

沙冬青豆荚螟—天敌空间分布的地统计学分析

马志芳, 张大治*, 贺泽帅, 张圣昕

(宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

摘要 空间分布格局是昆虫种群的重要属性。沙冬青是我国重点保护的珍稀濒危植物, 豆荚螟是为害沙冬青种子的主要害虫, 研究种子害虫及其天敌的区域性空间分布格局是害虫宏观管理的前提和基础。地统计学是深入研究昆虫种群空间格局的有效方法。2018年5月—6月, 选择宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区内沙冬青分布片区, 采用地统计学方法, 分析了沙冬青种子害虫豆荚螟幼虫及其天敌的空间分布格局。结果显示沙冬青有虫株率为100%, 豆荚受害率为23.02%, 豆粒受害率为14.11%; 沙冬青豆荚螟幼虫的密度为 (0.2969 ± 0.0020) 头/荚, 寄生性天敌密度为 (0.0120 ± 0.0002) 头/荚。分别采用不同的理论模型来拟合豆荚螟幼虫及其天敌的空间半变异函数曲线, 其全方向半变异函数曲线最优模型分别为高斯模型和球面模型, 空间格局均呈聚集分布; 害虫和天敌存在一定空间相关性, 空间依赖范围分别为88.61~434.05 m和159.05~426.88 m。用Kriging空间插值法对害虫和天敌的空间分布进行模拟, 结果呈斑块状分布, 二者存在空间依赖性和互补性。天敌对害虫有一定的空间跟随效应和控制效应。

关键词 沙冬青; 豆荚螟; 天敌; 空间分布; 地统计学

中图分类号: Q 968.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019290

Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Etiella zinckenella* larvae and their natural enemies on *Ammopiptanthus mongolicus*

MA Zhifang, ZHANG Dazhi*, HE Zeshuai, ZHANG Shengxin

(School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract The spatial variation of insect populations is caused by the interactions between population dynamics on one hand and biotic or abiotic factors on the other. Spatial distribution pattern is an important attribute of insect population. *Ammopiptanthus mongolicus* is a rare and endangered plant in China, and *Etiella zinckenella* is one of the main seed pests of *A. mongolicus*. Understanding the spatial distribution pattern of seed pests and their natural enemies is the premise and basis for integrated pest management. Geostatistics is an effective method for studying the spatial distribution pattern of insect populations. From May to June 2018, we selected a sample plot of *A. mongolicus* in Lingwu Baijitan National Nature Reserve of Ningxia, and analyzed the spatial characteristics of the population spatial structure of *E. zinckenella* larvae and their natural enemies by using geostatistical method. The results showed that each plant of *A. mongolicus* was damaged by seed pests; the damage rate of pods was 23.02%, and the damage rate of beans was 14.11%. The density of *E. zinckenella* larvae was (0.2969 ± 0.0020) per pod and the density of natural enemies was (0.0120 ± 0.0002) per pod. The best models for *E. zinckenella* larvae and their natural enemies were Gauss model and Spherical model; the semi-variogram curve and spatial distribution were fitted by these two models, respectively. The spatial pattern of pests and their natural enemies were aggregated distribution. There was a spatial correlation between the pest and their natural enemies to a certain degree. Analysis of the isotropic variogram indicated that the distance of spatial dependence of the pest and its natural enemies were 88.61—434.05 m and 159.05—426.88 m, respectively. The spatial distribution of pests and their natural enemies was simulated by using Kriging spatial interpolation method. The results showed that the spatial distri-

收稿日期: 2019-06-12 修订日期: 2019-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(31560611, 31860619)

* 通信作者 E-mail: zdz313@nxu.edu.cn

bution was patchy and there was spatial dependence and complementarity between them. Natural enemies of the pest had a spatial following effect and controlling effect on the pest to a certain degree.

Key words *Ammopiptanthus mongolicus*; *Etiella zinckenella*; natural enemy; spatial distribution; geostatistics

昆虫种群空间变异是种群动态与生物或非生物因素相互作用的结果^[1],昆虫的生物学特性与环境的相互作用决定其个体在特定生存空间中的分布格局,这种空间分布格局是昆虫种群的重要属性之一^[2],反映了其种内种间关系、对环境的适应、行为及遗传等对空间需求的内在生物学特性^[3-5]。了解害虫的区域性空间分布格局及发生动态是进行害虫宏观管理的前提和基础^[6-8]。与传统的生物学统计方法相比,利用地统计学方法研究昆虫种群空间格局,能够更为精确地揭示空间相关性和依赖性,并能进行有效的空间插值估计,是深入研究种群空间格局的有效手段,已成为昆虫生态学领域的研究热点和有效方法之一^[1,7]。

沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) Cheng f. 是我国重点保护的珍稀濒危植物,具有重要的生物学和生态学价值^[9-11]。豆荚螟 *Etiella zinckenella* 是沙冬青种子的主要害虫,对沙冬青资源的保护和产业化利用造成一定的影响。空间格局研究是深入认识豆荚螟种群生态学功能和过程的有效途径,基于传统的频次分布指标、聚集度指标及回归分析显示,沙冬青豆荚螟在自然生境、人工栽植生境中空间分布型均呈聚集分布^[12],但是其种群在空间中相关性有多大? 在多大的空间范围存在依赖性? 天敌对其空间分布有何影响? 天敌是否对寄主有一定的追随与控制作用? 用地统计学方法对这些问题进行探讨,通过对害虫与天敌的空间分布异质性的了解,以期为后期沙冬青种子害虫的综合治理提供科学的理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验样地

试验样地位于宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区中部的天然柠条和沙冬青保护片区。该地域属中温带干旱气候,具有典型的大陆性气候特征,其气候特点是:干燥,雨量少,蒸发量大,温差大,日照长,无霜期短,年均气温为 6.7~8.8℃,年降雨量 255.2 mm,年均蒸发量为年降水量的 10.5 倍^[13]。样地地理坐标

为 37° 55' 14" N - 37° 55' 24" N, 106° 33' 4" E - 106° 33' 19" E, 海拔 1 334~1 342 m, 面积 300 m × 400 m。沙冬青盖度约为 45%, 零星分布着柠条,其间为荒漠草原沙生植物。在本样地北部有一条交通道路,为了避免边缘效应的影响,样地北边界至少距离公路 100 m。

1.2 试验方法

于 2018 年 5 月下旬至 6 月上旬对沙冬青种子害虫(豆荚螟)老熟幼虫期进行调查。对样地内的沙冬青进行逐株系统调查并编号,记录其地理坐标,每株沙冬青每次随机摘取不同方位的豆荚 100 枚放入塑封袋内,带回室内饲养观察。室内在体视显微镜下剥开豆荚,统计荚内豆粒数、受害豆粒数、豆荚螟幼虫数,并观察豆荚皮蛀孔数。将豆荚螟幼虫(如表面有寄生蜂卵则用养虫盒单独饲养)放入人工气候箱进行饲养,记录天敌数据。

1.3 空间格局分析方法

1.3.1 半方差函数

空间结构采用半方差函数分析^[14]。公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数值,半方差函数曲线图(semivariogram)是半方差函数 $\gamma(h)$ 对距离 h 的坐标图形。 $N(h)$ 是间隔 h 距离的数据对 $(x_i, x_i + h)$ 的对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是点 x_i 和 $(x_i + h)$ 位置处样本的测量值, h 是 2 个分隔样点的距离。

通过半方差函数拟合生成变异曲线图,其中基台值($C + C_0$)、块金系数(C_0)、变程(a)是 3 个具有重要生态学意义的参数,这 3 个参数决定了半方差函数的形状和结构,并最终决定了种群的空间分布特征^[7]。

1.3.2 变异函数理论模型的拟合

空间变异曲线的拟合主要有高斯模型、球状模型、指数模型和线性模型 4 种,线性模型一般表示种群随机或均匀分布,而其他模型均表示种群呈聚集分布。根据已有的研究表明沙冬青豆荚螟幼虫的空间分布型均呈聚集分布^[12],因此只用前 3 种模型拟

合,具体选择时主要根据模拟误差最小原则,确定最优拟合模型^[14]。根据 $I = 1 - \frac{C_0}{C_0 + C}$ 计算聚集度指标。

1.3.3 空间分布图的生成

在选择合适的拟合模型,得出最优函数曲线后,使用普通 Kriging 插值法对豆荚螟及其寄生性天敌在样地中的数量进行插值分析。空间格局的半方差函数分析以及插值模拟在扩展模块中完成。

1.4 数据统计与分析

应用 Excel 2010 对原始数据进行统计分析。由于本研究发现沙冬青豆荚螟的天敌种群数量相对较少,因此在数据处理时将其归并为一类。在 ArcGIS 10.3 的地统计学拓展模块进行半变异函数分析,利用普通 Kriging 插值法生成空间分布图^[15]。

2 结果与分析

2.1 沙冬青豆荚螟幼虫的种群数量及为害率

本试验共剥检沙冬青豆荚 23 755 枚,有虫株率为 100%。荚内豆粒最多 8 粒/荚,最少 1 粒/荚,平均 2.538 5 粒/荚。豆荚受害率 23.02%,豆粒受害率 14.11%。种子害虫豆荚螟幼虫的密度为(0.296 9 ± 0.002 0)头/荚,寄生性天敌(0.012 0 ± 0.000 2)头/荚。在受害的豆荚中,81.28%的豆荚内只有 1 头豆荚螟幼虫,有时 1 个豆荚内有 2 头(占 14.63%)或 3 头(占

3.22%)豆荚螟幼虫,偶见有 4~6 头幼虫(分别占 0.69%、0.15%和 0.04%)

本研究发现沙冬青种子害虫豆荚螟幼虫的寄生性天敌主要有姬小蜂科的派姬小蜂 *Pediobius* sp.、金小蜂科的拟赘金小蜂 *Halticopterina* sp.、旋小蜂科—未定种、茧蜂科的黄愈腹茧蜂 *Phanerotoma flava* 等,其中派姬小蜂(占总数量的 57.79%)、拟赘金小蜂(占 24.69%)、旋小蜂科—未定种(占 10.69%)为优势种。

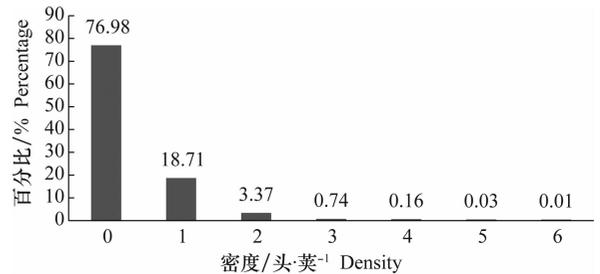


图 1 沙冬青豆荚螟幼虫密度分布直方图

Fig. 1 Density histogram of *Etiella zinckenella* larvae on *Ammopiptanthus mongolicus*

2.2 沙冬青豆荚螟幼虫及其天敌的空间分布

根据建模误差最小原则,优选出沙冬青豆荚螟幼虫的最优模型为高斯模型,天敌的最优模型为球面模型。分别采用高斯模型和球面模型来拟合豆荚螟幼虫及其天敌的半方差函数值,其模型及各参数和空间分布表见表 1,拟合曲线见图 2。

表 1 沙冬青豆荚螟幼虫及其天敌数量的全方向变异函数的理论模型拟合参数及空间分布型

Table 1 Parameters of omnidirection variogram models and spatial distribution for *Etiella zinckenella* larvae and their natural enemies on *Ammopiptanthus mongolicus*

类别 Type	模型 Model	变程 <i>a</i> Range	块金 <i>C</i> ₀ Nugget	基台值 <i>C</i> ₀ + <i>C</i> Sill	空间结构比率 <i>C</i> /(<i>C</i> ₀ + <i>C</i>)/% Spatial structure ratio	聚集度 <i>I</i> Aggregation	决定系数 <i>R</i> ² Decisive coefficient	分布型 Distribution
种子害虫 Seed pest	高斯模型	88.61	0.192 4	0.277 1	30.58	0.305 8	0.810 8	聚集分布
天敌 Natural enemy	球面模型	159.05	0.000 2	0.000 3	49.36	0.493 6	0.799 9	聚集分布

根据拟合模型可知,沙冬青豆荚螟幼虫及其天敌的空间分布有明显的空间结构,其拟合模型分别为高斯模型和球面模型,反映出的空间分布型为聚集分布,其空间异质性主要由空间自相关引起。由表 1、图 2 的块金值 *C*₀ 看出,无论是豆荚螟(0.192 4)还是其寄生性天敌(0.000 2)都较小,表明引起变量的随机程度很小。从变程 *a* 来看,沙冬青种子害虫

豆荚螟幼虫的变程(空间依赖范围)为 88.61 m,其寄生性天敌的变程(空间依赖范围)为 159.05 m,在此距离范围内的任何两样点幼虫或天敌的数量间具有明显的空间依赖性,存在着一定的相关关系,这说明沙冬青种子害虫豆荚螟的幼虫及其天敌在空间上的分布具有连续性,其强度随着距离的增加而减小,当间隔距离超过最大变程(分别为 434.05 m 和 426.88 m)

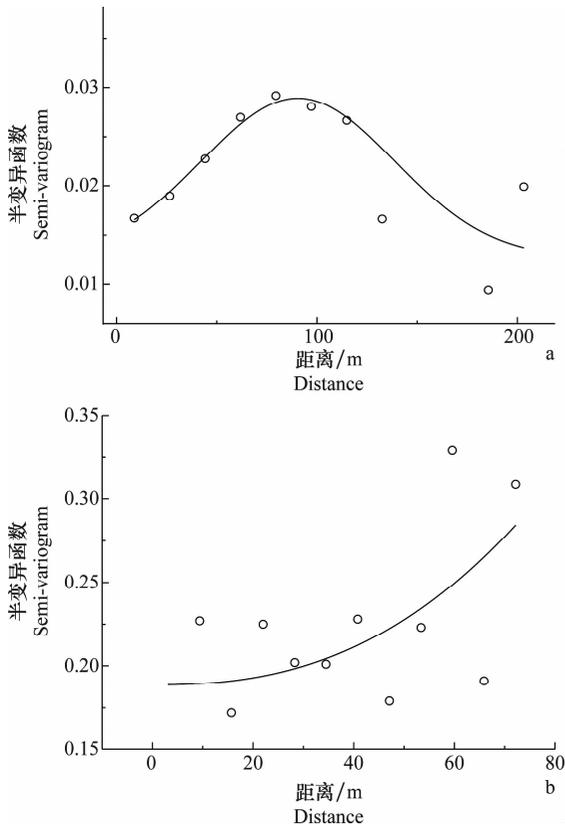


图2 沙冬青豆荚螟幼虫(a)及其天敌(b)的半变异函数曲线图
Fig. 2 Semi-variogram curves for the seed pest of *Ammopiptanthus mongolicus* (a) and their natural enemies (b)

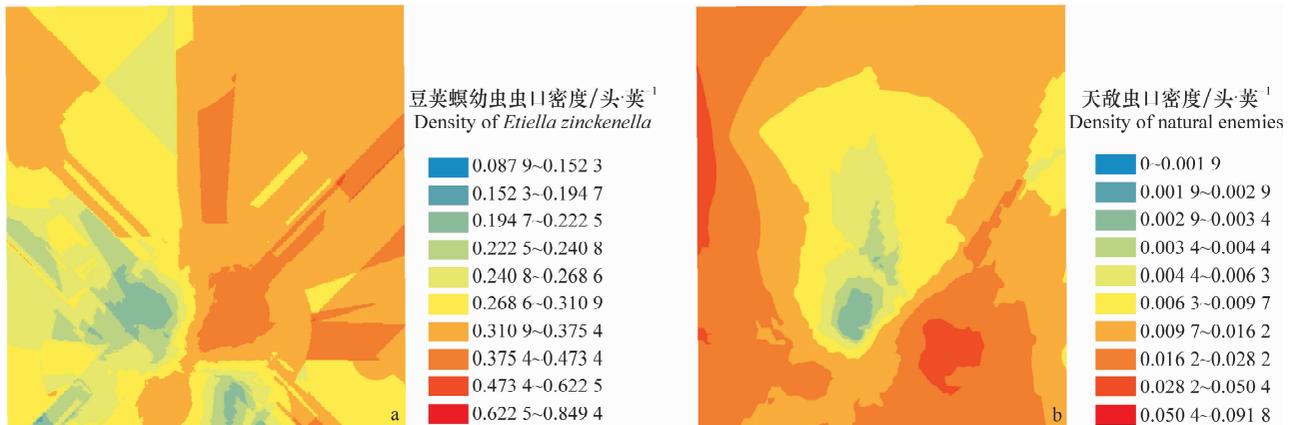


图3 沙冬青豆荚螟幼虫(a)及其天敌(b)的空间插值模拟图

Fig. 3 Kriging maps of the spatial patterns of *Etiella zinckenella* larvae (a) and their natural enemies (b) on *Ammopiptanthus mongolicus*

3 讨论

地统计学是研究昆虫种群空间格局和害虫防控的重要工具之一^[1],由于其考虑了研究对象的空间相关性,在不同尺度下分析昆虫的分布格局、害虫与天敌的空间分布异质性等,比经典方法更为可靠,因此得到了广泛应用^[16]。沙冬青种子害虫豆荚螟幼

虫时,空间相关性变差,甚至没有相互作用。基台值较小表明变量的变化幅度较小。从空间结构比率看,豆荚螟幼虫的为 30.58%,寄生性天敌的为 49.36%,介于 25%~75%之间,表明有中等程度的空间相关性,空间变异性程度主要是由空间自相关因素引起的。变异函数的块金常数的产生可能与试验样地北边不远处的一条交通道路上的人为活动的干扰以及试验误差有关。

2.3 沙冬青豆荚螟幼虫及其天敌空间分布的模拟

在空间相关性分析的基础上,基于最优模型应用普通 Kriging 空间插值法对沙冬青豆荚螟幼虫及其天敌数量进行地统计学分析(图 3)。从图 3 可以看出,无论是豆荚螟幼虫还是其寄生性天敌,空间异质性均较强,在样地中呈斑块状分布,变化明显。豆荚螟幼虫在样地中东部至东北部密度相对较大,由样地西南侧向北侧和东侧逐渐增多,东北侧的异质性大于西南侧,而豆荚螟幼虫的寄生性天敌情况则刚好相反,西南、西部及东南侧的密度相对较大,西南侧的异质性大于东北侧。样地边缘天敌数量较多,而豆荚螟幼虫密度较低,在豆荚螟幼虫密度较大的区域,天敌数量较少,可以看出天敌与害虫在空间上有一定的追随效应,且天敌对害虫有一定的控制作用。

虫的空间分布格局采用经典的统计学方法显示为聚集分布^[12],本研究通过地统计学方法进一步验证了这样的空间分布格局。

在景观层面,生境的破碎化导致了资源的斑块状分布,景观结构对害虫及其天敌在斑块中的空间分布格局影响等方面的研究具有重要意义。事实上,寄主植物的分布、景观格局的变化,都会影响植

食性昆虫的短距离觅食飞行,往往也会影响捕食者和天敌昆虫种群的发生和转移扩散^[17-19]。我们在研究中发现,为害沙冬青种子的豆荚螟与同域生境中为害柠条、苦豆子种子的豆荚螟属于同一物种,尽管这几种沙生植物花期、种子成熟期不同,但有交互重叠期,因此给种子害虫豆荚螟成虫转寄主提供了便利。已有研究表明为害柠条种子的豆荚螟在荒漠生境中表现为聚集分布^[20],寄生性天敌对寄主(豆荚螟)有较强的追随关系,控制力较强^[20-21]。本研究中沙冬青种子害虫豆荚螟和天敌空间分布的 Kriging 插值显示,害虫在样地的东侧及东北侧种群密度较高,而其寄生性天敌的空间分布刚好相反,一方面反映出了寄生性天敌对害虫的控制作用非常明显,天敌在空间上对寄主有较强的追随关系,其较强的寄主跟随能力可以大大提高其寄生效率,在自然状态下对害虫实施生态控制。另一方面豆荚螟幼虫的空间分布是成虫在产卵时的空间异质性体现,豆荚螟雌虫在样地中产卵时就已经决定了幼虫的空间分布格局,同时也反映了雌虫在产卵时的喜好性。沙冬青豆荚螟幼虫空间分布的变程约为 88.61 m,反映出豆荚螟雌成虫在这个范围之内相互有影响,幼虫的空间异质性与沙冬青的分布和环境密切相关。天敌在样地的西南方位密度较大,而这片区域恰好是沙冬青与其他植物斑块交错区域,环境中其他植物的存在,使生境的异质性提高,从而增加天敌的多样性,因此在有害昆虫的防控方面可充分利用这一特性,尽量在斑块化的生境中,增加环境异质性,以达到控害的目的。

边缘效应是生态学中的一个重要概念,也是一个普遍现象。在农业景观中,害虫和天敌在空间上具有明显的边缘效应,一般是斑块边缘害虫群落多样性高于中间,而天敌群落的多样性低于中间^[22],非作物生境是天敌的种质资源库,具有明显的边缘效应和溢出效应,但是超过 30 m 的区域边缘效应以及溢出效应不明显^[23]。在本研究样地北部有一条道路,为了避免边缘效应对取样研究结果的影响,本研究样点边界至少离公路 100 m,但是从空间插值模拟图可以看出斑块边缘及外界的干扰对害虫、天敌的分布还是有一定的影响。虽然样地的西南侧沙冬青分布相对较稀疏,但是还有柠条、甘草、苦豆子等沙生植物,植物群落多样性相对较高,因此寄生性天敌分布也相对较高。当然如何量化景观异质性、边缘效应对害虫、天敌多样性的影响还需要开展进一步研究。

参考文献

[1] SCIARRETTA A, TREMATERRA P. Geostatistical tools for

the study of insect spatial distribution: practical implications in the integrated management of orchard and vineyard pests [J]. *Plant Protection Science*, 2014, 50(2): 97-110.

- [2] 周国法,徐汝梅. 生物地理统计学[M]. 北京:科学技术出版社,1997.
- [3] 徐汝梅. 昆虫种群生态学[M]. 北京:北京师范大学出版社,1987.
- [4] 章一巧,宗世祥,刘永华,等. 陕西省柝黄枯叶蛾蛹的空间分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6308-6317.
- [5] LUO Zhiming, YIN Jiong, LI Wenfeng, et al. Geostatistical analysis of spatial distribution and dynamics of dead heart of sugarcane seedlings caused by borer [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2017, 18(4): 637-641.
- [6] 丁岩钦. 昆虫数学生态学[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [7] 刘永华,郑羽墨,阎雄飞,等. 柝黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的地统计学分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5595-5601.
- [8] 陈潜,许志春,张连生,等. 褐梗天牛幼虫和成虫空间分布的地统计学研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 975-983.
- [9] 刘美芹,卢存福,尹伟伦. 珍稀濒危植物沙冬青生物学特性及抗性研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(3): 384-388.
- [10] 李昌龙,尉秋实,李爱德. 孑遗植物沙冬青的研究进展与展望[J]. *中国野生植物资源*, 2004, 5(23): 21-23.
- [11] 李晓燕,廖里平,高永,等. 沙冬青属植物研究进展[J]. *草地学报*, 2017, 25(5): 921-926.
- [12] 李雪婷,杨益春,张大治,等. 不同生境中沙冬青豆荚螟的危害率及空间分布型[J]. *北方园艺*, 2016(24): 108-111.
- [13] 宋朝枢,王有德. 宁夏白芨滩自然保护区科学考察集[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [14] 王正军,李典漠,商晗武,等. 地质统计学理论与方法及其在昆虫生态学中的应用[J]. *昆虫知识*, 2002, 39(6): 405-411.
- [15] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等. ArcGIS 10 地理信息系统教程[M]. 北京:测绘出版社,2012.
- [16] 唐艳龙,姜静,王小艺,等. 栗山天牛及其天敌花绒寄甲空间分布的地统计学分析[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(2): 290-298.
- [17] MAZZI D, DORN S. Movement of insect pests in agricultural landscapes [J]. *Annals of Applied Biology*, 2012, 160(2): 97-113.
- [18] ROUBOS C R, RODRIGUEZ-SAONA C, ISAACS R. Mitigating the effects of insecticides on arthropod biological control at field and landscape scales [J]. *Biology Control*, 2014, 75(4): 28-38.
- [19] 张永生,欧阳芳,门兴元,等. 区域农田景观格局对麦田天敌瓢虫群落的影响[J]. *昆虫学报*, 2018, 61(4): 468-476.
- [20] 张大治,陈小蔚. 柠条豆荚螟及其天敌空间分布格局的地统计学分析[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(10): 108-110.
- [21] 洪波,辛明,张大治,等. 荒漠草原柠条林地黑胸茧蜂对豆荚螟的追踪作用[J]. *昆虫知识*, 2009, 46(4): 597-602.
- [22] 戈峰,门兴元,苏建伟,等. 边缘效应对棉田害虫和天敌种群的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 91-94.
- [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[J]. *中国科学:生命科学*, 2012, 42(10): 825-840.

(责任编辑:田喆)