

害虫生物防治综合效益评价方法

暴可心^{1,2}, 罗立平³, 王小艺^{1*}, 张彦龙¹, 魏可¹, 张永安¹, 杨忠岐¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所/国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091; 2. 河北农业大学林学院, 保定 071000; 3. 国家棉花工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 害虫生物防治效果的评价方法通常采用化学防治效果的计算方法, 一般仅体现短期内对目标害虫的致死作用结果, 而忽略了天敌在自然界数量增殖后对害虫种群数量的长期而持续的控制效果, 以及在保护生态环境、保护生物多样性等方面的评价。判断害虫生物防治计划是否获得成功, 目前缺乏广泛认同的评价方法。本文对害虫生物防治效果的评价方法进行了梳理, 并分析了各种方法可用于害虫生物防治效果评价的可行性及其优缺点。在此基础上, 利用层次分析法建立了一套评价害虫生物防治综合效益的指标体系, 并应用此方法结合国内外害虫防治包括生物防治的案例进行了比较分析, 初步提出了害虫生物防治项目成功与否的评价方法和标准。

关键词: 害虫生物防治; 效果评价; 综合效益评价; 层次分析法

中图分类号: S476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9261(2021)01-0038-14

Method for Evaluating the Comprehensive Benefits of Biological Control of Insect Pests

BAO Kexin^{1,2}, LUO Liping³, WANG Xiaoyi^{1*}, ZHANG Yanlong¹,
WEI Ke¹, ZHANG Yongan¹, YANG Zhongqi¹

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. National Cotton Engineering Technology Research Center, Urumqi 830091, China)

Abstract: The effects of biological control of insect pests are usually evaluated using the same methods as those for chemical control. However, the methods focus mainly on the short-term lethal efficacy on the target pests, while neglect the long-term and sustainable control effects along with the increase of natural enemy populations is neglected, and the benefits of biological control in protecting environment and biodiversity either. At present, there is a lack of widely accepted method for evaluating the success of biological pest control programs. In this article, the methods for evaluating biological control of insect pests are summarized, and their practical feasibility and advantages and disadvantages are analyzed. Based on these analyses, an index system for evaluation of biological control was established through the analytic hierarchy process. The index system was comparatively applied in some cases of insect pest control, the methodology and criteria were proposed for evaluating the success of biological control programs.

Key words: biological control of pests; effect evaluation; integrated evaluation; analytic hierarchy process

害虫防治方法包括植物检疫、化学防治、物理防治、生物防治及农林技术防治等措施^[1-3]。目前评价害虫防治效果的方法主要包括校正虫口减退率、植株受害程度、校正累积虫日、生命表法和模糊数学理论及状态空间分析法等。对害虫生物防治效果的评价方法通常参照化学防治的评价方法, 以短期内害虫的死亡

收稿日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1200400)

作者简介: 暴可心, 硕士研究生, E-mail: 2436965923@qq.com; *通信作者, 博士, 研究员, E-mail: xywang@caf.ac.cn。

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2021.01.024

率、寄生率等作为防控作用评价的主要指标。其评价结果只针对靶标害虫短时间内的虫口减退率, 缺乏对目标害虫的持续控制作用、防治成本投入以及对生物多样性的影响和环境安全等方面的综合评价, 因此, 没有准确反映生物防治效果的长效性和持续性等作用。

除虫口减退率外, 还有一些其他的害虫防治效果评价方法。如夏云龙^[4]应用模糊数学理论评价龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 和七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 对麦长管蚜 *Sitobion avenae* 的控制效果。Morris 和 Miller^[5]以云杉卷叶蛾 *Choristoneura fumiferana* 为研究对象, 组建了昆虫生命表。刘树生^[6]对各类方法进行了归纳和综述, 认为天敌控害作用的评估可分为定性和定量两个方面, 其中田间系统调查及相关分析、天敌排除或添加法、实验种群观察法和生命表分析法同样广泛应用于害虫防治效果评价中。采用的评价指标包括受害株率^[7]、虫口数^[8]、死亡率^[9,10]、寄生率^[11]、种群趋势指数^[12]等, 即直接或间接用害虫种群数量的短期变化来评价防治效果。这些评价方法或者难以体现某种防治措施的控害作用持续时间、成本投入及对生态环境影响等综合结果, 或者操作过程复杂费时。综上所述, 目前害虫生物防治控害效果评价方法要么存在评价指标单一, 要么所得结果并不全面、未能反映实际防治效果等问题。对生物防治效果评价的最终目标是要明确生物防治天敌产品在调节害虫种群方面到底起了多大作用, 若不能全面、综合反映防治效果, 则难以推广和应用。同时, 尽管有的评价方法科学、合理, 但操作复杂或耗时较长, 而不能很好地解决生产中便利化应用问题^[13]。基于此, 本文尝试应用层次分析法, 建立一种简洁实用的害虫生物防治综合效益评价方法。

1 现有害虫防治效果评价方法

1.1 根据植株受害程度或靶标害虫虫口变化进行评价

1.1.1 以害虫虫口数量变化作为评价指标 由于被杀死、被寄生、被捕食或被病原微生物的侵染所导致的目标害虫虫口数量减少, 用 Abbott 公式对虫口减退率进行校正: 防治效果 (%) = (防治区虫口减退率—对照区虫口减退率) / (100—对照区虫口减退率) × 100。

1.1.2 以植物被害程度作为指标的计算方法 根据植株受害程度进行评价, 直接套用化学防治效果评价的方法, 评估的结果主要是防治措施的短期效应^[14]。防治效果 (%) = (对照区植物受害程度—处理区植物受害程度) / 对照区植物受害程度。

郭建英等^[15]应用该方法评价释放天敌瓢虫和施用化学农药吡虫啉对麦田蚜虫的控制效果, 结果表明释放瓢虫后 5 d 和 10 d 的防效分别为-347.6%和-171.7%, 防控效果差, 人工助增天敌瓢虫并未达到对麦长管蚜的理想防治效果。杨忠岐等^[16]利用白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 控制美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury) 的效果主要用放蜂防治后林分的有虫株率、株平均网幕数和天敌的寄生率作为评价指标, 连续 5 年追踪放蜂防治美国白蛾的效果, 发现美国白蛾在放蜂后第 2 年至第 5 年有虫株率均保持在 0.1% 以下的低水平, 天敌的寄生率仍高达 92%。魏建荣与牛艳玲^[7]对利用寄生性天敌花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) 防治蛀干性害虫光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* Motschulsky 的效果进行了评价, 采用间接方法, 没有直接统计天敌寄生率或靶标害虫的死亡率, 而是设置对照区和试验区, 连续 3 年统计 2 个区域光肩星天牛新鲜排粪孔的增加或减少量来评估生物防治的效果。对于生活史较长的林木害虫, 实施长期、定点的系统调查, 才能得到更加令人信服的评价结果, 此方法适用于隐蔽性为害的钻蛀性害虫的防治效果评价。此外, 陶忠祥等^[17]指出应根据不同的防治对象及田间情况选用不同的方式统计防治效果, 例如评价 10 d 后寄生蜂对橡胶盔蚧 *Parasaissetia nigra* (Nietner) 的防治效果, 可采用虫口数量变化表达防治效果。

1.2 利用校正累积虫日评价

Ruppel^[18]提出了“虫日”和“累积虫日”作为害虫防治效果评价的一个指标, 将害虫数量及其在作物上为害时间的乘积称为“虫日”, 将所调查“虫日”之和称为“累积虫日”。黄次伟等^[19]和黄凤宽等^[20]直接以“累计虫日”的数值作为评价防治结果。凌冰等^[21]应用“累积虫日”作为评价田间防治效果的参数, 即: 防治效果 (%) = (对照区累积虫日—处理区累积虫日) / 对照区累积虫日。

潘文亮^[14]在此基础上按害虫各阶段的取食量分别乘上一个校正系数, 得出“校正虫日”, 进而可求“校

正累积虫日”。赵善欢等^[22]和钟国华等^[23]以“校正累积虫日”计算防治效果,指出此方法可减少田间试验调查的误差。

1.3 生命表方法

早在 20 世纪 50~60 年代生命表方法就已成功应用于昆虫种群的研究,提出了种群趋势指数模型,通过对试验区 and 对照区害虫种群建立生命表,并对靶标物种的种群趋势指数进行比较,就可以定量得出所研究目标的防治效果^[5,24]。这种方法是从某一虫期开始持续观察处理后试虫的一个完整世代或更长时间,以研究防治措施对不同虫态的各种影响及其累加作用^[25]。Varley 和 Gradwell^[26]应用数学模型对致死因子和密度相互关系进行了分析,并利用生命表方法研究了影响害虫种群变化的关键因子。随着昆虫学的迅速发展,研究技术手段不断创新,经典的昆虫生命表方法在发展过程中不断完善,庞雄飞等^[27]利用生命表结合 Morris-Watt 数学模型,建立了作用因子组配的生命表作为分析害虫和天敌相互作用的方法。胡学难等^[28]利用生命表的方法评价了玉米抗病品种对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* Guenée 的控制作用。Kuhar 等^[29]用生命表评价了玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae* Pang 对玉米螟 *Ostrinia nubilalis* Hübner 的控害潜能。侯有明等^[30]通过建立小菜蛾种群生命表方法估算了 1%苦皮藤乳油制剂施用后小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 种群趋势指数和干扰作用控制指数的变化。魏建荣等^[12]利用生命表方法评价了白蛾周氏啮小蜂对美国白蛾的控制效果。洗继东等^[31]利用生命表方法评价了印楝素乳油制剂对荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* Bradley 种群的控制效果。Kandasamy 等^[32]利用生命表方法评价了黄额食蚜瓢虫 *Stethorus gilvifrons* Mulsant 对咖啡小爪螨 *Oligonychus coffeae* Nietner 的捕食作用。Barat 等^[33]通过利用特定年龄生命表评估了大蒜、牛角瓜的提取物和印楝素的混合物对烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 的控制效果。

1.4 利用模糊数学理论进行评价

Zadeh^[34]提出的模糊集理论广泛应用于其他学科。Bosserman 和 Ragade^[35]将模糊集理论应用于生态系统分析, Giering 和 Kandel^[36]用模糊集理论建立了生态系统中的竞争模型。夏云龙^[4]用模糊数学理论评价了天敌昆虫的控制作用,提出的评价天敌作用的新方法是用经济学的观点,全面评价天敌在“社会-经济-自然”复合生态系统中所起的作用,并给出了权数计算方法可真实地描述昆虫益害的动态变化和益害属性的对立统一关系。王万雄和李子珍^[37]在此模型的基础上提出了把模糊集理论应用于对一种天敌控制多种害虫的评价模型,描述了天敌种群对害虫控制大小的动态变化和天敌对不同种类的害虫控制能力大小的动态变化。随后又提出了多种天敌控制多种害虫的模糊数学模型,这种评价方法用天敌减轻害虫造成危害的能力这一新标准评价天敌的作用。即: $SD = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m [UA(x_{ik}) - UB(x_{ik})]$, 当 $SD > 0$ 时,天敌防控措施有效;当 $SD < 0$ 时,天敌防控措施无效; $SD = 0$ 时,则定义控制指数和天敌相对摄食量均为 1,其次为特殊情形。其中, i 表示第 i 种害虫, k 表示害虫生长发育的第 k 阶段。A 表示定义 U 上普通集合。B 表示模糊子集。

1.5 现代控制论的状态空间分析法

在进行害虫防治措施效果评价时,不仅需要评价单种措施作用问题,而且往往需要评价多种措施的综合作用问题,即多输入多输出问题。状态空间法不仅有利于把系统划分为若干组分或子系统对各种措施的防治效果进行评价,同时更好地解决多输入和多输出问题,因而可提供解决这类问题的有效途径。

状态空间法方程式: $X(t+1) = AX(t) + BX(t)$, $Y(t) = CX(t)$ 。式中 $X(t)$ 为状态向量, $Y(t)$ 为输出向量, A 为系统矩阵, B 为控制矩阵, C 为输出矩阵。

随着控制论的发展,该方法被应用于研究害虫种群数量问题。庞雄飞等^[27]曾进行过有关这方面的研究,认为状态空间法可能成为研究这类问题的重要手段。吴进才等^[38]应用现代控制论的状态空间分析法建立了褐稻虱 *Nilaparvata lugens* Stål 状态方程,用以研究褐稻虱的种群数量预测和控制。

1.6 害虫增长指数与时间的超越函数定积分方法

邹运鼎等^[39]利用此方法评价了自然界天敌对蚜虫的综合控制作用。通过定期调查蚜虫的种群数量,得到蚜虫的消长规律,将第一次调查的蚜虫数量作为基数,其后调查的数量除以基数即可得增长指数,调查

日期数量化以后与增长指数进行拟合建模, 再根据超越函数定积分公式进行定向积分, 可得积分值。在天敌昆虫控害效果的评价中, 可设置对照区和处理区, 比较二者的积分值即可得防治效果。

2 害虫生物防治效果评价方法

目前常用的害虫生物防治效果评价方法包括应用害虫死亡率、植株受害程度和生命表评价方法等。以单位时间内靶标害虫虫口减退率或植株受害程度变化评价生物产品的防效, 仅能反映采取措施后短期内的效应, 并未体现出这些措施对害虫种群持续控制作用, 无法准确评价该种天敌昆虫的控害效果。虽然这种方法评价生物防治效果存在诸多缺点, 但由于操作简单易行且能节约工作量, 是目前最常用的评价方法。自作用因子组配的生命表提出后, 因具有反映不同作用因子的效果而广泛用于评价天敌的控害能力。但作用因子组配的生命表仅考虑了靶标物种存活率、产卵量及性比, 更适合于世代分离或世代重叠不严重的种群, 另外这种生命表也未考虑到致死因子之间的相互作用导致的增效和减效作用。此外, 利用“累积虫日”作为防治指数, 体现了害虫种群数量和为害时间的关系, 但对于构成害虫防治因素复杂的自然天敌控制作用, 这种评价方法则无法表达出来^[25]。应用模糊数学理论对天敌控制害虫的能力进行评价, 既适合于捕食性天敌, 也适合于寄生性天敌, 同时也可用于对人工释放天敌效果的评价, 但如何把不确定性降低到较小的程度, 把复杂化的公式转用通俗、合理、简单的方式表达, 是需要进一步解决的问题。害虫增长指数法应用面较窄, 计算复杂, 仅适用于特定条件。

3 害虫生物防治综合效益评价

害虫生物防治是一个系统的、综合的过程, 不适于直接套用评价化学防治效果的方法。在生物防治上不仅是以天敌释放后对害虫当时的寄生率来评价其作用效果, 而且涉及到天敌对目标害虫长期持续控制作用、非目标生物及生态环境等多方面的综合影响。为了克服仅以目标害虫死亡率作为生物防治效果为评价标准的缺陷, 本研究通过利用层次分析法建立有害生物防治综合效益评价指标, 获得了更加合理准确的评价结果。

层次分析法 (Analytical hierarchy process, AHP) 是将一个复杂问题视为一个系统, 通过分析复杂问题所包含的指标及其相互关系, 进而选择解决问题的最佳措施^[40-43]。现已广泛应用于企业资源规划^[44]、工程管理^[45]、交通运输^[46]等领域。在此基础上, 本文借鉴李霓雯等^[47]基于加权信息量模型的油松毛虫灾害发生危险性评价和王羽扬等^[48]基于层次分析法的软岩巷道支护方案优化方法, 将评价指标按照不同层次分为两级, 以生物防治中经济效益和生态环境效益开展多层次多指标的综合分析, 并考虑其科学性和可操作性, 对有害生物防治的综合效益进行评价。

3.1 评价体系框架的构建

在构建害虫生物防治效果评价体系之前, 需要构建体系框架和确定层次指标, 选择评价指标体系的主要原则是有典型代表性、可观测性和可度量性, 尽量采用综合指标, 且各指标间相互独立和无显著相关关系, 无直接作用关系^[49,50], 指标所形成的体系需全面反映系统的各种功能特征, 构成一个完整的体系^[51], 同时也需要考虑害虫生物防治效果影响因素的复杂性和评价系统的可操作性。目前对害虫生物防治效果评价方法中相对而言最为科学合理的是生命表方法, 但该方法主要考虑天敌对害虫的控制能力^[52], 尚未考虑到控害作用的持续时间、投入成本及生物防治带来的生态环境效益等一系列因素。

本研究所构建的评价体系框架分为 3 个层次, 最高层为害虫生物防治综合效益, 是分析问题的预定目标或理想结果, 称目标层; 中间层包括了为实现目标所涉及的中间环节, 包括所需要考虑的准则和子准则, 称为准则层, 包括经济效益和生态环境效益; 最底层表示为实现目标可供选择的各种措施、决策、方案等, 称为方案层。方案层是对准则层的延伸、细化及操作指标体系框架的设计 (表 1)。

3.2 评价体系各层级指标权重配比

3.2.1 构造判断矩阵及一致性检验 依据层次分析法原理, 对同一层次的不同指标进行成对比较相互之间的重要程度, 建立一个比较判断矩阵。进行各评价指标成对比较判断时, 参照 Saaty^[53]的 1~9 比例标度法判断指标之间的重要程度, 若用指标 A 和 B 作比较, 1 表示 A 与 B 同等重要, 3 表示 A 稍重要于 B, 5

表 1 害虫生物防治综合效益评价体系框架

Table 1 Framework of integrated benefit evaluation system for pest control

目标层 (A) Target class (A)	准则层 (B) Rule class (B)	方案层 (C) Project class (C)	
害虫生物防治综合效益 (A) Integrated benefits of biological pest control (A)	经济效益 (B1) Economic benefits (B1)	防治效果 (C1) Control effects (C1)	虫口减退率 (C1.1) Decrease percentage (C1.1) 持续时间 (C1.2) Duration (C1.2)
		投入成本 (C2) Investment cost (C2)	
	生态环境效益 (B2) Ecological and environmental benefits (B2)	生物多样性 (C3) Biodiversity (C3)	
		环境保护 (C4) Environmental protection (C4)	

表示 A 明显重要于 B, 7 表示 A 非常显著重要于 B, 9 表示 A 极显著重要于 B, 2、4、6、8 表示 A 与 B 的重要性介于上述两个相邻等级之间, 若 A 与 B 的重要性比为 k, 那么 B 与 A 的重要性比为 1/k。

基于每个判断矩阵所赋予的标度值, 参照邓雪等^[54]对层次分析法的研究求得特征值和特征向量值, 并将特征向量值进行归一化处理得到各评价指标权重值。为了保证评价系统的合理性, 需要对每个判断矩阵进行一致性检验, 计算所得的一致性比率 $CR < 0.1$ 时, 一般认为该矩阵具有满意一致性, 所求得的权重值符合标准, 若不满足此条件, 应该适当调整矩阵比对的标度值, 直至通过一致性检验为止。

如对本文中准则层进行判断矩阵 A 的构建, 将经济效益 B_1 和生态环境效益 B_2 进行比较, 得出相应的标度值, 并计算求得其相应的权重值 $W_{B1} = 0.6670$ 和 $W_{B2} = 0.3330$, 最后经过一致性检验 ($CR < 0.1$) 判断其权重值合理。其余各级指标按照此方法进行计算权重值并检验, 直至获得符合检验要求的权重分值。各级判断矩阵及其相应权重见表 2。

表 2 害虫生物防治效益判断矩阵及其权重

Table 2 Judgement matrix of biological pest control benefit and its weight

A	B ₁	B ₂	W _i	B ₁	C ₁	C ₂	W _i	B ₂	C ₃	C ₄	W _i	C ₁	C _{1.1}	C _{1.2}	W _i
B ₁	1	3	0.6670	C ₁	1	2	0.6670	C ₃	1	1	0.5000	C _{1.1}	1	1	0.5000
B ₂	1/3	1	0.3330	C ₂	1/2	1	0.3330	C ₄	1	1	0.5000	C _{1.2}	1	1	0.5000
λ_{max}		2.0000				2.0000				2.0000				2.0000	
CR		0.0000				0.0000				0.0000				0.0000	

注: W_i 为各评价指标所对应的权重。

Note: W_i is the weight of each associated evaluation index.

3.2.2 构建害虫生物防治效果评价体系 根据上述判断矩阵的输入, 基于 Yaahp V11.3 软件实现 AHP 模型下害虫生物防治效果评价各指标权重计算, 将体系总分设为 100 分, 各级权重值相应乘以 100, 在不影响一致性的前提下, 对各个权重值结合实际使用情况进行微调并设置赋分指标, 其结果如下表 (表 3)。

3.3 综合效益评价指标的定量化

在评价害虫生物防治中, 根据各评价指标的调查结果, 参照表 4 中的赋分标准, 对各评价指标定量化, 并按表 3 中各评价指标的权重值进行加权综合, 即: $G = \sum_{i=1}^n (W_{bi} W_{bi}) A_{bi}$, 式中 G: 害虫生物防治综合效益评价; W_{bi} 、 A_{bi} : 准则层 (B_i) 中相应方案层的各项指标的权重和量化值; W_{Bi} : 准则层 (B_i) 的权重; m : 不同等级中评价指标的个数。

害虫生物防治效益结果由多个评价指标综合考虑所得, 计算得分结果随机分布在 0~100, 本文采用等间距法将生物防治效果分值 G 划分为 5 个等级, 并给出相应分值 (表 4)。

4 案例对比分析研究

选择 17 例国内外害虫生物防治案例代入上述评价系统进行评估, 通过文献检索和专家咨询选择相应赋分标准, 并按照分值从高到低排列 (表 5)。结果表明, 应用产品澳洲瓢虫、荔枝卵平腹小蜂、埃塞食

表 3 害虫生物防治效果评价体系
Table 3 Evaluation system of biological pest control effect

目标层 (A) Target class (A)	准则层 (B) Rule class (B)	方案层 (C) Project class (C)	赋分标准 Assignment criteria	赋分 Assignment	
A	B1	C1	C1.1	≥80%	100
				60%~80%	80
				40%~60%	60
				20%~40%	40
				0~20%	20
			<0%	0	
			C1.2	≥3 月	100
				2~3 月	80
				1~2 月	60
				0.5~1 月	40
		0.25~0.5 月		20	
			<0.25 月	0	
		C2	≤100 元	100	
			100~500 元	80	
			500~1000 元	60	
			1000~1500 元	40	
			1500~2000 元	20	
			≥2000 元	0	
		B2	C3	仅作用于单一的靶标害虫	100
				除靶标害虫外，还作用于其他害虫	75
	除靶标害虫外，还作用于其他中性昆虫			50	
	除害虫外，还作用于天敌昆虫			25	
	广谱无选择性			0	
		C4	无污染或极小，可忽略	100	
			有一定污染，可在较短时间内降解	50	
			污染严重或残留时间较长，对人和高等动物有危险	0	

表 4 害虫生物防治评价等级划分
Table 4 Evaluation classification of pest biological control

害虫生物防治效果评价等级 Evaluation level of biological pest control effect	分值区间 Score range
非常成功 (I) Very success (I)	80~100
成功 (II) Success (II)	60~80
较成功 (III) Relatively success (III)	40~60
失败 (IV) Failure (IV)	20~40
完全失败 (V) Complete failure (V)	0~20

甲茧蜂、白蛾周氏啮小蜂及茎象食甲茧蜂评价等级为 I 级。白蜡吉丁啮小蜂、松毛虫赤眼蜂、花绒寄甲、花角蚜小蜂、椰心叶甲啮小蜂、管氏肿腿蜂、斯氏线虫、小地老虎核多角体病毒、苏云金杆菌、聚集信息素、性诱剂及白僵菌评价等级为 II 级。

同时，本研究用该方法也对一些其他防治方法案例进行了分析（表 6），结果表明，鱼藤酮、扑虱灵、印楝素效果评价等级为 II 级，灭幼脉、阿维菌素、氯菊酯、高效氟氯氰菊酯、杀虫灯、西维因、辛硫磷、克百威、黄板、甲胺磷、硫丹和 DDT 为 III 级。其中杀虫灯和黄板为物理防治，防治效果和专一性较差，其分值仅为 51.66 和 43.04。

表 5 害虫生物防治案例评估验证

Table 5 Evaluation and verification of pest biological control cases

排序 No	应用产品 Products	靶标害虫 Target pests	应用国家 Countries	参考文献 References	分值 Score	效果评价等级 Effect evaluation level
1	澳洲瓢虫 <i>Rodolia cardinalis</i>	吹绵蚧 <i>Icerya purchasi</i>	厄瓜多尔	[55,56,57]	91.39	I
2	荔枝卵平腹小蜂 <i>Anastatus japonicus</i>	荔枝椿象 <i>Tessaratoma papillosa</i>	中国	[58,59,60,61]	86.95	I
3	埃塞食甲茧蜂 <i>Microctonus aethiopoies</i>	浅黄根瘤象 <i>Sitona lepidus</i>	新西兰	[62,63,64]	86.95	I
4	白蛾周氏啮小蜂 <i>Chouioia cunea</i>	美国白蛾 <i>Hyphantria cunea</i>	中国	[16,65,12,66]	82.78	I
5	茎象食甲茧蜂 <i>Microctonus hyperodae</i>	阿根廷茎象甲 <i>Listronotus bonariensis</i>	新西兰	[67,68,69]	82.50	I
6	白蜡吉丁啮小蜂 <i>Tetrastichus planipennis</i>	白蜡窄吉丁 <i>Agrilus planipennis</i>	美国	[70,71,72]	78.34	II
7	松毛虫赤眼蜂 <i>Trichogramma dendrolimi</i>	马尾松毛虫 <i>Dendrolimus punctatus</i>	中国	[73,74,75,76]	78.34	II
8	花绒寄甲 <i>Dastarcus helophoroides</i>	松褐天牛 <i>Monochamus alternatus</i>	中国	[77,78,8,79]	78.06	II
9	花角蚜小蜂 <i>Coccobius azumai</i>	松突圆蚧 <i>Hemiberlesia pitysophila</i>	中国	[80,81,82]	78.05	II
10	椰心叶甲啮小蜂 <i>Tetrastichus brontispae</i>	椰心叶甲 <i>Brontispa longissima</i>	中国	[83,84,85,86]	78.05	II
11	管氏肿腿蜂 <i>Sclerodermus guani</i>	光肩星天牛 <i>Anoplophora glabripennis</i>	中国	[87,88]	73.61	II
12	斯氏线虫 <i>Steinernema carpocapsae</i>	美国白蛾 <i>Hyphantria cunea</i>	日本	[89,90]	69.44	II
13	小地老虎核多角体病毒 <i>Agrotis ipsilon nucleopolyhedrovirus</i>	小地老虎 <i>Agrotis ipsilon</i>	美国	[91,92,93,94]	64.99	II
14	苏云金杆菌 <i>Bacillus thuringiensis</i>	番茄斑潜蝇 <i>Tuta absoluta</i>	西班牙	[94,95,96]	60.83	II
15	聚集信息素 Aggregation pheromone	暗褐断眼天牛 <i>Tetropium fuscum</i>	波兰	[97,98,99,100]	60.26	II
16	性诱剂 Sex pheromone	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	中国	[101,102,103,104,105]	60.26	II
17	白僵菌 <i>Beauveria bassiana</i>	光肩星天牛 <i>Anoplophora glabripennis</i>	美国	[106,107,108,109]	51.65	III

注：害虫防治评估分值以表中各案例第一个参考文献为主。下同。

Note: The evaluation score of pest control is mainly based on the first reference of each case in the table. The same as below.

表 6 其他害虫防治案例评估验证

Table 6 Evaluation and verification of pest non-biological control cases

排序 No	应用产品 Products	靶标害虫 Target pests	应用国家 Countries	参考文献 References	分值 Score	效果评价等级 Effect evaluation level
1	鱼藤酮 Rotenone	胡萝卜微管蚜 <i>Semiaphis heraclei</i>	中国	[110,111]	64.99	II
2	扑虱灵 Buprofezin	稻飞虱 <i>Rice planthopper</i>	中国	[112,113,114,115]	61.11	II
3	印楝素 Azadirachtin	白蜡窄吉丁 <i>Agrilus planipennis</i>	加拿大	[116,117,118,119]	60.54	II
4	灭幼脲 Diflubenzuron	大豆夜蛾 <i>Pseudoplusia includens</i>	美国	[120,121]	56.67	III
5	阿维菌素 Abamectin	小菜蛾 <i>Plutella xylostella</i>	中国	[122,123,124]	56.38	III
6	氯菊酯 Permethrin	小菜蛾 <i>Plutella xylostella</i>	美国	[125,126,127]	52.50	III
7	高效氟氯氰菊酯 Beta-cyfluthrin	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	土耳其	[128,129,130]	52.50	III
8	杀虫灯 Black light lamps	松墨天牛 <i>Monochamus alternatus</i>	中国	[131,132,133]	51.66	III
9	西维因 Carbaryl	黄杉毒蛾 <i>Oryia pseudo</i>	美国	[134,135]	48.34	III
10	辛硫磷 Phoxim	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	中国	[136,137,138]	44.18	III
11	克百威 Carbofuran	亚洲玉米螟 <i>Ostrinia furnacalis</i>	菲律宾	[139,140,141]	44.18	III
12	黄板 Yellow sticky trap	黑刺粉虱 <i>Aleurocanthus spiniferus</i>	中国	[142,143]	43.04	III
13	甲胺磷 Methamidophos	小菜蛾 <i>Plutella xylostella</i>	新西兰	[144,145]	40.02	III
14	硫丹 Endosulfan	烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	印度	[146,147,148,149,150,151]	40.02	III
15	DDT	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	美国	[152,153]	40.02	III

5 讨论

随着害虫生物防治应用的推广, 人们也越来越关注生物产品对环境和生态的负面影响^[154], 例如天敌产品是否降低了生物的多样性。此外, 推广生物防治其中一个主要目的是通过减少劳动力和防治产品的经济支出, 达到降低成本提高收益的效果。而在传统的生物防治案例中, 仅通过各种措施测量靶标害虫的死亡率, 进而量化生物产品对害虫的影响来确定天敌产品的防控效果, 其评价方法均未考虑生物产品的经济效益及生态环境效益等因素。著名国际生物防治学家 Roy Van Driesche^[155]也明确反对生物控制不考虑成本效益, 支持扩大生物防治的前提是必须符合成本效益的观点。

本研究借助层次分析法, 通过对大量已有害虫防治效果评价方法的参考, 以经济效益和生态效益为主要评价指标, 并结合相关实例建立了害虫生物防治综合效益评价体系。魏建荣等^[12]利用种群生命表评价了周氏啮小蜂对美国白蛾连续 2 年共 4 个世代的控制作用, 其结果表明释放天敌对靶标物种美国白蛾种群有显著控制效果, 本文应用综合效益评价方法表明周氏啮小蜂对美国白蛾防效评估分值为 82.78, 效果评价等级为 I 级。梅芝健等^[156]通过测定储藏害虫的数量变化表明黄色花蝽的生物防治效果, 杨远亮等^[8]通过统计松褐天牛虫口数已确定花绒寄甲具有良好的控制效果, 本文测定花绒寄甲对松褐天牛防治的评估分值为 73.61, 效果评价等级为 II 级。其两种评价方法均表明周氏啮小蜂对美国白蛾的防效优于花绒寄甲对松褐天牛的生物防效, 但综合效益评价方法的结果更具有全面性, 操作性更强。田茂仁等^[112]和邱光等^[115]仅以害虫虫口密度作为评价扑虱灵对稻飞虱防治效果的指标, 评价结果均显示扑虱灵具有高效的防治效果; 刘浩官等^[114]不仅评价了扑虱灵对稻飞虱的防治效果, 也评价了扑虱灵对其捕食性天敌的影响, 表明扑虱灵对捕食性天敌具有一定选择性。此外, 覃志辉^[113]同样利用层次分析法建立了一种针对杀虫剂防治效果的综合评价方法, 并以害虫防治效果和保护天敌效果为评价指标, 结果也表明扑虱灵对防治稻飞虱有特效。本文利用害虫生物防治综合效益评价方法, 得出扑虱灵对稻飞虱综合防治效益分值仅为 61.11, 效果评价等级为 II 级。如果仅以害虫的数量变化作为评价指标, 结果为化学药剂硫丹对粉虱类的防治效果优于扑虱灵^[146]。而利用综合效益评价法, 将杀虫剂对环境的安全、生物多样性的影响、投入成本及防治持续时间等均作为评价指标, 结果表明硫丹对烟粉虱综合防治效益仅为 40.02, 效果评价等级为 III 级, 远低于扑虱灵的综合防治效益。此外, 谢国林等^[80]仅从天敌寄生率、扩散速度、定居能力及害虫虫口密度等方面分别分析了花角蚜小蜂 *C. azumai* 对松突圆蚧 *H. pitysohila* 的控制效能, 结果显示各方面防控效能均为一般, 而考虑生物防治还具有专化性强、无污染及低成本等特点, 利用害虫生物防治综合效益评价方法, 得出了花角蚜小蜂对松突圆蚧防效评估分值为 78.05, 防治综合效益优良。

由于生物防治评价涉及的因素众多, 且部分指标的评价标准难以精确量化, 因此, 获得较准确全面的评价指标, 还需要进一步研究和以大量案例样本分析为基础进行完善。值得注意的是, 权重是“心理价值”, 仅在心理因素影响较小时, 才能将结果与现实作对比^[157]。利用层次分析法可确定评价的指标顺序关系, 不能明确规定评价权重的大小, 要确定评价方案的优先权重, 必须考虑决策者对权重的分辨能力^[158]。从本文建立害虫生物防治综合效益评价方法的过程可以看出, 对于评价体系框架中各评价指标中权重比值的确定, 具有一定主观因素的干扰, 即不同的决策者具有不同的权重比值确定标准。不同生态系统中生物防治的评价指标重要性也存在一定差异。如在农业生态系统中“虫口减退”和“投入成本”等评价指标的重要性较高, 而林业生态系统中“生态环境效益”等评价指标的重要性较高, 但在实际评价防治效益中, 很难找到完全符合不同生态系统的评价方法。本文综合考虑了不同生态系统下防治效果评价指标的重要程度及实际操作性, 而选择通用性及操作性较高的评价指标, 如“经济效益”和“生态环境效益”。同时, 在考虑不同生态系统的基础上, 对于不同评价指标赋予了不同的权重值, 也是综合考虑不同生态系统所定的一种适中性评价方法。此外, 本文仅选择单独的生物防治方法进行了评价, 而对于多种生物防治方法同时应用时, 建议在评价“防治效果”指标时将多种评价方法视为一种防治方法进行计算求值, “投入成本”评价指标则进行累加计算; 评价“生物多样性”及“环境保护”时, 则取多种生物防治方法中的最低值进行取值评价。

害虫生物防治效果评价体系中, 同一方案层具有不同等级及分值, 但对于不同决策者所划定的结果并

不一致,因此对于害虫生物防治综合效益评价指标权重及等级分值的确定还不尽成熟,需根据应用实际情况进行调整,使评价结果更加准确可靠。此外,害虫生物防治综合效益的评价要与实际情况及生物防治产品特性相结合,后期根据应用考虑以下方面:一是对现有评价指标分数比值进行完善优化,设置评价指标分数的合理比重,以体现各评价指标的合理权重。二是根据应用实际要求,进一步完善综合效益评价的科学性、可操作性及合理性,生物防治效益评价体系的指标选择及结构优化也可进一步完善。三是应用层次分析法提出的综合效益评价方法可将定性化指标进行定量化,复杂的问题简单化,进而得出数据用于重要程度进行量化描述^[159]。

本文提出采用定量研究方法,弥补了传统评价方法的局限性,在理论上更加客观严谨,不仅对防治害虫本身具有一定的评价作用,也考虑了防治措施的经济效益和生态环境效益。应用本研究提出的方法对国内外一些害虫防治案例的评价结果显示,害虫生物防治综合效益评价指标更具有综合性及可操作性,评价指标体系和模型在各种生物防治效益评价中均具有较好的普适性,可为评价生物防治效益提供进一步的理论依据。

参 考 文 献

- [1] Waage J K, Greathead D J. Biological control: challenges and opportunities[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, 318(1189): 111-128.
- [2] Howarth F G. Environmental impacts of classical biological control[J]. *Entomology*, 1991, 36(36): 485-509.
- [3] 田应佳, 禄鑫, 张广. 我国森林害虫防治方法研究进展[J]. *贵州林业科技*, 2019, 47(2): 59-64.
- [4] 夏云龙. 用模糊数学理论评价天敌的作用[J]. *生物数学学报*, 1989, 4(1): 1-8.
- [5] Morris R F, Miller C A. The development of life tables for the spruce budworm[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1954, 32(4): 283-301.
- [6] 刘树生. 天敌动物对害虫控制作用的评估方法及其应用策略[J]. *中国生物防治*, 2004, 19(1): 1-7.
- [7] 魏建荣, 牛艳玲. 西安城区环境中释放花绒寄甲成虫对光肩星天牛的生物防治效果评价[J]. *昆虫学报*, 2011, 54(12): 1399-1405.
- [8] 杨远亮, 杨忠岐, 王小艺, 等. 应用花绒寄甲防治松褐天牛[J]. *林业科学*, 2013, 49(3): 103-109.
- [9] Legaspi J C, Legaspi B J, Saldaña R R. Evaluation of *Steinernema riobravis* (Nematoda: Steinernematidae) against the *Mexican rice borer* (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. *Journal of Entomological Science*, 2000, 35(2): 141-149.
- [10] Gazit Y Y, Glazer I. Evaluation of entomopathogenic nematodes for the control of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae)[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2000, 10(2): 157-164.
- [11] 唐艳龙, 杨忠岐, 王小艺, 等. 释放花绒寄甲成虫和卵防治栗山天牛[J]. *林业科学*, 2012, 48(7): 186-191.
- [12] 魏建荣, 杨忠岐, 苏智. 利用生命表评价白蛾周氏啮小蜂对美国白蛾的控制作用[J]. *昆虫学报*, 2003, 46(3): 318-324.
- [13] 郭晓华, 齐淑艳, 周兴文, 等. 外来有害生物风险评估方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1486-1490.
- [14] 潘文亮, 张兴. 杀虫剂田间药效的计算[J]. *植物保护*, 1988, 25(2): 32-34.
- [15] 郭建英, 吴岷, 武吉兆, 等. 释放天敌瓢虫和施用化学农药吡虫啉对麦田蚜虫的控制效果评价[J]. *昆虫知识*, 2006, 43(4): 508-513.
- [16] 杨忠岐, 王小艺, 王传珍, 等. 白蛾周氏啮小蜂可持续控制美国白蛾的研究[J]. *林业科学*, 2005, 41(5): 72-80.
- [17] 陶忠祥, 许丽月, 王进强, 等. 寄生蜂田间防治效果评价方法探讨[J]. *热带农业科技*, 2015, 38(1): 39-41.
- [18] Ruppel R F. Cumulative insect days as an index of crop protection[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1983, 76(2): 357-377.
- [19] 黄次伟, 冯炳灿, 刘少华, 等. 早稻白背飞虱防治适期的初步探讨[J]. *植物保护*, 1986, 12(6): 5-7.
- [20] 黄风宽, 罗善昱, 韦素美, 等. 抗褐飞虱生物型II水稻品种抗性稳定性研究[J]. *植物保护*, 2003, 23(6): 14-16.
- [21] 凌冰, 孙新华, 马德英, 等. 几种保苗剂防治棉蚜效果及其对棉花出苗保苗综合效应的研究[J]. *新疆农业大学学报*, 1998, 33(4): 10-14.
- [22] 赵善欢, 陈文奎, 张兴, 等. 杀虫剂田间毒理研究新进展[J]. *华南农业大学学报*, 1991, 12(4): 1-4.
- [23] 钟国华, 胡美英, 吴启松, 等. 黄杜鹃花萃取物防治美洲斑潜蝇和菜粉蝶幼虫的研究[J]. *植物保护*, 2000, 26(3): 19-21.
- [24] Morris R F. Predictive population equations based on key factors[J]. *Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 1963, 95(32): 16-21.
- [25] 黄风宽. 害虫防治效果评价方法概述[J]. *广西农业科学*, 1990(4): 34-36, 17.
- [26] Varley G C, Gradwell G R. The use of models and life tables in assessing the role of natural enemies[J]. *Biological Control*, 1971, 45(1): 93-112.
- [27] 庞雄飞, 梁广文, 曾玲. 昆虫天敌作用的评价[J]. *生态学报*, 1984, 4(1): 461-463.

- [28] 胡学难, 梁广文, 庞雄飞. 利用生命表技术评价甜玉米品种对亚洲玉米螟的抗性[J]. 中国农业科学, 2011, 34(5): 502-505.
- [29] Kuhar T P, Wright M G, Hoffmann M P. Life table studies of European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) with and without inoculative releases of *Trichogramma ostrinia* (Hymenoptera: Trichogrammatidae)[J]. Environmental Entomology, 2002, 31: 482-489.
- [30] 侯有明, 尤民生, 庞雄飞. 苦皮藤乳油对小菜蛾种群控制效应评价[J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(1): 40-43.
- [31] 洗继东, 梁广文, 曾玲. 印楝素乳油对荔枝蒂蛀虫种群的控制作用[J]. 昆虫知识, 2006, 43(3): 327-330.
- [32] Kandasamy P, Rajagopal S, Amsalingam R. Life table and predatory efficiency of *Stethorus gilvifrons* (Coleoptera: Coccinellidae), an important predator of the red spider mite, *Oligonychus coffeae* (Acari: Tetranychidae), infesting tea[J]. Experimental and Applied Acarology, 2010, 50(2): 141-150.
- [33] Barati R, Golmohammadi G, Ghajarie H. The effects of some botanical insecticides and pymetrozine on life table parameters of silver leaf whitefly *Bemisia tabaci* Gennadius (Hemiptera: Aleyrodidae)[J]. Pesticidii Fitomedicina, 2013, 28(1): 47-55.
- [34] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [35] Bosserman R W, Ragade R K. Ecosystem analysis using fuzzy set theory[J]. Ecological Modelling, 1982, 16(2-4): 191-208.
- [36] Giering E W, Kandel A. The application of fuzzy set theory to the modeling of competition in ecological systems[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1983, 9(1): 103-127.
- [37] 王万雄, 李自珍. 一种天敌控制多种害虫作用的模糊数学评价方法[J]. 生物数学学报, 2004, 19(4): 487-492.
- [38] 吴进才, 庞雄飞. 多物种复合种群捕食量的数学模型及在褐稻虱数量预测中的应用[J]. 生态学报, 1991, 11(2): 139-146.
- [39] 邹运鼎, 杨义和, 李甲林, 等. 天敌对油菜蚜虫的综合控制作用分析[J]. 生物数学学报, 1990, 5(2): 101-105.
- [40] 王乃江, 张文辉, 同金霞, 等. 黄土高原蔡家川林场森林质量评价[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 7-13.
- [41] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价[J]. 林业科学, 2011, 47(1): 135-142.
- [42] 陈俊华, 龚固堂, 朱志芳, 等. 小流域防护林体系的空间对位配置[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 38-47.
- [43] 国政, 臧润国. 中国极小种群野生植物濒危程度评价指标体系[J]. 林业科学, 2013, 49(6): 10-17.
- [44] Wei C C, Chien C F, Wang M J. An AHP-based approach to ERP system selection[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 96(1): 47-62.
- [45] Harbi A S. Application of the AHP in project management[J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(1): 19-27.
- [46] 窦慧娟, 张晓东, 张慧丽. 层次分析法在交通运输方式选择中的应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2003, 25(4): 44-46.
- [47] 李霓雯, 张晓丽, 张凝, 等. 基于加权信息量模型的油松毛虫灾害发生危险性评价[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 106-117.
- [48] 王羽扬, 刘勇, 王沉, 等. 基于层次分析法的软岩巷道支护方案优化及应用研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 1-9.
- [49] Wang Y, Xu N R. Application of optimization theory in analytical hierarchy process[J]. Systems Engineering-theory and Practice, 1991, 47(2): 24-30.
- [50] Young A. Change and constancy: an analysis of publications in agroforestry systems volumes 1-10[J]. Agroforestry Systems, 1991, 13(3): 195-202.
- [51] Wu G. Nitrogen phosphorus and potassium recycling in an agroforestry ecosystem of Huanghuaihai Plain: with *Paulownia elongata* intercropped wheat and maize as an example[J]. Journal of Environmental Sciences, 1998, 10(2): 62-69.
- [52] 高尚坤, 杨忠岐. 生命表技术在害虫生物防治中的应用[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(2): 256-263.
- [53] Saaty. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1986, 32(7): 841-855.
- [54] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 17(7): 93-100.
- [55] Carolina A C, Charlotte C E, Mark H E, et al. Monitoring the effects of *rodolia cardinalis* on *icerya purchasi* populations on the galapagos islands[J]. Biocontrol, 2012, 57(2): 167-179.
- [56] 张格成, 黄良炉. 利用澳洲瓢虫防治吹绵蚧初步研究[J]. 昆虫学报, 1963, 12(1): 688-700.
- [57] Caltagirone L E, Doult R L. The history of the *Vedalia Beetle* importation to California and its impact on the development of biological control[J]. Annual Review of Entomology, 1989, 34(1): 1-16.
- [58] Li D S, Liao C, Zhang B X. Biological control of insect pests in litchi orchards in China[J]. Biological Control, 2014, 68(1): 23-36.
- [59] 蒲蛰龙, 麦秀慧, 黄明度. 利用平腹小蜂防治荔枝蜡试初报[J]. 植物保护学报, 1962, 1(3): 301-306.
- [60] 韩诗畴, 刘文惠, 陈巧贤, 等. 香港地区释放荔枝卵平腹小蜂防治荔枝蜡[J]. 中国生物防治学报, 1999, 15(2): 54-56.
- [61] 刘雨芳, 古德祥. 荔枝卵平腹小蜂对寄主的搜索行为[J]. 中国生物防治学报, 2000, 16(1): 1-4.
- [62] Gerard P J, Wilson D J, Eden T M. Field release, establishment and initial dispersal of Irish *Microctonus aethioides* in *Sitona lepidus* populations in northern New Zealand pastures[J]. Biocontrol, 2011, 56(6): 861-870.
- [63] Barratt B I, Evans A A, Ferguson C M, et al. Laboratory nontarget host range of the introduced parasitoids *Microctonus aethioides* and *M. hyperodae*

- (Hymenoptera: Braconidae) compared with field parasitism in New Zealand[J]. Environmental Entomology, 1997, 26(3): 694-702.
- [64] Phillips C B, Canen R P, Mee J, *et al.* Intraspecific variation in the ability of *Microctonus aethiopoulos* (Hymenoptera: Braconidae) to parasitise *Sitona lepidus* (Coleoptera: Curculionidae)[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2002, 45(4): 295-303.
- [65] 杨忠岐, 王传珍, 刘玉明. 寄生美国白蛾的长尾啮小蜂一新种 (膜翅目: 姬小蜂科)[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 87-90.
- [66] Xin B, Liu P, Zhang S, *et al.* Research and application of *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae) in China[J]. Biocontrol Science & Technology, 2017, 27(3): 301-310.
- [67] Barker G M, Addison P J. Early impact of endoparasitoid *Microctonus hyperodae* (Hymenoptera: Braconidae) after its establishment in *Listronotus bonariensis* (Coleoptera: Curculionidae) populations of northern New Zealand pastures[J]. Journal of Economic Entomology, 2006, 44(2): 201-207.
- [68] Paul J A, Gary M B. Effect of various pesticides on the non-target species *Microctonus hyperodae*, a biological control agent of *Listronotus bonariensis*[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2006, 119(1): 71-79.
- [69] Barker G M. Biology of the introduced biocontrol agent *Microctonus hyperodae* (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Listronotus bonariensis* (Coleoptera: Curculionidae) in northern New Zealand[J]. Environmental Entomology, 2013, 42(5): 32-33.
- [70] Duan J J, Bauer L S, Abell K J, *et al.* Establishment and abundance of *Tetrastichus planipennisi* (Hymenoptera: Eulophidae) in Michigan: potential for success in classical biocontrol of the invasive emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2013, 106(3): 1145.
- [71] Ulyshen M D, Mankin R W, Chen Y, *et al.* Role of *Agrilus planipennisi* (Coleoptera: Buprestidae) larval vibrations in host-quality assessment by *Tetrastichus planipennisi* (Hymenoptera: Eulophidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2011, 104(1): 81-86.
- [72] Yang S, Duan J J, Lelito J, *et al.* Multiparasitism by *Tetrastichus planipennisi*, (Hymenoptera: Eulophidae) and *Spathius agrili*, (Hymenoptera: Braconidae): implication for biological control of the Emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae)[J]. Biological Control, 2013, 65(1): 118-123.
- [73] 巫之馨, 钦俊德, 李同修, 等. 以无昆虫物质的人工饲料培育松毛虫赤眼蜂幼虫[J]. 昆虫学报, 1982, 25(2): 128-134.
- [74] 沈立荣, 杜增庆, 裘学军. 浙江省马尾松毛虫的赤眼蜂种类调查及用柞蚕卵繁殖对优势种的影响[J]. 生物防治通报, 1992, 12(3): 101-103.
- [75] 梁细第, 蒋平. 浙江省应用赤眼蜂防治森林害虫回顾[J]. 森林病虫通讯, 1994, 12(4): 45-46.
- [76] 王翠敏, 丛斌, 崔宝玉, 等. 松毛虫赤眼蜂两性生殖品系与孤雌产雌品系生物学特性的比较[J]. 中国生物防治, 2006, 21(2): 96-100.
- [77] Yang Y L. Biological control of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) by releasing eggs and adults of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(3): 103-109.
- [78] 杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 等. 释放花绒寄甲和设置诱木防治松褐天牛对松材线虫病的控制作用研究[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(4): 490-495.
- [79] 唐艳龙, 高尚坤, 张彦龙, 等. 花绒寄甲寄生松褐天牛的关键环境因子研究[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(6): 830-835.
- [80] 谢国林, 潘务耀, 唐子颖, 等. 花角蚜小蜂对松突圆蚧的控制效能及其稳定作用的评估[J]. 昆虫学报, 1997, 38(2): 135-144.
- [81] 丁德诚, 谢国林. 松突圆蚧花角蚜小蜂的生物学[J]. 昆虫学报, 1995, 38(1): 46-53.
- [82] 古德祥, 陈永革. 松突圆蚧种群生命表与花角蚜小蜂的寄生作用的研究[J]. 昆虫天敌, 1998, 20(4): 12-19.
- [83] 彭正强, 吕宝乾, 覃伟权, 等. 外来害虫椰心叶甲入侵灾变的生态学基础及控制技术体系[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 161-165.
- [84] 吕宝乾, 彭正强, 许春霭, 等. 椰心叶甲蛹寄生蜂-椰心叶甲啮小蜂的生物学特性[J]. 昆虫学报, 2006, 49(4): 643-649.
- [85] Zhou H, Yu Y, Tan X. Biological control of insect pests in apple orchards in china[J]. Biological Control, 2014, 68(1): 47-56.
- [86] Liu K, Fu B L, Lin J R, *et al.* Parasitism performance of *Tetrastichus brontispae* ferriere over the coconut hispine beetle, *Brontispa longissimi* (gestro)[J]. Neotropical Entomology, 2016, 45(4): 420-426.
- [87] 姚万军, 杨忠岐. 利用管氏肿腿蜂防治光肩星天牛技术研究[J]. 环境昆虫学报, 2008, 30(2): 127-134.
- [88] 杨忠岐, 王小艺, 曹亮明, 等. 管氏肿腿蜂的再描述及中国硬皮肿腿蜂属 *Sclerodermus* (Hymenoptera: Bethyidae) 的种类[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(1): 1-12.
- [89] Yamanaka S, Seta K, Yasuda M. Evaluation of the use entomogenous nematode, *Steinernema feltiae* (strain Mexican) for the biological control of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae)[J]. Japanese Journal of Nematology, 1986, 16: 26-31.
- [90] Kim H H, Choo H Y, Lee S M. Pathogenicity of entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapsae* GSN1 strain (Rhabditida: Steinernematidae) against *Tebenna issikii* (Lepidoptera: Choreutidae)[J]. Korean Journal of Applied Entomology, 2007, 46(2): 313-318.
- [91] Andrea J B, Daniel A P. Evaluating a naturally occurring baculovirus for extended biological control of the Black cutworm (Lepidoptera: Noctuidae) in golf course habitats[J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103(5): 1555-1563.

- [92] Boughton A J, Lewis L C, Bonning B C. Potential of *Agrotis ipsilon* nucleopolyhedrovirus for suppression of the *Black cutworm* (Lepidoptera: Noctuidae) and effect of an optical brightener on virus efficacy[J]. Journal of Economic Entomology, 2001, 26(1): 1-10.
- [93] Prater C A, Redmond C T, Barney W. Microbial control of *Black cutworm* (Lepidoptera: Noctuidae) in turfgrass using *agrotis Lpsilon ultiple* nucleopolyhedrovirus[J]. Journal of Economic Entomology, 2006, 99(4): 1129-1133.
- [94] Joel G C, Oscar M, Helga M. Efficacy of *Bacillus thuringiensis* in controlling the tomato borer, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae)[J]. BioControl, 2011, 56: 71-80.
- [95] Oscar M, Joel G C, Urbaneja A. The combined use of *Bacillus thuringiensis* and *Nesidiocoris tenuis* against the *Tomato borertuta absoluta*[J]. BioControl, 2011, 56(6): 883-891.
- [96] Youssef N A, Hassan G M. Bio-insecticidal activity of *Bacillus thuringiensis* isolates on the tomato borer, *Tuta absoluta* (meyrick) and their molecular identification[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2013, 23(1): 107-116.
- [97] Silk P J, Lemay M A, Le C G, et al. Behavioral and electrophysiological responses of *Tetropium fuscum* (Coleoptera: Cerambycidae) to pheromone and spruce volatiles[J]. Environmental Entomology, 2010, 39(6): 1997-2005.
- [98] Silk P J, Sweeney J, Wu J, et al. Evidence for a male-produced pheromone in *Tetropium fuscum* and *Tetropium cinnamopterum* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Naturwissenschaften, 2007, 94(8): 697-701.
- [99] Gadi V R, Regina F, Uwe N, et al. Enhancement of attraction and trap catches of the old-house borer, *Hylotrupes bajulus* (Coleoptera: Cerambycidae), by combination of male sex pheromone and monoterpenes[J]. Pest Management Science, 2005, 61(7): 699-704.
- [100] 朱宁, 张冬勇, 吴利平, 等. 聚集信息素和寄主植物挥发物对光肩星天牛和星天牛的引诱作用[J]. 昆虫学报, 2017, 60(4): 421-430.
- [101] 徐文华, 李武权, 戚永奎, 等. 性诱剂对主害代棉铃虫的诱杀效应研究[J]. 江西农业学报, 2000, 12(2): 29-34.
- [102] 徐文华, 周加春, 沈安国. 性信息素在棉铃虫综合治理中的作用研究[J]. 植物保护, 2000, 26(4): 23-26.
- [103] 葛绍奎, 李典谟. 棉铃虫性诱剂对棉铃虫成虫行为的影响及田间控制作用分析[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 291-294.
- [104] 宋贤利, 孙爱萍, 王越. 棉铃虫性诱剂在测报上的应用效果比较[J]. 植物保护, 1998, 24(2): 47.
- [105] 仇保华, 刘宗泉, 李艳红, 等. 几种性诱剂、性诱器诱捕棉铃虫成虫效果初探[J]. 中国棉花, 2011, 38(6): 26-28.
- [106] Dubois T, Li Z, Jia H, et al. Efficacy of fiber bands impregnated with *Beauveria brongniartii* cultures against the *Asian longhorned Beetle*, *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Biological Control, 2004, 31(3): 320-328.
- [107] Higuchi T, Saika T, Senda S, et al. Development of biorational pest control formulation against longicorn beetles using a fungus, *Beauveria brongniartii* Petch[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1997, 84(3): 236-243.
- [108] 徐金柱, 樊美珍, 李增智. 放菌方式对白僵菌防治光肩星天牛效果的影响[J]. 中国生物防治, 2003, 18(1): 27-30.
- [109] Hajek A E, Huang B, Dubois T, et al. Field studies of control of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) using fiber bands containing the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria brongniartii*[J]. Biocontrol Science and Technology, 2006, 16(4): 329-343.
- [110] 渠成, 穆常青, 王然, 等. 6种植物源药剂对胡萝卜微管蚜的毒力测定和防效评价[J]. 植物保护, 2020, 46(1): 266-269.
- [111] 徐汉虹, 黄继光. 鱼藤酮的研究进展[J]. 西南大学学报, 2001, 27(2): 140-164.
- [112] 田茂仁, 蒲正国, 谢雪梅, 等. 扑虱灵控制稻飞虱的效果评价[J]. 昆虫知识, 1996, 33(3): 129-132.
- [113] 覃志辉. 一种综合评价稻田杀虫剂防治效果的方法[J]. 广西植保, 1995, 8(3): 4-6.
- [114] 刘浩官, 刘波, 林坚贞, 等. 扑虱灵对稻飞虱及其捕食性天敌种群的影响[J]. 华东昆虫学报, 1992, 1(2): 68-71.
- [115] 邱光, 顾正远, 刘贤金, 等. 吡虫啉、扑虱灵对褐稻虱的作用机制及药效特征比较研究[J]. 华东昆虫学报, 1997, 5(2): 81-86.
- [116] Susana G, Dean T, Derek C, et al. Foliar residue dynamics of azadirachtins following direct stem injection into white and green ash trees for control of emerald ash borer[J]. Pest Management Science, 2011, 67(10): 1277-1284.
- [117] McKenzie N, Helson B, Thompson D, et al. Azadirachtin: an effective systemic insecticide for control of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103(3): 708-717.
- [118] Leng P H, Reddy G V. Bioactivity of selected eco-friendly pesticides against *Cylas formicarius* (Coleoptera: Brentidae)[J]. Florida Entomologist, 2012, 95(4): 1040-1047.
- [119] Poland T M, Ciaramitaro T M, Mcullough D G. Laboratory evaluation of the toxicity of systemic insecticides to *Emerald Ash Borer* larvae[J]. Journal of Economic Entomology, 2015, 109(2): 705-716.
- [120] Willrich M M, Boethel D J. Effects of diflubenzuron on *Pseudoplusia includens* (Lepidoptera: Noctuidae) and its parasitoid *Copidosoma floridanum*

- (Hymenoptera: Encyrtidae)[J]. *Environmental Entomology*, 2001, 30(4): 794-797.
- [121] Scheepmaker J W A, Geels F P, Smits P H. Control of the mushroom pests *Lycoriella auripila* (Diptera: Sciaridae) and *Megaselia halterata* (Diptera: Phoridae) by *Steinernema feltiae* (Nematoda: Steinernematidae) in field experiments[J]. *Annals of Applied Biology*, 2010, 131(3): 359-368.
- [122] 何捷, 张雪燕. 小菜蛾对阿维菌素的抗性形成规律[J]. *广西植保*, 2001, 14(4): 28.
- [123] 吴青君, 张文吉, 张友军, 等. 表皮穿透和 GABAA 受体不敏感性在小菜蛾对阿维菌素抗性中的作用[J]. *昆虫学报*, 2002, 45(3): 336-340.
- [124] 孙红霞, Tadashi M, 吴刚. 亚致死剂量阿维菌素和氟虫晴处理小菜蛾对寄生蜂菜蛾绒茧蜂生长发育的影响[J]. *昆虫学报*, 2008, 51(3): 269-276.
- [125] Jallow M F A, Hoy C W. Indirect selection for increased susceptibility to permethrin in *Diamondback Moth* (Lepidoptera: Plutellidae)[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2007, 100(2): 526-533.
- [126] Eigenbrode S D, Shelton A M, Kain W C, et al. Managing lepidopteran pests in cabbage with herbicide-induced resistance, in combination with a pyrethroid insecticide[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1993, 69(1): 41-50.
- [127] Mochizuki M. Effectiveness and pesticide susceptibility of the pyrethroid-resistant predatory mite *Amblyseius womersleyi* in the integrated pest management of tea pests[J]. *Biocontrol*, 2003, 48(2): 207-221.
- [128] Karaa S U, Konu M, Musa B. Determination of susceptibility levels of *Helicoverpa armigera* (Noctuidae: Lepidoptera) strains collected from different regions to some insecticides in turkey[J]. *Journal of the Entomological Research Society*, 2013, 15(1): 37-45.
- [129] Athanassiou C G, Kavallieratos N G, Vayias B J, et al. Residual toxicity of beta cyfluthrin, alpha cypermethrin and deltamethrin against *tribolium confusum Jacquelin duval* (Coleoptera: Tenebrionidae) on stored wheat[J]. *Applied Entomology & Zoology*, 2004, 39(2): 195-202.
- [130] Athanassiou C G, Kavallieratos N G, Arthur F H, et al. Efficacy of a combination of beta-cyfluthrin and imidacloprid and beta-cyfluthrin alone for control of stored-product insects on concrete[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2013, 106(2): 1064-1070.
- [131] 梁细弟, 蒋平, 周连山, 等. 灯光诱杀松墨天牛的效果及评价[J]. *森林病虫害通讯*, 2000, 18(4): 28-30.
- [132] 梁细弟, 朱建国, 周关校, 等. 几种诱杀松墨天牛方法的效果比较及评价[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(4): 366-369.
- [133] 房应征, 那斯尔, 艾合买提江. 频振式杀虫灯 3 年使用效果和成本核算[J]. *植物保护*, 2000, 26(2): 49-50.
- [134] Ciesla W M, Kohler S, Dewey J E, et al. Field efficacy of aerial applications of carbaryl against *Douglas-fir tussock moth*[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1976, 69(2): 219-224.
- [135] Robertson J L. Contact and feeding toxicities of acephate and carbaryl to larval stages of the western spruce budworm, *Choristoneura occidentalis* (Lepidoptera: Tortricidae)[J]. *Canadian Entomologist*, 1980, 112(10): 1001-1006.
- [136] 林祥文, 沈晋良. 棉铃虫对辛硫磷抗性的风险评估与预报[J]. *昆虫学报*, 2001, 44(4): 462-468.
- [137] 韦存虚, 朱福兴, 李东霞. 氰戊菊酯、辛硫磷及其混剂对棉铃虫解毒代谢酶的影响[J]. *扬州大学学报*, 2004, 25(3): 59-64.
- [138] Wu K M, Li G M, Gu Y Y. Phoxim resistance in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in china[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1997, 90(4): 868-872.
- [139] Mahmut D, James W S, Sam P, et al. Comparison of management strategies for *Squash bugs* (Hemiptera: Coreidae) in watermelon[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2004, 97(6): 1999-2005.
- [140] Felkl G. Economic aspects of detasseling corn plants and insecticide use to control Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* Guenée (Lep: Pyralidae), in the Philippines[J]. *Journal of Applied Entomology*, 1988, 105(1-5): 379-386.
- [141] Aristizábal L F, Ospina K A, Vallejo U A, et al. Entomofauna associated with *Heliconia* spp. (Zingiberales: Heliconiaceae) grown in the ceyumintral area of colombia[J]. *Florida Entomologist*, 2013, 96(1): 112-119.
- [142] 彭萍, 唐敏, 侯渝嘉, 等. 黄板诱杀茶园黑刺粉虱及假眼小绿叶蝉效果及特性研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(1): 87-90.
- [143] 张洪, 柳晓霞, 杜娟, 等. 黄板诱杀温室白粉虱的关键技术研究[J]. *西北农业学报*, 2006, 15(3): 94-97.
- [144] Wu G, Jiang S, Miyata T. Seasonal changes of methamidophos susceptibility and biochemical properties in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) and its parasitoid *Cotesia plutellae* (Hymenoptera: Braconidae)[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 97(5): 1689.
- [145] Kumar K, Chapman R B. Sublethal effects of insecticides on the diamondback moth *Plutella xylostella*[J]. *Pest Management Science*, 1984, 15(4): 344-352.
- [146] Dhingra S, Walia S, Kumar J, et al. Field efficacy of azadirachtin-a, tetrahydroazadirachtin-a, neemazal ® and endosulfan against key pests of okra[J]. *Pest Management Science*, 2008, 64(11): 1187-1194.
- [147] Liu T X, Oetting D R, Buntin G D. Population dynamics and distribution of *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on

- poinsettia following applications of three chemical insecticides[J]. Journal of Entomological Science, 1993, 28(1): 126-135.
- [148] Palumbo J C, Coates W E. Air-assisted electrostatic application of pyrethroid and endosulfan mixtures for *Sweetpotato whitefly* (Homoptera: Aleyrodidae) control and spray deposition in cauliflower[J]. Journal of Economic Entomology, 1996, 89(4): 970-980.
- [149] Emmanouil R, Nikos E R, Anastasia T. Insecticide resistance in *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) populations from crete[J]. Pest Management Science, 2005, 61(6): 577-582.
- [150] Naveed M, Salam A, Saleem M A, *et al.* Effect of foliar applications of some insecticides on *Bemisia tabaci*, predators and parasitoids: implications in its management in Pakistan[J]. Phytoparasitica, 2008, 36(4): 377-387.
- [151] Basit M, Sayyed A H, Saleem M A, *et al.* Cross-resistance, inheritance and stability of resistance to acetamiprid in cotton whitefly, *Bemisia tabaci* Genn (Hemiptera: Aleyrodidae)[J]. Crop Protection, 2011, 30(6): 705-712.
- [152] Blanchard R A, Gouck H K. Ddt-oil emulsion for combined control of corn earworm and european corn borer[J]. Journal of Economic Entomology, 1950, 43(5): 734-735.
- [153] Bacon O G. Control of corn earworm on sweet corn in northern california[J]. Journal of Economic Entomology, 1950, 43(3): 364-371.
- [154] Hajek A E, Hurley B P, Kenis M, *et al.* Exotic biological control agents: a solution or contribution to arthropod invasions?[J]. Biol-Invasions, 2016, 18: 953-969.
- [155] Driesche R V, Hoddle M S. Classical arthropod biological control: measuring success, step by step[J]. Biological Control, 2000, 80(5): 39-75.
- [156] 梅芝健, 李霁瀛, 庞佳林, 等. 黄色花蝽模拟仓捕食储粮害虫及应用效果评价[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(4): 68-72.
- [157] 汪浩, 马达. 层次分析标度评价与新标度方法[J]. 系统工程理论与实践, 1993, 13(5): 24-26.
- [158] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 11(9): 107-112.
- [159] 郑娇, 胡国杰, 索乐都. 基于层次分析法的绿色建筑设计方案评价[J]. 辽宁工业大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 34-36.

(责任编辑: 张莹)

封面说明:

元宝枫种子瘿蚊金小蜂 *Systasis acerae* Yang, 寄主是为害元宝枫种子的瘿蚊幼虫, 是一种新的天敌昆虫, 体长仅 3 毫米, 金绿色。