

小麦田草地贪夜蛾的发生为害、空间分布与抽样技术

杨现明¹, 孙小旭^{1,2}, 赵胜园¹, 李加云³, 迟旭春⁴, 姜玉英⁵, 吴孔明^{1*}

(1. 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; 2. 西南大学, 重庆 400715; 3. 云南省昆明市寻甸回族彝族自治县金源乡农业综合服务中心, 昆明 655207; 4. 云南省寻甸回族彝族自治县植保植检工作站, 昆明 655200; 5. 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) 是中国重要的外来入侵害虫, 我们调查了该虫在云南省寻甸县麦田的发生与为害。结果表明: 田间小麦受害株率为 30%~100%, 幼虫平均密度 4.8~105.6 头/m², 二者呈显著正相关关系。苗期至分蘖期为害小麦的草地贪夜蛾多为低龄幼虫(1~3 龄幼虫比例为 98.3%), 拔节期低龄及高龄幼虫均有, 抽穗至灌浆期为害小麦则以高龄幼虫为主(3 龄以上幼虫比例达 75.4%)。空间分布型分析表明, 麦田草地贪夜蛾低龄幼虫呈聚集分布, 高龄幼虫为均匀分布。进一步研究提出了基于幼虫密度及龄期的麦田草地贪夜蛾理论抽样模型和基于防治指标的序贯抽样技术。本研究明确了小麦田草地贪夜蛾发生为害的特点、空间分布特征和抽样方法, 为田间种群密度调查和幼虫防治工作提供了技术支撑。

关键词 草地贪夜蛾; 小麦; 空间分布; 抽样技术

中图分类号: S 435.132 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019586

Population occurrence, spatial distribution and sampling technique of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in wheat fields

YANG Xianming¹, SUN Xiaoxu^{1,2}, ZHAO Shengyuan¹, LI Jiayun³,
CHI Xuchun⁴, JIANG Yuying⁵, WU Kongming^{1*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Jinyuan Agricultural Service Center in Xundian Hui and Yi Autonomous County, Kunming 655207, China; 4. Plant Protection and Quarantine Station of Xundian Hui and Yi Autonomous County, Kunming 655200, China; 5. China National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) is an important invasive species in China. In this study, the damage on wheat and the spatial distribution of *S. frugiperda* in wheat fields were investigated in Xundian county, Yunnan province. The results indicated that the percentage of wheat damaged by *S. frugiperda* in the fields ranged from 30% to 100%, which significantly correlated with the average larval densities (ranged from 4.8 to 105.6 individuals per meter square). The early larvae at 1st to 3rd instar were frequently observed on wheat from seedling to tillering stages (the percentage was 98.3%) and late larvae used to be found in wheat jointing or filling stages (the percentage of larvae larger than 3rd instar reached 75.4%). Spatial distribution analysis indicated that the early larvae took a pattern of aggregation distribution and the late larvae exhibited an evenly distribution in wheat fields. Further, a theoretical sampling model based on larvae age and density and a sequential sampling technique in connection with larval control threshold were developed. This study indicates that *S. frugiperda* is an important pest in Chinese wheat productive system, and provides a technical support for population density survey and control of *S. frugiperda* in wheat fields.

Key words fall armyworm; wheat; spatial distribution pattern; sequential sampling

收稿日期: 2019-10-29

修订日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器项目(31727901); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2019YJ06)

* 通信作者 E-mail: wukongming@caas.cn

草地贪夜蛾寄主植物广泛,包括玉米、甘蔗、高粱、苜蓿、大麦、狗牙根、荞麦、棉花、三叶草、燕麦、谷子、花生、水稻、黑麦草、甜菜、苏丹草、大豆、甘蔗、梯牧草、烟草和小麦等,最喜取食玉米、高粱等作物及狗牙根、马唐等杂草^[1-4]。根据其为害作物的习性,可将草地贪夜蛾分为玉米品系(corn strain, C strain)和水稻品系(rice strain, R strain)。玉米品系主要为害玉米、甘蔗、高粱、棉花和其他作物,水稻品系主要取食水稻、狗牙根及其他牧草等^[5-6]。

草地贪夜蛾 2016 年 1 月侵入非洲^[7-8], 2018 年 5 月侵入印度^[9], 12 月侵入缅甸等东南亚国家^[10], 为害玉米、高粱、谷子、小麦和苔麸等多种禾本科作物^[11-13]。2018 年 12 月 11 日,玉米型草地贪夜蛾从缅甸迁入我国^[14-16],到 2019 年 9 月已蔓延至 20 多个省。其主要取食为害玉米、甘蔗和高粱等作物。根据农业农村部数据,通过应急防控已将草地贪夜蛾引起的产量损失控制在 5% 以内,其在黄淮海等玉米主产区没有造成明显的产量损失^[17]。鉴于草地贪夜蛾 2019 年已在中国西南和华南地区定殖并形成较大数量的虫源基数,这将对 2020 年的粮食生产构成重大威胁。从生产模式看,我国各地玉米收获后,主要种植小麦,2018 年全国玉米种植 4 213 万 hm^2 ,小麦种植 2 427 万 hm^2 ,且冬小麦在西南等地广泛种植,小麦将成为继玉米之外的重要越冬寄主。因此,研究明确草地贪夜蛾对小麦的为害风险对防控工作有十分重要的意义。

2019 年 9 月底,云南省寻甸县金源乡发现草地贪夜蛾为害小麦。我们调查研究了该地草地贪夜蛾对小麦的为害特征、田间分布及抽样技术,以期对麦田抽样调查、监测预警和综合防治工作提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 小麦种植情况和调查方法

草地贪夜蛾为害小麦调查地点位于云南省寻甸回族彝族自治县金源乡中五里松村附近(25.866°N, 103.117°E)。调查小麦田前茬种植作物均为玉米。调查时间为 2019 年 10 月 12—17 日。当地小麦品种主要为当地农民自留种,种植密度约 150~400 株/ m^2 ,播期跨度大,田间小麦处于苗期至灌浆期。选取单块面积大于 333 m^2 的田块 23 块,每块田 5 点随机取样,每点调查 0.125 m^2 面积内小麦(约 20~30 株)上

草地贪夜蛾的种群密度。详细记录该区域内草地贪夜蛾幼虫的龄期、数量和为害情况。

1.2 空间分布型分析方法

采用聚集度指标法、Iwao 回归分析法及 Taylor 幂方法^[18-22]分析草地贪夜蛾幼虫空间分布型。

1.2.1 聚集度指标法

1) 扩散指数 C , $C = S^2/\bar{x}$; 当 $C < 1$ 时种群为均匀分布, $C = 1$ 时为随机分布, $C > 1$ 时为聚集分布。式中 S^2 为样本方差, $\bar{x}$ 为抽样单位下(0.125 m^2)的平均虫量(下同)。

2) 平均拥挤度 M^* , $M^* = \bar{x} + S^2/\bar{x} - 1$; 当 $M^* < 1$ 时种群为均匀分布, $M^* = 1$ 时为随机分布, $M^* > 1$ 时为聚集分布。

3) 丛生指数 I , $I = S^2/\bar{x} - 1$; 当 $I < 0$ 时种群为均匀分布, $I = 0$ 时为随机分布, $I > 0$ 时为聚集分布。

4) 负二项分布参数 K , $K = \bar{x}^2/(S^2 - \bar{x})$; 当 $K < 0$ 时种群为均匀分布, $K \rightarrow +\infty$ 时为随机分布, $K > 0$ 时为聚集分布。

5) Cassie 指标 C_A , $C_A = (S^2 - \bar{x})/\bar{x}^2$; 当 $C_A < 0$ 时种群为均匀分布, $C_A = 0$ 时为随机分布, $C_A > 0$ 时为聚集分布。

6) 聚块指数($M^*/\bar{x}$), $M^*/\bar{x} < 1$ 时种群为均匀分布, $M^*/\bar{x} = 1$ 时为随机分布, $M^*/\bar{x} > 1$ 时为聚集分布。

1.2.2 回归分析法

1) Iwao 的 $M^* - \bar{x}$ 回归法, $M^* = \alpha + \beta\bar{x}$ 。α 为分布基本成分的平均拥挤度,反映了个体散布情况:当 $\alpha = 0$ 时,分布的基本成分为单个个体; $\alpha > 0$ 时,个体间相互吸引,分布的基本成分是个体群; $\alpha < 0$ 时,个体间相互排斥。β 反映了个体群的空间分布型:当 $\beta < 1$ 时,种群为均匀分布; $\beta = 1$ 时,为随机分布; $\beta > 1$ 时,为聚集分布。

2) Taylor 幂法则 $S^2 = a\bar{x}^b$ 。对数转换为如下回归方程: $\lg S^2 = \lg a + b \lg \bar{x}$ 。当 $\lg a > 0$, $b = 1$ 时,种群为聚集分布,不具有密度依赖性; $\lg a > 0$, $b > 1$ 时,为聚集分布,种群具有密度依赖性; $\lg a < 0$, $b < 1$ 时,为均匀分布,密度越高分布越均匀。

1.3 聚集原因分析

利用 Blackkith 的种群聚集均数 λ 理论检验草地贪夜蛾在小麦田的聚集原因。其中, $\lambda = \frac{\bar{x}}{2K}r$, 式中 r 为自由度等于 $2K$ 时所对应的 χ^2 值(概率为 0.5)。当 $\lambda < 2$ 时,表明个体的聚集是由环境因素引

起;当 $\lambda \geq 2$ 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。

1.4 种群密度抽样技术研究方法

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

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

式中: N 为最适理论抽样数; t 为一定置信度下的分布值; D 为允许误差, α, β 为 Iwao $M^* - \bar{x}$ 回归方程中的截距和斜率。

采用 Iwao 提出的复合序贯抽样模型计算抽样的上下限,模型如下:

$$T_{Iwao(n)} = nm_0 \pm t \sqrt{n[(\alpha + 1)m_0 + (\beta - 1)m_0^2]}$$

式中, 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 $M^* - \bar{x}$ 回归方程中的截距和斜率。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 小麦田草地贪夜蛾幼虫种群密度与植株受害率的关系

处于苗期至灌浆期的 23 块小麦田中 1~6 龄草地贪夜蛾幼虫均有发现,1 龄、2 龄、3 龄、4 龄、5 龄和 6 龄幼虫的比例分别为 24.03%、20.97%、22.90%、15.00%、15.48%和 1.62%。单块麦田中草地贪夜蛾幼虫平均密度范围为 4.8~105.6 头/m²,小麦受害株率为 30%至 100%,二者具有显著相关性($R^2 = 0.555, P < 0.001$,表 1,图 1)。不同生育期小麦受害株率及草地贪夜蛾发生情况见表 2,苗期到分蘖期的小麦田中多为低龄幼虫为害,1~3 龄幼虫比例为 98.3%;拔节期小麦上 1~3 龄幼虫比例为 63.3%,7 块麦田中,5 块以低龄幼虫为主;抽穗灌浆期的小麦上大多为高龄幼虫为害,3 龄以上幼虫比例为 75.4%(表 2)。

表 1 草地贪夜蛾幼虫在云南寻甸麦田的发生为害情况

Table 1 Occurrence of fall armyworm in wheat fields in Xundian county, Yunnan province

样地 Sampling field	小麦生育期 Development stage of wheat	受害株率/% Plant damaged rate	平均密度/ 头·m ⁻² Average density	不同龄期幼虫数量/头 Number of larvae at different stages					
				1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	6 龄 6th instar
1	苗期 Seedling stage	56	14.4	3	2	3	1	0	0
2	苗期 Seedling stage	30	4.8	3	0	0	0	0	0
3	苗期 Seedling stage	66	44.8	23	4	1	0	0	0
4	分蘖期 Tillering stage	97	38.7	11	12	6	0	0	0
5	分蘖期 Tillering stage	100	88.0	32	21	2	0	0	0
6	分蘖期 Tillering stage	88	4.8	0	0	3	0	0	0
7	分蘖期 Tillering stage	97	84.8	25	21	7	0	0	0
8	分蘖期 Tillering stage	61	6.4	2	2	0	0	0	0
9	分蘖期 Tillering stage	100	105.6	39	18	7	2	0	0
10	拔节期 Jointing stage	88	41.6	1	13	10	2	0	0
11	拔节期 Jointing stage	46	8.0	0	0	4	1	0	0
12	拔节期 Jointing stage	87	16.0	0	6	4	0	0	0
13	拔节期 Jointing stage	97	35.2	1	1	16	3	1	0
14	拔节期 Jointing stage	100	62.4	4	14	5	8	8	0
15	拔节期 Jointing stage	76	25.6	0	0	7	6	3	0
16	拔节期 Jointing stage	100	51.2	0	2	7	10	12	1
17	抽穗期 Heading stage	66	14.4	5	2	2	0	0	0
18	抽穗期 Heading stage	77	19.2	0	5	7	0	0	0
19	抽穗期 Heading stage	100	83.2	0	2	25	18	7	0
20	抽穗期 Heading stage	64	14.4	0	2	4	2	1	0
21	抽穗期 Heading stage	100	60.8	0	1	9	11	17	0
22	抽穗期 Heading stage	100	83.2	0	2	11	15	23	1
23	灌浆期 Filling stage	100	76.8	0	0	2	14	24	8

表 2 云南寻甸不同生育期小麦草地贪夜蛾发生为害情况

小麦生育期 Growth stages of wheat	受害株率/% Plant damaged rate	平均密度/ 头·m ⁻² Average density	不同龄期幼虫比例/% Percentage of larvae at different stages					
			1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	6 龄 6th instar
苗期 Seedling stage	51	21.3	72.5	15.0	10.0	2.5	0.0	0.0
分蘖期 Tillering stage	91	54.7	51.9	35.2	11.9	1.0	0.0	0.0
拔节期 Jointing stage	85	34.3	4.0	24.0	35.3	20.0	16.0	0.7
抽穗期 Heading stage	85	45.9	2.9	8.1	33.7	26.7	27.9	0.6
灌浆期 Filling stage	100	76.8	0.0	0.0	4.2	29.2	50.0	16.7

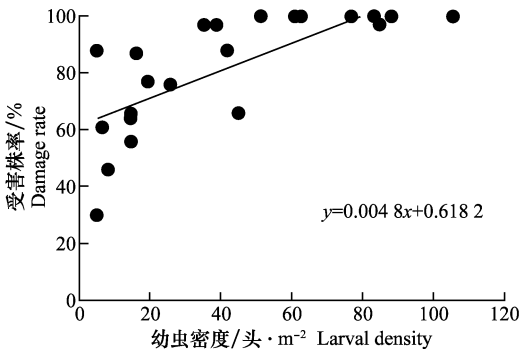


图 1 草地贪夜蛾幼虫密度与小麦受害株率的关系
Fig. 1 Relationship between larval density of fall armyworm and damage rate to wheat plants

2.2 幼虫的空间分布型

在所有调查的 23 块田中,将 3~6 龄幼虫比例大于 70%且 4~6 龄幼虫比例大于 30%的田块定为高龄幼虫发生田块。低龄幼虫发生量较大的共有 17 块小麦田,其余 6 块以高龄幼虫为主。聚集度指标分析表明,低龄幼虫为主的麦田中,12 块田幼虫为聚集分布(表 3),其余 5 块田中幼虫以均匀分布为主,该 5 块田中仅有 1 块处于分蘖期,其余 4 块田为拔节至抽穗期。高龄幼虫为主的 6 块麦田,除了平均拥挤度(M^*)指标以外,其他聚集度指标均表明幼虫为均匀分布。

表 3 小麦田草地贪夜蛾幼虫聚集度指标¹⁾

Table 3 Aggregation indices of fall armyworm larvae in wheat fields									
样地 Sampling field	平均密度/ 头·m ⁻² Average density	方差 S ² Variance	扩散系数 C Diffusion coefficient	平均拥挤度 M^* Mean crowded degree	丛生指数 I Clumping index	负二项分布指数 K Negative binomial distribution index	Cassie 指数 C _A Cassie index	聚块指数 $M^* / \bar{x}$ Aggregating index	种群聚集均数 λ Aggregation intensity index
1	14.40	1.20	0.67	1.47	-0.33	-5.40	-0.19	0.81	—
2	4.80	0.80	1.33	0.93	0.33	1.80	0.56	1.56	0.56
3	44.80	24.30	4.34	8.94	3.34	1.68	0.60	1.60	3.95
4	38.67	6.20	1.28	5.12	0.28	17.09	0.06	1.06	4.71
5	88.00	16.50	1.50	11.50	0.50	22.00	0.05	1.05	10.83
6	4.80	0.80	1.33	0.93	0.33	1.80	0.56	1.56	0.56
7	84.80	15.80	1.49	11.09	0.49	21.61	0.05	1.05	10.38
8	6.40	1.70	2.13	1.93	1.13	0.71	1.41	2.41	0.26
9	105.60	35.70	2.70	14.90	1.70	7.74	0.13	1.13	12.22
10	41.60	7.20	1.38	5.58	0.38	13.52	0.07	1.07	5.06
11	8.00	1.50	1.50	1.50	0.50	2.00	0.50	1.50	0.84
12	16.00	1.00	0.50	1.50	-0.50	-4.00	-0.25	0.75	—
13	35.20	4.80	1.09	4.49	0.09	48.40	0.02	1.02	4.52
14	62.40	9.70	1.24	8.04	0.24	32.02	0.03	1.03	7.71
15	25.60	2.70	0.84	3.04	-0.16	-20.48	-0.05	0.95	—
16	51.20	5.30	0.83	6.23	-0.17	-37.24	-0.03	0.97	—
17	14.40	1.20	0.67	1.47	-0.33	-5.40	-0.19	0.81	—
18	19.20	2.30	0.96	2.36	-0.04	-57.60	-0.02	0.98	—
19	83.20	5.80	0.56	9.96	-0.44	-23.51	-0.04	0.96	—
20	14.40	0.70	0.39	1.19	-0.61	-2.95	-0.34	0.66	—
21	60.80	6.30	0.83	7.43	-0.17	-44.43	-0.02	0.98	—
22	83.20	1.30	0.13	9.53	-0.88	-11.89	-0.08	0.92	—
23	76.80	4.30	0.45	9.05	-0.55	-17.39	-0.06	0.94	—

1) 加粗字体表示该指标表明该虫为聚集分布,其余为均匀分布(根据 1.2.1 标准)。“—”表示该田块草地贪夜蛾为非聚集分布,不予计算其种群聚集均数。
Bold indicates the larvae show a pattern of aggregation distribution and others means that larvae exhibits an evenly distribution. “—” indicates aggregation intensity index can not be calculated because of the non-aggregative distribution of fall armyworm in the specific wheat field.

对所有抽样田块的样本平均密度 $\bar{x}$ 与平均拥挤度 M^* 进行回归分析表明, $\bar{x}$ 与 M^* 的线性回归方程为: $M^* = 0.108\ 2 + 1.020\ 7\bar{x}$ ($R^2 = 0.953\ 8^{**}$)。回归方程中, $\alpha > 0$ 表明所有草地贪夜蛾幼虫在小麦田中分布的基本成分是个体群, 个体间相互吸引, $\beta > 1$ 表明草地贪夜蛾幼虫个体群在所有小麦田中总体上呈聚集分布。

对于低龄幼虫为主的田块, 样本平均密度 $\bar{x}$ 与平均拥挤度 M^* 的回归方程为 $M^* = 0.143\ 8 + 1.079\bar{x}$ ($R^2 = 0.962\ 3^{**}$)。 $\alpha > 0$, 表明草地贪夜蛾在小麦田中分布的基本成分是个体群, 个体间相互吸引, $\beta > 1$, 显示低龄草地贪夜蛾个体群在小麦田呈聚集分布。以高龄虫为主的田块, 回归方程为 $M^* = -0.327\ 3 + 0.983\ 8\bar{x}$ ($R^2 = 0.991\ 6^{**}$)。 $\alpha < 0$, 表明草地贪夜蛾在小麦田中相互排斥, $\beta < 1$, 表明高龄草地贪夜蛾个体群在小麦田呈均匀分布。

根据 Taylor 幂法则公式 $S^2 = a\bar{x}^b$, 对低龄幼虫为主的田块进行回归分析得到回归方程 $\lg S^2 = 0.049\ 5 + 1.146\lg\bar{x}$ ($R^2 = 0.96^{**}$), 参数 $\lg a = 0.049\ 5 > 0$, $b = 1.146 > 1$ 。表明小麦田中草地贪夜蛾低龄幼虫多为聚集分布, 且具有密度依赖性, 幼虫聚集度随平均密度的升高而上升。对高龄幼虫为主的田块进行回归分析得到回归方程 $\lg S^2 = -0.102\ 4 + 0.745\ 6\lg\bar{x}$

($R^2 = 0.356\ 7^*$), 参数 $\lg a = -0.102\ 4 < 0$, $b = 0.746\ 5 < 1$, 表明草地贪夜蛾高龄幼虫在小麦田间为均匀分布。

根据 Blackkith 的种群聚集均数 λ 理论公式, 由表 1 中的 $\bar{x}$ 和 K 值计算得到麦田草地贪夜蛾的种群聚集均数 λ 分布于 0.26~12.22 之间。4 块田的 λ 值小于 2, 表明草地贪夜蛾在小麦田中的聚集原因是由环境因素主导。其余 8 块田的 λ 值均大于 2, 表明草地贪夜蛾在小麦田的聚集原因为环境因素或该虫本身的聚集习性导致。

2.3 抽样模型与技术

将小麦田草地贪夜蛾低龄及高龄幼虫的 Iwao M^* 和 $\bar{x}$ 回归模型系数 $\alpha = 0.143\ 8$, $\beta = 1.079$ 及 $\alpha = -0.327\ 3$, $\beta = 0.983\ 8$ 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:

低龄幼虫理论抽样模型: $N = (\frac{3.84}{D^2})(\frac{1.143\ 8}{\bar{x}} + 0.079)$;

高龄幼虫理论抽样模型: $N = (\frac{3.84}{D^2})(\frac{0.672\ 7}{\bar{x}} - 0.016\ 2)$;

基于上述公式, 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 (表 4)。

表 4 小麦田中不同密度下草地贪夜蛾幼虫的理论抽样数¹⁾

Table 4 Theoretical sampling unit number of fall armyworm larvae at different densities in the wheat fields

样地 Sample fields	误差 D Errors	不同虫口密度($\bar{x}$)下的理论抽样单元数量/个 The number of theoretical sampling unit at different larval densities					
		0.5	1	2	4	8	16
低龄幼虫为主 Fields with more early larvae	0.1	909	470	250	140	85	58
	0.2	227	117	62	35	21	14
	0.3	101	52	28	16	9	6
高龄幼虫为主 Fields with more late larvae	0.1	510	252	123	58	26	10
	0.2	128	63	31	15	7	2
	0.3	57	28	14	6	3	1

1) 抽样单元面积为 0.125 m², $\bar{x}$ 为抽样单元(0.125 m²)的平均虫量(见 1.2.1)。
The size of sampling unit is 0.125 m². $\bar{x}$ indicates the mean larval number per 0.125 m² in the field.

根据国外研究结果, 草地贪夜蛾幼虫在小麦田苗期密度达到约 50~65 头/m² 时应进行防治^[23-24]。将低龄及高龄幼虫的 Iwao M^* 和 $\bar{x}$ 回归模型参数 α, β 代入序贯抽样模型:

$T_{Iwao(n)} = mn_0 \pm t \sqrt{n[(\alpha + 1)m_0 + (\beta - 1)m_0^2]}$,
得到防治指标下草地贪夜蛾低龄及高龄幼虫的抽样区间计算公式:

低龄幼虫: $T_{Iwao(n)} = 6n \pm 1.96 \sqrt{9.71n}$;

高龄幼虫: $T_{Iwao(n)} = 6n \pm 1.96 \sqrt{7.38n}$;
根据以上公式计算得到麦田草地贪夜蛾的序贯抽样表如表 5。

根据序贯抽样表, 抽样过程中, 若虫量大于表中抽样单元(0.125 m²)数所对应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, 以确定是否进行防治。

表 5 小麦田草地贪夜蛾幼虫种群序贯抽样表¹⁾

Table 5 Larval sequential sampling limits for fall armyworm in wheat fields

样地 Sample field	抽样单元 数量/个 Sample number	抽样单元虫口数量/头 Larval number intervals	
		上限 $T_{1(n)}$ Upper limit	下限 $T_{2(n)}$ Lower limit
低龄幼虫为主田块 Fields with more early larvae	1	12	0
	2	21	3
	3	29	7
	4	36	12
	5	44	16
	6	51	21
	7	58	26
	8	65	31
	9	72	36
	10	79	41
高龄幼虫为主 Fields with more late larvae	1	11	1
	2	20	4
	3	27	9
	4	35	13
	5	42	18
	6	49	23
	7	56	28
	8	63	33
	9	70	38
	10	77	43

1) 本序贯抽样表中抽样单元大小为 0.125 m²。
The size of sample unit for this table is 0.125 m².

3 讨论

小麦是我国最重要的粮食作物,保障小麦的安全生产对保障农业健康发展至关重要。我们的研究表明,草地贪夜蛾可严重为害小麦,已对我国小麦生产构成了威胁。云南省寻甸县金源乡调查点小麦植株受害率为 30%~100%,为害时期从小麦苗期持续至灌浆期。苗期、分蘖期多为低龄幼虫为害,拔节期低龄、高龄幼虫均有为害,抽穗、灌浆期多为高龄幼虫为害。高龄幼虫比率随着小麦生育期的推进而增大,幼虫生长与寄主营养供给具协调性,推测成虫产卵与玉米一样,选择在苗期。同时,调查小麦田草地贪夜蛾幼虫的田间密度为 4.8~105.6 头/m²,局部田块发生量远大于国外研究提出的小麦田的防治指标。因此,需要尽快在小麦产区,尤其是冬春季南方小麦生产地区开展草地贪夜蛾的种群监测工作,掌握越冬虫源和种群繁殖动态,指导做好虫源区的及时防控。

抽样技术是指导害虫监测与防治工作的基础^[21-22]。我们的研究表明,低龄草地贪夜蛾幼虫在小麦田中多为聚集分布,而高龄幼虫主要为均匀分布。Farias 等的研究亦显示草地贪夜蛾低龄幼虫在玉米田呈聚集分布,但随着该虫在田间为害的进一步发展,其分布型的随机性越来越强^[25-26]。阿根廷学者的调查显

示,草地贪夜蛾在玉米田间总体上呈聚集分布^[27],但低龄幼虫的聚集能力更强。巴西的 De Melo 等研究发现草地贪夜蛾中等龄期幼虫在玉米田间呈聚集分布,而为害玉米穗的幼虫为随机分布^[28-29]。我们前期研究发现,草地贪夜蛾幼虫在我国鲜食玉米田中为聚集分布,个体分布集中,幼虫聚集度随平均密度的增加而升高^[30],该调查中草地贪夜蛾龄期主要为 1~3 龄的低龄幼虫(比例为 95.57%),与本研究草地贪夜蛾低龄幼虫空间分布型一致。

与草地贪夜蛾在小麦田的空间分布相似,玉米田斜纹夜蛾幼虫在低龄期也常出现群集行为,个体间相互吸引,但随着虫龄增大吸引力减弱,进入高龄后则表现为相互排斥,表现为转株为害^[31]。黏虫、灰飞虱等害虫在小麦田中也呈聚集分布^[32-33],与草地贪夜蛾低龄幼虫的空间分布一致。

草地贪夜蛾的空间分布情况与其产卵习性、扩散能力及种群密度等相关。草地贪夜蛾每次可产接近 200 粒的卵块,低龄幼虫扩散能力弱而多聚集于卵块附近,但随着龄期的增加,扩散能力增强并呈现自残习性,导致高龄幼虫趋于随机分布^[34]。草地贪夜蛾的空间分布情况还与种群密度相关,低密度下有聚集分布的趋势,高密度下呈随机分布特征^[35]。本地虫源基数和迁入虫源数量叠加会增加种群密度,从而影响分布型。田间本地虫源和异地迁入虫源会影响种群密度,进而影响种群空间分布型。本文调查点小麦前茬作物主要为玉米,前期当地玉米上有草地贪夜蛾为害,小麦上的幼虫也可能有外地虫源的迁入,这有待于今后进一步研究。此外,草地贪夜蛾的空间分布型还与寄主的物候期(phenology)有关,Linduska 和 Harrison 研究表明播种后至第 40 天的玉米最易遭受草地贪夜蛾的为害^[36]。本研究中,苗期至拔节期多为低龄幼虫,种群呈聚集分布,需进行多点取样调查,而拔节至抽穗期多为高龄幼虫,田间种群均匀分布,可采用随机取样方式,减少调查工作量。

通过对寻甸县草地贪夜蛾空间分布的分析,我们建立了理论抽样数模型和序贯抽样模型,为小麦各生育期草地贪夜蛾的调查提供了抽样方法。在草地贪夜蛾密度低(≤ 16 头/m²)的田块中,每块田调查 28 个样方(每样方 0.125 m²),可保证误差 ≤ 0.3 ;在密度高(≥ 32 头/m²)的田块中,每块田调查 16 个样方,可保证误差 ≤ 0.3 。序贯抽样技术可应用于基层生产防治中,生产经营主体可基于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。文中所用小麦草地贪夜蛾的经济阈值来自国外的研

究工作,虫口密度达 5~6 头/平方英尺(约为 50~65 头/m²)时需进行防治。在国内小麦不同产区,不同发生代次的草地贪夜蛾近缘种黏虫的防治指标为 15~78 头/m²[37-40]。麦田一代棉铃虫 2 龄幼虫防治指标约为 8 头/m²[41]。对比国内麦田黏虫、棉铃虫等的防治指标,国外麦田草地贪夜蛾的防治指标较宽松,建议国内防治指标采用 10 头/m²。由于入侵草地贪夜蛾对我国小麦的为害受气候环境、小麦品种及天敌种类等多种因素的影响,今后应开展草地贪夜蛾为害小麦的防治经济指标研究,并参考该指标优化序贯抽样技术。

参考文献

- [1] CAPINERA J L. Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) [EB/OL]. (1997 - 07)[2019 - 10 - 28]. http://entnemdept.ufl.edu/creatures/field/fall_armyworm.htm#host.
- [2] CABI. *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) [R]. Wallingford, UK: CAB International, 2016.
- [3] LUGINBILL P. The fall army worm [M]. USDA Technology Bulletin, 1928, 34: 91.
- [4] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. The Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82 - 86.
- [5] 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.
- [6] DUMAS P, LEGEI 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.
- [7] ABRAHAMS P, BATEMAN M, BEALE T, et al. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. Evidence note (2), September 2017 [R]. UK: CABI, 2017.
- [8] 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.
- [9] IITA. Fall armyworm has reached the Indian subcontinent [EB/OL]. (2018 - 08 - 04)[2019 - 10 - 28]. <http://www.iita.org/news-item/fall-armyworm-has-reached-the-indian-subcontinent/>.
- [10] 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 - 10 - 28]. <http://ppdmyanmar.org/>.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fall armyworm monitoring and early warning system (FAMEWS) platform [DB/OL]. 2018. <http://www.fao.org/fall-armyworm/en/>.
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Integrated management of the fall armyworm on maize: A guide for farmer field schools in Africa [R]. 2018. <http://www.fao.org/3/I8665EN/i8665en.pdf/>.
- [13] 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/OL]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4103.
- [14] SUN Xiaoxu, HU Chaoping, JIA Huiru, et al. Case study on the first immigration of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* invading into China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18: 2 - 10.
- [15] 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]. 植物保护, 2019, 45(2): 1 - 6.
- [16] 张磊,柳贝,姜玉英,等. 中国不同地区草地贪夜蛾种群生物型分子特征分析[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 20 - 27.
- [17] 农业农村部就草地贪夜蛾防控工作举行新闻发布会[EB/OL]. (2019 - 09 - 17)[2019 - 10 - 28]. http://www.moa.gov.cn/hd/zbft_news/cdyefk/.
- [18] IWAO S. Application of the $m-m$ method to the analysis of spatial patterns by changing the quadrat size method to the analysis of spatial patterns by changing the quadrat size [J]. Population Ecology, 1972, 14(1): 97 - 128.
- [19] IWAO S. A new regress method for analyzing the aggregation pattern of animal population [J]. Population Ecology, 1968, 10(1): 1 - 20.
- [20] TAYLOR L R. Aggregation, variance and the mean [J]. Nature, 1961, 189(4766): 732 - 735.
- [21] 丁岩钦. 昆虫数学生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [22] 徐汝梅. 昆虫种群生态学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1987.
- [23] MICHAUD J P, WHITWORTH R J, SCHWARTING H N. Wheat insect management [R]. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. MF845. 2015. 01.
- [24] STUDEBAKER G E, KRING T, LORENZ G, et al. Wheat insect management and control [R]. University of Arkansas Cooperative Extension Service Printing Services. FSA7016-PD-11-04RV.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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(5): 471 - 477.
- [28] DE MELO E P, DEGRANDE P E, DE 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.

[6] 全国农业技术推广服务中心. 当前玉米重大病虫害发生动态 [EB/OL]. (2019-08-23). https://www.natesc.org.cn/Html/2019_08_23/28092_151760_2019_08_23_459724.html.

[7] 张磊, 柳贝, 姜玉英, 等. 中国不同地区草地贪夜蛾种群生物型分子特征分析[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 20-27.

[8] 张磊, 靳明辉, 张丹丹, 等. 入侵云南草地贪夜蛾的分子鉴定[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 19-24.

[9] 太红坤, 郭井非, 杨世常, 等. 草地贪夜蛾在云南德宏州甘蔗上的生物学习性及为害状观察[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 75-79.

[10] 刘杰, 姜玉英, 刘万才, 等. 草地贪夜蛾测报调查技术初探[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(4): 44-47.

[11] 仓晓燕, 张荣跃, 尹炯, 等. 我国蔗区草地贪夜蛾发生动态监测与防控措施[J]. 中国糖料, 2019, 41(3): 77-80.

[12] 杨普云, 朱晓明, 郭井非, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 1-6.

[13] CHI H. TWSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis [M]. National Chung Hsing University. Taichung, Taiwan, 2016.

[14] CHI H, SU H Y. Age-stage, two-sex life tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with mathematical proof of the relationship between female fecundity and the net reproductive rate [J]. Environmental Entomology, 2006, 35(1): 10-21.

[15] 姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态与未来趋势分析[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(2): 33-35.

[16] 秦誉嘉, 蓝帅, 赵紫华, 等. 迁飞性害虫草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 43-47.

[17] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 中国热带和南亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 1-9.

[18] BERDEGUE M T J. Effects of plant chemical extracts and physical characteristics of *Apium graveolens* and *Chenopodium murale* on host choice by *Spodoptera exigua* larvae [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1996, (78): 253-262.

[19] THOMPSON J N. Evolutionary ecology of the relationship between oviposition preference and performance of offspring in phytophagous insects [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1988, 47(1): 3-14.

[20] PITRE H N, MULROONEY J E, HOGG D B. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) oviposition: crop preferences and egg distribution on plants [J]. Journal of Economic Entomology, 1983, 76(3): 463-466.

[21] KEBEDE M. Out-break, distribution and management of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Africa: The status and prospects [J]. Academy of Agriculture Journal, 2018, 3(10): 551-568.

[22] 孙小旭, 赵胜国, 靳明辉, 等. 玉米田草地贪夜蛾幼虫的空间分布型与抽样技术[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 13-18.

[23] 张智, 张云慧, 姜玉英等. 草地贪夜蛾覆毛卵块与绒茧蜂茧块的识别特征[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 99-101.

[24] JUÁREZ M L, SCHÖFL G, VERA M T, et al. Population structure of *Spodoptera frugiperda* maize and rice host forms in South America: are they host strains? [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2014, 152(3): 182-199.

[25] 徐蓬军, 张丹丹, 王杰, 等. 草地贪夜蛾对玉米和烟草的偏好性研究[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 61-64.

[26] 吴正伟, 师沛琼, 曾永辉, 等. 3种寄主植物饲养的草地贪夜蛾种群生命表[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 59-64.

[27] 李定银, 邹军锐, 张涛, 等. 草地贪夜蛾对4种寄主植物的偏好性[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 50-54.

[28] DUMAS P, LEGEI 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.

[29] 张智, 郑乔, 张云慧, 等. 草地贪夜蛾室内种群抗寒能力测定[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 43-49.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 16 页)

[29] DE 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.

[30] 孙小旭, 赵胜国, 靳明辉, 等. 玉米田草地贪夜蛾幼虫的空间分布型与抽样技术[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 13-18.

[31] 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.

[32] 王军, 周菲. 小麦粘虫发生与分布特点研究[J]. 四川农业科技, 2018(2): 40-42.

[33] 朱金良, 王华弟, 陈跃, 等. 麦田灰飞虱种群空间分布型及抽样技术探讨[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 392-396.

[34] 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(2): 453-458.

[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] LINDUSKA J J, HARRISON F P. Adult sampling as a means of predicting damage levels of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in grain corn [J]. The Florida Entomologist, 1986, 69(3): 487-491.

[37] 李文强, 卢增斌, 李丽莉, 等. 济宁地区麦田粘虫种群监测及防治指标研究[J]. 山东农业科学, 2017, 49(11): 116-119.

[38] 舒占涛, 杨吉善. 二代粘虫危害与小麦产量损失及防治指标[J]. 植物保护, 1992, 18(6): 5-7.

[39] 张国彦, 陈松莲, 刘淑帆, 等. 豫中南小麦粘虫动态防治指标的探讨[J]. 中国植保导刊, 1998, 18(4): 12-13.

[40] 张文同. 从粘虫为害损失谈防治指标[J]. 安徽科技学院学报, 1994, 8(1): 33-37.

[41] 董宝信, 王厚振, 李文江, 等. 第一代棉铃虫危害小麦防治指标的研究[J]. 山东农业科学, 1993(6): 29-30.

(责任编辑: 杨明丽)