环境昆虫学报 2025，47（5）：1396-1415
Journal of Environmental Entomology
http://hjkcxb.alljournals.net
doi:10.3969/j.issn.1674-0858.2025.05.6

李洪冉，郭凤彩，吴超，萧玉涛. 草地贪夜蛾入侵中国七年：研究进展与未来展望[J]. 环境昆虫学报，2025，47（5）：1396-1415.
LI Hong-Ran, GUO Feng-Cai, WU Chao, XIAO Yu-Tao. Research progress and prospects on the invasion of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China over the past seven years [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 47 (5): 1396-1415.

草地贪夜蛾入侵中国七年：研究进展与未来展望

李洪冉*，郭凤彩*，吴　超，萧玉涛**
（岭南现代农业科学与技术广东省实验室深圳分中心，农业农村部基因编辑创新利用重点实验室（海南），
中国农业科学院（深圳）农业基因组研究所，广东深圳 518120）

摘要：草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*，FAW是全球重大农业入侵性害虫，被列入我国“一类农作物病虫害名录”。自2018年12月入侵我国以来，草地贪夜蛾迅速扩散至各大农业主产区，给我国玉米等重要粮食作物的安全生产造成严重威胁。本文系统梳理了我国草地贪夜蛾研究的现状，全面总结了过去七年中在生物型动态、生态适应性、入侵机制、抗性发展及综合防控技术等方面的关键研究成果，对目前研究存在的不足以及后续研究方向进行了展望，并提出了基于最新科研进展的科学治理和精准防控建议，旨在为我国草地贪夜蛾的长期管理和可持续防控提供理论依据与实践指导，同时为全球范围内入侵性害虫的研究与治理提供参考经验。

关键词：草地贪夜蛾；生物型；生态适应性；基因组学；抗性；综合防控
中图分类号：Q968.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-0858（2025）05-1396-20

Research progress and prospects on the invasion of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China over the past seven years

LI Hong-Ran*, GUO Feng-Cai*, WU Chao, XIAO Yu-Tao** (Shenzhen Branch, Guangdong Laboratory of Lingnan Modern Agriculture, Key Laboratory of Gene Editing Technologies (Hainan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agricultural Genomics Institute at Shenzhen, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen, Shenzhen 518120, Guangdong Province, China)

Abstract: The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, is a globally important invasive agricultural pest and has been listed as a "Category I Crop Diseases and Pest" in China. Since its first detection in China in December 2018, the pest has rapidly spread across major agricultural production regions, posing a severe threat to the secure production of key crops such as maize. This review provides a systematic overview of the current research status of *S. frugiperda* in China, and comprehensively summarizes key advances made over the past seven years, including biotype dynamics, ecological adaptation, invasion mechanisms, resistance evolution, and integrated pest management technologies. In addition, we discuss the existing limitations of current research and outline future research directions, while proposing evidence-based strategies for scientific governance and precision control based on recent advances. This work aims to provide both theoretical foundations and practical guidance for the long-term management and sustainable control of *S. frugiperda* in China, and also to contribute valuable insights to the study and management of invasive pests worldwide.

基金项目：农业生物育种国家科技重大专项（2022ZD04021）；中国农业科学院科技创新工程科学中心重点任务（CAAS-CSCB-202303）；国家自然科学基金（32302352）；深圳市科技计划项目（RCBS20231211090649086）
作者简介：李洪冉，男，1991年出生，副研究员，研究方向生物入侵与害虫防治，E-mail：lihongran@caas.cn；郭凤彩，女，1996年生，科研助理，研究方向草地贪夜蛾抗性机制研究，E-mail：970788283@qq.com
**通讯作者 Author for correspondence：萧玉涛，男，研究员，研究方向农业害虫适应性进化机制研究，E-mail：xiaoyutao@caas.cn
收稿日期Received：2025-07-05；修回日期Revision received：2025-08-21；接受日期Accepted：2025-08-25

Key words: *Spodoptera frugiperda*; biotype; ecological adaptation; genomics; resistance; integrated pest management

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（J.E. Smith，1797）原产于美洲的热带和亚热带地区，具有寄主范围广、繁殖和迁飞能力强、扩散速度快等特点，被联合国粮农组织（FAO）列为全球预警的重大农业灾害性害虫（Augusto *et al.*，2010；Westbrook *et al.*，2016）。2016年1月草地贪夜蛾首次在东半球非洲西部地区被发现，在随后的两年时间内迅速扩散至撒哈拉以南的44个国家和地区及东南亚国家，并于2020年初入侵大洋洲（Goergen *et al.*，2016；Nagoshi *et al.*，2020；Nguyen *et al.*，2021）。2021年2月，在西班牙加那利群岛首次监测到该虫的存在，这是其在欧盟范围内的首次报告。据推测，此次入侵事件可能起因于2020年3月底影响整个群岛的强风暴（Vives and Gaston，2020；Balaško *et al.*，2025）。草地贪夜蛾于2018年12月首次入侵到我国云南省普洱市，次年便扩散到全国26个省（市、区），严重威胁我国玉米等重要农作物的安全生产（姜玉英等，2019a；刘杰等，2019；张磊等，2019a；Sun *et al.*，2021）。2020年9月该虫被列入我国《一类农作物病虫害名录》，成为我国一种常态化的重大迁飞性害虫，其突发性、暴发性的特点导致难以实现精准预警和及时防控（吴孔明，2020；Wu *et al.*，2021；Yang *et al.*，2021；Zhou *et al.*，2021）。

草地贪夜蛾具有广泛的寄主范围，可以取食属于76个科的353种寄主植物，对禾本科植物具有明显的偏好性（Augusto *et al.*，2010；Débora *et al.*，2018）。自入侵我国以来，其危害范围持续扩大，除主要危害玉米外，已扩散至甘蔗、甘蓝、马铃薯等多种经济作物，并逐渐向茶树、烟草等新寄主蔓延（徐蓬军等，2019；梁沛等，2020；孙晓玲等，2020）。草地贪夜蛾还具有极强的迁飞与繁殖能力，成虫可借助高空气流进行连续多夜的长距离迁飞，单次飞行距离可达数百公里甚至上千公里，为其远距离扩散和暴发提供了关键条件（Westbrook *et al.*，2016；Ge *et al.*，2021；Chen *et al.*，2022）；草地贪夜蛾繁殖能力强、世代重叠现象显著，在适宜条件下可迅速完成多代繁殖，易形成暴发态势。种间关系研究表明，草地贪夜蛾在与同域分布的近缘物种：东方黏虫 *Mythimna separata*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 等的生态位竞争中表现出明显的竞争优势（施建琴等，2023；马文玲等，2024；苏湘宁等，2024）。此外，草地贪夜蛾对化学农药和苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*（Bt）毒素展现出强烈的抗性进化能力，与近缘物种相比，其体内与解毒代谢相关的基因家族存在显著扩张（Liu *et al.*，2019；Xiao *et al.*，2020；Zhang *et al.*，2020；Gui *et al.*，2022）。这些特性对草地贪夜蛾的防控造成了巨大的挑战。

针对草地贪夜蛾对我国农作物生产造成的严重威胁，以及我国科研工作者在草地贪夜蛾防控方面取得的重要进展和显著成效，本文拟对当前我国草地贪夜蛾研究现状进行系统梳理，重点阐述其生态适应性、入侵机制及综合防控策略等方面的研究成果，并对目前研究存在的不足以及后续研究方向进行了展望，旨在为草地贪夜蛾的可持续防控提供理论依据，并为我国应对外来入侵害虫积累可借鉴的防控经验。

1 入侵我国的草地贪夜蛾生物型及动态分布

1.1 入侵种群的生物型特征

在原产地，草地贪夜蛾可分为水稻型（Rice strain）和玉米型（Corn strain）2个亚群，二者在取食特性、生理特征、地理分布、性外激素及基因组组成等方面存在显著差异（Dumas *et al.*，2015；Comte *et al.*，2025；Tessnow *et al.*，2025）。水稻型食性较广，偏好水稻、苜蓿、谷子以及各种牧草等；玉米型主要危害玉米、高粱、甘蔗和棉花。两种生物型形态相似，但可通过线粒体细胞色素氧化酶亚基Ⅰ（Cytochrome oxidase Ⅰ，*COI*）基因和位于Z染色体的磷酸甘油醛异构酶（Triose phosphate isomerase，*Tpi*）基因进行分子鉴定（Acharya *et al.*，2021；Nayyar *et al.*，2021）。值得注意的是，在原产地尽管这些分子标记能够区分两个遗传亚群，其基因型与宿主植物偏好并不总是一致（Murúa *et al.*，2015）。基于 *COI* 标记的研究显示，约20%的水稻型基因型个体出现在

玉米植株上，而约5%的玉米型基因型则出现在牧草或草坪植物上。这表明，基于这些标记的生物型并不能完全预测其宿主植物关联性（Nagoshi，2010）。

在入侵地，草地贪夜蛾生物型发生了复杂的变化。分子遗传学研究表明，入侵我国的草地贪夜蛾种群，可能是通过水稻型品系（母本）与玉米型品系（父本）的杂交而形成的（张磊等，2019a；2019b）。在长期演化过程中，玉米型核基因组逐渐占据主导地位，形成以玉米型核基因组为主的杂交群体。该群体核基因组背景较为单一，但保留了水稻型和玉米型线粒体的多态性（Zhang *et al.*，2023）。最新研究还发现入侵我国种群中存在极低比例的赞比亚型（*Tpi*-ZS）（Liang *et al.*，2024）。目前*COI*和*Tpi*标记已广泛用于基因型鉴定及种群动态分析，但两种分子标记各自存在固有局限性：*COI*标记位于线粒体基因组，具有母系遗传特性，仅反映母本基因型；*Tpi*标记位于核基因组的Z染色体上，导致雌性（ZW）仅继承并表达父本的*Tpi*基因型。在此遗传背景下，任何单一标记均难以完整揭示个体的整体遗传背景，更多的生物型鉴定位点将有助于了解其复杂的遗传背景。Liang等通过对5个代表性草地贪夜蛾群体的*Tpi*基因进行全长测序，最终筛选出8个稳定的单核苷酸变异位点，这些位点可用于区分东半球草地贪夜蛾不同品系（Liang *et al.*，2024）。

1.2 生物型组成及动态分布

在草地贪夜蛾入侵的早期阶段，确定入侵种群的生物型组成迅速成为研究重点，生物型特征的确定与优先监测和防控的寄主植物密切相关。在包括非洲和亚洲等多个入侵区域，早期使用*COI*分子标记的研究揭示了水稻型和玉米型基因型的存在，且水稻型*COI*基因型通常在大多数区域出现频率较高（Nagoshi *et al.*，2022）。自2019年入侵我国以来，通过4年基于线粒体*COI*分子标记（2019-2021，2023）的田间系统追踪监测，发现初期入侵我国及每年迁入北方非越冬区的“水稻型”比例占明显优势（>98%），随着不断入侵，草地贪夜蛾“玉米型”比例逐渐上升（图1）；同时研究提取了联合国粮农组织网站记录的草地贪夜蛾首次入侵非洲各国家的数据，发现入侵非洲的草地贪夜蛾同样具有相似的变化趋势（Li *et al.*，2024a；Zhang *et al.*，2025a）。

2 草地贪夜蛾生态适应性

2.1 繁殖能力

草地贪夜蛾的繁殖能力受到光照条件、性别比例、营养状况和产卵节律等多种因素的综合调控。我国学者针对入侵种群的繁殖特性开展了系统性研究。在光照影响方面，Luo等（2025）研究发现红光条件下种群净增殖率、内禀增长率及周限增长率最高，均显著高于蓝绿光处理组；Lv等（2025）研究发现在草地贪夜蛾飞行过程中，短光照能促进飞行雌蛾的繁殖力恢复（较不飞行对照组），而长光照则抑制其繁殖。在性别比例调控研究中，Wu等（2025）研究发现当雌雄性别为1:1时草地贪夜蛾群体的终生繁殖力与子代成虫数量最高，种群增长潜力最大；并且雄性偏倚组较雌性偏倚组表现出更优的繁殖参数，表明灭雄策略可能具有更好的防控效果。在营养适应性方面，Yang等（2025）研究表明，不同碳水化合物对成虫的繁殖力和飞行能力有显著影响，其中果糖组的成虫单雌产卵量最高，且能促进产卵高峰提前。金涛等（2020）通过室内标准化饲养观察到入侵种群较高的繁殖能力，平均单雌总产卵量在1 000粒左右，其中羽化后7 d内的产卵量占总产卵量的68.1%，最高日产卵量可达229.3粒/头。

2.2 温度适应性

草地贪夜蛾是一种季节性迁飞昆虫，缺乏滞育现象，且对低温敏感，在中国北方大部分地区不能顺利过冬（陈辉等，2020）。草地贪夜蛾不同发育阶段的抗寒性存在显著差异，表现为卵的过冷却点和结冰点最低，蛹和成虫次之，而幼虫的过冷却点则随龄期增长呈现逐渐升高的趋势（张智等，2019）。草地贪夜蛾具有一定的耐低温能力，但连续10 d左右低于10℃环境可使其幼虫全部死亡（谢明惠等，2020）。草地贪夜蛾在我国形成3个明显的生态区：周年繁殖区（冬繁区）位于28°N以南的云南、广东等低纬度地区，这些区域1月平均温度维持在10℃以上，支持其全年持续繁殖；越冬区位于28°~31°N之间，对应1月平均温度6~10℃的过渡带；而在6℃等温线以北地区则无法越冬（姜玉英等，2021）。最新研究通过模拟自

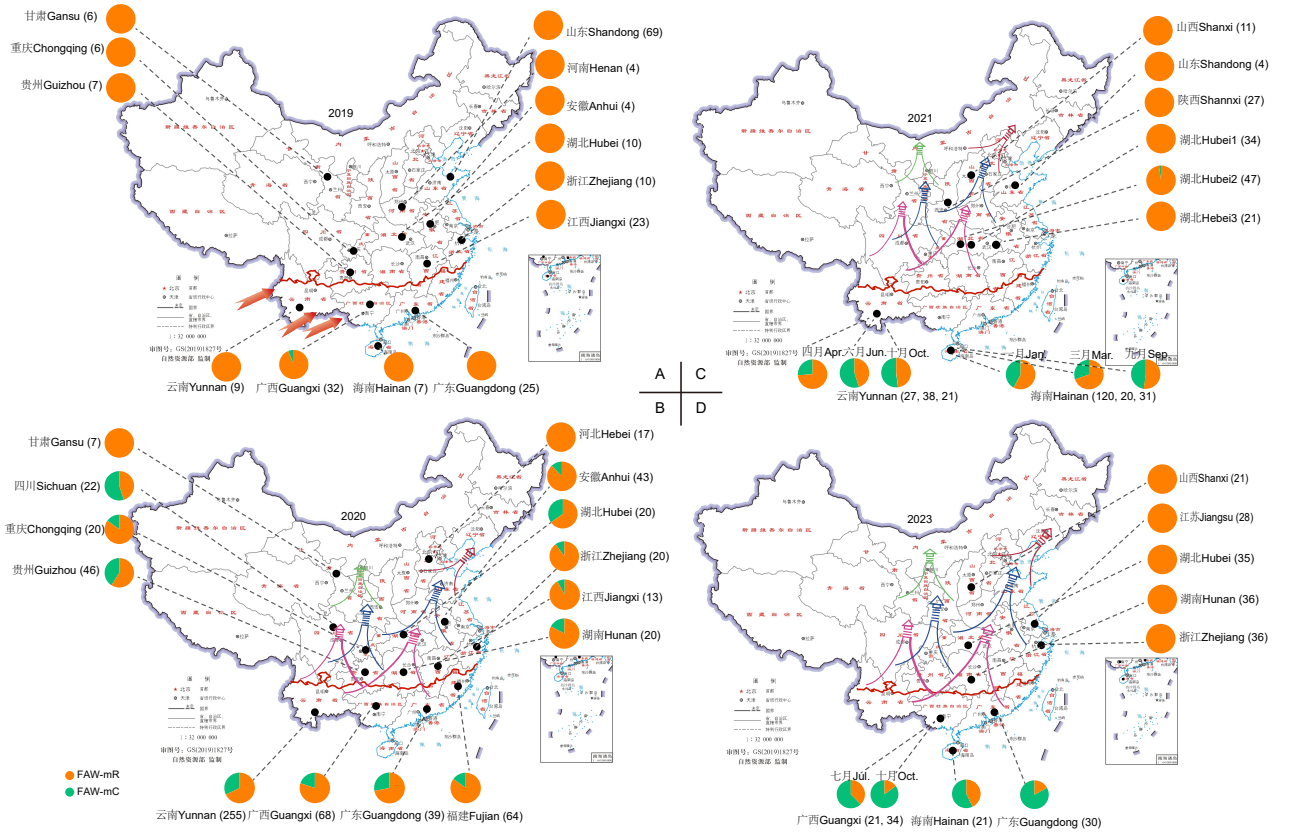

图1　2019–2023年草地贪夜蛾生物型的田间比例动态变化

Fig. 1　Dynamics in the field distribution of fall armyworm biotypes from 2019 to 2023

注：2019–2021年数据引自Li等（2024a），饼图中黄色表示水稻型，绿色表示玉米型。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS（2019）1827号的标准地图制作，底图无修改。Note: Data for 2019–2021 were sourced from Li *et al.* (2024a), yellow represented the rice strain, and green represented the corn strain in the pie chart. This map was based on the standard map with the review number GS (2019) 1827 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

然条件下的温度胁迫发现，草地贪夜蛾种群在6~10℃范围内能以5龄幼虫和蛹的形态完成越冬，其存活率与低温持续时间和发育阶段显著相关，但当温度低于6℃时种群则难以维持（张宇等，2025）。这一温度适应特性决定了该害虫在我国的季节性迁飞模式——冬季在南方温暖地区持续繁殖，随着气温回升逐步向北扩散，对中纬度地区的农业生产构成严重威胁。

2.3　季节性往返迁飞与定向行为

草地贪夜蛾属于典型的迁飞性昆虫，具有较强的远距离迁飞能力（Wolf *et al.*，1986；Westbrook *et al.*，2019），且没有典型的卵子发生–飞行拮抗综合征（Ge *et al.*，2021）。在我国大部分地区无法越冬，仅在热带和温暖的亚热带地区能够周年繁殖（齐国君等，2020；姜玉英等，2021）。其每年通过季节性迁飞寻找适宜的环境完成世代繁衍，从而实现大范围的蔓延为害（姜玉英等，2019b；吴孔明，2020）。目前，草地贪夜蛾在亚洲东部地区形成了季节性往返迁飞的局面，成为一种“北迁南回、周年循环”发生的重要农业害虫（Zhou *et al.*，2021）。研究表明，草地贪夜蛾在我国的迁飞路径可分为东、西两条主要路线：东线起源于泰国、老挝和越南，经3个世代的迁飞，可在6月抵达黄淮海地区，7月进入东北地区；西线则始于缅甸，经云南、四川、重庆、陕西等地，最终到达宁夏和内蒙古（陈辉等，2020；Li *et al.*，2020；吴秋琳等，2022）。李建春等研究发现我国草地贪夜蛾春夏季迁飞格局包括3个主要发生区和3次大规模北迁过程，其中2–4月主要发生在华南地区，4月下旬至5月中旬大规模迁入长

江以南地区（25°~30°N）；5-6月主要发生在长江以南地区，6月迁入江淮、黄淮地区（30°~35°N）；7-8月主要发生在江淮、黄淮地区，8月上中旬继续北迁至35°N以北地区（李建春等，2023）。在明确了其季节性迁飞和区域差异后，一个关键问题随之浮现：是什么在引导着种群在广阔的时空范围内，选择特定的迁飞路线与最终降落地点？定向行为是解答这一问题的关键。Chen等人基于自主研发的昆虫飞行模拟器，分别在室内和室外条件下系统测定草地贪夜蛾的飞行定向行为。研究证实，这一新近入侵我国的迁飞性害虫，在不到三年的时间内，已迅速表现出具有本地适应性的迁飞定向特征。草地贪夜蛾在春季主要朝西北方向飞行，秋季则转向西南，而夏季则未表现出统一的飞行方向，这一模式有利于其在东亚地区实现季节性的往返迁飞。研究还发现草地贪夜蛾飞行方向的季节性切换主要受光周期变化驱动（Chen *et al.*，2023）。在另一项研究中，Chen等人利用飞行磨系统对田间草地贪夜蛾成虫的飞行能力进行了测量，结果表明个体间飞行能力差异显著，其中58%的个体表现出较强的迁飞倾向。研究还确定了其在温度下降条件下的低温飞行阈值为13.1℃，为进一步揭示草地贪夜蛾的飞行生物学特性及迁飞机制提供了重要的科学依据（Chen *et al.*，2022）。

3 基因组学与入侵演化机制

3.1 基因组研究进展

自草地贪夜蛾入侵我国以来，国内科研团队已相继完成并公布了三套基因组数据（表1）。Zhang等人对实验室草地贪夜蛾近交系雄虫进行了PacBio和Hi-C测序组装，获得了染色体级高质量基因组，基因组大小为390.38 Mb（Zhang *et al.*，2020）。该组装规模接近基于k-mer深度分布分析估算的395 Mb，预测得到22 260个蛋白编码基因，BUSCO完整度达98.4%，也与流式细胞术测定结果（396 ± 3） Mb相符（Gouin *et al.*，2017）。Gui等人利用stLFR与Hi-C技术完成了一头雄性草地贪夜蛾的染色体级基因组组装，基因组大小为542.42 Mb（Liu *et al.*，2019；Gui *et al.*，2022）。此外，Xiao等人基于PacBio和Hi-C技术，对采自浙江东阳的草地贪夜蛾雌蛹进行了测序，获得了大小为486 Mb的染色体级基因组，涵盖完整的Z染色体及部分W染色体（Xiao *et al.*，2020）。虽然草地贪夜蛾基因组研究已取得一定进展，但单一参考基因组难以全面反映物种的遗传多样性。为深入解析草地贪夜蛾的遗传机制，Huang等人从美洲、非洲和中国共收集了137个个体的全基因组重测序数据，利用迭代映射与组装方法构建了泛基因组并进行了注释，通过将重测序数据映射到泛基因组，分析了基因存在/缺失变异（PAV）的概况（Huang *et al.*，2025）。

3.2 基于基因组学的入侵适应机制

从基因组学视角解析草地贪夜蛾的入侵机制，关键在于剖析其原产地（美洲）与入侵地种群之间的基因组差异。群体基因组学证实，草地贪夜蛾起源于美洲。其入侵路径以非洲为“桥头堡”进入亚洲。入侵种群在扩散过程中通过杂交获得新基因，导致其基因组多样性甚至高于美洲原生种群（Wang *et al.*，2024）。这些入侵种群不仅表现出独特的遗传结构，还呈现出区域内分化程度较低的特征，体现了其在入侵后的快速进化。此外，Zhang等（2023）研究表明，入侵过程并非单次事件，而是由多次引入及随后的基因混合共同塑造而成。由此可见，这种多次引入所导致的广泛杂交，最终促成草地贪夜蛾在新环境中的成功定殖与快速扩散。

通过对比美洲原生地与非洲、东亚、东南亚等主要入侵地的群体基因组特征，发现入侵地种群在扩散过程中逐渐演化出一种与原生地玉米型、水稻型及其杂交型均存在显著差异的全新杂交型。进一步对入侵种群的环境适应性相关基因的分析，发现与环境胁迫响应、解毒代谢过程及能量供应相关的基因位点在不同入侵地种群中均受到正向选择，这些基因功能与昆虫在新环境中成功入侵所需的取食适应和发育调控高度相关。值得注意的是，草地贪夜蛾在从美洲入侵非洲的过程中经历了显著的遗传瓶颈效应，表现为基因组多个位点出现选择清除，导致种群遗传多样性显著降低。而随后从非洲向亚洲扩张的过程中，其基因多态性又出现明显回升。这种变化反映出草地贪夜蛾可以通过维持核心基因座的多态性平衡，为应对后续环境变化预留进化潜力（Wang *et al.*，2024）。

表1 草地贪夜蛾已发表基因组信息对比表

Table 1 Comparison of published genomic information for *Spodoptera frugiperda*

登录号 Accession number	WUTJ01000000（NCBI）	WMCG01000000（NCBI）	CNP0000513（CNSA）
测序组装技术 Sequence assembly technology	PacBio + Hi-C	PacBio + Hi-C	stLFR + Hi-C
基因组大小（Mb）Genome size	390.38	486	542.42
核型 Karyotype	30+Z	30 + Z + W	30+Z
Contig 数量 Contig number	776	618	29 584
Scaffold 数量 Scaffold number	–	93	31+21 809
最长 scaffold（Mb）The longest scaffold	21.9	–	–
Contig N50 (kb)	5606.9	1130	91.97
Scaffold N50 (Mb)	12.9	16.3	14.16
BUSCO 完整率（%）BUSCO Completeness	98.4	93.1	95
GC 含量（%）GC content	36.4	36.4	36.52
重复占比（%）Repeat content	27.2	28	28.24
基因数量 Gene number	22 260	22 623	22 201

Note: WUTJ01000000 (Zhang *et al.*, 2020); WMCG01000000 (Xiao *et al.*, 2020); CNP0000513 (Liu *et al.*, 2019; Gui *et al.*, 2022).

草地贪夜蛾入侵地的全新杂交型可以被描述为一种特殊的类型：其核基因组表现为“玉米型”，而线粒体基因组则同时兼具“玉米型”和“水稻型”的特征（Zhang *et al.*，2023）。Li等通过飞行生物学、群体基因组学和比较转录组学等多方面数据分析杂交之后的两种线粒体生物型，发现FAW-mR（以玉米型线粒体为特征）表现出更快的振翼频率、更低的翅负载及更高的能量代谢水平，从而具备更强的远距离迁飞能力，加速了其对新栖息地的入侵与扩散；而FAW-mC（以水稻型线粒体为特征）则将更多能量分配给生殖投资，表现出更快的发育速率和更高的繁殖力（Li *et al.*，2024a）。这一研究揭示了不同线粒体生物型在迁飞与生殖繁殖上的分工协作模式，反映了杂交种群通过“分工明确、团结协作、多兵种作战”的方式，实现了高效的入侵扩散。综上可知，草地贪夜蛾在入侵扩散过程中，通过动态调控基因多态性水平与定向选择适应性基因的双重策略，成功实现了对新环境的快速适应。在面临新的选择压力时，其基因组会优先强化对解毒代谢、环境适应等关键功能基因的正向选择，从而增强自身在新环境中的生存能力。与此同时，草地贪夜蛾能够根据不同的环境变化动态调节基因多态性，这种“选择-多态性”协同调控模式，构成了该物种突破地理限制、实现全球入侵的重要分子基础。

4 草地贪夜蛾抗性研究进展

4.1 对化学农药的抗性机制

草地贪夜蛾对杀虫剂的抗性主要通过增强体内解毒代谢作用和降低杀虫剂靶标敏感性来实现（吴超等，2019）。它的解毒能力在很大程度上依赖于细胞色素P450（CY同chrome P450，CYP450）、谷胱甘肽S-转移酶（Glutathione S-transferase，GST）、水解还原酶等超家族中的基因或酶系统（Yu *et al.*，2004）。例如P450相关基因*CYP321A7*的持续过表达导致了草地贪夜蛾对高效氯氟氰菊酯的抗性（Li *et al.*，2024b）；一些P450基因例如*CYP6B50*和*CYP321A8*已被证明参与对具有不同抗性机制杀虫剂的交叉抗性（Chen *et al.*，2024；Guo *et al.*，2025）。另一研究表明草地贪夜蛾对甲氧虫酰肼的抗性与其细胞色素P450和谷胱甘肽S-转移酶相关基因的表达有关（Yang *et al.*，2025）。吴益东教授团队通过将快速分化的细胞色素P450基因簇与其寄主植物适应能力以及杀虫剂抗性进行关联，发现*CYP9A*基因簇可以代谢呋喃香豆素类植物防御化合物以及拟除虫菊酯、阿维

菌素和噁二嗪类杀虫剂（Shi *et al.*，2023）。此外，草地贪夜蛾的ε类谷胱甘肽S-转移酶（SfGSTe9）在杀虫剂解毒和抗氧化应激中起关键作用，*SfGSTe9*可能通过结合和隔离机制参与杀虫剂代谢，从而提高草地贪夜蛾对高效氯氰菊酯、高效氯氟氰菊酯和毒死蜱的抗性（Xu *et al.*，2025）。

在入侵我国多个地区的草地贪夜蛾种群中，普遍存在与有机磷类、氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类杀虫剂抗性相关的靶标基因高频突变。杀虫剂靶标位点分析表明，乙酰胆碱酯酶（AChE）基因在A201S、G227A和F290V位点均存在抗性突变，其中F290V突变以纯合为主（郭志敏等，2020；Zhang *et al.*，2020；Wang *et al.*，2022；Zeng *et al.*，2025a）。钙释放通道受体（RyR）基因在I4734M和I4790M位点也检测到低频率的杂合突变，而电压门控钠通道（VGSC）基因的抗性突变较少见，仅在T929I和L1014F位点观察到低频率突变（Guan *et al.*，2020；王帅宇等，2022；卢静波，2023）。除已知突变类型外，Cai等（2024）的研究还发现了若干新型变异位点，可能具有过渡性抗性功能。在分子机制层面，Zheng等（2024）通过分子对接和生物学效应分析揭示，Ace-1基因的A201S突变通过引入丝氨酸的羟基增强了酶活性，而F290V突变则通过改变酶活性中心结构，显著提高了对有机磷类和氨基甲酸酯类杀虫剂的抗性。Sun等（2023）发现草地贪夜蛾通过谷胱甘肽S转移酶GSTD1介导氯虫苯甲酰胺解毒代谢，以及利用海藻糖转运蛋白提高胞内海藻糖含量以适应农药胁迫的分子机制。此外，Lu等（2024）基于交叉转录组分析，系统鉴定了草地贪夜蛾在响应8种不同作用机制杀虫剂过程中共同诱导的核心解毒酶基因，并筛选出两个关键解毒酶蛋白，能够参与多种杀虫剂的解毒代谢过程，为开发新的杀虫剂靶标和制定精准防控策略提供了重要的基因资源支持。

4.2 对苏云金芽孢杆菌（*Bt*）的抗性机制

我国草地贪夜蛾种群对多种*Bt*蛋白持续保持着较高的敏感性水平。多项监测与研究结果显示，国内研发的*Bt*-Cry1Ab玉米和*Bt*-(Cry1Ab+Vip3Aa)玉米对草地贪夜蛾均表现出良好的防控效果，其中复合表达两种毒素蛋白的转基因玉米防治效果显著优于单一蛋白品种（张丹丹和吴孔明，2019）。徐婷婷等对安徽省不同生态区种群的研究证实，Cry1F和Cry1Ab蛋白对各田间种群均具有显著杀虫活性，且Cry1F蛋白的毒杀效果普遍更优（徐婷婷等，2022）。周彦妨对我国8个省市采集的草地贪夜蛾种群检测表明，所有测试种群对Vip3A、Cry1F、Cry1Ab和Cry2Ab均敏感，未检测到关键抗性突变（周彦妨，2023）。Guan等（2023）对中国东南部种群的监测也表明，田间种群对Cry1Fa和Vip3Aa等*Bt*毒素仍维持高敏感性。此外，贾文珍（2023）与郁亚齐（2024）等的研究也表明转*Bt*作物大豆、玉米等对草地贪夜蛾具有明显的杀虫活性。

草地贪夜蛾对*Bt*的抗性机制主要涉及毒素激活过程中关键酶类的调控、毒素受体的突变以及免疫系统的调节（Xiao and Wu，2019；吴超等，2019）。当前国内研究对毒素激活过程中关键酶类的调控机制和免疫系统的应答反应探索较为有限，主要集中于毒素受体的鉴定与功能解析。钙粘蛋白已被证实是*Bt*毒素的初级受体，参与Cry毒素的作用过程，Wang等在棉铃虫中发现钙粘蛋白*HaCad*基因的缺失与对Cry1Ac抗性相关（Wang *et al.*，2016），但目前在草地贪夜蛾中钙粘蛋白协同*Bt*毒素杀虫尚未得到直接验证。ABC（ATP-binding cassette transporter）转运蛋白可作为鳞翅目昆虫的一种*Bt*毒素受体，其中*ABCC2*更是被证实可作为多种昆虫*Bt*毒素的受体，与害虫对*Bt*毒素产生抗性有关。CRISPR/Cas9基因编辑实验与抗性品系的等位基因突变分析都表明，*SfABCC2*为Cry1F和Cry1Ab的关键受体（Jin *et al.*，2021；Jin *et al.*，2023a；Zhang *et al.*，2025b）。Liu等（2024a）研究发现转录因子*SfGATAe*正向调控*SfABCC2*的表达，其可以降低*SfABCC2*的表达从而降低草地贪夜蛾对Cry1Ac毒素的敏感性。Vip毒素（Vegetative insecticidal proteins，营养期杀虫蛋白）是*Bt*在营养生长阶段分泌的一类可溶性杀虫蛋白，早期研究表明草地贪夜蛾中可能存在多个参与Vip3Aa抗性的受体蛋白（Jiang *et al.*，2018；Hou *et al.*，2021），但均未得到证实。Jin等（2023b）于2023年首次发现了一个与Vip3Aa抗性密切相关的受体基因*Sfmyb*，并通过CRISPR/Cas9和RNAi等技术证实了该基因在Vip3Aa抗性形成中的关键作用。第二个Vip3Aa抗性关键受体基因——几丁质合成酶基因*SfCHS2*，被Liu等在2024年报道，该基因介导的毒素抗性不与Cry毒素交互（Liu *et al.*，

2024b)。另外，Zhang等（2025c）鉴定出*SfVipR1*基因，对其进行基因编辑敲除可使草地贪夜蛾获得超过1875倍的Vip3Aa抗性。这些研究为解析*Bt*的抗性机制及草地贪夜蛾的防控治理提供了新的分子靶点。

5 综合防控技术体系

草地贪夜蛾的防治工作遵循“预防为主、综合防治”的指导方针，力求构建覆盖全面监测、统防统治、区域联防与应急响应的综合防控体系（吴孔明，2020）。该体系以周年繁殖区为重点防控区域，强化迁飞过渡区的有效阻截，通过多层次诱杀迁飞成虫，全力遏制其暴发成灾，从而最大限度降低危害损失（康慧铭等，2023）。

5.1 监测预警

当前我国草地贪夜蛾的监测工作现状主要采用灯诱监测、雷达监测和田间调查及卵巢解剖等多元技术手段（丁奎婷等，2023）。灯诱技术是应用最广的监测工具，对成虫捕获效率最高，最适合用于监测种群发生动态和规模（黄建荣等，2025）。2018年Sun等首次用高空诱虫灯监测到草地贪夜蛾成虫（Sun *et al.*，2021）。研究学者还通过高空预报灯对全国不同省份的草地贪夜蛾进行了监测并获取了各省的发生动态趋势（姜玉英等，2020；唐继洪等，2022）。雷达监测则能实时、精准地追踪昆虫的迁飞参数，不受天气干扰。通过结合轨迹分析与气象数据，该技术已成功应用于阐明其跨境迁飞路径与落区规律（吴秋琳等，2019；齐国君等，2019）。此外，田间调查与卵巢解剖通过调查各虫态空间分布并建立抽样模型，可掌握田间危害情况（孙小旭等，2019；杨现明等，2020）；而通过解剖成虫卵巢发育级别，则可短期预报种群发生期与发生量，直接指导防治时机（和伟等，2019；赵胜园等，2019）。随着遥感、大数据等技术的快速发展，刘杰等（2023）也提出了系统化的智能监测框架，旨在推动我国草地贪夜蛾监测体系的技术升级与模式革新。

5.2 理化诱控技术

在成虫发生高峰期，可充分利用高空探照灯、地面测报灯等高效灯诱工具，以及性信息素诱捕器、食诱剂等理化诱控手段，以诱杀成虫和幼虫、干扰交配，从而降低田间落卵量（韩海亮等，2024；马永翠等，2024）。研究发现性信息素诱集法与探照灯诱集法在监测中功能互补：前者灵敏度高，后者捕获力强，二者协同可构建从“早发现”到“准评估”的完整监测系统（周光信等，2024；黄建荣等，2025）。目前，性诱剂已成为云南省应用最广泛的绿色防控措施。多项研究表明，通过优化性信息素组分及其配比，可显著提升诱捕效果（渠成等，2022；何洪磊等，2024）。

5.3 化学防治

化学防治是应急防控草地贪夜蛾暴发危害的主要手段。我国农业农村部于2020年1月公布的草地贪夜蛾应急防治用药推荐名单中，共有28种推荐药剂，其中包含22种化学农药（农业农村部，2020）。

在入侵我国之前，草地贪夜蛾已产生一定程度的抗药性。研究表明，传统的有机磷类、拟除虫菊酯类和氨基甲酸酯类农药对该害虫的防效已明显下降（赵胜园等，2019）。目前，对草地贪夜蛾防治效果较好的单剂化学农药包括：25%乙基多杀菌素、200 g/L氯虫苯甲酰胺、10%溴氰虫酰胺、240 g/L甲氧虫酰肼及10%四氯虫酰胺（太红坤等，2025）。复配药剂方面，包括6%阿维·氯苯酰悬浮剂（段炼等，2024）、以及甲氨基阿维菌素苯甲酸盐与四唑虫酰胺1∶40复配（陈澄宇等，2024）。在防治过程中，卵期及低龄幼虫期为施药关键期（丁奎婷等，2023）。室内毒力测定显示，甲维盐、溴虫氟苯双酰胺、虱螨脲及氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾3龄和5龄幼虫均具有较高活性，是理想的防治药剂（黄伟玲等，2023）。Mao等（2023）开发了草地贪夜蛾杀虫剂抗性诊断试剂盒，可在2 h内准确评估田间害虫对杀虫剂的抗性水平，为高效用药提供指导。此外，开发新型、高效且绿色环保的农药，并优化创新施药技术，是应急防控草地贪夜蛾的重要补充手段。Liu等（2025）以聚-L-赖氨酸改性锆基金属有机框架作为农药载体，开发了用于草地贪夜蛾防治的甲氨基苯甲酸酯纳米农药制剂。该制剂具有优异的抗紫外线降解性能，有利于延长农药的持效期，提高防控持续性。

5.4 生物防治

5.4.1 天敌生物

草地贪夜蛾本地天敌种类的调查及生防功能评价是天敌防治的重要内容。我国已报道的捕食

性和寄生性天敌种类丰富，包括寄生性天敌16种，捕食性天敌23种（表2）。这些新发现的天敌昆虫为草地贪夜蛾的生物防治提供了更多潜在的资源和手段。其中夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus* 是我国成功引进并规模化应用的寄生蜂优势物种，在田间防控实践中展现出卓越效果。针对广西地区草地贪夜蛾的生物防治研究表明，夜蛾黑卵蜂与螟黄赤眼蜂对其卵具有显著的自然寄生作用，其中夜蛾黑卵蜂的寄生效率显著高于螟黄赤眼蜂（谢丽玲等，2022）。田间试验数据显示，夜蛾黑卵蜂对草地贪夜蛾卵块的寄生率可达100%，卵粒寄生率可达84.39%（赵旭等，2020）；此外，螟黄赤眼蜂也表现出稳定的防治效果（胡红梅等，2024）。

表2 本土报道的寄生性和捕食性天敌生物

Table 2 Indigenous parasitoids and predators reported for *Spodoptera frugiperda* in China

类别 Groups	天敌种类 Species of natural enemy	功能虫态 Functional stage	靶标虫态 Target stages	参考文献 References
捕食性天敌 Predatory natural enemy	大红犀猎蝽 *Sycanus falleni*	3龄若虫、成虫 3rd instar nymphs, adults	3龄幼虫 3rd instar larvae	侯峥嵘等，2020
	黄带犀猎蝽 *Sycanus croceovittatus*	2龄、5龄若虫，成虫 2nd and 5th instar nymphs, adults	2~5龄幼虫 2nd to 5th instar	王亚楠等，2020 任雪敏等，2022
	环斑猛猎蝽 *Sphedanolestes impressicollis*	4龄若虫 4th instar nymphs	1~3龄幼虫 1st to 3rd instar larvae	胡宗伟等，2022
	红彩瑞猎蝽 *Rhynocoris fuscipes*	成虫 Adults	3龄幼虫 3rd instar larvae	游梓翊等，2023
	黄带犀猎蝽 *Sycanus croceovittatus*	2龄、5龄若虫及成虫 2nd and 5th instar nymphs, and adults	2龄幼虫 2nd instar larvae	王亚楠等，2024
	侧刺蝽 *Andrallus spinidens*	4龄、5龄若虫及雌成虫 4th and 5th instar nymphs, and adult females	3~5龄幼虫 3rd to 5th instar larvae	王燕等，2023 覃江梅等，2023a
	叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellate*	3龄若虫、5龄若虫、成虫 3rd and 5th instar nymphs, adults	3龄幼虫 3rd instar larvae	范悦莉等，2019 唐敏等，2019
	益蝽 *Picromerus lewisi*	成虫 Adults	3~6龄幼虫 3rd to 6th instar larvae	王燕等，2019a
	蠋蝽 *Arma chinensis*	5龄若虫、成虫 5th instar nymphs, adults	3~6龄幼虫 3rd to 6th instar larvae	王燕等，2019b 唐艺婷等，2019
	东亚小花蝽 *Orus sauteri*	3~5龄若虫，雌成虫 3rd to 5th instar nymphs, adult females	1~3龄幼虫 1st to 3rd instar larvae	代晓彦等，2019 赵雪晴等，2019
	多异瓢虫 *Hippodamia variegata*	成虫 Adults	1~2龄幼虫 1st to 2nd instar larvae	孔琳等，2019a
	七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*	成虫 Adults	1~2龄幼虫 1st to 2nd instar larvae	孔琳等，2019b
	龟纹瓢虫 *Propylaea japonica*	成虫，4龄幼虫 Adults, 4th instar larvae	卵、低龄幼虫 Eggs, early-instar larvae	蒋骏等，2020

续表2 Continued table 2

类别 Groups	天敌种类 Species of natural enemy	功能虫态 Functional stage	靶标虫态 Target stages	参考文献 References
捕食性天敌 Predatory natural enemy	异色瓢虫 *Harmonia axyridis*	1龄幼虫，4龄幼虫，成虫 1st and 4th instar larvae, adults	卵，1~2龄幼虫 Eggs, 1st to 2nd instar larvae	刘本菊等，2020 赵英杰等，2020
	六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculatus*	3龄幼虫、4龄幼虫及成虫 3rd and 4th instar larvae, and adults	卵、1龄、2龄幼虫 Eggs, 1st and 2nd instar larvae	邱良妙等，2023 崔祥鑫等，2024
	斜纹猫蛛 *Oxyopes sertatus*	亚成蛛和雌、雄成蛛 Subadult spiders and adult males/females	2龄、3龄幼虫 2nd and 3rd instar larvae	覃江梅等，2023b
	中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	各龄幼虫 Larvae of all instars	卵及1、2幼虫 Eggs and 1st, 2nd instar larvae	黄海艺等，2020
	大草蛉 *Chrysopa pallens*	3龄幼虫、成虫 3rd instar larvae, adults	卵、1龄幼虫 Eggs, 1st instar larvae	徐庆宣等，2019
	丽草蛉 *Chrysopa formosa*	2龄、3龄幼虫 2nd and 3rd instar larvae	卵、1~2龄幼虫 Eggs, 1st to 2nd instar larvae	李玉艳等，2021
	黄玛草蛉 *Mallada basalis*	2龄、3龄幼虫 2nd and 3rd instar larvae	卵、低龄幼虫 Eggs, early instar larvae	施琳琳等，2022
	双斑青步甲 *Chlaenius bioculatus*	成虫 Adults	幼虫 Larvae	黄潮龙等，2022
	黄足肥螋 *Eurellia pallipes*	成虫 Adults	2龄幼虫 2nd instar larvae	赵英杰等，2019
	蠼螋 *Labidura riparia*	若虫、成虫 Nymphs, adults	各虫态 All developmental stages	田彩红等，2021
寄生性天敌 Parasitoid	夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	赵旭等，2020 朱凯辉等，2020
	短管赤眼蜂 *Trichogramma pretiosum*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	朱凯辉等，2020
	螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	唐继洪等，2020
	菜粉蝶盘绒茧蜂 *Cotesia glomerata*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	宁素芳等，2019
	螟甲腹茧蜂 *Chelonus munakatae*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	李芬等，2019
	斯氏侧沟茧蜂 *Microplitis similis*	雌成虫 Adult female	2~4龄幼虫 2nd to 4th instar larvae	陈壮美等，2019
	斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis*	雌成虫 Adult female	幼虫 Larvae	尚丹等，2019
	台湾甲腹茧蜂 *Chelonus formosanus*	雌成虫 Adult female	卵、幼虫 Eggs, larvae	唐继洪等，2020
	淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes*	雌成虫 Adult female	幼虫 Larvae	唐继洪等，2020

续表2 Continued table 2

类别 Groups	天敌种类 Species of natural enemy	功能虫态 Functional stage	靶标虫态 Target stages	参考文献 References
寄生性天敌 Parasitoid	斜纹夜蛾侧沟茧蜂 *Microplitis prodeniae*	雌成虫 Adult female	2~3龄幼虫 2nd to 3rd instar larvae	覃江梅等，2021
	螟蛉盘绒茧蜂 *Cotesia ruficrus*	雌成虫 Adult female	1~3龄幼虫 1st to 3rd instar larvae	何朋阳等，2023
	霍氏啮小蜂 *Tetrastichus howardi*	雌成虫 Adult female	蛹 Pupae	唐继洪等，2020
	半闭弯尾姬蜂 *Diadegma semiclausum*	雌成虫 Adult female	卵 Eggs	宁素芳等，2019
	棉铃虫齿唇姬蜂 *Campoletis chlorideae*	雌成虫 Adult female	2~4龄幼虫 2nd to 4th instar	覃江梅等，2021
	厉寄蝇属寄生蝇 *Lydella* sp.	雌成虫 Adult female	幼虫 Larvae	宁素芳等，2019
	日本追寄蝇 *Exorista japonica*	雌成虫 Adult female	幼虫 Larvae	宁素芳等，2019

5.4.2 病原微生物

我国在草地贪夜蛾生物防治领域已建立起丰富的微生物资源库。其中昆虫病原真菌具有广谱作用，在自然条件下可引起昆虫流行病。白僵菌在我国已分离获得多个高毒力菌株，毒力较强的菌株对草地贪夜蛾致死率可达100%（程东美等，2020）。绿僵菌对幼虫和蛹具有显著致病性（赵建伟等，2023）。另外研究发现球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 和莱氏绿僵菌 *Metarhizium rileyi* 在对草地贪夜蛾幼虫存在高致病力的同时，对其天敌生物夜蛾黑卵蜂和玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae* 危害性较小，有较好的相容性（苟雪莲等，2022）。病毒防治方面，核型多角体病毒（nucleopolyhedrovirus，NPV）展现出显著优势，从不同入侵地种群中分离的草地贪夜蛾同源NPV毒株显示出地理种群特异性（Lei *et al.*，2020；程露强等，2022；Shi *et al.*，2024）。新型病毒资源不断被发现，徐蓬军等在非洲黏虫 *Spodoptera exempta* 中发现3种新型类Partiti病毒，并首次将其跨宿主转移至草地贪夜蛾中，该病毒对草地贪夜蛾表现出完全有害性：既可以降低繁殖率又增加其对NPV的易感性；并且其以高效率经卵巢垂直传播，可实现母代至子代的高效传递（Xu *et al.*，2020）。另外，鹿眼蛱蝶浓核病毒（Junonia coenia densovirus，JcDV）、烟芽夜蛾囊泡病毒（Heliothis virescens ascovirus，HvAV）等也是防治草地贪夜蛾的重要微生物资源（刘航等，2020；彭倩等，2024）。在细菌防治方面，最引人注目的是苏云金芽孢杆菌，我国科研人员已筛选出多株对草地贪夜蛾具有高效杀虫活性的 *Bt* 菌株（刘华梅等，2019；王宇航等，2022）。2021年，中国农业科学院植物保护研究所又新鉴定出3株 *Bt* 菌株（PS3、B14D2和C3E11），其产出的Cry1A、Cry2A和Vip3A等杀虫蛋白对草地贪夜蛾展现出较高的致死活性（王建等，2021）。昆虫病原线虫（Entomopathogenic nematodes，EPNs）因其可以主动搜寻害虫、寄主范围广且对人、畜和环境安全等优点被广泛应用于农业害虫防治中。经室内测定筛选获得了多个防治草地贪夜蛾的优势线虫品系：异小杆属昆虫病原线虫 *Heterorhabditis indica* 0872L（刘佳等，2025）、CQ7-2（Zeng *et al.*，2025b），嗜菌异小杆线虫 *Heterorhabditis bacteriophora* HbSD（Chen *et al.*，2022），小卷蛾斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* All（梁铭荣等，2020）等。这些研究成果不仅丰富了草地贪夜蛾生物防治的资源库，也为开发具有种群特异性、环境友好型的微生物农药提供了重要支撑。

7 总结与展望

草地贪夜蛾作为一种全球性入侵农业害虫，其生物学特性与入侵机制研究已成为国际关注焦点。在原产地北美洲和南美洲，研究人员已明确了其存在玉米型和水稻型两种生物型（Dumas *et al.*，2015；Comte *et al.*，2025）。尽管室内观察与基因分析均证实了两品系间存在杂交现象，且

杂交个体在自然界中亦有分布，但二者在原产地中是否存在天然的“选型交配”行为仍待进一步研究（Pashley *et al.*，1992；Schöfl *et al.*，2009）。种群遗传学研究表明，草地贪夜蛾既能通过远距离迁飞维持广泛的基因交流，又会受局部地区地理气候因素的选择压力而形成特定的种群结构。在此过程中，地理来源是驱动其遗传分化的一个关键因素（Juárez *et al.*，2014；Arias *et al.*，2019）。所以针对入侵地种群的溯源及其局部适应性的研究，成为精准防控的关键所在。

我国在草地贪夜蛾入侵防控方面反应迅速，通过提前发布预警通知并建立监测体系，为其有效防控奠定了坚实基础（郭井菲等，2018）。尽管“多重独立入侵”假说提示了其入侵历史的早期复杂性，但基于我国种群动态的溯源研究显示，其近期的传播路径清晰地遵循着“自西向东”的扩散模式（Zhang *et al.*，2023）。基于线粒体*COI*分子标记监测我国入侵种群的研究表明，其遗传构成呈现动态演变特征——由初期以水稻型为主导逐步转变为玉米型与杂交型比例上升的混合群体。这一发现提示我们，需突破原产地二分法认知框架，转而从混合遗传体的视角理解入侵过程中通过杂交与自然选择形成的复杂种群结构，未来需借助更全面的分子工具，持续揭示其遗传背景与演化动态（Zhang *et al.*，2025a）。在生态适应性方面，我国学者围绕繁殖特性、温度适应与迁飞定向等关键性状展开系统研究，逐步构建起涵盖害虫生命周期、气候适应与迁飞路径的预测模型，为精准防控提供理论支撑。入侵机制研究证实，杂交是推动其成功入侵的核心环节——杂交种群通过扩散与繁殖功能的生理分化，形成迁飞与繁殖分工协同的入侵策略，显著提升定殖效率（Li *et al.*，2024a；Wang *et al.*，2024；Li and Xiao，2025）。在抗药性方面，草地贪夜蛾通过“增强代谢解毒”与“降低靶标敏感性”双重机制构建了立体防御体系（吴超等，2019）。我国入侵种群普遍携带乙酰胆碱酯酶F290V等靶标基因突变，对有机磷和氨基甲酸酯类杀虫剂已形成广泛抗性（Wang *et al.*，2022；Zeng *et al.*，2025）。值得关注的是，我国种群对当前主要*Bt*毒素（Cry1Ab、Cry1F、Vip3Aa等）仍保持高度敏感性。研究已明确*SfABCC2*为Cry1F/Cry1Ab的关键受体；同时鉴定出*Sfmyb*、*SfCHS2*、*SfVipR1*等多个独立作用的Vip3Aa毒素受体基因，其中*SfCHS2*介导的抗性与Cry毒素无交互性（Jin *et al.*，2023a，2023b；Liu *et al.*，2024b；Zhang *et al.*，2025b，2025c）。这些发现既揭示了草地贪夜蛾对多种*Bt*毒素产生高水平抗性的遗传潜力，也凸显了建立基于分子监测的抗性治理策略的紧迫性。在抗性机制研究方面，已有成果多集中于代谢解毒或靶标突变等单一通路，而对表观遗传调控、宿主植物互作及昆虫肠道微生物群的作用关注不足。这些研究空白在一定程度上限制了我们对草地贪夜蛾种群动态及抗性演化过程的全面理解。未来亟需通过多组学整合与功能验证，建立更为完善的生物型鉴定体系与抗性评估框架，为精准防控提供坚实的理论依据。

与此同时，我国已建立的涵盖天敌昆虫、病原微生物和理化诱控技术的绿色防控体系，为推进害虫可持续治理提供了丰富技术储备和实践路径。通过多技术融合与系统化治理，我们有望实现对该入侵物种的长期有效管控。

参考文献（References）

Acharya R, Akintola AA, Malekera MJ, *et al.* Genetic relationship of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) populations that invaded Africa and Asia [J]. *Insects*, 2021, 12: 439.

Arias O, Cordeiro E, Corrêa AS, *et al.* Population genetic structure and demographic history of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae): Implications for insect resistance management programs [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75: 2948–2957.

Augusto CM, Laura JM, Guillermina S, *et al.* Review of the host plants of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Revista De La Sociedad Entomológica Argentina*, 2010, 69 (3–4): 209–231.

Balaško KM, Varga F, Temunović M. Europe under siege? Predicting fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) invasion risk based on climatic niche shift and species distribution models [J]. *Diversity and Distributions*, 2025, 31 (5): e70037–e70037.

Cai YF, Chen HL, Hu MF, *et al.* Discovery of novel potential insecticide-resistance mutations in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2024, 15 (3): 186.

Chen CY, Zhang XF, Zhao YX, *et al.* Joint bioactivity and field efficacy of emamectin benzoate and tetraniliprole mixture against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Agrochemicals*, 2024, 63 (2): 147–151. [陈澄宇, 张学峰, 赵云霞, 等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐与四唑虫酰胺复配对草地贪夜蛾的联合生物活性及田间防效 [J]. 农药, 2024, 63 (2): 147–151]

Chen H, Wan GJ, Li JC, *et al.* Adaptive migratory orientation of an

invasive pest on a new continent [J]. *iScience*, 2023, 26 (12): 108281.

Chen H, Wang Y, Huang L, *et al.* Flight capability and the low temperature threshold of a chinese field population of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2022, 13 (5): 422.

Chen H, Wu MF, Liu J, *et al.* Migration pathways and occurrence zoning of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 747-757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 等. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 747-757]

Chen Y, Long HB, Jin T, *et al.* Potential of entomopathogenic nematode HbSD as a candidate biocontrol agent against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2022, 14 (1): 2.

Chen YM, Cen YJ, Liu Y, *et al.* P450 gene *CYP6a13* is responsible for cross-resistance of insecticides in field populations of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insect Science*, 2024, 32 (1): 227-242.

Cheng DM, Hong WW, Sun H, *et al.* Investigation of larval mycosis incidence and isolation-identification of pathogenic fungi in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (6): 1298-1304. [程东美, 洪婉雯, 孙辉, 等. 草地贪夜蛾幼虫僵虫发生率调查及致病菌分离鉴定 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (6): 1298-1304]

Cheng LQ, Jin WY, Guo L, *et al.* Comparative analysis of virulence of *Spodoptera frugiperda* nucleopolyhedrovirus against different geographical populations of *S. frugiperda* in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (3): 538-547. [程露强, 靳雯怡, 郭琳, 等. 草地贪夜蛾核型多角体病毒对我国草地贪夜蛾不同地理种群毒力的比较分析 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (3): 538-547]

Comte A, Delarue A, François CM, *et al.* Functional investigation of the receptor to the major pheromone component in the C-Strain and the R-Strain of the Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2025, 16 (3): 304.

Cui XX, Li HL, Li P, *et al.* Bidirectional predatory functional response between larvae of *Menochilus sexmaculatus* and *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40 (3): 559-567. [崔祥鑫, 黎荟璐, 李盼, 等. 六斑月瓢虫幼虫和草地贪夜蛾幼虫之间的双向捕食功能评价 [J]. 中国生物防治学报, 2024, 40 (3): 559-567]

Débora G, Montezano, Specht A, *et al.* Host Plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas [J]. *African Entomology*, 2018, 26 (2): 286-300.

Ding KT, Du SJ, Yang NW, *et al.* Research progress on integrated management techniques for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Journal of Biosafety*, 2023, 32 (4): 291-302. [丁奎婷, 杜素洁, 杨念婉, 等. 草地贪夜蛾综合防控技术研究进展 [J]. 生物安全学报, 2023, 32 (4): 291-302]

Duan L, Wu BC, Yang X, *et al.* Field efficacy trials of different pesticides against *Spodoptera frugiperda* on corn [J]. *Hubei Plant Protection*, 2024, 4: 43-45. [段炼, 吴丙成, 杨霞, 等. 不同药剂防治玉米草地贪夜蛾田间药效试验 [J]. 湖北植保, 2024, 4: 43-45]

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: 305-316.

Ge SS, Sun XX, He W, *et al.* Potential trade-offs between reproduction and migratory flight in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2021, 132: 104248.

Goergen G, Kumar PL, Sankung SB, *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]. *Public Library of Science ONE*, 2016, 11: e0165632.

Gou XL, Wang ZY, Tu XB, *et al.* Pathogenicity of two entomopathogenic fungal strains against *Spodoptera frugiperda* and compatibility of highly virulent strain with egg parasitoids [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49 (5): 1505-1512. [苟雪莲, 王振营, 涂雄兵, 等. 两株虫生真菌对草地贪夜蛾的致病力及高毒力菌株与卵寄生蜂的相容性 [J]. 植物保护学报, 2022, 49 (5): 1505-1512]

Gouin A, Bretaudeau A, Nam K, *et al.* Two genomes of highly polyphagous lepidopteran pests *Spodoptera frugiperda* Noctuidae with different hostplant ranges [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1-4): 1-12.

Guan F, Zhang JP, Shen HW, *et al.* Whole-genome sequencing to detect mutations associated with resistance to insecticides and *Bt* proteins in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insect Science*, 2020, 28 (3): 627-638.

Guan F, Zhang Z, Lin YH, *et al.* Susceptibility and diagnostic concentration for *Bacillus thuringiensis* toxins and newer chemical insecticides in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) from China [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2023, 116 (5): 1830-1837.

Gui FR, Lan TM, Zhao Y, *et al.* Genomic and transcriptomic analysis unveils population evolution and development of pesticide resistance in fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Protein Cell*, 2022, 13: 513-531.

Guo JF, Zhao JZ, He KL, *et al.* Alert of the invasion of the dangerous pest fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, into China [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (6): 1-10. [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]

Guo ZM, Deng XQ, Li J, *et al.* Insecticide susceptibility and target-site mutation detection in field populations of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from four regions of Hubei Province [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (5): 582-589. [郭志敏, 邓晓倩, 李静, 等. 湖北四个地区草地贪夜蛾田间种群的杀虫剂敏感性及靶标突变检测 [J]. 昆虫学报, 2020, 63 (5): 582-589]

Guo ZM, Tang JH, Ling SS, *et al.* Upregulation of a cytochrome P450 gene, *CYP6B50*, confers multi-insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Advanced Research*, 2025, 28: S2090-1232.

Han HL, Liu M, Dong HS, *et al.* Study on trapping distance and sex ratio of *Ostrinia furnacalis* and *Spodoptera frugiperda* by insecticidal lamps [J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 50 (3): 312-315, 340. [韩海亮, 刘敏, 董航顺, 等. 杀虫灯诱杀亚洲玉米螟和草地贪夜

蛾的距离与性比研究 [J]. 植物保护, 2024, 50 (3): 312–315, 340]

He HL, Xie ZY, Shi ZY, *et al.* Green control measures for *Spodoptera frugiperda* on corn in Yunnan Province [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2024, S1: 82–86. [何洪磊, 谢志英, 石兆云, 等. 云南省玉米草地贪夜蛾绿色防控措施 [J]. 云南农业科技, 2024, S1: 82–86]

He PY, Li X, Liu TX, *et al.* Individual development of *Cotesia ruficrus*, a parasitoid wasp of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (6): 1488–1494. [何朋阳, 李贤, 刘同先, 等. 草地贪夜蛾寄生蜂螟蛉盘绒茧蜂的个体发育 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (6): 1488–1494]

He W, Zhao SY, Ge SS, *et al.* Research on sex pheromone-based monitoring and forecasting methods for *Spodoptera frugiperda* populations [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 48–53, 115. [和伟, 赵胜园, 葛世帅, 等. 草地贪夜蛾种群性诱测报方法研究 [J]. 植物保护, 2019, 45 (4): 48–53, 115]

Hou XY, Han L, An BJ, *et al.* Autophagy induced by Vip3Aa has a pro-survival role in *Spodoptera frugiperda* Sf9 cells [J]. *Virulence*, 2021, 12 (1): 509–519.

Hou ZR, Sun BB, Liu XJ, *et al.* Predatory functional response of Sycanus croceovittatus to the third-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 852–858. [侯峥嵘, 孙贝贝, 刘先建, 等. 大红犀猎蝽对草地贪夜蛾3龄幼虫捕食功能反应 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 852–858]

Hu HM, Tian MY. Efficacy trial of *Trichogramma chilonis* for controlling *Spodoptera frugiperda* in corn fields [J]. *Southern Agriculture*, 2024, 18 (15): 60–62. [胡红梅, 田美艺. 螟黄赤眼蜂防治玉米田草地贪夜蛾效果试验 [J]. 南方农业, 2024, 18 (15): 60–62]

Hu ZW, Feng WZ, Zhang HR, *et al.* Predatory functional analysis of Sphedanolestes impressicollis against early-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (3): 530–537. [胡宗伟, 冯万祖, 张浩然, 等. 环斑猛猎蝽对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食功能分析 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (3): 530–537]

Huang CL, Guo JF, He KL, *et al.* Biological characteristics of *Chlaenius bioculatus* and its predatory capacity against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) adults [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49 (5): 1493–1498. [黄潮龙, 郭井菲, 何康来, 等. 双斑青步甲的生物学特性及其成虫对草地贪夜蛾的捕食能力[J]. 植物保护学报, 2022, 49 (5): 1493–1498]

Huang HY, Liu YN, Qi YF, *et al.* Predation of Chrysoperla sinica larvae on eggs and early-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (6): 1333–1340. [黄海艺, 刘亚男, 亓永凤, 等. 中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食作用 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (6): 1333–1340]

Huang JR, Xu YW, Li GP, *et al.* Analysis of monitoring methods and occurrence characteristics of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Henan Province from 2019 to 2021 [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1070–1080. [黄建荣, 徐永伟, 李国平, 等. 2019–2021年河南省草地贪夜蛾监测方法与发生特点分析 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1070–1080]

Huang WL, Wang QQ, Ren XX, *et al.* Laboratory toxicity tests of 20 insecticides against different instars and geographical populations of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Plant Protection*, 2023, 49 (6): 323–331, 337. [黄伟玲, 王芹芹, 任学祥, 等. 20种杀虫剂对不同龄期不同地理种群草地贪夜蛾的室内毒力测定 [J]. 植物保护, 2023, 49 (6): 323–331, 337]

Huang XY, Rao YH, Su SB, *et al.* The pan-genome of *Spodoptera frugiperda* provides new insights into genome evolution and horizontal gene transfer [J]. *Communications Biology*, 2025, 8 (1): 407.

Jia WZ. Resistance Evaluation of *Bt*-transgenic Rice and Maize Against *Spodoptera frugiperda* [D]. Sichuan Agricultural University, 2023. [贾文珍. 转*Bt*基因水稻和玉米对草地贪夜蛾的抗性研究 [D]. 四川农业大学, 2023]

Jiang K, Hou XY, Han L, *et al.* Fibroblast growth factor receptor, a novel receptor for vegetative insecticidal protein Vip3Aa [J]. *Toxins*, 2018, 10 (12): 546.

Jiang YY, Liu J, Wu QL, *et al.* Investigation on overwintering and winter breeding areas of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (1): 212–217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 等. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查 [J]. 植物保护, 2021, 47 (1): 212–217]

Jiang YY, Liu J, Xie MC, *et al.* Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019 [J]. *Plant Protection*, 2019a, 45 (6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 等. 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测 [J]. 植物保护, 2019a, 45 (6): 10–19]

Jiang YY, Liu J, Yang JJ, *et al.* Application effect of light trap monitoring for fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in 2019 [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (3): 118–122, 156. [姜玉英, 刘杰, 杨俊杰, 等. 2019年草地贪夜蛾灯诱监测应用效果 [J]. 植物保护, 2020, 46 (3): 118–122, 156]

Jiang YY, Liu J, Zhu XM. Occurrence dynamics and future trends of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) invasion in China [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (2): 33–35. [姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态和未来趋势分析 [J]. 中国植保导刊, 2019b, 39 (2): 33–35]

Jin MH, Shan YX, Li Q, *et al.* A novel Cry1A resistance allele of fall armyworm in the new invaded region [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023a, 244125392–125392.

Jin MH, Shan YX, Peng Y, *et al.* Downregulation of a transcription factor associated with resistance to *Bt* toxin Vip3Aa in the invasive fall armyworm [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023b, 120 (44): e2306932120–e2306932120.

Jin MH, Tao JH, Li Q, *et al.* Genome editing of the *SfABCC2* gene confers resistance to Cry1F toxin from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021,

20 (3): 815−820.

Jin T, Lin YY, Ma GC, *et al.* Oviposition rhythm of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) and its oviposition preference for different substrates [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (3): 99−103. [金涛, 林玉英, 马光昌, 等. 草地贪夜蛾的产卵节律及其对不同介质的产卵选择性 [J]. 植物保护, 2020, 46 (3): 99−103]

Juárez ML, Schöfl G, Vera MT, *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: 182−199.

Kang HM, Wang WT, Wang SS, *et al.* Phase polymorphism of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, based on population density-dependent effects [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (6): 1733−1740. [康慧铭, 王玮彤, 王诗诗, 等. 基于种群密度依赖效应的草地贪夜蛾相多态性研究 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (6): 1733−1740]

Lei CF, Yang J, Wang J, *et al.* Molecular and biological characterization of *Spodoptera frugiperda* multiple nucleopolyhedrovirus field isolate and genotypes from China [J]. *Insects*, 2020, 11 (11): 777.

Li GP, Ji TJ, Sun XX, *et al.* Sensitivity evaluation of the invasive *Spodoptera frugiperda* population in Yunnan Province to five common *Bt* proteins [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (3): 15−20. [李国平, 姬婷婕, 孙小旭, 等. 入侵云南草地贪夜蛾种群对5种常用*Bt*蛋白的敏感性评价 [J]. 植物保护, 2019, 45 (3): 15−20]

Li HR, Xiao YT . Hybridization-driven genomic plasticity enhances the global invasion of fall armyworm [J]. *The Innovation*, 2025, 6 (10): 101047−101047.

Li HR, Liang XY, Peng Y, *et al.* Novel mito-nuclear combinations facilitate the global invasion of a major agricultural crop pest [J]. *Advanced science* (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), 2024a, 11 (34): e2305353.

Li JC, Liu J, Qi GJ, *et al.* Northward migration patterns of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China and their relationships with source populations [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1039−1051. [李建春, 刘杰, 齐国君, 等. 我国草地贪夜蛾北迁格局及其虫源衔接关系 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1039−1051]

Li TW, Lin YJ, Liu JJ, *et al.* Molecular insights into the functional analysis of P450 *CYP321A7* gene in the involvement of detoxification of lambda-cyhalothrin in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2024b, 203106009−106009.

Li XJ, Wu MF, Ma J, *et al.* Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach [J]. *Pest management science*, 2020, 76 (2): 454−463.

Li YY, Wang MQ, Zhang YY, *et al.* Predation capacity of Chrysopa formosa larvae on eggs and early-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (5): 178−184, 197. [李玉艳, 王孟卿, 张莹莹, 等. 丽草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵及低龄幼虫的捕食能力评价 [J]. 植物保护, 2021, 47 (5): 178−184, 197]

Liang MR, Li ZY, Dai QX, *et al.* Lethal effects of four entomopathogenic nematodes on *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Biosafety*, 2020, 29 (2): 82−89. [梁铭荣, 李子园, 戴钎萱, 等. 4种昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用 [J]. 生物安全学报, 2020, 29 (2): 82−89]

Liang P, Gu SH, Zhang L, *et al.* Research progress and prospects on biology, ecology and control of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (5): 624−638. [梁沛, 谷少华, 张雷, 等. 我国草地贪夜蛾的生物学、生态学和防治研究概况与展望 [J]. 昆虫学报, 2020, 63 (5): 624−638]

Liang XY, Zhang L, Li RH, *et al.* Genetic variation in the triosephosphate isomerase gene of the fall armyworm and its distribution across China [J]. *Insect Science*, 2024, 31 (6): 1984−1997.

Lin HF. Research progress on entomogenous fungi [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1998, 3: 43−46. [林华峰. 虫生真菌研究进展 [J]. 安徽农业大学学报, 1998, 3: 43−46]

Liu H, Lan TM, Fang DM, *et al.* Chromosome level draft genomes of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest in China [J]. *bioRxiv*, 2019.

Liu H, Liao YX, Chen ZM, *et al.* Infection characteristics of Heliothis virescens ascovirus 3h strain on fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae and its effects on growth and development [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 875−883. [刘航, 廖用信, 陈壮美, 等. 烟芽夜蛾囊泡病毒3h株对草地贪夜蛾幼虫的感染特性及对其生长发育的影响 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 875−883]

Liu HM, Hu X, Wang YL, *et al.* Screening of *Bacillus thuringiensis* strains with high virulence against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (5): 721−728. [刘华梅, 胡虓, 王应龙, 等. 对草地贪夜蛾高毒力的苏云金杆菌菌株筛选 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (5): 721−728]

Liu J, Jiang YY, Wang JQ, *et al.* Construction and application of a national informatization platform for monitoring and early warning of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1297−1306. [刘杰, 姜玉英, 王建强, 等. 全国草地贪夜蛾监测预警信息化平台建设与应用 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1297−1306]

Liu J, Jiang YY, Wu QL, *et al.* Damage characteristics of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) during winter-spring seasons and occurrence trend analysis for the second half year in China [J]. *China Plant Protection*, 2019a, 39 (7): 36−38, 49. [刘杰, 姜玉英, 吴秋琳, 等. 我国草地贪夜蛾冬春季发生为害特点及下半年发生趋势分析 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (7): 36−38, 49]

Liu J, Xue YX, Zang JC, *et al.* Supplementary survey of entomopathogenic nematode resources in Gansu Province and screening of highly pathogenic nematode strains against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2025, 68 (4): 432−449. [刘佳, 薛银霞, 臧建成, 等. 甘肃省昆虫病原线虫资源补充调查

及对草地贪夜蛾高致病力线虫品系筛选 [J]. 昆虫学报, 2025, 68 (4): 432-449]

Liu LL, He WF, Xu PW, *et al.* Contribution of the transcription factor *SfGATAe* to *Bt* Cry toxin resistance in *Spodoptera frugiperda* through reduction of *ABCC2* expression [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024a, 267 (P1): 131459-131459.

Liu ZK, Wang L, Liu CZ, *et al.* Zirconium based metal-organic framework for emamectin benzoate delivery: Enhanced control efficiency against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and significantly improved biosafety [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505159547-159547.

Liu ZX, Liao CY, Zou LM, *et al.* Retrotransposon-mediated disruption of a chitin synthase gene confers insect resistance to *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa toxin [J]. *PLoS Biology*, 2024b, 22 (7): e3002704.

Lu JB. Resistance Monitoring and Target-site Mutation Detection of Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda*) to Commonly Used Insecticides in Anhui Province [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. [卢静波. 安徽省草地贪夜蛾对常用杀虫剂抗性监测及靶标突变检测 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023]

Lu ZH, Lu K, Li YH, *et al.* Screening and functional validation of the core detoxification genes conferring broad-spectrum response to insecticides in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Pest Management Science*, 2024, 80 (7): 3491-3503.

Luo XT, Wang X, Wu YH, *et al.* Effects of different wavelengths of silicon-based LED on the growth, development, and reproduction of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuoidea) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2025, 118 (3): 1115-1125.

Lv WX, Meng LH, Jiang XF, *et al.* Short photoperiod facilitates seasonal migration in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2025, 118 (5): 2258-2267.

Ma WL, Yang DH, Fan HZ, *et al.* Differences in intraspecific and interspecific competitive behaviors between *Spodoptera frugiperda* and *Mythimna separata* [J]. *Plant Protection*, 2024, 50 (5): 158-170. [马文玲, 杨灯海, 范恒喆, 等. 草地贪夜蛾与东方黏虫的种内及种间斗争行为差异研究 [J]. 植物保护, 2024, 50 (5): 158-170]

Ma YC, Yang DY, Ma ZL, *et al.* Evaluation of monitoring efficacy of different sex pheromones for *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Medicine*, 2024, 3 (2): 58-67. [马永翠, 杨德雁, 马仲炼, 等. 不同性诱剂对草地贪夜蛾的监测效果评价 [J]. 植物医学, 2024, 3 (2): 58-67]

Mao KK, Li HR, Zhu JY, *et al.* Rapid test to detect insecticide resistance in field populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2023, 141254765-1254765.

Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on E-mergency Pesticide Use for Fall Armyworm Control [EB/OL]. (2020-01-03) [2025-08-24]. http://www. moa. gov. cn/nybgb/2019/201907/202001/t20200103_6334251.htm. [农业农村部. 农业农村部办公厅关于做好草地贪夜蛾应急防治用药有关工作的通知[EB/OL]. (2020-01-03) [2025-08-24]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2019/201907/202001/t20200103_6334251.htm]

Murúa MG, Nagoshi RN, dos Santos DA, *et al.* Demonstration using field collections that argentina fall armyworm populations exhibit strain-specific host plant preferences [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108 (5): 2305-2315.

Nagoshi RN, Goergen G, Koffi D, *et al.* Genetic studies of fall armyworm indicate a new introduction into Africa and identify limits to its migratory behavior [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 1941-1941.

Nagoshi RN, Htain NN, Boughton D, *et al.* Southeastern Asia fall armyworms are closely related to populations in Africa and India, consistent with common origin and recent migration [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 1421.

Nagoshi RN. The fall armyworm triose phosphate isomerase (Tpi) gene as a marker of strain identity and interstrain mating [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2010, 103: 283-292.

Nayyar N, Gracy RG, Ashika TR, *et al.* Population structure and genetic diversity of invasive fall armyworm after 2 years of introduction in India [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 7760.

Nguyen DT, Chen YZ, Herron GA. Preliminary characterisation of known pesticide resistance alleles in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in its invasive Australian range [J]. *Austral Entomology*, 2021, 60 (4): 782-790.

Pashley DP, Hammond AM, Hardy TN. Reproductive isolating mechanisms in fall armyworm host strains (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1992, 85: 400-405.

Peng Q, Yi L, Zeng Y, *et al.* Virulence and infection characteristics of *Spodoptera frugiperda* nucleopolyhedrovirus against fall armyworm (S. frugiperda) [J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51 (3): 629-635. [彭倩, 易磊, 曾洋, 等. 草地贪夜蛾核型多角体病毒对草地贪夜蛾的毒力及其侵染特征 [J]. 植物保护学报, 2024, 51 (3): 629-635]

Prowell DP, McMichael M, Silvain JF, *et al.* Multilocus genetic analysis of host use, introgression, and dpeciation in host strains of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2004, 97 (5): 1034-1044.

Qi GJ, Huang DC, Wang L, *et al.* Winter occurrence characteristics and annual breeding areas of *Spodoptera frugiperda* in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020b, 42 (3): 573-582. [齐国君, 黄德超, 王磊, 等. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究 [J]. 环境昆虫学报, 2020b, 42 (3): 573-582]

Qi GJ, Ma J, Hu G, *et al.* Analysis of the migration pathway and weather background of the first invasion of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, into Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 488-496. [齐国君, 马健, 胡高, 等. 首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 488-496]

Qi GJ, Su XN, Zhang YP, *et al.* Research advances in monitoring, early

warning and control of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020a, 47 (12): 109–121. [齐国君, 苏湘宁, 章玉苹, 等. 草地贪夜蛾监测预警与防控研究进展 [J]. 广东农业科学, 2020a, 47 (12): 109–121]

Qin JM, Huang Q, Cai XY, *et al.* Evaluation of predatory capacity of Andrallus spinidens against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023b, 60 (4): 1215–1222. [覃江梅, 黄芊, 蔡晓燕, 等. 侧刺蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食能力评价 [J]. 应用昆虫学报, 2023a, 60 (4): 1215–1222]

Qin JM, Qin W, Cai XY, *et al.* Predation effect of *Oxyopes sertatus* on fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Journal of Plant Protection*, 2023a, 50 (4): 1033–1041. [覃江梅, 覃武, 蔡晓燕, 等. 斜纹猫蛛对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用 [J]. 植物保护学报, 2023b, 50 (4): 1033–1041]

Qin JM, Qin W, Chen HS, *et al.* Discovery of two larval parasitoid wasps of *Spodoptera frugiperda* in Guangxi fields [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (5): 292–296. [覃江梅, 覃武, 陈红松, 等. 广西田间发现2种草地贪夜蛾幼虫寄生蜂 [J]. 植物保护, 2021, 47 (5): 292–296]

Qiu LM, Liu QQ, Chen XQ, *et al.* Predation of *Menochilus sexmaculatus* on early-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (2): 471–477. [邱良妙, 刘其全, 陈秀琴, 等. 六斑月瓢虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食作用 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (2): 471–477]

Qu C, Li B, Wang R, *et al.* Formulation screening and field efficacy evaluation of sex pheromone lures for *Spodoptera frugiperda* [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42 (2): 73–76. [渠成, 李冰, 王然, 等. 草地贪夜蛾性诱剂配方筛选与田间应用效果评价 [J]. 中国植保导刊, 2022, 42 (2): 73–76]

Ren XM, Xu ZW, Zhao B, *et al.* Predation behavior and capacity of *Sycanus croceovittatus* adults on fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Biological Disaster Science*, 2022, 45 (1): 48–52. [任雪敏, 徐志文, 赵斌, 等. 黄带犀猎蝽成虫对草地贪夜蛾幼虫的捕食行为和能力研究 [J]. 生物灾害科学, 2022, 45 (1): 48–52]

Schöfl G, Heckel DG, Groot AT. Time-shifted reproductive behaviours among fall armyworm (Noctuidae: *Spodoptera frugiperda*) host strains: Evidence for differing modes of inheritance [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2009, 22: 1447–1459.

Shi JQ, Wang ZY, Xie HC, *et al.* Behavioral performance of interspecific competition between *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa armigera* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1157–1163. [施建琴, 王振营, 解海翠, 等. 草地贪夜蛾和棉铃虫种间竞争行为表现 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1157–1163]

Shi LL, Li ZY, Lin DM, *et al.* Predation capacity of *Mallada basalis* larvae on eggs and early-instar larvae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2022, 65 (10): 1324–1333. [施琳琳, 李子园, 林丹敏, 等. 黄玛草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食能力 [J]. 昆虫学报, 2022, 65 (10): 1324–1333]

Shi Y, Liu QQ, Lu WJ, *et al.* Divergent amplifications of *CYP9A* cytochrome P450 genes provide two noctuid pests with differential protection against xenobiotics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120 (37): e2308685120.

Shi ZH, Li YZ, Wu SL, *et al.* The complete genome and biological activity of a novel *Spodoptera litura* multiple nucleopolyhedrovirus for controlling *Spodoptera frugiperda* [J]. *Biological Control*, 2024, 188105412.

Shi ZH, Yang YS, Wang YS, *et al.* Preliminary study on laboratory parasitism effect of *Campoletis chlorideae* on fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (6): 1645–1652. [史子涵, 杨艺帅, 王玉生, 等. 棉铃虫齿唇姬蜂对草地贪夜蛾幼虫的室内寄生效果初探 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (6): 1645–1652]

Su XN, Lin XZ, Yu XQ, *et al.* Intraspecific and interspecific competitive behaviors of *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera exigua* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (1): 243–252. [苏湘宁, 林晓珠, 余小强, 等. 草地贪夜蛾与甜菜夜蛾种内和种间的竞争行为 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (1): 243–252]

Sun XL, Chen CC, Li N, *et al.* Potential risk of *Spodoptera frugiperda* transferring to tea plants [J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40 (1): 105–112. [孙晓玲, 陈成聪, 李宁, 等. 草地贪夜蛾有转移危害茶树的可能 [J]. 茶叶科学, 2020, 40 (1): 105–112]

Sun XX, Hu CX, Jia HR, *et al.* Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 664–672.

Sun XX, Zhao SY, Jin MH, *et al.* Spatial distribution pattern and sampling technique of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, larvae in maize fields [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (2): 13–18. [孙小旭, 赵胜园, 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]

Sun ZX, Lu ZH, Xiao TX, *et al.* Genome-wide scanning loci and differentially expressed gene analysis unveils the molecular mechanism of chlorantraniliprole resistance in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71 (38): 14092–14107.

Tai HK, Guo JF, Zhang F, *et al.* Comparative evaluation of six insecticides for field control efficacy against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2025, 62 (2): 473–483. [太红坤, 郭井菲, 张峰, 等. 六种杀虫剂对草地贪夜蛾的田间防控效果比较 [J]. 应用昆虫学报, 2025, 62 (2): 473–483]

Tang JH, Lu H, Lyu BQ. Dynamic monitoring and analysis of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, using high-altitude light trap in Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42 (1): 51–55. [唐继洪, 卢辉, 吕宝乾. 海南草地贪夜蛾高空诱虫灯诱虫动态监测与分析 [J]. 热带农业科学, 2022, 42 (1): 51–55]

Tang JH, Lyu BQ, Lu H, *et al.* Investigation and basic biological observation of parasitic wasps of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Hainan [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41 (6): 1189–1195. [唐继洪, 吕宝乾, 卢辉, 等. 海南草地贪夜蛾

寄生蜂调查与基础生物学观察 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (6): 1189−1195]

Tay WT, Meagher RL, Czepak C, *et al*. *Spodoptera frugiperda*: Ecology, evolution, and management options of an invasive species [J]. *Annual Review of Entomology*, 2023, 68: 299−317.

Tessnow EA, Nagoshi NR, Meagher LR, *et al*. Genomic patterns of strain−specific genetic structure, linkage, and selection across fall armyworm populations [J]. *BMC Genomics*, 2025, 26 (1): 116.

Tian CH, Cao HY, Zhang JY, *et al*. Predatory behavior and functional response of earwigs against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (6): 1160−1165. [田彩红, 曹华毅, 张俊逸, 等. 蠼螋捕食草地贪夜蛾的行为及功能反应 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (6): 1160−1165]

Vives MA, Gastón J. Five new species for the fauna of Spain and other interesting lepidopterological information for Spain and Sudan (Insecta: Lepidoptera) [J]. *SHILAP Revista de Lepidopterología*, 2020, 48 (192): 717−731.

Wang HH, Zhao R, Gao J, *et al*. Genetic architecture and insecticide resistance in Chinese populations of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Pest Science*, 2022, 96 (4): 1595−1610.

Wang J, Yang XX, Wang DD, *et al*. Screening of *Bacillus thuringiensis* strains with high virulence against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) and study on their insecticidal activity [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (4): 660−670. [王建, 杨小雪, 王丹丹, 等. 对草地贪夜蛾高毒力的苏云金芽胞杆菌菌株筛选与杀虫活性研究 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (4): 660−670]

Wang J, Zhang HN, Wang HD, *et al*. Functional validation of cadherin as a receptor of *Bt* toxin Cry1Ac in *Helicoverpa armigera* utilizing the CRISPR/Cas9 system [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2016, 76: 11−17.

Wang SY, Zhang ZT, Xie AT, *et al*. Mutation analysis of insecticide target genes in Chinese populations of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55 (20): 3948−3959. [王帅宇, 张子腾, 谢爱婷, 等. 我国草地贪夜蛾种群杀虫剂靶标基因突变分析 [J]. 中国农业科学, 2022, 55 (20): 3948−3959]

Wang X, Du ZY, Duan YG, *et al*. Population genomics analyses reveal the role of hybridization in the rapid invasion of fall armyworm [J]. *Journal of Advanced Research*, 2024, 74: 43−55..

Wang Y, Li XY, Zhang HM, *et al*. Predatory behavior and capacity of Andrallus spinidens against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (2): 478−486. [王燕, 李向永, 张红梅, 等. 侧刺蝽对草地贪夜蛾的捕食行为和捕食能力 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (2): 478−486]

Wang YH. Evaluation of *Bt* Engineered Strain G033A Product Stability and Field Control Efficacy [D]. *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, 2022. [王宇航. *Bt* 工程菌 G033A 产品稳定性与田间防效评价研究 [D]. 中国农业科学院, 2022]

Wang YN, Zhao SY, He YZ, *et al*. Predation capacity of *Sycanus croceovittatus* against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) under different temperatures [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1207−1214. [王亚楠, 赵胜园, 何运转, 等. 不同温度下黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食能力 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1207−1214]

Wang YN, Zhao SY, He YZ, *et al*. Predation effect of *Sycanus croceovittatus* on fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2020, 36 (4): 525−529. [王亚楠, 赵胜园, 何运转, 等. 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用 [J]. 中国生物防治学报, 2020, 36 (4): 525−529]

Westbrook J, Fleischer S, Jairam S, *et al*. Multigenerational migration of fall armyworm, a pest insect [J]. *Ecosphere*, 2019, 10 (11): e02919.

Westbrook JK, Nagoshi RN, Meagher RL, *et al*. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60 (2): 255−267.

Wolf WW, Sparks AN, Pair SD, *et al*. Radar observations and collections of insects in the gulf of mexico [J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 1986, 221−234.

Wu C, Zhang L, Liao CY, *et al*. Resistance mechanisms of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) to chemical pesticides and *Bt* crops and its management strategies [J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46 (3): 503−513. [吴超, 张磊, 廖重宇, 等. 草地贪夜蛾对化学农药和 *Bt* 作物的抗性机制及其治理技术研究进展 [J]. 植物保护学报, 2019, 46 (3): 503−513]

Wu KM. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (2): 1−5. [吴孔明. 中国草地贪夜蛾的防控策略 [J]. 植物保护, 2020, 46 (2): 1−5]

Wu PX, Wu FM, Fan JY, *et al*. Potential economic impact of invasive fall armyworm on mainly affected crops in China [J]. *Journal of Pest Science*, 2021, 94 (4): 1065−1073.

Wu QL, Jiang YY, Liu Y, *et al*. Migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Northwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55 (10): 1949−1960. [吴秋琳, 姜玉英, 刘媛, 等. 草地贪夜蛾在中国西北地区的迁飞路径 [J]. 中国农业科学, 2022, 55 (10): 1949−1960]

Wu QL, Jiang YY, Wu KM. Analysis of migratory routes of *Spodoptera frugiperda* from Myanmar into China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (2): 1−6, 18. [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, 18]

Wu RS, Wang H, Zhao JC, *et al*. Effect of sex ratio on the life history traits of an important invasive species, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Open Life Sciences*, 2025, 20 (1): 20220873.

Xiao HM, Ye XH, Xu HX, *et al*. The genetic adaptations of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* facilitated its rapid global dispersal and invasion [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2020, 20 (4): 1050−1068.

Xiao YT, Wu KM. Recent progress on the interaction between insects and *Bacillus thuringiensis* crops [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2019, 374 (1767): 20180316.

Xie LL, He Z, Long XZ, *et al*. Investigation on field parasitism of two egg parasitoid wasps of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*,

2022, 48 (1): 265−271. [谢丽玲, 何瞻, 龙秀珍, 等. 两种草地贪夜蛾卵寄生蜂的田间寄生作用调查 [J]. 植物保护, 2022, 48 (1): 265−271]

Xie MH, Zhong YZ, Chen HL, *et al.* Preliminary study on overwintering capacity of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Anhui Province [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (3): 236−241. [谢明惠, 钟永志, 陈浩梁, 等. 草地贪夜蛾在安徽地区越冬能力初探 [J]. 植物保护, 2020, 46 (3): 236−241]

Xu HW, Zhu YM, Xu HZ, *et al.* Functional characterization of an epsilon glutathione S−transferase (*SfGSTe9*) associated with insecticide detoxification in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2025, 208106305−106305.

Xu PJ, Yang LY, Yang XM, *et al.* Novel partiti−like viruses are conditional mutualistic symbionts in their normal lepidopteran host, African armyworm, but parasitic in a novel host, Fall armyworm [J]. *PLoS pathogens*, 2020, 16 (6): e1008467.

Xu PJ, Zhang DD, Wang J, *et al.* Preference of *Spodoptera frugiperda* for maize and tobacco [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 61−64, 90. [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, 90]

Xu TT, Wang YQ, Hu F, *et al.* Sensitivity of different geographic populations of *Spodoptera frugiperda* to *Bt* proteins in Anhui Province [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49 (5): 1521−1527. [徐婷婷, 王月琴, 胡飞, 等. 安徽省不同地理种群草地贪夜蛾对*Bt*蛋白的敏感性 [J]. 植物保护学报, 2022, 49 (5): 1521−1527]

Yan YQ. Evaluation of Resistance of *Bt* soybean to *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda* in North China [D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. [郁亚齐. 华北地区*Bt*大豆对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的抗性评价 [D]. 中国农业科学院, 2024]

Yang HB, Guo SS, Sun YL, *et al.* Adult feeding on different carbohydrates affects the reproduction and flight performance of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of economic entomology*, 2025, 118 (3): 1207−1214.

Yang SQ, Yuan Y, Zhang XW, *et al.* Responses of biological characteristics and detoxification enzymes in the fall armyworm to methoxyfenozide stress [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2025, 118 (2): 846−857.

Yang XM, Song YF, Sun XX, *et al.* Population occurrence of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in the winter season of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19: 2−12.

Yang XM, Sun XX, Zhao SY, *et al.* Occurrence, damage, spatial distribution, and sampling technique of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in wheat fields [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (1): 10−16, 23. [杨现明, 孙小旭, 赵胜园, 等. 小麦田草地贪夜蛾的发生为害、空间分布与抽样技术 [J]. 植物保护, 2020, 46 (1): 10−16, 23]

Yang XM, Wyckhuys K, Jia XP, *et al.* Fall armyworm invasion heightens pesticide expenditure among Chinese smallholder farmers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111949.

You ZY, Zeng T, Liu PP, *et al.* Control efficacy of *Rhynocoris fuscipes* against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) larvae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (6): 1653−1664. [游梓翊, 曾涛, 刘平平, 等. 红彩瑞猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的控害能力 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (6): 1653−1664]

Yu Sj. Induction of detoxification enzymes by triazine herbicides in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2004, 80 (2): 113−122.

Zeng BJ, Ding JH, Xiao YJ, *et al.* Monitoring insecticide resistance and target−site mutations in field populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in China [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2025a, 118 (2): 868−876.

Zeng SC, Zhang HT, Yi J, *et al.* Comparative assessment of a Chinese indigenous entomopathogenic nematode versus a commercial strain for the biological control of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Biological Control*, 2025b, 208105844−105844.

Zhang DD, Wu KM. Resistance evaluation of domestic *Bt*−Cry1Ab and *Bt*− (Cry1Ab+Vip3Aa) maize against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 54−60. [张丹丹, 吴孔明. 国产*Bt*−Cry1Ab和*Bt*−(Cry1Ab+Vip3Aa)玉米对草地贪夜蛾的抗性测定 [J]. 植物保护, 2019, 45 (4): 54−60]

Zhang L, Jin MH, Zhang DD, *et al.* Molecular identification of invasive fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Yunnan [J]. *Plant Protection*, 2019a, 45 (2): 19−24, 56. [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, 2019a, 45 (2): 19−24, 56]

Zhang L, Li ZY, Peng Y, *et al.* Global genomic signature reveals the evolution of fall armyworm in the eastern hemisphere [J]. *Molecular Ecology*, 2023, 32 (20): 5463−5478.

Zhang L, Liang XY, Xiao YT. Genomic perspectives on the evolution of fall armyworm subpopulations [J]. *Genomics Communications*, 2025a, 2: e015.

Zhang L, Liu B, Jiang YY, *et al.* Molecular characterization analysis of biotypes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) populations from different regions in China [J]. *Plant Protection*, 2019b, 45 (4): 20−27. [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, 2019b, 45 (4): 20−27]

Zhang L, Liu B, Zheng WG, *et al.* Genetic structure and insecticide resistance characteristics of fall armyworm populations invading China [J]. M*olecular Ecology Resources*, 2020, 20: 1682−1696.

Zhang Y, Chi HP, Zhang P, *et al.* Effects of low temperature treatment on viability of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J/OL]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 1−14. [张宇, 迟海鹏, 张苹, 等. 低温处理对草地贪夜蛾生存力的影响 [J/OL]. 环境昆虫学报, 2025, 1−14]

Zhang Z, Pang XR , Wang LS, *et al.* Knockout of the *SfVipR1* gene confers high−level resistance to *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa toxin in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Pest Management Science*, 2025c.

Zhang Z, Wu SW, Long Y, *et al.* Identification of *SfABCC2* as the critical receptor for Cry1Fa and Cry1Ab in *Spodoptera frugiperda* via CRISPR−mediated gene knockouts [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2025b, 213, 106526−106526.

Zhang Z, Zheng Q, Zhang YH, *et al*. Cold resistance measurement of laboratory population of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (6): 43–49, 69. [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, 69]

Zhao JF, Zheng Y, Qiu LM, *et al*. Identification and analysis of the overwintering population biotype of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Fujian Province [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (6): 1326–1332. [赵金凤, 郑宇, 邱良妙, 等. 福建省草地贪夜蛾越冬种群生物型鉴定与分析 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (6): 1326–1332]

Zhao JW, Ding XL, Zheng Y, *et al*. Screening and identification of highly pathogenic *Metarhizium* strains against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (4): 1111–1118. [赵建伟, 丁雪玲, 郑宇, 等. 草地贪夜蛾高致病力绿僵菌菌株的筛选与鉴定 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (4): 1111–1118]

Zhao SY, Sun XX, Zhang HW, *et al*. Laboratory evaluation of the control efficacy of common chemical insecticides against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (3): 10–14, 20. [赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 等. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定 [J]. 植物保护, 2019, 45 (3): 10–14, 20]

Zhao X, Zhu KH, Zhang ZT, *et al*. Preliminary evaluation of field control efficacy of *Telenomus remus* against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (1): 74–77. [赵旭, 朱凯辉, 张柱亭, 等. 夜蛾黑卵蜂对草地贪夜蛾田间防效的初步评价 [J]. 植物保护, 2020, 46 (1): 74–77]

Zheng CF, Li S, Wu MY, *et al*. Insecticide binding mode analysis and biological effects of acetylcholinesterase target-site resistance mutations in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2024, 205106164–106164.

Zhou GX, Ma YC, Ren JX, *et al*. Analysis of adult population dynamics and physical control benefits of *Spodoptera frugiperda* in Zhaotong City, Yunnan Province, 2021 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40 (8): 132–139. [周光信, 马永翠, 任佳昕, 等. 云南昭通市2021年草地贪夜蛾成虫种群动态及物理防控效益分析 [J]. 中国农学通报, 2024, 40 (8): 132–139]

Zhou Y, Wu QL, Zhang HW, *et al*. Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 637–645.

Zhou YF. Sensitivity of Different Geographic Populations of *Spodoptera frugiperda* to Four *Bt* Proteins and Sequence Analysis of Their ABCC2 Gene [D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023. [周彦妨. 不同地理种群草地贪夜蛾对四种*Bt*蛋白的敏感性及其ABCC2基因的序列分析 [D]. 中国农业科学院, 2023]