响. 生态学报, 45(2): 974–983.]

Wu KK, Gu G, Lai RQ, Zhou T, Han M, 2022. Effects of photoperiod, temperature and humidity on the parasitic ability and reproduction of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(11): 1488–1497. [吴珂珂, 顾钢, 赖荣泉, 周挺, 韩梦, 2022. 光周期和温湿度对烟蚜茧蜂寄生能力和繁殖的影响. 昆虫学报, 65(11): 1488–1497.]

Wu SY, Wang PX, Zhang ZK, Xu XN, Lei ZR, 2014. Capability of the predatory mite in carrying conidia of *Beauveria bassiana* and conidia vitality and virulence to *Frankliniella occidentalis*. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(20): 3999–4006. [吴圣勇, 王鹏新, 张治科, 徐学农, 雷仲仁, 2014. 捕食螨携带白僵菌孢子的能力及所携孢子的活性和毒力. 中国农业科学, 47(20): 3999–4006.]

Wu W, Cheng W, Zhang GX, Lu S, Wang C, 2015. Preliminary report on the control of *Tetranychus cinnabarinus* on greenhouse strawberry by *Phytoseiulus persimilis*. *China Plant Protection*, 35(1): 34–36. [武雯, 成玮, 张顾旭, 陆爽, 王春, 2015. 智利小植绥螨防治大棚草莓二斑叶螨试验初报. 中国植保导刊, 35(1): 34–36.]

Wu ZW, Yuan RZ, Gu QJ, Wu XT, Gu LC, Ye XQ, Zhou YN, Huang JH, Wang ZZ, Chen XX, 2023. Parasitoid serpins evolve novel functions to manipulate host homeostasis. *Molecular Biology and Evolution*, 40(12): msad269.

Xia N, Yang G, You MS, 2015. Regulation of dominant insect pests and natural enemies by intercropping tomato in cauliflower-based fields. *Acta Entomologica Sinica*, 58(4): 391–399. [夏咛, 杨广, 尤民生, 2015. 间作番茄对花椰菜田主要害虫和天敌的调控作用. 昆虫学报, 58(4): 391–399.]

Xie M, Lu Y, Zhang YY, Li QY, Sui L, Zhang ZK, 2023. Effects of *Beauveria bassiana*-maize symbionts on the growth and development of *Ostrinia furnacalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(6): 1851–1859. [谢敏, 路杨, 张云月, 李启云,

隋丽, 张正坤, 2023. 球孢白僵菌–玉米共生体对亚洲玉米螟个体发育的影响及其机理. 应用昆虫学报, 60(6): 1851–1859.]

Xie MQ, Wang LJ, Han YQ, 2023. Compatibility of five commonly used pesticides with *Beauveria bassiana*. *China Plant Protection*, 43(3): 9–12. [谢梅琼, 王龙江, 韩永强, 2023. 5 种常用农药与生防菌球孢白僵菌的相容性研究. 中国植保导刊, 43(3): 9–12.]

Xu HP, He XY, Jiang HL, Zhang H, Lei ZG, Xie HC, Wu SY, 2021. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* to *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and its indirect effects on *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 37(3): 436–442. [徐华苹, 贺小勇, 蒋洪丽, 张慧, 雷仲仁, 解海翠, 吴圣勇, 2021. 球孢白僵菌对二斑叶螨的致病性和对天敌智利小植绥螨的间接影响. 中国生物防治学报, 37(3): 436–442.]

Xu QX, Wang J, Mi YY, Liu JX, Di N, Wang S, Li S, 2024. Synergistic effect of *Calendula officinalis* on colonization and pest control of *Orius sauteri* in strawberry greenhouse in Northern China. *Journal of Environmental Entomology*, 46(6): 1286–1292. [徐庆宣, 王杰, 米莹莹, 刘俊秀, 邸宁, 王甦, 李姝, 2024. 北方温室内金盏菊对东亚小花蝽定殖及防控草莓害虫的增效作用. 环境昆虫学报, 46(6): 1286–1292.]

Xu SL, 2011. Field efficacy against *Spodoptera exigua* and effect to natural enemies on cabbage of 1×10^9 PIB/mL *Spodoptera exigua* nucleopolyhedrovirus SC. *Guangdong Agricultural Sciences*, 38(12): 87–88. [徐树兰, 2011. 10 亿 PIB/mL 甜菜夜蛾核型多角体病毒悬浮剂防治甘蓝甜菜夜蛾的效果及对天敌昆虫的影响. 广东农业科学, 38(12): 87–88.]

Xu Y, Zhang Q, Guo XR, Zhao M, Li WZ, Xi YQ, Wang GP, Hu MX, Zhang LJ, 2024. Predicting the suitable regions of *Propylea japonica* in China under current and future climate. *Journal of Environmental Entomology*, 46(6): 1391–1400. [徐扬, 张琦, 郭线茹, 赵曼, 李为争, 席玉强, 王高平, 胡明鑫, 张利娟, 2024. 当前和未来气候下龟纹瓢虫在中国的适生区预测. 环境昆虫学报, 46(6): 1391–1400.]

Xu YL, Wu LM, Yang RS, Lu WY, 2010. Control effect of *Beauveria bassiana* Bb06 against *Ostrinia furnacalis*. *Agrochemicals*, 49(11): 836–837. [徐艳聆, 吴利民, 杨瑞生, 吕文彦, 2010. 球孢白僵菌 Bb06 菌株对亚洲玉米螟的药效试验. 农药, 49(11): 836–837.]

Yang CJ, Ren GH, Du XX, Li SW, Qian YR, Huang GH, Yu H, 2022. Comparisons of pathogenic course of two *Heliothis virescens* ascovirus isolates (HvAV-3i and HvAV-3j) in four noctuid (Lepidoptera) pest species. *Journal of Invertebrate Pathology*, 189: 107734.

Yang FL, Cao TT, Zhang B, Wu HM, 2020. Field control efficacy of entomopathogenic nematodes against *Phyllotreta striolata* on Chinese cabbage. *China Plant Protection*, 40(11): 48–51. [杨凤丽, 曹婷婷, 张斌, 吴慧明, 2020. 昆虫病原线虫对小白菜黄曲条跳甲的田间防效. 中国植保导刊, 40(11): 48–51.]

Yang GG, Fan W, Zhang Q, Li M, Jiang ZX, Duan P, Hu CX, Chen GH, Zhang XM, 2022. Predatory Function of *Harmonia axyridis* and *Propylea japonica* larvae to young larvae of *Tuta absoluta*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(4): 959–966. [杨桂群, 范苇, 张倩, 李貌, 蒋正雄, 段盼, 胡昌雄, 陈国华, 张晓明, 2022. 异色瓢虫和龟纹瓢虫幼虫对番茄潜叶蛾低龄幼虫的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 38(4): 959–966.]

Yang YY, Wang QY, Kong FF, Song P, Nangong ZY, 2012. Lethal and sublethal effects of *Xenorhabdus nematophila* on *Plutella xylostella* larvae in laboratory. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 14(3): 291–297. [杨云艳, 王勤英, 孔繁芳, 宋萍, 南宫自艳, 2012. 嗜线虫致病杆菌对小菜蛾的致死和亚致死效应室内评价. 农药学学报, 14(3): 291–297.]

Yang Z, 2020. Biological control against Asian corn borer (ACB) by *Trichogramma dendrolimi* vectored *Beauveria bassiana*. Master dissertation. Changchun: Jilin Agricultural University. [杨芷, 2020. 松毛虫赤眼蜂携带球孢白僵菌防治亚洲玉米螟研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学.]

Yao HY, Wang LL, Wang F, 2015. Effect of *Steinernema feltiae* on the mortality rate of *Spodoptera litura* larvae. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 56(3): 374–376. [姚红燕, 王丽丽, 汪峰, 2015. 斯氏线虫对斜纹夜蛾幼虫致死率的影响. 浙江农业科学, 56(3): 374–376.]

Yi SJ, Hopkins RJ, Chen XY, Chen ZM, Wang X, Huang GH, 2020. Effects of temperature on the development and fecundity of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Physiological Entomology*, 45(2/3): 95–102.

Yin YY, Zhai YF, Lin QC, Yu Y, Zheng L, Chen H, 2019. Impacts of periodic heat events on the application of *Encarsia formosa*. *Plant Protection*, 45(3): 115–118, 124. [尹园园, 翟一凡, 林清彩, 于毅, 郑礼, 陈浩, 2019. 周期性高温对丽蚜小蜂田间应用效果的影响. 植物保护, 45(3): 115–118, 124.]

Yu H, Yang CJ, Li N, Zhao Y, Chen ZM, Yi SJ, Li ZQ, Adang MJ, Huang GH, 2021. Novel strategies for the biocontrol of noctuid pests (Lepidoptera) based on improving ascovirus infectivity using *Bacillus thuringiensis*. *Insect Science*, 28(5): 1452–1467.

Yu JM, Kong CX, Xiao Y, Yu XW, Bai MJ, Wang R, Zhang HH, 2019. Combination effect of entomopathogenic nematodes P01 and *Beauveria bassiana* Bbn6 against tobacco white grubs. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 32(12): 2820–2825. [余佳敏, 孔垂旭, 肖勇, 余祥文, 白梦娇, 王蓉, 张海华, 2019. 昆虫病原线虫 P01 与白僵菌 Bbn6 对烟田蛴螬的联合作用. 西南农业学报, 32(12): 2820–2825.]

Yu L, Zheng LX, Zhang CQ, Zhang ZG, Wei HY, 2016. Effects of temperature and photoperiod on diapause of *Aphidius gifuensis* Ashmead. *Tobacco Science & Technology*, 49(11): 21–25. [余玲, 郑丽霞, 张超群, 张志高, 魏洪义, 2016. 温度及光周期对烟蚜茧蜂滞育的影响. 烟草科技, 49(11): 21–25.]

Zhang CR, Ban FX, Liu SL, Mao TT, Zhang XY, Cao Y, 2023. The suitability of eggs of *Cadra cautella* and *Ephestia kuehniella* as alternative prey for mass-reared *Orius nagaii*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 163–169. [张昌容, 班菲雪, 刘少兰, 卯婷婷, 章行远, 曹宇, 2023. 两种鳞翅目昆虫卵对明小花蝽的饲喂效果评价. 应用昆虫学报, 60(1): 163–169.]

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 F, Luo C, Zhang JM, Wang S, 2011. Biological control of whitefly in protected vegetable fields. *China Vegetables*, 2011(5): 25–27. [张帆, 罗晨, 张君明, 王甦, 2011. 保护地菜田粉虱的生物防治. 中国蔬菜, 2011(5): 25–27.]

Zhang GR, Zhang WQ, Zhou Q, Hu J, Xu WH, 2024. Biological control benefits mankind. *Science China Life Sciences* (*Vitae*), 54(9): 1626–1640. [张古忍, 张文庆, 周强, 胡建, 徐卫华, 2024. 生物防治造福人类. 中国科学: 生命科学, 54(9): 1626–1640.]

Zhang JM, Liu M, Chen YQ, Lin WC, Pan QB, Li JQ, Lu YB, 2019. Field effect of beet armyworm multiple nucleopolyhedrovirus on beet armyworm in asparagus plantations. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 60(6): 940–941, 943. [章金明, 刘敏, 陈永全, 林文彩, 潘秋波, 李建群, 吕要斌, 2019. 甜菜夜蛾核型多角体病毒对芦笋园甜菜夜蛾的田间防效. 浙江农业科学, 60(6): 940–941, 943.]

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.]

Zhang N, Zhou L, Kang N, Zhao Q, Hu HY, 2023. Multivariate ratio analysis of morphological characteristics among four important species of the genus *Diglyphus* (Hymenoptera: Eulophidae): Descriptions of two new record species of *Diglyphus* from China. *Journal of Environmental Entomology*, 45(2): 342–352. [张楠, 周乐, 康宁, 赵倩, 胡红英, 2023. 基于多元比例分析研究 4 种潜蝇姬小蜂(膜翅目: 姬小蜂科)的形态特征差异: 附 2 中国新纪录种. 环境昆虫学报, 45(2): 342–352.]

Zhang TY, Jiang JX, Zhang H, Wang JY, You CM, Chen YJ, Ji XY, 2024. Attractiveness of two host plants to *Microplitis pallidipes* and their volatile compounds identification. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(1): 62–73. [张彤瑶, 蒋杰贤, 张浩, 王金彦, 尤春梅, 陈义娟, 季香云, 2024. 两种寄主植物对淡足侧沟茧蜂的引诱作用及挥发物成分分析. 应用昆虫学报, 61(1): 62–73.]

Zhang WH, Huang SY, Li HQ, Su J, Zhang JP, Ge F, Cai ZP, 2024. Characteristics and potential uses of the plant *Ammi visnaga*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(6): 1170–1176. [张文慧, 黄淑洋, 李慧琴, 苏杰, 张建萍, 戈峰, 蔡志平, 2024. 功能植物阿米芹的特征及其应用潜能. 应用昆虫学报, 61(6): 1170–1176.]

Zhang ZK, Zhou YD, Wu XM, 2023. Effect of temperature on the predation of *Orius sauteri* against *Frankliniella occidentalis*. *China Cucurbits and Vegetables*, 36(9): 123–127. [张治科, 周银迪, 吴小梅, 2023. 温度对东亚小花蝽捕食西花蓟马效果的影响. 中国瓜菜, 36(9): 123–127.]

Zhang ZX, 2015. Research and application progress of broad-spectrum insect baculovirus biopesticides. *Huazhong Entomology*, 11: 65–82. [张忠信, 2015. 广谱昆虫杆状病毒生物农药研究与应用进展. 华中昆虫研究, 11: 65–82.]

Zhang ZX , 2021. Biological Pesticide *of Spodoptera brassicae* Nuclear Polyhedrosis Virus . Beijing: Science Press. 1–60. [张忠信, 2021. 甘蓝夜蛾核型多角体病毒生物农药. 北京: 科学出版社. 1–60.]

Zhang ZY, Tuerxun, Guo WC, Erkin Memet, Wu JM, 2012. Research on technique with preventative effect on *Trialeurodes vaporariorum* by artificially propagated *Encarsia formosa* in greenhouse in Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 49(2): 243–248. [张振宇, 吐尔逊, 郭文超, 艾尔肯·麦麦提, 吴家明, 2012. 人工繁殖丽蚜小蜂防治温室白粉虱田间放蜂技术研究. 新疆农业科学, 49(2): 243–248.]

Zhao J, Li YY, Wang L, Zhang F, Cao H, Wang S, 2018. Dispersal behaviors of *Encarsia formosa* in the greenhouse. *Chinese*

Journal of Biological Control, 34(6): 813–817. [赵静, 李媛媛, 王蕾, 张帆, 曹慧, 王甦, 2018. 温室条件下丽蚜小蜂的扩散行为. 中国生物防治学报, 34(6): 813–817.]

Zhao J, Wang L, Zhang F, Cao H, Wang S, 2019. Effect of cold storage on development and dispersal of *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 35(4): 497–503. [赵静, 王蕾, 张帆, 曹慧, 王甦, 2019. 低温贮藏对丽蚜小蜂生长发育和扩散的影响. 中国生物防治学报, 35(4): 497–503.]

Zhao Y, Liu J, Lu Y, Sui L, Xu WJ, Du Q, Li QY, Zhang ZK, 2023. Control effect of *Trichogramma chilonis* carrying *Beauveria bassiana* on soybean podborer. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(4): 760–766. [赵宇, 刘佳, 路杨, 隋丽, 徐文静, 杜茜, 李启云, 张正坤, 2023. 螟黄赤眼蜂携带球孢白僵菌防治大豆食心虫. 中国生物防治学报, 39(4): 760–766.]

Zhong SY, Liang XH, Wang DJ, Li GY, Zhang ZK, Wang HH, Lei ZR, Wu SY, Gao YL, 2025. The effect of endophytic colonization of cowpeas by *Beauveria bassiana* on *Liriomyza sativae*. *Chinese Journal of Biological Control*, 41(3): 691–701. [钟绍忆, 梁兴慧, 王登杰, 李桂英, 张治科, 王海鸿, 雷仲仁, 吴圣勇, 高玉林, 2025. 球孢白僵菌内生定殖豇豆对美洲斑潜蝇种群的影响. 中国生物防治学报, 41(3): 691–701.]

Zhou SX, Gao P, He SC, Lu X, Li XY, Gao YB, 2025. *Trichogramma* species and strains screening and field performance evaluation for controlling *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Biological Control*, 41(1): 1–6. [周淑香, 高芃, 赫思聪, 鲁新, 李小宇, 高月波, 2025. 防治小菜蛾赤眼蜂蜂种和品系筛选与田间防治效果评价. 中国生物防治学报, 41(1): 1–6.]

Zhou XM, Lei CL, 2002. Utilization efficiency and functional response of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) to different preys. *Acta Ecologica Sinica*, 2002(12): 2085–2090. [周兴苗, 雷朝亮, 2002. 南方小花蝽对不同猎物捕食作用及利用效率. 生态学报, 2002(12): 2085–2090.]

Zhu XL, Gou JY, Wu HZ, Huang CY, Yang MF, Yang X, Yu XF, 2024. Predation effect of *Aphidoletes aphidimyza* on *Uroleucon formosanum*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(1): 109–119. [朱绪立, 苟剑渝, 吴慧子, 黄纯杨, 杨茂发, 杨相, 于晓飞, 2024. 食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的捕食作用. 应用昆虫学报, 61(1): 109–119.]

Zhu ZY, Di N, Zhang F, Xu ZG, Wang S, 2022. Research progress and prospect of minute pirate bug *Orius sauteri*. *Journal of Plant Protection*, 49(6): 1551–1564. [朱正阳, 邸宁, 张帆, 徐志刚, 王甦, 2022. 天敌昆虫东亚小花蝽研究进展与展望. 植物保护学报, 49(6): 1551–1564.]

Zou YD, Chen GC, Meng QL, Wang GM, Geng JG, 1999. Effect of starvation on predation of *Harmonia axyridis*. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(1): 115–119. [邹运鼎, 陈高潮, 孟庆雷, 王公明, 耿继光, 1999. 饥饿对七星瓢虫捕食作用的影响. 生态学报, 1999(1): 115–119.]