论文

中国知名大学及研究院所专栏 中国科学院动物研究所专辑

区域性农田景观格局对麦蚜及其天敌种群的生态学效应

欧阳芳^①, 门兴元^②, 关秀敏^③, 肖云丽^③, 戈峰^{①*}^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 山东省农业科学院, 植物保护研究所, 济南 250100;^③ 山东省植物保护总站, 济南 250100

* 联系人, E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期: 2015-07-23; 接受日期: 2015-08-20

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB127604)、国家自然科学基金(批准号: 31572059)和国家科技支撑计划(批准号: 2012BAD19B05)资助

摘要 明确农田景观格局对害虫及其天敌种群的生态学效应, 是开展区域性害虫生态调控的基础. 以前的研究大多集中于小空间尺度下、单个景观因子对昆虫种群的作用, 而从省级范围的大空间尺度、多个景观因子的分析很少. 本文以山东省区域性小麦种植区为研究对象, 基于遥感影像和土地覆盖分类数据以及田间调查的昆虫种群数据, 分析了景观组成类型(component type)、构成比例(component proportions)和形状结构(shape structure)多因子对麦蚜及其天敌寄生蜂和瓢虫种群的综合作用. 结果发现, 农田景观组成类型中斑块类型(patch type)越多, 越利于麦蚜和天敌瓢虫种群数量的增长; 且斑块密度(patch density)越大, 越利于麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫数量的增加; 景观形状结构中边界密度(edge density)越高, 也越利于麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫种群数量的增加. 进一步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. 结果表明, 三类景观格局因子对麦蚜影响较小, 权重为 9.81%; 而对麦蚜寄生蜂的影响权重为 25.87%; 对天敌瓢虫种群高达 47.86%. 本研究清楚地表明, 通过优化农田景观中作物与非作物生境布局, 可直接调节和增加天敌昆虫种类与数量, 有效控制和减少小麦蚜虫的种群数量, 从而提高区域性农田景观中天敌昆虫的生物控害服务功能.

关键词 农田景观, 景观结构, 麦蚜, 寄生蜂, 天敌瓢虫, 区域性生物控害功能

农田生态系统是人类赖以生存的种植作物的生态系统^[1]. 在该系统中, 植物-害虫-天敌三者之间相互作用、相互制约, 形成一个农田景观系统. 在这个系统中, 作物种类和数量的变化, 势必影响作物生产

力、害虫及天敌的群落结构与功能. 显然, 基于农田景观生境的多样化以及昆虫具有较强的转移扩散能力, 害虫的管理必然需要扩展到区域性农田景观生态系统^[2]. 通过作物的布局、农田生境的管理, 增加

引用格式: 欧阳芳, 门兴元, 关秀敏, 等. 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, 2016, 46: 139–150
Ouyang F, Men X Y, Guan X M, et al. Ecological effect of regional agricultural landscape pattern on wheat aphids and their natural enemies. Sci Sin Vitae, 2016, 46: 139–150, doi: 10.1360/N052015-00219

生物多样性, 提高天敌的生物控害功能, 将是害虫生态调控的重要手段^[3,4].

以前的研究主要集中于某一块农田, 如麦田、棉田、玉米田的害虫与天敌研究^[5-8]. 目前越来越多的研究, 将整合景观生态学和保护生物理论应用到农田景观, 并关注农田景观格局如何影响害虫与天敌种群动态^[9]. 而农业景观中各种不同景观格局因子对害虫种群的发生与危害, 以及天敌昆虫的生物控害作用均产生一定的影响作用^[10-12]. 例如, 农业耕地的扩张、农田面积的扩大和非作物栖息地的消除, 将会导致农田景观格局的单一化^[13], 引起农田景观中生物多样性迅速下降^[14], 从而可能改变农田景观格局中害虫的发生与危害. 基于此, Landis 等人^[11]已从保护自然天敌角度分析了农田景观系统中的生物控制服务功能; Bianchi 等人^[10]从农业景观组成影响生物多样性和害虫自然控制方面, 重点阐述了非作物栖息地对生物多样性保护具有重要作用, 以及不同比例非作物栖息地的景观中定量化的天敌行为和害虫危害. 但这些研究大都局限于某一个小局域范围, 而从一个较大的区域(如省级尺度), 综合分析景观组成类型、构成比例和形状结构对害虫及其天敌生态效应的研究很少.

山东是我国重要的小麦(*Triticum aestivum*)生产省份, 其种植面积和产量均属于全国较大的一个省份. 麦蚜(麦长管蚜(*Sitobion avenae* Fabricius)、麦二叉蚜(*Schizaphis graminum* Rondani)以及禾谷缢管蚜(*Rhopalosiphum padi* L.))是山东乃至我国小麦上最重要的害虫, 而捕食性瓢虫(龟纹瓢虫(*Propylea japonica* Thunberg)、异色瓢虫(*Harmonia axyridis* Pallas)以及七星瓢虫(*Coccinella septempunctata*))和寄生蜂(燕麦蚜茧蜂(*Aphidius avenae* Haliday)与烟蚜茧蜂(*Aphidius gifuensis* Ashmead))是麦蚜的重要天敌类群. 近年来, 随着产业结构调整、耕作制度变更与城镇化建设, 引起了包括麦田在内的农田景观格局的变迁, 使山东省区域性农田景观格局特征呈现多样化. 然而, 这种大尺度区域范围内农田景观格局对麦蚜及其天敌种群数量的作用如何, 目前不清楚.

本研究以山东省作为典型代表的小麦种植区为例, 首先基于遥感影像和土地覆盖分类数据, 解析山东省范围内农田景观格局特征, 分析山东省县域范围为样本点的麦蚜及其天敌昆虫(寄生蜂和瓢虫)的数量频次分布; 以此为基础, 进一步探讨 3 类景观格

局因子, 如景观组成类型、构成比例和形状结构对麦蚜及其天敌昆虫的生态学效应, 定量评价 3 类景观格局因子对麦蚜及其天敌昆虫影响作用的贡献率大小, 从而在区域性大尺度范围内, 阐明农田景观中生物控害功能的维持机理, 为增强区域性生物控害功能的农田景观优化提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

山东是我国重要的小麦生产省份, 陆地总面积 15.71 万平方千米, 2000~2010 年小麦年平均种植面积超过 3000 千公顷, 小麦年均产量超过 1800 万吨, 其种植面积和产量均属于全国较大的省份之一. 害虫是小麦生产的重要威胁因子, 在山东省每年因小麦虫害所造成的实际损失量达 29.45 万吨, 占全国虫害实际损失量的 19.09%. 其中, 麦蚜是小麦的主要害虫之一, 其每年所造成的实际损失量达 18.43 万吨, 占虫害总实际损失量的 62.57%(欧阳芳和戈峰, 中国生物灾害评估, 暂未公开发表内容).

本研究以山东省为典型代表的小麦种植区为例, 分析农田景观格局对麦蚜及其天敌种群的影响. 山东省范围内包括多种土地覆盖景观类型, 如森林、草地、湿地、水体、耕地、园地、居住工业道路交通、其他用地.

1.2 数据获取

(1) 麦蚜及其天敌种群调查. 本文以 2010 年山东省各样点县的麦蚜、寄生蜂和天敌瓢虫的数据为基础数据, 建立了害虫及天敌发生在全省分布的数据库及分布图(图 1). 麦蚜包括 3 种: 麦长管蚜(*S. avenae*)、麦二叉蚜(*S. graminum*)以及禾谷缢管蚜(*R. padi*); 寄生蜂包括燕麦蚜茧蜂(*A. avenae*)与烟蚜茧蜂(*A. gifuensis*); 天敌瓢虫包括龟纹瓢虫(*P. japonica*)、异色瓢虫(*H. axyridis*)及七星瓢虫(*C. septempunctata*). 在山东省每个样点县范围内选取 10 块左右典型小麦田, 每块小麦田按照 5 点取样调查. 每个样点选择 200 株小麦, 调查统计麦蚜数量及其寄生蜂的寄生率, 最后折算为百株蚜虫量和麦蚜寄生百分率; 同时每个样点以 1 m²为范围, 调查天敌瓢虫的数量, 即为单位面积的天敌瓢虫数量.

(2) 遥感影像和土地覆盖分类. 本研究使用的

遥感数据源为 2010 年 Landsat TM/ETM 的中分辨率卫星影像(10~30 m). 运用 ENVI 5.0 遥感图像处理软件, 对图像进行几何精校正、图像裁剪和图像增强等预处理. 在大量野外实地调查的基础上, 建立遥感影像分类图谱库. 利用遥感影像分类图及其数值编码, 获得 2010 年山东省土地覆被分类的栅格数据. 土地覆被图例系统中, 一级为 6 类, 对应 IPCC 的 6 类, 二级类型由 FAO LCCS 的方法进行定义, 共 38 类基本类型(图 1). 基于这 38 类基本类型, 将山东省区域内土地覆盖类型归为 8 类: 森林、草地、湿地、水体、耕地、园地、居住工业道路交通和其他用地. 土地覆被分类的栅格数据精度为 30 m×30 m. 在地理信息系统(ARCGIS 10.2)的支持下, 根据山东省内 140 个县级单位行政区的矢量数据, 把全省土地覆被分类的栅格数据分割成 140 个景观类型分类图.

1.3 景观格局分析

区域性农田景观格局的特征可以归纳为“质、量、形、度”4 个方面^[9]. “质”(composition)即景观组成类型(component type), 表示农田景观中不同的斑块性质或类型, 包括种植的作物类型, 非作物种类等. “量”(quantity)即景观构成比例(component proportions), 反映不同类型斑块的大小, 面积比例等. “形”(configuration)即景观形状结构(shape structure), 表示不同斑块类型的形状, 排列方式等. “度”(scale)表示时空尺度(spatial-temporal scale), 包括时间尺度和空间尺度, 反映农田景观格局变化在时间和空间上所涉及的范围和发生的频率. 基于山东省 140 个县级单位的土地覆被分类栅格数据, 利用景观格局分析软件(FRAGSTATS 4.2), 分别分析在景观水平

制作时间: 2014年5月20日

制作单位: 中国科学院动物研究所种群生态与全球变化组

图 1 山东省土地覆盖类型图与麦蚜、寄生蜂和天敌瓢虫取样点分布

(landscape level)和类水平(class level)上计算每个县域的 4 个方面的 14 类景观格局指数(表 1).

1.4 统计学分析

(1) 描述性分析. 利用 SPSS software(SPSS Inc, Chicago, USA), Descriptives 选项分析山东省所有样点县麦蚜、天敌瓢虫和寄生蜂种群的平均值、最大值、最小值、标准差等; Frequencies 选项分析所有样点县三类昆虫种群的频次分布和正态拟合曲线.

(2) 相关性分析. 利用 R project(version 3.0.1), 计算每个样点县域 4 个方面农田景观格局特征的 14 类景观格局指数与麦蚜、天敌瓢虫和寄生蜂种群数量的 Pearson 相关系数及其显著性检验, 以明确显著影响麦蚜及其天敌种群数量的景观格局因子.

(3) 生态方差分解. 利用 R project(version 3.0.1) 工具, 采用方差分解方法 Variation partitioning

(VP)^[15], 分析在景观水平(landscape level)上景观组成类型(质)、景观构成比例(量)和景观形状结构(形)三类景观格局因子解释麦蚜及其天敌种群数量的变化方差, 即定量分析 3 类景观格局因子对昆虫种群数量变化的影响作用大小, 即贡献率大小. 并利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)^[16]进行显著性检验. 昆虫种群数量 Y 为响应变量(response variable), 三类景观格局因子矩阵为解释变量(explanatory variable)(表 1 和 2), 第一类: 景观组成类型(质), 矩阵 Matrix 1: 斑块多度(PR), 斑块丰富度密(PRD); 第二类: 景观构成比例(量), 矩阵 Matrix 2: 斑块密度(PD), 斑块面积比(PLAND), 平均斑块面积(MPA), Shannon 多样性指数(SHDI), Simpson 多样性指标(SIDI); 第三类: 景观形状结构(形), 矩阵 Matrix 3: 边界密度(ED), 景观形状指数(LSI), 分形指数(FRACT), 周长面积比(PARA), 聚集度指数(CONTIG).

表 1 定量描述农田景观格局 4 类特征的重要景观指数

景观指数	描述
景观组成类型(component type): 质(composition)	
斑块类型(patch type, PT)	即景观组成、定性指标、土地覆盖类型, 包括植被类型
斑块多度(patch richness, PR)	农田景观系统中土地覆盖类型或斑块类型数量, 或称景观丰度
斑块丰富度密度(patch richness density, PRD)	土地覆盖类型或斑块类型总数比上农田景观总面积
景观构成比例(component proportions): 量(quantity)	
斑块密度(patch density, PD)	在斑块级别上等于某一斑块类型的斑块数目除以该类型的总面积 在景观级别上等于景观总面积除以各个类型的斑块总数
斑块面积比例(percentage of landscape, PLAND)	某一斑块类型的总面积占整个景观面积的百分比
平均斑块面积(mean patch area, MPA)	在斑块级别上等于某一斑块类型的总面积除以该类型的斑块数目 在景观级别上等于景观总面积除以各个类型的斑块总数
Shannon 多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)	度量景观系统结构组成复杂程度. 在景观级别上等于各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值
Simpson 多样性指标(Simpson's diversity index, SIDI)	度量景观系统结构组成复杂程度
景观形状结构(shape structure): 形(configuration)	
边界密度(edge density, ED)	不同土地覆盖类型或斑块边界总长度比上农田景观总面积
景观形状指数(landscape shape index, LSI)	所有斑块边界总长度比上农田景观总面积的平方根, 再乘以正方形校正常数
平均斑块形状指数(mean shape index, MSI)	每一斑块的周长比上面积的平方根, 再乘以正方形校正常数, 然后对所有斑块加和, 最后除以斑块总数
分形指数(fractal dimension index, FRACT)	用来度量景观形状的复杂程度
周长面积比(perimeter-area ratio, PARA)	斑块周长与其面积之比
聚集度指数(CONTIG)	通常度量同一类型斑块的聚集程度
景观时空尺度(spatial-temporal scale): 度(scale)	
斑块尺度(patch)	景观组成单元范围
类型尺度(class)	同一类型斑块范围
景观尺度(landscape)	整个研究区域范围

2 结果

2.1 山东农田景观格局特征

以山东省为典型代表的小麦种植区域为研究对象, 分析其农田景观格局的特征. 景观组成类型分析结果表明, 山东省斑块类型(PT)包括森林、草地、湿地、水体、耕地、园地、居住工业道路交通和其他用地等 8 种斑块($PR=8$); 斑块丰富度密(PRD)为 0.0001 类/100 hm^2 (表 2).

从其农田景观构成比例分析来看, 斑块面积比($PLAND$, 即以上 8 种景观类型面积占区域总面积的比例)分别为 11.85%, 4.05%, 0.61%, 5.48%, 60.75%, 0.61%, 15.91 和 0.76%, 其中耕地、居住工业道路交通、森林、水体和草地用地占据面积较多(表 2). 整个山东省域范围内斑块密度(PD)为 1.7833 块/100 hm^2 , 其中居住工业道路交通、耕地、森林、草地和水体 5 种景观类型的斑块密度(PD)较大, 分别为 0.7026, 0.3562, 0.3310, 0.2203 和 0.1421 块/100 hm^2 (表 2). 整个山东省域范围内平均斑块面积(MPA)为 56.0752 块/100 hm^2 , 其中耕地类型最大为 170.5388 块/100 hm^2 , 草地类型最小为 18.3648 块/100 hm^2 . 整个山东省域范围内 Shannon 多样性指数($SHDI$)和 Simpson 多样性指标($SIDI$)分别为 1.2359 和 0.5869(表 2).

其景观形状结构(表 2)显示, 整个山东省域范围

内边界密度(ED)为 42.9760 m/hm^2 , 其中耕地、居住工业交通、森林、草地和水体的边界密度(ED)分别为 34.2787, 22.0885, 16.0811, 7.4663 和 4.8831 m/hm^2 . 整个山东省域范围内景观形状指数(LSI)为 428.4147, 其中居住工业交通、森林、耕地、草地、水体、其他用地、园地和湿地景观类型的平均斑块形状指数(MSI)为 548.5535, 462.0171, 435.6638, 367.0517, 212.4886, 57.6263, 57.2701 和 34.2696, 依次减少. 整个山东省域范围内分形指数($FRACT$)为 1.3094, 其中耕地最大为 1.3675; 湿地最小为 1.1440. 整个山东省域范围内周长面积比($PARA$)为 86.3262, 其中草地最大为 184.6559, 湿地最小为 44.5890. 整个山东省域范围内聚集度指数($CONTIG$)为 0.9256, 其中湿地最大为 0.9616, 草地最小为 0.8422.

2.2 麦蚜、寄生蜂和瓢虫种群数量特征

通过对山东省 63 个县样点麦蚜、寄生蜂和瓢虫种群数量调查表明, 麦蚜种群密度的平均值为 2900 头/百穗小麦, 最大值为 10483 头/百穗小麦, 最小值为 683 头/百穗小麦(图 2A); 58 个县样点寄生蜂的寄生率平均值为 25.47%, 最大值为 90.00%, 最小值为 4.30%(图 2B); 22 个县样点天敌瓢虫种群密度平均值为 1.42 头/ m^2 , 最大值为 8.47 头/ m^2 , 最小值为 0.04 头/ m^2 (图 2C).

表 2 山东省农田景观格局 4 类特征的重要景观指数^{a)}

景观指数	景观尺度	类型尺度							
	景观组成类型: 质(composition)								
斑块类型(PT)	省域范围	森林	草地	湿地	水体	耕地	园地	居工道*	其他
斑块多度(PR)	8								
斑块丰富度密(PRD)	0.0001								
	景观构成比例: 量(quantity)								
斑块密度(PD)	1.7833	0.3310	0.2203	0.0058	0.1421	0.3562	0.0053	0.7026	0.0200
斑块面积比(PLAND)	100.0000	11.8543	4.0458	0.6052	5.4752	60.7451	0.6053	15.9053	0.7637
平均斑块面积(MPA)	56.0752	35.8148	18.3648	104.7396	38.5215	170.5388	113.8315	22.639	38.1061
Shannon 多样性指数(SHDI)	1.2359								
Simpson 多样性指标(SIDI)	0.5869								
	景观形状结构: 形(configuration)								
边界密度(ED)	42.9760	16.0811	7.4663	0.2668	4.8831	34.2787	0.4500	22.0885	0.4373
景观形状指数(LSI)	428.4147								
平均斑块形状指数(MSI)		462.0171	367.0517	34.2696	212.4886	435.6638	57.2701	548.5535	57.6263
分形指数(FRACT)	1.3094	1.2166	1.2168	1.144	1.2325	1.3675	1.1952	1.2247	1.1585
周长面积比(PARA)	86.3262	135.7883	184.6559	44.589	91.8945	56.5615	74.5043	139.1881	66.7480
聚集度指数(CONTIG)	0.9256	0.8833	0.8422	0.9616	0.9210	0.9512	0.9357	0.8795	0.9428

a) *: 居工道包括居住、工业、道路交通等用地

图2 山东省小麦种植区麦蚜、寄生蜂和瓢虫种群数量特征

2.3 景观组成类型对麦蚜及其天敌种群的影响

在县域范围为研究尺度下,对山东省8种景观组成类型与麦蚜及其天敌种群的相关性分析(表3)表明,麦蚜种群密度与斑块丰富度密度(PRD)显著正相关($R=0.2517$, $P=0.0484$);天敌瓢虫种群密度与斑块丰富度密度(PRD)显著正相关($R=0.5068$, $P=0.0161$).

2.4 景观构成比例对麦蚜及其天敌种群的影响

同样,以县域范围为空间尺度下,分析整个县域和县域内不同景观组成类型两个层次的景观构成对麦蚜及其天敌种群的影响,结果表明景观构成对麦蚜及其天敌种群的影响不同(表4).其中,麦蚜种群密度与耕地的斑块密度(PD)显著正相关($R=0.3603$, $P=0.0040$).麦蚜种群密度显著负相关与整个县域($R=-0.3042$, $P=0.0162$)和耕地($R=-0.2973$, $P=0.0190$)的平均斑块面积(MPA);而显著正相关与草地的平均斑块面积(MPA)($R=0.3599$, $P=0.0088$).

寄生蜂的寄生率显著正相关与整个县域($R=0.4269$, $P=0.0008$)、森林($R=0.4399$, $P=0.0005$)、耕地($R=0.3296$, $P=0.0115$)和居住工业道路交通用地($R=0.4643$, $P=0.0002$)的斑块密度(PD).寄生蜂的寄生率与水体斑块面积比例(PLAND)显著负相关($R=-0.3425$, $P=0.0085$).

天敌瓢虫种群密度与整个县域的斑块密度(PD)显著正相关($R=0.4731$, $P=0.0262$),与整个县域的Shannon多样性指数(SHDI)显著正相关($R=0.4270$, $P=0.0475$).

2.5 景观形状结构对麦蚜及其天敌种群的影响

类似地,在县域范围为空间尺度下,分析整个县

域和县域内不同景观组成类型两个层次的景观结构对麦蚜及其天敌种群的影响(表5).结果发现,麦蚜种群密度与平均斑块形状指数(MSI)显著正相关($R=0.3509$, $P=0.0108$),与分形指数(FRACT)显著正相关($R=0.2839$, $P=0.0414$).

寄生蜂的寄生率与整个县域($R=0.4395$, $P=0.0006$)、森林($R=0.3604$, $P=0.0055$)、耕地($R=0.4388$, $P=0.0006$)和居住工业道路交通用地($R=0.4942$, $P=0.0001$)的边界密度(ED)显著正相关.寄生蜂的寄生率与整个县域($R=0.4358$, $P=0.0006$)、森林($R=0.3443$, $P=0.0081$)和水体用地($R=0.5805$, $P=0.0001$)的周长面积比(PARA)显著正相关.寄生蜂的寄生率与整个县域($R=-0.4396$, $P=0.0006$)、森林($R=-0.3352$, $P=0.0101$)和水体用地($R=-0.5783$, $P=0.0001$)的聚集度指数(CONTIG)显著负相关.

天敌瓢虫种群密度与整个县域($R=0.4502$, $P=0.0355$)和耕地($R=0.4538$, $P=0.0339$)的边界密度(ED)显著正相关.天敌瓢虫种群密度与草地平均斑块形状指数(MSI)显著正相关($R=0.5163$, $P=0.0236$).天敌瓢虫种群密度与草地分形指数(FRACT)显著正相关($R=0.5525$, $P=0.0142$).天敌瓢虫种群密度与整个县域($R=0.4548$, $P=0.0335$)和耕地($R=0.4405$, $P=0.0402$)的周长面积比(PARA)显著正相关.天敌瓢虫种群密度与整个县域($R=-0.4458$, $P=0.0376$)和耕地($R=-0.4359$, $P=0.0426$)的聚集度指数(CONTIG)显著负相关.

2.6 景观组成类型、构成比例和形状结构对麦蚜及其天敌种群数量影响作用的大小

以山东省的县域为空间单元,在景观水平的尺

度上, 景观格局因子对麦蚜及其天敌种群数量具有一定的影响作用. 生态方差分析结果表明, 景观组成类型、景观构成比例和景观形状结构整体对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值为 0.0981(图 3A); 其中, 单纯景观组成、景观构成和景观结构对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值分别为 0.0038, 0.0076 和 0.0272; 景观组成与景观构成、景观组成与景观结构、景观构成与景观结构两两之间的交集对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值分别为 0.0091, 0.0102 和 0.0156; 景观组成、景观构成和景观结构三者之间的

交集对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值为 0.0246. 其他未识别的因素对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值为 0.9019.

景观组成类型、景观构成比例和景观形状结构整体对寄生蜂寄生率变化影响作用的权重值为 0.2587(图 3B); 其中, 单纯景观组成类型、景观构成比例和景观形状结构对寄生蜂寄生率变化影响作用的权重值分别为 0.0138, 0.0208 和 0.2001; 景观组成与景观构成、景观组成与景观结构两两之间的交集对寄生蜂寄生率变化影响作用的权重值分别为 0.0205

表 3 景观组成类型与麦蚜及其天敌种群的相关性及其显著性^{a)}

景观组成类型: 质(composition)	麦蚜 (cereal aphid)		寄生蜂 (parasitic wasp)		瓢虫 (lady beetle)	
	R	P	R	P	R	P
斑块类型(PT)						
省域范围	森林, 草地, 湿地, 水体, 耕地, 园地, 居工道, 其他					
斑块丰富度密度(PRD)						
县域范围	0.2517	<u>0.0484</u>	-0.0194	0.8848	0.5068	<u>0.0161</u>

a) 下画线表示在 0.05 的统计差异水平下, 达到显著相关

表 4 景观构成比例与麦蚜及其天敌种群的相关性及其显著性^{a)}

景观构成: 量(quantity)	麦蚜(cereal aphid)		寄生蜂(parasitic wasp)		瓢虫(lady beetle)	
	R	P	R	P	R	P
斑块密度(PD)						
县域范围	0.1851	0.1497	0.4269	<u>0.0008</u>	0.4731	<u>0.0262</u>
森林	0.2090	0.1030	0.4399	<u>0.0005</u>	0.3218	0.1442
草地	0.0233	0.8697	0.1615	0.2675	0.2195	0.3666
水体	-0.0344	0.7908	0.2204	0.0965	0.1997	0.3728
耕地	0.3603	<u>0.0040</u>	0.3296	<u>0.0115</u>	0.4061	0.0608
居工道*	0.0134	0.9174	0.4643	<u>0.0002</u>	0.3863	0.0758
斑块面积比例(PLAND)						
县域范围						
森林	0.0080	0.9506	0.1674	0.2092	0.1733	0.4407
草地	0.1173	0.4078	0.2124	0.1429	0.3737	0.1150
水体	0.0120	0.9261	-0.3425	<u>0.0085</u>	0.1465	0.5153
耕地	-0.1181	0.3604	0.1496	0.2625	-0.3721	0.0881
居工道	0.1537	0.2331	0.1219	0.3619	0.0330	0.8843
平均斑块面积(MPA)						
县域范围	-0.3042	<u>0.0162</u>	-0.2069	0.1191	-0.0891	0.6933
森林	-0.1207	0.3500	0.1068	0.4251	0.0268	0.9057
草地	0.3599	<u>0.0088</u>	0.0079	0.9572	0.4409	0.0588
水体	-0.0030	0.9815	-0.2661	<u>0.0435</u>	0.1801	0.4225
耕地	-0.2973	<u>0.0190</u>	-0.1603	0.2293	-0.0854	0.7056
居工道	0.0326	0.8012	-0.1002	0.4542	0.0365	0.8720
其他						
Shannon 多样性指数(SHDI)						
县域范围	0.1114	0.3887	-0.2194	0.0979	0.4270	<u>0.0475</u>

a) *: 居工道包括居住、工业、道路交通等用地. 下画线表示在 0.05 的统计差异水平下, 达到显著相关

和 0.0190; 景观组成、景观构成和景观结构三者之间的交集对寄生蜂寄生率变化影响作用的权重值为 0.0038. 其他未识别的因素对寄生蜂寄生率变化影响作用的权重值为 0.7413.

景观组成类型、景观构成比例和景观形状结构整体对天敌瓢虫种群数量变化影响作用的权重值为 0.4786(图 3C); 其中, 单纯景观组成类型、景观构成

比例和景观形状结构对天敌瓢虫种群数量变化影响作用的权重值分别为 0.4261, 0.0143 和 0.1919; 景观构成与景观结构两两之间的交集对天敌瓢虫种群数量变化影响作用的权重值为 0.0526; 景观组成、景观构成和景观结构三者之间的交集对麦蚜种群数量变化影响作用的权重值为 0.1548. 其他未识别的因素对天敌瓢虫种群数量变化影响作用的权重值为 0.5214.

表 5 景观形状结构与麦蚜及其天敌种群的相关性及其显著性^{a)}

景观结构: 形(configuration)	麦蚜(cereal aphid)		寄生蜂(parasitic wasp)		瓢虫(lady beetle)	
	R	P	R	P	R	P
边界密度(ED)						
县域范围	0.1995	0.1200	0.4395	<u>0.0006</u>	0.4502	<u>0.0355</u>
森林	0.1789	0.1642	0.3604	<u>0.0055</u>	0.2544	0.2532
草地	0.0353	0.8038	0.1898	0.1914	0.2882	0.2315
水体	0.0036	0.9778	-0.1434	0.2828	-0.0862	0.7029
耕地	0.1896	0.1400	0.4388	<u>0.0006</u>	0.4538	<u>0.0339</u>
居工道*	0.1324	0.3049	0.4942	<u>0.0001</u>	0.2888	0.1924
景观形状指数(LSI)						
县域范围	-0.2158	0.0920	0.0199	0.8820	-0.0055	0.9808
平均斑块形状指数(MSI)						
森林	-0.0740	0.5677	0.1446	0.2788	0.0634	0.7791
草地	0.3509	<u>0.0108</u>	0.1008	0.4906	0.5163	<u>0.0236</u>
水体	-0.0802	0.5354	-0.1481	0.2673	-0.3288	0.1352
耕地	-0.2005	0.1182	-0.0110	0.9347	0.0304	0.8932
居工道	0.0282	0.8276	0.1295	0.3328	0.1894	0.3985
分形指数(FRACT)						
县域范围	-0.1246	0.3347	0.2082	0.1168	0.0893	0.6928
森林	-0.0018	0.9886	0.2533	0.0551	0.1195	0.5962
草地	0.2839	<u>0.0414</u>	0.1434	0.3257	0.5525	<u>0.0142</u>
水体	-0.1136	0.3792	0.0355	0.7913	-0.3704	0.0897
耕地	-0.1535	0.2335	0.0975	0.4667	0.1251	0.5791
居工道	0.1075	0.4055	0.1195	0.3717	0.3260	0.1387
周长面积比(PARA)						
县域范围	0.2013	0.1168	0.4358	<u>0.0006</u>	0.4548	<u>0.0335</u>
森林	0.1496	0.2457	0.3443	<u>0.0081</u>	-0.0921	0.6836
草地	-0.2689	0.0539	0.1308	0.3704	-0.3607	0.1292
水体	-0.0771	0.5512	0.5805	<u>0.0001</u>	-0.0707	0.7546
耕地	0.1773	0.1679	0.2479	0.0606	0.4405	<u>0.0402</u>
居工道	-0.0115	0.9291	0.1833	0.1685	0.2539	0.2542
聚集度指数(CONTIG)						
县域范围	-0.2127	0.0969	-0.4396	<u>0.0006</u>	-0.4458	<u>0.0376</u>
森林	-0.1493	0.2469	-0.3352	<u>0.0101</u>	0.1025	0.6500
草地	0.2609	0.0618	-0.1250	0.3921	0.3580	0.1323
水体	0.0728	0.5740	-0.5783	<u>0.0001</u>	0.0715	0.7519
耕地	-0.1861	0.1476	-0.2458	0.0629	-0.4359	<u>0.0426</u>
居工道	0.0048	0.9703	-0.1849	0.1646	-0.2420	0.2778

a) *: 居工道包括居住、工业、道路交通等用地. 下画线表示在 0.05 的统计差异水平下, 达到显著相关

3 讨论

3.1 景观组成类型对麦蚜及其天敌种群的影响

在山东省范围内景观组成即斑块类型包括 8 大类: 森林、草地、湿地、水体、耕地、园地、居住工业道路交通和其他用地。耕地是主要景观组成要素, 占总面积的 60.75%。在大尺度空间范围内耕地斑块与其他类型的斑块构成了区域性的农田景观。由不同植物缀块组成的农田景观(包括农田缀块中不同类型作物的组合种植和农田缀块周围或者之间的不同类型非作物的植物类群), 反映了山东省农田景观格局“质”的特征。山东省区域性农田景观包含作物(如小麦)和非作物的植物类群(如杨树林、草原植物、湿地植物等)。在农田景观中非作物生境可以作为昆虫生存与繁殖的重要生境或栖息地, 很多昆虫如蚜虫、鳞翅目昆虫和甲虫类与这些栖息地密切相关^[17]。本文发现在县域范围内单位面积的斑块类型数量或者说植物类型越多, 即斑块丰富度密度(PRD)越大, 越利于麦田中麦蚜种群数量的增加。这可能是由于小麦成熟收割后麦蚜迁飞转移到临近的非作物生境内, 而栖息在非作物斑块内的麦蚜在下一季小麦生长期, 再回到小麦田, 从而增加了麦田蚜虫的数量。同样, 斑块丰富度密度(PRD)越大, 越利于麦田中天敌瓢虫种群数量的增加。小麦蚜虫的主要天敌瓢虫的种类有龟纹瓢虫、异色瓢虫以及七星瓢虫等种类, 其都属于广谱性天敌类群, 其猎物种类包括多种害虫如蚜虫、叶蝉和飞虱。已有研究表明, 木本和草本栖息地可为捕食性天敌瓢虫提供备选寄主和猎物^[18],

还可为多种昆虫提供花粉和花蜜, 作为它们必要的食物来源^[19]; 天敌瓢虫能够扩散到了周围的作物上, 利用田间作物上的蜜源生长发育^[20], 同时转移到作物上控制害虫^[21]。本研究组前期的研究也发现, 农田生态系统中植物与害虫、害虫与天敌相邻营养级之间的生物量显著相关, 适当的作物丰富度可增加农田生态系统的生物控害功能^[22]。显然, 通过农田景观系统中不同作物类型与非作物类型的组合的改变, 将是调节天敌种群及其生物控害功能的方式之一。

3.2 景观构成比例对麦蚜及其天敌种群的影响

景观构成比例反映不同类型斑块的大小, 面积比例等特征^[9]。Bianchi 等人^[10]发现, 高面积比例的非作物生境景观(如森林、灌木篱墙、林木线、农田边缘、草地、休耕地、道路和塘地)能够增加天敌种群数量。本文结果表明, 县域范围内各类斑块密度越大, 越利于寄生蜂对麦蚜的寄生作用, 也利于麦田中天敌瓢虫种群数量的增加。特别是森林、耕地、居住、工业、道路交通等斑块密度的增加显著有利于麦蚜寄生蜂的寄生作用。而且, 复杂多样化的农田景观有利于维持麦蚜天敌种群的种类和数量。这可能是因为复杂多样化的生境和植物种类能够为麦蚜提供更多的食物来源和栖息场所, 有利于麦蚜种群的延续和繁衍。赵紫华等人^[23]研究表明, 非作物生境是多种麦蚜天敌的种群资源库, 尤其是苜蓿草地、农田防护林以及田埂, 这 3 类非作物生境在维持天敌种类和数量中发挥着重要的作用和功能。本文结果同样表明, 高比例非作物生境面积的增加有利于维持和增加麦蚜

图3 景观组成类型、构成比例和形状结构对麦蚜(A)、寄生蜂(B)和捕食性瓢虫(C)种群数量动态影响的生态方差分解
Residuals: 残差方差的组分

寄生蜂和天敌瓢虫种群密度。类似地, 不同作物类型的面积比例组合, 也会影响昆虫种群密度, 例如, 本课题组前期的研究表明, 由玉米(*Zea mays*)和棉花(*Gossypium* spp.)构成的农田景观系统中玉米斑块所占的面积比对龟纹瓢虫和异色瓢虫种群密度均产生显著影响。这说明开展区域性害虫生态调控, 需要考虑农田景观系统中各类斑块组合的面积比例, 从而有利于增强多种天敌昆虫的协调控害作用^[24]。

3.3 景观形状结构对麦蚜及其天敌种群的影响

描述和刻画景观破碎化程度, 聚集程度或连通度有多个指标, 如边界密度(ED)、形状指数(LSI)、分形指数(FRACT)、周长面积比(PARA)、聚集度指数(CONTIG)。其中, 边界密度从边形特征描述景观破碎化程度, 其越高说明斑块破碎化程度越高^[25-27]。本文结果说明, 县域空间尺度范围内边界密度越高, 越利于麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫数量的增加, 尤其是森林、耕地和居住道路等斑块边界密度的变大, 更有利于寄生蜂数量的发展; 类似地, 耕地斑块边界密度的增加, 显著有利于天敌瓢虫数量的增长。同时, 草地平均斑块形状指数的加大, 也有利于麦蚜和天敌瓢虫种群数量的增加。这说明随着草地平均斑块形状指数的增加, 草地斑块越离散分布在农田景观区域内; 而离散分布的草地斑块可以作为麦蚜和天敌瓢虫的轮换栖息场所。

进一步用分形指数(FRACT)来度量景观形状的复杂程度^[28]。结果表明, 草地斑块分形指数越大, 越利于麦蚜和天敌瓢虫种群的维持, 这说明草地斑块多样化的排列方式利于麦蚜和天敌瓢虫在麦田和草地斑块之间来回转移扩散。此外, 在县域范围内, 斑块周长面积比(PARA)增加, 表现出其斑块形状在一定程度上复杂度增加, 越利于寄生蜂和天敌瓢虫种群数量的增长。而聚集度指数(CONTIG)反映了景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度, 其越高说明景观完整性较好, 相对的破碎化程度较低^[29]。本文的结果显示, 县域范围内不同斑块的聚集度指数与麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫种群显著负相关, 斑块破碎化程度越低越不利于麦蚜天敌种群数量增加。这是因为在农田景观区域内麦田面积越大越集中, 而其他类型的景观要素类型越少以及其面积越小, 越不利于麦蚜天敌的持续稳定维持种群数量。

3.4 景观组成类型、构成比例和形状结构三者对麦蚜及其天敌种群的综合生态效应

农田景观格局对天敌昆虫和害虫种群数量的生态学效应呈现多向性, 包括正向、负向和中性 3 个方面的作用^[9]。如 Bianchi 等人^[10]基于 28 个案例分析, 发现木本栖境(wooded habitats)对天敌种群呈正向效应的占 71%, 负向效应的占 4%, 中性作用的占 25%; 而其对害虫胁迫呈正向效应的占 32%, 负向效应的占 54%, 中性作用的占 14%。草本植物(herbaceous)对天敌种群呈正向效应的占 80%, 负向效应的占 16%, 中性作用的占 4%; 而其对害虫胁迫呈正向效应的占 56%, 负向效应的占 22%, 中性作用的占 22%。本研究表明, 景观组成类型越丰富, 越利于麦蚜和天敌瓢虫种群数量的增加; 景观构成中斑块密度越大, 越利于麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫的增加; 景观结构中边界密度越大, 越利于麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫种群数量的增加。以此为基础, 进一步定量估计了景观组成、构成和结构 3 个方面对麦蚜及其天敌瓢虫影响作用大小, 发现景观组成、构成和结构 3 个方面对麦蚜的总体影响较小, 权重不到 10%; 景观组成、构成和结构 3 个方面对麦蚜寄生蜂的影响权重达 26%, 其中景观结构对其的作用最为突出, 权重影响作用达 20%; 而景观组成、构成和结构 3 个方面对天敌瓢虫种群的总体影响权重达 48%, 其中景观组成和景观结构对其影响作用分别达 43%和 19%, 从而对天敌瓢虫种群产生巨大的调节作用。

从山东省各县麦蚜及其天敌种群数量来看: 麦蚜密度的最大值(10483 头/百穗小麦)为其平均值(2900 头/百穗小麦)的 3.6 倍, 但是景观组成、构成和结构 3 个方面对麦蚜的总体影响作用较小, 因此通过农田景观优化小麦布局来直接调节麦蚜密度的效果不一定明显。而麦蚜寄生蜂寄生率的最大值(90.00%)为其平均值(25.47%)的 3.5 倍, 天敌瓢虫密度的最大值(8.47 头/m²)为其平均值(1.42 头/m²)的 6.0 倍, 但景观组成类型、景观构成比例和景观形状结构 3 个方面对麦蚜寄生蜂和天敌瓢虫的调节作用较大。显然, 可通过优化农田景观作物和非作物布局来直接增加天敌昆虫种群种类和数量, 以达到控制小麦蚜虫的数量, 从而提高区域性农田景观中的区域性生物控害服务功能。

参考文献

- 1 Joseph A, Neville J A, Colin D B, et al. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Millennium Ecosystem Assessment. Washington: Island Press, 2005
- 2 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
- 3 戈峰. 害虫生态调控的理论与方法. 生态学杂志, 1998, 17: 38–42
- 4 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
- 5 Men X Y, Ge F, Yardim E N, et al. Evaluation of winter wheat as a potential relay crop for enhancing biological control of cotton aphids in seedling cotton. Biocontrol, 2004, 49: 701–714
- 6 Men X Y, Ge F, Edwards C A, et al. The influence of pesticide applications on *Helicoverpa armigera* Hübner and sucking pests in transgenic Bt cotton and non-transgenic cotton in China. Crop Protection, 2005, 24: 319–324
- 7 Men X Y, Ge F, Liu X H, et al. Diversity of arthropod communities in transgenic Bt cotton and nontransgenic cotton agroecosystems. Environ Entomol, 2003, 32: 270–275
- 8 Ouyang F, Men X Y, Yang B, et al. Maize benefits the predatory beetle, *Propylea japonica* (Thunberg), to provide potential to enhance biological for aphids in cotton. PLoS One, 2012, 7: e44379
- 9 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, 2011, 48: 1177–1183
- 10 Bianchi F J, Booij C J, Tscharntke T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. Proc Biol Sci, 2006, 273: 1715–1727
- 11 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
- 12 Kleijn D, Sutherland W J. How effective are European agri-environment schemes in conserving and promoting biodiversity? J Appl Ecol, 2003, 40: 947–969
- 13 Robinson R A, Sutherland W J. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. J Appl Ecol, 2002, 39: 157–176
- 14 Benton T G, Vickery J A, Wilson J D. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? Trends Ecol Evol, 2003, 18: 182–188
- 15 Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. Ecology, 1992, 73: 1045–1055
- 16 Legendre P, Legendre L. Numerical Ecology, 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier Science BV, 2012
- 17 Tscharntke T, Denys C. Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows. Oecologia, 2002, 130: 315–324
- 18 Simon S, Rieux R, Defrance H. Role of hedgerows and ground cover management on arthropod populations in pear orchards. Agri Ecosyst Environ, 1999, 73: 119–127
- 19 Bugg R, Anderson J M, Thomsen C, et al. Enhancing Biological Control: Habitat Management to Promote Natural Enemies of Agricultural Pests. Berkeley: University of California Press, 1998
- 20 Nicholls C I, Parrella M, Altieri M A. The effects of a vegetational corridor on the abundance and dispersal of insect biodiversity within a northern California organic vineyard. Landscape Ecol, 2001, 16: 133–146
- 21 Tylianakis J M, Didham R K, Wratten S D. Improved fitness of aphid parasitoids receiving resource subsidies. Ecology, 2004, 85: 658–666
- 22 赵紫华, 时培建, 门兴元, 等. 基于微景观试验模型系统下作物丰富度对害虫-天敌关系的影响. 中国科学: 生命科学, 2013, 43: 548–556
- 23 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
- 24 王秀秀, 欧阳芳, 刘雨芳. 瓢虫种群对棉花-玉米农田景观格局的响应. 应用昆虫学报, 2013, 50: 903–911
- 25 Jenerette G D, Wu J G. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA. Landscape Ecol, 2001, 16: 611–626
- 26 Wu J G, Jenerette G D, Buyantuyev A, et al. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: the case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. Ecol Compl, 2011, 8: 1–8
- 27 Li C, Li J X, Wu J G. Quantifying the speed, growth modes, and landscape pattern changes of urbanization: a hierarchical patch dynamics approach. Landscape Ecol, 2013, 28: 1875–1888
- 28 Imre A R, Bogaert J. The fractal dimension as a measure of the quality of habitats. Acta Biotheoretica, 2004, 52: 41–56
- 29 O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, et al. Indices of landscape pattern. Landscape Ecol, 1988, 1: 153–162

Ecological Effect of Regional Agricultural Landscape Pattern on Wheat Aphids and Their Natural Enemies

OUYANG Fang¹, MEN XingYuan², GUAN XiuMin³, XIAO YunLi³ & GE Feng¹

1 State Key Laboratory of Integrated Management of Pests and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;

3 Station of Plant Protection, Agriculture Department of Shandong, Jinan 250100, China

Knowing the ecological effects of agricultural landscape pattern on population dynamics of insect pests and their natural enemies is fundamental for ecological regulation and management of insect pests. Previous research studied the ecological effect of simple landscape factor on insects on the micro scale; however, few of them focused on the ecological effect of multiple landscape factors on the macro scale. In this study, we took the planting region of wheat in Shandong province, China as a typical example, and analyzed the ecological effects of agricultural landscape patterns (component type, component proportions and shape structure) on population dynamics of an insect pest (wheat aphids) and their two natural enemy insects (parasitic wasp and predatory lady beetle) on the basis of the remote sensing data, land coverage type distribution and the survey data of insect population dynamics in fields. The results showed that the more patch types in agricultural landscape helped to increase the population numbers of wheat aphids and predatory lady beetle per unit area. The higher patch density and edge density enhanced the population numbers of the two natural enemy insects (parasitic wasp and predatory lady beetle) per unit area. The relative contributions of three landscape factors (component type, component proportions and shape structure) in explaining the variation of insect population numbers (wheat aphids, parasitic wasp and predatory lady beetle) were quantified. For the wheat aphids, the total variation explained by the above three landscape factors was only 9.81%. While three landscape factors accounted for 25.87% of the total variation for the parasitic wasp and 47.86% for the predatory lady beetle. The results suggested that the optimization of agricultural landscape such as crop patterns and non-crop habitats can help to directly regulate and increase the relative abundance and richness of natural enemy insects, and to indirectly suppress and reduce the population numbers of wheat aphids, enhancing regional biological control of natural enemy insects for pests on wheat.

agricultural landscape, landscape structure, wheat aphids, parasitic wasp, predatory ladybeetle, regional biological control

doi: 10.1360/N052015-00219