

# 基于 GIS 和 GS 的东亚飞蝗卵块空间格局的研究

季 荣<sup>1,2</sup>, 谢宝瑜<sup>2</sup>, 李 哲<sup>2</sup>, 李典谟<sup>2\*</sup>, 孟冬丽<sup>1</sup>

(1. 新疆师范大学生命与环境科学学院, 乌鲁木齐 830054;

2. 中国科学院动物研究所, 农业虫害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 本文以沿渤海蝗区东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) 越冬卵块为研究对象, 野外采用 450 m 和 50 m 规则栅格取样, 包括卵量、植被覆盖度、土壤含水量、含盐量、土壤 pH 和有机质等, 利用地统计学方法, 在 GIS 平台下, 分析研究区域内影响蝗虫产卵选择的环境因子、蝗虫卵块的空间异质性及分布格局。结果表明, 植被覆盖度、土壤含盐量和土壤含水量在有卵和无卵的环境中存在极显著的差异, 飞蝗产卵时最适宜的植被覆盖度、土壤含水量和盐度范围分别为 0~30%、10.1%~20.0% 和 0.09%~1.99%, 且当小环境植被覆盖度 > 50%、土壤含水量 > 30% 或含盐量 > 3% 时, 飞蝗不再选择产卵。蝗虫卵块具有高度空间异质性, 其空间自相关范围平均为 390 m 且呈斑块、聚集分布, 蝗虫卵块变异函数曲线为球状模型。利用块段克立格法进行空间局部插值, 得到研究区域卵块的空间分布格局图, 可较准确地描述飞蝗卵块在研究区域内的空间分布、形状、地理位置及相对位置。研究结果可为地面卵块抽样调查、实时跟踪蝗卵胚胎发育进程、确定蝗灾早期发生点、片防治区域及蝗灾早期遥感预警提供科学依据。

**关键词:** 东亚飞蝗; 卵块; 种群空间格局; 地理信息系统; 地统计学

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2006)03-0410-06

## Spatial distribution of the Oriental migratory locust (Orthoptera: Acrididae) egg pods studied with GIS and GS

Ji Rong<sup>1,2</sup>, Xie Bao-Yu<sup>2</sup>, Li Zhe<sup>2</sup>, Li Dian-Mo<sup>2\*</sup>, Meng Dong-Li<sup>1</sup> (1. College of Life and Environment Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The spatial distribution of the Oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) egg pods was studied by integrating geostatistical analysis and GIS techniques. Data of egg pods were collected from both spatial scales over two years of extensive surveys: 450 m intervals for the whole study area, then 50 m grid for possible egg-laying areas which were located on the areas damaged by the locust plague or covered with sparse vegetation. Meanwhile, site ecological variables including vegetation coverage, and soil parameters (salinity, pH, water content at 5 cm depth, organic matter, etc.) were surveyed at these grid points. The results showed that three site variables including vegetation coverage, soil water content at 5 cm depth and soil salinity were significantly different between sites with and without egg pods, and the preferable ranges for *L. m. maniliensis* oviposition were 0–30%, 10.1%–20.0% and 0.09%–1.99% for these three variables, respectively. No eggs were laid when vegetation coverage exceeded 50%, soil water content at 5 cm depth was higher than 30%, or soil salinity was above 3%. Semivariograms indicated that the distribution of egg pods was in high heterogeneity. Spatial autocorrelation in egg pod distribution was at distances about 390 m. The spatial distribution of egg pods was patchy and aggregated in the two years and could be best described using spherical models. GIS risk assessment maps, derived by block kriging, displayed the probabilities of occurrence of the locust egg pods at an area-wide scale. The results may provide useful information on planning for sampling in the field, tracking embryo developments, monitoring targets and taking site-specific measures

基金项目: 国家自然科学基金项目(30460028, 30270858, 30170596); 中国科学院知识创新项目(KSCX2-SW-103, KSCX2-1-02); 新疆维吾尔自治区高校科研资助项目(XJEDU2004S20, XJEDU2005I23); 新疆师范大学校基金项目资助(XJNU2004KY001)

作者简介: 季荣, 女, 1970年6月生, 江苏人, 博士, 副教授, 研究方向种群生态学及害虫遥感监测, E-mail: jirongxj@yahoo.com.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: lidm@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2005-10-10; 接受日期 Accepted: 2006-04-13

towards this locust.

**Key words:** *Locusta migratoria manilensis*; egg pods; population spatial pattern; geographic information system; geostatistics

自 20 世纪 80 年代,东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) 再次成为我国发生最频繁、成灾最严重的农牧业害虫之一。大面积的化学防治不仅形成了“年年防治,年年成灾”的恶性循环,而且已造成了严重的环境污染。本世纪初,国内学者开始借助 3S 技术手段进行蝗灾的遥感监测及预警的研究(倪绍祥, 2002; 石瑞香等, 2003; 季荣等, 2003, 2004), 其目的之一就是事先定位蝗虫孳生地即蝗虫集中产卵地, 以达到点片防治的目的。因此, 弄清东亚飞蝗越冬卵块的区域性空间分布格局是对蝗灾发生进行预测的前提和基础。

东亚飞蝗在长期发展进化过程中, 对周围环境具有一定的选择能力。蝗虫产卵在土壤中, 为后代提供了一个较为稳定的环境, 不易受到地面上不良因子和天敌的干扰。飞蝗产卵时, 对地形、植被、土壤理化性质等都有明显的选择性。已有报道表明, 植物不同种类及其覆盖度、不同土壤类型、土壤不同含水量和含盐量等对飞蝗产卵数量均有影响(尤其傲等, 1958; 尤端淑和马世骏, 1964; 郭郭等, 1991)。但就东亚飞蝗卵块的空间异质性及自相关程度的研究还未见报道。

本文选择国家一类蝗区(即常年重点防治地区)河北省南大港国营农场水库为研究区, 通过连续 2 年(2002 和 2003 年)越冬卵块数据的野外调查, 在 GIS 平台下, 利用地统计学方法, 开展以下研究: 1) 弄清与蝗虫产卵选择相关的环境因子; 2) 确定研究区域内蝗卵的空间异质性和自相关程度; 3) 通过块段克立格(block kriging)空间插值获得研究区域的卵块空间分布格局图, 旨在为早期点片防治和遥感早期监测提供服务。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区描述

南大港水库(N38°28.04' ~ N38°33.54', E117°25.74' ~ E117°32.78')位于河北省黄骅市南大港国营农场境内, 东临渤海, 属于泻洪入海口区域, 面积约 4 700 hm<sup>2</sup>。近 10 年来, 由于天旱降雨量少、地下水利用过度、人工蓄水不足等原因, 库区内除低洼地和防火沟里有季节性的积水外, 常年无水。研究区

域年均气温 11.9℃, 年均降水量 62.7 cm, 库区内主要是壤性土质, 植被以芦苇为主(李贻铎, 1993)。

南大港国营农场是典型的沿海蝗区, 也是历史上有名的老蝗区及东亚飞蝗的主要发生基地之一, 在研究区域内东亚飞蝗 1 年 2 代, 以卵越冬(马世骏等, 1965)。自 1991 ~ 2002 年期间, 有 6 年飞蝗大发生, 其中 2002 年仅夏蝗发生面积就超过  $2 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> (占全农场总面积的 68%), 芦苇被 3 ~ 5 龄群居型的蝗蝻危害至只剩茎杆的面积就超过 1 300 hm<sup>2</sup>, 蝗蝻最高密度达 8 000 头/m<sup>2</sup>(季荣等, 2002)。南大港农场已被列为国家一类蝗区, 即常年防治的重点地区(朱恩林, 1999)。水库是南大港农场蝗虫严重发生区, 每年高密度的群居型蝗蝻和成虫都主要分布在库区内。

### 1.2 数据采集与处理

将最新南大港水库地形图(1:15 000)数字化, 并将地图上由河北省沧州水文资源勘测局所测的 312 个点的高程在 ArcGIS 下进行空间插值以得到其二维平面图(季荣等, 2003)。

越冬卵块数据(有或无、卵块数/m<sup>2</sup>)的调查分别在 2002 年和 2003 年秋蝗产卵盛期或刚结束进行(10 月中、下旬或 11 月初, 尽可能保证在没有任何形式的降水之前)。首先对整个研究区域采取 450 m 栅格取样(图 1), 然后对有可能产卵的区域(裸露地、稀疏植被地、芦苇严重受害处)采用 50 m 栅格取样, 两个尺度分别获得 292、2 601 个样点。调查卵块时每一样方大小为 100 cm 长 × 50 cm 宽 × 10 cm 深。现场记录的环境变量(样方大小 1 m<sup>2</sup>)包括植被覆盖度、土壤 5 cm 深的湿度(TSC-II™智能野外湿度仪); 然后取约 100 g 样土装袋、密封和标记, 带回室内测量土壤粒径、总盐及八大离子含量、有机质、pH 和土壤类型等。在调查过程中, 每一样点的经纬度信息用 GPS 准确记录。2002 年所有调查点在 2003 年重复调查。

## 2 结果与分析

### 2.1 蝗虫产卵选择与小生境变量间的关系

2002 年和 2003 年分别获得有卵样方(50 m 栅格)593 个和 317 个。首先, 将所调查的环境变量根

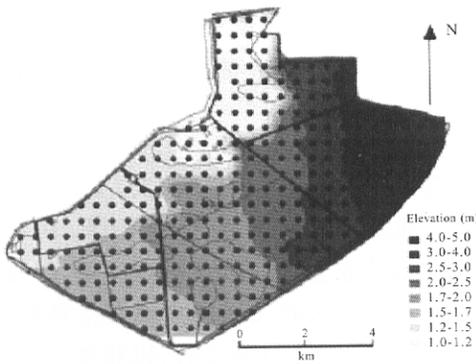


图 1 样点与南大港水库高程图层叠加

Fig. 1 Sketch map of the study area with elevation as background and locations of 292 samples for 450 m grids (50 m grids not shown)

据调查样方卵的有/无分为两组,分别求其平均值,并进一步检验两组数据之间是否存在显著差异,找出与蝗虫产卵显著相关的环境变量。表 1 显示,植被覆盖度、土壤含盐量和土壤含水量在有卵和无卵的环境下存在极显著的差异,说明它们与蝗虫产卵选择有显著的关系;相反,两年的数据显示,土壤 pH 和有机质含量在有卵和无卵的样方间无显著差异,表明小生境下的土壤 pH 和有机质含量不是决定蝗虫产卵与否的关键因素。

表 1 蝗虫产卵选择与环境变量间的关系

Table 1 Relationship of locust oviposition selection and environmental factors

	有卵	无卵	<i>t</i>
	With egg pods	No egg pods	
植被覆盖度 Vegetation coverage (%)			
2002	20.7	68.5	9.24***
2003	18.2	56.3	11.52***
土壤含盐量 Soil salinity (%)			
2002	0.80	2.611	26.91***
2003	0.70	2.26	20.87***
土壤 5 cm 含水量 Soil water content at 5 cm depth (%)			
2002	15.72	25.40	13.54***
2003	16.77	29.31	17.46***
pH			
2002	7.71	7.76	3.65
2003	7.70	7.73	3.51
有机质 Organic matter (%)			
2002	1.91	2.16	5.61
2003	2.01	2.37	4.93

\*\*\*: 同行数据差异极显著 Data in the same row are significantly different at 0.01 level. 下同 The same below.

其次,根据两年的有卵样方和其相对应的各环境变量的值,统计出蝗虫产卵时最偏好的阈值范围。图 2 表明飞蝗产卵时最适宜的植被覆盖度、土壤含水量和盐度范围分别 0 ~ 30%、10.1% ~ 20.0% 和

0.09% ~ 1.99%,且当植被覆盖度 > 50% 时,产卵量接近于零,而土壤含水量 > 30% 或含盐量 > 3% 时,飞蝗不再选择产卵。

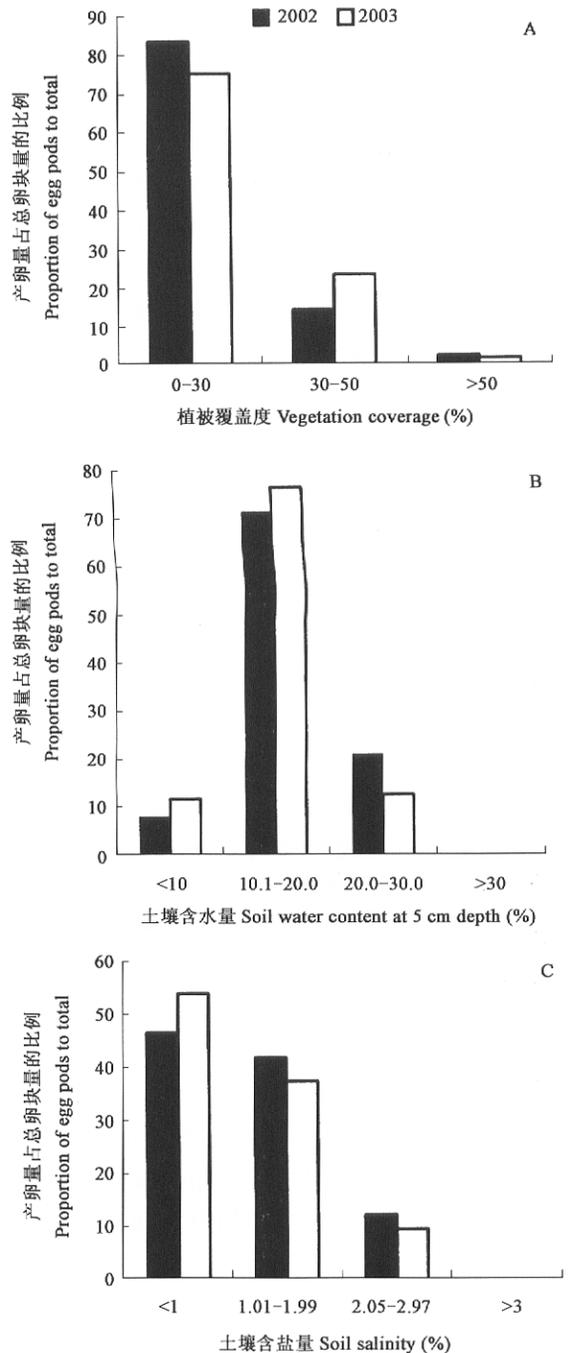


图 2 蝗虫产卵量与植被覆盖度(A)、土壤含水量(B)和土壤含盐量(C)的关系

Fig. 2 Relationship of egg pod numbers and vegetation coverage (A), soil water content (B) and soil salinity (C)

2.2 飞蝗卵块的变异函数模型与分析

进行地统计学分析时,主要以 50 m 栅格取样得到的卵块数据(有、无及数量)为依据。2002 年和 2003 年有卵块样方数分别为 593 和 317 个。在

ARCGIS 8.1 软件下计算实际变异函数的值  $\gamma^*(h)$ , 绘制实际变异函数曲线, 然后选择模型进行拟合, 从

中选出最优的变异函数理论模型, 拟合结果和有关参数见表 2。

表 2 东亚飞蝗卵块变异函数理论模型及有关参数

Table 2 Theoretical models of population variograms and parameters of the oriental migratory locust egg pods

年份 Year	变量 Variable	理论模型 Theoretical model	$C_0$	$C + C_0$	$a$ (m)	$C_0/(C + C_0)$	$R^2$
2002	卵块 Egg pod	球状模型 Spherical model	0.6687	2.4158	452	0.2768	0.839
2003	卵块 Egg pod	球状模型 Spherical model	0.2989	0.7756	328	0.3854	0.673

$C_0$ : 块金值 Nugget;  $C + C_0$ : 基台值 Sill;  $a$ : 变程 Range;  $R^2$ : 决定系数 Decisive coefficient

从表 2 可看出, 东亚飞蝗卵块具有明显的空间异质性, 2002 年和 2003 年飞蝗卵块变异函数曲线均为球状模型, 但存在明显不同: (1) 块金方差与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  表明, 2002 年卵块密度由随机因素引起的差异占总空间异质性的 27.68%, 且主要表现在 50 m 以下的小尺度上, 而由空间自相关引起的空间变异性占总空间异质性的 72.32%, 主要表现在 50 ~ 452 m 的中尺度范围内; 2003 年飞蝗卵块由随机因素引起的差异和空间自相关引起的空间异质性分别为 38.54% 和 61.46%, 并分别表现在 50 m 以下的小尺度和 50 ~ 328 m 的尺度上。(2) 两年的数据还表明, 蝗虫卵块由空间自相关引起的空间异质性都占主要部分 (> 60%), 但两者的空间变异范围有差异, 2002 年的空间自相关尺度 (452 m) 明显大于 2003 年的 328 m。这可能因为在 2003 年秋蝗产卵盛期, 整个华北地区普降大雨, 研究区域 5 天内降雨量达到 30 cm, 致使多数蝗虫不得不将卵散产于并不适宜产卵的场所, 这亦是导致 2002 年 ( $R^2 = 0.839$ ) 变异函数模型拟合优于 2003 年 ( $R^2 = 0.673$ ) 的主要原因。

### 2.3 飞蝗卵块的空间分布格局

变异函数分析表明, 飞蝗卵块具有高度的空间异质性, 在二维平面上, 这种空间异质性则是该种群的空间分布格局。根据变异函数理论模型, 通过空间局部估计 Kriging 法绘制研究区域卵块的空间格局。在进行 Kriging 空间插值时, 同时考虑了两年的卵块数据, 即只要一样点在某一年调查中出现卵, 则把卵量作为源数据进行插值, 若在 2002 和 2003 年都有卵, 则采用 2002 年的数据, 以此建立一个新的数据库, 利用块段克立格法 (block kriging, 如果估计的不是某一点  $X_0$  的值, 而是以  $X_0$  为中心的某一块段的平均值时, 则需用块段克立格法) 采用 50 m 栅格进行克立格空间局部估计, 绘制出研究区域卵块数量的空间分布格局如图 3。

结果表明: (1) 飞蝗卵块呈聚集分布, 并形成聚集程度极不均匀的斑块 (patch), 各斑块大小、形状及

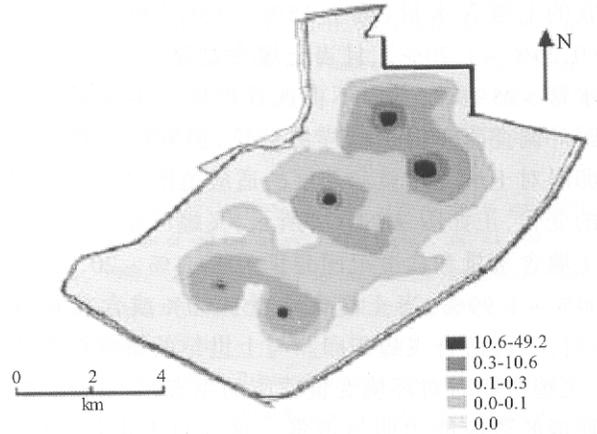


图 3 南大港水库蝗虫卵块空间分布格局  
Fig. 3 Spatial patterns of locust egg pods in Nandagang reservoir

空间分布具有显著差异, 但卵块密度由低到高的分布梯度规律总存在。斑块中心到边缘种群密度的梯度变化既反映出飞蝗卵块的聚集强度, 又反映了格局的空间尺度。地统计学的结果表明, 飞蝗卵块空间自相关尺度在 2002 年和 2003 年分别为 452 m 和 328 m (表 2), 且 5 个卵块斑块的变化尺度不同 (图 3)。一般而言, 斑块尺度的大小在一定程度上可反映秋蝗种群数量及产卵盛期生境变量对飞蝗产卵的适合度, 其中降水是影响飞蝗选择适宜产卵场所的最主要因素之一。(2) 飞蝗卵块主要分布在研究区域的中部和东北部, 少数分布在南部, 而在水库东部、西部和北部几乎没有卵块的分布。分析其原因与研究区域地形、植被长势不均有关。正常年份下, 飞蝗喜欢在土壤含水量适宜、植被稀疏、温度较高的场所集中产卵, 而在异常年份如正值大雨, 飞蝗将卵集中产于地势较高的田埂、沟或坡的阳面, 有时甚至不得不散产于并不适宜产卵的地方 (马世骏等, 1965)。从图 1 可看出, 研究区域海拔自东向西呈下降趋势, 2003 年秋蝗产卵盛期正值大雨, 卵块主要集中分布在地势较高的东北部和中部; 在 2002 年 (未有异常气候变化), 卵块亦主要分布在水库东北部和中部, 但有部分蝗虫将卵产在地势较低的南部;

而在西北部则由于地势低,土壤含水量偏高,无论是正常或异常年份都不是飞蝗适宜的产卵场所。

### 3 讨论

#### 3.1 环境改变对东亚飞蝗产卵选择的影响

20 世纪 50 年代的研究结果表明,东亚飞蝗产卵多选择在植被稀疏 (< 50%) 的阳坡面,而且有最适宜的土壤含水量(壤土 15% ~ 18%) 和含盐量范围(0.20% ~ 1.20%),且当土壤含盐量 > 2% 或土壤含水量 > 25% 时,飞蝗不再选择产卵。本文通过两年野外调查研究得出同样的结论,但同时发现飞蝗产卵时对土壤含水量和盐度的适应范围已发生了明显的变化,正如图 2(A-C) 所示,飞蝗产卵时最适宜的土壤含水量和盐度范围分别为 10.1% ~ 20.0% 和 0.09% ~ 1.99%,当土壤含水量 > 30% 或含盐量 > 3% 时,不再适合飞蝗产卵。与上世纪的研究结果相比,飞蝗产卵时对环境变量适应的生态幅范围拓宽,对环境的适应能力明显增强。这与自上世纪 80 年代以来,研究区域降雨量少、地下水利用过度、人工蓄水不足等导致区域环境发生改变密切相关(李贻铎, 1993)。近 10 年与上世纪 60 年代相比,研究区域内年均降水、土壤含盐量和年地下水开采量已发生显著变化(表 3)。说明随着环境的改变,蝗虫产卵的选择行为亦发生了变化。

表 3 1960 ~ 2000 (20 世纪 60 年代和 90 年代) 年间研究区域环境因子变化及其程度

Table 3 Changes of some factors related to the oviposition behavior of *L. m. manilensis* (Meyen) during 1960s and 1990s in the study area

参数 Parameters	年份 Year		t
	1961 ~ 1970	1991 ~ 2000	
温度 Temperature (°C) <sup>a</sup>	11.83	12.99	3.01
降水 Precipitation (mm) <sup>a</sup>	666.2	486.5	17.58***
5 cm 深土壤温度 Soil temperature at 5 cm (°C) <sup>a</sup>	13.71	13.90	4.22
土壤含盐量 Soil salinity (%) <sup>a</sup>	1.02	3.08	25.97***
年地下水开采量 (× 10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup> Groundwater extracted <sup>b</sup>	0.42	13.00	11.04***

<sup>a</sup>表示 10 年平均值 Average value in ten years; <sup>b</sup>分别是 1983 和 2003 年所测得值 Average value in 1983 and 2003 respectively.

#### 3.2 蝗卵空间分布格局形成原因及其分析方法在实践中的应用

变异函数分析结果表明,飞蝗卵块空间分布具有高度的空间异质性。基台值( $C + C_0$ )和块金值  $C_0$  可用来描述空间异质性程度。基台值( $C + C_0$ )

表示系统属性或区域化变量最大变异,  $C + C_0$  值越大,表示总的空间异质性程度越高。但是当不同区域化变量相比较时,基台值  $C + C_0$  并不有效,因为基台值受自身因素和测量单位的影响较大。即不同区域化变量的基台值不具可比性;块金值  $C_0$  表示随机部分的差异,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不可忽视(Trangmer *et al.*, 1985; 王政权, 1999)。与基台值相似,块金值也不能用于比较不同变量间的随机性方面的差异。但块金值与基台值之比  $C_0/(C + C_0)$  反映的是块金方差占总空间异质性变异的大小,则非常有意义(Li and Reynolds, 1995)。如果该比值较高,说明随机部分引起的差异较高;若比值较低,说明由空间自相关引起的差异占主要部分;如果该比值接近于 1,则景观中某一变量在整个尺度上具有恒定的变异。

从两年的飞蝗卵块分析结果可判断出,2002 年卵块的空间异质性程度(72.32%)高于 2003 年(61.46%)。究其原因,首先与 2003 年秋蝗产卵盛期不适宜的气候条件有关(5 天降雨量超过 30 cm)。其次,秋蝗种群数量与密度亦是影响因素之一,2003 年夏蝗发生严重,研究区域进行了较为彻底的飞机化学防治,故秋蝗种群数量较低;2002 年秋蝗危害则很严重,防治时多数蝗蛹已进入成虫期,防治效果不彻底,导致 2002 年秋蝗种群数量基数较大。再者,2003 年夏蝗危害后,研究区域采取了“改治结合”的治蝗方针,即逐步改造蝗区环境,引水使整个已干涸的水库被水淹没 2 cm 左右,4 ~ 5 m 深的环港渠及防火沟内都积满水,这都影响了秋蝗对最佳产卵场所的选择。

地统计学是以区域化变量理论为基础的空间统计,它既可用于定量分析飞蝗卵块的空间分布,亦可确定空间变异尺度,进而提高采样的有效性(李哈滨和伍业刚, 1992)。尤其是空间局部估计及克里格法所得到的南大港水库飞蝗卵块空间分布格局图(图 3),又称为“危险图”(hazard maps),该图较为准确地描述飞蝗卵块在研究区域内的空间分布、形状、地理位置或相对位置,这不仅可作为卵块抽样调查的依据,亦是监测蝗灾早期发生和点、片防治的重点区域,因此具有较高的使用价值。然而,尽管蝗虫产卵对小环境变量如地形、地貌、土壤理化性、方位、植被等都有明显的选择性,且正常年份下,这种较为苛刻的选择性不会改变,但有些环境变量如土壤含水量、含盐量不仅年际变化大,而且在不同的季节、月份,甚至在一场明显的降水过程后,其值的波动范围就

会很大。因此,如何利用已有的地统计学结果,在准确掌握飞蝗产卵对环境变量要求的基础上预测飞蝗可能产卵的场所,仍是需研究的科学问题,亦是实现蝗灾遥感早期预警的主要环节。

### 参 考 文 献 (References)

- Guo F, Chen YL, Lu BL, 1991. The Biology of Migratory Locusts in China. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press. 330 - 339. [郭鄂, 陈永林, 卢宝廉, 1991. 中国飞蝗生物学. 济南: 山东科学技术出版社. 330 - 339]
- Ji R, Xie BY, Li Z, Li DM, Zhang X, Liu TJ, Liu JD, Yang CQ, 2002. Reasons and characteristics of outbreak of the Oriental migratory locust *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) plague in Nandagang, Hebei province. *Entomol. Knowl.*, 39(6): 430 - 433. [季荣, 谢宝瑜, 李哲, 李典谟, 张霞, 刘团结, 刘金栋, 杨常青, 2002. 河北省南大港农场 2002 年夏蝗发生特点及原因浅析. 昆虫知识, 39(6): 430 - 433]
- Ji R, Zhang X, Xie BY, Li Z, Liu TJ, Liu C, Li DM, 2003. Use of MODIS data to detect the Oriental migratory locust plague: A case study in Nandagang, Hebei province. *Acta Entomol. Sin.*, 46(6): 713 - 719. [季荣, 张霞, 谢宝瑜, 李哲, 刘团结, 刘闯, 李典谟, 2003. 用 MODIS 遥感数据监测东亚飞蝗灾害——以河北省南大港为例. 昆虫学报, 46(6): 713 - 719]
- Ji R, Xie BY, Li DM, Li Z, Zhang X, 2004. Use of MODIS data to monitor the Oriental migratory locust plague. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 104(1): 605 - 609.
- Li YD, 1993. Annals of Hydraulic Engineering in the Nandagang State Farm. Tianjin: Tianjin People Press. 41 - 48. [李贻铎, 1993. 南大港农场水利志. 天津: 天津人民出版社. 41 - 48]
- Li HB, Wu YG, 1992. Quantitative research methods of landscape ecology. In: Liu JG ed. Forums of Current Ecology. Beijing: China Science and Technology Press. 209 - 233. [李哈滨, 伍业刚, 1992. 景观生态学的数量研究方法. 见: 刘建国 主编. 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社. 209 - 233]
- Li H, Remolds JF, 1995. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 73(2): 280 - 284.
- Ma SJ *et al.*, 1965. Studies on Breeding Areas of the Oriental Migratory Locust in China. Beijing: Science Press. 1 - 335. [马世骏等, 1965. 中国东亚飞蝗蝗区的研究. 北京: 科学出版社. 1 - 335]
- Ni SX, 2002. Monitoring and Forecasting Grasshoppers by Remote Sensing around Qinghai Lake. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. [倪绍祥, 2002. 环青海湖地区草地蝗虫遥感监测与预测. 上海: 上海科学技术出版社.]
- Shi RX, Liu C, Li DM, Xie BY, 2003. Application of MODIS-NDVI to monitoring locust pest in Baiyang Shallow Lake. *J. Nat. Disast.*, 12(3): 155 - 160. [石瑞香, 刘闯, 李典谟, 谢宝瑜, 2003. MODIS-NDVI 在白洋淀蝗虫灾害监测中的应用. 自然灾害学报, 12(3): 155 - 160]
- Trangmar BB, Yost RS, Uehara G, 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 38: 44 - 94.
- Wang ZQ, 1999. Geostatistics and Its Application on Ecology. Beijing: Science Press. [王政权, 1999. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社]
- You DS, Ma SJ, 1964. Relationship of *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) oviposition and hatch to soil salinity. *Acta Phytopath. Sin.*, 3(4): 333 - 344. [尤端淑, 马世骏, 1964. 东亚飞蝗产卵及蝗卵孵化与土壤含盐量的关系. 植物保护学报, 3(4): 333 - 344]
- You QJ, Guo F, Chen YL, Zhang FH, You DS, 1958. Habits of *Locusta migratoria manilensis* (Meyen). *Acta Entomol. Sin.*, 8(2): 119 - 135. [尤其傲, 郭鄂, 陈永林, 张福海, 尤端淑, 1958. 东亚飞蝗的生活习性. 昆虫学报, 8(2): 119 - 135]
- Zhu EL, 1999. Occurrence and Management of the Oriental Migratory Locust in China. Beijing: China Agriculture Press. 3 - 38. [朱恩林, 1999. 中国东亚飞蝗发生与治理. 北京: 中国农业出版社. 3 - 38]

(责任编辑: 袁德成)