基于生态调控的小麦害虫综合治理研究进展*

门兴元[1**] 董兆克[2] 李丽莉[1] 杨泉峰[3] 张晴晴[1,3]
欧阳芳[3] 卢增斌[4] 李 超[1] 于 毅[1] 庄乾营[1]

（1. 山东省农业科学院植物保护研究所，济南 250100；2. 青岛农业大学植物医学学院， 青岛 266109；3. 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；4. 山东省农业科学院玉米研究所，济南 250100）

摘 要 中国是小麦种植面积最大的国家。近年来，受全球气候变化、农业产业结构调整等因素的影响，小麦虫害问题趋于严重。而目前化学农药是小麦害虫防治的主要手段，过度依赖化学农药带来了环境污染、害虫抗性等一系列问题。针对这些问题，我国科学家在阐明小麦害虫区域性灾变规律和机理的基础上，发展了小麦害虫生态调控技术，并构建了基于农田景观设计的生态调控工程。本文综述了我国小麦害虫治理的新进展，并基于国际上小麦害虫治理的发展趋势，展望了我国小麦害虫治理的未来发展方向。

关键词 小麦；害虫；区域性灾变机理；生态调控；综合治理

Advances in the integrated management of wheat pests based on ecological regulation

MEN Xing-Yuan[1**] DONG Zhao-Ke[2] LI Li-Li[1] YANG Quan-Feng[3] ZHANG Qing-Qing[1,3]
OUYANG Fang[3] LU Zeng-Bin[4] LI Chao[1] YU Yi[1] ZHUANG Qian-Ying[1,3]

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Science, Ji'nan 250100, China; 2. College of Plant Health and Medicine, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract China has the largest wheat growing area in the world. Global climate change and changing agricultural methods have exacerbated pest damage to wheat crops in China. Chemical pesticides are still the main method of controlling wheat pests but over-dependence on pesticides leads to a series of problems, such as environmental pollution and pest resistance. Chinese scientists have developed ecological pest regulation technology and established a wheat pest regulation system based on landscape design. This paper summarizes advances in the use of integrated pest control to protect wheat crops in China, and discusses future prospects for research on the control of wheat pests in light of overseas trends.

Key words wheat; pest; regional disaster mechanism; ecological regulation; IPM

小麦是全球三大粮食作物之一，在世界各地广泛种植。中国是主要产麦国和消费国。2017年全世界小麦播种面积2.19亿 hm^2，中国播种面积达0.25亿 hm^2，世界第一（联合国粮食及农业组织，2017）。中国是最早种植小麦的国家之一，害虫种类多、危害重，主要害虫如麦蚜、麦螨等经过长期的进化适应了小麦生态系统。尤其是，近年来随着小麦种植区域扩张、栽培管理措施改变和全球气候变化，一些新害虫，如白眉野草螟 *Agriphila aeneociliella*、瓦矛夜蛾 *Spaelotis valida* 等在局部暴发危害。

长期以来小麦害虫的防治以化学防治为主，过度依赖化学农药带来了环境污染和农药残留等不良影响，促使各国政府和科学家寻求更和谐的途径防控小麦害虫，同时兼顾环境、保障生产者和消费者的健康。如欧盟国家使用生境管理的

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划课题（2017YFD0201700）；山东省农业科学院农业科技创新工程（CXGC2019G01）
**通讯作者 Corresponding author，E-mail：menxy2000@hotmail.com
收稿日期 Received：2019-12-20；接受日期 Accepted：2020-01-12

方法，通过增加麦田生态系统多样性和复杂性，更好的发挥了小麦生态系统中自然天敌的控害作用（Tschumi *et al.*，2015，2016)。戈峰（2001）在害虫综合治理（Integrated pest management，IPM）的基础上，提出了害虫区域性生态调控理论，将麦田害虫生态调控研究由单一的农田拓展到区域性农田景观的空间范围。在该理论的指导下，我国的学者系统研究了华北农田景观中小麦害虫及其自然天敌在农田景观中不同作物间、作物与非作物生境间转移扩散全过程（Men *et al.*，2004；Dong *et al.*，2015），解析了农田景观结构对麦田害虫及其自然天敌的影响（卢增斌等，2016；欧阳芳等，2016；Yang *et al.*，2018；张永生等，2018），定量评价了自然天敌的控害功能（于汉龙等，2014），研发了控害保益的新方法（Dong *et al.*，2012；杨泉峰等，2018），设计和组装了麦田害虫区域性生态调控技术体系和生态工程，提高了我国小麦害虫防治的水平。为此，本文将综述近年来我国小麦害虫治理的新进展，并基于国际小麦害虫治理的发展趋势，展望我国小麦害虫治理的未来发展方向。

1 我国主要小麦害虫灾变趋势

当前，我国小麦上常见害虫 37 种，包括麦蚜、吸浆虫、黏虫、麦蜘蛛、麦秆蝇、蝼蛄、蛴螬、金针虫等（陈万权，2013）。据 2006-2015 年统计，全国小麦主要害虫造成的实际损失排第一的是麦蚜（年平均危害损失 93.28 万吨），其次是麦红蜘蛛（25.56 万吨），然后是吸浆虫（11.13 万吨）（刘万才等，2016）。这些害虫在许多地区经常暴发危害，往往造成明显的产量损失，影响麦区粮食的稳产和高产。尽管小麦生态系统中的植食性昆虫种类很多，但大部分种类一般不会造成明显危害损失，近年随着农业种植区扩张、土地利用强度增强、自然调节作用减弱以及全球气候变化，新成灾害虫不断出现，常发害虫也呈现出不同的危害特点，危害有增长的趋势。如欧阳芳等（2014）分析全国植物保护统计数据和农田土地覆盖类型分布遥感数据，发现从 1991 年到 2010 年 20 年期间我国小麦害虫的发生强度增加了 31%。

1.1 麦蚜

在我国各小麦产区，麦蚜主要包括麦长管蚜 *Macrosiphum avenae*、麦二叉蚜 *Schi zaphis graminum*、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* 等，它们常混合发生危害。麦蚜通过吸食小麦营养、影响光合作用以及传播病毒病，导致小麦减产和品质下降。20 世纪 90 年代以来，麦蚜发生面积迅速增加，虽然大力防治，每年的损失仍在 50 万吨以上，如 1995 年和 1999 年分别损失 83.2 万吨、82.7 万吨，占小麦病虫害造成损失总量的 1/3（曹雅忠等，2006）。21 世纪麦蚜在各麦区仍呈中等偏重发生态势，全国麦蚜年发生面积持续保持在 1 000 万 hm^2 次以上。

1.2 小麦吸浆虫

我国小麦吸浆虫主要包括瘿蚊科的麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* Géhin 和麦黄吸浆虫 *Contarinia tritici* (Kirby)。自 20 世纪 80 年代以来主要发生的是麦红吸浆虫，麦黄吸浆虫鲜有发生。麦红吸浆虫以幼虫吸食麦粒汁液，造成麦粒瘪疮、空壳或霉烂，一般减产 10%-20%，甚至绝产。小麦吸浆虫虽然为局部发生的害虫，主要发生在黄河流域麦区的陕西、河南和河北等几个省份，但由于其危害具有隐蔽性，作物生长期不容易发现，往往在局部地区或田块容易造成绝收等毁灭性灾害。近年来，该虫呈现出“北扩东移”的趋势，与 20 世纪 50 年代相比，其发生北界向北推移超过 400 km，河北、北京、天津和鲁西北、鲁西南及鲁南成为新发生区（武予清等，2014）。

1.3 小麦红蜘蛛

我国麦区主要红蜘蛛种类是麦圆蜘蛛 *Penthaleus major*（Duges）和麦岩螨 *Petrobia lateens*（Müller）。麦圆蜘蛛有较强的活动性，可随田间的环境条件改变栖息场所（冯成玉等，2010）。近年来，随着气候变化、农业耕作制度变化，麦园蜘蛛在河南、安徽等麦区出现较大面

积的发生危害(李刚等, 2016)。如薛敏云(2015)通过 5 年的观测, 认为麦岩螨的发生与环境因素密切相关, 适量浇水和改善田间生态环境是有效控制途径。

1.4　粘虫

粘虫 *Mythimna separata* Walker 具有迁飞性、暴食性、群聚性的危害特性, 严重威胁我国的粮食生产。20 世纪 90 年代后随着大幅度压缩了南方小麦种植面积, 粘虫的危害逐步得到控制(郭予元, 2006), 2012、2013 年粘虫连续 2 年在全国大发生, 其发生面积之大, 虫口密度之高, 损失之重, 均属历史罕见(张云慧等, 2012; 姜玉英等, 2014)。近年来, 粘虫主要危害作物也由小麦转为玉米(姜玉英等, 2014; 江幸福等, 2014)。

1.5　其他害虫

麦茎蜂和麦叶蜂是我国麦区常见的膜翅目害虫。灰翅麦茎蜂 *Cephus fumipennis* Eversmann 主要在干旱和半干旱麦区, 以幼虫钻蛀为害小麦茎秆, 导致小麦产量降低、品质下降(吴秀花等, 2016)。麦叶蜂 *Dolerus tritici* 主要发生在长江以北冬小麦产区, 以幼虫啃食小麦叶片, 在 20 世纪 80 年代末期到 90 年代初期是小麦主要虫害之一, 近年来在部分地区旱茬发生呈现加重趋势(滕世辉等, 2014)。麦田常发害虫危害的同时, 也有新发害虫不断涌现。例如山东、山西等地发现了小麦根茎的新发害虫-白眉野草螟 *Agriphila aeneociliella* (Eversmann)(陈付强等, 2014; 曾娟等, 2014)。2014 年后, 一种新发害虫-瓦矛夜蛾 *Spaelotis valida* Walker 在河北、山东等地危害小麦(姜京宇等, 2013; 郭婷婷等, 2017)。因此, 在防治小麦主要害虫的同时, 需要警惕和加强对次要害虫的监测和防控。

2　小麦害虫区域性灾变机理

随着我国小麦生产的集约化程度提高、土地利用强度增加, 害虫发生危害加重、新发害虫不断涌现, 促使人们在掌握小麦害虫生物学特性的基础上, 从农田生态系统、区域性农田生态系统、农田景观生态系统各种尺度下, 研究耕作制度变更、气候变化等对害虫发生灾变规律的影响, 探求高效的害虫控制策略。

2.1　气候变化对小麦害虫的影响

明确全球气候变化背景下害虫及天敌的响应规律与适应性机制, 可以揭示害虫区域性暴发机理, 对全球气候变化背景下害虫发生提出预警(孙玉诚等, 2017)。其中, 全球变暖是全球气候变化中最重要的特征。OuYang 等(2016)基于田间试验和长时间的棉铃虫越冬代监测数据, 研究发现全球气候变暖导致越冬代棉铃虫成虫羽化提前, 从而使一代棉铃虫幼虫数量增加, 对小麦的危害加重。极端高温事件幅度和频率增加也改变了麦蚜的群落结构, 温度升高使禾谷缢管蚜的相对优势度增加, 麦长管蚜和二叉蚜的相对优势度则明显降低(Ma *et al.*, 2015)。大量研究表明, 为了适应气候变暖, 昆虫会向高纬度地区分布, 如 20 世纪 50 年代, 麦红吸浆虫在华北地区最北界为河南与河北交界处的磁县的北纬 36° 线(杨平澜, 1959), 而 2007 年发生区已经向北推移至天津蓟县和北京密云的北纬 40°地区(武予清等, 2014)。苗进等(2011)在河南洛宁和河北徐水 70-100 m 的高空系留气球上捕获了大量的麦红吸浆虫成虫, 表明麦红吸浆虫可以自黄淮南部随西南气流向华北和东北地区扩散。

2.2　农田景观格局对小麦害虫的影响

现代农业集约化化发展, 耕地不断扩张、非作物生境减少, 导致了农田景观格局单一化。农田景观中生物多样性丧失对害虫灾变和自然天敌控害的影响已经成为了研究热点问题(Bianchi *et al.*, 2006)。这种农田景观格局的“质、量、形、度”变化, 都会对害虫和自然天敌产生不同程度的生态学效应(欧阳芳和戈峰, 2011)。其中, 农田景观结构(草地的斑块面积、耕地的破碎化等)是影响麦田蚜虫种群发生的重要景观因素(张永生等, 2018)。如赵紫华等(2010)发现景观结构会影响麦蚜迁入麦田的时间, 复杂农业景观下麦蚜迁飞麦田的时间都要晚于连片种植的农业景观。卢增斌等(2016)分析了农田景

观结构与两种小麦红蜘蛛（麦岩螨 *Petrobia latens* 和麦圆叶爪螨 *Penthaleus major*）的影响，发现与景观中森林面积、斑块形状及水域面积等与小麦红蜘蛛的发生量有明显关系。

2.3 栽培管理对小麦害虫的影响

随着我国现代农业的集约化发展，机械化种植和收获面积增大，农作物的种植方式和栽培管理变化为一些害虫创造了发生危害的条件和机会。例如，白眉野草螟在山东、山西等地发生危害，可能与小麦收获后免耕或少耕，减少了对其滞育越夏的茧有关（曾娟等，2014）。近年来小麦红吸浆虫的扩散可能与其远距离扩散习性以及小麦收割机自南向北作业携带传播有关（高军等，2009；Miao *et al.*，2013）。

3 基于生态调控的小麦害虫综合防治

农业害虫综合防治（IPM）的基本思想是在最大限度地利用自然调控因素，综合利用农业防治、生物防治、物理防治和化学防治等措施，建立一个不利于害虫发生的生态系统，促进农业的可持续发展（刘树生，2000；吴孔明等，2009），因此在害虫综合防治金字塔（IPM pyramid）中生态调控是基础。早在 20 世纪 90 年代，戈峰（1998）提出了害虫生态调控的概念，随后发展了害虫区域性生态调控理论与方法（戈峰，2001），随着现代信息技术在生态学的应用，大量的研究表明农田景观结构对害虫及天敌自然控害作用有着深刻的影响，为此戈峰等（2014，2017）提出害虫治理的尺度应该从单一农田扩展到农田景观，设计组装以昆虫生态服务为中心、多功能的农田景观工程。主要措施如下：

3.1 利用小麦抗虫性

利用小麦抗虫品种是最佳的调控田间害虫的策略之一，我国学者针对小麦品种对主要害虫小麦吸浆虫和麦蚜的抗性，开展了大量研究工作，已持续不断地开展了筛选抗小麦吸浆虫的材料和抗虫育种工作（成卫宁等，2003；屈振刚等，2011）。如郝亚楠等（2014）开展了小麦品种（系）对麦红吸浆虫抗性指标筛选与抗性评价，郝燕冉等（2017）开展了小麦品种抗麦红吸浆虫 QTL 分析；对小麦抗麦长管蚜相关基因进行差异表达和鉴定分析（王春平等，2013），并开展了抗虫品种抗性机制的深入研究（徐琼芳等，2004）。利用RNAi技术沉默麦长管蚜和桃蚜体内细胞色素 P450，能够显著降低蚜虫体内细胞色素 P450 的表达水平，直至导致目的基因沉默和蚜虫死亡（王晖等，2012），也为基因工程改造小麦提供参考依据。外源化合物诱导后小麦对麦长管蚜和粘虫具有抗性（尹姣等，2005）。

3.2 利用作物间作及推拉策略

近年来，我国学者在农田系统内选择合适的作物与小麦间作调控小麦害虫进行了多方面的探索。发现小麦与多种作物间、套及混种对蚜虫具有良好控制作用（范佳等，2014）。其中，小麦与豌豆以 8∶2 的行数间作对蚜虫控制及天敌引诱作用最佳，非寄主植物的气味对寄主植物气味起掩盖作用，干扰蚜虫的寄主定位，这可能是间作低于单作蚜量的原因之一（解海翠等，2012）。小麦与油菜邻作模式有利于麦蚜主要天敌向小麦田转移，并能提高小麦的产量和生物量（费晓东等，2011）。小麦-油菜间作和小麦-大蒜间作均能对麦田中麦长管蚜起到较好的控制作用（王万磊等，2008）。利用信息化学物质发展推-拉策略可以改变害虫及天敌的分布从而调控害虫发生危害，我国与比利时合作研究明确了蚜虫报警激素反-β-法尼烯[(E)-β-Farnesene，EBF]等挥发物缓释对蚜虫控制及对天敌的引诱效果及其作用机理，具有应用于“推-拉”策略的潜力（范佳等，2014；Zhou *et al.*，2016）。植物次生化合物水杨酸甲酯对小麦蚜虫具有趋避作用，于小麦-油菜间作田人工释放水杨酸甲酯，能使麦长管蚜趋于均匀分布且增加其天敌数量，对麦田蚜虫起到明显的控制作用，其效较单独间作明显，表现出协同效应（董洁等，2012；徐庆宣等，2016）。

3.3 利用麦田周边非作物生境

非作物生境能够为天敌种群提供食物资源

和栖息场所(俞晓平等, 1996; 尤民生等, 2004)。在农田害虫尚未发生或种群数量较低时, 如果农田周边的非作物生境有替代猎物, 就可能在田间害虫发生时有较多的自然天敌数量, 因此将半自然生境引入农田生态系统中有助于麦蚜的生物防治。如在小麦田边缘条带状种植紫花苜蓿或黑麦草等牧草, 能够为瓢虫提供替代食物, 刈割牧草可以助迁瓢虫进入麦田控害 (董兆克, 2011; Dong *et al.*, 2012)。紫花苜蓿与小麦条带种植能增加卵形异绒螨幼虫及卵的数量, 增加麦长管蚜被卵形异绒螨的寄生率, 从而抑制麦蚜种群的增长 (Ma *et al.*, 2007)。非作物生境由于受到干扰少, 在作物收获时也可以维持天敌种群。许多步甲和其它广食性和专食性的捕食者在农田边缘越冬, 春季迁入农田。自然植被边界带与麦田交界处维持了较高的蜘蛛活动密度, 并具有向农田内部扩散的趋势 (张旭珠等, 2018)。因此, 可以农田边缘建立合适的生境使天敌在田间重新分布, 增加农田内的天敌数量, 提高麦蚜生物防治水平。

选择合适的功能植物是开展区域性农田景观设计是其中十分关键的一环。功能植物通常具备能够提供天敌适合的花粉及花蜜、越夏或越冬场所、对害虫及天敌有趋避或诱集作用等重要的特征 (赵紫华等, 2013)。近年来, 欧洲开展了利用功能植物开展麦田的生态调控的害虫的研究, 发现在麦田旁边种植组合功能植物带能够显著减少当地麦田主要害虫-黑角负泥虫的危害并显著增加小麦的产量 (Tschumi *et al.*, 2015)。欧阳芳等开展了适用于我国北方小麦-玉米轮作模式的功能植物筛选, 发现在麦田边缘种植一种能涵养大量天敌昆虫的功能植物蛇床 *Cnidium monnieri*, 可使天敌昆虫提前迁入, 助增天敌瓢虫种群并提前迁入麦田控害, 能够显著维持和增加农田生态系统的天敌控害作用。蛇床同时具有种植管理轻简、适生性强、种子不扩散、美化乡村等特点, 麦田周边种植蛇床成为害虫生态调控的一种新途径, 有助于粮食稳产增收、减少化学农药使用、改善生态环境, 具有重要的经济价值、生态价值和社会价值 (杨泉峰等, 2018)。

3.4　农田景观尺度下害虫生态调控

欧阳芳等 (2016) 定量评估了农田景观组成类型、构成比例和形状结构对麦蚜及其天敌种群影响的作用大小, 发现三类景观格局因子对麦蚜影响权重为 9.81%, 而对自然天敌瓢虫和麦蚜寄生蜂种群的影响权重为 47.86%和 25.87%, 因此优化农田景观中作物与非作物生境的布局能够提高区域性农田景观中自然天敌的生物控害功能。景观组成因素影响天敌迁入麦田的时间和种群数量 (杨龙等, 2016; Yang *et al.*, 2018)。复杂的农业景观下麦蚜迁飞入田时间都要晚于简单农业景观(连片种植)下的入田时间 (赵紫华等, 2010), 同时随着复杂度增加, 寄生蜂对麦蚜的寄生率会增加 (Zhao *et al.*, 2014)。农田景观中的农田林网对天敌瓢虫迁入麦田有积极的影响 (Dong *et al.*, 2015), 林木生境有助于在季节初期能使瓢虫从越冬地迁移到农田建立种群。农田景观结构的各种因素对不同种类的害虫影响不同, 草地的斑块面积、耕地的破碎化等是影响麦田蚜虫种群发生的重要景观因素 (张永生等, 2018), 而景观中的森林面积和斑块形状及水域面积等与小麦红蜘蛛的发生量有明显关系 (卢增斌等, 2016)。由于不同种类的害虫和天敌在不同尺度下对农田景观结构要素响应不同, 因此害虫生态调控需要根据区域内害虫和天敌的种类在多空间尺度下进行(Zhao *et al.*, 2016)。

3.5　利用耕作措施

我国自 70 年代以来, 一些地区也开始了免耕种植, 面积逐渐加大。我国 2009-2015 年规划新增保护性耕作面积 1 333 万 hm^2。保护性耕作也带来一些植保问题, 如土传病虫害加重 (张雪松等, 2006)。免耕是保护性耕作的主要形式, 免耕直接改变土壤微环境, 对在土壤内越冬的昆虫可能有影响。例如免耕有利于小麦吸浆虫幼虫的越冬, 但研究发现免耕田麦穗受害较轻, 是否免耕有利于捕食者才降低了小麦吸浆虫的数量尚不清楚 (张智等, 2012)。免耕的麦田内部分杂草化可能影响地面活动的捕食者 (如步甲) 的数量, 如在山东禹城田间发现, 免耕田的麦蚜种

群仅在发展初期有减少，随后多数调查内蚜虫数量受耕作的影响不明显，免耕对瓢虫和寄生蜂没有任何影响（董兆克，2011）。田间土壤含水量对麦蚜发生量有一定的影响，田间土壤持水量过高或过低均有可能导致麦蚜发生加重（董兆克，2011），田间持水量可能影响小麦叶片内化学成分，麦蚜数量与叶片水分、可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉含量呈正相关，与丁布、单宁含量呈负相关（张钧等，2002）。

3.6 小麦害虫生态调控工程实践

基于区域性农田景观设计的害虫生态调控工程可充分发挥自然调节因子持续调控害虫种群，是目前开展害虫综合防治的重要方法，也是农业向生态集约化转变的重要途径。近年来，戈峰研究团队以山东省农田景观为研究区域，通过多年可重复的田间控制实验和区域性系统调查，从作物物种多样性、作物田间布局、农田与周边肥作物生境、区域性农田景观多样性等不同角度和尺度，研究明确了小麦害虫（麦蚜、红蜘蛛）及其自然天敌（瓢虫、寄生蜂）在小麦田、玉米田和棉花田及周边的农林网等非作物生境的周年转移扩散过程，发现农田景观中非作物生境对于调控小麦害虫种群及天敌控害功能有重要作用（卢增斌等，2016；欧阳芳等，2016；张永生等，2018），通过罩笼法定量评价了龟纹瓢虫等自然天敌对与麦蚜的控害功能，发现天敌对麦蚜种群的控害指数在 30%以上（于汉龙等，2014），提出了利用抗性品种、健康栽培、种子包衣和利用功能植物的小麦害虫生态调控工程（图 1），并制定了小麦害虫生态调控技术规程，开展了大面积推广应用。

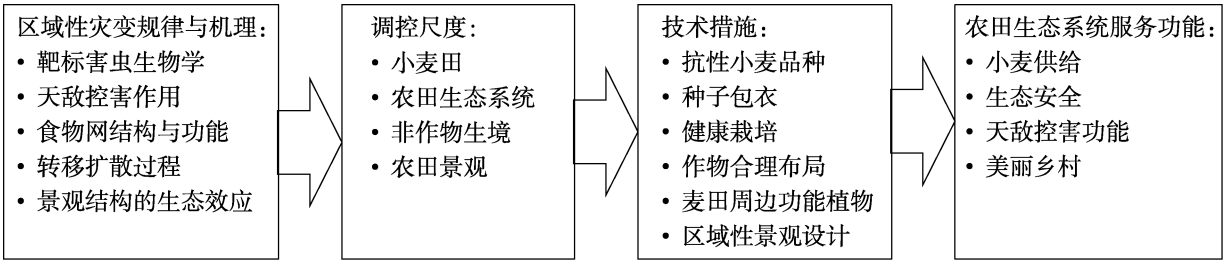

图 1 小麦害虫生态调控工程
Fig. 1 Ecological engineering for wheat pest management

4 国外进展

农业可持续发展是国际社会的普遍共识。欧美国家重视农业扩张与生物多样性保护的平衡，提出了农业生态集约化发展。欧盟发起的共同农业政策（Common agriculture policy）旨在减少环境压力，这项农业环境方案为成员国提供资金支持，设计和实行农业环境措施。最近在欧洲中部开展的农业环境方案，包括种植开花条带、树篱和保护已有的半自然生境，改善相邻农田生态系统的服务功能，开展害虫自然控制（Ekroos *et al.*，2014）。通过管理生境的方法增加农业生态系统多样性和复杂性，调控害虫-天敌关系使害虫种群在可控范围（Altieri and Nicholls，2004）。通常生境管理并不是彻底改变耕作系统，只是相对简单的引入边界植物或廊道植物，使天敌有足够的替代食物或场所，如种植在小麦生态系统的功能植物有荨麻（Alhmedi *et al.*，2009）、一年生的开花植物条带（Tschumi *et al.*，2015）等。休耕地与麦田相邻有利于自然天敌（Toivonen *et al.*，2018）。有研究表明，大尺度的景观异质性是驱动麦蚜生物防治的驱动力（Baillod *et al.*，2017）。发达国家社会公众和政府对环境保护要求相对较高，因此开展农田景观布局设计的农业环境方案容易被广泛接受。在发展中国家的种植者通常缺乏资源投入，依赖自然天敌等控制农作物害虫，随着农业现代化进程作物系统的多样性将逐渐减少，自然控害作用降低，将使种植者更多的依赖农药防治害虫。

5 展望

害虫防治进程已经从化学药剂为主发展到基于生态调控的综合防治。我国在害虫防治关键防治技术或措施方面已取得许多重要进展，但在害虫生态调控体系和实践方面还相对薄弱。我国小麦播种面积大、分布范围广，依赖化学防治造成的环境污染风险较大，因此在我国开展基于生态调控的害虫综合防治势在必行。

明确害虫区域性灾变规律和影响害虫灾变的关键景观因子，从而确定调控的靶标和途径是开展小麦区域性害虫生态调控的基础，因此需要加强农田景观格局下害虫区域灾变机制和调控策略研究。未来将应用生态能学和化学生态学方法，研究农田景观中作物-害虫-天敌之间的食物营养关系与化学信息联系，解析节肢动物食物网的结构与功能。利用现代信息技术与景观生态方法，定量研究多尺度空间下昆虫种群的时空分布与转移特征、农业景观格局和过程对天敌保育与害虫种群控制的影响。从生态农业的角度改造农田环境，开展基于作物布局、功能植物伴生、非作物生境管理和区域性农田景观设计的害虫生态调控技术研究，维持和增加农田景观中自然天敌的数量，使农田系统中自然天敌与害虫发生基本同步，充分发挥自然天敌的控害功能。针对不同区域环境特点，集成区域性的害虫生态调控工程，使农田生态系统提供粮食供给、害虫调控等多种生态服务功能。

参考文献 (References)

Alhmedi A, Haubruge E, Francis F, 2009. Effect of stinging nettle habitats on aphidophagous predators and parasitoids in wheat and green pea fields with special attention to the invader *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae). *Entomological Science*, 12(4): 349–358.

Altieri MA, Nicholls CI, 2004. Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems. Boca Raton: CRC Press. 17–23.

Baillod AB, Tscharntke T, Clough Y, Batary P, 2017. Landscape-scale interactions of spatial and temporal cropland heterogeneity drive biological control of cereal aphids. *Journal of Applied Ecology*, 54(6): 1804–1813.

Bianchi FJJA, Booij CJH, 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.

Cao YZ, Yin J, Li KB, Zhang KC, Li XQ, 2006. Discussion on the reasons and control measures of wheat aphids. *Plant Protection*, 32(5): 72–75. [曹雅忠, 尹姣, 李克斌, 张克诚, 李贤庆, 2006. 小麦蚜虫不断猖獗原因及控制对策的探讨. 植物保护, 32(5): 72–75.]

Chen FQ, Wu CS, Zhang YH, Peng H, Dong BX, Yuan GH, 2014. Identification of an new wheat pest: *Agriphila aeneociliella*. *Plant Protection*, 40(5): 130–132. [陈付强, 武春生, 张云慧, 彭赫, 董保信, 原国辉, 2014. 小麦根茎新害虫:白眉野草螟的鉴定. 植物保护, 40(5): 130–132.]

Chen WQ, 2013. Comprehensive technical system for controlling major diseases and insect pests of wheat. *Plant Protection*, 39(6): 16–24. [陈万权, 2013. 小麦重大病虫害综合防治技术体系. 植物保护, 39(6): 16–24.]

Cheng WN, Li XL, Li JJ, Xin ZX, 2003. Current status and prospects of wheat varietiesresistant to *Sitodiplosis mosellana*. *Journal of Tritieeae Crops*, 23(3): 132–135. [成卫宁, 李修炼, 李建军, 辛转霞, 2003. 小麦品种抗麦红吸浆虫的研究现状与展望. 麦类作物学报, 23(3): 132–135.]

Dong J, Liu YJ, Li PL, Lin FJ, Chen JL, Liu Y, 2012. Ecological effects of wheat-oilseed rape intercropping combined with methyl salicylate release on *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(10): 2843–2848. [董洁, 刘英杰, 李佩玲, 林芳静, 陈巨莲, 刘勇, 2012. 间作与 MeSA 释放对麦长管蚜及其优势天敌的生态效应. 应用生态学报, 23(10): 2843–2848.]

Dong Z, 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.

Dong ZK, 2011. Wheat aphid ecological management technology system. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Sciences University. [董兆克, 2011. 小麦蚜虫生态治理技术体系. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学.]

Dong ZK, Gao FJ, Zhang RZ, 2012. Use of ryegrass strips to enhance biological control of aphids by ladybirds in wheat fields. *Insect Science*, 19(4): 529–534.

Ekroos J, Olsson O, Rundlöf M, Wätzold F, Smith HG, 2014. Optimizing agri-environment schemes for biodiversity, ecosystem services or both? *Biological Conservation*, 172(4): 65–71.

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 Ecology*,

51(6): 1413–1434. [范佳, 刘勇, 曾建国, 郭梅, 孙京瑞, 程辟, 陈巨莲, 2014. 小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1413–1434.]

FAOSTAT, 2017. Data of crops. http://www.fao.org/faostat/en/#home. [联合国粮食及农业组织, 2017. 作物数据. http://www.fao.org/faostat/en/#home.]

Fei XD, Li C, Zhang QW, Zhao ZW, 2011. The effects of wheat planted adjacent to rape on natural enemy population dynamics and wheat prodyction. *Plant Protection*, 37(6): 186–190. [费晓东, 李川, 张青文, 赵章武, 2011. 油菜-小麦邻作模式对麦蚜主要天敌种群动态以及小麦生产的影响. 植物保护, 37(6): 186–190.]

Feng CY, Lu XF, Ji YQ, 2010. Observation of transfer habits of *Pentfaleus major* on wheat plants. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(1): 197–200. [冯成玉, 陆晓峰, 吉用铨, 2010. 麦圆蜘蛛在麦株上的转移习性观察. 昆虫知识, 47(1): 197–200.]

Gao J, Wang HJ, Wang CH, 2009. Investigation and analysis on the transmission of wheat blossom midge by cross-operating of combine harvester in Hebei province. *China Plant Protection*, 29(10): 5–8. [高军, 王贺军, 王朝华, 2009. 河北省小麦吸浆虫随联合收割机跨区作业传播的调查分析. 中国植保导刊, 29(10): 5–8.]

Ge F, 1998. The principles and methods of ecological regulation and management of science. *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. *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, Ouyang F, Men XY, 2017. Ecological effects of regional agricultural landscape on insect and its prospect. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 32(8): 830–835. [戈峰, 欧阳芳, 门兴元, 2017. 区域性农田景观对昆虫的生态学效应与展望. 中国科学院院刊, 32(8): 830–835.]

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.]

Guo TT, Men XY, Yu Y, Zhang SC, Qi JS, Zhuang QY, Sun TL, Li LL, 2017. New pest *Spaelotis valida* occurred in wheat fields in Shandong. *Shandong Agricultural Sciences*, 49(6): 115–118. [郭婷婷, 门兴元, 于毅, 张思聪, 齐军山, 庄乾营, 孙廷林, 李丽莉, 2017. 山东麦田发生新害虫—瓦矛夜蛾. 山东农业科学, 49(6): 115–118.]

Guo YY, 2006. Illustrations with real examples of using ecological regulation strategies against crop pests in China. *Plant Protection*, 32(2): 1–4. [郭予元, 2006. 我国农作物病虫害生态调控实例分析. 植物保护, 32(2): 1–4.]

Hao YN, Zhang J, Long ZR, Wang Y, Cheng WN, 2014. Screening of resistance indicators and evaluation of the resistance of wheat varieties to the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(11): 1321–1327. [郝亚楠, 张箭, 龙治任, 王越, 成卫宁, 2014. 小麦品种(系)对麦红吸浆虫抗性指标筛选与抗性评价. 昆虫学报, 57(11): 1321–1327.]

Hao YR, Wen SM, Wang RH, An XJ, Liu GR, 2017. QTL Analysis for midge resistance in wheat cultivar Jimai 24. *Journal of Plant Genetic Resources*, 18(5): 933–938. [郝燕冉, 温树敏, 王睿辉, 安雪娇, 刘桂茹, 2017. 小麦品种冀麦 24 抗麦红吸浆虫 QTL 分析. 植物遗传资源学报, 18(5): 933–938.]

Jiang JY, Xu YH, Zhou X, Cao S, Chen FQ, Zhang XL, Wang LQ, Zhang QL, 2013. Study on damage and control of *Spaelotis valida*. *Agricultural Disaster Research*, 3(8): 1–2, 52. [姜京宇, 许佑辉, 周霄, 曹烁, 陈付强, 张晓龙, 王丽芹, 张秋兰, 2013. 瓦矛夜蛾危害及防治研究. 农业灾害研究, 3(8): 1–2, 52.]

Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Novel features, occurrence trends and economic impact of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1444–1449. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014. 我国粘虫发生危害新特点及趋势分析. 应用昆虫学报, 51(6): 1444–1449.]

Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. Population dynamics of the armyworm in China: A review of the past 60 years' research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 890−898. [姜玉英, 李春广, 曾娟, 刘杰, 2014. 我国粘虫发生概况: 60 年回顾. 应用昆虫学报, 51(4): 890−898.]

Li G, Chen Z, Zhang B, 2016. Wheat *Penthaleus major* (Duges) special expedition and prevention measures. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 62(6): 87–88.[李刚, 陈镇, 张波, 2016. 麦圆蜘蛛的特征及防治对策. 陕西农业科学, 62(6): 87–88.]

Liu SS, 2000. The chances, challenges and countermeasures of pest management and treatment. *Plant Protection*, 26(4): 35–38. [刘树生, 2000. 害虫综合治理面临的机遇、挑战和对策. 植物保护, 26(4): 35–38.]

Liu WC, Liu ZD, Huang C, Lu MH, Liu J, Yang QP, 2016. Statistics and analysis of crop yield loss caused by main diseases and insect pests in recent 10 years. *Plant Protection*, 42(5): 1–9. [刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡, 2016. 近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析. 植物保护, 42(5): 1–9.]

Lu ZB, OuYang F, Zhang YS, Guan XM, Men XY, 2016. Impacts of landscape patterns on populations of the wheat mites, *Petrobia latens* (Müller) and *Penthaleus major* (Duges), in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 36(14): 4447–4455. [卢增斌, 欧阳芳, 张永生, 关秀敏, 门兴元, 2016. 华北平原地区景观格局对麦田害螨种群数量的影响. 生态学报, 36(14): 4447– 4455.]

Ma G, Rudolf VHW, Ma CS, 2015. Extreme temperature events alter demographic rates, relative fitness, and community structure. *Global Change Biology*, 21(5): 1794–1808.

Ma KZ, Hao SG, Zhao HY, Kang L, 2007. Strip cropping wheat and alfalfa to improve the biological control of the wheat aphid *Macrosiphum avenae* by the mite *Allothrombium ovatum*. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 119(1/2): 49–52.

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

Miao J, Wu YQ, Gong ZJ, He YZ, Dun Y, Jiang YL, 2013. Long-distance wind-borne dispersal of *Sitodiplosis mosellana* Géhin (Diptera: Cecidomyiidae) in Northern China. *Journal of Insect Behavior*, 26(1): 120–129.

Miao J, Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Liu ST, Jiang YL, Duan Y, 2011. Trajectory analysis of long-distance dispersal of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, with air current. *Acta Entomologica Sinica*, 54(4): 432–436. [苗进, 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 刘顺通, 蒋月丽, 段云, 2011. 麦红吸浆虫随气流远距离扩散的轨迹分析. 昆虫学报, 54(4): 432–436.]

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. 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, Hui C, Men XY, Zhang YS, Fan LP, Shi PJ, Zhao ZH, Ge F, 2016. Early eclosion of overwintering cotton bollworm moths from warmingtemperatures accentuates yield loss in wheat. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 217(4): 89–98.

Ouyang F, Men XY, Ge F, 2014. Analysis of biological disasters in main food crops of China. *Biological Disaster Science*, 37(1): 1–6. [欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2014. 1991-2010 年中国主要粮食作物生物灾害发生特征分析. 生物灾害科学, 37(1): 1–6.]

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. *Scientia Sinica Vitae*, 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.]

Qu ZG, Wen SM, Qu Y, Liu GR, 2011. Evaluation and identification of wheat varieties resistant to *Sitodiplosis mosellana*. *Journal of Plant Genetic Resources*, 12(1): 121–124. [屈振刚, 温树敏, 屈赟, 刘桂茹, 2011. 小麦品种抗麦红吸浆虫鉴定与抗性分析. 植物遗传资源学报, 12(1): 121–124.]

Sun YC, Guo HJ, Ge F, 2017. The response and adaptation of insects to global climate change. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(4): 539–552. [孙玉诚, 郭慧娟, 戈峰, 2017. 昆虫对全球气候变化的响应与适应性. 应用昆虫学报, 54(4): 539–552.]

Teng SH, Li XX, Li MM, Gao SZ, Wang GX, 2014. Study on the causes and prevention and control measures of reoccurrence of wheat leaf bee year by year. *Agricultural Science and Technology Communication*, 24(10): 151–152. [滕世辉, 李晓霞, 李明明, 高淑真, 王桂香, 2014. 小麦麦叶蜂逐年重发原因及防控措施研究. 农业科技通讯, 24(10): 151–152.]

Toivonen M, Huusela-Veistola E, Herzon I, 2018. Perennial fallow strips support biological pest control in spring cereal in Northern Europe. *Biological Control*, 121: 109–118.

Tschumi M, Albrecht M, Bärtschi C, Collatz J, Entling MH, Jacot K, 2016. Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220(5): 97–103.

Tschumi M, Albrecht M, Entling MH, Jacot K, 2015. High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1814): 1–8.

Wang CP, Zhao HY, Zhu QD, Luo K, 2013. Differential expression and identification of related genes of wheat resistance to wheat aphid. *Journal of Northwest A&F University* (*Nat. Sci. Ed.*), 41(8): 195–201. [王春平, 赵惠燕, 朱启迪, 罗坤, 2013. 小麦抗麦长管蚜相关基因的差异表达与鉴定分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版) , 41(8): 195–201.]

Wang H, Zhang M, Zhang XH, Xia LQ, 2012. RNAi technology was used to silence aphids of wheat and peach aphis cytochrome P450. *Chinese Agricultural Science*, 45(17): 3463–3472. [王晖, 张珉, 张小红, 夏兰琴, 2012. 利用 RNAi 技术沉默麦长管蚜与桃蚜细胞色素 P450. 中国农业科学, 45(17): 3463–3472.]

Wang WL, Liu Y, Ji XL, Wang G, Zhou HB, 2008. Effects of intercropping garlic or rape on population dynamics of aphid and its main natural enemies in wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(6): 1331–1336. [王万磊, 刘勇, 纪祥龙, 王光, 周海波, 2008. 小麦间作大蒜或油菜对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. 应用生态学报, 2008(6): 1331–1336.]

Wu KM, Lu YH, Wang ZY, 2009. Research status and prospect of integrated pest control in agriculture in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(6): 831–836. [吴孔明, 陆宴辉, 王振营,

2009. 我国农业害虫综合防治研究现状与展望. 昆虫知识, 46(6): 831–836.]

Wu XH, Cárcamo AH, Pang BP, 2016. Research progress of *Cephus pygmaeus*. *Plant Protection*, 42(4): 18–26. [吴秀花, Cárcamo A. Héctor, 庞保平, 2016. 麦茎蜂研究进展. 植物保护, 42(4): 18–26.]

Wu YQ, Jiang YL, Duan Y, 2008. Monitoring methods evaluation of *Sitodiplosis mosellana*. *Henan Agricultural Science*, (8): 98–100. [武予清, 蒋月丽, 段云, 2008. 小麦吸浆虫监测方法评价. 河南农业科学, (8): 98–100.]

Wu YQ, Miao J, Gong ZJ, Duan Y, Jiang YL, Li T, 2014. Biology, ecology and control research progress of *Sitodiplosis mosellana*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1450–1458. [武予清, 苗进, 巩中军, 段云, 蒋月丽, 李彤, 2014. 小麦吸浆虫的生物学、生态学及防治研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1450–1458.]

Xie HC, Chen JL, Cheng DF, Zhou HB, Sun JR, Liu Y, Francis F, 2012. The function of ecological regulation to aphids in the wheat intercropping field. *Plant Protection*, 38(1): 50–54. [解海翠, 陈巨莲, 程登发, 周海波, 孙京瑞, 刘勇, Francis Frederic, 2012. 麦田间作对麦长管蚜的生态调控作用. 植物保护, 38(1): 50–54.]

Xu QF, Tian F, Chen XH, Wen S, Li LC, Du LP, Xu HJ, Xin ZY, 2004. Inheritance of sgna gene and insect-resistant activity in transgenic wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 30(5): 475–480. [徐琼芳, 田芳, 陈孝侯, 文胜, 李连城, 杜丽璞, 徐惠君, 辛志勇, 2004. 转基因抗虫小麦中 sgna 基因的遗传分析及抗虫性鉴定. 作物学报, 30(5): 475–480.]

Xu QX, Lopes T, Hatt S, Francis F, Chen JL, 2016. Effects of two volatile chemical pheromones and wheat-pea intercropping on aphids. 2016 Annual Meeting of Chinese Plant Protection Society. Chengdu. 501. [徐庆宣, Lopes Thomas, Hatt Severin, Francis Frederic, 陈巨莲, 2016. 两种挥发性化学信息素与小麦-豌豆间作协同作用对蚜虫的生态调控. 中国植物保护学会 2016 年学术年会. 成都. 501.]

Xue MY, 2015. The influence of environmental factors on the occurrence degree of the mite and the prevention and control measures. *China Plant Protection*, 35(4): 49–51. [薛敏云, 2015. 环境因子变化对麦岩螨发生程度的影响及防控措施初探. 中国植保导刊, 35(4): 49–51.]

Yang L, Xu L, Liu B, Lu YH, 2016. Effects of landscape pattern on the occurrence of adybeetles in wheat fields in northern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 612–620. [杨龙, 徐磊, 刘冰, 陆宴辉, 2016. 农田景观格局对华北地区麦田早期瓢虫种群发生的影响. 应用昆虫学报, 53(3): 612–620.]

Yang L, Zeng YD, Xu L, Liu B, Zhang Q, Lu YH, 2018. Change in ladybeetle abundance and biological control of wheat aphids over time in agricultural landscape. *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, 255(3): 102–110.

Yang PL, 1959. Research and Control of the Wheat Blossom Midge. Opera Entomologica. Beijing: Science Press. 193–211. [杨平澜, 1959. 小麦吸浆虫的研究与防治. 昆虫学集刊. 北京: 科学出版社. 193−211.]

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.]

Yin J, Chen JL, Cai YZ, Li KB, Hu Y, Sun JR, 2005. Wheat resistance induced by exogenous chemicals to the wheat aphid, *Sitobion avenae* (F.) and the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 48(5): 718–724. [尹姣, 陈巨莲, 曹雅忠, 李克斌, 胡毅, 孙京瑞, 2005. 外源化合物诱导后小麦对麦长管蚜和粘虫的抗虫性研究. 昆虫学报, 48(5): 718–724.]

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.]

Yu HL, Li LM, Zhang SC, Yu Y, Zhang AS, Li LL, Zhou XH, Zhuang QY, Men XY, Ye BH, 2014. Effect of suppression of natural enemies on wheat aphids using enclosures in wheat fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 107–113. [于汉龙, 李林懋, 张思聪, 于毅, 张安盛, 李丽莉, 周仙红, 庄乾营, 门兴元, 叶保华, 2014. 应用罩笼法定量评价天敌对麦蚜的控害作用. 应用昆虫学报, 51(1): 107–113.]

Yu XP, Hu C, Heong KL, 1996. The effects of non-crop habitats on crop. *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.]

Zeng J, Jiang YY, Wang HY, Yuan GH, Dong BX, Qin YX, 2014. The biological characteristics of *Agriphila aeneociliella* and methods for monitoring and managing this pest. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 814–818.[曾娟, 姜玉英, 王海英, 原国辉, 董保信, 秦引雪, 2014. 白眉野草螟的生物学特性和监测防控对策. 应用昆虫学报, 51(3): 814–818.]

Zhang J, Yang HM, Lin JS, Wang GX, Wang YF, Wang J, 2002. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentrations on population dynamics of the wheat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.). *Acta Entomologica Sinica*, 45(4): 477–481. [张钧, 杨惠敏, 林久生,

王根轩, 王亚馥, 王静, 2002. 大气二氧化碳浓度变化对禾谷缢管蚜种群动态的影响. 昆虫学报, 45(4): 477–481.]

Zhang XS, Cao YS, Cao KQ, 2006. Management of pests on crops under the conservative farming system. *Plant Protection*, 32(2): 19–22. [张雪松, 曹永胜, 曹克强, 2006. 保护性耕作条件下河北粮食作物植物保护新问题和治理对策. 植物保护, 32(2): 19–22.]

Zhang XZ, Zhang X, Song X, Yu ZR, Liu YH, 2018. Effects of vegetated field margins on the distribution of epigaeic carabid beetles and spiders and aphid development in adjacent wheat fields. *Acta Ecologica Sinica*, 38(23): 8442–8454. [张旭珠, 张鑫, 宋潇, 宇振荣, 刘云慧, 2018. 植被边界带对相邻麦田地表步甲和蜘蛛分布及蚜虫发生的影响. 生态学报, 38(23): 8442–8454.]

Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF, 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third-generation armyworm *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 1–8. [张云慧, 张智, 姜玉英, 曾娟, 高月波, 程登发, 2012. 2012 年三代黏虫大发生原因初步分析. 植物保护, 38(5): 1–8.]

Zhang YS, Ouyang F, Men XY, Ge F, Yuan ZM, 2018. Effects of regional agricultural landscape pattern on the community of ladybeetles in wheat fields. *Acta Entomologica Sinica*, 61(4): 468–476. [张永生, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 袁哲明, 2018. 区域农田景观格局对麦田天敌瓢虫群落的影响. 昆虫学报, 61(4): 468–476.]

Zhang Z, Zhang YH, Cheng DF, Sun JR, Jiang JW, Yang LX, Liang XZ, 2012. Impacts of different tillage practices on population dynamics of the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(5): 612–617. [张智, 张云慧, 程登发, 孙京瑞, 蒋金炜, 杨龙显, 梁相志, 2012. 耕作方式对麦红吸浆虫种群动态的影响. 昆虫学报, 55(5): 612–617.]

Zhao ZH, Hui C, Hardev S, Ouyang F, Dong Z, Ge F, 2014. Responses of cereal aphids and their parasitic wasps to landscape complexity. *Journal of Economic Entomology*, 107(2): 630–637.

Zhao ZH, Ouyang F, Men XY, Liu JH, He HD, 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, Reddy GVP, Hui C, Li BL, 2016. Approaches and mechanisms for ecologically based pest management across multiple scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230(16): 199–209.

Zhao ZH, Shi Y, He HD, Hang J, Zhao YS, Wang Y, 2010. Population dynamics of wheat aphids in different agricultural landscapes. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6380–6388. [赵紫华, 石云, 贺达汉, 杭佳, 赵映书, 王颖, 2010. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. 生态学报, 30(23): 6380–6388.]

Zhou H, Chen L, Liu Y, Chen J, Francis F, 2016. Use of slow-release plant infochemicals to control aphids: A first investigation in a Belgian wheat field. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep31552.