

DOI: 10.5846/stxb201801270220

张永生, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 袁哲明. 区域农田景观格局对麦蚜种群数量的影响. 生态学报, 2018, 38(23): - .
Zhang Y S, Ouyang F, Men X Y, Ge F, Yuan Z M. Effects of regional agricultural landscape patterns on populations of wheat aphids. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

区域农田景观格局对麦蚜种群数量的影响

张永生^{1,2}, 欧阳芳², 门兴元³, 戈峰², 袁哲明^{1,*}

1 湖南农业大学植物保护学院, 植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室, 长沙 410128

2 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

3 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100

摘要:明确农田景观格局对麦田蚜虫种群的影响, 是开展区域性害虫生态调控的重要理论依据之一。以区域性小麦种植区为研究对象, 基于遥感影像与土地覆盖分类数据以及田间调查的蚜虫种群数据, 计算景观格局指数, 使用负二项分布的广义线性模型从农田景观、非作物生境景观和区域景观 3 个方面分析了区域农田景观格局对麦田蚜虫种群的影响。结果表明, 蚜虫种群的数量与草地的平均斑块面积和最大斑块指数显著正相关, 与县域的平均几何最邻近距离和面积加权平均斑块面积显著负相关, 与耕地的面积加权平均斑块面积显著负相关, 与耕地的斑块密度显著正相关。草地斑块面积的增大、区域景观与耕地的破碎化、区域景观的聚集会促进蚜虫种群数量的增加。使用草地的斑块面积和最大斑块指数、区域景观的平均几何最邻近距离可以预测蚜虫种群的发生量。非作物生境草地的斑块面积、耕地的破碎化、区域景观的空间分布及破碎化是影响麦田蚜虫种群发生的重要景观因素。

关键词:农田景观; 景观格局指数; 麦蚜; 种群数量

Effects of regional agricultural landscape patterns on populations of wheat aphids

ZHANG Yongsheng^{1,2}, OUYANG Fang², MEN Xingyuan³, GE Feng², YUAN Zheming^{1,*}

1 Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests, College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100, China

Abstract: Knowing the effects of agricultural landscape patterns on wheat aphid populations is an important theoretical basis for ecological regulation and management of insect pests. Based on remote sensing data, land cover classification, and wheat aphid abundance survey data, we took a wheat planting region as a typical example and calculated the landscape pattern metrics and analyzed the effects of landscape patterns of farmland, non-crop habitat, and the regional agricultural landscape on wheat aphid abundances using a negative binomial generalized linear model. The results showed that aphid abundance was positively correlated with mean patch area and largest patch index of grassland and patch density of farmland, and was negatively correlated with mean Euclidean nearest neighbor distance and area-weighted mean patch area of the regional landscape and area-weighted mean patch area of farmland. The increase in patch area of grassland, fragmentation of the regional landscape and farmland, and the aggregation of the regional landscape promoted an increase in aphid abundance. The patch area and largest patch index of grassland and mean Euclidean nearest neighbor distance of the regional landscape best predicted aphid abundance. The patch area of grassland, the fragmentation of farmland, and the spatial distribution and fragmentation of the regional landscape and were important landscape factors affecting the occurrence of wheat aphids.

基金项目:国家自然科学基金项目(31572059, 31300347); 国家重点研发计划资助(2017YFD0200400)

收稿日期:2018-01-27; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhmyuan@sina.com

Key Words: agricultural landscape; landscape pattern metrics; wheat aphids; population

区域农田景观是由耕地、草地、林地、园地、城镇等类型斑块构成,其在空间上的分布与组合构成了区域农田的景观格局。在农田景观系统中,频繁的农田生产活动,如耕地、灌溉、喷施农药、收割等会迫使害虫与天敌在各种生境(作物生境与非作物生境)之间不断地迁移;并且农田中的很多害虫是从外地迁飞而来,通常与农田周围的环境条件没有直接关系^[1]。因此,害虫与天敌的管理必然要扩展到大尺度的区域农田景观系统^[2-4]。而农田景观格局的变化势必会影响景观中害虫与天敌种群的发生和转移扩散,从而影响害虫的危害与天敌的控害作用^[5-8]。例如耕地面积的扩大和非作物栖息地的减少会导致农田景观格局的单一化,引起景观中生物多样性的下降,从而影响农田景观格局中害虫的发生与危害^[5,9-11]。

在农田景观中的作物生境和非作物生境对害虫与天敌的发生都具有重要影响^[1]。目前大量的研究集中在农田周围的非作物生境对天敌种群发生的影响,如林地、草地等非作物生境可以作为天敌瓢虫的栖息地和庇护所,能够为瓢虫提供蚜虫以及花粉、花蜜等备选食物,促进天敌瓢虫的发生^[12-16];同时在非作物生境上生长发育的瓢虫也会迁移到麦田上捕食蚜虫^[11,17-18]。农田景观中的非作物生境也可以为瓢虫提供安全的越冬场所,从而促进越冬瓢虫数量的增加^[11,14,19-20]。Dong 等^[21]发现麦田周围的林地以及景观多样性有利于瓢虫种群的发生。非作物生境也可以作为寄生蜂的庇护所和越冬所,寄生蜂从非作物生境中获取可替代性寄主和营养来完成其生活史^[22-23]。非作物生境的类型、面积与分布都会影响农田中寄生蜂的发生时间与发生量,林地与草地非作物生境促进了蚜茧蜂种群的增长,蚜茧蜂种群密度随景观复杂程度的增加而增加^[24-25]。同时,农田景观中的非作物生境也可作为一些害虫如蚜虫的栖息地、避难所和越冬所,从而有利于害虫的发生^[1,11]。已有研究表明,林地与草地非作物生境促进了麦蚜种群的增长^[25],但关于农田景观格局对蚜虫种群影响的研究还是比较少。另外,目前的大部分研究主要关注于田间尺度下的农田周围非作物生境类型的比例和面积对天敌与害虫的影响,而在大尺度的区域农田景观下,各种生境的面积比例、形状和空间布局景观等特征对天敌与害虫影响的研究也比较少。

本研究以山东省县市区域的小麦种植区为研究对象,首先,基于遥感影像与土地覆盖分类数据,计算景观格局指数来定量描述区域农田景观的各种特征。其次,基于田间蚜虫种群的调查数据,从农田的景观、各种非作物生境的景观、县区域的景观这 3 个层次出发,分析各层次景观的格局特征与蚜虫发生量的相关性,并建立蚜虫种群发生量模型。探讨在大尺度区域范围内,区域农田景观格局对麦田蚜虫种群的影响,以及影响蚜虫发生的重要景观因子,以期增强区域性生物控害功能的农田景观格局优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

山东省属于暖温带季风气候,是我国小麦的主要产区之一,小麦年均种植面积超过了 300 万 hm^2 ,年均产量超过了 1800 万 t。小麦与玉米接茬轮作是该地区主要的种植制度,6 月收割完小麦后种植玉米。本研究的样点分布在山东省 62 个县市的小麦种植区(图 1)。

1.2 蚜虫种群调查

2009 与 2010 年的 4 月、5 月和 6 月在 62 个样点县调查了小麦蚜虫的种群数量(图 1),主要包括麦长管蚜(*Sitobion avenae*)、麦二叉蚜(*Schizaphis graminum*)和禾谷缢管蚜(*Rhopalosiphum padi*)3 种麦蚜。在每个样点县范围内选取 10 块左右代表性强的小麦田,每块田按

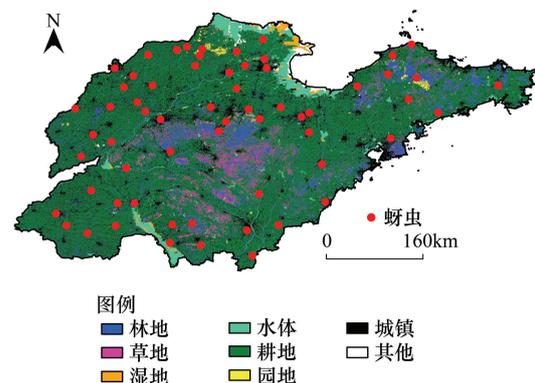


图 1 山东省土地覆盖类型与取样点分布图

Fig.1 Land use map and distribution of the study sites in Shandong Province

照 5 点取样,每个样点调查 200 株小麦,统计每块田的百株蚜虫数量,最后计算每个样点县的年平均百株蚜虫量。

1.3 遥感影像和景观类型分类

本研究使用的遥感数据来源于 2010 年 Landsat TM/ETM 的中分辨率卫星影像。使用 ENVI 5.0 遥感图像处理软件对图像进行几何校正、裁剪、增强等预处理。利用遥感影像分类图及其数值编码,获得山东土地覆盖分类栅格数据,此栅格数据的土地覆盖类型共分为 38 类^[8,26]。在本研究中,根据山东的实际土地覆盖类型情况,使用 ARCGIS 10.2 软件将栅格数据的土地覆盖类型合并整理为 8 类:耕地、园地、林地、草地、城镇、水体、湿地、其他用地(图 1)。栅格数据的空间分辨率为 30 m×30 m。利用 ARCGIS 10.2 软件提取出各样点县的土地覆盖分类栅格数据。

1.4 景观格局分析

本研究选取了景观类型比例(PLAND)、斑块面积(AREA)、最大斑块指数(LPI)、斑块密度(PD)、边界密度(ED)、分维数(FRAC)、几何最邻近距离(ENN)、斑块丰富度密度(PRD)、香农多样性指数(SHDI)等常用的景观格局指数,其中 AREA、FRAC 与 ENN 由平均值(MN)、面积加权平均值(AM)2 个统计分布值来度量,如 AREA_AM 为平均斑块面积、AREA_AM 为面积加权平均斑块面积(表 1)。这些景观格局指数从景观斑块

表 1 景观格局指数

Table 1 Landscape pattern metrics

景观指数 Landscape metrics	描述 Description
景观类型比例 Percentage of landscape (PLAND)	某一斑块类型的面积占整个景观面积的百分比
平均斑块面积 Mean patch area (AREA_MN)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块的总面积除以该类型斑块的数目;在景观水平上等于景观总面积除以景观中所有斑块的总数
面积加权平均斑块面积 Area-weighted mean patch area (AREA_AM)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块面积的面积加权平均值;在景观水平上等于景观中所有斑块面积的面积加权平均值。面积加权平均是每个斑块的某一景观指数值与它所占该斑块类型面积(或整个景观面积)比重的乘积,然后再求和
最大斑块指数 Largest patch index (LPI)	在斑块类型水平上等于某一类型类型中最大斑块的面积占整个景观面积的百分比;在景观水平上等于景观中最大斑块的面积占整个景观面积的百分比
斑块密度 Patch density (PD)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块的数目除以景观总面积;在景观水平上等于景观中所有斑块的总数除以景观总面积
边界密度 Edge density (ED)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块的边界总长度除以景观总面积;在景观水平上等于景观的边界总长度除以景观总面积。
平均斑块分维数 Mean patch fractal dimension (FRAC_MN)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块分维数的平均值;在景观水平上等于景观中所有斑块分维数的平均值。分维数是度量斑块形状的复杂程度,取值范围为[1,2],周长非常简单的形状(如正方形),其值接近 1;周长迂回曲折的形状,其值接近 2
面积加权平均斑块分维数 Area-weighted mean patch fractal dimension (FRAC_AM)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块分维数的面积加权平均值;在景观水平上等于景观中所有斑块分维数的面积加权平均值
平均几何最邻近距离 Mean Euclidean nearest neighbor distance (ENN_MN)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块几何最邻近距离的平均值;在景观水平上等于景观中所有斑块几何最邻近距离的平均值。几何最邻近距离是某一斑块到它最近的同类型斑块之间的距离
面积加权平均几何最邻近距离 Area-weighted mean Euclidean nearest neighbor distance (ENN_AM)	在斑块类型水平上等于某一类型斑块几何最邻近距离的面积加权平均值;在景观水平上等于景观中所有斑块几何最邻近距离的面积加权平均值
斑块丰富度密度 Patch richness density (PRD)	景观中斑块类型数除以景观总面积
香农多样性指数 Shannon's diversity Index (SHDI)	景观中各斑块类型的面积比重与其自然对数乘积的总和,再取相反数。景观中只有一个斑块时,其值为 0

的面积比例、大小、密度、边缘、形状、聚集、多样性等方面来定量描述区域农田景观的空间格局特征^[5,27-28]。基于土地覆盖类型栅格数据,利用景观格局分析软件 FRAGSTATS 4.2^[29],从农田生态系统景观、非作物生境景观和县域景观 3 个层次来计算各样点县的景观格局指数。

1.5 数据处理

利用 R 3.2.5 软件计算各样点县农田、非作物生境和县域景观 3 个方面的景观格局指数与麦蚜种群数量的 Pearson 相关系数及其显著性检验。使用 R 3.2.5 软件的 `glm.nb()` 函数建立景观格局指数与蚜虫种群数量之间的负二项分布的广义线性模型,根据赤池信息准则 (adjusted akaike's information criterion, AICc) 评估各模型的优劣并进行模型选择,分析区域农田景观因子对麦蚜种群的影响。通常 AICc 值最小的模型为最优模型, AICc 值越小模型越优。

2 结果与分析

2.1 区域农田景观的组成

62 个样点县的区域农田景观由耕地、园地、林地、草地、水体、湿地、城镇和其他用地组成。农田生态系统景观包括耕地与园地,非作物生境景观包括林地、草地、水体和湿地。62 个样点县中,耕地的 PLAND 最大为 79.36%、最小为 23.56%,平均为 60.82%;园地的 PLAND 最大为 11.65%,最小为 0.01%,平均为 1.30%;林地的 PLAND 最大为 46.24%,最小为 0.10%,平均为 10.33%;草地的 PLAND 最大为 15.16%,最小为 0.003%,平均为 2.38%;水体的 PLAND 最大为 53.85%,最小为 0.34%,平均为 6.25%。湿地的 PLAND 最大为 14.70%,最小为 0.003%,平均为 3.26%。

2.2 麦蚜种群发生量

通过对各县域样点麦蚜种群数量的调查,62 个县域中,百株蚜量最小为 625 头,最大为 11575 头,平均为 3007.4 头,大多数县域的百株蚜量在 1000—4000 头之间(图 2)。麦蚜种群的发生量呈区域性分布,有的县域之间差异很大。

2.3 农田景观、区域景观与麦蚜种群发生量的相关性

农田由耕地与园地构成。以县域为空间尺度,分析了县域范围内耕地与园地的景观格局、整个县区域范围的景观格局与麦蚜种群数量的相关性。农田景观中耕地的斑块面积 (AREA) 对麦蚜种群有显著的抑制作用,耕地的 AREA_MN ($R = -0.269, P = 0.035$)、AREA_AM ($R = -0.259, P = 0.042$) 与麦蚜的种群数量呈显著负相

关;耕地的 PD 对麦蚜种群有显著的促进作用,与麦蚜的种群数量呈显著正相关 ($R = 0.310, P = 0.014$) (表 2)。园地的景观格局与麦蚜的种群数量没有显著的相关性(表 2)。县域的 AREA_AM ($R = -0.258, P = 0.043$)、ENN_MN ($R = -0.278, P = 0.029$) 与麦蚜的种群数量呈显著负相关(表 2)。可见耕地的景观格局与麦蚜种群的相关性强于园地与县域景观。

2.4 非作物生境景观与麦蚜种群发生量的相关性

以县域为空间尺度,分析了县域范围内作为非作物生境的林地、草地、水体与湿地的景观格局与麦蚜种群数量的相关性。农田景观中草地的斑块面积 (AREA) 对麦蚜有显著的促进作用,草地的 AREA_MN ($R = 0.498, P < 0.001$)、AREA_AM ($R = 0.411, P = 0.002$)、LPI ($R = 0.593, P < 0.001$)、FRAC_AM ($R = 0.330, P = 0.017$) 与麦蚜的种群数量显著正相关(表 3)。湿地的 FRAC_AM 与麦蚜的种群数量显著正相关 ($R = 0.560, P = 0.037$, 表 3)。林地与水体的景观格局与麦蚜的种群数量没有相关性(表 3)。可见草地的景观格局与麦蚜种

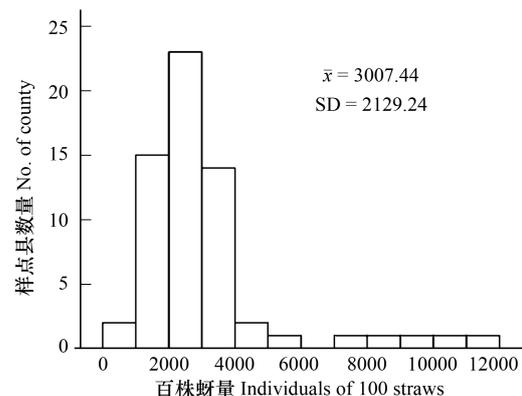


图 2 麦蚜种群数量特征

Fig.2 The characteristic of populations of wheat aphid

群的相关性最强,草地促进了麦蚜的发生。

表 2 农田、区域景观格局与麦蚜种群数量的相关性

Table 2 Correlation between landscape pattern of cropland and county and wheat aphid population

景观格局指数 Landscape pattern metrics	耕地景观 Farmland		园地景观 Orchard		县域景观 County	
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
景观类型比例 (PLAND)	-0.091	0.484	-0.065	0.698		
平均斑块面积 (AREA_MN)	-0.269	0.035 *	-0.066	0.694	-0.149	0.247
面积加权平均斑块面积 (AREA_AM)	-0.259	0.042 *	-0.059	0.725	-0.258	0.043 *
最大斑块指数 (LPI)	-0.142	0.270	-0.046	0.783	-0.117	0.366
斑块密度 (PD)	0.310	0.014 *	-0.085	0.610	0.191	0.136
边界密度 (ED)	0.202	0.115	-0.052	0.756	0.215	0.093
平均斑块分维数 (FRAC_MN)	-0.119	0.357	0.023	0.889	-0.003	0.979
面积加权平均斑块分维数 (FRAC_AM)	-0.092	0.475	0.086	0.607	-0.062	0.632
平均几何最邻近距离 (ENN_MN)	-0.173	0.178	0.035	0.842	-0.278	0.029 *
面积加权平均几何最邻近距离 (ENN_AM)	0.007	0.959	0.195	0.261	0.047	0.715
斑块丰富度密度 (PRD)					0.187	0.146
香农多样性指数 (SHDI)					0.097	0.452

* $P < 0.05$.

表 3 非作物生境景观格局与麦蚜种群数量的相关性

Table 3 Correlation between landscape pattern of non-crop habitat and wheat aphid population

景观格局指数 Landscape pattern metrics	林地景观 Forest		草地景观 Grassland		水体景观 Water		湿地景观 Wetland	
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
景观类型比例 (PLAND)	0.018	0.888	0.153	0.278	0.014	0.917	-0.126	0.667
平均斑块面积 (AREA_MN)	-0.154	0.231	0.498	0.000 **	-0.018	0.888	-0.195	0.504
面积加权平均斑块面积 (AREA_AM)	-0.120	0.355	0.411	0.002 **	0.006	0.961	-0.135	0.645
最大斑块指数 (LPI)	-0.041	0.753	0.593	0.000 **	0.030	0.814	-0.125	0.671
斑块密度 (PD)	0.232	0.069	0.041	0.774	-0.068	0.602	0.037	0.901
边界密度 (ED)	0.201	0.117	0.060	0.671	0.010	0.938	0.029	0.921
平均斑块分维数 (FRAC_MN)	0.064	0.620	0.106	0.454	-0.062	0.633	0.419	0.136
面积加权平均斑块分维数 (FRAC_AM)	0.017	0.896	0.330	0.017 *	-0.041	0.752	0.560	0.037 *
平均几何最邻近距离 (ENN_MN)	-0.134	0.298	-0.030	0.841	0.023	0.861	-0.282	0.351
面积加权平均几何最邻近距离 (ENN_AM)	-0.133	0.301	-0.020	0.893	-0.118	0.362	-0.211	0.489

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

2.5 景观格局对麦蚜种群的影响

通过相关系数分析,耕地的平均斑块面积 ($AREA_MN_{fa}$)、面积加权平均斑块面积 ($AREA_AM_{fa}$)、斑块密度 (PD_{fa}),草地的平均斑块面积 ($AREA_MN_{gr}$)、面积加权平均斑块面积 ($AREA_AM_{gr}$)、最大斑块指数 (LPI_{gr})、面积加权平均斑块分维数 ($FRAC_AM_{gr}$),湿地的面积加权平均斑块分维数 ($FRAC_AM_{we}$),县域的面积加权平均斑块面积 ($AREA_AM_{co}$)、平均几何最邻近距离 (ENN_MN_{co}),与麦蚜种群显著相关。使用这 10 个景观指数与麦蚜种群的数量建立负二项分布的广义线性模型,通常认为 ΔAIC 小于 2 的模型为有竞争力的模型,模型按 AIC_c 值从小到大的排序见表 4。其中,包含景观变量草地的 $AREA_MN$ 、 $AREA_AM$ 、 LPI 和非作物生境的 ENN_AM 的模型排第一, AIC_c 值最小,也即为最优模型 ($Y = 8.151 - 0.0015 AREA_AM_{gr} + 0.0445 AREA_MN_{gr} + 0.8718 LPI_{gr} - 0.0031 ENN_MN_{co}$),该模型的权重 W_i 为 12%,对蚜虫的种群数量拟合最好,能更好的预测蚜虫种群的发生量。蚜虫种群的数量与草地的 $AREA_MN$ 、 LPI 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$),与县域的 ENN_MN 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),草地平均斑块面积的增大有利于麦田蚜虫种群的发生。从其他竞争模型还

可看出,蚜虫种群的数量与耕地的 AREA_AM ($P<0.01$)、县域的 AREA_AM ($P<0.05$)呈显著负相关关系,与耕地的 PD 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。表 4 中所有的竞争模型均包含草地的斑块面积这一景观变量,可见草地的斑块面积是影响麦蚜种群的重要景观因子。

表 4 麦蚜种群发生量模型选择

Table 4 Model selection statistics for wheat aphid abundance

模型 Model	R^2	df	logLik	AIC _c	Δ AIC	W_i
8.151-0.0015 AREA_AM _{gr} +0.0445 AREA_MN _{gr} **+0.8718 LPI _{gr} ** - 0.0031ENN_MN _{co} *	0.52	6	-438.80	891.5	0.00	0.12
7.679-0.54×10 ⁻⁵ AREA_AM _{fa} **+0.0260 AREA_MN _{gr} ** + 0.7049 LPI _{gr} **	0.50	5	-440.11	891.5	0.05	0.12
8.338+0.0330 AREA_MN _{gr} **+0.5281 LPI _{gr} *-0.0036ENN_MN _{co} *	0.50	5	-440.20	891.7	0.24	0.11
7.577-0.45×10 ⁻⁵ AREA_AM _{fa} *-0.0014 AREA_AM _{gr} +0.0373 AREA_MN _{gr} **+0.9977 LPI _{gr} **	0.52	6	-439.03	891.9	0.46	0.09
7.681+0.0274 AREA_MN _{gr} **+0.6770 LPI _{gr} ** -0.78×10 ⁻⁵ AREA_AM _{co} *	0.49	5	-440.40	892.1	0.63	0.09
8.188+0.0310 AREA_MN _{gr} **+0.5494 LPI _{gr} *-0.49×10 ⁻⁵ AREA_AM _{co} -0.0024ENN_MN _{co}	0.51	6	-439.45	892.8	1.30	0.06
7.179+0.6943 PD _{fa} *+0.0323 AREA_MN _{gr} **+0.5165 LPI _{gr}	0.48	5	-440.76	892.8	1.37	0.06
8.118-0.34×10 ⁻⁵ AREA_AM _{fa} +0.0299 AREA_MN _{gr} **+0.5847 LPI _{gr} *-0.0021ENN_MN	0.51	6	-439.49	892.9	1.39	0.06
7.573-0.0013 AREA_AM _{gr} +0.0380 AREA_MN _{gr} **+0.9609 LPI _{gr} ** - 0.61×10 ⁻⁵ AREA_AM _{co}	0.51	6	-439.50	892.9	1.39	0.06
7.461-0.40×10 ⁻⁵ AREA_AM _{fa} +0.3970 PD _{fa} +0.0291 AREA_MN _{gr} **+0.5776 LPI _{gr} *	0.51	6	-439.54	892.9	1.47	0.06
7.377-0.0019 AREA_AM _{gr} *+0.0427 AREA_MN _{gr} **+1.1530 LPI _{gr} **	0.48	5	-440.95	893.2	1.74	0.05
7.444+0.4277 PD _{fa} +0.0303 AREA_MN _{gr} **+0.5477 LPI _{gr} *-0.56×10 ⁻⁵ AREA_AM _{co}	0.50	6	-439.74	893.3	1.88	0.05
8.009-0.25×10 ⁻⁵ AREA_AM _{fa} -0.0014 AREA_AM _{gr} +0.0410 AREA_MN _{gr} **+0.8758 LPI _{gr} ** -0.0021 ENN_MN _{co}	0.53	7	-438.42	893.4	1.91	0.05
7.184+0.5240 PD _{fa} -0.0014 AREA_AM _{gr} +0.0422 AREA_MN _{gr} **+0.8585 LPI _{gr} *	0.50	6	-439.80	893.5	2.00	0.04

表中只列出了 Δ AIC_c<2 的模型,其中第一个模型为最优模型即 AIC_c值最小。*表示景观变量在 0.05 水平上显著相关,**表示景观变量在 0.01 水平上显著相关;df 为自由度,logLik 为对数极大似然值, Δ AIC 为每个模型的 AIC_c值与最小 AIC_c值相减, W_i 为 Akaike 权重

3 讨论

区域农田景观格局对害虫与天敌种群的影响可以从“度”、“质”、“量”、“形”四个方面来分析^[5,8,30]。“度”表示景观格局的时空尺度,本研究在县域尺度上进行了研究。“质”表示景观的组成结构,本研究中调查样点的区域农田景观由耕地、园地、林地、草地、水体等类型组成,其中耕地是主要的组成景观,平均占各样点区域面积的 60.82%,非作物生境平均占 19.31%。“量”表示景观中不同斑块类型的面积比例、大小、密度等,斑块面积 (AREA)、最大斑块指数 (LPI) 和斑块密度 (PD) 可以进行描述。AREA_MN、AREA_AM 与 LPI 描述斑块的面积大小,可不同程度的反映景观的破碎化,值越小越破碎化。PD 是也可反映景观的破碎化,值越大越破碎化。从麦蚜发生量的竞争模型可知,草地的 AREA_MN、LPI 与麦蚜种群数量正相关,其值越大,即连片草地的面积越大,越有利于麦田中蚜虫种群数量的增加。草地斑块面积的增大会为蚜虫栖息和越冬提供更大的场所。耕地的 AREA_AM 与麦蚜种群数量负相关,耕地的 PD 与麦蚜种群数量正相关,区域景观的 AREA_AM 与麦蚜种群数量负相关,耕地与区域景观的破碎化会促进麦蚜种群的发生。“形”表示景观中不同斑块类型的边缘、形状、空间分布和排列方式等,平均几何最邻近距离 (ENN_MN) 可以进行描述。农田景观“形”的

特征对许多生态过程都有影响,如景观斑块的形状和分布影响动物的迁移和捕食等活动。ENN_MN 描述斑块的聚集程度,从麦蚜发生量的竞争模型可知,区域景观的 ENN_MN 与麦蚜种群数量负相关,其值越小,即区域景观中的各类型斑块相对越集中,越有利于麦田中蚜虫种群数量的增加。

在农田景观系统中,麦田周围的非作物生境既可以为蚜虫天敌如瓢虫、寄生蜂提供安全的栖息地、庇护所和越冬地,也可以作为蚜虫的栖息地、避难所与越冬场所,如非作物生境中的杂草或植被可以成为蚜虫的替代寄主或越冬寄主^[1,8];但关于农田景观格局直接对蚜虫种群影响研究还比较少^[31]。本研究结果表明,草地景观是影响麦蚜发生的重要景观因素,草地斑块面积的增大会有利于麦蚜种群数量的增加。这可能是由于小麦收割后蚜虫迁飞转移到麦田附近的草丛里栖息,等下一季小麦种植后又迁回到小麦地,从而增加了麦田蚜虫种群的数量^[8]。生境的破碎化会影响天敌的搜寻行为和聚集行为,从而导致蚜虫种群的动态稳定性下降,蚜虫局部的频繁暴发^[5,32]。复杂农业景观的麦蚜种群增长率大于简单农业景观,可能与生境破碎化影响了天敌瓢虫对猎物的寻找效应及寄生蜂的寄生有关^[33]。本研究结果也表明,区域景观与耕地的破碎化是影响麦蚜种群发生的重要景观因子。生境的破碎化干扰了天敌瓢虫搜寻和捕获蚜虫的能力,从而促进麦蚜种群数量的增加。区域景观的聚集程度也是影响麦蚜种群发生的重要景观因子。这可能是由于生境斑块的聚集,使生境斑块间距离减小,便于蚜虫在各种生境间迁移和栖息,如蚜虫在草地斑块间的迁移扩散,从而有利于麦田中蚜虫种群数量的增加。

本研究表明在县域景观上,非作物生境草地的斑块面积、作物生境耕地的破碎化、区域景观的空间分布及破碎化是影响麦田蚜虫种群发生的重要景观因素。草地斑块面积的增大、区域景观与耕地的破碎化、区域景观的聚集有利于蚜虫种群数量的增加。蚜虫发生量的竞争模型分析可知,使用草地的斑块面积和最大斑块指数、区域景观的平均几何最邻近距离可以预测蚜虫种群的发生量。草地是害虫与天敌重要的栖息场所,今后在设计与规划农田景观格局时,要充分考虑草地等非作物生境对麦田蚜虫及天敌瓢虫的影响,通过优化景观布局最大限度地发挥天敌瓢虫对蚜虫的区域性生态控害作用,从而提高区域性农田景观的生态服务功能。

参考文献 (References):

- [1] 尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 杨广, 李志胜, 蔡鸿娇. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. 昆虫学报, 2004, 47(2): 260-268.
- [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(5): 337-341.
- [3] 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(3): 597-605.
- [4] 戈峰, 欧阳芳, 门兴元. 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, 2017, 32(8): 830-835.
- [5] 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(5): 1177-1183.
- [6] Caballero-López B, Bommarco R, Blanco-Moreno J M, Sans F X, Pujade-Villar J, Rundlöf M, Smith H G. Aphids and their natural enemies are differently affected by habitat features at local and landscape scales. *Biological Control*, 2012, 63(2): 222-229.
- [7] Roubos C R, Rodriguez-Saona C, Isaacs R. Mitigating the effects of insecticides on arthropod biological control at field and landscape scales. *Biological Control*, 2014, 75: 28-38.
- [8] 欧阳芳, 门兴元, 关秀敏, 肖云丽, 戈峰. 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(1): 139-150.
- [9] Robinson R A, Sutherland W J. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39(1): 157-176.
- [10] Benton T G, Vickery J A, Wilson J D. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(4): 182-188.
- [11] Bianchi F J J A, Booij C J H, Tscharntke T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 273(1595): 1715-1727.
- [12] Landis D A, Wratten S D, Gurr G M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 2000, 45: 175-201.
- [13] Evans E W. Multitrophic interactions among plants, aphids, alternate prey and shared natural enemies—a review. *European Journal of Entomology*, 2008, 105(3): 369-380.
- [14] Villegas C M, Verdugo J A, Grez A A, Tapia J, Lavandero B. Movement between crops and weeds: temporal refuges for aphidophagous insects in

- Central Chile. *Ciencia E Investigacion Agraria*, 2013, 40(2): 317-326.
- [15] Ramsden M W, Menéndez R, Leather S R, Wäckers F. Optimizing field margins for biocontrol services: the relative role of aphid abundance, annual floral resources, and overwinter habitat in enhancing aphid natural enemies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 94-104.
- [16] 杨龙, 徐磊, 刘冰, 陆宴辉. 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*, 2016, 53(3): 612-620.
- [17] Tylianakis J M, Didham R K, Wratten S D. Improved fitness of aphid parasitoids receiving resource subsidies. *Ecology*, 2004, 85(3): 658-666.
- [18] Schellhorn N A, Bianchi F J J A, Hsu C L. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59: 559-581.
- [19] Honěk A, Martinková Z, Pekár S. Aggregation characteristics of three species of Coccinellidae (Coleoptera) at hibernation sites. *European Journal of Entomology*, 2007, 104(1): 51-56.
- [20] Wang S, Michaud J P, Tan X L, Zhang F, Guo X J. The aggregation behavior of *Harmonia axyridis* in its native range in Northeast China. *BioControl*, 2011, 56(2): 193-206.
- [21] Dong Z K, Ouyang F, Lu F, Ge F. Shelterbelts in agricultural landscapes enhance ladybeetle abundance in spillover from cropland to adjacent habitats. *BioControl*, 2015, 60(3): 351-361.
- [22] Gagic V, Tschamtkke T, Dormann C F, Gruber B, Wilstermann A, Thies C. Food web structure and biocontrol in a four-trophic level system across a landscape complexity gradient. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 278(1720): 2946-2953.
- [23] Sarthou J P, Badoz A, Vaissière B, Chevallier A, Rusch A. Local more than landscape parameters structure natural enemy communities during their overwintering in semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 194: 17-28.
- [24] Zhao Z H, Hui C, Hardev S, Ouyang F, Dong Z K, Ge F. Responses of cereal aphids and their parasitic wasps to landscape complexity. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107(2): 630-637.
- [25] 赵紫华, 王颖, 贺达汉, 关晓庆, 辛明. 麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析. *生态学报*, 2012, 32(2): 472-482.
- [26] 欧阳志云, 张路, 吴炳方, 李晓松, 徐卫华, 肖焱, 郑华. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系. *生态学报*, 2015, 35(2): 219-226.
- [27] Schwarz N. Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(1): 29-47.
- [28] Li J X, Li C, Zhu F G, Song C H, Wu J G. Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1545-1565.
- [29] McGarigal K, Cushman S A, Ene E. FRAGSTATS v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. Amherst: University of Massachusetts, 2012. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- [30] 卢增斌, 欧阳芳, 张永生, 关秀敏, 门兴元. 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*, 2016, 36(14): 4447-4455.
- [31] Chaplin-Kramer R, O'Rourke M E, Blitzer E J, Kremen C. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 922-932.
- [32] 赵紫华, 贺达汉, 杭佳, 石云, 赵映书, 王颖. 设施农业景观下破碎化麦田麦蚜及寄生蜂种群的最小适生面积. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 206-214.
- [33] 赵紫华, 石云, 贺达汉, 杭佳, 赵映书, 王颖. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. *生态学报*, 2010, 30(23): 6380-6388.