



有害生物综合防治的生态经济学效益 定量评估方法*

张晴晴^{1,2**} 欧阳芳¹ 戈峰^{1,2***}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 生物互作卓越创新中心, 北京 100049)

摘要 【目的】如何客观、定量评估有害生物综合防治的生态经济学效益是有效开展有害生物生态调控的基础。但目前评价有害生物综合防治的效益时,更多的是考虑防治的经济效益,而缺乏有关防治带来的生态学效益的定量评估方法。【方法】本文基于市场价值法,给出了定量评估有害生物综合防治、化学防治的生态经济学效益的方法,并以此方法定量评估了1987-2016年30年中国粮食作物病虫害的损失情况、化学防治及劳动力投入、生态负效益,计算出粮食作物病虫害防治的生态经济学效益。【结果】有害生物综合防治的生态经济学效益主要与防治效益、投入成本及对生态产生的负效益有关。1987-2016年的粮食作物病虫害防治的生态经济学效益为-250.67-180.85亿元,平均生态经济学效益为-3.81亿元。【结论】我国粮食作物病虫害综合防治生态经济学效益较低,防治时需要充分考虑其带来的生态负效益;本文提出的有害生物综合防治的生态经济学效益定量评估方法,可为客观、准确评估病虫害综合防治提供科学依据。
关键词 生态经济学效益;定量评估;有害生物;综合防治;粮食作物病虫害

Quantitative evaluation and case analysis of the economic and ecological benefits of integrated pest control

ZHANG Qing-Qing^{1,2**} OUYANG Fang¹ GE Feng^{1,2***}

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. CAS Center for Excellence in Biotic Interactions, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Objectives] Evaluating both the ecological and economic benefits of integrated pest control (IPM) is essential to comparing its performance to other forms of pest control. However, the economic benefits of IPM are always given greater weight than its ecological benefits. [Methods] Based on the market value method, we propose a new method that can quantitatively evaluate the ecological and economic benefits of both integrated and purely chemical pest control, and use this method to compare the relative benefits of IPM and chemical control in the 30 years from 1987 to 2016. [Results] The economic and ecological benefits of IPM are mainly related to control benefits, input costs and negative benefits to ecology. The economic and ecological benefits of grain pest control were -25.07 billion yuan to 18.09 billion yuan from 1987 to 2016, with average economic and ecological benefits of -0.381 billion yuan. [Conclusion] The ecological and economic benefit of IPM for the prevention and control of grain pests in China has been relatively low, and the negative ecological benefits have not been fully taken into account. We propose a quantitative method for evaluating the economic and ecological benefits of IPM which provides a scientific basis for the objective and accurate evaluation of this form of pest control.

Key words economic and ecological benefits; quantitative assessment; pests; integrated control; pests and diseases of grain

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFD0200400); 国家自然科学基金面上项目 (31572059)

**第一作者 First author, E-mail: sybil321@163.com

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

收稿日期 Received: 2019-11-10; 接受日期 Accepted: 2019-12-23

农田生态系统提供粮食作物、棉麻、油料及水果蔬菜等人类赖以生存的农作物产品, 其中粮食作物包括水稻、小麦、玉米、大豆、马铃薯及其他粮食作物。然而, 在农作物的整个生长发育及产品储藏阶段, 均有可能受到有害生物的危害。有害生物主要包括有害昆虫(害虫)、有害病原菌(病菌)、有害啮齿动物(害鼠)、有害杂草(杂草)等(欧阳芳等, 2017), 有害生物既可直接取食和危害农作物, 也可以间接传播病毒、病原微生物或者与农作物竞争阳光、水分、营养物质等减少农作物产量, 对农田生态系统中农作物造成的危害极大。为了保障粮食安全, 人类采用化学防治、生物防治和物理防治等方法防治有害生物。而目前主要以化学防治措施为主, 这种长期使用农药等化学试剂, 除控制有害生物外, 还会带来有害生物抗性增加、生物多样性减少、威胁人类健康及降低出生率等生态负面影响(Currie *et al.*, 2015; Arceo *et al.*, 2016; Larsen *et al.*, 2017)。因此, 如何客观、定量评估有害生物综合防治的生态经济学效益十分重要。

目前评价有害生物综合防治的效益时, 更多的是考虑防治的经济效益, 而有关防治带来的生态学效益则没有定量评价的方法。事实上, 在进行农田生态系统有害生物综合防治时, 除了人类最关注的经济效益外, 也应该考虑对生态环境造成的影响, 提高对生态经济协调发展规律的认识, 从而促进农业可持续发展(王效科等, 2019)。但现实中, 谈及生态效益时, 通常用“生态效益巨大, 无法估计”来描述。其实, 生态效益也有可量化的评估方法。其中, 市场价值法被认为是当前用于评估生态系统服务价值的一种重要的手段, 它是以市场价格对生态系统中具有实际市场的产品和服务进行直接评估, 包括市场价格法、费用支出法等(Odum, 1988; Costanza *et al.*, 1997; Costanza *et al.*, 2014; 王小莉等, 2018), 适合于有实际交易市场的生态环境效益价值核算。

基于此, 本文运用市场价值法, 提出了有害生物综合防治的生态经济学效益评估方案, 发展了定量评估有害生物综合防治的生态经济学效益的方法, 以 1987-2016 年长达 30 年我国粮食作物的病虫害防治为案例(中国统计年鉴,

1987-2016; 全国植保专业统计资料, 1987-2016; 中国化学工业年鉴, 1987-2016)进行分析, 为科学合理定量评估有害生物综合防治的生态经济学效益提供科学依据。

1 有害生物综合防治的生态经济学效益的评估方案

根据有害生物综合防治的生态经济学效益的形成本质和提出的目的, 可以定义为: 在农田生态系统中, 对害虫、有害病原菌、有害啮齿动物、有害杂草进行化学防治、生物防治及物理防治等综合防治所产生的价值及对生态环境产生的影响之和。例如评价农田生态系统中粮食作物病虫害综合防治的生态经济学效益时, 常常要考虑水稻、小麦、玉米、大豆、马铃薯及其他粮食作物产生的经济价值, 也需要考虑化学防治对生态环境产生的负面影响, 因此可以以下的图 1 所示方案来估算农田生态系统中有害生物(病虫害)防治的生态经济学效益。

2 粮食作物有害生物综合防治的生态经济学效益评估

2.1 病虫害的损失情况

定量评价农作物的损失量是评估综合防治的生态经济学效益的基础。常用的评价农作物损失情况的指标是挽回损失率、实际损失率和潜在损失率。Oerke 等(1994)提出了评价农作物损失情况指标的概念, 挽回损失率强调在没有进行任何防治措施(化学防治、生物防治及物理防治等), 其他生产要素(品种、施肥量、灌溉次数等)相似的情况下, 病虫害鼠害等给农作物带来的损失率; 而实际损失率则指已经进行防治措施后产生的作物损失率; 潜在损失率指没有进行任何防治措施与进行防治后的农作物损失率之和。

基于 1987-2016 年《全国植保专业统计资料》和 1987-2016 年《中国农业统计年鉴》的统计指标, 提出计算有害生物为害造成的作物潜在损失率、实际损失率及挽回损失率的方法:

$$P_{ij} = (GL_{ij} + RL_i) / GT_{ij}$$

其中, P_{ij} 表示潜在损失率(%), GL_{ij} 表示实

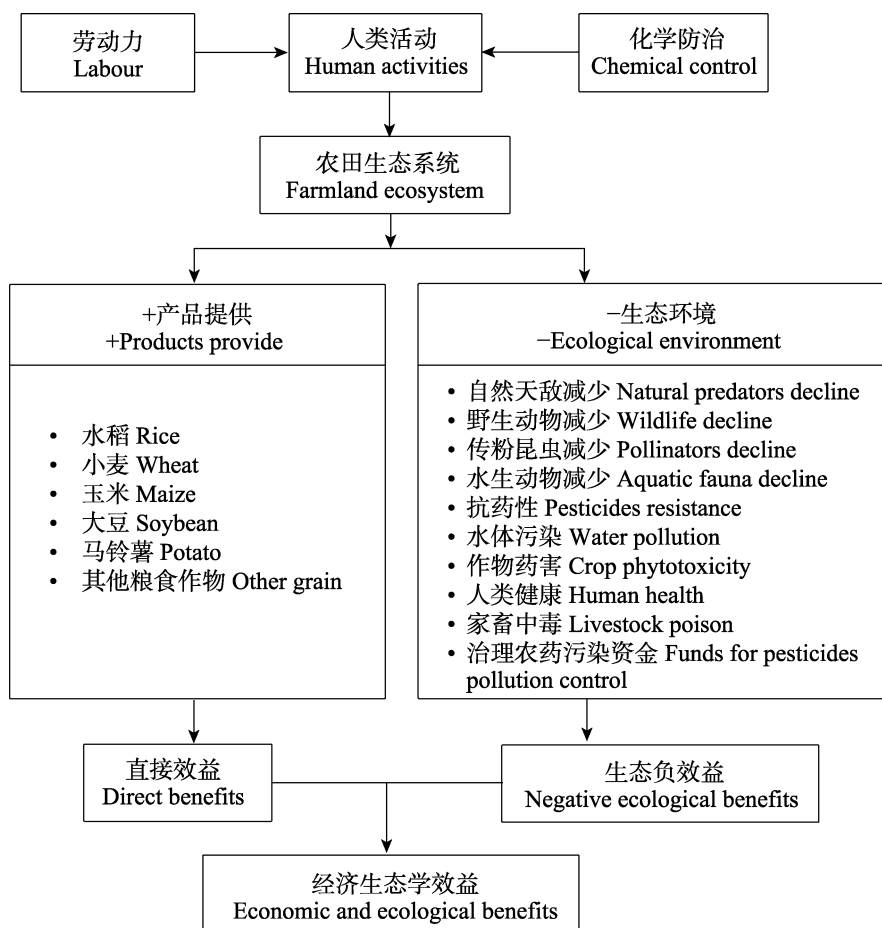


图 1 农田生态系统中有害生物（病虫害）防治的生态经济学效益评估方案

Fig. 1 Evaluation of ecological economic benefits of pest (plant diseases and insect pests) control in farmland ecosystems

际损失量（万吨）， RL_{ij} 表示挽回损失量（万吨）， GT_{ij} 表示总产量（万吨）， i 表示时间（年）， j 表示某类作物。

$$A_{ij} = GL_{ij} / GT_{ij}$$

其中， A_{ij} 表示实际损失率（%）， GL_{ij} 表示实际损失量（万吨）， GT_{ij} 表示总产量（万吨）， i 表示时间（年）， j 表示某类作物。

$$R_{ij} = P_{ij} - A_{ij}$$

其中， R_{ij} 表示挽回损失率（%）， P_{ij} 表示潜在损失率（%）， A_{ij} 表示实际损失率（%）， i 表示时间（年）， j 表示某类作物。

依据 1987-2016 年 30 年间《全国植保专业统计资料》、《中国农业统计年鉴》上粮食作物的实际损失、挽回损失及粮食总产量的数据，计算结果显示：我国 1987-2016 年 30 年间粮食作物的潜在损失率为 7.51%-17.56%，平均潜在损失率为 12.65%；粮食作物的实际损失率为 2.00%-

3.71%，平均实际损失率为 2.57%；粮食作物的挽回损失率为 5.41%-14.56%，平均挽回损失率为 10.08%。总体来看，有害生物造成的粮食作物的潜在损失率和挽回损失率呈逐年上升的趋势，其中粮食作物的实际损失率 1987-1995 年波动较大，1995-2016 年趋于平稳。

2.2 化学防治的作用分析

化学防治是目前防治有害生物的主要手段，通过《全国植保专业统计资料》、《中国农业统计年鉴》的统计数据显示，1987 年至 2016 年 30 年我国化学防治的防治面积占防治面积的比例可达 90%左右。在进行化学防治分析时，通常涉及防治效益、防治成本和劳动力投入成本 3 个方面。

2.2.1 防治效益 防治效益 PB_{ij} 指经过化学防治、生物防治及物理防治等防治措施挽回的农作物损失量，根据农作物当时的市场价格换算成的

价值。

$$PB_{ij} = RL_{ij} \times AP_{ij}$$

其中, i 表示时间 (年), j 表示某类作物, PB_{ij} 表示防治效益 (亿元), RL_{ij} 表示挽回损失量 (万吨), AP_{ij} 表示 j 作物在 i 年的价格 (亿元/万吨)。

从 1987-2016 年间《全国植保专业统计资料》、《中国农业统计年鉴》数据分析表明, 每年因有害生物造成的潜在损失逐年上升, 如不进行防治, 最高可造成 9 879.09 万吨粮食损失。其中, 1987-2016 年, 由于采取防治措施, 我国粮食作物挽回损失为 2 133-8 162 万吨, 平均挽回损失

约 4 771 万吨 (图 3)。

从 1987-2016 年中国粮食作物病虫害防治效益图 (图 4) 可以看出, 1987-2016 年 30 年间我国粮食作物的有害生物呈不端上升趋势, 平均防治效益为 731.21 亿元, 其中最高的防治效益为 2012 年可达 1 986.86 亿元。

2.2.2 防治成本 目前有害生物的防治方法主要以化学防治为主, 且化学防治的方法又以喷洒农药为主, 因此防治成本为农药投入的价值。

$$PC_{ij} = PQ_{ij} \times PP_i$$

其中, i 表示时间 (年), j 表示某类作物, PC_{ij} 表示 i 年 j 作物防治成本 (亿元), PQ_{ij} 表示

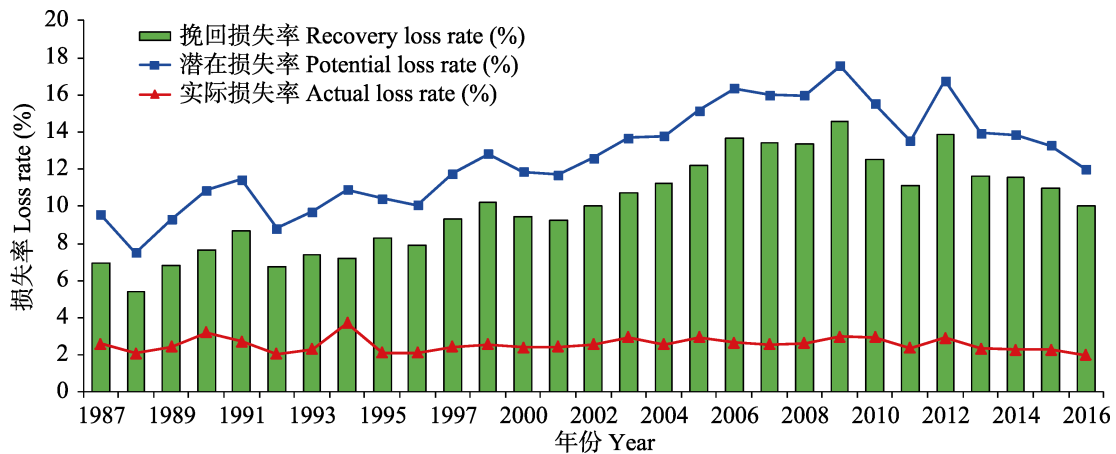


图 2 1987-2016 年 30 年我国粮食作物损失率
Fig. 2 Loss rate of grain from 1987 to 2016

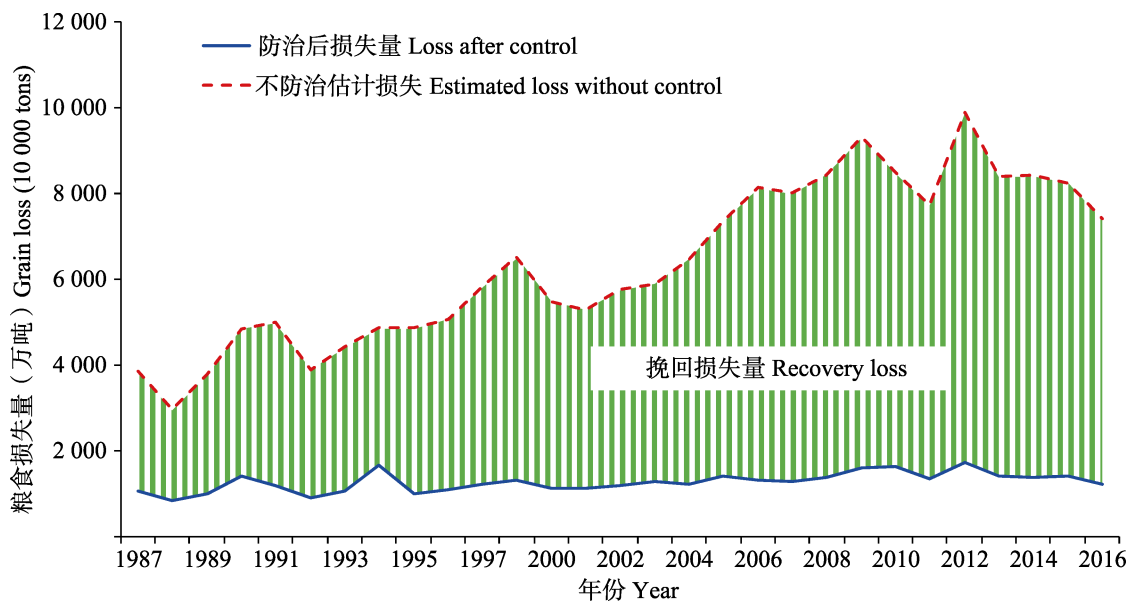


图 3 1987-2016 年中国粮食作物病虫害防治挽回损失量
Fig. 3 Recover loss of pests and diseases control of grain in China from 1987 to 2016

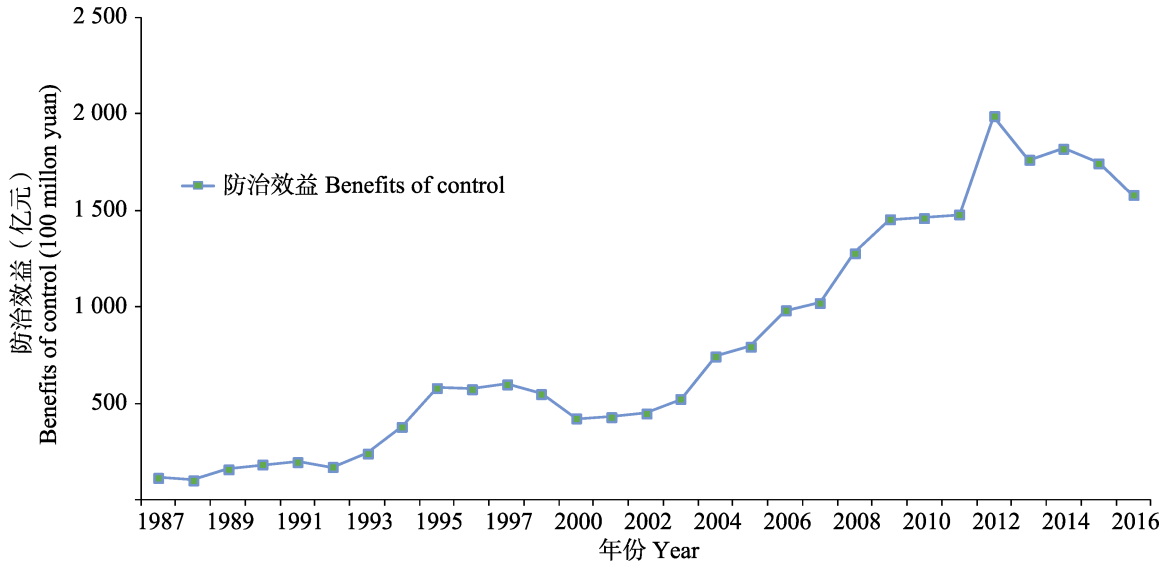


图 4 1987-2016 年中国粮食作物病虫害防治效益图
 Fig. 4 Benefits of pests and diseases control of grain in China from 1987 to 2016

j 作物的农药使用量 (万吨), PP_i 表示 i 年的农药价格 (亿元/万吨)。

从图 5 中 1987-2016 年 30 年间《中国农业统计年鉴》及《中国化学工业年鉴》数据表明, 我国粮食作物农药使用量平均每年为 121.50 万吨, 农药价格平均每吨为 29 082.99 元, 计算得到平均防治成本为 380.55 亿元。其中, 防治成本最高的年份为 2011 年, 高达 815.94 亿元。

2.2.3 劳动力投入成本 劳动力成本受经济和

社会发展的影响较大, 劳动力的投入成本主要与防治面积和劳动力价值有关。

$$L_{ij} = PA_{ij} \times AS_i$$

其中, i 表示时间 (年), j 表示某类作物, L_{ij} 表示 i 年 j 作物的劳动力投入成本 (亿元), PA_{ij} 表示 i 年 j 作物的防治面积 (hm^2), AS_i 表示 i 年的防治价格 (亿元/ hm^2), 防治价格可通过人均收入与每人每天的防治面积来计算。

依据 1987-2016 年 30 年间《全国植保专业

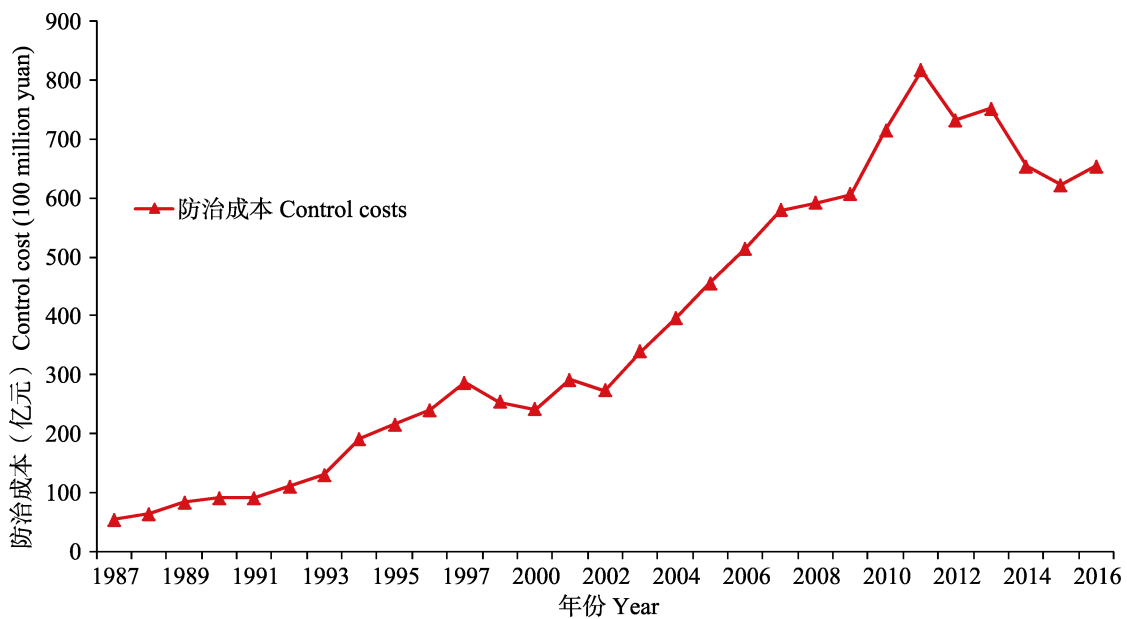


图 5 1987-2016 年粮食作物病虫害防治成本 (亿元)
 Fig. 5 Control costs of pests and diseases control of grain in China from 1987 to 2016

统计资料》、《中国农业统计年鉴》数据计算结果表明, 粮食作物的平均防治面积为 22 784 万 hm^2 , 而中国人民人均收入由 1987 年的 4.00 元/d 增长至 2016 年的 185.12 元/d, 由此估算劳动投入成本平均约为 238.92 亿元, 以 2016 年的劳动投入最高 (图 6)。

2.3 化学防治的生态负效益

化学防治取得经济效益的同时, 也会给生态环境带来负面的影响。在评价生态效益时, 国际上通常的做法是通过统计归纳总结不同地区主要生态过程功能与生态系统效益的价值 (Costanza *et al.*, 1997; 谢高地等, 2003)。Pimentel 等 (2014) 对农药所引起的环境与社会代价, 如自然天敌、野生动物、传粉昆虫及水生动物的减少, 抗药性、水体污染、作物药害、人类健康、家畜中毒及治理农药污染所需资金等的增加进行了定量评估。结果表明农药的使用引起社会与环境的总代价高达 96 亿美元, 相当于美国化学农药防治效益 400 亿美元的四分之一。即生态化学防治产生的生态学负效益相当于化学防治效益的四分之一。

$$NC_i = -\frac{1}{4} \times PB_{ij}$$

其中, i 表示时间 (年), j 表示某类作物, NC_i 表示 i 年化学防治的生态负效益 (亿元), PB_{ij}

表示防治效益 (亿元)。

由此, 得出我国 1987-2016 年 30 年来因化学防治产生的生态负效益共计为 -5 951.39 亿元, 其中以 2012 年化学防治产生的生态负效益达到最高 -496.71 亿元。

2.4 综合防治的生态经济学效益

综合防治的生态经济学效益主要与防治效益、投入成本及对生态产生的负效益有关。可用以下模型表示:

$$ENC_{ij} = PB_{ij} - L_{ij} - PC_{ij} + NC_i$$

其中, i 表示时间 (年), j 表示某类作物, ENC_{ij} 表示 i 年对 j 作物进行综合防治的生态经济学效益 (亿元), PB_{ij} 表示防治效益 (亿元), L_{ij} 表示 i 年 j 作物的劳动力投入成本 (亿元), PC_{ij} 表示 i 年 j 作物防治成本 (亿元), NC_i 表示 i 年化学防治的生态负效益 (亿元)。

依据《全国植保专业统计资料》、《中国农业统计年鉴》及《中国化学工业年鉴》, 对我国 1987-2016 年 30 年的粮食作物病虫害防治的生态经济效益分析 (图 7) 表明, 我国粮食作物病虫害防治的生态经济学效益为 -250.67-180.85 亿元, 粮食作物病虫害防治的平均生态经济学效益为 -3.81 亿元。

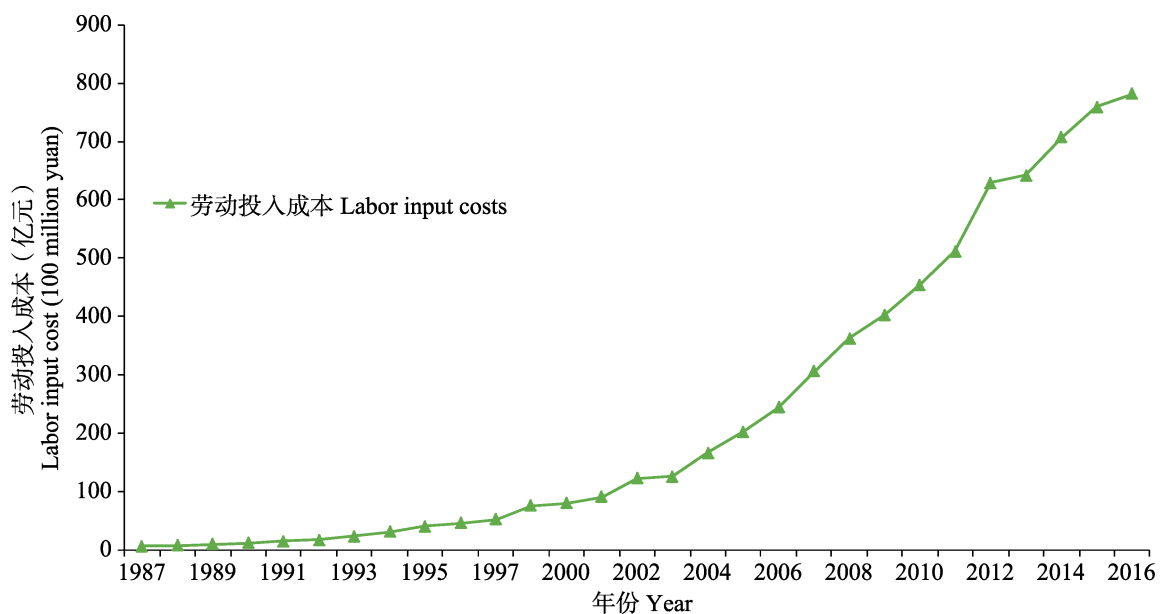


图 6 1987-2016 年中国粮食作物病虫害防治劳动投入成本

Fig. 6 Labor input costs of pests and diseases control of grain in China from 1987 to 2016

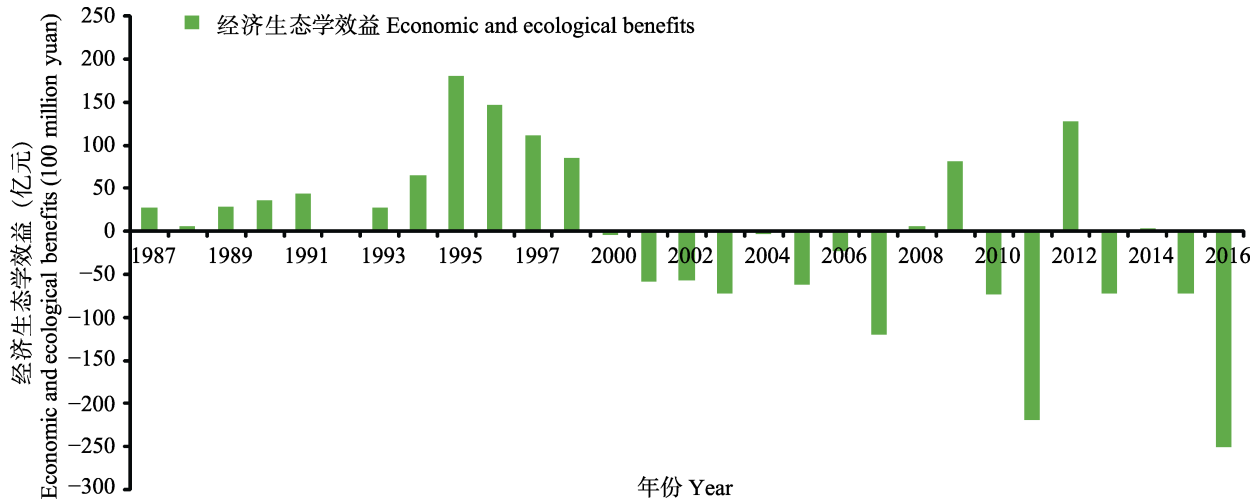


图 7 1987-2016 年中国粮食作物病虫害防治的生态经济学效益

Fig. 7 Economic and ecological benefits of pests and diseases control of grain in China from 1987 to 2016

3 讨论

有害生物综合防治在农业生产和可持续发展中起着非常重要的作用。但过去只考虑防治后农作物产量、质量等经济效益指标，忽视了防治后对生态环境的负作用，显然是不全面的，也不科学的。即使谈及综合防治的生态效益，也是用“生态效益很大、无法估计”来搪塞。事实上，生态效益也是可以定量评估的。

本文基于市场价值法，首次将有害生物综合防治的经济效益与生态效益结合在一起，提出了有害生物综合防治的生态经济学效益估计的定量计算方法。

由于化学防治在取得经济效益的同时，还将带来生态的负效益。因此，有害生物化学防治的生态学效益为：

$$NC_i = -\frac{1}{4} \times RL_{ij} \times AP_{ij} = -\frac{1}{4} \times PB_{ij}$$

其中， i 表示时间（年）， j 表示某类作物， NC_i 表示 i 年化学防治的生态负效益（亿元）， RL_{ij} 表示挽回损失量（万吨）， AP_{ij} 表示 j 作物在 i 年的价格（亿元/万吨）， PB_{ij} 表示防治效益（亿元）。

而综合防治在取得经济效益的同时，同时也减少了化学防治所带来生态的负效益；因此，有害生物综合防治的生态经济学效益为：

$$ENC_{ij} = PB_{ij} - L_{ij} - PC_{ij} - \frac{1}{4} \times PB_{ij} = PB_{ij} - L_{ij} - PC_{ij} + NC_i$$

其中， i 表示时间（年）， j 表示某类作物， ENC_{ij} 表示 i 年对 j 作物进行综合防治的生态经济学效益（亿元）， PB_{ij} 表示防治效益（亿元）， L_{ij} 表示 i 年 j 作物的劳动力投入成本（亿元）， PC_{ij} 表示 i 年 j 作物防治成本（亿元）， NC_i 表示 i 年化学防治的生态负效益（亿元）。

本文通过对我国 1987-2016 年 30 年间粮食作物病虫害防治的生态经济效益分析表明，我国粮食作物病虫害防治的生态经济学效益范围为 -250.67-180.85 亿元，粮食作物病虫害防治的生态经济学效益波动较大，其中，2016 年最低为 -250.67 亿元。从 30 年（1987-2016 年）来的平均生态经济学效益（-3.81 亿元）来看，整体水平较低。造成粮食作物病虫害的生态经济学效益较低的主要原因为片面的追求经济效益，大量投入化学农药，忽略了化学防治所引起的生态负效益。本研究所提出的有害生物综合防治生态经济学效益定量评估方法，不仅仅可为客观、准确评估病虫害综合防治提供科学依据；而且还提示，在进行害虫防治、保证经济效益的同时，还必须重视防治所引起的生态正与负效益。

参考文献 (References)

Arceo E, Hanna R, Oliva P, 2016. Does the effect of pollution on infant mortality differ between developing and developed countries? Evidence from Mexico city. *The Economic Journal*, 126(591): 257-280.

- Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, V. O'Neill R, Paruelo J, G. Raskin R, Sutton P, van den Belt MC, Costanza R, d'Arge R, Groot RD, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630): 253–260.
- Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK, Costanza R, de Groot R, Sutton P, 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1): 152–158.
- Currie J, Davis L, Greenstone M, Walker R, 2015. Environmental health risks and housing values: Evidence from 1,600 toxic plant openings and closings. *Review of Economic Studies*, 105: 678–709.
- 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.
- National Bureau of Statistics, 1987-2016. China Chemical Industry Yearbook. Beijing: China Statistics Press. 21–119. [国家统计局, 1987-2016. 中国化学工业年鉴. 北京: 中国统计出版社. 21–119.]
- National Bureau of Statistics, 1987-2016. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press. 12–89. [国家统计局, 1987-2016. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社. 12–89.]
- National Bureau of Statistics, 1987-2016. China Agricultural Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press. 81–169. [国家统计局, 1987-2016. 中国农业统计年鉴. 北京: 中国统计出版社. 81–169.]
- Odum HT, 1988. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 242(4882): 1132–1139.
- Oerke EC, Dehne HW, Schonbeck F, Weber A, 1994. Crop production and crop protection-estimated losses in major food and cash crops. *Agricultural Systems*, 51(4): 493–495.
- Ouyang F, Ge F, Xu WH, Men XY, Zhang YS, Chen FJ, Li J, Liang YY, Yang F, Zeng JP, 2017. Assessment of Biological Disasters in China. Beijing: Science Press. 1–2. [欧阳芳, 戈峰, 徐卫华, 门兴元, 张永生, 陈法军, 李姣, 梁玉勇, 杨飞, 曾菊平, 2017. 中国生物灾害评估. 北京: 科学出版社. 1–2.]
- Pimentel D, Burgess M, 2014. Integrated pest management. New York: Springer. 47–71.
- Schlenker W, Walker R, 2011. Airports, air pollution and contemporaneous health. *Review of Economic Studies*, 83: 768–809.
- Statistics of National Plant Protection Major, 1987-2016. Beijing: China Agricultural Press. 8–39. [全国植保专业统计资料, 1987-2016. 北京: 中国农业出版社. 8–39.]
- Wang XK, Yang N, Wu F, Ren YF, Wang SY, Bo GM, Jiang GM, Wang YK, Sun YJ, Zhang L, Ouyang ZY, 2019. Ecological benefit and its characteristics. *Acta Ecologica Sinica*, 39(15): 5433–5441. [王效科, 杨宁, 吴凡, 任玉芬, 王思远, 薄乖民, 蒋高明, 王玉宽, 孙玉军, 张路, 欧阳志云, 2019. 生态效益及其特性. 生态学报, 39(15): 5433–5441.]
- Wang XL, Gao ZB, Su J, Chen ZF, Zheng MX, Sun YY, Ji DF, 2018. Assessment methods of regional ecosystem service value and a case study of Dongjiang River basin. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 8(2): 212–220. [王小莉, 高振斌, 苏婧, 等陈志凡, 郑明霞, 孙源媛, 纪丹凤, 2018. 区域生态系统服务价值评估方法比较与案例分析. 环境工程技术学报, 8(2): 212–220.]
- Xie GD, Lu CX, Leng YF, Zheng D, Li SC, 2003. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of the Natural Resources*, 18(2): 189–196. [谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成, 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 18(2): 189–196.]