



评述

多尺度空间下害虫生态调控理论与应用

赵紫华^{①②}, 高峰^①, 贺达汉^③, 戈峰^②

① 中国农业大学农学与生物技术学院昆虫学系, 北京 100193;

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

③ 宁夏大学农学院, 银川 750021

E-mail: zhzhao@cau.edu.cn

收稿日期: 2015-02-27; 接受日期: 2015-05-28; 网络版发表日期: 2015-08-11

国家自然科学基金(批准号: 31400349, 31260429, 31101491)和中央高校基本科研业务费(批准号: 2015QC013)资助项目

doi: 10.1360/N052014-00314

摘要 不同尺度空间下农田生态系统具有不同的生境斑块组成结构, 尺度性也是生态系统的重要特征之一. 近年来, 北美和欧洲等地区用农田生境管理与区域性景观设计相结合的研究方法实施多尺度空间下害虫生态调控, 实现复合生态系统服务. 其核心思想是以大区域景观设计和农田作物布局与农事管理的有机结合, 通过农业景观格局的空间配置, 调节种植模式、管理技术、乃至改变农业景观格局的空间配置等以切断害虫种群的生活史, 建立和恢复天敌种群库与转移通道, 从而最大程度地提高农业生态系统自身的控害功能. 近年来, 北美和欧洲对多尺度空间下农业复合生态系统服务功能都做了大量工作, 尤其是田间尺度与景观尺度相结合的研究方法更是当前生境管理研究的重要内容. 本文总结了多尺度空间下生态系统环境条件与天敌种群间的作用机制及假说, 包括田间尺度上主要通过轮作与间套作、覆盖作物、减免耕及发展有机农业等方式提高天敌种群, 景观尺度上通过生境斑块的空间配置来改变植物资源布局, 最终提高天敌的控害作用. 以期为深入地解析景观格局及复杂性对生物多样性的影响, 揭示农业景观变化对昆虫种间关系的作用机制, 在实践上为利用农田景观格局控制害虫种群发生提供新的途径与方法.

关键词斑块
生境管理
生物多样性
生物防治
生活史

农业景观是多种生境斑块及廊道组成的空间镶嵌体, 这种空间镶嵌体格局及演化过程与其昆虫种群及群落发生形成了长期的互作和协同进化关系^[1,2]. 半个世纪以来, 全球性农业景观发生了显著变化, 包括土地利用类型变化与地表植被的快速演替、农业生产水平的提高与管理措施的改进, 以及农田环境质量与土壤营养的改变等. 这些变化给农田生物多样性造成了极大威胁^[3,4], 同时导致了害虫猖獗暴发^[5].

为此, 研究全球景观格局变迁与气候变化背景下的害虫生态调控是当前乃至未来农业可持续发展的重要方向^[2,6].

随着农业现代化发展, 我国农业生产已由单一的粮食生产向多种经济导向的立体化生产发展, 区域化立体式复合农业形成了大尺度范围的复合型农业结构体, 亦形成了复杂的天敌和害虫系统^[7,8]. 长期以来, 害虫生态调控研究主要是在农田尺度上的

引用格式: 赵紫华, 高峰, 贺达汉, 等. 多尺度空间下害虫生态调控理论与应用. 中国科学: 生命科学, 2015, 45: 755–767

Zhao Z H, Gao F, He D H, et al. Ecologically based pest management at multiple spatial scales. SCIENTIA SINICA Vitae, 2015, 45: 755–767, doi: 10.1360/N052014-00314

农田生态系统中进行的, 主要体现在农田生态系统内的作物耕作与栽培、品种组合与布局、农事操作与管理、天敌保护与害虫防治等的有机结合, 以实现害虫种群调控^[9-11]。受空间范围的影响, 多数农田尺度上的害虫综合治理措施在大区域内应用推广往往受到限制。在检验不同农田生态系统模式中天敌对害虫控制的有效性和持续性时, 研究大尺度农田景观格局对害虫生态调控的影响变得尤为重要^[12,13]。同时, 大尺度景观条件下的害虫控制研究在实际中受客观条件的影响, 应用上有一定局限性, 如景观组成在田间尺度上并不具备可操作性等^[14]; 再加之不同的天敌类群对景观格局响应的空间尺度也存在很大差异^[15]。近年来, 随着 3S(remote sensing, RS; geography information systems, GIS; global positioning systems, GPS)技术在农业生产上的广泛应用, 为在景观或区域尺度上研究生态环境与害虫发生关系提供了技术支撑。因此, 对于景观水平上复合生态系统下的害虫与天敌关系研究需要进行多尺度空间的景观规划与设计^[1,16], 开展多尺度空间下天敌的控害作用研究将是今后害虫生态调控的重要方向之一^[17,18]。本文在总结前人工作的基础上, 提出其理论体系及设计途径, 并以国内外研究实例进行了应用的可行性分析。

1 多尺度空间农业景观下害虫生态调控的生态学理论基础

多尺度空间是指农业景观在不同空间尺度上的结构与功能复合体。广义地讲, 包括景观范围内生境斑块格局的演变过程与生境质量的动态变化。狭义上包括了景观尺度上的不同生境斑块的空间布局及拓扑特征和田间尺度上微生境的结构与质量变

化^[19,20]。前者主要指景观水平上的土地利用形式、生境斑块类型、分布、排列、廊道及组成特征; 后者主要指田块基础上的作物耕作与栽培模式、品种搭配与布局、田间农事管理措施的实施动态, 涵盖了杀虫剂、除草剂、杀菌剂、肥料等的使用^[21,22]。多尺度空间下的害虫生态调控是在景观尺度上大生境斑块的静态布局和田间尺度上局域碎块的动态布局, 以及其功能的有效结合, 通过不同农业生态系统的整体布局与微环境调控, 维护区域性农田生态系统的生物多样性, 达到控制害虫种群, 以实现区域性农业生产高效、环境友好以及社会和谐的目的^[23-25]。

已报道的天敌控害作用机制和假说见表 1。很多学者从不同角度解释了农业生态系统中害虫种群生态治理的可行性, 包括资源密度假说、天敌控制假说、辅助防御假说、保险假说、以及“推-拉”假说和屏障假说等^[1,4,32]。实践证明, 这些假说也同样能应用于检验景观尺度上天敌对害虫种群的控害作用。Kruess^[12]证明作物-害虫系统不仅受小尺度田间生境的影响, 而且受大空间尺度农业景观复杂性和斑块格局的影响更显著。Schmidt 等人^[32]研究发现, 天敌对害虫的控害作用存在空间尺度效应; 其中, 有些天敌类群受田间尺度特征的影响, 而有些类型则受景观尺度特征的影响。田间和景观尺度的特征均能对害虫及其天敌产生重要影响。田间尺度上主要是改变害虫与天敌的营养和微环境等; 景观尺度上主要是改变害虫与天敌的转移寄主、越冬场所、食物等资源的空间配置^[33-35]。农业生态系统中, 害虫种群暴发通常能通过改变农业生态系统结构和环境加以控制, 这种通过农业景观规划设计与农事操作的策略能够调节天敌群落, 进而发挥对害虫种群的控制作用^[36,37]。这种景观区划设计和农田农事操作相结合的多尺度空间下的生境管理是害虫综合治理(integr-

表 1 植物-害虫-天敌关系的重要假说以及内涵机制

假说	内涵与机制
资源密度假说(resource concentration hypothesis)	植食性昆虫更倾向定位或栖息在密度较高或单一寄主植物生境 ^[26]
天敌控制假说(natural enemy hypothesis)	多样化的植物群落能够增加天敌种群, 从而更有效地控制害虫 ^[26,27]
辅助防御假说(associate resistance hypothesis)	非寄主植物能够通过释放化学物质产生“气味掩盖”作用, 使寄主不易被害虫搜索定位 ^[28,29]
保险假说(insurance hypothesis)	大量的非优势天敌在生态系统中作为害虫种群控制的保险种类, 在优势天敌种群下降时能够及时弥补生物控害作用 ^[18]
推-拉假说(pull-push hypothesis)	采用化学生态学原理, 利用驱虫植物排斥害虫与诱集植物吸引天敌结合形成推拉策略 ^[30]
屏障假说(barrier hypothesis)	农业景观中采用较高的非寄主植物来阻止害虫在多个生境之间的扩散和危害 ^[28,31]

ated pest management, IPM)的深化与深入, 亦能形成高效的经济效益和良好的可持续宏观生态环境, 是一种有害生物可持续控制的新思想与途径^[38-40].

2 害虫生态调控的多尺度空间景观设计途径与应用

2.1 农田尺度下害虫种群的生态调控

田块空间尺度特征主要指田块尺度上的垂直效应, 或者称景观的动态效应, 主要影响害虫及其天敌的物种组成、分布以及种群动态. 主要体现在土地微环境特征、作物布局及农事操作与管理对害虫及其天敌种群产生的重要影响^[41,42]. 技术上, 田间设计的主体是作物品种搭配与布局、农事操作与管理, 包括耕作模式、栽培模式、管理模式以及化学药剂和肥料的使用等^[43,44]. 田间设计的指导思想除着重于农产品的高产、优质与高效, 农业措施的合理性、可控性与操作的可行性外, 还充分考虑到不同害虫或者天敌种类的发生规律、为害特点、扩散特征及生活史过程等, 并充分利用种群在时空上的转移规律, 以 IPM 引导或干扰害虫的空间转移过程, 联通天敌库资源, 切断害虫生活史过程, 最大程度地发挥农业生态系统对害虫种群的有效与可持续控制^[45-47]. 同时, 亦要考虑到整个成本投入, 包括对环境造成的污染等, 以采用最优的田间管理模式来实现害虫种群的可持续控制^[48,49].

田块尺度设计的主体思想是改善农田作物的生境质量, 包括地上作物健康和地下土壤健康^[50,51]. 土壤健康是作物健康的基础, 也是各种害虫和天敌栖息的环境^[52]. Altieri 发现田间尺度上通过作物轮作、覆盖作物和品种搭配等措施能够极大地提高天敌的控害能力. 轮作不仅有利于充分利用土壤营养条件, 还能够打破害虫和病原菌的循环过程, 改善土壤结构, 降低害虫种群和病原菌数量, 提高作物健康水平^[53-55]. 免耕能够保持土壤墒情, 防止土壤侵蚀和水土流失, 并且能够恶化害虫的生存环境, 有效降低害虫为害. 覆盖作物同样能够增加植物盖度, 提高土壤湿度, 改善地表捕食性天敌的生存条件, 最终提高农业生态系统的自身控害能力^[56,57]. 间套作技术也是充分利用营养与空间, 改善土壤结构, 调控害虫种群的有效方法. 另外, 农田营养管理也是影响害虫及

其天敌发育速率的重要方面, 尤其是作物营养的改善能大大增加害虫的发育速率, 造成了害虫种群的持续暴发; 杀虫剂、化学肥料的大量使用能影响农田生态系统中的天敌群落组成变化和害虫种群波动过程^[58,59]. 此外, 有机农业以及管理模式也能提高土壤健康和作物健康, 加速农业生态系统的物质能量循环, 同时改善天敌的生存环境, 增加对害虫的控害能力^[60,61].

2.2 景观尺度下害虫种群的生态调控

景观空间尺度特征主要指景观或区域范围内的生境斑块格局与功能动态. 理论上, 它包括大区域静态结构和动态功能的结合, 实践上, 则多体现为静态布局上的结构功能作用^[62,63]. 其主要作用是对害虫及其天敌的分布、扩散与阻隔及种群动态造成重要的影响, 主要体现在农业景观的空间格局直接形成各种生境斑块和资源的空间配置结构功能^[64,65]. 利用景观格局的空间配置和布局能为天敌提供避难所或转移寄主, 并消除害虫的越冬场所和转移寄主, 阻断害虫的大规模扩散与蔓延, 能够有效提高害虫的生物防治^[51]. 例如, 我国北方的水旱田区域性的年际轮作, 农田防护林地的布局与管理, 粮食作物与牧草作物的区域布局, 农牧交错区休闲地的分布与利用等. Thies 等人^[66]研究认为, 通过农业景观格局的设计改造, 增加非作物生境的比例, 改变生境斑块之间的排列组合等都能够提高天敌对麦蚜(*Sitobion avenae* (Fabricius))的控害作用. Tscharrntke 等人^[1]发现, 通过改变农业景观中的斑块组成能够有效提高天敌的控害作用, 实现害虫的生态治理. 农业景观中非作物生境的组成和格局能够影响多种天敌的分布, 进而影响害虫的种群控制. 很多研究表明, 农业景观中的自然和半自然生境是生物多样性的热点地区, 通常也是天敌资源库, 能够为农田输送大量的天敌资源, 而且在作物收获后还能提供转移寄主维持天敌存活. 通过农业景观中各种生物斑块的空间配置和人为设计, 都能够明显改善农业生态系统的生物多样性, 进而提高害虫种群的生态治理水平^[67].

景观尺度上规划主体思想是改变农业景观中斑块的空间配置和排列格局, 包括作物生境和非作物生境的组成与布局, 目标作物与非目标作物的空间布局等^[68]. 空间异质性是农业景观(区域)空间斑块配置的核心问题, 作物生境质量通常存在巨大变异, 生

长期能够为天敌提供丰富的食物资源,而收获期天敌只能转移到其他生境。天敌在作物生境中都具有非全周期性特点,因此多种生境的农业景观能够为天敌提供必要的转移寄主或者猎物,并为天敌提供避难所和越冬场所等^[40]。通过空间配置来改善天敌在景观中的扩散通道,降低转移过程中的死亡率,同时通过斑块组成来封闭害虫在景观中的转移通道,将害虫封闭在一定的空间范围,采用上行策略(bottom-up strategy)和下行策略(top-down strategy) 2种策略进行害虫种群调控^[4]。

农业景观结构与天敌控害作用的关系目前尚存在一些争议,但总体上这种相互关系还是被广泛支持和认可的^[1]。这些研究大多通过卫星影像解析农业景观格局组成,把农田景观复杂性、非作物生境的比率和连通度等作为研究害虫-天敌关系的重要指标,配合地面生物数据采集,然后分析景观复杂性演变与害虫及天敌间的定量关系,这也逐步成为研究利用农业景观格局实现害虫种群可持续控制的新方法^[69]。

2.3 多尺度空间特征与害虫种群生态治理的关系

多尺度的景观空间特征强调的是景观大尺度和田块碎块尺度相结合的生境组成与排列空间的复杂性与异质性,即在大尺度空间内形成了一种“马赛克”镶嵌体景观,在“马赛克”体内,适时适地实施有效农事操作,造成生境界面上物种的流动与扩散,阻断害虫生活史,联动天敌库天敌的“溢出”与扩散,进

而影响害虫及其天敌生长、交配和繁殖^[70],达到对害虫与其天敌复合体的结构与功能的优化,实现综合治理目的。许多研究表明,田间农事操作与景观格局过程是影响害虫种群可持续控制的重要方面,田间农田特征与景观格局共同形成了动态的空间镶嵌体,这种空间镶嵌体对害虫及其天敌有着显著影响^[70,71]。不同尺度空间下农业景观具有不同的生境组成和结构特征,而且不同昆虫类群对空间镶嵌体的响应也有很强的种间特异性^[72,73]。

多尺度空间特征是农业生态系统最重要特征之一,不同空间尺度下物种的扩散规律也是影响天敌控害作用的一个关键因素,因此多尺度空间下研究天敌分布特征和种群扩散规律是其研究的一项重要内容^[73,74]。因此,研究害虫及其天敌在多尺度空间内的分布,并根据边缘效应与“溢出”效应等理论,利用合适的农事操作来形成天敌在农田内部及景观中的自由扩散与分布,是研究多尺度空间下斑块组成和排列对天敌控害作用的重要方面。另一方面,田间农事操作与景观格局配置,通常是驱动害虫及天敌种群的两大重要因子,同时也是农业生态系统中天敌控制研究的关键^[75-77]。尤其是农田尺度与景观尺度的结合下形成地上的作物健康和地下的土壤健康来全面调控害虫-天敌种群,最终实现复合的生态系统服务(图 1)^[78]。可持续性害虫生态调控的中心,全面综合的生态学和环境学观点是 2 个基本点,复合生态系统服务作为评价指标和手段,来全面地调控生态系统和实现生态系统功能。

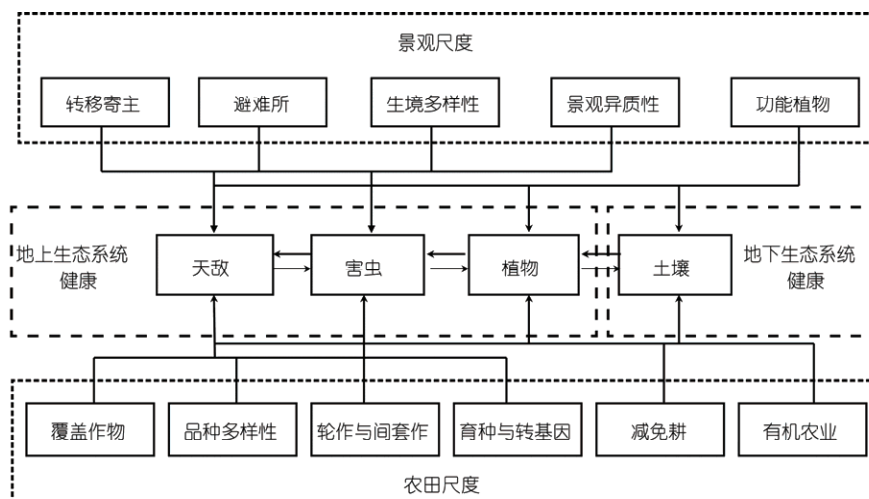


图 1 农田尺度与景观尺度下多种策略调控土壤-作物-害虫-天敌系统

景观复杂性的增加通常能够促进天敌的控害作用, 但与空间尺度有很强的交互作用; 此外, 田间尺度与景观尺度的管理通常也存在很强的交互作用^[1]. 关键是农事措施的合理实施和利用, 例如, 适时的苜蓿刈割是利用苜蓿(*Medicago sativa*)的天敌控制棉田害虫的关键^[79]. 其次, 还需要利用物种特异性, 这种特异性体现在对空间尺度的响应不同. Thies 等人^[66]认为, 扩散能力强的捕食性天敌对景观格局响应的空间尺度较大, 而扩散能力较弱的寄生性天敌对景观格局响应的空间尺度则较小, 并发现 500~1000 m 的空间范围进行景观格局设计是提高寄生蜂种群的最优生态尺度, 即不同天敌类群表现出明显的“空间尺度效应”. 因此, 多尺度空间下需要进行不同大小生境斑块和生境类型的空间组合排列, 形成空间“马赛克镶嵌体”, 最终达到害虫种群的生态治理^[80,81].

3 应用实例

3.1 美国农业生态系统管理

2003 年美国密歇根州进行了一系列的功能植物筛选和生境管理研究工作. 这些地区主要栽培玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、小麦(*Triticum aestivum*)和牧草, 高度单一化与高度异质化的农业景观并存. 为建立和恢复生态系统功能, 当地政府和学者共同构建了以生态重建为目的的多尺度农业生态系统, 以提高农业生态系统的可持续性^[3]. 期间, 筛选了 43 种多年生本地草本植物与 5 种一年生引进种, 调查发现 24 种本地植物能够起到良好的诱集天敌效果, 且植物诱集作用与花期时间显著相关, 花期较长的植物诱集功能更为明显^[82]. 不同时期不同植物种类在功能上也存在较大差异, 主要是由于物候期的不同, 如本地种类通常花期持续时间长且开花量较低, 从而能在较长时间内发挥作用, 而引进种类开花量较大, 能在一定时期内为天敌提供大量食物资源^[83]. 此外, 研究者还在农田边界进行了功能植物的斑块化种植, 作为天敌的避难所和食物来源, 有效提高了天敌对害虫种群的控害能力^[84]. 功能植物(如伴生植物、驱虫植物、屏障植物、指示植物、诱集植物、虫源植物及银行植物)的筛选是美国生境管理研究的重要内容^[28].

技术方面, 在田间采取一系列的管理措施, 如轮

作与间套作、覆盖作物、减免耕以及有机种植等, 显著提高了作物健康和土壤健康; 景观上增加非作物生境的斑块比例, 建立天敌栖息和越冬的保护性生境, 并且针对不同的类群采取针对性措施. 同时, 景观上注意剔除害虫的转移寄主, 有效降低害虫的越冬种群, 在多尺度空间下提高农业生态系统的健康和对害虫的预防能力^[85]. Altieri^[86]利用这些技术在多种生态系统中进行了大量的探索性试验研究, 目前这些管理措施只在部分有机种植园内得到全面应用, 虽然有时产量稍有降低, 但复合的生态系统服务功能显著提高, 尤其在生态和经济方面都取得了巨大收益. 因此, 这些技术措施也逐步向传统种植的农田、果园和其他农业生态系统推进实施.

3.2 新西兰农业生态系统管理

新西兰是以农牧业为主的国家, 随着农业机械化和农业科技发展, 整个景观发生了巨大转变, 农业生态系统呈现了高度单一化趋势, 如葡萄(*Vitis vinifera*)的单一化种植而大量破坏本地植被和开发草地, 导致葡萄病虫害发生日趋严重, 大规模使用除草剂等来提高产量的同时导致生产效益和效率降低. 近年来, 新西兰政府大力实施大尺度研究保护计划, 在葡萄园景观中恢复和种植部分本地的功能植物^[87]. 如新西兰的基督城北部怀帕拉地区是葡萄种植的重要地区之一, 过去钻蛀性害虫苹果蠹蛾的为害非常严重, 主要种类为苹浅褐卷蛾(*Epiphyas postvittana* (Walker)), 而一种本地植物 *Dolichogenidea tasmanica* (Cameron)的花粉能够为苹果蠹蛾的寄生蜂提供重要的食物资源. 在葡萄园内或者相邻的生境中种植这种植物, 能够为天敌提供有效的栖息环境和避难所, 从而提高害虫种群的生态治理^[88]. 此外, 在葡萄园采用覆膜技术能够打乱害虫的生活史, 最大程度降低害虫种群的发生为害, 是一种田间尺度上控制害虫的有效策略^[89]. 另外新西兰政府也在不同的研究尺度下推进不同的农业生态系统管理策略来全方位地提高生态系统服务, 包括其他特有功能植物提供的生态系统服务, 如杂草控制、土壤调节维持、甲硫细菌功能的加强、生物多样性保护与生态旅游.

3.3 欧洲农业生态系统管理

欧洲的土地管理较为成熟, 很多作物生态系统管理完全实现了智能化和机械化, 生产效率和产量

较高^[18]。在大多数地区, 包括地中海地区、北欧地区以及英国, 大多数农业生态系统都是高度集约化, 且作物种植高度单一化, 但在提高单产和总产量方面取得巨大成绩的同时也丧失了大量其他生态系统服务功能, 如生物多样性丧失, 尤其是鸟类和蜜蜂种类多样性的剧烈下降^[90]。因此, 欧洲联盟制定了共同农业计划(Common Agriculture Policy), 这一计划在1988年开始实施, 其中包括在整个农业生态系统中留出5%~15%的耕地作为休闲地, 这种休闲地不仅可以恢复土壤健康和肥力, 也能够提高生物多样性和害虫种群的可持续控制^[25]。具体实施是在整个农业景观中有目的地构建休闲地组成的斑块格局, 并分散在整个农业景观中。各国政府都为本国休闲地进行财政补贴, 用于鼓励那些利用休闲地来提高生物多样性和生态系统服务的农场主^[25]。

Tscharntke 等人^[18]曾对这种休闲地的景观格局做了大量工作, 发现10%左右的预留地对生物多样性保护非常重要, 尤其在土壤种子库丰富的情况下能够很快地建立物种丰富度较高的自然生境。休闲地杂草群落在前两年的演替中甚至还能出现少量稀有植物种类和植食性昆虫, 同时还能保护很多鸟类和小型哺乳动物, 欧洲联盟也提供了24种混合植物种类来进行本地生态系统重建和恢复。从田间尺度上升到景观尺度后, 休闲地管理措施在简单或集约化景观中更为有效, 能够有效提高生物多样性和生态系统服务功能^[25,91]。因此, 在作物生境占优势的农业景观中, 改进的休闲地管理能够有效提高害虫种群的可持续性。瑞士、芬兰和德国等一直采用财政补贴来进行休闲地管理, 其生物多样性得到了明显的增加, 也极大地提高了农业生态系统的可持续性。

4 我国害虫生态调控的模式、指导思想及发展

害虫种群治理是我国农业昆虫学研究的核心问题, 过去曾经提出了多种实现途径和指导思想, 包括经典IPM方法和“预防为主, 综合防治”的植物保护方针。在全球变化背景下, 世界范围内农业生态系统与气候条件都在发生巨大变化。近年来, 由于作物轮作、农业布局调整, 耕作模式改变等, 我国农业管理措施和土地覆盖类型也发生了巨大变化, 同时形成了多尺度空间下生态斑块的动态演化过程, 这种动

态演化过程强烈地驱动着害虫-天敌系统, 并导致害虫种群的为害特征发生了巨大转变^[92]。因此, 研究多尺度空间下害虫种群的生态治理也是农业可持续发展的必然趋势与需要。多尺度空间下的害虫生态调控以景观区域内的土壤-作物-害虫-天敌系统为研究对象, 进行农业景观格局的设计和农田质量的管理, 田间尺度上提升土壤健康与作物健康水平, 景观尺度上以多生境斑块的合理布局, 加强天敌的流通和扩散, 阻断害虫的生活史, 实现害虫种群的生态调控与环境质量保障^[2]。3S技术的发展为开展多尺度下害虫生态调控的景观规划提供了技术支撑与保障。而且还应以农学、生态学与地理信息学等多学科交叉, 开展更广泛的生态试验研究, 推动本思想理论和技术的深入发展^[53]。

利用多种技术原理形成多生境中天敌流动或“溢出”是多尺度下害虫生态调控机理的关键, 但这些多尺度的空间特征究竟是如何影响昆虫的物种组成、分布及动态的都还不清楚^[81]。虽然我国多尺度空间下农业管理和生境斑块空间配置对害虫种群研究还很缺乏, 但这些都为害虫生态调控提供了重要的机遇和挑战^[93]。欧美学者指出, 不同空间尺度下景观格局和过程能够强烈影响害虫种群及其天敌的控害作用, 但有关研究并不完善, 大多试验仅简单地采用捕食率或寄生率作为天敌控害的指标, 或者采用天敌/害虫比例作为控害作用的量度, 这些都不是准确评价天敌控害能力的有效方法^[94,95]。甚至有些研究并没有发现景观格局组成与某些天敌类群之间的相关性, 其中非常重要的原因可能是空间尺度选取的问题, 这些研究都没有在多尺度空间的条件下进行。这表明大尺度农业景观中害虫种群的可持续控制还需要更为细致和全面的工作, 这也是目前全球变化和农业可持续发展背景下的有害生物综合治理的迫切要求^[3]。甚至有学者在多学科交叉的基础上提出了建立农业生态系统的生境斑块网络组成结构, 并且建立了一系列的操作法则来实现景观设计, 最终达到害虫种群的生态调控(图2)^[96-98]。

Rudner 等人^[99]曾提出了综合栅格模型 INGRID, 成功地用于草地景观中生态系统功能管理, 本文对此模型进行改进, 建立了多尺度空间下害虫生态调控理论框架。此框架由4个亚模型组成: (i) 生境模型, 采用农田尺度上生境类型与质量数据, 模型适合农田尺度上的害虫种类组成; (ii) 景观模型, 在不同

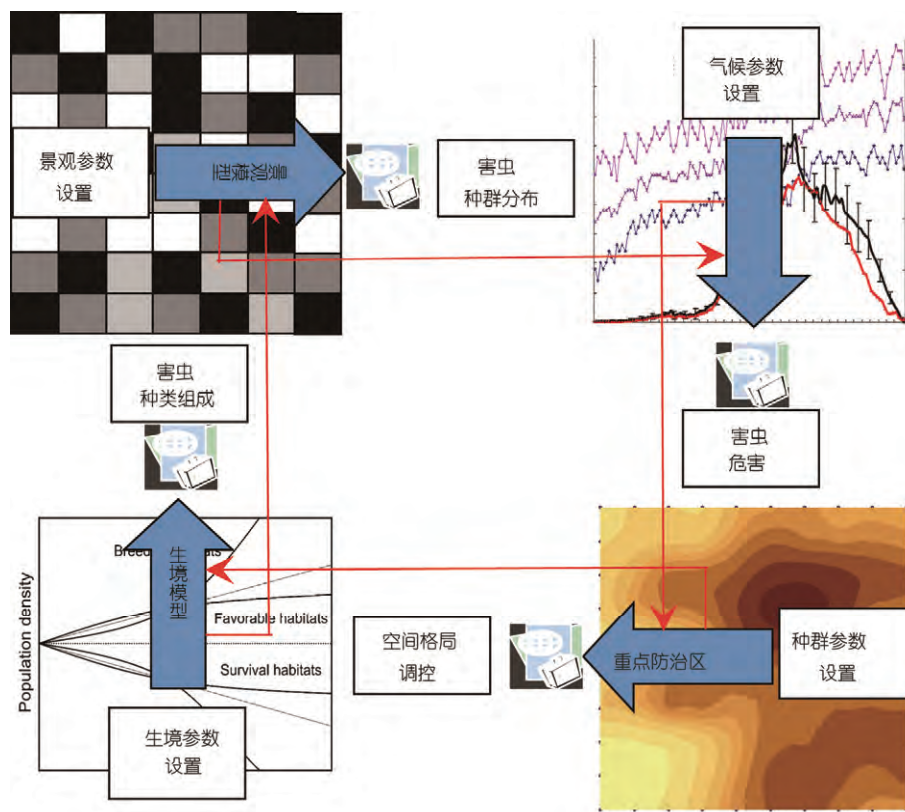


图2 害虫生态调控理论与技术框架图

生境类型组成的基础上,建立大尺度空间下害虫种群在农业景观中的空间分布格局;(iii) 预测模型,结合气候数据与环境条件,模拟害虫在农业景观中的危害情况以及造成的损失;(iv) 重点防治区,在景观模型和预测模型的基础上,找出农业景观中害虫易爆发的小区域或者生境斑块,并进行田间调整和景观改造,在多尺度空间下采用综合措施抑制害虫种群发生. 4 个亚模型组成一个既相互独立又相互影响的有机系统和循环体系,每个亚模型的技术方法略有不同,但互为基础,共同组成一个完整的体系,实现害虫生态调控.

害虫生态调控是一种生态战略,优先恢复生态系统自身的抗性,包括田间尺度上作物健康和土壤健康,同时在景观尺度上设置天敌的空间庇护所、转移生境以及越冬环境,最大程度地利用生态系统本身实现害虫生态调控. 虽然田间尺度与景观尺度上有关于害虫生态调控的技术方法及实例都有报道,但这些方法还需要有机地集成,建立害虫生态调控的完整体系. 尤其在我国特有的生态条件下,还需注

意因地制宜,考虑到经济、产量、生态、环境等诸多因素,结合我国的耕作传统(如间套作技术)充分利用空间、营养以及阳光,在平衡多种生态系统服务基础上,充分考虑作物营养与农事操作的可行性,通过多尺度空间下田间技术与空间格局的结合,达到害虫生态调控的目的^[100].

5 展望

害虫生态调控研究能够揭示多尺度空间下农业景观格局和过程对害虫种群控制的影响机制,是一种以复合生态系统服务为中心的生态经济技术,核心是提高农业生态系统和作物自身的健康程度和防卫能力^[101]. 农业生态系统是具有结构和功能的基本单元,尤其在研究生物群落关系的过程中,要采用多层次和多尺度的方法进行田间研究,也需要与多角度跨学科的理论模型相结合^[102]. 多尺度空间尤其其需要从田间尺度和空间尺度入手,详细研究每种害虫调控技术应用的范围和空间尺度,运用多种方法提

高农业生态系统的生物多样性和稳定性, 为害虫生态调控提供更有力的基础条件(图 3)。

多营养级的食物网研究同样是害虫生态调控的重要领域, 包括地上和地下食物网系统, 都形成了复杂的种间互作和营养关系。害虫生态调控理论重在调控整个食物网的能量流动和物质循环, 包括食物网中各种捕食、寄生、共生及拮抗等各种关系。这些都是需要通过局部-田间-景观尺度进行有梯度的景观复杂性研究, 在多尺度空间的景观中来实现多害虫种群生态治理, 这同时也是农业生态系统健康管理和可持续发展策略的迫切需要^[103,104]。这些研究在理论上能够揭示农业生态系统中害虫种群暴发及群落食物网关系的内在机制, 在实践上也能充分利用生态治理技术提供探索害虫种群控制的新途径与新方法, 最终实现农业生态系统的可持续发展^[105,106]。

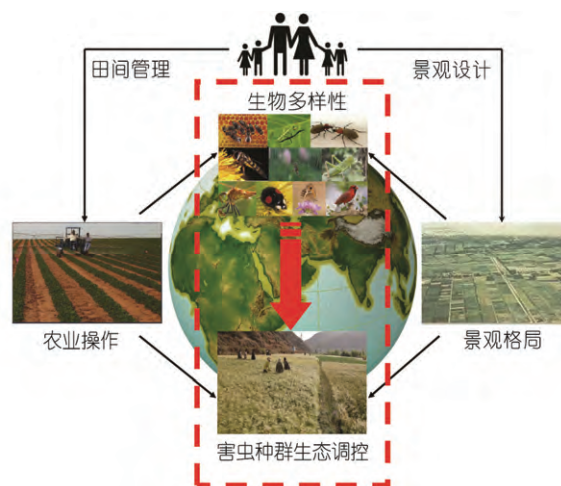


图 3 农业生态系统中害虫生态调控的思想和路径(网络版彩图)

参考文献

- 1 Tschamntke T, Tylianakis J M, Rand T A, et al. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes—eight hypotheses. *Biol Rev*, 2012, 87: 661–685
- 2 Thies C, Tschamntke T. Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science*, 1999, 285: 893–895
- 3 Brewer M J, Goodell P B. Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. *Annu Rev Entomol*, 2012, 57: 41–59
- 4 Landis D A, Wratten S D, Gurr G M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annu Rev Entomol*, 2000, 45: 175–201
- 5 Poveda K, Martinez E, Kersch-Becker M F, et al. Landscape simplification and altitude affect biodiversity, herbivory and andean potato yield. *J Appl Ecol*, 2012, 49: 513–522
- 6 Landis D A, Werling B P. Arthropods and biofuel production systems in North America. *Insect Sci*, 2010, 17: 220–236
- 7 Deguine J P, Ferron P, Russell D. Sustainable pest management for cotton production. A review. *Agron Sustain Dev*, 2008, 28: 113–137
- 8 Kausrud K, Okland B, Skarpaas O, et al. Population dynamics in changing environments: the case of an eruptive forest pest species. *Biol Rev*, 2012, 87: 34–51
- 9 Wilby A, Lan L P, Heong K L, et al. Arthropod diversity and community structure in relation to land use in the Mekong delta, Vietnam. *Ecosystems*, 2006, 9: 538–549
- 10 Dreyer J, Gratton C. Habitat linkages in conservation biological control: lessons from the land-water interface. *Biol Control*, 2014, 75: 68–76
- 11 丁岩钦. 论害虫种群的生态控制. *生态学报*, 1993, 12: 99–107
- 12 Kruess A. Effects of landscape structure and habitat type on a plant-herbivore-parasitoid community. *Ecography*, 2003, 26: 283–290
- 13 Roschewitz I, Gabriel D, Tschamntke T, et al. The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming. *J Appl Ecol*, 2005, 42: 873–882
- 14 戈峰. 害虫区域性生态调控的理论、方法及实践. *昆虫知识*, 2001, 38: 337–341
- 15 Zhao Z H, Hui C, He D H, et al. Effects of agricultural intensification on ability of natural enemies to control aphids. *Sci Rep*, 2015, 5: 8024
- 16 Zhao Z H, He D H, Hui C. From the inverse density-area relationship to the minimum patch size of a host-parasitoid system. *Ecol Res*, 2012, 27: 303–309
- 17 Kruess A, Tschamntke T. Habitat fragmentation, species loss, and biological-control. *Science*, 1994, 264: 1581–1584

- 18 Tschamtk T, Bommarco R, Clough Y, et al. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol Control*, 2007, 43: 294–309
- 19 Kuesel R, Gonthier D J, Cruz M, et al. Local management and landscape use intensity associated with a coffee leaf-chewing beetle. *Agroecol Sust Food*, 2014, 38: 532–540
- 20 Tylianakis J M, Binzer A. Effects of global environmental changes on parasitoid-host food webs and biological control. *Biol Control*, 2014, 75: 77–86
- 21 Loeuille N, Barot S, Georgelin E, et al. Eco-evolutionary dynamics of agricultural networks: implications for sustainable management. *Adv Ecol Res*, 2013, 49: 339–435
- 22 Massol F, Petit S. Interaction networks in agricultural landscape mosaics. *Adv Ecol Res*, 2013, 49: 291–338
- 23 Fisichelli N A, Abella S R, Peters M, et al. Climate, trees, pests, and weeds: change, uncertainty, and biotic stressors in eastern US national park forests. *Forest Ecol Manag*, 2014, 327: 31–39
- 24 Pawson S M, Brin A, Brockerhoff E G, et al. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers Conserv*, 2013, 22: 1203–1227
- 25 Tschamtk T, Clough Y, Wanger T C, et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biol Conserv*, 2012, 151: 53–59
- 26 Root R B. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecol Monogr*, 1973, 43: 95–120
- 27 Bianchi F J J A, Booij C J H, Tschamtk T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc Roy Soc B-Biol Sci*, 2006, 273: 1715–1727
- 28 Parolin P, Bresch C, Desneux N, et al. Secondary plants used in biological control: a review. *Int J Pest Manage*, 2012, 58: 91–100
- 29 Tahvanai J O, Root R B. Influence of vegetational diversity on population ecology of a specialized herbivore, *Phyllotreta cruciferae* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Oecologia*, 1972, 10: 321–346
- 30 Cook S M, Khan Z R, Pickett J A. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annu Rev Entomol*, 2007, 52: 375–400
- 31 Perrin R M, Phillips M L. Some effects of mixed cropping on the population-dynamics of insect pests. *Entomol Exp Appl*, 1978, 24: 585–593
- 32 Schmidt M H, Roschewitz I, Thies C, et al. Differential effects of landscape and management on diversity and density of ground-dwelling farmland spiders. *J Appl Ecol*, 2005, 42: 281–287
- 33 Kremen C, Miles A. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecol Soc*, 2012, 17: 40
- 34 Bell J R, Burkness E C, Milne A E, et al. Putting the brakes on a cycle: bottom-up effects damp cycle amplitude. *Ecol Lett*, 2012, 15: 310–318
- 35 Held D, Potter D A. Prospects for managing turfgrass pests with reduced chemical inputs. *Annu Rev Entomol*, 2012, 57: 329–354
- 36 Sivakoff F S, Rosenheim J A, Dutilleul P, et al. Influence of the surrounding landscape on crop colonization by a polyphagous insect pest. *Entomol Exp Appl*, 2013, 149: 11–21
- 37 Zhao Z H, Shi P J, Men X Y, et al. Effects of crop species richness on pest-natural enemy systems based on an experimental model system using a microlandscape. *Sci China Life Sci*, 2013, 56: 758–766
- 38 Vinatier F, Gosme M, Valantin-Morison M. A tool for testing integrated pest management strategies on a tritrophic system involving pollen beetle, its parasitoid and oilseed rape at the landscape scale. *Landscape Ecol*, 2012, 27: 1421–1433
- 39 Yemshanov D, Koch F H, Lyons D B, et al. A dominance-based approach to map risks of ecological invasions in the presence of severe uncertainty. *Divers Distrib*, 2012, 18: 33–46
- 40 Burgio G, Ragolini G, Petacchi R, et al. Optimization of agriotes sordidus monitoring in northern Italy rural landscape, using a spatial approach. *Bull Insectol*, 2012, 65: 123–131
- 41 Vasseur C, Joannon A, Aviron S, et al. The cropping systems mosaic: how does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agr Ecosyst Environ*, 2013, 166: 3–14
- 42 Rusch A, Bommarco R, Jonsson M, et al. Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale. *J Appl Ecol*, 2013, 50: 345–354
- 43 Macfadyen S, Cunningham S A, Costamagna A C, et al. Managing ecosystem services and biodiversity conservation in agricultural landscapes: are the solutions the same? *J Appl Ecol*, 2012, 49: 690–694
- 44 Wielgoss A, Clough Y, Fiala B, et al. A minor pest reduces yield losses by a major pest: plant-mediated herbivore interactions in Indonesian

- cacao. *J Appl Ecol*, 2012, 49: 465–473
- 45 Puech C, Baudry J, Joannon A, et al. Organic vs. conventional farming dichotomy: does it make sense for natural enemies? *Agr Ecosyst Environ*, 2014, 194: 48–57
- 46 Timprasert S, Datta A, Ranamukhaarachchi S L. Factors determining adoption of integrated pest management by vegetable growers in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. *Crop Prot*, 2014, 62: 32–39
- 47 Thorburn C. Empire strikes back: the making and unmaking of Indonesia's national integrated pest management program. *Agroecol Sust Food*, 2014, 38: 3–24
- 48 Stuart A M, Prescott C V, Singleton G R. Habitat manipulation in lowland rice-coconut cropping systems of the Philippines—an effective rodent pest management strategy? *Pest Manag Sci*, 2014, 70: 939–945
- 49 Tey Y S, Li E, Bruwer J, et al. The relative importance of factors influencing the adoption of sustainable agricultural practices: a factor approach for malaysian vegetable farmers. *Sustain Sci*, 2014, 9: 17–29
- 50 Szendrei Z, Bryant A, Rowley D, et al. Linking habitat complexity with predation of pests through molecular gut-content analyses. *Biocontrol Sci Technol*, 2014, 24: 1425–1438
- 51 Rand T A, Waters D K, Blodgett S L, et al. Increased area of a highly suitable host crop increases herbivore pressure in intensified agricultural landscapes. *Agr Ecosyst Environ*, 2014, 186: 135–143
- 52 Korthals G W, Thoden T C, van den Berg W, et al. Long-term effects of eight soil health treatments to control plant-parasitic nematodes and *Verticillium dahliae* in agro-ecosystems. *Appl Soil Ecol*, 2014, 76: 112–123
- 53 Thompson I D, Okabe K, Parrotta J A, et al. Biodiversity and ecosystem services: lessons from nature to improve management of planted forests for REDD-plus. *Biodivers Conserv*, 2014, 23: 2613–2635
- 54 Olanya O M, Larkin R P, Halloran J M, et al. Relationships of crop and soil management systems to meteorological variables and potato diseases on a russet burbank cultivar. *J Agric Meteorol*, 2014, 70: 91–104
- 55 Szalai M, Kiss J, Kover S, et al. Simulating crop rotation strategies with a spatiotemporal lattice model to improve legislation for the management of the maize pest *Diabrotica virgifera virgifera*. *Agr Syst*, 2014, 124: 39–50
- 56 Bryant A, Brainard D C, Haramoto E R, et al. Cover crop mulch and weed management influence arthropod communities in strip-tilled cabbage. *Environ Entomol*, 2013, 42: 293–306
- 57 Rosa S M, Kraemer F B, Soria M A, et al. The influence of soil properties on denitrifying bacterial communities and denitrification potential in no-till production farms under contrasting management in the Argentinean Pampas. *Appl Soil Ecol*, 2014, 75: 172–180
- 58 Haghighi R S, Critchley N, Leifert C, et al. Individual and interactive effects of crop type and management on weed and seed bank composition in an organic rotation. *Int J Plant Prod*, 2013, 7: 243–268
- 59 Wan N F, Ji X Y, Jiang J X, et al. A methodological approach to assess the combined reduction of chemical pesticides and chemical fertilizers for low-carbon agriculture. *Ecol Indic*, 2013, 24: 344–352
- 60 Miller N A, Henderson J J. Organic management practices on athletic fields. Part 2: the effects on playing surface characteristics and soil physical properties. *Crop Sci*, 2013, 53: 637–646
- 61 Meyling N V, Navntoft S, Philipsen H, et al. Natural regulation of *delia radicum* in organic cabbage production. *Agr Ecosyst Environ*, 2013, 164: 183–189
- 62 Morrison W R, Szendrei Z. Patterns of spatial and temporal distribution of the asparagus miner (Diptera: Agromyzidae): implications for management. *J Econ Entomol*, 2013, 106: 1218–1225
- 63 Lemessa D, Hylander K, Hamback P. Composition of crops and land-use types in relation to crop raiding pattern at different distances from forests. *Agr Ecosyst Environ*, 2013, 167: 71–78
- 64 Vinatier F, Gosme M, Valantin-Morison M. Explaining host-parasitoid interactions at the landscape scale: a new approach for calibration and sensitivity analysis of complex spatio-temporal models. *Landscape Ecol*, 2013, 28: 217–231
- 65 戈峰. 害虫生态调控的原理与方法. *生态学杂志*, 1998, 17: 38–42
- 66 Thies C, Haenke S, Scherber C, et al. The relationship between agricultural intensification and biological control: experimental tests across europe. *Ecol Appl*, 2011, 21: 2187–2196
- 67 Sciarretta A, Trematerra P. Geostatistical tools for the study of insect spatial distribution: practical implications in the integrated management of orchard and vineyard pests. *Plant Protect Sci*, 2014, 50: 97–110
- 68 Caballero-Lopez B, Bommarco R, Blanco-Moreno J M, et al. Aphids and their natural enemies are differently affected by habitat features at local and landscape scales. *Biol Control*, 2012, 63: 222–229

- 69 Thies C, Steffan-Dewenter I, Tscharntke T. Interannual landscape changes influence plant-herbivore-parasitoid interactions. *Agr Ecosyst Environ*, 2008, 125: 266–268
- 70 Holland J M, Oaten H, Moreby S, et al. Agri-environment scheme enhancing ecosystem services: a demonstration of improved biological control in cereal crops. *Agr Ecosyst Environ*, 2012, 155: 147–152
- 71 Clough Y, Kruess A, Tscharntke T. Local and landscape factors in differently managed arable fields affect the insect herbivore community of a non-crop plant species. *J Appl Ecol*, 2007, 44: 22–28
- 72 Roland J, Taylor P D. Insect parasitoid species respond to forest structure at different spatial scales. *Nature*, 1997, 386: 710–713
- 73 Rand T A, Tylianakis J M, Tscharntke T. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecol Lett*, 2006, 9: 603–614
- 74 Elliott N C, Kieckhefer R W, Beck D A. Effect of aphids and the surrounding landscape on the abundance of coccinellidae in cornfields. *Biol Control*, 2002, 24: 214–220
- 75 Menalled F D, Costamagna A C, Marino P C, et al. Temporal variation in the response of parasitoids to agricultural landscape structure. *Agr Ecosyst Environ*, 2003, 96: 29–35
- 76 Costamagna A C, Menalled F D, Landis D A. Host density influences parasitism of the armyworm *Pseudaletia unipuncta* in agricultural landscapes. *Basic Appl Ecol*, 2004, 5: 347–355
- 77 Parry H R, Evans A J, Morgan D. Aphid population response to agricultural landscape change: a spatially explicit, individual-based model. *Ecol Model*, 2006, 199: 451–463
- 78 Zhao Z H, Hui C, He D H, et al. Effects of position within wheat field and adjacent habitats on the density and diversity of cereal aphids and their natural enemies. *Biocontrol*, 2013, 58: 765–776
- 79 赵紫华, 欧阳芳, 贺达汉. 农业景观中不同生境界面麦蚜天敌的边缘效应与溢出效应. *中国科学: 生命科学*, 2012, 42: 825–840
- 80 Zaller J G, Moser D, Drapela T, et al. Parasitism of stem weevils and pollen beetles in winter oilseed rape is differentially affected by crop management and landscape characteristics. *Biocontrol*, 2009, 54: 505–514
- 81 Lundy M G, Buckley D J, Boston E S M, et al. Behavioural context of multi-scale species distribution models assessed by radio-tracking. *Basic Appl Ecol*, 2012, 13: 188–195
- 82 Kleijn D, Baquero R A, Clough Y, et al. Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five european countries. *Ecol Lett*, 2006, 9: 243–254
- 83 Jonsson M, Wratten S D, Landis D A, et al. Recent advances in conservation biological control of arthropods by arthropods. *Biol Control*, 2008, 45: 172–175
- 84 Lee J C, Heimpel G E. Impact of flowering buckwheat on lepidopteran cabbage pests and their parasitoids at two spatial scales. *Biol Control*, 2005, 34: 290–301
- 85 Fiedler A K, Landis D A, Wratten S D. Maximizing ecosystem services from conservation biological control: the role of habitat management. *Biol Control*, 2008, 45: 254–271
- 86 Altieri M A. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agr Ecosyst Environ* 2002, 93: 1–24
- 87 Berndt L A, Wratten S D, Hassan P G. Effects of buckwheat flowers on leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) parasitoids in a new zealand vineyard. *Agr Forest Entomol*, 2002, 4: 39–45
- 88 Begum M, Gurr G M, Wratten S D, et al. Using selective food plants to maximize biological control of vineyard pests. *J Appl Ecol*, 2006, 43: 547–554
- 89 Sandhu H S, Wratten S D, Cullen R, et al. The future of farming: the value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach. *Ecol Econ*, 2008, 64: 835–848
- 90 Tscharntke T, Klein A M, Kruess A, et al. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. *Ecol Lett*, 2005, 8: 857–874
- 91 Veres A, Petit S, Conord C, et al. Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agr Ecosyst Environ*, 2013, 166: 110–117
- 92 Zhao Z H, Hui C, Hardev S, et al. Responses of cereal aphids and their parasitic wasps to landscape complexity. *J Econ Entomol*, 2014, 107: 630–637
- 93 Ragsdale D W, Landis D A, Brodeur J, et al. Ecology and management of the soybean aphid in north america. *Annu Rev Entomol*, 2011, 56: 375–399

- 94 Geneau C E, Wackers F L, Luka H, et al. Selective flowers to enhance biological control of cabbage pests by parasitoids. *Basic Appl Ecol*, 2012, 13: 85–93
- 95 Ferrier S, Guisan A. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *J Appl Ecol*, 2006, 43: 393–404
- 96 Koomen E, Opdam P, Steingrover E. Adapting complex multi-level landscape systems to climate change. *Landscape Ecol*, 2012, 27: 469–471
- 97 Vos C C, Opdam P, Steingrover E G, et al. Transferring ecological knowledge to landscape planning: a design method for robust corridors. In: Wu J, Hobbs R, eds. *Key Topics in Landscape Ecology. Studies In Landscape Ecology*. New York: Cambridge University Press, 2007. 227–245
- 98 van Rooij S, van der Sluis T, Steingrover E, et al. Applying landscape ecological methods to analyse and design ecological networks. In: Smithers R, ed. *Landscape Ecol Trees Forest, Landscape Ecology of Trees and Forests. Proceedings of the Twelfth Annual IALE (UK) Conference*, 2004. 208–215
- 99 Rudner M, Biedermann R, Schroder B, et al. Integrated grid based ecological and economic (INGRID) landscape model—a tool to support landscape management decisions. *Environ Modell Softw*, 2007, 22: 177–187
- 100 戈峰, 欧阳芳, 赵紫华. 基于服务功能的昆虫生态调控理论. *应用昆虫学报*, 2014, 51: 597–605
- 101 Schellhorn N A, Bianchi F J J A, Hsu C L. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression. *Annu Rev Entomol*, 2014, 59: 559–581
- 102 赵紫华, 欧阳芳, 门兴元, 等. 生境管理——保护性生物防治的发展方向. *应用昆虫学报*, 2013, 54: 879–889
- 103 Cai Q N, Ma X M, Zhao X, et al. Effects of host plant resistance on insect pests and its parasitoid: a case study of wheat-aphid-parasitoid system. *Biol Control*, 2009, 49: 134–138
- 104 Zehnder G, Gurr G M, Kuhne S, et al. Arthropod pest management in organic crops. *Annu Rev Entomol*, 2007, 52: 57–80
- 105 Diehl E, Sereda E, Wolters V, et al. Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: a meta-analysis. *J Appl Ecol*, 2013, 50: 262–270
- 106 Gardiner M M, Landis D A, Gratton C, et al. Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecol Appl*, 2009, 19: 143–154

Ecologically Based Pest Management at Multiple Spatial Scales

ZHAO ZiHua^{1,2}, GAO Feng¹, HE DaHan³ & GE Feng²

*1 Department of Entomology, College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China;*

3 Department of Agonomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Patch composition structure and landscape pattern at different spatial scales have great variation. Scale effect is also an important characteristics in agricultural landscape. In recent years, both agricultural management within field and landscape modification at landscape scale were used to achieve ecologically based pest management and ecosystem services. Ecologically based pest management should be conducted at multiple spatial scales, especially the combination of farming activities at local scale and patch pattern at landscape scale. Optimization of planting pattern and agricultural management at local scale and landscape modification at landscape scale should be considered together, which could cut off the life history of agricultural and recover the population of natural enemy. Then, the agroecosystem health and biological control service was enhanced at most extent. We also summarized the mechanism and hypothesis between environmental conditions and biological control in agroecosystem. At local scale, rotation, cover crop, no-tillage, and organic management could be used to enhance crop health and biocontrol service, which were also improved by the rearrangements of habitat patches and plant resource at landscape scale. Additionally, habitat management should be conducted at multiple spatial scales. The landscape characteristics at different spatial scales have varied effects on insects due to the species specific. In recent years, great progress has been obtained through landscape design in the USA and Europe. The varied responses of different species to spatial scales may be important unexplored fields in pest sustainable management. The research landscape pattern and biodiversity can reveal the interspecific relationship and mechanism in theory, which can provide new approaches and methods to control insect pests by landscape design in practice.

patch, habitat management, biodiversity, biocontrol, life history

doi: 10.1360/N052014-00314