

贵州省高粱田草地贪夜蛾幼虫发生 及其空间分布研究*

徐建霞^{1**} 向中华² 徐海英³ 丁延庆¹ 曹 宁¹
程 斌¹ 高 旭¹ 李文贞¹ 张立异^{1***}

(1. 贵州省农业科学院旱粮研究所, 贵阳 550006; 2. 黔西市定新乡农业服务中心, 黔西 551500;
3. 仁怀市鲁班街道农业服务中心, 仁怀 564500)

摘 要 【目的】草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 是一种迁飞性的重大农业害虫, 近年来在贵州高粱田发生为害严重。明确其在高粱田中的发生规律及空间分布, 为制定有效的防治策略提供理论依据。【方法】于 2022 年 6-7 月在贵州省安顺、贵阳、黔西、金沙和仁怀 5 个地区开展田间调查, 采用 6 个聚集度指标、Taylor 幂法和 Iwao 聚集格局回归分析法, 对草地贪夜蛾幼虫的空间分布进行分析。【结果】田间调查发现, 在高粱 6-9 叶生长期, 草地贪夜蛾幼虫主要啃食叶片, 导致叶片出现不规则孔洞或缺损; 5 个调查地区高粱田中多为低龄幼虫 (1-3 龄), 高龄幼虫 (4-6 龄) 较少, 且南部地区 (安顺、贵阳) 的幼虫数量和密度显著 ($P < 0.05$) 高于偏北部地区 (黔西、金沙和仁怀)。空间分布指数表明, 草地贪夜蛾幼虫在高粱田中呈聚集分布。高粱植株受害率与幼虫数量呈极显著正相关 ($r = 0.972\ 9$, $P < 0.01$), 回归方程为 $y = 54.646\ 0x + 5.232\ 8$ ($R^2 = 0.946\ 5$)。基于空间分布型分析, 提出幼虫密度的理论抽样模型 $N = (3.84 / D^2)(1.945\ 8 / x - 0.664\ 9)$, 明确了在不同虫害密度和允许误差范围下的抽样高粱株数; 根据幼虫密度防治指标, 得出草地贪夜蛾幼虫的序贯抽样区间计算公式为 $T_{Iwao(n)} = 0.27n \pm 1.96\sqrt{0.477n}$ 。【结论】在贵州高粱 6-9 叶期, 草地贪夜蛾幼虫以 1-3 龄为主, 呈聚集分布, 南部虫害较为严重。研究还提出了基于虫害密度的序贯抽样模型和防治指标, 为田间监测及防控措施提供了科学依据。**关键词** 草地贪夜蛾; 高粱; 空间分布; 抽样模型; 序贯抽样

Occurrence and spatial distribution of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields in Guizhou Province

XU Jian-Xia^{1**} XIANG Zhong-Hua² XU Hai-Ying³ DING Yan-Qing¹ CAO Ning¹
CHENG Bin¹ GAO Xu¹ LI Wen-Zhen¹ ZHANG Li-Yi^{1***}

(1. Dry Grain Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guizhou 550006, China; 2. Agricultural Service Center of Dingxin Township, Qianxi 551500, China; 3. Agricultural Service Center of Luban Subdistrict Office, Renhuai 564500, China)

Abstract [Aim] To determine the occurrence patterns and spatial distribution of *Spodoptera frugiperda*, a significant migratory, agricultural pest, in sorghum fields in Guizhou. [Methods] Field surveys were conducted in the Anshun, Guiyang, Qianxi, Jinsha, and Renhuai regions of Guizhou Province and 6 aggregation indices, Taylor's power law, and Iwao's regression analysis were used to analyze the spatial distribution of *S. frugiperda* larvae. [Results] Field surveys revealed that *S. frugiperda* larvae primarily feed on leaves, causing irregular holes or other damage, during the 6th to 9th sorghum leaf

*资助项目 Supported projects: 贵州省基础研究计划 (自然科学基金) 青年引导项目 (黔科合基础-[2024]青年 077); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2022]一般 235、黔科合基础-ZK[2023]一般 169); 贵州省育种科研基础平台创新能力建设项目 (黔科合服企[2022]014); 科研机构创新能力建设项目 (黔科合服企[2022]007); 贵州省农科院项目 (黔农科种质资源[2023]06 号)

**第一作者 First author, E-mail: 529438648@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lyzhang1997@hotmail.com

收稿日期 Received: 2024-06-10; 接受日期 Accepted: 2024-07-11

stages. In the 5 surveyed regions, larvae were mainly 3rd instar larvae or younger, with few 5th and 6th instar larvae. The number and density of larvae were significantly higher in southern compared to northern regions. Spatial distribution indices indicate that larvae have an aggregated distribution pattern. There was a highly significant, positive correlation between the infestation rate of sorghum plants and the number of larvae ($R = 0.972\ 9$, $P < 0.01$), which conformed to the regression equation $y = 54.646\ 0x + 5.232\ 8$ ($R^2 = 0.946\ 5$). A theoretical sampling model for larval density was developed based on analysis of the spatial distribution pattern: $N = (3.84/D^2) (1.945\ 8/x - 0.664\ 9)$. This model defines the number of sorghum plants that should be sampled under different larval densities and allowable error ranges. Based on the larval density control threshold, a sequential sampling interval calculation formula for larvae was derived: $T_{Iwao(n)} = 0.27n \pm 1.96\sqrt{0.477n}$.

[Conclusion] During the 6th to 9th leaf stages of sorghum in Guizhou, *Spodoptera frugiperda* larvae are predominantly in the 1st to 3rd instar stages, exhibiting an aggregated distribution. Infestations are more severe in the southern regions. The study also introduces a sequential sampling model based on pest density, along with control thresholds, providing a scientific basis for field monitoring and integrated pest management strategies.

Key words *Spodoptera frugiperda*; sorghum; spatial distribution; sampling model; sequential sampling

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 又名秋粘虫, 原产于美洲, 被联合国粮农组织列为全球重要农业害虫 (Abbas *et al.*, 2022)。该虫在美洲热带和亚热带地区全年活跃, 迁飞能力强, 能飞至加拿大和阿根廷 (Westbrook *et al.*, 2019), 因此, 草地贪夜蛾可能新的区域引起严重暴发, 增加了监测和防控难度 (郭井菲等, 2018)。草地贪夜蛾可摄食 350 多种植物, 对玉米、高粱、水稻和小麦等主要农作物构成了严重威胁 (Montezano *et al.*, 2018; 杨杰, 2023)。自 2016 年在非洲尼日利亚和加纳首次被发现后, 草地贪夜蛾已在非洲 44 国大规模暴发 (Day *et al.*, 2017), 于 2018 年入侵印度, 2019 年侵入我国云南, 并迅速扩散至国内 27 个省 (自治区和直辖市), 我国受害农作物面积超 236 万 hm^2 , 其中西南等地区尤为严重 (姜玉英等, 2019; 丁奎婷等, 2023)。2019 年 4 月, 贵州省首次发现草地贪夜蛾, 目前已遍及贵州全省, 对玉米和高粱等农作物生产造成了严重损失, 2023 年发生面积约为 3.4 万 hm^2 (贵州省农业农村厅, 2023)。

高粱 *Sorghum bicolor* 是一种 C_4 植物, 因其具有较强耐逆性 (耐旱、耐涝、耐盐碱、耐贫瘠及耐高温等), 在干旱地区被广泛种植, 成为重要的粮食作物, 显著影响旱地农业生产 (戴凌燕等, 2018; 杨博等, 2019)。高粱除了作为粮食, 还在糖料生产、造纸、板材制造、饮料制备及酒精提取等多个领域发挥关键作用, 尤其是在动物

饲料和白酒酿造中占据核心地位 (高进等, 2017)。我国高粱的主要产区集中在西南和东北地区, 部分省份如山西、河南等也有零星种植 (邹剑秋等, 2020)。在这些产区, 超过 80% 的高粱籽粒用于酿造白酒, 如茅台、习酒和五粮液等高级酱香型白酒均以高粱为主要原料 (丁延庆等, 2023)。贵州白酒产业凭借其悠久历史和地理优势, 已成为地区经济的重要支柱。2023 年, 贵州省高粱种植面积已增至约 18.7 万 hm^2 , 主要集中在仁怀、习水、金沙和黔西等地。然而, 草地贪夜蛾已在我国西南至华南地区成功越冬并定殖, 形成了年度迁移循环, 对当地高粱种植构成了持续威胁 (丁奎婷等, 2023; 徐建霞等, 2023)。

目前, 我国对草地贪夜蛾为害农作物的研究主要集中在玉米和小麦等大面积作物上 (李文静等, 2023; 王潇楠等, 2023; 徐丽娜等, 2023; 陶旋等, 2024)。孙小旭等 (2019) 研究表明, 在云南地区鲜食玉米田中, 草地贪夜蛾幼虫呈聚集分布, 且随种群密度的增加, 其聚集性随之增强。此外, 环境条件是导致其聚集分布的主要原因。刘诗颖等 (2021) 分析了海南省玉米田中草地贪夜蛾幼虫的空间分布, 发现其与玉米种植模式、幼虫发育阶段和气候变异密切相关; 在玉米苗期、小喇叭口期和大喇叭口期, 幼虫为害较为严重, 3 龄幼虫比例高且呈聚集分布; 玉米开花期和成熟期多见 5-6 龄幼虫, 分布较均匀。幼虫在海南省东部和中部地区的玉米田中呈聚集分

布,在南部和北部地区则呈均匀分布。李国平等(2022)详细分析了黄淮海地区夏玉米受草地贪夜蛾侵害的影响,发现玉米在不同生育阶段受害后导致的产量损失及防治门槛存在显著差异。徐艳玲等(2020)指出如果不采取防治措施,草地贪夜蛾对中国小麦产业造成的经济损失可达1 023.44-5 299.79 亿元。

这些研究结果不仅深入分析了草地贪夜蛾在不同地区及玉米、小麦等主要粮食作物上的危害模式和经济影响,还为制定和优化相关防治策略提供了重要依据。然而,这些研究对高粱上草地贪夜蛾的防控指导存在一定局限性。目前,只有少数地区如河南新乡(刘彬等,2020)和江西九江(洪霖等,2023)对草地贪夜蛾幼虫在高粱上的为害进行了简要报道,具体分布和为害情况尚缺乏系统研究。鉴于草地贪夜蛾对高粱这一白酒原料存在潜在威胁,本研究在贵州省主要高粱种植区开展了草地贪夜蛾的田间分布状况及危害特征调查,旨在建立一套有效的田间监控、早期预警和综合管理体系,以减轻其对高粱的为害。研究结果不仅有助于贵州省的害虫管理,还将为重庆、四川等邻近省(直辖市)提供预警信息。

1 材料与方法

1.1 调查区域概况

贵州位于中国西南部,地理坐标 $4^{\circ}37'-29^{\circ}13'N$, $103^{\circ}36'-109^{\circ}35'E$ 。该省属亚热带湿润季风气候,气候温暖湿润,四季分明。春季温暖雨量充足,雨季与高温季节重合,具有较长的无霜期,平均年温约为 $14.8^{\circ}C$ 。这些条件为草地贪夜蛾等农作物害虫提供了理想的繁殖环境。基于气候和地理条件,本研究选取了贵州省5个县市中高粱种植面积集中的区域作为监测点,监测点从南至北分别是安顺市山京农场、贵阳市贵州省农业科学院、黔西市金碧镇、金沙县柳塘镇和仁怀市茅坝镇。

1.2 调查方法

2022年6-7月,对贵州省5个调查点高

粱田中的草地贪夜蛾进行抽样调查。为确保调查结果的准确性和代表性,调查点的种植高粱均为“红缨子”常规品种,且在调查前未施用任何杀虫剂。调查样地标准:种植密度8 000-10 000株/667 m²、植株处于6-9叶生长期及种植面积超过1 334 m²。采用“W”型5点取样法进行随机抽样,每点调查10株高粱,记录幼虫数量和受害株数。每个调查点共调查10块样地,样地间距大于200 m。在每个调查点除记录幼虫数量外,还详细记录了幼虫龄期,以便深入了解草地贪夜蛾在该地区的发生和发展情况。

1.3 统计方法

1.3.1 单株平均虫量和植株受害率

单株平均虫量=调查总虫口数/调查总株数,
植株受害率=被害株数/调查株数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 聚集度指标法 通过计算以下6种聚集度指标(徐汝梅,1987)解析草地贪夜蛾的空间分布情况。

(1) 扩散指数 C : $C = S^2 / x$;

(2) 平均拥挤度 M^* : $M^* = x + S^2 / x - 1$,反映了每个个体周围的平均密度;

(3) 丛生指数 I : $I = S^2 / x - 1$,描述种群分布的聚集程度;

(4) 负二项分布参数 K : $K = x^2 / (S^2 - x)$,反映种群的聚集状态;

(5) Kuno 指数 C_A : $C_A = (S^2 - x) / x$,评估种群分布的聚集性;

(6) 聚块指数: 平均拥挤度与平均虫量的比值(M^* / x),该指数表示相对于平均值,每个个体周围的拥挤程度。

以上公式中, S^2 是样本方差, x 是抽样单位的平均虫量。

1.3.3 回归分析法 (1) 利用 Taylor 幂法则分析田间草地贪夜蛾幼虫的空间分布型(Taylor, 1961; 杨现明等, 2020)。Taylor 幂法则 $S^2 = ax^b$ 作为一种分析生态学数据的工具,在探讨种群分布聚集性方面显示出独特价值。该方法通过回归方程模型描绘种群的平均数(x)与其方差(S^2)之间的关系,其对数转换的回归方程表达式为

$\lg S^2 = \lg a + b \lg x$ 。当 $\lg a > 0$ 且 $b > 1$, 种群呈聚集分布, 表现出密度依赖性; $\lg a > 0$ 且 $b = 1$, 种群呈聚集分布, 但无密度依赖性; $\log(a) < 0$ 且 $b < 1$, 种群呈均匀分布, 且随着密度增加分布越均匀。

(2) 通过 Iwao 建立的回归分析模型明确田间草地贪夜蛾幼虫的种群分布特征(丁岩钦, 1994; 杨现明等, 2020)。Iwao 的回归分析模型是研究种群分布特性的重要方法, 通过建立平均拥挤指数 (M^*) 与种群平均数 (x) 之间的数学关系来分析种群的空间分布。具体模型为 $M^* = \alpha + \beta x$, 其中参数 α 为分布基本成分的平均拥挤度, 揭示个体之间的相互关系。当 $\alpha > 0$ 时, 表示幼虫聚集性分布; $\alpha = 0$ 表示个体独立随机分布; $\alpha < 0$ 则表明个体间均匀分布。参数 $\beta > 1$ 时, 表示聚集性随密度增加而增强; $\beta = 1$ 表示聚集性与密度无关; $\beta < 1$ 表示聚集性随密度增加而减弱。

1.3.4 种群密度抽样技术的研究方法 根据 Iwao 的方法(丁岩钦, 1994), 高粱田中草地贪夜蛾幼虫的理论最适抽样数可通过以下公式计算: $N = t^2 / D^2(\alpha + 1/x + \beta - 1)$ 。其中, N 代表理想的理论抽样数量; t 表示在给定的置信度下的 t 分布数值; D 是指定的误差范围; α 和 β 分别是 Iwao 回归模型中 M^* 与 x 回归关系的截距与斜率; x 为观测到的平均密度。该模型使研究者能够根据实际情况, 在特定置信水平和允许误差下, 确定有效抽样的最佳数量, 为高粱田中草地贪夜蛾幼虫的监测与管理提供精确的数据支持。

利用 Iwao 提出的复合序贯抽样技术模型

$T_{Iwao(n)} = nm_0 \pm t \sqrt{n[(\alpha + 1)m_0 + (\beta - 1)m_0^2]}$ 计算抽样的上下限。公式中 $T_{1(n)}$ 代表累积害虫量的上界, 通过加号计算得出; $T_{2(n)}$ 表示累积害虫量的下界, 通过减号计算得出; n 为实际进行的田间抽样次数; m_0 为设定的防治阈值; t 为在给定的置信度下的 t 分布数值; α 和 β 分别是 Iwao 回归模型中 M^* 与 x 关系式的截距与斜率。在抽样过程中, 如果实际害虫数量超过了 $T_{1(n)}$, 表示种群密度已超过设定的防治阈值, 需要采取控制措施; 如果害虫数量低于 $T_{2(n)}$, 则表示种群密度未达到防治阈值, 无需进行防治; 若害虫数量介于两者之间, 需继续抽样以获取更准确的数据。该方法为农业防治措施的决策提供了科学且精确的依据。

1.4 数据处理

数据处理和图表制作采用 Microsoft Excel 2020 和 Origin 2022 软件完成。统计分析使用 SPSS 21 软件进行, 采用 Duncan 氏多重比较法对 5 个地区间草地贪夜蛾数量的差异显著性进行检验 ($P < 0.05$), 并利用 Pearson 法对高粱植株受害率与幼虫数量之间进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 幼虫对高粱的田间为害症状

对 6-9 叶生长期高粱的田间调查发现, 草地贪夜蛾幼虫主要取食为害叶片, 导致叶片出现不规则孔洞或缺损, 取食点周围常呈红褐色损伤边缘。1-3 龄幼虫白天多藏匿于心叶中啃食叶肉(图 1: A); 4 龄幼虫常在叶片的中部和基



图 1 草地贪夜蛾不同龄期幼虫对高粱的田间为害症状

Fig. 1 Damage symptoms of sorghum caused by *Spodoptera frugiperda* larvae at different instars

A. 1-3 龄; B. 4 龄; C. 5-6 龄。A. 1st-3rd instar; B. 4th instar; C. 5th-6th instar.

部区域取食,叶片边缘被啃食成锯齿状,幼虫取食过程中会排泄大量黑褐色粪便,堆积在叶片表面或叶片之间(图 1: B); 5-6 龄幼虫不仅啃食叶片的软组织,还能够咬穿叶片,形成贯穿性破洞,导致叶片大量缺刻,并排出大量虫粪堆积在叶片和植株之间(图 1: C)。

2.2 幼虫的密度与为害情况

对贵州省安顺、贵阳、黔西、金沙和仁怀 5 个地区的草地贪夜蛾幼虫数量调查结果显示,安顺虫害最为严重,平均每块地幼虫数量为 (32.9 ± 2.6) 头;其次是贵阳,平均为 (24.9 ± 2.4) 头;黔西的幼虫数量居中,平均为 (17.7 ± 2.0) 头;金沙和仁怀的虫害较轻,幼虫数量分别为 (10.7 ± 2.3) 和 (13.2 ± 3.6) 头。统计分析表明,位于贵州南部的安顺和贵阳地区的虫害显著高于偏北部的金沙和仁怀地区 ($F = 116.3$, $P < 0.05$) (图 2)。5 个地区高粱田均以草地贪夜蛾低龄幼虫为主,老熟幼虫比例较低(图 3)。贵阳、安顺、黔西和金沙地区 1-3 龄幼虫占比均超过 90.0%,其中安顺最高,为 94.2%,仁怀 1-3 龄幼虫占比 85.6%;4-6 龄幼虫在各地区的比例均未超过 15.0%,其中 6 龄幼虫最少,安顺、贵

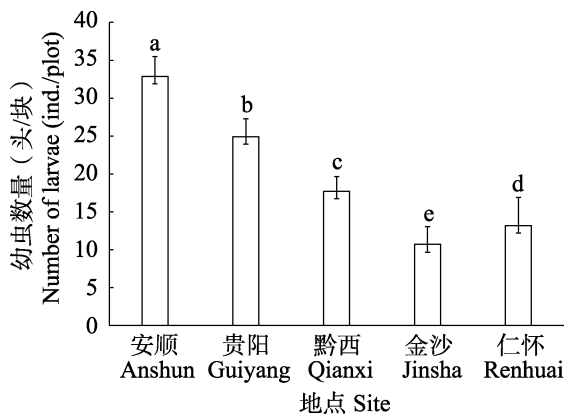


图 2 5 个地区高粱田中草地贪夜蛾的幼虫数量
Fig. 2 The number of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields across five regions.

柱上标有不同小写字母表示不同地区之间经单因素方差分析 Duncan 氏检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Lowercase letters above bars indicate significant difference between regions based on one-way ANOVA followed by Duncan's test at the $P < 0.05$ level.

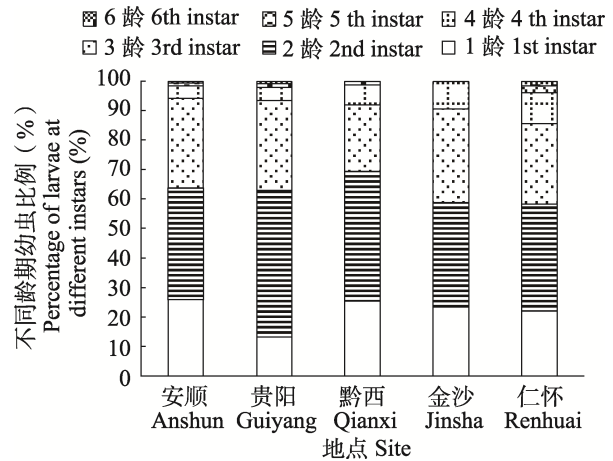


图 3 5 个地区高粱田中草地贪夜蛾幼虫不同龄期比例
Fig. 3 The percentages of different instar of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields across five regions

阳和仁怀仅发现 2 头 6 龄幼虫,而黔西和金沙未见 6 龄幼虫。

为探究高粱田中草地贪夜蛾幼虫种群密度与植株受害率之间的关系,对 5 个地区的单株幼虫密度和受害株率进行了简单线性回归和 Pearson 相关性分析。结果显示,高粱植株受害率与幼虫数量之间存在极显著的正相关关系 ($r = 0.9729$, $P < 0.01$), 回归方程为 $y = 54.6460x + 5.2328$ ($R^2 = 0.9465$), 这表明平均每增加 1 头幼虫,高粱植株的受害率将增加 54.6460% (图 4)。

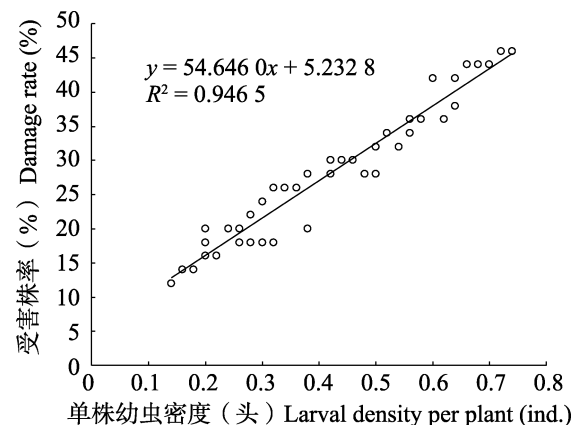


图 4 高粱田草地贪夜蛾幼虫种群密度与植株受害率的关系

Fig. 4 The relationship between *Spodoptera frugiperda* larval population density and plant damage rate in sorghum fields

2.3 幼虫的空间分布型

在 5 个调查地区的田块中, 草地贪夜蛾幼虫的平均密度存在差异 (表 1)。其中, 安顺的幼虫密度为每株 0.58-0.74 头、贵阳为每株 0.42-0.56 头、黔西为每株 0.28-0.44 头、金沙为每株 0.14-0.28 头和仁怀为每株 0.16-0.38 头。所有调查田块的样本聚块指数 (M^*/x) 均大于 1, 表明草地贪夜蛾幼虫在各地高粱田中呈聚集分布。除仁怀外, 其他地区样地的扩散指数 (C) 也大于 1。平均拥挤度指标 (M^*) 分析结果显示, 除贵阳、安顺、黔西和金沙的部分样地外, 大多数样地的平均拥挤度大于 1。此外, 各调查地的聚集指数 (I)、负二项分布参数值 (K) 和久野指数 (C_A) 均大于 0。综上所述, 草地贪

夜蛾幼虫在贵州省高粱田中主要呈聚集分布。

通过对安顺、贵阳、黔西、金沙和仁怀地区高粱田中草地贪夜蛾幼虫数量的调查, 应用 Taylor 幂法分析得出了幼虫平均数量 (x) 与方差 (S^2) 之间的关系。回归方程分别为: 安顺 $\lg S^2 = 1.104\ 5 \lg x + 0.170\ 5$ (图 5: A)、贵阳 $\lg S^2 = 1.294\ 0 \lg x + 0.319\ 0$ (图 5: B)、黔西 $\lg S^2 = 1.108\ 6 \lg x + 0.261\ 7$ (图 5: C)、金沙 $\lg S^2 = 1.101\ 6 \lg x + 0.332\ 3$ (图 5: D) 和仁怀 $\lg S^2 = 1.091\ 7 \lg x + 0.301\ 2$ (图 5: E)。所有地区的回归系数 b (分别为 1.294 0、1.104 5、1.108 6、1.101 6 和 1.091 7) 均大于 1, 且 $\lg a$ 值均大于 0。结果表明, 草地贪夜蛾幼虫在贵州省 5 个地区的高粱田中均呈聚集分布。

表 1 高粱田草地贪夜蛾幼虫聚集度指标
Table 1 Aggregation indices of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields

地点 Site	样地 Sampling field	平均密度 x (头/株) Average density (ind./plant)	方差 S^2 Variance	扩散指数 C Diffusion index	平均拥挤 度 M^* Mean crowded degree	丛生指数 I Clumping index	负二项分布 参数值 K Negative binomial distribution parameter value	久野指数 C_A Kuno index	聚块指数 M^*/x Agglomerati on index
安顺 Anshun	1	0.62	0.89	1.44	1.06	0.44	1.42	0.70	1.70
	2	0.60	0.74	1.23	0.83	0.23	2.67	0.38	1.38
	3	0.58	0.95	1.64	1.22	0.64	0.90	1.11	2.11
	4	0.74	1.05	1.42	1.16	0.42	1.75	0.57	1.57
	5	0.64	0.85	1.33	0.97	0.33	1.95	0.51	1.51
	6	0.66	0.92	1.40	1.06	0.40	1.66	0.60	1.60
	7	0.68	0.98	1.43	1.11	0.43	1.57	0.64	1.64
	8	0.72	1.02	1.42	1.14	0.42	1.72	0.58	1.58
	9	0.70	1.11	1.59	1.29	0.59	1.19	0.84	1.84
	10	0.64	0.85	1.32	0.96	0.32	1.98	0.51	1.51
贵阳 Guiyang	1	0.54	0.91	1.68	1.22	0.68	0.79	1.26	2.26
	2	0.50	1.01	2.02	1.52	1.02	0.49	2.04	3.04
	3	0.48	0.77	1.61	1.09	0.61	0.78	1.28	2.28
	4	0.46	0.68	1.48	0.94	0.48	0.95	1.05	2.05
	5	0.56	0.99	1.76	1.32	0.76	0.74	1.36	2.36
	6	0.44	0.62	1.41	0.85	0.41	1.08	0.92	1.92
	7	0.52	1.06	2.04	1.56	1.04	0.50	2.00	3.00
	8	0.42	0.78	1.85	1.27	0.85	0.50	2.01	3.01
	9	0.56	0.89	1.59	1.15	0.59	0.95	1.05	2.05
	10	0.50	0.82	1.64	1.14	0.64	0.78	1.28	2.28

续表 1 (Table 1 continued)

地点 Site	样地 Sampling field	平均密度 $\bar{x}$ (头/株) Average density (ind./plant)	方差 S^2 Variance	扩散指数 C Diffusion index	平均拥挤 度 M^* Mean crowded degree	丛生指数 I Clumping index	负二项分布 参数值 K Negative binomial distribution parameter value	久野指数 C_A Kuno index	聚块指数 $M^*/\bar{x}$ Agglomerati on index
黔西 Qianxi	1	0.34	0.63	1.85	1.19	0.85	0.40	2.51	3.51
	2	0.32	0.54	1.70	1.02	0.70	0.46	2.19	3.19
	3	0.36	0.63	1.75	1.11	0.75	0.48	2.08	3.08
	4	0.30	0.50	1.65	0.95	0.65	0.46	2.18	3.18
	5	0.38	0.59	1.56	0.94	0.56	0.67	1.48	2.48
	6	0.42	0.68	1.63	1.05	0.63	0.67	1.49	2.49
	7	0.36	0.53	1.47	0.83	0.47	0.77	1.30	2.30
	8	0.44	0.78	1.78	1.22	0.78	0.57	1.76	2.76
	9	0.34	0.58	1.71	1.05	0.71	0.48	2.08	3.08
	10	0.28	0.44	1.56	0.84	0.56	0.50	1.99	2.99
金沙 Jinsha	1	0.20	0.45	2.23	1.43	1.23	0.16	6.13	7.13
	2	0.26	0.40	1.54	0.80	0.54	0.48	2.07	3.07
	3	0.18	0.33	1.84	1.02	0.84	0.21	4.69	5.69
	4	0.16	0.28	1.74	0.90	0.74	0.22	4.61	5.61
	5	0.20	0.38	1.91	1.11	0.91	0.22	4.53	5.53
	6	0.28	0.53	1.90	1.18	0.90	0.31	3.21	4.21
	7	0.14	0.26	1.89	1.03	0.89	0.16	6.33	7.33
	8	0.24	0.39	1.62	0.86	0.62	0.39	2.57	3.57
	9	0.22	0.44	1.99	1.21	0.99	0.22	4.50	5.50
	10	0.26	0.56	2.17	1.43	1.17	0.22	4.50	5.50
仁怀 Renhuai	1	0.18	0.33	1.02	1.84	0.84	0.21	4.69	5.69
	2	0.22	0.34	0.76	1.54	0.54	0.41	2.44	3.44
	3	0.26	0.46	1.03	1.77	0.77	0.34	2.96	3.96
	4	0.34	0.68	1.33	1.99	0.99	0.34	2.92	3.92
	5	0.20	0.37	1.07	1.87	0.87	0.23	4.33	5.33
	6	0.30	0.52	1.04	1.74	0.74	0.41	2.47	3.47
	7	0.16	0.28	0.90	1.74	0.74	0.22	4.61	5.61
	8	0.28	0.41	0.74	1.46	0.46	0.60	1.66	2.66
	9	0.32	0.56	1.07	1.75	0.75	0.43	2.34	3.34
	10	0.38	0.77	1.41	2.03	1.03	0.37	2.71	3.71

采用 Iwao 聚集格局回归分析法, 明确贵阳、安顺、黔西、金沙和仁怀 5 个地区高粱田中草地贪夜蛾幼虫的分布特征。结果显示, 各地幼虫的平均拥挤度 (M^*) 与平均密度 ($\bar{x}$) 之间存在特

定关系, 回归方程分别为: 安顺 $M^* = 1.157 6x + 0.318 3$ (图 6: A)、贵阳 $M^* = 1.905 5x + 0.257 1$ (图 6: B)、黔西 $M^* = 1.372 5x + 0.534 1$ (图 6: C)、金沙 $M^* = 0.780 7x + 0.929 9$ (图 6: D)、

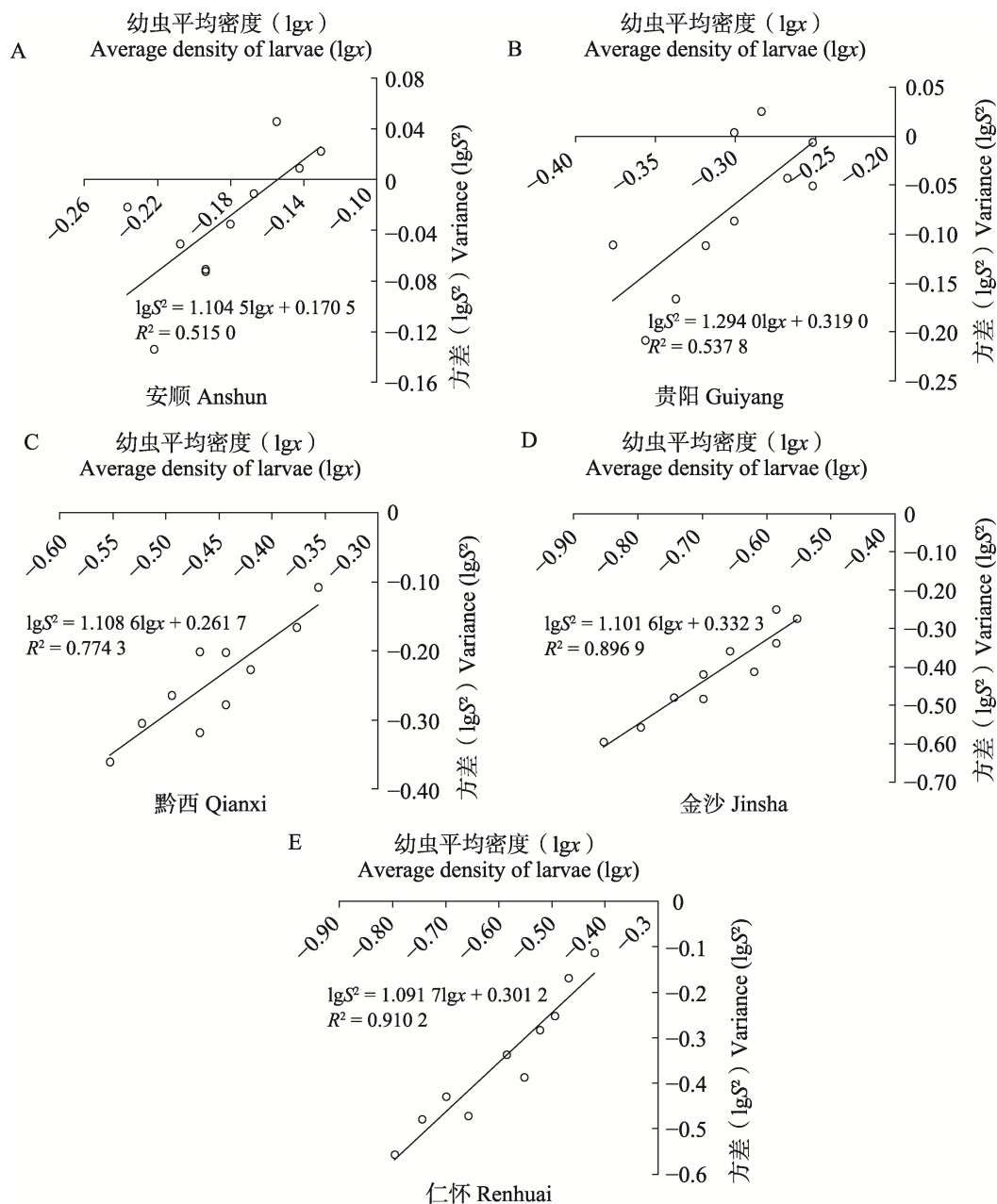


图5 5个地区高粱田中草地贪夜蛾幼虫 Taylor 幂法空间分布型
Fig. 5 Spatial distribution pattern of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields across five regions based on Taylor's power law

A. 安顺 Anshun; B. 贵阳 Guiyang; C. 黔西 Qianxi; D. 金沙 Jinsha; E. 仁怀 Renhuai.

及仁怀 $M^* = 0.8503x + 1.5485$ (图6: E)。在安顺、贵阳和黔西地区, 回归方程的 α 系数大于0且 β 系数大于1, 表明草地贪夜蛾幼虫在这3个地区高粱田中呈现出以个体群为基本成分的聚集分布特征, 且个体之间存在相互吸引; 在金沙和仁怀地区, 回归方程的 α 系数大于0, 但 β 系数小于1, 表明幼虫在这2个地区的分布具有

聚集性, 但这种聚集性在低密度时更为显著, 且随着密度的增加有所减弱。

2.4 抽样模型与技术

对5个地区的50个高粱田样本进行 Iwao 线性回归分析, 回归方程为 $M^* = 0.3351x + 0.9458$, 将回归模型系数 ($\alpha = 0.9458$, $\beta =$

0.335 1) 代入在置信度为 0.95 ($t = 1.96$) 条件下的最佳理论抽样数模型:

$N = (3.84/D^2) (0.945 8 + 1/x + 0.335 1 - 1) = (3.84/D^2) (1.945 8/x - 0.664 9)$, 基于该公式, 计算不同误差条件下 ($D = 0.1$ 、 0.2 和 0.3) 草地贪夜蛾幼虫在相应密度 x 时的理论最佳抽样数 N (表 2)。结果表明, 在不同的虫害密度条件下, 田间调查最佳抽样数不同。低密度时 (虫害密度

不超过每株 0.5 头), 为确保调查误差不超过 0.1, 每 667 m² 田块至少需调查 1 239 株高粱。若允许误差范围扩大至 0.3, 则所需调查的高粱株数减少至每 667 m² 138 株; 高密度时 (虫害密度超过每株 0.5 头), 每 667 m² 田块需调查 492-990 株高粱以保证调查误差不超过 0.1, 若误差范围不超过 0.3, 则每 667 m² 需调查 55-110 株高粱。

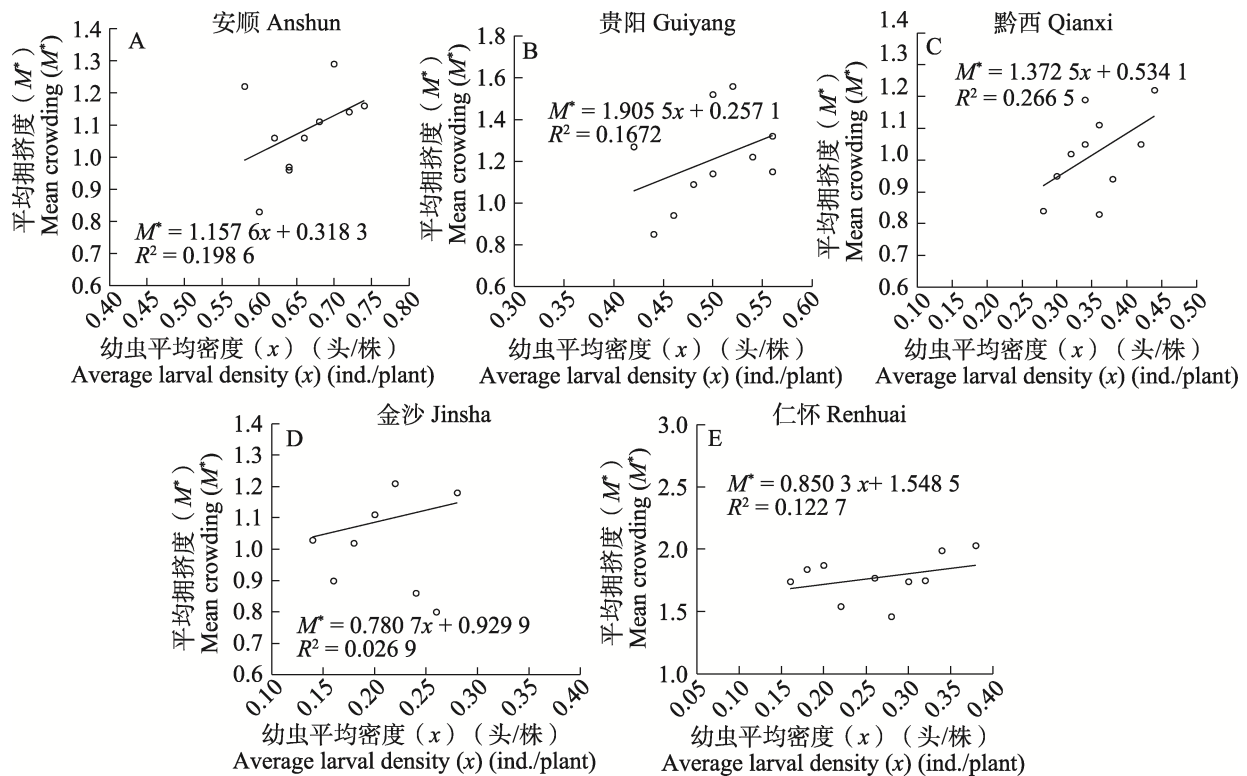


图 6 5 个地区草地贪夜蛾幼虫空间聚集型的 Iwao 回归分析

Fig. 6 Iwao regression analysis of spatial aggregation of *Spodoptera frugiperda* larvae in five regions

A. 安顺 Anshun; B. 贵阳 Guiyang; C. 黔西 Qianxi; D. 金沙 Jinsha; E. 仁怀 Renhuai.

表 2 高粱田中不同密度下草地贪夜蛾幼虫的理论抽样数

Table 2 Theoretical sampling numbers of *Spodoptera frugiperda* larvae at different densities in sorghum fields

误差 D Error	不同虫口密度 x 下的理论抽样数 (株) Theoretical sampling number at different larval densities (plant)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	7 217	3 481	2 235	1 613	1 239	990	812	679	575	492
0.2	1 804	870	559	403	310	247	203	170	144	123
0.3	802	387	248	179	138	110	90	75	64	55

根据国外研究结果, 当草地贪夜蛾幼虫在高粱和玉米等作物上的为害率达到 20% 时应立即采取防控措 (Feed the Future, 2018)。通过高

粱受损程度与幼虫数量的计算模型 $y = 54.646 0 x + 5.232 8$, 确定单株高粱上草地贪夜蛾幼虫的防治密度标准为 0.27 头。将 Iwao's M^* 和 x 回归模

型的参数 α 和 β 代入序贯抽样模型 $T_{Iwao(n)} = nm_0 \pm t\sqrt{n[(\alpha+1)m_0 + (\beta-1)m_0^2]}$, 得到在该防治密度下草地贪夜蛾幼虫的序贯抽样区间计算公式为 $T_{Iwao(n)} = 0.27n \pm 1.96\sqrt{0.477n}$ 。该公式根据不同样本数量 ($n = 50、60、70、\cdots$ 和 200) 计算出明确的抽样区间, 具体结果见表 3。

表 3 高粱田草地贪夜蛾幼虫种群序贯抽样表
Table 3 Sequential sampling table for *Spodoptera frugiperda* larvae populations in sorghum fields

抽样植株数 (n) Sample size	抽样植株虫口数量 (头) Larval number intervals (ind.)	
	上限 $T_{1(n)}$ Upper limit	下限 $T_{2(n)}$ Lower limit
50	24	4
60	26	6
70	30	8
80	34	10
90	37	11
100	41	13
110	44	16
120	47	18
130	51	20
140	54	22
150	57	24
160	60	26
170	64	28
180	67	30
190	70	33
200	73	35

在实际抽样过程中, 如果检测到的虫量超过表 3 所示的上限, 则种群密度超过防治阈值, 需采取相应的防治措施。例如, 当抽样数为 50 株时, 若虫口数量大于 24 头, 应立即采取化学(杀虫剂)或生物(天敌)防治措施; 相反, 如果虫量低于下限, 则表示种群密度低于防治指标, 无需采取防治措施; 若幼虫密度位于两者之间, 则需继续抽样以做出更准确的判断。

3 讨论

昆虫空间分布研究是种群生态学的核心议

题之一, 对优化抽样方法、准确评估种群结构、制定高效的害虫监测和管理策略具有重要意义 (Fernandes *et al.*, 2003)。草地贪夜蛾是全球主要农作物害虫之一, 入侵中国后, 研究其在不同作物上的空间分布特征不仅能深化种群生态学理论, 还为科学有效的害虫防控提供了重要依据。

高粱和玉米同属 C_4 作物, 生育期在自然条件下基本重叠。“玉米型”草地贪夜蛾幼虫主要嗜食玉米和高粱, 但更偏好玉米。因此, 近年来的研究主要集中在幼虫在玉米田的空间分布分析上 (吕亮等, 2022)。研究表明, 2019 年来, 草地贪夜蛾在我国的分布呈现明显的地理特征, 分布范围自南向北逐步扩大, 但虫口密度逐渐减少。草地贪夜蛾在西部地区的发生时间普遍早于东部地区, 且虫口密度明显偏高 (刘诗颖等, 2021; 张雪艳, 2022; 王崇贤, 2023)。本研究在贵州省安顺、贵阳、黔西、金沙和仁怀 5 个县市对高粱田中草地贪夜蛾幼虫的发生量及空间分布进行了调查与分析。结果显示, 从南 (安顺) 向北 (仁怀), 草地贪夜蛾幼虫数量及密度基本上呈递减趋势, 且差异显著, 与刘诗颖等 (2021) 和王崇贤 (2023) 研究结果一致。

对贵州省 5 个地区 6-9 叶生长期高粱的田间调查发现, 草地贪夜蛾幼虫主要取食叶片, 导致叶片出现不同程度的损害。这些损害不仅影响高粱植株的光合作用, 还会直接导致植株生长停滞, 严重时甚至整株枯死。研究表明, 在高粱 6-9 叶生长期内, 草地贪夜蛾幼虫以 1-3 龄低龄幼虫为主, 高龄幼虫 (4-6 龄) 数量较少。这一现象与孙小旭等 (2019) 在玉米同一生育期上的研究结果相似, 其主要原因可能是高龄幼虫具有较强的迁移能力和自残行为, 导致其在植株上的数量减少 (唐雪等, 2022)。通过 6 个聚集度指标、Taylor 幂法和 Iwao 聚集格局回归分析法, 本研究明确了草地贪夜蛾幼虫在高粱田的空间分布模式。结果表明, 幼虫在高粱田主要呈聚集分布, 与国内外学者如 Serra 和 Trumper (2006)、孙小旭等 (2019) 和刘诗颖等 (2021) 对玉米田中草地贪夜蛾的研究结果一致。本研究中, 草地

贪夜蛾幼虫在高粱上呈现聚集分布的原因可能是调查期间高粱多处于拔节前期至喇叭口期,而草地贪夜蛾偏好取食嫩叶且倾向于块状产卵,导致低龄幼虫高密度聚集(刘诗颖等,2021)。研究表明,与草地贪夜蛾具有相似生物学行为的害虫幼虫,如粘虫 *Mythimna separata* 和劳氏黏虫 *Leucania loreyi*,在高粱和玉米田中也呈聚集分布,符合负二项式分布(龙玲等,2003)。此外,其他几种鳞翅目害虫幼虫,包括斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、桃蛀螟 *Conogethes punctiferalis* 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera*,在玉米的不同生长期也表现出聚集分布特征(陈浩等,2016)。这些研究结果进一步证实了在农田害虫管理中考虑害虫空间分布模式的重要性。

Iwao 聚集格局回归分析表明,在安顺、贵阳和黔西地区,草地贪夜蛾在低密度时存在一定程度的聚集,且随着个体密度的增加,聚集趋势更为明显;而在金沙和仁怀地区,草地贪夜蛾在低密度时聚集性更显著,但随着密度增加,聚集性有所减弱。国内外学者也指出,草地贪夜蛾幼虫的空间分布格局受自身群体及生态因子的影响,如寄主植物的生长发育阶段等(Subramanian *et al.*, 2020; Cui *et al.*, 2022)。de Melo 等(2006)发现,草地贪夜蛾低龄幼虫(1-3龄)在玉米田间通常呈聚集分布,而随着玉米进入中后期生长阶段,高龄幼虫(4-6龄)的分布趋向随机,尤其在危害玉米穗部时更为明显。Farias 等(2008)也指出,在玉米田中低龄幼虫主要呈聚集分布,聚集度随密度的增加而升高,但随着幼虫龄期增加,分布的随机性增强。此外,种群内部密度竞争也影响草地贪夜蛾幼虫的分布格局。因此,在后续田间调查中,需要综合考虑幼虫龄期和寄主植物生育期等因素。

在对贵州省 5 个地区高粱田中草地贪夜蛾的空间分布分析后,建立了理论抽样数模型和序贯抽样模型,明确了高粱 6-9 叶生育期草地贪夜蛾的抽样方法。在低密度田块(虫害密度不超过每株 0.5 头),每 667 m² 需调查 1 239-7 217 株高粱,以确保误差不超过 0.1,调查 138-802 株则误差不超过 0.3;在高密度田块(虫害密度超

过每株 0.5 头)中,每 667 m² 需调查 492-990 株高粱,以确保误差不超过 0.1,调查 55-110 株则误差不超过 0.3。序贯抽样技术在生产防治中具有广泛应用,尤其适用于基层生产经营主体(孙小旭等,2019)。根据本研究确定的防治指标(每百株高粱 27 头草地贪夜蛾幼虫),可根据序贯抽样表进行虫量调查,决定是否需要喷药防治。

鉴于贵州省高粱田中草地贪夜蛾幼虫主要呈现聚集分布的趋势,防控策略应遵循“突出重点,兼顾周边”的原则。在分布密集的区域,集中力量进行防治;在发生较少或未发生的区域,采取相应的预防措施。因草地贪夜蛾成虫具有强迁移性和高为害性,防治工作重点应主要针对低龄幼虫开展。具体措施包括强化田间管理、优化种植结构及构建完善的农业防护体系等。在实施化学防治的同时,应综合采用诱光灯、天敌释放和信息素诱捕等生物防治方法。此外,相关工作人员需加强虫情监测和预警,确保防治措施全面执行,以减轻虫害影响,保障高粱产量。对于草地贪夜蛾在贵州高粱田广泛分布后的田间分布模式是否发生变化,还需开展进一步的研究。

参考文献 (References)

- Abbas A, Ullah F, Hafeez M, Han X, Dara MZN, Gul H, Zhao CR, 2022. Biological control of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Agronomy*, 12(11): 2704.
- Cui Y, Sun H, Shi S, Zhao Y, Li S, 2022. Mapping the spatio-temporal distribution of fall armyworm in China by coupling multi-factors. *Remote Sensing*, 14(17): 4415.
- Chen H, Zhao WL, Men XY, Yu Y, Wang ZY, Li LL, 2016. Spatial distribution of three lepidoptera pests during maize filling period. *Maize Science*, 24(1): 160-165. [陈浩, 赵文路, 门兴元, 于毅, 王振营, 李丽莉, 2016. 玉米灌浆期 3 种鳞翅目害虫的空间分布. *玉米科学*, 24(1): 160-165.]
- Feed the Future, 2018. Fall Armyworm in Africa: A Guide for Integrated Pest Management, First Edition. USA: The U.S Government's Global Hunger & Food Security Initiative. 21-23.
- Dai LY, Cai XY, Chen Z, Wu JD, Yin KD, 2018. Advance research of sorghum kafirin. *Food Industry*, 2018(3): 253-257. [戴凌燕, 蔡欣月, 陈卓, 吴金迪, 殷奎德, 2018. 高粱醇溶蛋白的研究进展. *食品工业*, 2018(3): 253-257.]
- Day R, Abrahams P, Bateman M, Beale T, Clotley V, Cock M, Colmenarez Y, Corniani N, Early R, Godwin J, Gomez J, Moreno PG, Murphy ST, Oppong-Mensah B, Phiri N, Pratt C,

- Silvestri S, Witt A, 2017. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management*, 28(5): 196–201.
- de Melo EP, Fernandes MG, Degrande PE, Cessa RMA, Salomão JL, Nogueira RF, 2006. Spatial distribution of plants infested with *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on corn crop. *Neotropical Entomology*, 35(5): 689–697.
- Ding KT, Du SJ, Yang NW, Liu WX, Guo JY, 2023. Research progress on comprehensive control techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in China. *Journal of Biosafety*, 32(4): 291–302. [丁奎婷, 杜素洁, 杨念婉, 刘万学, 郭建洋, 2023. 草地贪夜蛾综合防控技术研究进展. 生物安全学报, 32(4): 291–302.]
- Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Beijing: Science Press. 318–332. [丁岩钦. 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 318–332.]
- Ding YQ, Xu JX, Wang C, Zhou LB, Zhang GB, Zhao Q, Shao MB, Zhang LY, 2023. QTL mapping of sorghum grain brewing related traits based on Super-GBS technology. *Journal of Nuclear Agriculture*, 37(2): 241–250. [丁延庆, 徐建霞, 汪灿, 周棱波, 张国兵, 赵强, 邵明波, 张立昇, 2023. 基于 Super-GBS 技术的高粱籽粒酿造相关性状 QTL 定位. 核农学报, 37(2): 241–250.]
- Farias PRS, Barbosa JC, Busoli AC, Overall WL, Miranda VS, Ribeiro SM, 2008. Spatial analysis of the distribution of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and losses in maize crop productivity using geostatistics. *Neotropical Entomology*, 37(3): 321–327.
- Fernandes MG, Busoli AC, Barbosa JC, 2003. Distribuição espacial de *Alabama argillacea* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) em algodoeiro. *Neotropical Entomology*, 32(1): 107–115.
- Gao J, Cai LW, Wang YH, Shi QH, Wang HY, Wang W, Sun YR, Chen JP, 2017. Comprehensive evaluation and cluster analysis of new sweet sorghum varieties (lines). *Jiangsu Agricultural Sciences*, 45(20): 93–97. [高进, 蔡立旺, 王永慧, 施庆华, 王海洋, 王为, 孙艳茹, 陈建平, 2017. 甜高粱新品种(系)综合评价与聚类分析. 江苏农业科学, 45(20): 93–97.]
- Guo JF, Zhao JZ, He KL, Zhang F, Wang ZY, 2018. Potential invasion of the crop-devastating insect pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to China. *Plant Protection*, 44(6): 1–10. [郭井非, 赵建周, 何康来, 张峰, 王振营, 2018. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国. 植物保护, 44(6): 1–10.]
- Guizhou Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs, 2023. The occurrence trends of major diseases and pests in late autumn crops of 2023. Guiyang: http://nynct.guizhou.gov.cn/wsfw/ycyj/202307/t20230724_81231712.html. [贵州省农业农村厅, 2023. 2023 年秋粮作物中后期重大病虫害发生趋势. 贵阳: http://nynct.guizhou.gov.cn/wsfw/ycyj/202307/t20230724_81231712.html.]
- Hong L, Jia ZX, Zhong QZ, Cheng SD, Qi XW, Cheng ZX, Wan P, Men XY, Liang YY, 2023. The fall armyworm *Spodoptera frugiperda* is found as pest damaging sorghum bicolor in Jiujiang City, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Plant Protection*, 50(6): 1651–1652. [洪霖, 贾志新, 钟秋瓚, 程森弟, 漆学伟, 程正新, 万鹏, 门兴元, 梁玉勇, 2023. 江西省九江市发现草地贪夜蛾为害高粱. 植物保护学报, 50(6): 1651–1652.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Li GP, Liu B, Zhang DM, Li SK, Huang B, Tao ZL, Huang JR, Wang GS, Tian CH, Zhang YJ, Feng HQ, 2022. Yield loss and control threshold of *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) infesting grain maize in the Huang-Huai-Hai summer maize region. *Chinese Journal of Plant Protection*, 49(5): 1472–1481. [李国平, 刘彬, 张大明, 李松科, 黄博, 陶子龙, 黄建荣, 王根松, 田彩红, 张永军, 封洪强, 2022. 黄淮海夏玉米区草地贪夜蛾为害籽粒玉米的产量损失与防治阈值. 植物保护学报, 49(5): 1472–1481.]
- Li WJ, Zhang TT, Guo JF, Jiang LT, Xu D, Xu M, Wan P, 2023. Population dynamics and dispersal of *Spodoptera frugiperda* larvae in maize fields of Hubei province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(4): 1081–1089. [李文静, 张天涛, 郭井非, 姜理涛, 许冬, 许敏, 万鹏, 2023. 湖北玉米田草地贪夜蛾幼虫种群动态及扩散规律. 应用昆虫学报, 60(4): 1081–1089.]
- Li YP, Yao SY, Feng D, Haack RA, Yang Y, Hou JL, Ye H, 2023. Dispersal behavior characters of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Insects*, 14(6): 488.
- Liu B, Huang B, Zhao J, Huang JR, Zhao WX, Lv GQ, Li GP, Feng HQ, 2020. Occurrence of *Spodoptera frugiperda* in Xinxiang City, Henan Province in autumn 2019. *Plant Protection*, 46(5): 181–185. [刘彬, 黄博, 赵军, 黄建荣, 赵文新, 吕国强, 李国平, 封洪强, 2020. 2019 年秋季河南新乡草地贪夜蛾发生调查. 植物保护, 46(5): 181–185.]
- Liu SY, Sun MK, Li JH, Zhang YY, Li T, Chen JS, Fan YM, 2021. The spatial distribution pattern of *Spodoptera frugiperda* larvae in corn fields of Hainan province. *Guangdong Agricultural Sciences*, 48(2): 108–115. [刘诗颖, 孙明凯, 李金花, 张业扬, 李涛, 陈剑山, 范咏梅, 2021. 海南玉米田入侵草地贪夜蛾幼虫的空间分布型. 广东农业科学, 48(2): 108–115.]
- Long L, Liu HM, Mo CB, 2003. Spatial distribution pattern and sampling technique of second-generation armyworm larvae. *Journal of Mountain Agricultural Biology*, 22 (5): 391–392, 413. [龙玲, 刘红梅, 莫纯碧, 2003. 二代粘虫幼虫空间分布型及抽样技术研究. 山地农业生物学报, 22(5): 391–392, 413.]
- Lü L, Xia HX, Guo L, Chang QQ, Wan P, Zhang S, 2022. Effect of feeding *Spodoptera frugiperda* corn or sorghum on oviposition

- site selection and fitness. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 542–550. [吕亮, 夏红霞, 郭蕾, 常向前, 万鹏, 张舒, 2022. 草地贪夜蛾对玉米和高粱的产卵选择及寄主适合度. 应用昆虫学报, 59(3): 542–550.]
- Montezano DG, Specht A, Sosa-Gómez DR, Roque-Specht VF, Sousa-Silva JC, Paula-Moraes SV, Peterson JA, Hunt TE, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.
- Serra GV, Trumper EV, 2006. Sequential sampling protocols for *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), on *Zea mays* fields: Influence of sampling unit size. *Bulletin of Entomological Research*, 96(5): 471–477.
- Sun XX, Zhao SY, Jin MH, Zhao HY, Li GP, Zhang HW, Jiang YY, Yang XM, Wu KM, 2019. Larval spatial distribution pattern and sampling technique of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in maize fields. *Plant Protection*, 45(2): 13–18. [孙小旭, 赵胜园, 靳明辉, 赵慧媛, 李国平, 张浩文, 姜玉英, 杨现明, 吴孔明, 2019. 玉米田草地贪夜蛾幼虫的空间分布型与抽样技术. 植物保护, 45(2): 13–18.]
- Subramanian S, Niassy S, Adan M, Tonnang HEZ, Kassa C, Greve K, Goergen G, 2020. Bioecology of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, its management and potential patterns of seasonal spread in Africa. *PLoS ONE*, 15(10): e0239114.
- Tang X, Lv BQ, Lu H, Tang JH, Liu YL, Yan SQ, 2022. Analysis of the self-destruction and feeding behavior of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Journal of Environmental Entomology*, 44(3): 523–529. [唐雪, 吕宝乾, 卢辉, 唐继洪, 刘彦龙, 闫三强, 2022. 草地贪夜蛾幼虫自残捕食量分析. 环境昆虫学报, 44(3): 523–529.]
- Tao X, Lu Z, He W, Chen YP, Gui FR, Sun ZX, 2024. Effects of elevated CO₂ concentration on interspecific competition of larvae of *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera litura* on wheat and artificial diets. *Journal of Environmental Entomology*, 46(2): 418–430. [陶旋, 鲁智慧, 何文, 陈亚平, 桂富荣, 孙仲享, 2024. 高 CO₂ 浓度对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾幼虫在小麦和人工饲料上种间竞争的影响. 环境昆虫学报, 46(2): 418–430.]
- Taylor LR, 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature*, 189(4766): 732–735.
- Wang CX, 2023. The spatiotemporal distribution and influencing factors of the *Spodoptera frugiperda* in Hubei Province. Master dissertation. Wuhan: Hubei University. [王崇贤, 2023. 湖北省草地贪夜蛾的时空分布及影响因子分析. 硕士学位论文. 武汉: 湖北大学.]
- Wang XN, Wang SW, Lei CM, Liu YP, Chang H, Xiao Y, Li ZY, 2023. The effect of flight parameters and nozzle type on the efficacy of spraying chlorantraniliprole from an unmanned aerial vehicle to control *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(4): 1244–1253. [王潇楠, 王思威, 雷春媚, 刘艳萍, 常虹, 肖勇, 李振宇, 2023. 植保无人机喷施氯虫苯甲酰胺在玉米冠层中沉积分布及对草地贪夜蛾的防治效果. 应用昆虫学报, 60(4): 1244–1253.]
- Westbrook J, Fleischer S, Jairam S, Meagher R, Nagoshi R, 2019. Multigenerational migration of fall armyworm, a pest insect. *Ecosphere*, 10(11): e02919.
- Xu JX, Ding YQ, Feng Z, Cao N, Cheng B, Gao X, Zou GH, Zhang LY, 2023. QTL mapping of plant height and internode number of sorghum based on Super-GBS. *Bulletin of Biotechnology*, 39(7): 185–194. [徐建霞, 丁延庆, 冯周, 曹宁, 程斌, 高旭, 邹桂花, 张立昇, 2023. 基于 Super-GBS 的高粱株高和节间数 QTL 定位. 生物技术通报, 39(7): 185–194.]
- Xu LN, Tong Q, Xu TT, Bi SJ, Hu BJ, Yun H, Hu F, Wang ZY, 2023. Effects of corn-soybean intercropping on growth, development and reproduction of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Plant Protection*, 50(3): 642–650. [徐丽娜, 佟强, 徐婷婷, 毕思佳, 胡本进, 云慧, 胡飞, 王振营, 2023. 玉米-大豆间作对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响. 植物保护学报, 50(3): 642–650.]
- Xu RM, 1987. Insect Population Ecology. Beijing: Beijing Normal University Press. 5–39. [徐汝梅, 1987. 昆虫种群生态学. 北京: 北京师范大学出版社. 5–39.]
- Xu YL, Li ZY, Chen J, Li ZH, Qin YJ, 2020. Assessment of potential economic loss of wheat industry caused by the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 740–746. [徐艳玲, 李昭原, 陈杰, 李志红, 秦誉嘉, 2020. 草地贪夜蛾对我国小麦产业造成的潜在经济损失评估. 植物保护学报, 47(4): 740–746.]
- Yang B, Qu ZY, Liu X, Sun HH, Sun YL, 2019. Study on adaptability of different varieties of liquor-making sorghum planted in saline soil. *Crop Research*, 33(6): 538–542. [杨博, 屈忠义, 刘霞, 孙慧慧, 孙宇乐, 2019. 不同品种酿酒高粱在盐碱地种植的适应性研究. 作物研究, 33(6): 538–542.]
- Yang J, 2023. Monitoring of drug resistance of *Spodoptera exigua* and study on sublethal effect of chlorantraniliprole. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [杨杰, 2023. 草地贪夜蛾抗药性监测与氯虫苯甲酰胺亚致死效应研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Yang XM, Zhao SY, Jiang Y, Wu KM, 2020. Occurrence and sampling techniques of *Spodoptera frugiperda* in wheat field. *Plant Protection*, 46(2): 18–23. [杨现明, 赵胜园, 姜玉英, 吴孔明, 2020. 大麦田草地贪夜蛾的发生为害及抽样技术. 植物保护, 46(2): 18–23.]
- Zhang XY, 2022. Study on habitat distribution, generation division and migration trajectory of *Spodoptera frugiperda* in Sichuan Province. Master dissertation. Chengdu: Sichuan Agricultural University. [张雪艳, 2022. 四川省草地贪夜蛾适生区分布、世代区划及迁飞轨迹研究. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学.]
- Zou JQ, Wang YQ, Ke FL, 2020. Development status and prospect of sorghum industry in China. *Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition)*, 40(3): 1–8. [邹剑秋, 王艳秋, 柯福来, 2020. 高粱产业发展现状及前景展望. 山西农业大学学报(自然科学版), 40(3): 1–8.]