应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2017, 54(4): 660–666. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2017.081

# 麦蚜与龟纹瓢虫在麦田的空间格局分析*

李文强[1, 2**] 卢增斌[1] 李丽莉[1] 董 松[1] 于 毅[1] 门兴元[1***] 叶保华[2***]

（1. 山东省农业科学院植物保护研究所，济南 250100；2. 山东农业大学植物保护学院，泰安 271018）

**摘 要** **【目的】** 为保护麦田天敌并合理利用天敌对麦蚜进行控制。**【方法】** 通过田间网格式取样调查，应用生态位和地统计学方法研究了麦田中麦蚜及其主要天敌龟纹瓢虫 *Proplaea japonica* 的时空分布格局。**【结果】** 麦蚜及瓢虫时间序列上的种群动态分析显示，麦田中龟纹瓢虫发生期比麦蚜滞后，麦蚜与龟纹瓢虫的种群数量动态趋势相似，种群相关系数为 0.930，表明龟纹瓢虫与麦蚜种群呈明显的跟随关系。在空间上，麦蚜和龟纹瓢虫两者的生态位重叠度随着麦蚜的发生量增多而增高，最高达 0.52。麦蚜与龟纹瓢虫的空间格局在时间序列上，随着种群数量改变而变化。在低种群密度下，麦蚜的半变异函数为线性模型，呈随机分布；在高密度下，麦蚜和龟纹瓢虫的的半变异函数均为指数模型，呈聚集分布。Block Kriging 空间插值分析，得到二维空间插值模拟图，较好反映了麦蚜和龟纹瓢虫种群在麦田的时空分布。**【结论】** 麦田生态系统中麦蚜与其天敌——龟纹瓢虫在时空分布上具有较强的相似性。同时研究结果提示，评价自然天敌对害虫的控害功能时，要综合分析两者的数量关系和空间分布关系及其控害功能的协同作用，才能提出可靠的防治策略。

**关键词** 麦蚜，龟纹瓢虫，空间格局，地学统计学

# Spatial patterns of wheat aphids and *Propylaea japonica* in wheat fields

LI Wen-Qiang[1, 2**] LU Zeng-Bin[1] LI Li-Li[1] DONG Song[1]
YU Yi[1] MEN Xing-Yuan[1***] YE Bao-Hua[2***]

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;
2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract** **[Objectives]** Conservation and utilization of natural enemies of wheat aphids in wheat fields. [**Methods]** Wheat aphids and *Proplaea japonica* were sampled using a sampling grid and ecological niche and geostatistical methods were used to analyze their spatial patterns and the relationships between them. [**Results**] Population dynamics of aphids and *P. japonica* were similar in different seasons. Population sizes of both species were significantly correlated with a correlation coefficient of 0.930. This indicates that aphid abundance has a positive impact on the abundance of *P. japonica*. In addition, both aphids and *P. japonica* had broad ecological niches and the overlap between these increased with aphid density up to a peak value of 0.52. The spatial patterns of wheat aphids and *P. japonica* also changed according to the densities of aphids during the entire sampling period. Aphids were randomly distributed at lower density. However, at higher densities, semivariograms of aphids and *P. japonica* were best simulated by an exponential model, indicating an aggregative population distribution. 2D-maps of spatial distribution stimulated by Block Kriging interpolation can intuitively show the spatial distributions of aphids and *P. japonica* in wheat fields. [**Conclusion**] The temporal population dynamics and spatial distribution of wheat aphids and *P. japonica* are very similar in wheat fields. Thus, wheat aphid management should comprehensively take into account these population relationships, spatial patterns and the biological control services provided by the natural enemy *P. japonica*.

*资助项目 Supported projects：山东省自然基金（ZR2014YL019）；山东省博士后创新专项基金；山东省农业科学院农业科技创新工程（CXGC2016A09）；山东省农业重大应用技术创新项目；山东省重点产业关键技术项目（2016CYJS03A01）

**第一作者 First author，E-mail：lovedaoba@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：menxy2000@hotmail.com；baohua@sdau.edu.cn

收稿日期 Received：2016-12-02，接受日期 Accepted：2017-03-20

**Key words**　wheat aphids, *Proplaea japonica*, spatial pattern, geostatistics

麦蚜主要包括麦长管蚜 *Sitobion avenae*、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 和禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*，不仅能直接刺吸小麦汁液，同时传播植物病毒，3 种蚜虫在麦田常常混合发生，是对小麦生产造成严重危害的有害生物之一（Nauen *et al.*，1998；Ragsdale *et al.*，2007；Vernon *et al.*，2013）。龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 是我国北方麦田中优势的捕食性瓢虫种类，对麦蚜种群具有极强的控制效果。阐明自然天敌种群与害虫种群在农田生态系统中的时空关系，是保护和利用自然天敌控害功能的基础。近年来，随着全球气候变化、作物品种和栽培管理变化，麦田的许多重要害虫呈现出新的灾变趋势（Ouyang *et al.*，2016），田间害虫及其自然天敌的关系也发生了深刻变化。

山东省是我国小麦主产区，小麦种植面积 373.3 多万 $hm^2$，居全国第二位，麦蚜一直是威胁山东省小麦安全生产的主要害虫。为此，本文系统研究了麦田生态系统中麦蚜与龟纹瓢虫的分布格局及其时空关系，以期为麦蚜的生物控害及其持续治理提供理论支持。

## 1　材料与方法

### 1.1　调查麦田

试验田设在山东省济南市济阳县山东省农业科学院试验基地（36.98°N，116.98°E）。小麦品种为常规小麦品种——济麦 22。试验田常规水肥管理，整个小麦生长期不施用任何杀虫剂。选取一块长 12 m、宽 8 m 的田块，采取网格式取样，即将调查的麦田分成 96 个 1 m 的小样方，每个样方调查并统计 10 株小麦上各种节肢动物的种类和数量。调查时间为 4 月 10 日到 5 月 21 日，每 3 d 调查一次。

### 1.2　分析方法

**1.2.1**　麦蚜和龟纹瓢虫种群动态分析　把每次调查时的麦蚜和龟纹瓢虫种群数量换算成百株虫口密度（头/百株），用 Microsoft Excel 2010 绘制麦蚜和龟纹瓢虫种群时间序列动态曲线，并用 SPSS18.0 软件进行时间序列上两个种群数量的相关分析。

**1.2.2**　麦蚜和龟纹的生态位宽度和重叠度　采用 Hulbert 生态位宽度计算麦蚜和龟纹瓢虫的生态位宽度，用 Pianka 测度计算麦蚜和龟纹瓢虫的生态位重叠度（张君亭等，2010）。

**1.2.3**　麦蚜和龟纹的空间格局分析　基于地统计学的区域化变量理论，借助半方差函数分析麦蚜种群和龟纹瓢虫种群在空间上的分布格局。半方差函数的计算公式（Liebhold *et al.*, 1993）如下：

$$r(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[z(x_{\mathrm{i}})-z(x_{\mathrm{i}}+h)]^2$$

公式中 $\gamma(h)$为相对于距离 $h$ 的估计半方差函数数值，$N(h)$是被 $h$ 分隔的数据对的数量，分别表示在点和处的样本测量值，$h$ 为样本间距离。试验中得到的半方差函数通过参数设置，选用最优的理论模型进行拟合，常用的模型主要有球型、指数型、线型和高斯模型等（Hatifield *et al.*，1989）。

采用块状克里格插值法（Block Kriging）进行插值分析（Sun *et al.*，2004），并绘制二维模拟图来反映麦蚜和龟纹瓢虫种群在田间的空间分布情况。

## 2　结果与分析

### 2.1　麦蚜和龟纹瓢虫在时间序列上的种群动态

整个调查期间麦蚜和龟纹瓢虫的种群动态见图 1。4 月 18 日麦蚜始发生，百株虫量为 0.2 头，4 月 24 日到 5 月 10 日麦蚜种群逐渐平稳上升，百株虫量始终低于 500 头，低于防治指标。5 月 10 日后，麦蚜种群迅速上升，5 d 内即超过防治指标，5 月 21 日百株虫量达到 1 274 头。4 月 24 日始见龟纹瓢虫，较麦蚜发生滞后，龟纹瓢虫种群数量与麦蚜种群呈正相关关系（$r$= 0.930），在时间上表现出种群跟随现象。龟纹瓢

虫和麦蚜的益害比动态呈单峰型，在 4 月 24 日最高，为 1∶32，随着麦蚜种群的快速增长，益害比下降，5 月 21 日为 1∶331（图 2）。

### 2.2 麦蚜及龟纹瓢虫的空间生态位分析

图 3 显示，麦蚜在前期种群密度较低的时候，种群的生态位宽度较窄，但随着种群数量增加，生态位宽度逐渐增大。龟纹瓢虫和麦蚜生态位宽度发展趋势相似，在种群数量增多时生态位宽度也增大，但麦蚜的空间生态位宽度始终大于龟纹瓢虫。

生态位重叠指数（图 4）显示，5 月 14 日前，麦蚜种群数量较低时，龟纹瓢虫和麦蚜的空间生态位重叠度始终低于 0.30，随着麦蚜和龟纹瓢虫种群增多，它们的空间生态位重叠度迅速增加，5 月 21 日最大，达到了 0.52。

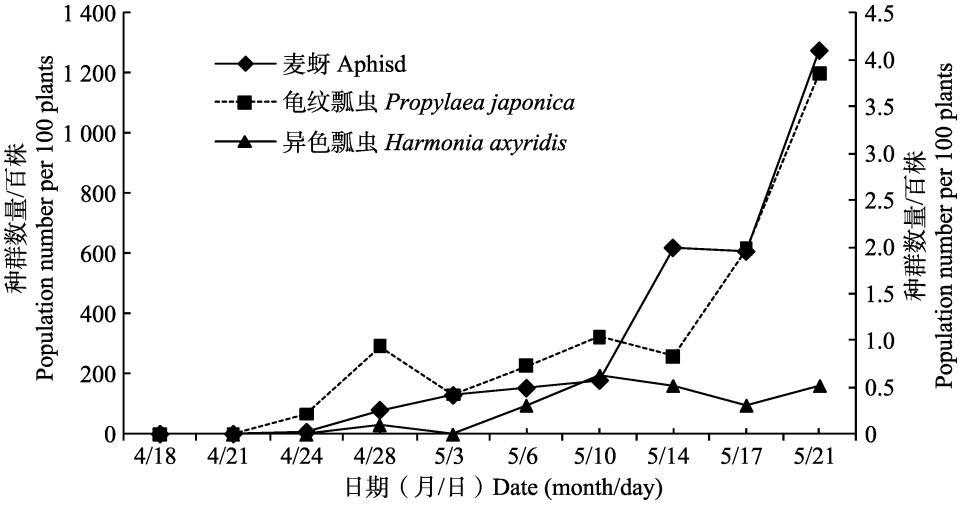


图 1 麦蚜与龟纹瓢虫发生动态

**Fig. 1 Population dynamics of wheat aphid and *propylaea japonica***

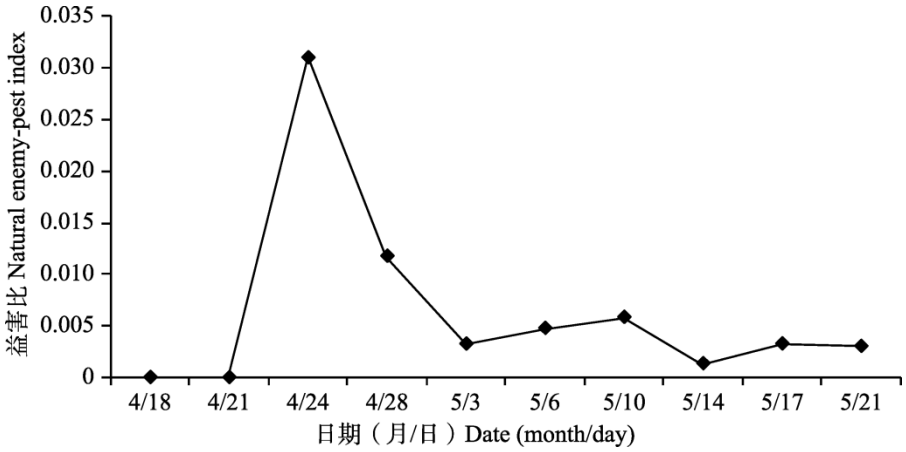


图 2 麦田益害比动态

**Fig. 2 Dynamics of natural enemy-pest index in wheat fields**

### 2.3 麦蚜种群的半方差函数和空间格局

利用 GS+软件处理得出各调查时间麦蚜种群的半方差函数曲线，然后确定相关参数及拟合模型（表 1），绘制的麦蚜种群二维空间插值见图 5。

4 月 24 日和 5 月 3 日，麦蚜开始随机迁入麦田，拟合的模型为线性模型，结构方差 $C_1$ 为 0，空间格局表现为随机型。$C_1$ 表示由于空间非随机机构造成的变异，反映了该变量的空间自相关的变化特征。4 月 28 日空间格局表现聚集型，

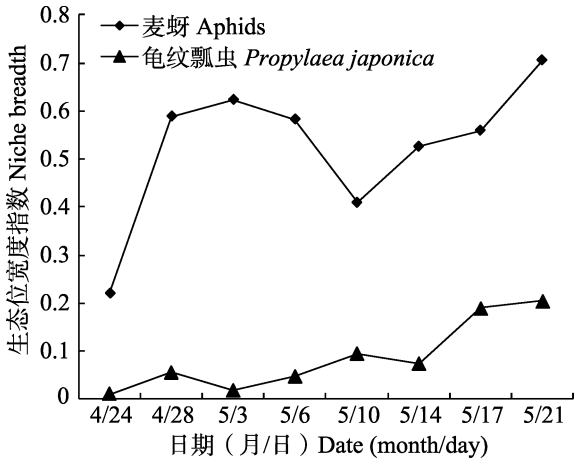


图 3　麦蚜与龟纹瓢虫生态位宽度

**Fig. 3　Niche breadth of wheat aphid and *Propylaea japonica***

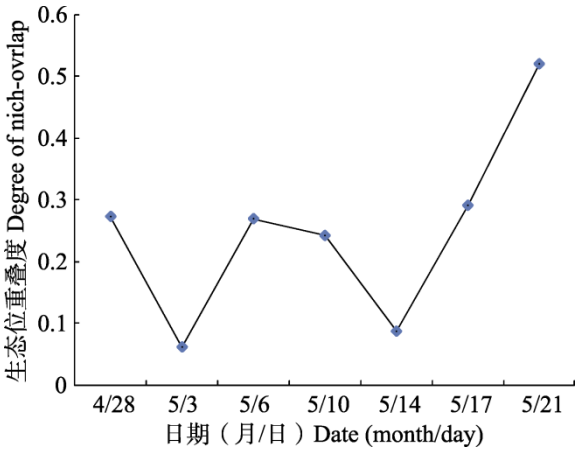


图 4　麦蚜与龟纹瓢虫生态位重叠度

**Fig. 4　Niche-overlap degree of wheat aphid and *Propylaea japonica***

表 1　麦蚜的半变异函数模型参数及空间分布型

**Table 1　The parameters of semivariogram models and spatial patterns of wheat aphid**

| 日期 Date | 块金常数 $C_0$ Nugget | 结构方差 $C_1$ Structure deviation | 基台值 $C_0+C_1$ Sill | 变程 Range | 结构性强度 $C_1/(C_1+C_0)$ Aggregative intensity | 决定系数 $R^2$ Resolution coefficient | 模型 Model | 空间格局 Spatial patterns |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4/24 | 1.44 | 0.00 | 1.44 | 6.31 | 0.00 | 0.60 | 线型 Line | 随机型 Random |
| 4/28 | 2.00 | 41.49 | 43.49 | 1.26 | 0.95 | 0.33 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/3 | 103.90 | 0.00 | 103.90 | 6.31 | 0.00 | 0.74 | 线型 Line | 随机型 Random |
| 5/6 | 62.80 | 119.90 | 182.70 | 1.75 | 0.66 | 0.96 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/10 | 184.00 | 319.30 | 503.30 | 10.71 | 0.63 | 0.94 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/14 | 160.00 | 3 259.00 | 3 419.00 | 3.69 | 0.95 | 0.81 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/17 | 1 916.00 | 2 608.00 | 4 524.00 | 24.90 | 0.58 | 0.92 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/21 | 460.00 | 6 451.00 | 6 911.00 | 3.33 | 0.93 | 0.98 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |

决定系数较小，不能很好的反应元素的空间分布特征。4 月 24 日至 5 月 3 日，麦蚜总体呈现随机分布。

自 5 月 6 日至 5 月 21 日，麦蚜种群持续上升，其半方差函数的变程范围为 1.26~24.90 m，即在此范围内的任意两样点间都存在空间相关性，并且随着距离的增大，空间相关性逐渐减小，而超过此范围样点间的空间相关性不再随距离而改变。拟合半方差函数曲线的理论模型主要是指数模型，各决定系数 $R^2$ 都大于 0.8，说明这些理论模型与试验半方差函数的拟合程度较高。这段时间的结构性强度分别为 0.96、0.81、0.92 和 0.98，总体来说，小麦穗期的麦蚜种群空间格局为集聚型，从相应的二维插值模拟图（图 5）可以看出麦蚜种群的聚集高峰除了 4 月 28 日（在麦田分析图的中下部位）外，其余聚集在麦田的中部偏右的位置，这可能与麦株长势的空间分布有关。

### 2.4　龟纹瓢虫种群的半方差函数和空间格局

龟纹瓢虫种群的空间分析，自 5 月 3 日开始总共 6 次，其半方差函数模型及参数见表 2，二维空间模拟见图 6。5 月 3 日至 5 月 14 日，由于龟纹瓢虫的种群数量较少，半方差函数模型的决定系数均较小（小于 0.2），模型的可靠性较差。5 月 17 日和 5 月 21 日，龟纹瓢虫的空间分布均表现为聚集分布，半方差函数的变程为 1.98 m 和 2.67 m，二维插值模拟图也显示其分布为聚集型。

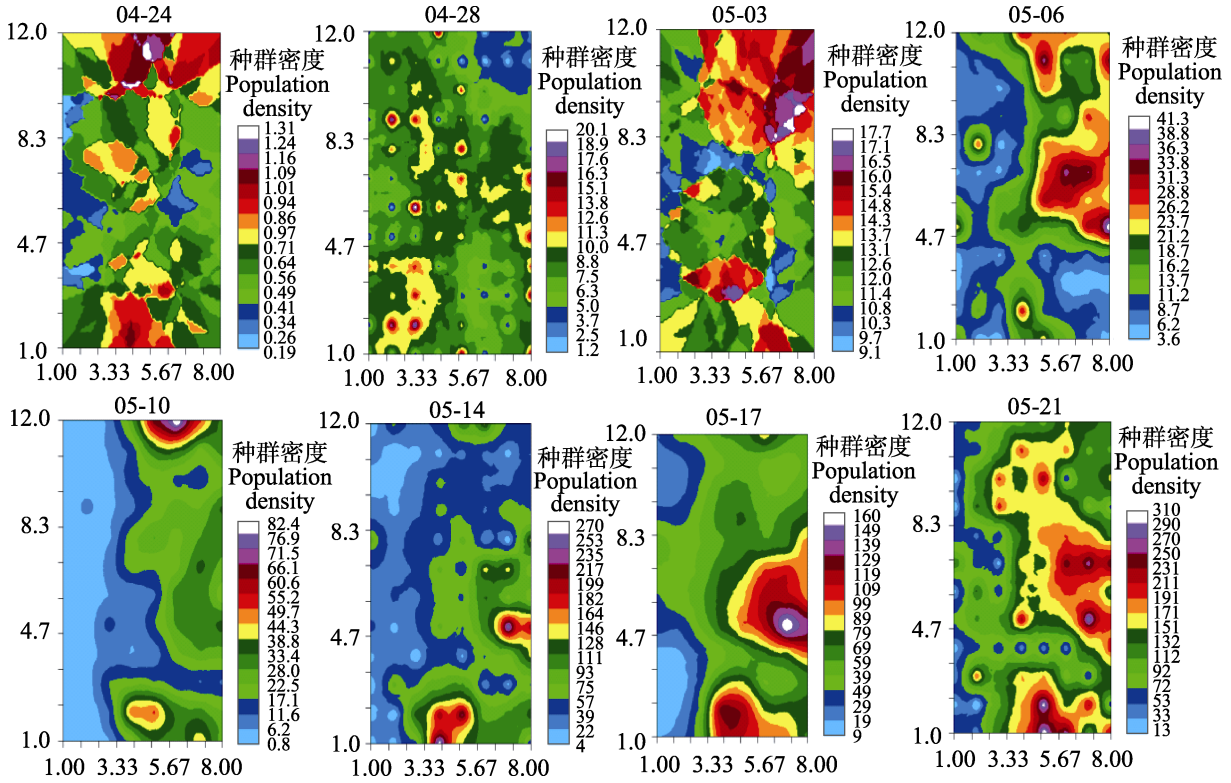


图 5　麦蚜的空间分布图

**Fig. 5　The two-dimensional interpolation maps of wheat aphids**

表 2　龟纹瓢虫半变异函数模型参数及空间分布型

**Table 2　The parameters of semivariogram models and spatial patterns of *Propylaea japonica***

| 日期 Date | 块金常数 $C_0$ Nugget | 结构方差 $C_1$ Structure deviation | 基台值 $C_0+C_1$ Sill | 变程 Range | 结构性强度 $C_1/(C_1+C_0)$ Aggregative intensity | 决定系数 $R^2$ Resolution coefficent | 模型 Model | 空间格局 Spatial patterns |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5/3 | 0.00010 | 0.06 | 0.06 | 1.59 | 1.00 | 0.20 | 球状 Global | 聚集型 congregate |
| 5/6 | 0.01080 | 0.08 | 0.09 | 1.14 | 0.89 | 0.05 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/10 | 0.00690 | 0.09 | 0.10 | 1.14 | 0.93 | 0.08 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/14 | 0.08260 | 0.00 | 0.08 | 6.31 | 0.00 | 0.01 | 线型 Line | 随机型 Random |
| 5/17 | 0.00030 | 0.15 | 0.15 | 1.98 | 1.00 | 0.51 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |
| 5/21 | 0.00200 | 0.48 | 0.48 | 2.67 | 1.00 | 0.70 | 指数 Index | 聚集型 Congregate |

## 3　讨论与结论

麦蚜是我国北方小麦生产上的主要害虫，严重威胁着小麦的安全生产，一直是研究和防治的重点。目前，我国农业生产中防治麦蚜仍然以化学防治为主，持续的化学防治，将不可避免的导致麦蚜的抗性和再猖獗等一系列问题。因此，保护和发挥自然天敌的控害功能是麦蚜持续治理的重要基础。李世功等（1994）提出，在考虑天敌捕食控制作用后，原来仅以麦蚜为害单因素所制定的防治指标可有较大幅度的放宽。大量的研究显示，龟纹瓢虫是麦蚜的重要天敌，发挥着极为重要的自然控制作用。例如，毕守东等（2000）从捕食强度角度上阐明了龟纹瓢虫是麦长管蚜与麦二叉蚜的优势种天敌，邹运鼎等（1999）发现龟纹瓢虫对麦二叉蚜聚集部位有明显的追随跟踪攻击作用，于汉龙等（2014）发现龟纹瓢虫是山东省麦蚜的主要天敌，对麦蚜有稳

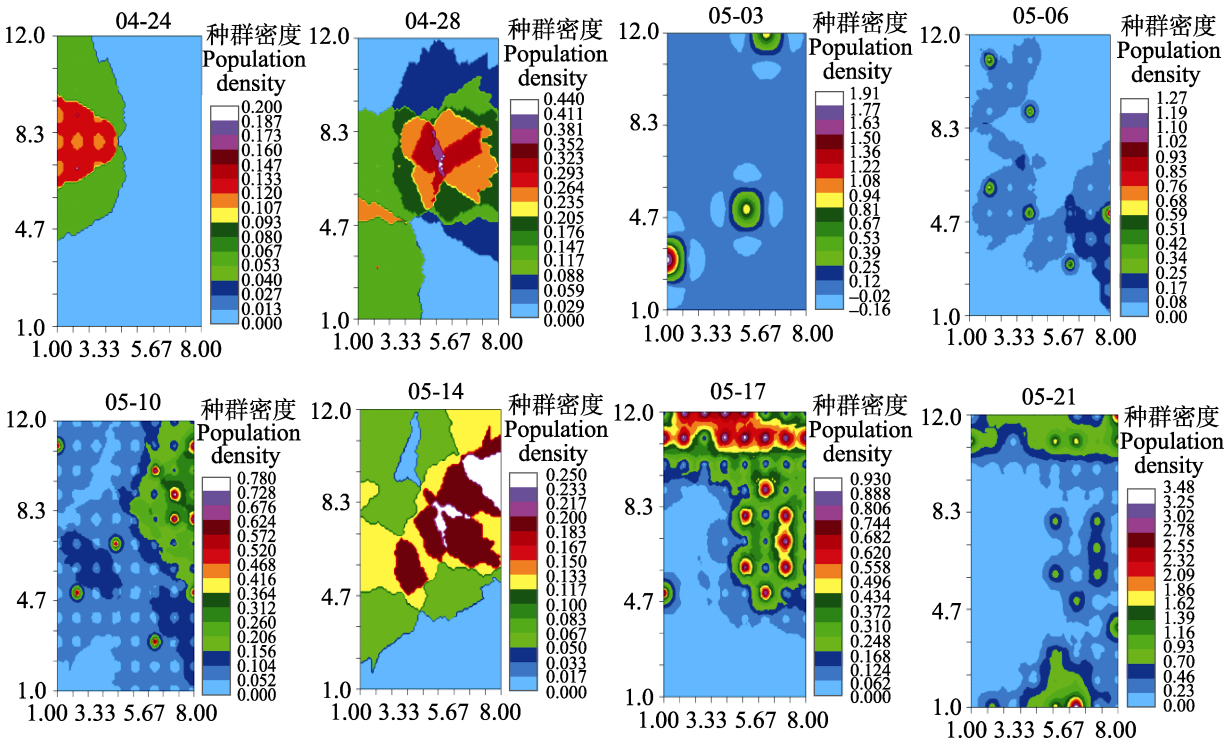


图 6　龟纹瓢虫的空间分布图

**Fig. 6　The two-dimensional interpolation maps of *propylaea japonica***

定的控制作用，控害指数在 30%以上。本研究中，麦蚜及瓢虫时间序列上的种群动态分析显示，麦田龟纹瓢虫发生期比麦蚜滞后，麦蚜与龟纹瓢虫的种群数量动态趋势相似，种群相关系数为 0.930，表明龟纹瓢虫与麦蚜种群呈明显的跟随关系。

麦蚜和龟纹瓢虫都有较大的生态位宽度，两者的生态位重叠度随着麦蚜的发生数量增多而增高。两者的空间分布格局显示，在时间序列上随着种群数量改变而变化。在迁入麦田后，种群密度较低时，麦蚜和龟纹瓢虫都呈现出随机分布，种群空间分布的结构性不强。随着两者种群密度的上升，其分布均符合半变异函数的指数模型，呈聚集分布，表明龟纹瓢虫与麦蚜在时间序列上空间分布也具有较大的相似性。Park 等（2004）报道了玉米田中玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis* 和瓢虫时空分布的地统计学研究结果，发现二者在种群密度达到高峰时表现为聚集分布，而在前期和后期均为随机分布。毕守东等（2000）在研究棉蚜 *Aphis gossypii* 与龟纹瓢虫空间格局关系时，发现棉蚜种群与龟纹瓢虫种群在数量和空间上有较强的跟随关系，这与本研究结果相似。

地统计学分析昆虫的空间格局相比于用经典研究方法，可以充分获取种群数量分布的空间信息，并且易于区别不同空间格局的实际差别。本研究应用地统计学的方法研究了麦蚜及其主要天敌——龟纹瓢虫的空间分布格局，绘制了二维空间插值模拟图，很好的反映了麦蚜和龟纹瓢虫种群的田间分布状况，其空间分布情况在时间序列的变化十分清楚。同时，也发现在麦蚜和龟纹瓢虫的发生初期，种群数量较低时，半方差函数模型的决定系数较小，模型的可靠性较低，显示了该方法在处理低密度种群的局限性。

针对麦蚜与天敌瓢虫在空间的滞后性，我们提出可以通过在田间种植功能植物等措施，提早引入龟纹瓢虫，提高其与麦蚜在时空上的同步性，从而充分发挥龟纹瓢虫的控害功能。

益害比指数反映了自然天敌与害虫数量的关系，作为天敌控害作用的一个重要指标，人们往往根据其大小制定防治策略。我们发现在 4 月 24 日龟纹瓢虫和麦蚜的益害比高达 1∶32，但是

麦蚜的种群仍然持续上升，这可能与龟纹瓢虫迁入麦田较晚，尚未与麦蚜形成空间分布的相似关系有关。随着麦蚜种群的上升，龟纹瓢虫与麦蚜的分布型均呈聚集分布，趋于相似，生态位重叠度达到了达到 0.52，但是由于龟纹瓢虫的种群密度增长远远不及麦蚜，龟纹瓢虫与麦蚜的益害比仅为 1∶331，也无法控制住麦蚜种群增长势头。这表明，评价自然天敌对害虫的控害功能时，紧紧依据害虫和天敌的数量关系是远远不够的，要同时综合分析两者的数量关系和空间分布关系及其控害功能的协同作用，才能提出可靠的防治策略。

## 参考文献 (References)


Bi SD, Zou YD, Geng JG, Wang GM, Chen GC, Meng QL, 2000. Geostatistical analysis on spatial patterns of *Aphis gossypii* and *Propylaca japonica*. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 11(3): 421–424. [毕守东, 邹运鼎, 耿继光, 王公明, 陈高潮, 孟庆雷, 2000. 棉蚜及龟纹瓢虫空间格局的地学统计学研究. 应用生态学报, 11(3): 421–424.]

Hatifield JL, Nielsen DR, Biggar JW, 1989. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51 (3): 1–75.

Li SG, Liu AZ, Liu SM, 1994. Research of relationship between aphid and natural enemy and the beginning control index of aphid. *China Academic Journal*, 21(1): 15–18. [李世功, 刘爱芝, 刘素梅, 1994. 麦蚜与天敌相互关系研究及麦蚜防治指标初报. 植物保护学报, 21(1): 15–18.]

Liebhold AM, Rossi RE, Kemp WP, 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual Review of Entomology*, 38: 303–327.

Ouyang F, Hui C, Men X, Zhang Y, Fan L, Shi P, Zhao Z, Ge F, 2016. Early eclosion of overwintering cotton bollworm moths from warming temperatures accentuates yield loss in wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 217: 89–98.

Park YL, Obrycki JJ, 2004. Spatio- temporal distribution of corn leaf aphids (Homoptera: Aphididae) and lady beetles(Coleoptera: Coccinellidae) in Iowa. *Biological Control*, 31 (2): 210–217.

Robertson GP, Gross KL, 1994. Assessing the heterogeneity of belowground resources: Quantifying pattern and scale// Caldwell MM, Pearcy RW (eds.). Exploitation of Encironmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Belowground. San Diego: Academic Press. 237–253.

Sun YJ, Wang JF, Bai YC, 2004. Study on progress of methods in geostatistics. *Advance in Earth Sciences*, 19(2): 268–274.

Wang SB, Chen B, Wang Y, Bu HM, 2003. Synthesis discussion of prevention and cure on wheat aphid. *J. Shanxi Agric. Sci*., 31 (2): 69–71. [王随保, 陈斌, 王义, 卜鸿梅, 2003. 小麦蚜虫及黄矮病综合防治研究综述. 山西农业科学, 31(2): 69–71.]

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*, 57 (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.]

Zhang JT, Sun YL, Men XY, Yu Y, Zhang AS, Li LL, 2010. Distribution and geostatistics analysis of spatial pattern of *Adelphocoris suturalis* and its main natural enemies in alfalfa (*Medicago sativa*) field. *Shandong Agricultural Sciences*, (2): 20–23. [张君亭, 孙延林, 门兴元, 于毅, 张安盛, 李丽莉, 2010. 紫花苜蓿田中黑盲蝽和主要天敌分布及空间格局的地统计学研究. 山东农业科学, (2): 20–23.]

Zou YD, Geng JG, 1999. Relationship between wheat aphids and its predators population in three dimentional distribution pattern. *Journal of Anhui Agricultural University* 26(2): 117–123. [邹运鼎, 耿继光, 1999. 麦蚜与其天敌种群在三维空间格局上的关系. 安徽农业大学学报, 26(2): 117–123.]