

害虫防治的生态经济阈值及其估算方法*

门兴元^{1**} 李丽莉¹ 欧阳芳² 张晴晴² 卢增斌¹ 李超¹ 戈峰^{2***}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100;

2. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要 害虫经济阈值 (Economic threshold, ET) 作为农业害虫管理关键决策依据, 是主要基于挽回作物损失的价值和防治费用的农业害虫防治经济阈值。在实践应用中, 由于对害虫防治措施的生态代价考虑不足, 往往导致阈值指标偏低, 防治次数和农药使用量偏多。本文利用农药生态效应评估的最新研究进展, 提出了充分考虑防治费用和防治生态代价的农业害虫防治生态经济阈值 (Ecological and economic threshold, EET) 概念, 给出了基于农药生态风险指数的简便易行的数学模型和估算方法。生态经济阈值的提出与推广应用, 不仅为现代农业害虫防治决策提供了科学依据, 而且有助于我国的农药减量目标的实现。

关键词 农业害虫; 生态经济阈值; 估算方法; 农药生态风险指数

Ecological and economic threshold (EET) and its estimation method

MEN Xing-Yuan^{1**} LI Li-Li¹ OUYANG Fang² ZHANG Qing-Qing²
LU Zeng-Bin¹ LI Chao¹ GE Feng^{2***}

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Science, Ji'nan 250100, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Economic threshold (ET) was the key index for guiding agricultural pest management, which was based on the value of the saved crops and control cost in the pest management. Because the ecological cost of pesticide use often was less considered in the practical application, ET was lower and more pesticides were used. We proposed the concept of ecological and economic threshold (EET) with the aid of the new development in the assessment of ecological impacts of pesticide use, in which both the control cost and ecological cost of pesticide use were fully considered. The simple mathematic model and estimation method based on the index of pesticide ecological risk use were presented. EET will be conducive to promote the pest management level and achieve purpose of pesticide reduction.

Key words agricultural pest; ecological and economic threshold; estimation method; index of pesticide ecological risk

害虫经济阈值 (Economic threshold, ET) 在农业害虫管理中发挥非常重要的作用, 是害虫防控决策的主要依据 (Kogan, 1998)。农业生产中, 害虫防治的直接目标是挽回农作物损失, 因此在采用害虫防治措施时, 需要充分考虑防治投入和防治效益, 也就是防治成本不能高于挽回的农作物收益。早在 20 世纪 50 年代, Stern 等 (1959) 提出了 ET 概念, 认为经济阈值是决定使用防治措施时害虫的种群密度, 即害虫种群达

到该密度时, 需要采取防治措施阻止害虫达到经济危害水平 (Economic injury level, EIL)。之后, 国内外的科学家从不同的角度对经济阈值的概念、数学模型进行了广泛的探讨 (Headley, 1972; Norgaard, 1976, Chiang, 1979; Onstad, 1987, 丁岩钦, 1988; Hutchins *et al.*, 1988; 张青文等, 1988; 盛承发, 1989)。虽然各种经济阈值模型的估算方法不同, 但是其所遵循的基本原理是防治代价等于挽回损失 (郝树广和张孝羲, 1998)。

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0200400); 山东省农业科学院农业科技创新工程 (CXGC2019G01)

**第一作者 First author, E-mail: menxy2000@hotmail.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2019-11-26; 接受日期 Accepted: 2019-12-29

因此, 进行 ET 的定量分析都是基于构建防治挽回作物损失的价值与防治代价之间的关系模型。实际上, 防治代价包括直接代价和间接代价。其中, 直接代价即为防治中的材料、用工及器械成本, 也就是防治费用; 而间接代价就是防治所造成的不利后果, 如环境污染、杀伤天敌、生物多样性降低、害虫抗药性上升、农药残留、危害人体健康等负效益 (盛承发, 1989; Larsen *et al.*, 2017)。间接代价主要表现为生态代价, 其可以通过消除防治措施造成的不利后果而付出的经济代价来估算, 但是与直接代价相比估算难度较大。以此, 目前所提出的农作物、草原、森林害虫的防治经济阈值大部分只包括挽回作物损失的价值和直接代价 (盛承发, 1989), 而没有考虑其防治后所引起的生态代价。

相对于传统农田生态系统的主要功能是农产品供给, 现代农田生态系统除具有巨大的产品服务功能价值外, 还具有巨大的环境服务功能价值和维持区域生态安全价值 (尹飞等, 2006)。因此, 基于挽回作物损失的价值和防治费用的农业害虫防治经济阈值, 往往不考虑害虫防治措施的生态代价, 由此导致经济阈值指标偏低, 防治次数和农药使用量偏多。尤其是随着植保机械化程度提高, 单位面积的害虫防治成本也随之降低, 将进一步降低农业害虫防治经济阈值。而且, 目前害虫防治的经济阈值, 由于对防治生态代价估算不准, 甚至不考虑, 从而对害虫防控的指导作用降低。显然, 仅考虑防治费用的害虫防治经济阈值已经不能满足我国农业高质量发展的要求, 亟需充分考虑包含防治生态代价的新的防治阈值用于指导害虫防治。为此, 本文基于农药生态环境风险提出了充分考虑防治费用和防治生态代价的农业害虫防治生态经济阈值 (Ecological and economic threshold, EET) 概念, 介绍了其定量估算方法, 旨在为现代农业害虫防治决策提供了科学依据。

1 害虫防治生态经济阈值

基于收益与代价相等的基本原理, 将害虫防治生态经济阈值 (Ecological and economic

threshold, EET) 定义为: 需要使用防治措施时的害虫种群密度, 此时由防治费用加上防治生态代价之和构成的防治代价与防治挽回作物损失价值相等。显然, 害虫防治生态经济阈值综合考虑防治费用和生态代价, 因此其阈值 (EET) 指标通常要高于仅考虑防治费用的阈值 (ET) 指标。害虫防治的生态代价要依据防治措施中所用农药的生态风险估算。

2 害虫防治生态经济阈值的估算方法

2.1 害虫防治的生态代价估算

害虫防治生态经济阈值中, 防治代价中的防治费用为防治材料、人工成本和防治机械损耗之和, 相对容易测算; 而生态代价可以利用消除防治措施的不利后果付出的经济代价进行估算, 这些不利后果包括: 环境污染、杀伤天敌、生物多样性降低、害虫抗药性上升、农药残留、危害人体健康等, 构建防治措施与诸多因素的回归模型非常困难。

目前, 国际上常通过统计归纳方法总结不同地区主要生态过程功能与生态系统效益的价值的方法估算生态效益 (Costanzo *et al.*, 1997)。农作物病虫害防治的生态代价主要来自于农药的使用, 害虫防治的环境成本和社会成本与使用的农药种类和用量直接密切相关, 而与防治措施的人工成本、机械损耗关系不大, 因此需要构建防治措施中农药使用与生态代价的关系。农药使用的环境与社会成本越来越受到重视, 我国使用农药防控农作物病虫害的环境成本至少在 39.4-118.7 元/kg (杨普云等, 2019)、社会成本至少在 11.72-87.74 元/kg (杨普云和李春光, 2019)。国外使用农药所产生的环境和社会成本平均为 4-19 美元/kg (Pretty and Bharucha, 2015)。其中, 美国每年使用农药产生的环境和社会代价基本上是农药投入的 2 倍 (Pimental *et al.*, 1992; Pimental, 2005)。因此, 害虫防治的生态代价可以用以下公式估算:

$$EC = P \times \alpha$$

其中, EC (Ecological cost, EC) 表示害虫防治的生态代价, P 表示防治中投入的农药价值, α 表示防治中农药生态风险指数, 是防治的生态代价与投入的农药的比值系数。

2.2 害虫防治生态经济阈值的模型

Chiang (1979) 的 ET 模型是目前较为全面, 应用较多的经济阈值模型:

$$ET = \frac{C \times F}{E \times Y \times H \times D \times S}$$

其中, ET 为经济阈值, C 为防治代价, E 为杀虫效率, Y 为无虫时产量, H 为产品单价, D 为单位害虫量引起的产量损失, S 为害虫种群的自然存活率, F 为社会调节因子。

基于以上模型, 本害虫防治生态经济阈值 (EET) 计算模型为:

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

其中, EET 为生态经济阈值, P 表示防治中投入的农药价值, α 表示农药生态风险指数, L 为防治劳动成本, M 为防治机械损耗成本。

2.3 害虫防治生态经济阈值参数的估算

生态经济阈值模型中, 其参数杀虫效率 (E)、无虫时产量 (Y)、产品单价 (H)、为害虫种群的自然存活率 (S) 都可以通过田间系统观测获得; 单位害虫量引起的产量损失 (D) 可以通过盆栽、罩笼、田间接虫/除虫、人工模拟危害等方法建立害虫密度与产值的关系模型, 计算获得 (盛承发, 1989); 防治用药价值和为防治劳动成本 (L), 防治机械损耗成本 (M) 是防治的直接代价, 容易获得。

α 可综合考虑防治措施中农药种类、用量、对非靶标生物毒性、暴露方式、环境毒理、环境行为等因素, 判断其对生态影响大小进行赋值, α 的取值范围主要在 0-5 之间 (表 1), 当 $\alpha=0$ 时, 表示这次防治的生态代价可以忽略, 当 α 越大则防治的生态代价越大。

3 生态经济阈值的应用前景

传统的害虫防治经济阈值重点考虑防治投

表 1 农药生态风险指数(α)的赋值
Table 1 Index of pesticides ecological risk

农药生态风险指数 (α) Index of pesticides ecological risk (α)	农药生态风险程度 Level of pesticides ecological risk
0	无
1	极低
2	低
3	中等
4	高
5	极高

人和带来的直接经济效益关系, 这两者可以认为是当前效益、局部效益, 而减少害虫防治的生态代价是长远利益、整体利益, 害虫管理者需要当前和长远相结合、局部和整体相结合 (丁岩钦, 1988)。联合国贸发会 2013 年《贸易与环境回顾》报告认为, 发展中国家和发达国家农业发展模式都急需转变: 从“绿色革命”转向“真正的生态集约化”做法。农业管理上需要从线性做法转向整体方法, 农民将不仅是农产品生产者, 也是农业生态系统的管理者, 农民对害虫防治生态经济阈值的接受程度也会越来越高。随着我国经济的飞速发展, 社会对食品安全、生态安全的要求越来越高, 生态文明建设已经深入人心, 客观上有利于生态经济阈值的快速应用。同时, 相关政府部门也需要加强宣传、政策引导, 推进害虫防治生态经济阈值研究和应用。

本文通过对害虫防治经济阈值的分析, 根据国内外对农药生态效应定量评估最新进展, 提出了充分考虑防治费用和防治生态代价的农业害虫防治生态经济阈值的概念, 并结合经济学和生态学的原理, 提出了基于农药风险指数的简便易行的数学模型和估算方法, 以满足我国现代农业高质量发展对农业害虫防治减少生态代价的要求。

参考文献 (References)

- Chiang HC, 1979. A general model of the economic threshold levels of pest population. *FAO Plant Protection Bulletin*, 273(3): 71-73.
- Costanzo R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton

- P, van den Belt M, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(15): 253–260.
- Ding YQ, 1988. The concept on the economic threshold of pest population and its mathematical model. *Zoological Research*, 9(2): 151–160. [丁岩钦, 1988. 害虫种群经济阈值的概念及其数学模型. *动物学研究*, 9(2): 151–160.]
- Hao SG, Zhang XX, 1998. A further discussion on the economic threshold in IPM. *Chinese Journal of Ecology*, 17(2): 71–77. [郝树广, 张孝羲, 1998. 对害虫经济阈值理论的再思考. *生态学杂志*, 17(2): 71–77.]
- Headley JC, 1972. Defining the Economic Threshold in Pest Control Strategies for the Future. Washington D. C.: National Academy Science. 100–108.
- Hutchins SH, Higley LG, Pedigo LP, 1988. Injury equivalency as a basis for developing multiple species economic injury levels. *Journal of Economic Entomology*, 81(1): 1–8.
- Kogan M, 1998. Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43: 243–270.
- Larsen AE, Gaines SD, Deschênes O, 2017. Agricultural pesticide use and adverse birth outcomes in the San Joaquin Valley of California. *Nature Communications*, 8(1): 302.
- Norgaard RB, 1976. The economics of improving pesticide use. *Annual Review of Entomology*, 21: 45–60.
- Onstad DW, 1987. Calculation of economic-injury levels and economic thresholds for pest management. *Journal of Economic Entomology*, 80(2): 297–303.
- 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.
- Pimentel D, Acquay H, Biltonen M, Rice P, Silva M, Nelson J, Lipner V, Giordano S, Horowitz A, D'Amore M, 1992. Assessment of environmental and economic impacts of pesticide use//Pimentel D, Lehman H (eds.). *The Pesticide Question*. Boston, MA: Springer. 47–84.
- Pretty J, Bharucha ZP, 2015. Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects*, 6(1): 152–182.
- Sheng CF, 1989. An overview on the concept of economic threshold. *Acta Entomologica Sinica*, 32(4): 492–500. [盛承发, 1989. 害虫经济阈值的研究进展. *昆虫学报*, 32(4): 492–500.]
- Stern VM, Smith RF, van den Bosch R, 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted aphid. *Hilgardia*, 29(2): 81–101.
- Yin F, Mao RZ, Fu BJ, Liu GH, 2006. Farmland ecosystem service and its formation mechanism. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(5): 929–934. [尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 刘国华, 2006. 农田生态系统服务功能及其形成机制. *应用生态学报*, 17(5): 929–934.]
- Yang PY, Li P, Ren BY, Li CG, 2019. Analysis on environmental costs of crop pest chemical management technologies in China. *China Plant Protection*, 39(6): 27–30, 43. [杨普云, 李萍, 任彬元, 李春广, 2019. 我国农作物病虫害化学防控技术的环境成本分析. *中国植保导刊*, 39(6): 27–30, 43.]
- Yang PY, Li CG, 2019. Social costs analysis of chemical management technologies on crop pests in China. *China Plant Protection*, 39(4): 21–25, 69. [杨普云, 李春广, 2019. 我国农作物病虫害化学防控技术的社会成本分析. *中国植保导刊*, 39(4): 21–25, 69.]
- Zhang QW, Yang QH, Zhou MX, 1988. On the economic threshold and economic injury level of pest. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 14(4): 408–413. [张青文, 杨奇华, 谢以铨, 周明群, 1988. 关于害虫的经济阈值与经济为害水平. *北京农业大学学报*, 14(4): 408–413.]