玉米田草地贪夜蛾幼虫的空间分布型与抽样技术

孙小旭[1,2]， 赵胜园[2]， 靳明辉[3]， 赵慧媛[4]， 李国平[5]，
张浩文[2]， 姜玉英[6]， 杨现明[2]， 吴孔明[2*]

(1. 西南大学，重庆 400715；2. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室，北京 100193；
3. 中国农业科学院深圳农业基因组研究所，深圳 518120；4. 鹤壁佳多科工贸股份有限公司，鹤壁 458030；
5. 河南省农业科学院植物保护研究所，郑州 450002；6. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125)

摘要 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)是一种世界性的重大农业害虫，已于 2019 年 1 月侵入中国云南省西部地区，对当地主要经济作物鲜食玉米的生产构成了严重威胁。我们调查了入侵成虫后代幼虫在鲜食玉米田的种群密度和为害情况，分析了幼虫种群的空间分布格局。结果表明，草地贪夜蛾幼虫在玉米田呈聚集分布，聚集度随密度的增加而升高，环境是导致聚集分布的主要因素。基于空间分布型的分析结果，进一步研究提出了幼虫密度的理论抽样模型和基于幼虫密度防治指标的序贯抽样技术。本研究明确了草地贪夜蛾幼虫在玉米田的空间分布特征和抽样方法，为通过调查田间种群密度指导幼虫防治工作提供了技术支撑。

关键词 草地贪夜蛾； 鲜食玉米； 空间分布； 序贯抽样

中图分类号： S 435.132 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2019115

Larval spatial distribution pattern and sampling technique of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in maize fields

SUN Xiaoxu[1,2], ZHAO Shengyuan[2], JIN Minghui[3], ZHAO Huiyuan[4], LI Guoping[5],
ZHANG Haowen[2], JIANG Yuying[6], YANG Xianming[2], WU Kongming[2]

(1. *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*; 2. *State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests*, *Institute of Plant Protection*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*;
3. *Agricultural Genomics Institute at Shenzhen*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Shenzhen* 518120, *China*;
4. *Hebi Jiaduo Science Industry and Trade Co., Ltd*, *Hebi* 458030, *China*; 5. *Institute of Plant Protection*, *Henan Academy of Agricultural Sciences*, *Zhengzhou* 450002, *China*; 6. *National Agro-Tech Extension and Service Center*, *Beijing* 100125, *China*)

Abstract The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), is a major agricultural pest worldwide. It invaded the western part of Yunnan Province in January 2019 and poses a serious threat to the production of fresh-eating maize, the main cash crop in Yunnan Province. We investigated the larval population density from invasive adults and its damage in fresh-eating maize fields, and analyzed the spatial distribution pattern of larval populations. The results showed that the larvae exhibited a pattern of aggregation distribution in the maize field, and the aggregation degree increased with increasing larval density. The environment was the main factor leading to the aggregation distribution. Based on the results of spatial distribution analysis, a theoretical sampling model of larval density and a sequential sampling technique in connection with larval control threshold were proposed, which provided a technical support for guiding larval control by investigating population density in the field.

Key words fall armyworm; fresh-eating maize; spatial distribution pattern; sequential sampling

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)源于美洲大陆，周年发生于美洲热带及亚热带地区，但能向北迁飞到达加拿大、向南迁飞到达阿根廷等广阔的地域[1-2]。草地贪夜蛾可取食 200 种植物，并

收稿日期： 2019-03-10
基金项目： 国家自然科学基金重大仪器项目(31727901)
* 通信作者 E-mail:wukongming@caas.cn

分化出嗜食玉米和高粱的玉米型和主要为害水稻和牧草的水稻型[3-5]，是玉米、高粱、水稻、棉花、苜蓿等农作物的重大害虫[6-9]。草地贪夜蛾在适宜温度下，一个月可完成一个世代，无滞育现象[2,10]。由于其具有较强的迁飞能力，常常通过远距离迁移导致异地暴发为害，监测预警和防控工作难度很大[11-13]。

草地贪夜蛾2016年1月首次侵入非洲尼日利亚和加纳[14]，并在此后的2年内，在非洲44个国家暴发为害成灾[10]。该虫于2018年5月侵入印度[15]，12月侵入缅甸[16-17]，2019年1月侵入中国云南西南地区，目前已在6市(州)16县发生为害。滇西南地区为热带、南亚热带气候，种植玉米、水稻、甘蔗等草地贪夜蛾嗜好寄主作物。鲜食玉米是该地区9月份至翌年4月份的主要经济作物，种植面积超过20万 hm^2，是农民冬春季经济收入的主要来源[18-20]，草地贪夜蛾入侵后，农民开始大量使用化学农药，给鲜食玉米的质量安全造成了很大的影响。

昆虫种群均有一定的空间分布范围，通过研究昆虫空间分布型，可以了解昆虫种群内部与种群之间的结构，以及种群与生境之间的复杂联系，有助于提高害虫预测预报的准确性和指导害虫的防控工作[21]。我们研究了首次入侵种群后代幼虫在鲜食玉米田的空间分布格局和抽样技术，旨在为田间种群调查和指导防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 玉米种植情况和调查方法

草地贪夜蛾侵入云南西部地区后，我们于2019年1月下旬到德宏州瑞丽市勐卯镇姐东村(北纬23°58′35″，东经97°48′51″)开展田间调查工作。当地主要种植鲜食甜玉米，品种为‘玉米王8号’(上海金农种业有限公司)、‘夏甜809’(广西金卡农业科技有限公司)、‘双色拉菲’(云南明拓农业科技有限公司)、‘卡罗拉’(南京永立农业发展有限公司)和‘晶甜6号’(南京绿领种业有限公司)等，玉米种植密度3 000～3 500株/667m^2，处于6～9叶生长期。选取单块面积大于1 334 m^2 的20块田，每块田5点随机取样，每点连续调查12株，记录每株玉米上草地贪夜蛾幼虫龄期、数量和为害情况。

1.2 聚集度测定和空间分布型分析方法

采用下述8种方法测定聚集度和分析空间分布型[22-25]。(1) Morisita 的扩散指数 C，$C=S^2/\bar{x}$；(2) Lloyd的平均拥挤度 M^*，$M^*=\bar{x}+S^2/\bar{x}-1$；(3) David 和 Moor 的丛生指数 I，$I=S^2/\bar{x}-1$；(4) Water的负二项分布 K 值，$K=\bar{x}^2/(S^2-\bar{x})$；(5) Kuno 的久野指数 C_A 值，$C_A=(S^2-\bar{x})/\bar{x}^2$；(6) 扩散指标 I_δ，$I_\delta=n\sum_{i=1}^{n}x_i(x_i-1)/N'(N'-1)$；(7) Iwao 的 $M^*-\bar{x}$ 回归法，$M^*=\alpha+\beta\bar{x}$；(8) Taylor 幂法则 $S^2=a\bar{x}^b$。

式中，S^2 为方差，$\bar{x}$ 为平均密度，n 为抽样数，N' 为总虫数，x_i 为第 i 株玉米上的虫口数，a、b、α、β 为参数。

根据 Blackkith 的种群聚集均数 λ 理论，可检验草地贪夜蛾在玉米田间的聚集原因。其中，$\lambda=\frac{\bar{x}}{2K}r$，式中 r 为自由度等于 $2K$ 时的 χ^2 分布函数(概率为0.5)。因 $2K$ 常为小数，故可用比例内插法求 r 值。当 $\lambda<2$ 时，表明个体的聚集是由当地气候、土壤湿度和植株生长状况等环境因素引起的；当 $\lambda\geqslant 2$ 时，个体的聚集是由昆虫的聚集行为和环境因素综合作用的结果。

1.3 种群密度抽样技术的研究方法

采用 Iwao 提出的抽样数公式，建立玉米田的草地贪夜蛾幼虫理论抽样数计算模型：

$$N=\frac{t^2}{D^2}\left(\frac{\alpha+1}{\bar{x}}+\beta-1\right)$$

式中：N 为最适理论抽样数；t 为一定置信度下的 t 分布值；D 为允许误差，α、β 为 Iwao 回归模型 $M^*-\bar{x}$ 回归式的截距和斜率，$\bar{x}$ 为平均密度。

采用 Iwao 提出的复合序贯抽样技术：$T_{\mathrm{Iwao}(n)}=nm_0\pm t\sqrt{n[(\alpha+1)m_0+(\beta-1)m_0^2]}$，式中：累计虫量的上限 $T_{1(n)}$ 取模型加号计算的数值，下限 $T_{2(n)}$ 取模型减号计算的数值。n 为田间抽样数，m_0 为防治指标，t 为相应置信度下的分布值，α、β 为 Iwao 模型 $M^*-\bar{x}$ 回归式的截距和斜率。抽样过程中，若虫量大于上限则表明种群密度高于防治指标，若虫量低于下限则表明种群密度低于防治指标，否则需继续抽样。

2 结果与分析

2.1 幼虫的密度与为害情况

对20块玉米田的调查表明，草地贪夜蛾幼虫主要处于2～3龄期，1龄、2龄、3龄、4龄和5龄幼虫

的比例分别为 11.20%、59.85%、24.52%、4.25%和 0.19%。幼虫平均密度范围为 0.12～1.05 头/株,玉米受害株率为 10%～45%,二者有极显著的正相关关系(R=0.804 9**)(图 1)。

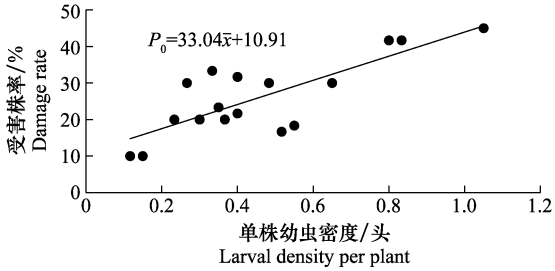


图 1　草地贪夜蛾幼虫密度与玉米受害株率的关系

Fig. 1　Relationship between larval density of the fall armyworm and maize damage rate

2.2　幼虫的空间分布型

如表 1 所示,对调查数据的分析结果表明,扩散系数 C、平均拥挤度 M^*、聚块指数 $M^*/\bar{x}$ 都大于 1,聚集指数 I、久野指数 C_A、负二项分布 K 均大于 0。根据各聚集度分布标准分析,草地贪夜蛾幼虫在玉米田间的分布类型为聚集分布。将 Taylor 幂法公式 $S^2=a\bar{x}^b$ 转换为 $\lg S^2=\lg a+b\lg\bar{x}$,根据表 1 中的 S^2 和 $\bar{x}$ 值得到图 2 玉米田草地贪夜蛾的回归方程 $\lg S^2=0.18+0.69\lg\bar{x}$($R$=0.934 1**),参数 a=1.51>1,b=0.69<1。因此,可判断玉米田中草地贪夜蛾幼虫为聚集分布,个体分布集中,幼虫聚集度随平均密度的升高上升。

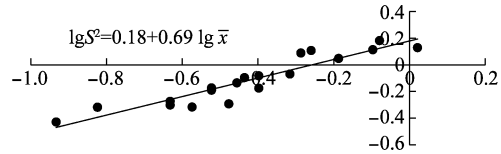


图 2　lgS^2 与 lg$\bar{x}$ 的相关关系

Fig. 2　Relationship between lgS^2 and lg$\bar{x}$

表 1　玉米田草地贪夜蛾幼虫密度、方差及聚集指标

Table 1　The larval density, variance and aggregation indices of the fall armyworm in maize fields

样地 Sampling field	平均密度 $\bar{x}$/头·株$^{-1}$ Average density	方差(S^2) Variance	扩散系数(C) Diffusion coefficient	平均拥挤度(M^*) Mean degree of crowding	丛生指数(I) I index	负二项分布(K) Negative binomial distribution value	久野指数(C_A) C_A index	扩散指标(I_δ) I_δ index	聚块指数($M^*/\bar{x}$) Aggregation index	聚集因素(λ) Aggregation value
1	0.55	1.28	2.33	1.88	1.33	0.41	2.42	4.66	3.42	0.21
2	0.37	0.80	2.19	1.55	1.19	0.31	3.24	3.12	4.24	0.09
3	0.65	1.12	1.72	1.37	0.72	0.90	1.11	2.43	2.11	0.43
4	0.30	0.65	2.15	1.45	1.15	0.26	3.84	2.35	4.84	0.06
5	0.30	0.67	2.24	1.54	1.24	0.24	4.13	2.75	5.13	0.05
6	0.40	0.83	2.07	1.47	1.07	0.37	2.67	2.83	3.67	0.13
7	0.83	1.52	1.82	1.66	0.82	1.01	0.99	3.13	1.99	0.58
8	0.15	0.48	3.21	2.36	2.21	0.07	14.71	5.00	15.71	0.00
9	0.12	0.37	3.19	2.31	2.19	0.05	18.79	2.86	19.79	0.00
10	0.30	0.67	2.24	1.54	1.24	0.24	4.13	2.75	5.13	0.05
11	0.35	0.73	2.09	1.44	1.09	0.32	3.12	2.57	4.12	0.09
12	0.48	0.85	1.77	1.25	0.77	0.63	1.58	2.07	2.58	0.26
13	0.27	0.48	1.81	1.08	0.81	0.33	3.03	0.50	4.03	0.08
14	0.23	0.53	2.28	1.52	1.28	0.18	5.50	1.98	6.50	0.02
15	0.23	0.50	2.14	1.37	1.14	0.20	4.89	1.32	5.89	0.03
16	0.33	0.51	1.53	0.86	0.53	0.63	1.59	0.32	2.59	0.18
17	0.80	1.30	1.62	1.42	0.62	1.28	0.78	2.39	1.78	0.60
18	0.40	0.67	1.67	1.07	0.67	0.59	1.68	1.30	2.68	0.21
19	1.05	1.35	1.28	1.33	0.28	3.73	0.27	1.69	1.27	0.96
20	0.52	1.23	2.38	1.89	1.38	0.38	2.67	4.77	3.67	0.17

根据 Blackkith 的种群聚集均数 λ 理论公式,由表 1 中的 $\bar{x}$ 和 K 值计算得到玉米田草地贪夜蛾的聚集均数 λ,其数值分布于 0～0.96 之间。鉴于 λ 值均小于 2,故此判断草地贪夜蛾在玉米田的聚集原因是由环境因素主导的。将 λ 和 $\bar{x}$ 作回归分析,得到方程:$\lambda=\bar{x}-0.22$(R=0.966 3**),表明幼虫的聚集程度与种群密度呈正相关(图 3)。

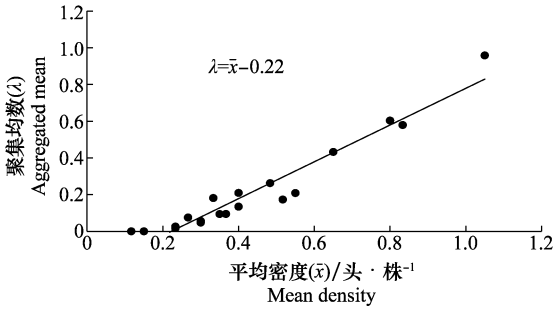


图 3 草地贪夜蛾幼虫聚集均数与平均密度的关系

Fig. 3 Relationship between aggregated mean and larval mean density ($\bar{x}$) of the fall armyworm

2.3 抽样模型与技术

将玉米田草地贪夜蛾幼虫的 Iwao M^* 和 $\bar{x}$ 回归模型系数 α=1.66，β=−0.33，代入公式得出在概率 0.95（t 值为 1.96）条件下的最佳理论抽样数模型：

$$N=(3.84/D^2)(2.66/\bar{x}-1.33)$$

可计算不同误差条件下（D=0.1，0.2，0.3），草地贪夜蛾幼虫在相应密度 $\bar{x}$ 时的理论最佳抽样数 N。

根据相关国际科研机构的研究结果，草地贪夜蛾幼虫在玉米田的为害率达到 20%时就应采取防控措施[26]，按 $P_0=33.04\bar{x}+10.91$ 计算幼虫密度的防治指标为单株玉米 0.33 头。将 Iwao M^* 和 $\bar{x}$ 回归模型参数 α、β 代入序贯抽样模型，得到该防治指标下草地贪夜蛾幼虫的抽样区间计算公式：$T_{\mathrm{Iwao}(n)}=0.33n\pm1.96\sqrt{0.73n}$。计算不同取样株数（$n$=50、60、70、…、200）时草地贪夜蛾幼虫的序贯抽样区间列入表 2。抽样过程中，若虫量大于表中上限则表明种群密度高于防治指标，需要进行防治；若虫量低于下限则表明种群密度低于防治指标，不需要防治；如幼虫密度处于上下限之间，仍需要继续抽样。

表 2 玉米田草地贪夜蛾幼虫种群序贯抽样表

Table 2 Larval sequential sampling limits of the fall armyworm in maize fields

抽样数(n) Sample size	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
上限 $T_{1(n)}$ Upper limit	28	33	37	41	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82	86	90
下限 $T_{2(n)}$ Lower limit	5	7	9	11	14	16	19	21	24	26	29	32	34	37	40	42

3 讨论

昆虫的空间分布是种群生态学的重要研究内容之一，对提高抽样技术，明确昆虫种群结构，开发有效的害虫监测和管理技术及指导害虫防治至关重要[25,27-28]。草地贪夜蛾是为数不多的在世界范围内对农作物造成毁灭性危害的重大害虫之一[29]，在其侵入中国初期，开展田间空间分布的调查，为其种群抽样调查、监测预警和综合防治提供数据支撑是十分必要的。

美国学者通过分析草地贪夜蛾连续 3 年的田间分布情况，发现该虫在田间有多种空间分布型，不同年份、不同种群密度都会出现不同的分布类型[30]。巴西有报道称草地贪夜蛾中等龄期幼虫在玉米田间是聚集分布，而幼虫为害玉米穗的空间分布是随机的[28,31]，Farias 等人的研究也表明，草地贪夜蛾低龄幼虫在田间的分布型为聚集分布，随着该虫在田间的为害发展，其分布型的随机性越来越强[32-33]。阿根廷学者调查发现则表明草地贪夜蛾在玉米田间总体上是呈聚集分布的[34]，墨西哥有报道称草地贪夜蛾幼虫在玉米田间随机分布[35]。本研究中草地贪夜蛾幼虫在鲜食玉米田中的空间分布型为聚集分布，个体分布集中，幼虫聚集度随平均密度的增加而升高。与多名国外学者的研究结果一致[28,31-34]。在国内玉米害虫中，与草地贪夜蛾生物学行为较近的黏虫和劳氏黏虫在玉米田间亦呈聚集分布，符合负二项式特征[36-37]。斜纹夜蛾在抽雄授粉期的甜玉米上也为聚集分布[38]，亚洲玉米螟、桃蛀螟和棉铃虫 3 种鳞翅目害虫在灌浆期玉米田中的水平分布也均属于聚集分布[39]。

通过对瑞丽市鲜食玉米田草地贪夜蛾空间分布的调查、抽样技术的分析，建立了理论抽样数模型和序贯抽样模型，明确了玉米营养生育期调查草地贪夜蛾的抽样方法。根据该虫不同发生密度等级，在低密度田（≤0.6 头/株）的田块中，每 667 m^2 应调查 1 192～9 708 株，可保证误差≤0.1；在高密度田（>0.6 头/株）的田块中，每 667 m^2 应调查 57～766 株，可保证误差≤0.1。序贯抽样技术可方便地应用于生产防治中，尤其是基层生产经营主体，可基于百株 33 头的防治指标，按照序贯抽样表调查虫量，决定是否需要喷药防治。

昆虫空间分布型受多种因素的影响，比如寄主品种及生长环境差异、调查幼虫龄期大小等。草地贪夜蛾食性比较杂，不仅可以为害玉米，还可为害我

国小麦、水稻等粮食作物和番茄、大豆、棉花和马铃薯等经济作物。不同国家玉米的种植模式不同,以及物候期差异可能是导致草地贪夜蛾在玉米田间呈聚集或随机分布的原因[30]。此外,由于草地贪夜蛾块状产卵,低龄草地贪夜蛾幼虫个体呈高密度聚集存在,表现为负二项分布,到高龄幼虫后转移扩散能力强,可能导致出现低密度随机分布现象,而表现为泊松分布[32]。玉米田斜纹夜蛾幼虫在低龄幼虫期也常出现群集行为,个体间相互吸引,随着虫龄增大而吸引力减弱,进入高龄后则表现为相互排斥,表现为扩散转株为害[38]。由于各地玉米品种不同及生态环境的差异,本文在滇西研究得到的模型未必能够适用于其他地区。因此,在不同地区、不同时期及不同作物上还需要开展一些验证性的研究,发展适合当地环境与生产特点的抽样技术。

因玉米型与水稻型的草地贪夜蛾均已经在非洲定殖为害[40],两种类型的草地贪夜蛾都有可能入侵我国。目前入侵云南的种群主要为害玉米,但随着水稻生产的开始,水稻型的种群会很快增加。因此,有必要通过分子生物学研究确定种型并明确不同种型在各种作物的分布特征,发展有针对性的抽样技术,做到对防治工作的精准指导[41-42]。总之,草地贪夜蛾已经在滇西定殖,随着气温的回升和西南季风的加强,中国中南部地区都可能会成为潜在的迁入地[17],生产上既要加强农业技术推广部门的测报工作,也要加强基层生产主体的田间调查工作,确保有效控制在入侵地的危害和不会形成其他地区的虫源基地。

参考文献

[1] LUGINBILL P. The fall army worm [R]. USDA Technology Bulletin, 1928, 34: 91.

[2] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. The Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82-86.

[3] PASHLEY D P. Host-associated genetic differentiation in fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae): a sibling species complex? [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1986, 79: 898-904.

[4] PASHLEY D P, JOHNSON S J, SPARKS A N. Genetic population structure of migratory moths: the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Annals of the Entomological Society of America, 1985, 78: 756-762.

[5] DUMAS P, LEGEAI F, LEMAITRE C, et al. *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) host-plant variants: two host strains or two distinct species? [J]. Genetica, 2015, 143(3): 305-316.

[6] SPARKS A N. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) potential for area-wide management[J]. Florida Entomologist, 1986, 69: 603-614.

[7] JOHNSOM S J. Migration and life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the Western Hemisphere [J]. Insect Science and its Application, 1987, 8: 543-549.

[8] CLARK P L, MOLINA-OCHOA J, MARTINELLI S, et al. Population variation of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in the Western Hemisphere [J/OL]. Journal of Insect Science, 2007, 7(5): http://www.bioone.org/doi/abs/10.1673/031.007.0501.

[9] MÚRUA G, MOLINA-OCHOA J, COVIELLA C. Population dynamics of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its parasitoids in northwestern Argentina [J]. Florida Entomologist, 2006, 89(2):175-182.

[10] ABRAHAMS P, BATEMAN M, BEALE T, et al. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. Evidence note (2), September 2017[R]. UK: CABI, 2017.

[11] WESTBROOK J K, NAGOSHI R N, MEAGHER R L, et al. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(2): 255-267.

[12] 郭井菲, 赵建周, 何康来, 等. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 1-10.

[13] ROSE A, SILVERSIDES R, LINDQUIST O. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae), and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. The Canadian Entomologist,1975,107(6):567-576.

[14] GOERGEN G, KUMAR P L, SANKUNG S B, et al. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa[J/OL]. PLoS ONE, 2016, 11(10): e0165632.

[15] IITA. Fall armyworm has reached the Indian subcontinent[EB/OL]. (2018-08-04)[2018-10-04]. http://www.iita.org/news-item/fall-armyworm-has-reached-the-indian-subcontinent/.

[16] 缅甸农业部植保司. 缅甸部分地区冬玉米首次记录草地贪夜蛾的入侵[EB/OL]. (2018-12-19)[2019-01-05]. http://ppdmyanmar.org/.

[17] 吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析[J/OL]. 植物保护,(2019-01-27)[2019-02-16]. https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2019047.

[18] 姚文华, 韩学莉, 汪艳芬, 等. 我国甜玉米育种研究现状与发展对策[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(2): 1-8.

[19] 李琰聪, 谢艳芬, 杨纪明, 等. 云南玉米产业发展思路探讨[J]. 农业科技通讯, 2018(12):4-6.

[20] 张雷,黄英,王杰,等.云南干热河谷区鲜食甜玉米耗水量与耗水规律试验研究[C]//云南省水利学会.云南省水利学会 2018 年度学术交流会论文集,2018:10.

[21] 丁岩钦. 昆虫种群数学生态学原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 1980.

[22] IWAO S. A new regress method for analyzing the aggregation

pattern of animal population [J]. Researches on Population Ecology, 1968, 10(1): 1 - 20.
[23] TAYLOR L R. Aggregation, variance and the mean [J]. Nature, 1961, 189: 7325.
[24] 丁岩钦. 昆虫数学生态学[M]. 北京:科学出版社,1994.
[25] 徐汝梅. 昆虫种群生态学[M]. 北京:北京师范大学出版社,1987.
[26] CROPLIFE AFRICA MIDDLE EAST. Controlling fall armyworm handbook for SSPs, feed the future Ethiopia value chain activity [M]. USA; The U. S Government's Global Hunger &. Food Security Initiative, 2018.
[27] FERNANDES M G, BUSOLI A C, BARBOSA J C. Spatial distribution of *Alabama argillacea* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton crop [J]. Neotropical Entomology, 2003, 32(1): 107 - 115.
[28] MELO E P, DEGRANDE P E, LIMA JUNIOR I S, et al. Spatial arrangement and damage by the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on maize [J]. Revista Ceres, 2014, 61(3):343 - 349.
[29] GARCIA A G, GODOY W A C. A theoretical approach to analyze the parametric influence on spatial patterns of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) populations [J]. Neotropical Entomology, 2017, 46(3): 283 - 288.
[30] MITCHELL F L, FUXA J R. Distribution, abundance, and sampling of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in south-central Louisiana cornfields[J]. Environmental Entomology, 1987, 16:453 - 458.
[31] MELO E P, FERNANDES M G, DEGRANDE P E, et al. Spatial distribution of plants infested with *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on corn crop [J]. Neotropical Entomology, 2006, 35(5):689 - 697.
[32] FARIAS PAULO R S,BARBOSA J C, BUSOLI A C. Spatial distribution of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), on corn crop [J]. Neotropical Entomology, 2001, 30(4):681 - 689.
[33] FARIAS PAULO R S, BARBOSA J C, BUSOLI A C, et al. Spatial analysis of the distribution of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and losses in maize crop productivity using geostatistics [J]. Neotropical Entomology, 2008, 37(3): 321 - 327.
[34] SERRA G V, TRUMPER E V. Sequential sampling protocols for *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), on *Zea mays* fields: influence of sampling unit size [J]. Bulletin of Entomological Research, 2006, 96: 471 - 477.
[35] HERNANDEZ J L, LÓPEZ-BARBOSA E C, GARZA-GONZÁLEZ E, et al. Spatial distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in maize landraces grown in Colima, Mexico [J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2008, 28(3): 126 - 129.
[36] 郭松景,李世民,马林平,等. 劳氏粘虫幼虫在玉米田的空间分布及抽样技术研究[J]. 河南农业大学学报,2001,35(3):245 - 248.
[37] 龙玲,刘红梅,莫纯碧. 二代粘虫幼虫空间分布型及抽样技术研究[J]. 山地农业生物学报,2003,22(5):391 - 392.
[38] 汪恩国,陈克松,李达林,等. 玉米田斜纹夜蛾空间分布型及抽样技术[J]. 应用昆虫学报,2004,41(6):585 - 588.
[39] 陈浩,赵文路,门兴元,等. 玉米灌浆期 3 种鳞翅目害虫的空间分布[J]. 玉米科学,2016(1):160 - 165.
[40] COCK M J W, BESEH P K, BUDDIE A G, et al. Molecular methods to detect *Spodoptera frugiperda* in Ghana, and implications for monitoring the spread of invasive species in developing countries [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4103.
[41] JUÁREZ M L, MURUA M G, GARCÍA M G, et al. Host association of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) corn and rice strains in Argentina, Brazil and Paraguay[J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105(2):573 - 582.
[42] GROOT A T, MARR M, SCHOFL G, et al. Host strain specific sex pheromone variation in *Spodoptera frugiperda*[J]. Frontiers in Zoology, 2008, 5(1): 20.

(责任编辑:田 喆)

(上接 6 页)

[25] COCK M J, BESEH P K, BUDDIE A G, et al. Molecular methods to detect *Spodoptera frugiperda* in Ghana, and implications for monitoring the spread of invasive species in developing countries [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):4103.
[26] 芦芳, 翟保平, 胡高. 昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法[J]. 应用昆虫学报,2013, 50(3):853 - 862.
[27] WANG Fengying, YANG Fan, LU Minghong, et al. Determining the migration duration of rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) moths using a trajectory analytical approach [J]. Scientific Reports, 2017, 7:39853.
[28] WU Qiulin, HU Gao, TUAN H A, et al. Migration patterns and winter population dynamics of rice planthoppers in Indochina: New perspectives from field surveys and atmospheric trajectories [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2019,265:99 - 109.
[29] WU Qiulin, HU Gao, WESTBROOK J K, et al. An advanced numerical trajectory model tracks a corn earworm moth migration event in Texas, USA [J/OL]. Insects, 2018, 9(3):115. DOI: 10.3390/insects9030115.
[30] CHAPMAN J W, NESBIT R L, BURGIN L E, et al. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects [J]. Science, 2010, 327: 682 - 685.
[31] 朱坚. 长江以南地区春季降水的气候特征及其与青藏高原动力作用的联系[D]. 南京: 南京大学, 2011.
[32] WU Qiulin, WESTBROOK J K, HU Gao, et al. Multiscale analyses on a massive immigration process of *Sogatella furcifera* (Horváth) in south-central China: influences of synoptic-scale meteorological conditions and topography [J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(8): 1389 - 1406.

(责任编辑:田 喆)