



中国害虫生态防控的成就、技术突破与未来展望^{*}

戈 峰^{1**} 门兴元¹ 李 卓¹ 鞠 倩² 张兴瑞¹ 梁潇以¹

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省农业有害生物绿色防控重点实验室, 济南 250100;

2. 山东省花生研究所, 国家花生工程技术研究中心, 青岛 266100)

摘 要 自 20 世纪 90 年代以来, 农田集约化和作物单一化加剧了农田景观生物多样性下降, 削弱了自然天敌的生态调控作用, 导致农业害虫发生频繁、危害严重, 并导致农药使用量增加。在此背景下, 害虫生态防控受到了广泛关注。本文重点梳理了近年来我国害虫生态调控理论的发展脉络, 系统介绍了食物网关系解析的新方法, 阐述了基于生态调控理论的“田内-田边-景观”三维生态防控技术研究及其应用, 展望了未来害虫生态防控技术发展的方向。旨在推动我国害虫防控的绿色转型及技术进步, 进而保障国家粮食安全和生态安全。

关键词 生态防控技术; 生态调控理论; 功能植物; 作物多样性; 农田景观设计

Main achievements and prospects in the ecological regulation and management of pests in China

GE Feng^{1**} MEN Xing-Yuan¹ LI Zhuo¹ JU Qian² ZHANG Xing-Rui¹ LIANG Xiao-Yi¹

(1. Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection,

Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. National Engineering Technology Research

Center of Peanut, Shandong Peanut Research Institute, Qingdao 266100, China)

Abstract Since the 1990s, the intensification of agriculture and extensive planting of monocultures has led to a decline landscape biodiversity in farmland, weakening the regulatory role of the natural enemies of agricultural pests. This has resulted in more frequent pest outbreaks, more severe crop damage, and higher pesticide usage. Consequently, the ecological regulation and control of pests has become the focus of increasing research. This review highlights the role of ecological regulation and control of pests in reconstructing farmland landscapes and enhancing the capacity for natural pest suppression. The development of theories of ecological regulation and management of pests (ERMP) in China is outlined, and new methods for analyzing food web relationships are introduced, with emphasis on the research and application of the “field-field edge-landscape” three-dimensional ecological pest control technology based on ERMP. Finally, future directions for ecological pest management technologies are discussed, with the goal of advancing pest control strategies and safeguarding food security and ecological sustainability in China.

Key words ecological pest control technologies; ecological regulation theory; functional plants; crop biodiversity; farmland landscape design

害虫治理的发展经历了多个阶段, 从最初的原始防治、物理防治、化学防治到综合治理

(Integrated pest management, IPM)。20 世纪 60 年代, IPM 概念的提出标志着害虫防控从单

^{*}资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划资助 (2023YFD1400800); 山东省顶尖人才“一事一议”项目资助 (2023YSYY-006); 国家自然科学基金联合基金项目 (U24A20412)

^{**}第一作者和通讯作者 First and corresponding author, E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2025-03-23; 接受日期 Accepted: 2025-05-05

一化学防治向多元化策略转变,强调化学防治、生物防治及农业防治的协同应用 (Stern *et al.*, 1959; Kogan, 1998; Ehler, 2006)。我国在 1975 年确定了“预防为主, 综合防治”的植保方针, 之后又提出了“公共植保, 绿色植保”的理念。然而, IPM 在全球范围内的实践仍然面临巨大挑战, 特别是在农田景观退化、作物单一化和气候变化等背景下, 害虫暴发频率增加, 农药使用量持续上升, 对生态环境和粮食安全构成严重威胁。因此, 如何在减少化学农药依赖的同时, 实现高效、可持续的害虫控制, 成为全球农业可持续发展的一大课题。

国内外学者逐渐认识到, 传统以降低害虫种群为核心的治理理论存在局限性, 需要新的理论体系指导现代农业生产中的害虫可持续治理。1981 年, Flint 和 van den Bosch (1981) 提出“生态学为基础的害虫管理”(Ecologically-based pest management, EBPM) 概念。随后, 丁岩钦 1993 年提出了害虫种群生态控制 (Ecological pest control, EPC) 的理念, 强调从生态因子入手控制害虫 (丁岩钦, 1993)。在此基础上, 戈峰 (1998) 率先提出了害虫生态调控 (Ecological regulation and management of pests, ERMP) 的理论和方法, 进一步发展了害虫区域性生态调控 (Regional ecological regulation and management of pest, RERMP) 理论 (戈峰, 2001), 提出基于生态服务功能的害虫调控策略 (戈峰等, 2014), 并在 2020 年全面论述了害虫生态调控原理、关键技术及实践路径, 从而形成了完整的害虫生态调控体系 (戈峰, 2020)。当前, 害虫生态调控理论系统已构建了从田间、景观到区域的多尺度害虫生态调控框架, 强调通过重塑农田生态环境, 实现害虫的可持续治理 (戈峰, 2020)。该理论不仅涵盖了害虫种群动态的生态调控机制, 还提出了利用农田景观生态设计、功能植物种植、生物多样性保护、时空生态位配置、栖息地改造等生态防控技术, 以重塑农田景观生态系统, 并协同其它防控措施, 将害虫控制在生态经济阈值之下, 达到经济可行、生态可持续、社会可接受的目的, 为现代害虫生态防控提供了系统

化的理论指导。

国际上, 也非常重视生态防控的研究并形成了各国特色。如: 欧洲的农业生态系统研究强调通过增加半自然生境 (如绿篱、野花带) 来提升天敌群落稳定性, 从而减少害虫种群 (Bianchi *et al.*, 2006); 北美地区则聚焦于功能植物的优化配置, 以提高天敌昆虫和传粉昆虫的保育和利用效率 (Landis *et al.*, 2000)。相比之下, 在生态调控理论的指导下, 我国的生态防控研究不仅关注农田景观设计和功能植物的利用, 还提出了“田间-田边-景观”三维生态防控策略, 形成了独具特色的害虫生态防控体系。通过在中国知网 CNKI 输入生态调控、生态防控二个关键词查找 2000-2025 年我国发表的生态调控理论与生态防控技术文章数量 (图 1) 可以看出, 自 2000 年以来每 5 年的论文数量均明显增加, 说明我国生态调控理论与生态防控技术方面的研究进展显著, 相关理论体系逐步完善, 生态防控技术得到大规模推广应用。然而, 面对全球农业格局的变化和生态环境压力的加剧, 仍需进一步深化害虫生态防控的理论与实践研究。本研究将系统梳理近年来我国生态防控的理论发展、关键技术及应用模式, 以期对未来害虫生态防控的发展提供科学依据, 助力我国农业的可持续发展。

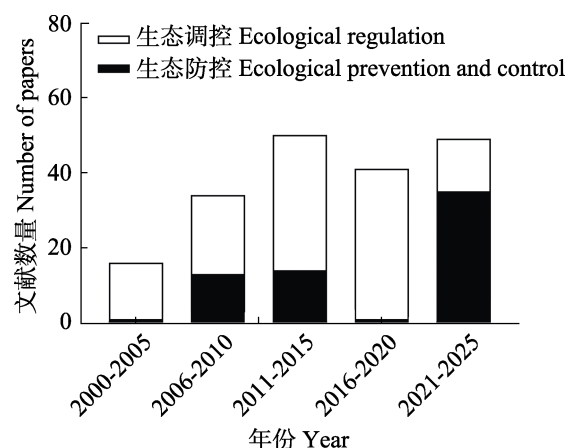


图 1 2000-2025 年中国生态调控理论与生态防控技术发表的论文数量变化 (来源于 CNKI)

Fig. 1 Changes in the number of papers published on China's ecological regulation theory and ecological prevention and control technology from 2000 to 2025 (from CNKI)

1 害虫生态调控理论及其发展

1.1 害虫生态调控的理论基础

1.1.1 种群调节理论 种群调节理论是害虫生态调控最基础的理论。主要基于对种群内部和外部生态因子的调控,使害虫在“植物-害虫-天敌”食物链中维持一定的种群密度。本质上,其源于生物密度制约的多元生态因子,包括种内和种间资源竞争、天敌的捕食与寄生、植物对害虫的抗性等。当害虫种群密度较高时种内竞争加剧,天敌捕食和寄生作用增强,同时植物抗性提升,从而抑制害虫种群增长;相反,当害虫种群密度较低时,由于天敌和植物抗性作用减弱,害虫数量可能回升。因此,在农业生态系统中,应充分利用生态系统内部及外部的各种生态因素,基于生态调节与控制两个过程,将天敌控害、植物抗性等有益因子调节上升,而将害虫的种群密度调节下降,使害虫种群在经济允许危害水平之下的平衡密度周围波动(戈峰, 2008)。

1.1.2 生物多样性相生相克原理 从农田景观食物网相互作用关系来看,害虫与天敌之间存在相互依存、相生相克的动态平衡。缺乏天敌控制,害虫就容易猖獗、暴发成灾;反之,如果缺少害虫,天敌则失去食物来源,从而削弱控害能力。因此,重建农田景观生态系统,为天敌提供适宜的生境和栖息地,是实现害虫可持续控制的关键策略。研究也表明,相较于单一作物集约化种植的简单农业生态系统,在镶嵌大量非作物生境的复杂农业生态系统中,多样化的生境能为天敌提供一系列的替代猎物或寄主,从而支持更为丰富的天敌种群(尤士骏等, 2019)。因此,景观复杂度高的农田生态系统中,植食性害虫数量相对较少,作物受害虫侵扰较小。但是,物种多样性与天敌控害能力并非简单的线性关系。生物多样性增加,也可能拓展害虫的食物链,特别是增大了广食性害虫暴发成灾的风险,导致“桥梁田”出现、危害更加严重。最近, Wan 等(2020, 2022)通过在全球尺度上的分析发现增加植物多样性,如在农田周边种植功能植物或间作套种,

将增加寄生性和捕食性天敌的数量,降低害虫的丰度和为害程度。因此,通过农田景观生境设计,利用功能植物“以草养虫、以虫治虫”,为天敌提供“衣、食、住、行”,同时避免形成害虫的“桥梁田”,是生态防控中生物多样性利用的重要策略。此外,生态位理论、岛屿生态学理论和多营养级作用理论等,可以在一定程度上阐明如何基于生物多样性种植调控害虫的种群数量,防止其暴发成灾(戈峰, 2020)。

1.1.3 上行作用和下行作用途径 在农田景观“植物-害虫-天敌”食物网中,害虫处于第二营养级,作为初级消费者,其种群数量的增长受到两方面约束:一是来自更高营养级天敌的捕食与寄生压力,二是来自第一营养级植物生长状况的限制。所以,害虫生态防控的核心在于协调上行作用途径(Bottom-up effect)与下行作用途径(Top-down effect),即通过食物资源管理和栖息地优化(上行作用)调控害虫种群,同时依赖天敌的捕食和寄生(下行作用)实现害虫控制(赵紫华, 2016)。这一原理要求我们,一方面要充分利用自然天敌自上而下(Top-down)对害虫进行调节和控制,另一方面利用植物或者作物抗性自下而上(Bottom-up)对害虫进行防御,两者相辅相成,共同发挥农田景观食物网在害虫调控中的生态防控功能,实现害虫种群的长期稳定控制。

1.2 生态调控理论的发展

近年来,害虫生态调控理论在农田、景观和区域三个空间尺度得到了深入发展,并相应形成了系统的技术路径及策略。如:在农田尺度,论述了害虫生态调控的理论与方法,提出了从作物-害虫-天敌食物链出发,充分发挥作物抗性与天敌作用的害虫控制新思路(戈峰, 1998);在景观尺度,根据食物网原理,发展了基于害虫与天敌在农田、森林、防护林带等不同景观斑块中转移扩散过程的景观害虫生态调控理论,提出了区域性害虫生态调控的理论与方法(戈峰等, 2011; 欧阳芳和戈峰, 2011);在区域尺度,基于昆虫的生物控害功能、授粉功能和土壤分解功能,提出了昆虫生态服务概念,

将害虫防治拓展到昆虫的生态服务功能,发展了基于提升生态服务功能的害虫区域性生态调控(戈峰等, 2014)。目前,害虫生态调控已形成较为系统的理论体系,包括理论基础、技术方法、指导思想及应用策略(戈峰, 2020),该理论体系不仅为害虫生态防控的实践提供了科学指导,同时也得到了社会与政府的广泛认可与应用,逐步成为当前害虫防治的主流理念,为我国害虫可持续治理奠定了坚实的理论基础(戈峰, 2020)。

2 害虫生态调控研究的方法

2.1 定量解析食物网关系的方法

害虫生态调控的基础在于对复杂的农田食物网进行解析。近年来,针对农田景观中的食物网结构及其控害关系,已发展出一系列定量分析植物-害虫-天敌相互作用关系的方法。如为解决害虫与天敌在农田景观中的迁移扩散难以确定的问题,采用稳定同位素碳-氮标记技术,成功追溯了棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 成虫的寄主来源,并解析了捕食性天敌瓢虫的食物来源,完善了食物网中作物-害虫-天敌的食物溯源方法(Ouyang *et al.*, 2015);利用诊断 PCR 技术构建了棉蚜 *Aphis gossypii*-初级寄生蜂-重寄生蜂定量食物网,系统评价和解析了景观因子及寄生蜂多样性对食物网结构及相关寄生蜂生态服务功能的影响(Yang *et al.*, 2021);基于天敌肠道内含物 PCR 检测技术,追溯天敌捕食食物来源,构建捕食者和猎物的食物网络定量定性关系(Ju *et al.*, 2019; 鞠倩等, 2020; 韦夕平等, 2024);应用铷元素标记技术,明确了天敌(如龟纹瓢虫 *Propylaea japonica*)的转移扩散路线(蔡志平等, 2019; Cai *et al.*, 2020)等。

2.2 定量评估捕食性天敌控害能力的方法

针对传统定量估计天敌昆虫捕食害虫数量难的问题,通过构建以能量为统一单位、定量分析捕食性天敌对害虫控制作用的生态能量分析方法,可定量分析田间中华通草蛉

Chrysoperla sinica 和龟纹瓢虫种群对棉蚜的捕食功能,从而可以估算出天敌吃了多少害虫,评价田间捕食性天敌作用与地位(Gao *et al.*, 2010; 戈峰和欧阳芳, 2014)。此外,通过罩笼去除天敌或者接入天敌拟合害虫、放置卵(卡)诱集等方法,也可以定量评估捕食性和寄生性天敌控害能力。

2.3 大尺度多因子与多途径分析

为突破传统农田研究中小尺度、单因子分析的局限性,近年来发展了一系列从局域农田、县域、省域以及国家层面多个尺度,分析农田景观中品种多样性、作物多样性、景观多样性、非作物生境等对害虫、天敌群落结构与天敌控害功能的生态效应,揭示了农田景观中害虫成灾的机制。如通过解析 2010 年山东省土地覆盖类型数据,结合山东全省小麦害虫及天敌种群普查数据分析,发现景观形状结构中边界密度与捕食性、寄生性天敌种群密度显著正相关,农田景观构成对天敌种群的影响作用大于害虫种群(欧阳芳等, 2016)。基于麦田防护林对麦田天敌瓢虫的保育作用,显示靠近防护林麦田中的瓢虫数量和周边防护林的面积呈现正相关,适当增加防护林面积更有利于天敌瓢虫的保育(Dong *et al.*, 2015)。根据中国 2000-2018 年 19 年间小麦上主要病虫害造成的损失趋势,表明减少黄淮海区域小麦病虫害的损失,是保证我国小麦稳定生产的关键(Zhang *et al.*, 2022a)。

近年来,进一步将宏观与微观结合的景观遗传学方法来分析食物网关系。如 Yang 等(2021)通过分子检测技术分析了来自 25 个不同景观背景棉田的棉蚜-寄生蜂定量食物网,发现寄生作用与初级寄生蜂的多样性和食物网的普遍性呈负相关关系,而重寄生率与食物网的易损性呈正相关关系。Dong 等(2021, 2023)发现玉米面积比例较高的景观中,玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 某些单倍型出现频率较高,出现了与玉米面积高度相关的基因型;而桃蛀螟 *Conogethes punctiferalis* 则是首先以非作物生境中的寄主为主,随着寄主演变到玉米上为害。

2.4 生态经济阈值

害虫经济阈值 (Economic threshold, ET) 是指当害虫数量达到某一密度时应采取防治措施的种群密度, 以免达到引起经济损失的最低密度 (即经济损失水平或 Ecological and economic threshold, EIL)。而目前的经济阈值与防治指标都是 20 世纪 80 年代的工作。但随着农药品种变更、人工费用增加、农业机械化操作以及对环境保护的重视, 这些指标远远不能适应现代害虫防控的需求。为此, 门兴元等 (2020) 基于作物收益和防治成本平衡的原则, 发展了害虫的生态经济阈值模型:

$$EET = \frac{P \times (1 + \alpha) + L + M}{E \times Y \times H \times D \times S}$$

式中, 变量 E 代表杀虫效率; Y 为无虫害作物的预期产量; H 为作物的市场单价; S 为害虫在自然条件下的存活率; D 为每单位害虫对作物产量造成的损失; L 和 M 分别代表化学防治的药剂成本与劳动力成本和机械成本 (门兴元等, 2020); α 系数考虑了农药的选择、施用量、对非目标生物的影响程度和环境因素, 通常取值范围在 1-5 之间 (Pimentel, 2005)。

该模型充分考虑了害虫防治的环境代价, 其中包括防治费用及其对生态影响的代价, 这两者的总和等于通过防治能够恢复的作物价值, 从而为害虫生态防控科学决策提供基础, 减少化学农药使用的数次和数量。

2.5 生态工程方法

害虫生态工程是一种综合性的害虫管理方法, 主要通过整合生态防控、生物防治、物理防治和农业生态工程等手段, 实现害虫的可持续控制。其核心在于重塑农田景观生态系统, 通过科学规划、设计及组装, 构建高效、可持续的农业景观生态系统以及害虫生态防控技术体系, 基于生态系统的自我调节能力, 减少对化学农药的依赖 (戈峰, 2020)。

综合来看, 基于上述稳定同位素标记、铷元素标记、肠道内含物分子检测技术、生态能学方法等方法, 可解析农田景观食物网中的天

敌“从哪来-吃了什么-吃了多少”关系; 结合害虫控制生态经济阈值指标体系和生态工程技术, 可为精准调节食物网相生相克关系开展害虫生态调控奠定基础。

3 生态防控关键技术

在生态调控理论的指导下, 基于上述对农田景观中食物网关系的解析, 明确了功能植物、农田景观、品种与作物多样性等是调节生态控害的关键因子, 并确立了“田内-田边-景观”三维生态防控途径 (图 2)。

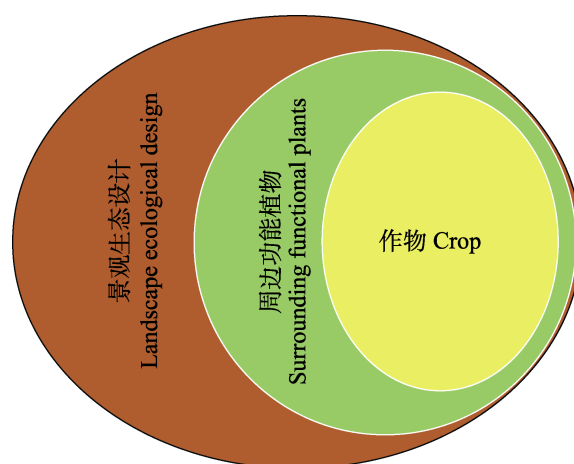


图 2 害虫生态防控技术的“田内-田边-景观”三维途径
Fig. 2 The three-dimensional approach of “field-field edge-landscape” of ecological pest control technology

3.1 农田内生态防控技术: 品种及作物多样性控害技术

针对作物品种与害虫适应性的相互作用, 研究揭示了植物韧皮部免疫系统对桃蚜 *Myzus persicae* 唾液蛋白 CathB3 的信号识别、转导及激活的生化机制, 阐明了广食性蚜虫的寄主适应性分子基础, 为通过作物品种选育及合理布局实现蚜虫生态调控提供了理论支撑 (Guo *et al.*, 2020)。此外, 研究发现, 作物物种多样性对天敌控害能力及生态系统稳定性具有显著影响, 4 种作物组成的农田生态系统可有效提升天敌种群的生物控害功能 (Zhao *et al.*, 2013)。在玉米-棉花/花生间作系统中, 玉米田可为龟纹瓢虫、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*

提供适宜的栖息环境,有效地控制周边棉花、花生上蚜虫的发生与危害;其中,龟纹瓢虫等天敌昆虫集中在玉米田栖息,转移到玉米和棉花间捕食棉蚜(5-8月)和玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis* (9月),对2种作物蚜虫的控制指数可达31%-80% (Ouyang *et al.*, 2020);花生田里90%以上的龟纹瓢虫和异色瓢虫来自于玉米,它们对花生蚜的控制作用为71.43% (鞠倩等, 2020)。基于此,提出了玉米-棉花1:4条带种植技术与玉米-花生2:3间作技术,以增强天敌控害效果,优化农田生态系统。

3.2 农田及果园周围生态防控技术: 功能植物伴生种植

基于功能植物控制害虫的原理与方法,在华北地区从62种功能植物中筛选出涵养瓢虫、食蚜蝇、草蛉等优势天敌昆虫的蛇床草 *Cnidium monnieri*,发现其具有种植管理轻简、适生性强、不扩散成杂草、一次种植多年有效等可应用特点 (杨泉峰等, 2018)。进一步研究表明,蛇床草中的邻二乙苯和对二乙苯是吸引天敌昆虫聚集的关键化学信息物质 (Cai *et al.*, 2020);蛇床草上的胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei* 为天敌昆虫提供了丰富的早春食物,促进了其种群定殖和繁育;蛇床草花粉作为优质替代食物,显著延长了天敌瓢虫寿命、助其安全渡过食物缺乏的轮作间隔期 (Yang *et al.*, 2021);显著增加了麦田中天敌的数量及控害能力,进而显著控制麦蚜的发生量 (Liang *et al.*, 2024)。由此研发了小麦(30 m)-蛇床草(1 m)伴生种植模式。

北有蛇床草,南有香根草 *Vetiveria zizanioides*。香根草作为诱杀螟虫的功能植物,已经在南方稻田广泛应用 (鲁艳辉等, 2018)。而且,它与其它功能植物相配,在我国乃至东南亚稻田得以大面积使用,取得了很好的生态防控效果 (Gurr *et al.*, 2016; 郑许松等, 2017)。事实上,水稻田埂自然生长着各种野生植物,是天敌昆虫重要的半自然栖息地和庇护所,可显著增加天敌种群并降低害虫数量 (俞晓平等, 1996; 尤民生等, 2004; Zhao *et al.*, 2013)。如

在水稻田旁边种植茭白 *Zizania caduciflora*, 茭白上的长绿飞虱 *Saccharosydne procerus* 涵养的寄生性天敌稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* 可以转移到附近稻田控制褐飞虱 *Nilaparvata lugens*, 控制效果显著 (俞晓平等, 1999);水稻田旁边种植秕壳草 *Leersia sayanuka*, 可涵养褐飞虱的重要寄生性天敌稻虱缨小蜂,对临近水稻的飞虱也有较好的控制作用 (Zheng *et al.*, 2017)。通过在水稻旁边种植诱杀水稻二化螟 *Chilo suppressalis* 的香根草,能减少临近稻田螟虫的种群数量 (陈先茂等, 2007; 郑许松等, 2009)。

在苹果园果树行间种植蛇床草可显著增加相邻果树上天敌多样性和种群密度,进而提高天敌对绣线菊蚜 *Aphis citricola* 的控制作用 (Cai *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022b);种植夏至草 *Lagopsis supina*、泥胡菜 *Hemistepta lyrata* 和紫花苜蓿 *Medicago sativa*, 能保育大量的天敌昆虫,明显减少果园的苹果叶螨 *Panonychus ulmi*、绣线菊蚜和金纹细蛾 *Lithocolletis ringoniella* 等害虫的种群数量 (于毅和严毓骅, 1998)。果园和菜园里套种除虫菊 *Tanacetum cinerariifolium*, 其挥发的(E)- β 法尼烯报警信息素,能自然驱避蚜虫,并吸引捕食性昆虫天敌 (Li *et al.*, 2019)。梨园种植紫花苜蓿能吸引大量的麦蚜茧蜂、龟纹瓢虫、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 和黑带食蚜蝇 *Episyrphus balteatus* (刘奇志等, 2010)。桃园按照不同比例种植夏至草和紫花苜蓿对桃蚜、桃粉蚜 *Hyalopterus arundinis* 和桃纵卷瘤蚜 *Tuberocephalus mononis* 种群表现出不同程度的控制作用 (董民等, 2011)。

3.3 区域性农田景观设计生态防控技术: “生态岛-廊道”技术

农田景观是由农田及其周围非作物生境组成,主要包括:基质(Matrix)、斑块(Patch)、廊道(Corridor)。通过农田景观生态设计,优化景观内各种要素的配置,可为天敌提供食物资源、栖息与繁育场所;通过改善景观要素的配置与空间连通,可增进天敌在不同生境之间

的转移扩散, 增加天敌到目标农田或者果园中进行害虫控制 (Bianchi *et al.*, 2006; 欧阳芳和戈峰, 2011)。具体应用到农田中, 就是建立涵养、储备天敌的“生态岛”以及输送天敌的“生态廊道”, 简称“生态岛-廊道”技术。如在果园周边灌丛生境种植 5%-10%的郁李、木槿、野蔷薇、紫薇等建立涵养、储备天敌的“生态岛”, 在“生态岛”与果园之间种植蛇床草等功能植物带形成输送天敌的“生态廊道”。通过这种“生态岛-廊道”涵养天敌的果园害虫生态控制技术, 在果园周围设计 5%-10%的“生态岛”, 在“生态岛”与果园之间种植显花植物作为“廊道”, 促进了“生态岛”涵养的天敌向果园转移扩散, 有效控制了主要果树害虫的种群数量。

4 生态防控应用模式

在生态调控理论指导之下, 基于上述生态防控技术, 结合其它绿色防控技术, 近几年来构建了不同作物的生态防控模式, 生态防控取得了很大的进展。如: 以蛇床草伴生种植为核心, 配套品种搭配、种子包衣、释放天敌, 可以减少小麦-玉米轮作田防治 2-3 次, 减少化学农药使用量 50%以上 (Li *et al.*, 2023)。在水稻田埂种植红花酢酱草 *Oxalis corymbosa*、波斯菊 *Cosmos bipinnata*、硫华菊 *Cosmos sulphureus* 等显花植物, 在稻田路两边种植诱集植物香根草, 诱杀水稻螟虫, 使得稻田生态功能得到良好修复, 对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的持续控制效果显著, 杀虫剂的投入减少了 93.75% (郑许松等, 2017)。在茶园周围生境种植比茶树高的桂花、香樟等树种, 在梯壁、梯埂种植比茶树矮的圆叶决明、黄花菜等功能植物, 这种“立体复合”的生态控害景观设计, 对小绿叶蝉 *Empoasca flavescens*、茶尺蠖 *Ectropis oblique hypulina* 等主要害虫的自然控害效能达 88.2%, 可减少农药用量 50%以上 (李金玉等, 2022)。此外, 在苹果园、梨园、花生田、棉田、蔬菜地也开展了害虫生态防控, 取得了很好的效果 (Ju *et al.*, 2019; Dunn *et al.*,

2020; Yang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022b; Han *et al.*, 2025)。

5 展望

当前农业生产高度集约化, 导致农田景观的生物多样性下降, 天敌数量减少, 使害虫种群更易暴发并造成严重危害。这不仅导致农作物减产, 还促使化学农药使用量大幅上升, 对粮食安全与生态环境构成重大风险。因此, 推进害虫生态防控已成为农业可持续发展的必然选择。国家高度重视生态防控, 在“十三五”和“十四五”专门设立了害虫生态防控领域的国家重点研发计划, “十五五”《全国农业科技创新重点领域 (2024-2028 年)》也将生态调控等 5 项技术列为全国农业科技创新重点领域。此外, 国家基金委也设立了方向“生物互作与生态调控”, 专门支持生态防控相关领域的研究; 并于 2024 年, 召开了“首届中国生态防控大会”, 设立了生态防控学科。这充分体现了国家对生态防控的战略布局以及社会对健康、安全生态农产品的殷切期盼。

如上所述, 经过“十三五”和“十四五”害虫生态防控项目的研发和科学家们共同的努力, 生态防控取得了一系列突破。展望“十五五”, 害虫生态防控将重点关注以下研究工作:

1) **理论创新** 从景观生态学角度, 开展农田生态服务区 (Eco-service area) 研究与设计。探讨生态服务区的合理规模、空间配置及互联机制。通过优化非作物生境管理, 减少害虫孳生地, 为天敌提供稳定栖息环境, 构建更具韧性的农田景观生态系统。

2) **食物网的解析** 聚焦“非作物生境-作物-害虫-天敌”相互作用网络, 解析食物网中生物之间的化学信息通讯与营养联系。结合基因组和高通量 PCR 技术, 阐明食物网之间作用机制。明确害虫及其天敌在农田景观中的转移扩散规律, 为害虫精准生态防控提供理论支撑。

3) **生态防控关键技术研发** 深化生态服务区设计、“生态岛-廊道”构建、功能植物优化配置、作物区域布局及时空搭配、内生菌促抗

机制、生境改造等核心技术研发,推动害虫生态防控体系向精准化、智能化、高效化方向发展。

4) 协同增效策略与途径 生态防控作为害虫管理的基础,需要与生物防治、理化诱控、合理的化学防治等绿色防治措施有机结合,探索多作物害虫全过程防控的多因子协同新途径;结合大数据、人工智能等技术,实现精准监测,智能生态调控,构建基于生态系统健康和作物健康的害虫精准生态防控技术体系。

5) 加大推广应用力度 针对不同地区的自然条件和社会经济状况不同,需因地制宜制定害虫生态防控方案。通过政策补贴和市场机制提高农民积极性。加强培训和技术支持,生产出安全、健康的生态农产品,促进生态防控的应用,让生态防控的研究成果直接服务于社会。

总之,未来害虫生态防控的主要特征将表现在:以农田景观“非作物生境-作物-害虫-天敌”食物网关系调节为基础,以功能植物应用为根本,以作物合理搭配为辅助,以景观生态设计为支撑,以与其它措施协调相融合,以生态农产品生产为目标,最终构建出现代生态防控的新体系。

参考文献 (References)

Bianchi FA, Booij CH, Tscharntke T, 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 273(1595): 1715–1727.

Cai ZP, Ouyang F, Su JW, Zhang XR, Liu CL, Xiao YL, Zhang JP, Ge F, 2020. Attraction of adult *Harmonia axyridis* to volatiles of the insectary plant *Cnidium monnieri*. *Biological Control*, 143: 104189.

Cai ZP, Ouyang F, Zhang XR, Chen J, Xiao YL, Ge F, Zhang JP, 2021. Biological control of *Aphis spiraeicola* (Hemiptera: Aphididae) using three different flowering plants in apple orchards. *Journal of Economic Entomology*, 114(3): 1128–1137.

Cai ZP, Xiao YL, Ouyang F, Ge F, Zhang JP, 2019. Quantitative evaluation of the biological control efficiency of predatory insects based on rubidium marking method. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(2): 348–353. [蔡志平, 肖云丽, 欧阳芳, 戈峰, 张建萍, 2019. 定量评价天敌昆虫控害功能的铷元素标记技术. 应用昆虫学报, 56(2): 348–353.]

Chen XM, Peng CR, Yao FX, Guan XJ, Wang HL, Deng GQ, 2007. Study on techniques and effects of vetiver for trapping and killing rice borers. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 19(12): 51–52, 56. [陈先茂, 彭春瑞, 姚锋先, 关贤交, 王华伶, 邓国强, 2007. 利用香根草诱杀水稻螟虫的技术及效果研究. 江西农业学报, 19(12): 51–52, 56.]

Ding YQ, 1993. Ecological management control of pest insect population. *Acta Ecologica Sinica*, 13(2): 99–106. [丁岩钦, 1993. 论害虫种群的生态控制. 生态学报, 13(2): 99–106.]

Dong M, Li ZP, Zhang DW, Du XG, 2011. The effect of control aphids in organic peach orchard by planting *Lagopsis supina* (Steph.). *Northern Horticulture*, 2011(14): 139–140. [董民, 李志朋, 张顶武, 杜相革, 2011. 间作夏至草对有机桃园三种蚜虫的防效. 北方园艺, 2011(14): 139–140.]

Dong ZK, Li C, Zhang QQ, Li LL, Lu ZB, Ouyang F, Song YY, Yu Y, Men XY, 2021. Landscape genetic analyses reveal host association of mitochondrial haplotypes in the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis*. *Insect Science*, 28(4): 1169–1178.

Dong ZK, Li C, Song YY, Li LL, Men XY, 2023. Population genetics of the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis*, reveals landscape-mediated genetic distribution in agroecosystems. *Entomologia Generalis*, 43(4): 861–869.

Dong ZK, Ouyang F, Lu F, Ge F, 2015. Shelterbelts in agricultural landscapes enhance ladybeetle abundance in spillover from cropland to adjacent habitats. *BioControl*, 60(3): 351–361.

Dunn L, Lequerica M, Reid CR, Latty T, 2020. Dual ecosystem services of syrphid flies (Diptera: Syrphidae): Pollinators and biological control agents. *Pest Management Science*, 76(6): 1973–1979.

Ehler LE, 2006. Integrated pest management (IPM): Definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, 62(9): 787–789.

Flint ML, van den Bosch R, 1981. Introduction to Integrated Pest Management. New York: Plenum. 8–12.

Gao F, Jifon J, Liu XH, Ge F, 2010. An energy budget approach for evaluating the biocontrol potential of cotton aphid (*Aphis gossypii*) by the ladybeetle *Propylaea japonica*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 136(1): 72–79.

Ge F, 1998. The principles and methods of ecological regulation and management of pests. *Chinese Journal of Ecology*, 17(2): 38–42. [戈峰, 1998. 害虫生态调控的原理与方法. 生态学杂志, 17(2): 38–42.]

Ge F, 2001. The principles, methods and practices of regional ecological regulation and management of pests. *Entomological Knowledge*, 38(5): 337–341. [戈峰, 2001. 害虫区域性生态调控的理论、方法及实践. 昆虫知识, 38(5): 337–341.]

Ge F, 2008. Principles and methods of insect ecology. Beijing: Higher Education Press. 201–223. [戈峰, 2008. 昆虫生态学原理与方法. 北京: 高等教育出版社. 201–223.]

Ge F, 2020. The ecological regulation and management of pests.

- Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 10–19. [戈峰, 2020. 论害虫生态调控策略与技术. *应用昆虫学报*, 57(1): 10–19.]
- Ge F, Ouyang F, 2014. Quantitative evaluation of the biological control value of predatory insects based on ecological energetic analyses. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 307–313. [戈峰, 欧阳芳, 2014. 定量评价天敌控害功能的生态能学方法. *应用昆虫学报*, 51(1): 307–313.]
- Ge F, Ouyang F, Zhao ZH, 2014. Ecological management of insects based on ecological services at a landscape scale. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 597–605. [戈峰, 欧阳芳, 赵紫华, 2014. 基于服务功能的昆虫生态调控理论. *应用昆虫学报*, 51(3): 597–605.]
- Ge F, Wu KM, Chen XX, 2011. Major advance on the interaction mechanism among plants, pest insects and natural enemies in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(1): 1–6. [戈峰, 吴孔明, 陈学新, 2011. 植物-害虫-天敌互作机制研究前沿. *应用昆虫学报*, 48(1): 1–6.]
- Guo HJ, Zhang YJ, Tong JH, Ge PP, Wang QY, Zhao ZH, Zhu-Salzman K, Hogenhout SA, Ge F, Sun YC, 2020. An aphid-secreted salivary protease activates plant defense in phloem. *Current Biology*, 30(24): 4826–4836.
- Gurr GM, Lu ZX, Zheng XS, Xu HX, Zhu PY, Chen GH, Yao XM, Cheng JA, Zhu ZR, Catindig JL, Villareal S, Van Chien H, Cuong LQ, Channoo C, Chengwattana N, Lan LP, Hai LH, Chaiwong J, Nicol HI, Perovic DJ, Wratten SD, Heong KL, 2016. Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture. *Nature Plants*, 2: 16014.
- Han GD, Zhang XR, Cai ZP, Xiao YL, Ge F, 2025. Flower strips enhance the abundance and biocontrol services of predatory arthropods in a pear orchard. *Biological Control*, 200: 105680.
- Ju Q, Ouyang F, Gu SM, Qiao F, Yang QF, Qu MJ, Ge F, 2019. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286: 106682.
- Ju Q, Ouyang F, Qiao F, Ge F, 2020. The method of quantitatively evaluating predator feeding activity using gut content analysis. *Journal of Applied Entomology*, 57(1): 218–225. [鞠倩, 欧阳芳, 乔飞, 戈峰, 2020. 应用肠道内含物定量评价天敌捕食作用的方法. *应用昆虫学报*, 57(1): 218–225.]
- Kogan M, 1998. Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43: 243–270.
- Landis DA, Wratten SD, Gurr GM, 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45: 175–201.
- Li JY, You MS, You SJ, 2022. Progress in utilizing biodiversity to enhance pest control in tea plantations. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(4): 710–725. [李金玉, 尤民生, 尤士骏, 2022. 茶园生物多样性控害的研究进展. *应用昆虫学报*, 59(4): 710–725.]
- 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.
- Li JJ, Hu H, Mao J, Yu L, Stoop G, Wang MQ, Mumm R, de Ruijter NCA, Dicke M, Jongsma MA, Wang CY, 2019. Defense of *Pyrethrum* flowers: Repelling herbivores and recruiting carnivores by producing aphid alarm pheromone. *New Phytologist*, 223(3): 1607–1620.
- Liang XY, Ouyang F, Zhang XR, Sun YC, Li Z, Ge F, 2024. Increasing the proportion of flower strip area in farmland promotes natural enemies to enhance aphid biocontrol and wheat yield. *Entomologia Generalis*, 44(5): 1183–1192.
- Liu QZ, Zhang LJ, Du XY, Li ZR, Qi LP, Xie N, Liang LL, 2010. The relationship between groundcover plants and natural enemies of species and quantity in a pear orchard. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(12): 209–215. [刘奇志, 张丽娟, 杜小引, 李振茹, 亓丽萍, 谢娜, 梁林琳, 2010. 梨园地被植物与天敌的种类及其数量关系. *中国农学通报*, 26(12): 209–215.]
- Lu YH, Zheng XS, Lu ZX, 2018. The potential of vetiver grass as a biological control for the rice stem borers *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6): 1111–1117. [鲁艳辉, 郑许松, 吕仲贤, 2018. 水稻螟虫诱杀植物香根草的发现与应用. *应用昆虫学报*, 55(6): 1111–1117.]
- Men XY, Li LL, Ouyang F, Zhang QQ, Lu ZB, Li C, Ge F, 2020. Ecological and economic threshold (EET) and its estimation method. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 214–217. [门兴元, 李丽莉, 欧阳芳, 张晴晴, 卢增斌, 李超, 戈峰, 2020. 害虫防治的生态经济阈值及其估算方法. *应用昆虫学报*, 57(1): 214–217.]
- Ouyang F, Cao J, Liu XH, Men XY, Zhang YS, Zhao ZH, Ge F, 2015. Tracing dietary origins of aphids and the predatory beetle *Propylea japonica* in agricultural systems using stable isotope analyses. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 155(2): 87–94.
- Ouyang F, Ge F, 2011. Effects of agricultural landscape patterns on insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1177–1183. [欧阳芳, 戈峰, 2011. 农田景观格局变化对昆虫的生态学效应. *应用昆虫学报*, 48(5): 1177–1183.]
- Ouyang F, Men XY, Guan XM, Xiao YL, Ge F, 2016. Ecological effect of regional agricultural landscape pattern on wheat aphids and their natural enemies. *Science China-Life Sciences*, 46 (1): 139–150. [欧阳芳, 门兴元, 关秀敏, 肖云丽, 戈峰, 2016. 区域性农田景观格局对麦蚜及其天敌种群的生态学效应. *中国科学: 生命科学*, 46(1): 139–150.]
- Ouyang F, Su WW, Zhang YS, Liu XH, Su JW, Zhang QQ, Men XY, Ju Q, Ge F, 2020. Ecological control service of the predatory natural enemy and its maintaining mechanism in

- rotation-intercropping ecosystem via wheat-maize-cotton. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301: 107024.
- Pimentel D, 2005. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, 7(2): 229–252.
- Stern VM, Smith RF, van den Bosch R, Hagen KS, 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: The integrated control concept. *Hilgardia*, 29(2): 81–101.
- Wan NF, Fu LW, Dainese M, Hu YQ, Kiær LP, Isbell F, Scherber C, 2022. Plant genetic diversity affects multiple trophic levels and trophic interactions. *Nature Communications*, 13(1): 7312.
- Wan NF, Zheng XR, Fu LW, Kiær LP, Zhang ZJ, Chaplin-Kramer R, Dainese M, Tan JQ, Qiu SY, Hu YQ, 2020. Global synthesis of effects of plant species diversity on trophic groups and interactions. *Nature Plants*, 6(5): 503–510.
- Wei XP, Qu MJ, Chen Y, Ju Q, Li W, 2024. Control of the peanut aphid (*Aphis craccivora*) by *Orius sauteri* in peanut-maize strip intercropped fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(1): 120–128. [韦夕平, 曲明静, 陈瑶, 鞠倩, 李伟, 2024. 花生-玉米间作田东亚小花蝽对花生蚜的控制作用. *应用昆虫学报*, 61(1): 120–128.]
- Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2018. Discovery and utilization of a functional plant, rich in the natural enemies of insect pests, in northern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 942–947. [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2018. 北方富含天敌的功能植物的发现与应用. *应用昆虫学报*, 55(5): 942–947.]
- Yang QF, Li Z, Ouyang F, Men XY, Zhang KN, Liu M, Guo W, Zhu CG, Zhao WL, Reddy GVP, Ge F, 2023. Flower strips promote natural enemies, provide efficient aphid biocontrol, and reduce insecticide requirement in cotton crops. *Entomologia Generalis*, 43(2): 421–432.
- Yang TB, Song XH, Xu XQ, Zhou CQ, Shi AM, 2021. A comparative analysis of spider prey spectra analyzed through the next-generation sequencing of individual and mixed DNA samples. *Ecology and Evolution*, 11(21): 15444–15454.
- You MS, Hou YM, Liu YF, Yang G, Li ZS, Cai HJ, 2004. Non-crop habitat manipulation and integrated pest management in agroecosystems. *Acta Entomologica Sinica*, 47(2): 260–268. [尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 杨广, 李志胜, 蔡鸿娇, 2004. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. *昆虫学报*, 47(2): 260–268.]
- You SJ, Zhang J, Li JY, Chen YT, Liu TS, Niu DS, You MS, 2019. Theory and practice of utilizing biodiversity to enhance pest control in agroecosystems. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1125–1147. [尤士骏, 张杰, 李金玉, 陈燕婷, 刘天生, 牛东升, 尤民生, 2019. 利用生物多样性控制作物害虫的理论与实践. *应用昆虫学报*, 56(6): 1125–1147.]
- Yu XP, Hu C, Heong KL, 1996. The effects of non-crop habitats on crop pests and their natural enemies. *Chinese Journal of Biological Control*, 12(3): 130–133. [俞晓平, 胡萃, Heong KL, 1996. 非作物生境对农业害虫及其天敌的影响. *中国生物防治*, 12(3): 130–133.]
- Yu XP, Zheng XS, Chen JM, Lu ZX, Hu JC, 1999. A study on the relationship between egg parasitoid, *Anagrus nilaparvatae* and green slender planthopper, *Saccharosydne procerus*, a species of insect pest of wild rice, *Zizania caduciflora*. *Acta Entomologica Sinica*, 42(4): 387–393. [俞晓平, 郑许松, 陈建明, 吕仲贤, 胡继承, 1999. 茭白害虫长绿飞虱与稻田缨小蜂关系的研究. *昆虫学报*, 42(4): 387–393.]
- Yu Y, Yan YH, 1998. A study on the plant diversity in apple orchards toward sustainable pest management. *Acta Entomologica Sinica*, 41(S1): 84–92. [于毅, 严毓骅, 1998. 苹果园植被多样化在果树害虫持续治理中的作用. *昆虫学报*, 41(S1): 84–92.]
- Zhang QQ, Men XY, Hui C, Ge F, Ouyang F, 2022a. Wheat yield losses from pests and pathogens in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326: 107821.
- Zhang XR, Ouyang F, Su JW, Li Z, Yuan YY, Sun YC, Sarkar SC, Xiao YL, Ge F, 2022b. Intercropping flowering plants facilitate conservation, movement and biocontrol performance of predators in insecticide-free apple orchard. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340: 108157.
- Zhao ZH, 2016. From “integrated pest management” to “ecologically based pest management”. *Chinese Science Bulletin*, 61(18): 2027–2034. [赵紫华, 2016. 从“害虫综合治理”到“生态调控”. *科学通报*, 61(18): 2027–2034.]
- Zhao ZH, Shi PJ, Men XY, Ouyang F, Ge F, 2013. Effects of crop species richness on pest-natural enemy systems based on an experimental model system using a microlandscape. *Science China Life Sciences*, 56(8): 758–766.
- Zheng XS, Liu GL, Chen YB, Tian JC, Lü ZX, 2017. Application of ecological engineering technology to control major insect pests in single-cropping late rice ecosystem. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 950–957. [郑许松, 刘桂良, 陈宇博, 田俊策, 吕仲贤, 2017. 单季晚稻区应用生态工程技术控制水稻主要害虫的实践. *植物保护学报*, 44(6): 950–957.]
- Zheng XS, Lu YH, Zhu PY, Zhang FC, Tian JC, Xu HX, Chen GH, Nansen C, Lu ZX, 2017. Use of banker plant system for sustainable management of the most important insect pest in rice fields in China. *Scientific Reports*, 7: 45581.
- Zheng XS, Xu HX, Chen GH, Wu JX, Lü ZX, 2009. Potential function of Sudan grass and vetiver grass as trap crops for suppressing population of stripped stem borer *Chilo suppressalis* in rice. *Chinese Journal of Biological Control*, 25(4): 299–303. [郑许松, 徐红星, 陈桂华, 吴降星, 吕仲贤, 2009. 苏丹草和香根草作为诱虫植物对稻田二化螟种群的抑制作用评估. *中国生物防治*, 25(4): 299–303.]