应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2020, 57(1): 10–19. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2020.002

论害虫生态调控策略与技术*

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 害虫生态调控作为害虫管理的一种“高级”策略，主要基于“预防为主，生态优先，整合治理，精准施策”的原则，通过调节与控制两个相辅相成的过程，整合包括生态调控技术、现代生物技术、农业防治、生物防治、理化诱控技术以及合理的化学防治等手段，构建“经济、简便、有效”的生态工程技术体系，将害虫控制在生态经济阈值水平之下。同时，它也是害虫管理的一种技术，包括景观生态设计、功能植物种植、推拉技术、生态自杀技术、作物合理布局、健康作物环境调控技术等措施。本文重点阐明了作为害虫管理策略与害虫管理技术“二重性”的害虫生态调控概念，明确了害虫生态调控的 4 项基本原理、6 大独特技术和 4 个指导思想，比较了害虫生态调控策略与害虫综合治理策略的特征，解析了害虫生态调控技术与农业防治、生物防治的区别和联系，指出了未来害虫生态调控发展的趋势。

关键词 害虫生态调控；害虫综合管理；技术；策略；特征

The ecological regulation and management of pests

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 To reduce the risk from pesticides to humans and the environment, many growers have switched from conventional pest control methods to the ecological regulation and management of pests (ERMP). An "advanced" kind of integrated pest management (IPM), ERMP places strong emphasis on the crop protection principle of " prevention first, making ecology a priority, using integrated management and precise implementation". The Implementation of ERMP depends on integrating all available management methods, including ecological tactics, agricultural control, biological control, physical control, modern biotechnology and reasonable chemical control, to keep pests below the eco-economic threshold level. Furthermore, ERMP is also a kind of pest management technology, which makes use of habitat manipulation, functional plant, push-pull, ecological suicide, crop ratio and crop health. This paper presents the conceptual framework, four fundamental principles, six unique tactics and four guidelines, of the ERMP strategy, and describes the relationship between strategy and technology in ERMP. It is important to note that ERMP and IPM are not mutually exclusive; ERMP is a subset of IPM. The development of more reliable ERMP practices should allow growers to achieve the more economic, ecological and social benefits.

Key words ecological regulation and management of pests (ERMP); integrated pest management (IPM); strategy; technology; characteristics

面对化学农药滥用引起的“3S”（抗药性 Resistance，再增猖獗 Resurgence 和农药残留 Residue）问题，以及可持续发展的需要，以生态学为基础的害虫综合治理（IPM）应运而生（Kogan，1998）。基于此，戈峰（1998）提出了害虫生态调控（Ecological regulation and management of pests，ERMP）的概念；之后，又进一步发展了害虫区域性生态调控（AW-ERMP）理论（戈峰，2001）

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划重点专项（2017YFD0200400）

**第一作者 First author，E-mail：gef@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2019-12-01；接受日期 Accepted：2019-12-29

和基于生态服务功能的农田景观昆虫生态调控（ES-ERMP）思想（戈峰等，2014）。那么，什么是害虫生态调控？它的理论与技术的支撑是什么？与现在的生物防治、综合治理又有什么区别？如何开展害虫生态调控？为此，本文将重点论述害虫生态调控的定义、策略、指导思想、理论与技术及其实践，解析作为害虫管理策略与害虫管理技术“二重性”的害虫生态调控特征，为有效开展害虫生态调控提供方法与技术支撑。

1　害虫生态调控是基于生态学基础的害虫管理策略

1.1　害虫生态调控定义

害虫综合治理（IPM）本身就是以生态学为基础的害虫防治（Kogan，1998；Ehler，2006）。但直到 1981 年才明确提出“基于生态的害虫防治策略”（Ecologically-based pest management，EBPM）的概念（Flint and Van den Bouch，1981；Altieri *et al.*，1983），至 1994 年美国国家科学研究委员会（NRC）（1994）进一步指出以生态为基础的害虫治理（EBPM）是未来害虫防治发展的方向，并于 1995 年对害虫生态管理（Ecological pest management，EPM）的理论与方法进行了系统的探讨（Tshernshev，1995）。之后，欧盟和美国分别制定相应的法规与条例，鼓励生产者使用以生态为基础的害虫治理策略与技术，并取得了很好的效果（Altieri and Nicholls，2003；Wilson and Daane，2017）。

我国学者丁岩钦（1993）、戈峰（1998，2001）、盛承发等（2002）进一步对生态控制、生态调控、生态防治等若干基本概念与方法进行了讨论。而且也开展了一系列以生态为基础的害虫治理实践，并取得了很好的经济与生态效益（戈峰，1998；陆宴辉等；2017；萧玉涛等，2019；徐红星等，2019）。

尽管有关以生态为基础的害虫治理（EBPM）的名字有所不同（如生态控制、生态调控、生态防治、生态治理等），但我们认为使用害虫生态调控这个名字，更能体现未来以生态为基础的害虫治理含义。根据国内外害虫管理发展的趋势，以及害虫生态调控的实践，我们将害虫生态调控（Ecological regulation and management of pests，ERMP）定义为：害虫生态调控是害虫管理的一种策略，它基于“预防为主，生态优先，整合治理，精准施策”的原则，强调调节与控制两个过程相辅相成，从农田景观生态系统中“作物-害虫-天敌及其周围环境”相互作用关系出发，充分考虑到昆虫的生物控害功能、传粉功能和分解功能，在充分发挥天敌的控害、作物的抗性以及创造不利于害虫而有利于天敌及作物生长的环境基础上，整合包括生态调控技术、农业防治、生物防治、理化诱控、现代生物技术和合理的化学防治等手段，构建“经济、简便、有效”的生态技术体系，将害虫控制在生态经济阈值水平之下，达到经济可行、生态可持续、社会可接受的目的。

由此可见，从名字上来看，害虫生态“调控”包括了“调（节）”和“控（制）”两个内涵，其中“控制”是将害虫迅速控制在平衡密度之下；“调节”是将害虫持续维持在低平衡密度之下，二者相辅相成。因此，它比单独使用生态控制、生态防治、生态治理等概念更为贴切，更能体现了害虫生态调控的实质。

1.2　害虫生态调控策略

显然，害虫生态调控只是害虫管理中的一种策略，是基于生态学为基础的害虫管理策略。它本着“预防为主，生态优先，整合治理，精准施策”的原则，强调的是从农田景观生态系统中作物-害虫-天敌及其周围环境相互作用关系出发，而不是单纯针对靶标害虫或单一农田；充分考虑农田景观中昆虫的生物控害功能、传粉功能和分解功能，而不仅仅是害虫以及害虫防治；通过生态因素的调节，也包括非生态因子的合理控制，充分发挥生态系统中生物与非生物的调节与控制因素的功能，既考虑到景观生态设计、作物合理布局、功能植物种植、推拉技术、生态自杀技术、健康作物环境调控技术等生态调控技术，还要考虑到传统的农业防治、生物防治、理化诱控；既充分利用现代生物技术（如基因编辑、RNAi 干涉、转基因作物、昆虫性信息素、生物农药等），

还允许适当使用低毒低残留的选择性化学农药；从而整合成为“经济、简便、有效”的生态工程技术体系；目标是将害虫危害控制在生态经济阈值而不是经济阈值水平之下；目的不仅仅是经济效益，还包括生态效益和社会效益，对人类、环境无负影响。

2 害虫生态调控特征

2.1 害虫生态调控过程

害虫生态调控中的调控实际包括两个部分，即调节（Regulation）和控制（Management）。所谓调节是发挥农田景观生态系统内部的生物因素，通过作物-害虫-天敌食物网之间的相互作用，使害虫种群始终围绕着某一低的平衡密度波动，它是生物密度制约因子作用的结果；所谓控制是发挥农田景观系统外的生物因素与非生物因素作用，通过引进新的有益生物控害因子（如天敌、Bt、NPV、功能植物）、采用适当的措施（如性引诱剂、某些选择性杀虫剂）、改变现有的生态系统结构（如间套作、作物布局、非作物生境）等，使害虫种群降至某一平衡密度之下。它是人为的生物密度制约因子与非生物密度因子作用的结果（戈峰，2008）。

由于害虫通常是暴发性的，一旦暴发极容易引起作物生长发育受到危害。因此，调节与控制二者相辅相成。没有控制作用，害虫种群不可能尽快地下降到生态经济允许水平（生态经济阈值）之下；反之，没有调节作用，害虫种群不可能持续地维持在低平衡密度下波动。这二者（内因与外因）必须有效地结合起来。如果片面强调控制（如目前的化学防治）易使害虫种群激烈波动，易引起害虫再猖獗；片面强调调节（如在某些农田生态系统不防治区内）易使害虫种群上升到高密度为害，造成农作物损失（图 1）。

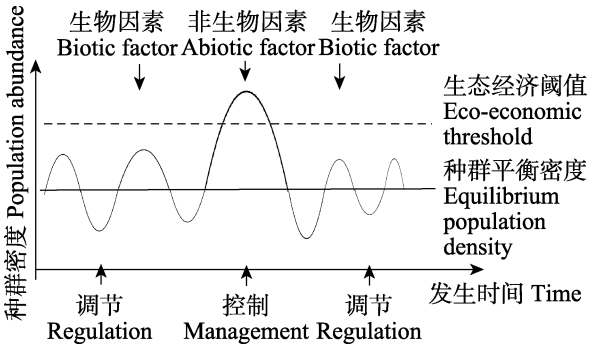

图 1 害虫生态调控过程

Fig. 1 The process of ecological regulation and management on pests population

2.2 害虫生态调控特征

如上所述，生态调控主要是利用农田生态系统内部与外部、生物与非生物因素通过控制与调节两个过程开展害虫管理，是害虫综合管理的一个发展方向。从图 2 中农田景观生态系统自然因素（作物抗性、自然天敌控害功能）作用发挥的程度、化学农药的使用程度、对农田景观中作物-害虫-天敌相互关系的掌握程度、现代生物技术（如基因编辑、RNAi 干涉、转基因作物、昆虫性信息素、生物农药）的应用程度四个维度来看，原始防治主要依靠自然因素的作用（图 2 下左）；化学防治主要依赖化学农药的使用（图 2 下右）；综合防治则综合使用自然因素、化学农药、田间害虫天敌信息和生物技术（图 2 中）；而害虫生态调控则充分发挥自然因素的作用，在掌握对作物-害虫-天敌相互关系的基础上，尽可能使用生物技术，而少用化学农药等（图 2 上左），将害虫持续调控在低平衡密度，减少环境的生态风险性。

显然，害虫生态调控与害虫综合防治都是害虫管理的一个策略，只是它们哲学思想、指导理论、使用的技术与不同。以下将分别论述。

3 害虫生态调控理念与指导思想

3.1 害虫生态调控理念

从害虫管理理念的发展来看，主要体现在以下 4 个方面：1）从消灭哲学到容忍哲学，发展了经济阈值与行动阈值的概念；2）从靶标害虫控制到作物-害虫-天敌食物链的调控，发展了基于生物学的 IPM、基于生态学的害虫生态调控（EBPM）；3）从单一作物防治对象到区域性农田景观格局，发展了害虫区域性生态调控（Area-wide pest management，AWPM）、害虫的保护性生物控制（Conservation biological

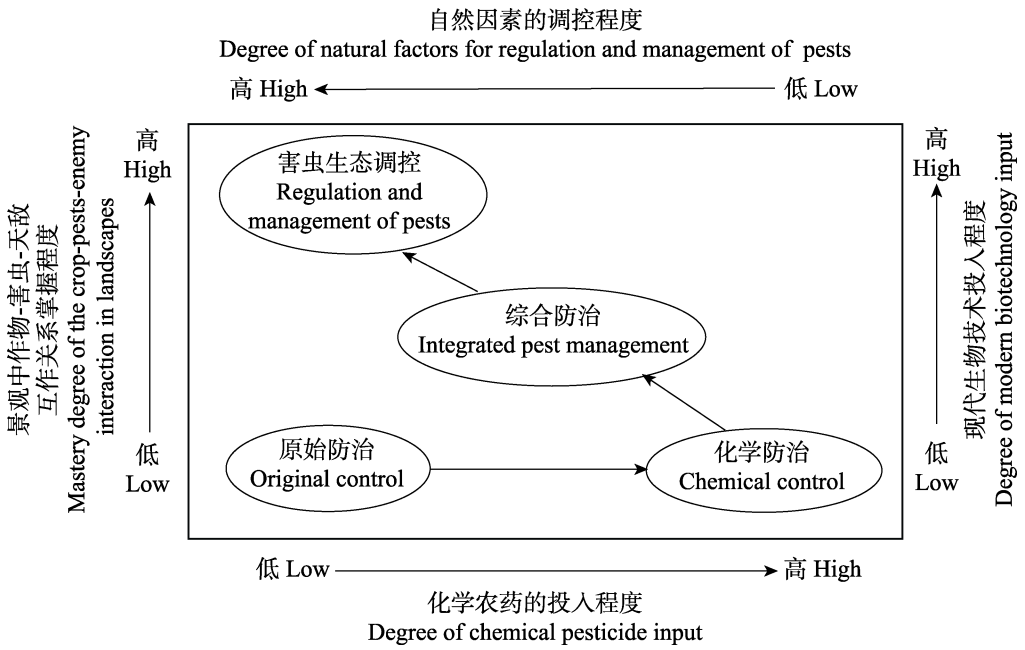

图 2　4 种害虫管理策略特征比较

Fig. 2　Comparison of characteristics among four management strategies

control，CBC）；4）从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（Ecosystem-service based AWPM）（戈峰，2020）。

害虫生态调控的理念是在基于生态服务功能的害虫区域性生态调控学术思想（戈峰等，2014）的基础上，更强调“人与自然和谐”和“生态命运共同体”的哲学观。换言之，害虫管理一定要基于对生态系统服务功能的认识，要充分认识到人也是生态系统中的一个组分，是食物链上的一个环节，长期以来人与自然是相互依存的；生态系统的破坏，势必通过食物链级联效应影响到人类的健康与生存。特别是人作为生态系统的顶级消费者，生态系统中所有的物质（包括有毒物质）均通过富集或流动作用于人类；同时，人类又是生态系统的操纵者，其对生态系统的干扰都会通过食物网影响到其它物种的消失，影响整个系统的生态服务功能，从而打破原有的生态系统平衡，出现外来入侵生物，甚至超级传播者（病毒），直接威胁到人类安全（如 2013 年的 SARS）。所以说，人与生态是命运共同体。事实上，人类不必对昆虫数量的增长过于紧张，除了少部分昆虫成为害虫之外，绝大多数昆虫作为生态系统中的重要组成部分，对生物控制、传粉、物质分解和资源供给等生态系统功能的实现都起到非常重要的作用（欧阳芳等，2013；戈峰等，2014）。因此，进行害虫管理时，还必须考虑到其它昆虫的生物控害、传粉和分解服务功能，尽可能使用生态系统内部的自然因素，使其对人类及其环境影响较小。

3.2　害虫生态调控指导思想

具体来说，害虫生态调控的指导思想主要体现在以下 4 个方面。

3.2.1　生态服务观　不仅仅着眼于害虫的防治，而应从生态系统服务功能出发，综合考虑系统中其它昆虫的传粉功能、生物控害功能和分解功能，可能这些昆虫的服务价值远远超过了害虫的损失值，从而使整个农田生态系统获得最大的生态效益。

3.2.2　区域整体观　不仅仅着眼于单一农田生态系统，而应扩展到区域性农田景观生态系统，充分考虑整个生态系统中害虫及其天敌的转移发生过程，从空间格局与时间全过程管理害虫及其天敌，　提高害虫管理的整体性水平。

3.2.3　生态优先观　不仅仅着眼于防治效果，而

应从人与自然和谐、生态命运共同体哲学观出发，基于“生态优先、绿色发展”的原则，优先考虑生态的、绿色的调控措施，尽可能少用化学农药，将害虫持续调控在低平衡密度，减少环境与对人类的生态风险性，造福于子孙后代。

3.2.4 整合措施观 不仅仅着眼于使用生态调控措施（它仅是优先，但不是唯一），任何一种手段都有其局限性，而应从农田景观生态系统食物网及其调控因素互作关系出发，整合使用生态系统内外一切可以利用的因素，将生态调控技术与生物防治技术、理化诱控技术、现代生物技术（如基因编辑、RNA 干涉、转基因作物、昆虫性信息素）以及低毒低残留的化学农药手段整合成为“经济、简便、有效”的生态工程技术体系，为系统的整体功能服务。

4 害虫生态调控原理

作为以生态学为基础的害虫生态调控，相关的生态学原理很多，本文仅论述害虫生态调控独特的 4 个基本原理。

4.1 种群调节理论

在自然生态系统中，生物与生物之间相互作用，生物与环境之间相互适应，从而使某一物种（如昆虫）在生物群落中维持一定的种群密度。事实上，自然生态系统中 95%的种群均被自然因子调控在平衡密度之下。这种将种群维持在平衡密度的过程即为自然调节过程，它是生物密度制约因子（如种间竞争、天敌的捕食寄生作用和植物的抗性等）的结果。即当害虫种群密度高时，害虫种群因植物（食物）抗性（特别是诱导抗性）、天敌控害的作用加强而下降；而当害虫种群密度低时，害虫种群因植物（食物）、天敌的作用减弱而上升。因此，可通过生态系统内外的作用因素降低其密度，使害虫种群密度在处于生态经济允许水平下的平衡密度周围波动（戈峰，2008）。

4.2 生态位理论

生态位（Niche）系指群落内一个物种的资源利用，它具有空间生态位、功能生态位和多维生态位等特征。在一个景观或地区内，由空间梯度的物理和化学环境构成了该栖息地的多维空间轴。一个特定物种所占有的该多维空间的一部分，就是这个物种栖息地的多维体积（戈峰，2008）。基于这个理论，可通过引进新的有利生态元（如种植功能植物、引进天敌）、去除有害生态元（如性引诱剂、某些选择性杀虫剂）、改变现有的生态元（如景观格局、间套作、作物布局），以发挥景观内生态服务功能。

4.3 生物多样性原理

生物多样性可定义为生物的多样化和变异性以及生境的生态复杂性。它包括了遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性和景观多样性多个层次（戈峰，2008）。一般认为复杂的农业景观有利于天敌控害作用和蜜蜂传粉，更好地实现昆虫的生态功能（欧阳芳和戈峰，2013）。解释这个现象，通常包括天敌假说、资源集中假说、联合抗性假说、“推-拉”假说、中度复杂假说、景观缓冲假说等（尤士骏等，2019）。其中，食物网中的“植物-害虫-天敌”“上下”作用的“top-down”、“bottom-up”理论，以及“左右”作用的“似然作用”理论尤为重要。但也有案例说明，复杂的生物多样性，增加害虫食物链，导致“桥梁田”出现、虫源地更多，害虫发生更严重（Martin *et al.*，2013）。因此有关多样性与控害的关系，目前尚存在着争论。

4.4 岛屿生态学理论

在农田景观中，作物可以看成是一个“岛屿”，周围的其他作物或非作物生境通过各种斑块将他们连接成各种景观结构。岛屿生态学理论认为，岛屿面积越大，生境多样性越大，物种灭绝率越小；隔离程度越高，物种迁入率越低，物种丰富度越低；面积大而隔离度又低的岛屿具有较高的平衡物种丰富度的功能；面积小或隔离度低的生境具有较高的物种周转率（戈峰，2008）。为此，可在大时空景观尺度范围内进行多种生境的设计与布局，如设计生态岛、斑块、廊道，创造有利于天敌的环境条件，抑制害虫种群，达到减小环境污染、提升农业生态系统的控害保益功能，最终实现害虫种群控制的可持续性（赵紫华等，2013）。

5　生态调控技术

害虫生态调控不仅仅是害虫管理的一种策略，而且还有其独特的技术。

5.1　生态景观设计

基于农田景观中作物与非作物生境中能流、物流和信息流关系，在农田、果园乃至更大时空尺度范围内进行多种生境的设计与布局，通过设计生态岛、斑块、廊道，在农田、果园等周围创造有利于天敌或传粉昆虫越冬、栖息及其繁衍和转移扩散的生境，以提升农业生态系统的控害保益功能，最终实现害虫种群控制的可持续性。一般认为 5%-20%左右比率的非作物生境有利于农田的害虫生态调控。赵紫华等（2014）还发现麦田周围 33%左右比率的非作物生境更有利于初级寄生蜂对麦蚜的控制作用。

5.2　作物的合理布局

基于农田生态系统内多作物作用系统，通过轮作、间作、套作及农作物的整体布局，建立合理的栽培制度，是有效开展害虫生态调控的基础。如棉田与小麦套作，可以很好控制棉蚜（戈峰和丁岩钦，1997）。玉米与花生间作，可以增加花生田里的捕食性瓢虫，从而可以抑制花生蚜的发生（Qu *et al.*，2019）。小麦与棉花邻作时，当小麦田收获之后，其内的天敌可转移到周围的棉田，可以有效抑制棉花田 16 m 内的蚜虫（Men *et al.*，2004）。此外，适当的轮作能够将害虫寄主桥梁破坏，一些害虫就会失去寄主食物，其生存环境就会急剧恶化，不能够适应生存环境变化的害虫就会死掉。

5.3　功能植物的合理配置

作为害虫生态调控的功能植物，主要是指有助于害虫天敌生物控害或（和）传粉昆虫传粉授精的蜜源植物，有利于天敌昆虫的栖境植物和储蓄植物，以及吸引害虫的诱集植物、能击退害虫的驱避植物和诱杀害虫的诱杀植物等。显然，功能植物主要发挥着涵养天敌和传粉昆虫、保护天敌和传粉昆虫同时又不成为靶标害虫食物链的功能，它通常具有涵养储存天敌和传粉昆虫不涵养害虫趋避害等 4 个特征（杨泉峰等，2020）。我们最近的研究表明，蛇床草 *Cnidium monnieri* 是华北农田很好的功能植物，可以起到保护麦田前期天敌且可作为将麦田天敌转移过渡到玉米田的“驿站”（杨泉峰等，2018）。

5.4　推拉技术

近年来，基于对植物-害虫-天敌三者间相互作用的深入认识，以及化学生态学的发展，诱集植物（作物）与驱避植物或其他化学驱避物质结合形成的“推-拉”（Push-pull）防治措施得到很大发展，并且成为生态调控的一个重要措施（Hassanali *et al.*，2008）。最为经典的的例子当属在肯尼亚等东非国家利用“推-拉”（Push-pull）技术防治对玉米田害虫。它主要通过在玉米田旁边种植糖蜜草 *Melinis minutiflora* 产生挥发物对玉米田外的螟蛾科雌虫起到驱避作用（推），同时种植狼尾草 *Pennisetum purpureum* 可诱杀玉米田内鳞翅目害虫 (Khan *et al.*，2008)。由于诱集植物一般比目标作物对靶标害虫有更强的吸引作用，将害虫吸引到诱集植物，从而减少对目标作物的损害；同时，诱集作物使害虫趋于集中，也有助于吸引田间天敌觅食或者便于天敌的集中释放，有利于增强天敌作用效果（陈学新等，2014）。此外，目前也开始应用一些合成的化学物质在“推-拉”（Push-pull）措施应用中。如利用蚜虫报警激素反-β-法尼烯驱避蚜虫、吸引天敌的特性，发展了小麦、蔬菜蚜虫“推-拉”防控技术（范佳等，2014）。

5.5　生态自杀技术

通过时间、空间上生态位的错位，制定合理的种植和收获时间，切断害虫与寄主之间的食物链，从而使害虫的种群因无法完成整个生活史而自行衰退或者灭亡。如提前播种，双季稻改为单季稻，切断了水稻螟虫的食物链，使螟虫找不到寄主水稻而消亡；稻田田埂周围种植香根草 *Vetieria zizanioides* 可诱杀二化螟 *Chilo suppressalis* 成虫产卵，但螟虫又不能在香根草上生存，从而消灭了螟虫（徐红星等，2019）。也可以通过基因工程的手段，延迟或提前害虫的发育使害虫找

不到其合适的寄主，使其无法生存。

5.6 健康作物环境管理技术

在选用优良的抗虫农作物基础上，还需要对其周围环境进行管理，使作物生长在健康的环境中，降低害虫的侵害，从而提高农作物的产量。其中，水肥管理最为重要，它不但影响害虫的生存与扩散，还影响农作物的生存环境、抗性。此外，定时清理生长环境，防止害虫重新滋生，恶化害虫的越冬、化蛹等生存条件，可达到降低害虫虫源基数的目的。

显然，生态调控作为技术，它与生物防治技术、农业防治技术等既有联系，也有区别。如生物防治主要利用自然的或经过改造的生物、基因或代谢产物来减少有害生物的作用，更多的是生物因素的作用。农业防治更多的是利用农事操作来管理害虫，主要是非生物因素的作用。而害虫生态调控是利用生物与非生物因素通过控制与调节两大因素开展害虫管理。

6 害虫生态调控的技术体系构建与实践

害虫生态调控作为害虫管理的一种“高级”策略，主要基于“预防为主，生态优先，整合治理，精准施策”的原则，整合生态调控技术、农业防治、生物防治、理化诱控技术、现代生物技术和合理的化学防治等手段，构建“经济、简便、有效”的生态技术体系，将害虫控制在生态经济阈值水平之下。具体的流程如图 3。

1）首先要对农田景观生态系统进行辨析，掌握主要害虫及其天敌的生物学、生态学特性，了解“作物-害虫-天敌”食物网关系，明确可以利用的生物与非生物因子；

2）因地制宜对农田景观进行生态设计，规划作物布局、轮作、套间作；进行栖息地改造，从时空上合理配置功能植物；

3）选择合适的品种，优先选用高产抗性品种，必要时可进行品种混合；确定合理的播种日期，可根据需要使用种衣剂；

4）对土壤及水分进行科学管理，必要时加入土壤肥力改良剂及蚯蚓等以增强土壤活力；

5）进行害虫、天敌种群监测并管理，充分利用传粉昆虫传粉，在害虫发生较重时，使用性引诱剂、灯诱、食物和色板诱杀；

6）选择性使用昆虫病毒、昆虫病原线虫、昆虫病原真菌和 Bt 等生物制剂；

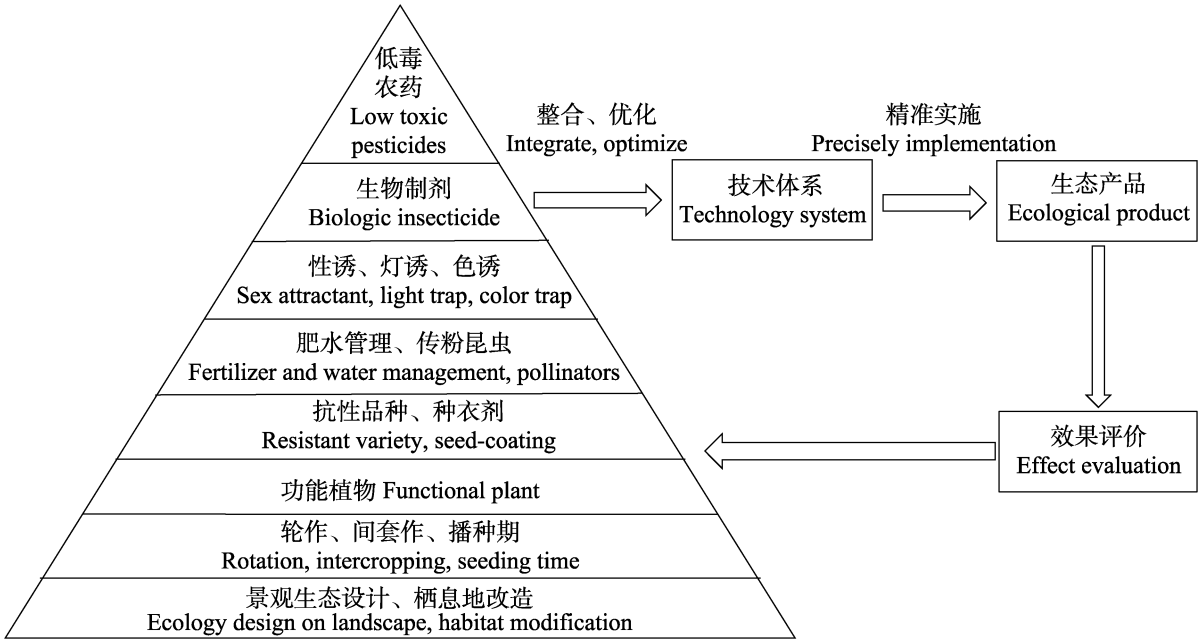

图 3 害虫生态调控的技术体系构建框图

Fig. 3 Diagram for the technical system construction of ecological regulation and management of pests

7）当害虫种群密度超过生态经济阈值时，可考虑使用低毒低残留且高效的新型化学农药；

8）研判各个措施之间的“协同、协同”关系，整合、优化、构建农田景观“经济、简便、有效”的生态技术体系；形成“可重复、可操作、可推广”的模式，农民或者农场可直接使用；

9）针对不同区域、不同类型主要害虫进行生态调控方案精准设计，实施个性化管理，同时实时记录生产及管理过程，生产出符合健康标准的生态产品。整个过程做到经济上可行、生态上可持续、社会上可接受；

10）从经济、生态和社会多个方面评价害虫生态调控的效果，并针对问题及时提出修正意见，不断地完善这一技术体系，真正实现农田景观生态系统的适应性、个性化管理。

基于上述理论与技术体系，我们在华北农田和山东烟台果园，通过选用抗虫品种、作物布局、功能植物配置，结合土壤管理及其它生物防治措施，进行了个性化区域性害虫生态调控实践，打造出源头控制、自然生产、原始加工的全生态链，实现了从农田到餐桌的可追踪、可溯源、可持续的“态控 I 号”健康生态产品的小面积生产。

7　展望

综上所述，害虫生态调控这个名字具有“二重性”。

作为害虫管理的一项技术，害虫生态调控更强调利用生态系统内、外因素，通过控制与调节两个过程开展害虫管理，它包括景观生态设计、功能植物种植、推拉技术、生态自杀技术、作物合理布局、健康作物环境调控技术等措施。

作为害虫管理的一种策略，它强调充分了解农田景观生态系统中作物、害虫、天敌食物网之间的关系，基于“预防为主，生态优先，整合治理，精准施策”的原则，构建“经济、简便、有效”的生态工程技术体系，将害虫控制在生态经济阈值之下，减少化学农药的使用，达到经济可行、生态持续、社会接受、环境友好的目的。显然，害虫生态调控有其独特的哲学理论、指导思想、生态学原理与技术、实施方法与标准以及管理目标，与害虫综合治理策略有联系与区别（表 1）。

进行害虫生态调控，不仅仅是概念的创新，关键是如何实施。未来尚需要从以下的科学、技术、组织与政策等方面开展工作。

1）科学问题　重点围绕着农田景观中作物-害虫-天敌食物网的结构与功能开展研究，探究食物网中的“植物-害虫-天敌”“上下”之间作用的“top-down”、“bottom-up”理论，以及食物网中“左右”之间作用的“似然作用”学说，以维持食物网中自然因子对害虫的“调节”作用；从农田景观生态的角度，了解害虫及其天敌在作物与非作物之间的转移扩散规律，掌握害虫及其天敌的“库源”动态，准确地监测、预测害虫及其天敌种群动态；从生物学和生态学角度，深入阐述为什么这个昆虫会成为害虫及其暴发成灾的机制。

2）技术问题　重点是整合构建“经济、简便、有效”的生态技术体系，关键要掌握各个防

表 1　害虫生态调控与害虫综合治理策略的区别

Table 1　The comparison between ecological regulation and management of pests (ERMP) and integrated pest management (IPM)

类型 Types	哲学基础 Philosophical foundation	指导思想 Guiding ideology	研究范围 Scope	研究焦点 Focus	使用措施 Measures	实施方法 Methods	实施标准 Standard	管理目标 Objectives
害虫综合防治（IPM）	容忍	生态学，经济学	农田或靶标害虫	种群，群落	各种防治措施	协调、综合	经济阈值	经济效益为主
害虫生态调控（ERMP）	主动调控，容忍，人与自然合谐相处	生态服务功能，区域景观，整合，生态优先	农田景观	食物网结构与功能	害虫生态调控技术及其它措施	整合设计组装	生态经济阈值	获得最多的生态与社会，经济效益

治要素之间的“相生、相克”原理，发挥各个措施间的“协同”和“协调”作用，找出不同时空条件下控害保益的关键措施，设计和组装出维持多功能的农田景观昆虫生态调控技术体系，形成“可重复、可操作、可推广”的模式，农民能够直接应用。

3）组织管理 由于害虫生态调控需要从大尺度、区域性进行，因此更需要从政府的角度去组织和引导。可喜的是随着当前从事农业生产的人口急剧下降，种植大户和专业合作社已成为我国农业生产的重要力量，也为我国开展农田景观害虫生态调控创造相对有利的环境。下一步需要加强开展“生态农民”培训和“绿色技术经营服务主体”等的资格认定，通过生态调控理念的传播、技术支撑的优化、装备水平的改善、服务方式的改进，提高生态调控的专业化服务组织能力和服务水平。

4）政策问题 类似于欧盟与美国，我国也应该制定相应的法规与条例，鼓励生产者使用害虫生态调控策略与技术，减少化学农药依赖和对环境污染，实现优质优价；加快在我国建立生态补偿制度，加大对生态调控技术、生物农药和天敌等产品的补贴力度，并提高化肥和化学农药市场准入门槛等措施；从市场和农民的角度，全面评价害虫生态调控的效益。从政府角度，强化监管的职责，从消费者的角度，去分析害虫生态调控的社会责任，从农民的角度，强化生态产品的商品价值；打造源头控制、自然生产、原始加工的全生产链，生产出从农田到餐桌的可追踪、可溯源、可持续的健康生态产品。

参考文献 (References)

Altieri MA, Martin PB, Lewis WJ, 1983. A quest for ecologically based pest management systems. *Environmental Management*, 7(1): 91–99.

Altieri MA, Nicholls CI, 2003. Ecologically based pest management: A key pathway to achieving agroecosystem health. *Managing for Healthy Ecosystems*, (12): 999–1010.

Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plant-mediated support system for natural enemies of insect pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1–12.]

Ding YQ, 1993. Ecological management 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.]

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

Fan J, Liu Y, Zeng JG, Guo M, Sun JR, Cheng P, Chen JL, 2014. Advancement of new prevent and control technologies for aphids in wheat and vegetable. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1413–1434. [范佳, 刘勇, 曾建国, 郭梅, 孙京瑞, 程辟, 陈巨莲. 小麦及蔬菜蚜虫绿色防控技术进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1413–1434.]

Flint ML, Van den Bosch R, 1981. Introduction to Integrated Pest Management. New York: Plenum. 240–262.

Ge F, 1998. The principles and methods of ecological regulation and management of pests. *Chinese Journal of Ecology*, 17(2): 38–41. [戈峰, 1998. 害虫生态调控的理论与方法. 生态学杂志, 17(2): 38–41.]

Ge F, 2008. Principle and Methods of Insect Ecology. Beijing: Higher Education Press. 51–186. [戈峰, 2008. 昆虫生态学原理与方法. 北京: 高等教育出版社. 51–186.]

Ge F, 2001. The principles, methods and practices of regional ecological regulation and management of pests. *Chinese Bulletin of Entomology*, 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, Ding YQ, 1997. Functional features of preserving natural enemies to control insect pests in intercropped cotton field ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 8(3): 295–298. [戈峰, 丁岩钦, 1997. 多样化棉田生态系统控害保益功能特征研究. 应用生态学报, 8(3): 295–298.]

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, 2020. Pest management: From ‘comprehensive management’ to ‘integrated management’. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 1–9. [戈峰, 2020. 害虫管理: 从“综合”到“整合”. 应用昆虫学报, 57(1): 1–9.]

Hassanali A, Herren H, Khan ZR, Pickett JA, Woodcock CM, 2008. Integrated pest management: The push–pull approach for controlling insect pests and weeds of cereals, and its potential for other agricultural systems including animal husbandry. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491): 611–621.

Khan ZR, James DG, Midega CAO, Pickett JA, 2008. Chemical ecology and conservation biological control. *Biological Control*, 45(2): 210–224.

Kogan M, 1998. Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual review of Entomology*, 43: 243–270.

Lu YH, Zhao ZH, Cai XM, Cui L, Zhang HN, Xiao HJ, Li ZY, Zhang LS, Zeng J, 2017. Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pests in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 349–363. [陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 崔丽, 张浩男, 肖海军, 李振宇, 张礼生, 曾娟, 2017. 我国农业害虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 54(3): 349–363.]

Martin EA, Reineking B, Seo B, Steffan-Dewenter I, 2013. Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes, *PNAS*, 110(14): 5534–5539

Men XY, Ge F, Yardim EN, Parajulee MN, 2004. Evaluation of winter wheat of as a potential crop enhancing biological control cotton aphids. *Biocontrol*, 49(6): 701–714.

National Research Council, 1996. Ecologically Based Pest Management: New Solution for a New Century. Washington DC: National Academy Press. 144.

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, Zhao ZH, Ge F, 2013. Insect ecological services. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 305–310. [欧阳芳, 赵紫华, 戈峰, 2013. 昆虫的生态服务功能. 应用昆虫学报, 50(2): 305–310.]

Qu Q, Ouyang, Gu SM, Qiao F, Yang QF, Ge F, 2019. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 286(10):1–8.

Sheng CF, Su JW, Xuan WJ, Wang HT, Fan WM, 2002. A discuss on the conceptions of ecological pest management. *Acta Ecologica Sinica*, 22(4): 597–602. [盛承发, 苏建伟, 宣维健, 王红托, 范伟民, 2002. 关于害虫生态防治若干概念的讨论. 生态学报, 22(4): 597–602.]

Tshernyshev WB, 1995. Ecological pest management (EPM): General approaches. *Journal of Applied Entomology*, 119(1/5): 379–381.

Wilson H, Daane KM, 2017. Review of ecologically-based pest management in California Vineyards. *Insects*, 8(4): 108.

Xiao YT, Wu C, Wu KM, 2019. Achievements and prospects of agricultural pest control technology in the past 70 years in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1115–1124. [萧玉涛, 吴超, 吴孔明, 2019. 中国农业害虫防治科技 70 年的成就与展望. 应用昆虫学报, 56(6): 1115–1124.]

Xu HX, Yang YJ, Zheng XS, Tian JC, Lu YH, Cheng JA, Lv ZX, 2019. Research on the management of rice insect pests in China since the 21 century: Advances and future prospects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1163–1177. [徐红星, 杨亚军, 郑许松, 田俊策, 鲁艳辉, 程家安, 吕仲贤, 2019. 二十一世纪以来我国水稻害虫治理成就与展望. 应用昆虫学报, 56(6): 1163–1177.]

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, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2020. The working principles, methods and future researches of the functional plant. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 41–48. [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2020. 功能植物的作用原理、方式及研究展望. 应用昆虫学报, 57(1): 41–48.]

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.]

Zhao ZH, Ouyang F, Men XY, Liu JH, He DH, Ge F, 2013. Habitat management in biological control. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(4): 879–889. [赵紫华, 欧阳芳, 门兴元, 刘军和, 贺达汉, 戈峰, 2013. 生境管理—保护性生物防治的发展方向. 应用昆虫学报, 50(4): 879–889.]

Zhao ZH, Cang H, Hardev S, Ouyang F, Dong Z, Ge F, 2014. The response of primary parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids to landscape complexity. *Journal of Economic Entomology*, 107(2): 630–637.