Hans Journal of Agricultural Sciences 农业科学, 2026, 16(11), 1721-1731
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjas
https://doi.org/10.12677/hjas.2026.1611204

Hans汉斯

环境可持续视角下草地贪夜蛾防控策略研究进展

李雪玲[1,2]，金　前[3]

[1]伊犁师范大学生物科学与技术学院，新疆　伊宁
[2]伊犁师范大学新疆薰衣草资源保护与利用重点实验室，新疆　伊宁
[3]伊犁师范大学生物科学与技术学院绿色有机果蔬提质增效技术研究与利用团队，新疆　伊宁

收稿日期：2026年10月12日；录用日期：2026年11月13日；发布日期：2026年11月20日

摘　要

草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)属鳞翅目夜蛾科，是一种起源于西半球的全球性重大迁飞害虫，对我国粮食作物生产构成严重威胁。该虫抗药性强、寄主范围广、隐蔽取食，致使现有防治体系面临严峻挑战。本综述系统梳理了防治该虫的化学杀虫剂研究现状，重点评述甲氧虫酰肼、喹喔啉衍生物、黄酮类衍生物、马钱碱衍生物、γ-氨基丁酸受体拮抗剂及喹啉衍生物等新型化合物的作用机理与应用潜力；归纳了植物源提取物及其活性代谢物(如柠檬苦素类、印楝素、胡椒属黄酮及酰胺类化合物)所展现的拒食、驱避、毒杀、杀卵及生长抑制等环境友好活性，指出其在生物源杀虫剂研发中的潜在价值；总结了苏云金芽胞杆菌、昆虫病原真菌、病毒及寄生性天敌等生物防治因子的应用进展；评述了基于性信息素的监测预警技术在种群动态预测及综合防控决策中的作用。本综述旨在为草地贪夜蛾新型绿色防控技术的研发与可持续治理提供参考。

关键词

草地贪夜蛾，生物防治，化学防治，提取物，代谢物

Advances in Management Strategies for the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda*, from an Environmental Sustainability Perspective

Xueling Li[1,2], Qian Jin[3]

[1]College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining Xinjiang
[2]Key Laboratory for Conservation and Utilization of Xinjiang Lavender Resources, Yili Normal University, Yining Xinjiang

文章引用: 李雪玲, 金前. 环境可持续视角下草地贪夜蛾防控策略研究进展[J]. 农业科学, 2026, 16(11): 1721-1731.
DOI: 10.12677/hjas.2026.1611204

[3]Research and Application Team for Quality Improvement and Efficiency Enhancement of Green Organic Fruits and Vegetables, College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining Xinjiang

Received: October 12, 2026; accepted: November 13, 2026; published: November 20, 2026

Abstract

The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), belongs to the order Lepidoptera and family Noctuidae and is a globally significant migratory pest originating in the Western Hemisphere, posing a severe threat to grain crop production in China. Its strong insecticide resistance, broad host range, and concealed feeding behavior pose formidable challenges to current pest management strategies. This review systematically summarizes the current status of chemical insecticides used against *S. frugiperda*, with particular emphasis on the modes of action and application potential of novel compounds, including methoxyfenozide, quinoxaline derivatives, flavonoid derivatives, matrine derivatives, GABA receptor antagonists, and quinoline derivatives. The environmentally benign activities of plant-derived extracts and their active metabolites, such as limonoids, azadirachtin, piper flavonoids, and amide compounds, including antifeedant, repellent, insecticidal, ovicidal, and growth-inhibitory effects, are comprehensively reviewed, highlighting their potential value in the development of biorational insecticides. Furthermore, recent advances in biological control agents, including Bacillus thuringiensis, entomopathogenic fungi, viruses, and parasitoids, are summarized, and the role of sex-pheromone-based monitoring and early-warning technologies in population dynamics forecasting and integrated pest management decision-making is discussed. This review aims to provide a scientific reference for the development of novel green control technologies and sustainable management of *S. frugiperda*.

Keywords

***Spodoptera frugiperda*, Biological Control, Chemical Control, Extracts, Metabolites**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith))属鳞翅目夜蛾科，是一种起源于美洲的全球性重大迁飞害虫[1]。其幼虫主要取食叶片、嫩梢和幼芽，具有寄主范围广、扩散能力强和隐蔽取食等生物学特性，近年来已相继入侵非洲、印度和中国，对寄主作物造成严重减产与经济损失[2] [3]。长期依赖化学防治不仅加重了环境与健康负担，也诱导该虫抗药性持续增强。此外，其化学敏感性随龄期而异，初孵幼虫对苏云金芽胞杆菌及有机磷、拟除虫菊酯、氨基甲酸酯和新烟碱类杀虫剂更为敏感[4]。基于线粒体 COI 基因的差异，草地贪夜蛾可划分为偏好玉米、高粱和棉花的“玉米型”与偏好水稻及禾本科植物的“水稻型”两种生物型，二者在寄主选择、行为反应及抗药性等方面存在显著差异，其中玉米型的抗药性普遍强于水稻型[5]。系统梳理草地贪夜蛾的防治技术及其研究进展，对于科学制定可持续治理策略具有重要意义。本文综述了用于草地贪夜蛾防治的化学化合物、植物提取物及其活性代谢物、生物制剂与性信息素的研究进展，重点归纳了各类活性成分的有效剂量、构效关系、作用机制及天敌分布等方面的最新成果，旨在为草地贪夜蛾新型绿色防控技术的研发与可持续治理提供科学依据。

2. 化学杀虫剂

自 1940 年以来，化学杀虫剂始终是防治农业害虫的主要手段。然而，草地贪夜蛾幼虫隐匿于叶片之下并覆盖虫粪，使药剂难以接触虫体，化学化合物的持续滥用进一步诱导了抗药性。Carvalho 等报道，巴西草地贪夜蛾种群对有机磷和拟除虫菊酯类的抗性较敏感品系高 18~28 倍[6]，且已对 DDT、环二烯、有机磷、氨基甲酸酯和拟除虫菊酯等多类化合物产生抗性，亟需发掘新型化合物[7]。在此背景下，甲氧虫酰肼作为蜕皮加速化合物(MAC)被开发出来，其结构模拟 20-羟基蜕皮激素，可激动蜕皮激素受体、诱发提前蜕皮致死(图 1(A))，该二酰肼类化合物主要经三龄幼虫口摄入起效[8]。喹喔啉衍生物广泛存在于天然产物中，其衍生物及 N-氧化物可作用于磷酸二酯酶、胆碱酯酶等受体。Rosas-García 等测定五种 N-氧化物衍生物对一龄幼虫的活性，其中 QX5 (图 1(B))经口处理死亡率达 100% [9]。

在新作用靶标方面，γ-氨基丁酸(GABA)受体拮抗剂是颇具潜力的方向。Dent 等筛选出一种吡唑并嘧啶酮先导物，其田间活性较商品化对照高 2~4 倍(图 1(E)) [10]；4,5-二氢吡唑并[1,5-a]喹唑啉衍生物对害虫死亡率可达 79.63%，7-氯-4-(1H-1,2,3-三唑-1-基)喹啉衍生物(图 1(F))对四龄幼虫兼具杀虫、拒食及乙酰胆碱酯酶抑制活性[7] [11]。此外，以色酮为母核的黄酮类衍生物是植物中广泛分布的代谢物，Romanelli 等合成的 9 种 1-(2-羟基苯基)-3-芳基-1,3-丙二酮衍生物(图 1(C))中，卤代衍生物具明显杀虫活性[12]。以苦参(*Sophora flavescens*)和苦豆子(*S. alopecuroides*)中的马钱碱为母体，引入二硫代氨基甲酸酯基团，可在低浓度下显著增强活性(图 1(D)) [13]。

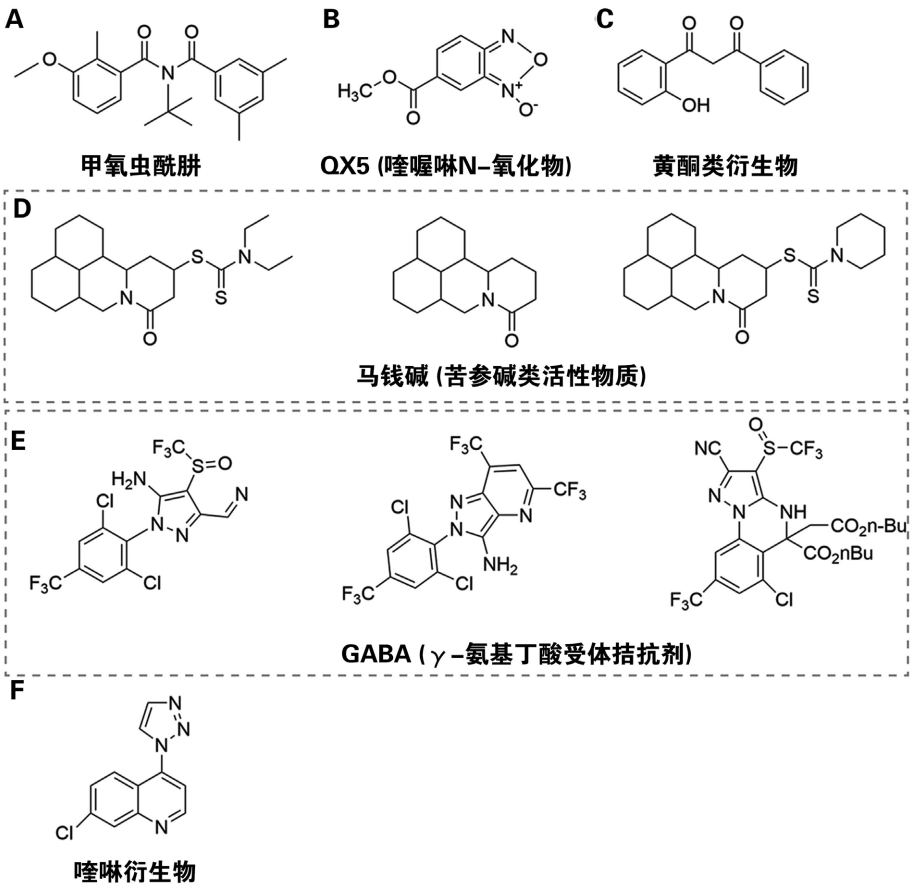


Figure 1. Chemical structures of various chemical insecticides
图 1. 各种化学杀虫剂化学结构式

3. 植物提取物和代谢物

植物通过合成并释放皂苷、单宁、生物碱、二萜和三萜等次生代谢物进行防御，对昆虫产生驱避、拒食、杀卵、毒杀及抑制生殖与生长等多重作用，因高效、廉价、安全而被视为化学农药的重要替代选择[14]。Lizarazo 等测定水、白英和海芋的乙醇及二氯甲烷提取物对玉米型二龄幼虫的活性，2.5 mg/L 二氯甲烷提取物效果最佳，处理 12 天死亡率达 100%、玉米叶取食率低于 4%，其活性成分之一为作用于神经系统和细胞呼吸的类视黄醇[15]。番木瓜种子粉末在 10%和 15%浓度下具杀幼虫活性，其氯仿提取物的杀虫作用与棕榈酸、油酸和硬脂酸有关；甜橙、黎檬种子及果皮中的多酚和多糖则表现出强烈的拒食与抗营养作用[7]。柠檬苦素类化合物是芸香目最具代表性的四环三萜，具 4,4,8-三甲基-17-喃基甾体骨架(图 2(A))，兼具抗真菌、抗菌和杀虫活性。印楝富含萜类与柠檬苦素类，其细胞悬浮液乙醇提取物(2500~30,000 ppm)可致死二龄幼虫；印楝素(图 2(B))与多刺糖多孢菌产生的代谢物在 1000 mg/L 下对 48 h 卵的杀卵死亡率为 12%~31%；香椿属植物中的天然二萜类化合物与槲皮素对初孵幼虫的 LC50 分别低至 8~39 ppm，并可降低蛹重、抑制生长(图 2(C)和图 2(D))。此外，从胡椒地上部分经活性引导分离得到黄酮、酰胺和原儿茶酸等多种成分，其中含硝基苯基的酰胺衍生物活性最高(图 2(E)和图 2(F))；Alves 等发现柳叶番荔枝茎皮提取物对初孵幼虫活性最强(LT50 为 61.4 h、LC50 为 946.5 μg/mL)，代谢组学分析提示其活性与 2,4,5-三甲氧基苯乙烯有关(图 2(G)) [14]；在马拉维种群上的测定表明，10%浓度下烟草和过江藤经口处理二龄幼虫的死亡率最高(均为 66%)，烟草接触毒性为 60% [7]。

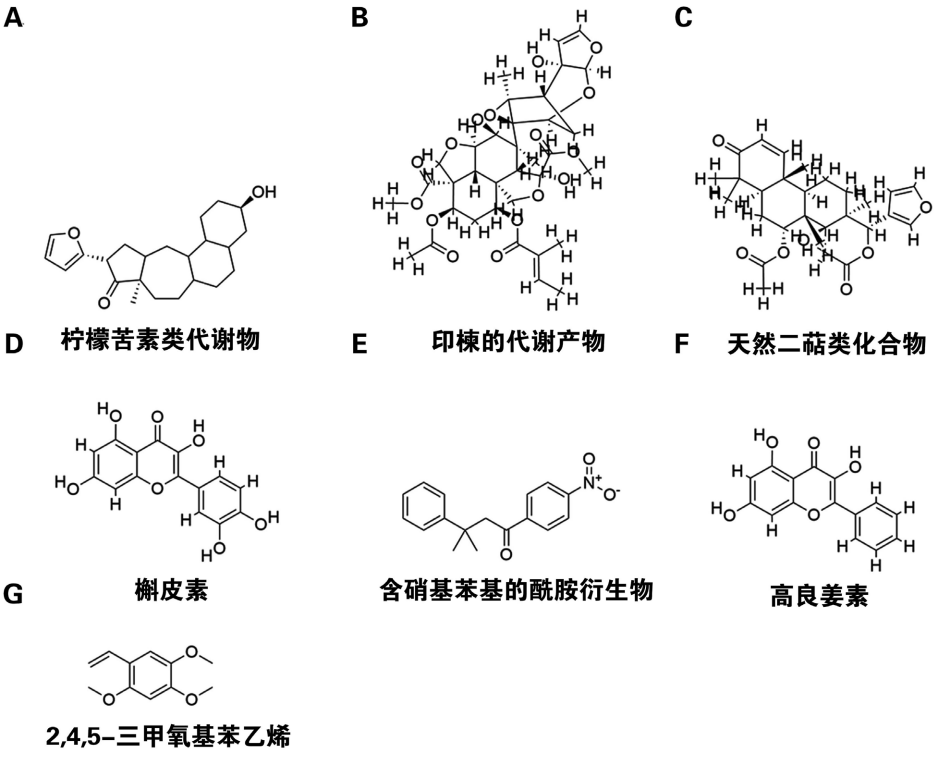


Figure 2. Chemical structures of representative bioactive compounds in plant extracts and their metabolites
图 2. 植物提取物及其代谢物中代表性生物活性化合物的化学结构

4. 生物防治

生物防治利用生物体或其代谢产物进行害虫控制，基于自然界物种间捕食、寄生与竞争等生态关系，

具有环境友好、靶标特异性强等优势，可分为保护型、接种型和淹没型生物防治[16] [17]。细菌防治方面，苏云金芽胞杆菌应用最为广泛，其在指数生长期产生具杀虫活性的晶体蛋白(ICPs)，通过毒杀害虫肠道发挥作用[18]。转基因 Bt 作物已在全球推广，但草地贪夜蛾对 *Cry1Ab*、*Cry2Ab*、*Cry1Fa* 和 *Vip3Aa* 等蛋白的抗性种群已在巴西、阿根廷和美国等地被鉴定[7]。基于 CRISPR/Cas9 技术的研究进一步表明，草地贪夜蛾钙粘蛋白(*SfCad*)不参与 Cry1Ab 和 Cry1Fa 的作用机制[19]。多刺糖多孢菌产生的代谢物会作用于昆虫神经系统，引起肌肉抽搐和僵直，48 小时后致死，已成为防治草地贪夜蛾的重要生物农药[20]。昆虫致病病毒因其高特异性和毒力成为有前景的替代方案，包括核多角体病毒、颗粒病毒、囊泡病毒等，但其在田间对紫外线辐射、温湿度和 pH 值等环境因素的不稳定性限制了应用[7] [21] [22]。真菌防治方面，白僵菌和绿僵菌是最具代表性的昆虫病原真菌。白僵菌分生孢子附着于昆虫表皮后萌发形成穿透菌丝，导致宿主死亡。绿僵菌可侵染 300 余种鞘翅目、鳞翅目和同翅目昆虫，引起绿僵病[23]。菜氏野村菌对草地贪夜蛾幼虫的防治效果达 90%以上，但尚未商品化[23]。近年来，化学杀虫剂与昆虫病原真菌的联合应用显示出协同增效作用，可优化害虫综合治理方案[24]。

寄生性天敌是生物防治的重要组成部分。草地贪夜蛾有超过 100 种寄生蜂，在墨西哥已登记 88 种，包括膜翅目的 *Trichogramma spp.*、*Chelonus spp.*、*Cotesia marginiventris*、*Meteorus laphygmae* 及双翅目的 *Archytas marmoratus* 和 *Lespesia archippivora* 等[7]。*Chelonus insularis* 在墨西哥部分地区寄生率达 86%，是北美最普遍的优势种；在哥伦比亚，*Coelemgilla maculata* 是最常见的捕食性物种[25] [26]。在美国佛罗里达州，*C. marginiventris* 和 *C. insularis* 检出率最高，未处理田块寄生率(44.0% ± 9.6%)显著高于处理田块(15.0% ± 2.5%) [27]。在非洲，*Telenomus remus* 被记录为草地贪夜蛾卵的重要寄生蜂，广泛分布于南非、象牙海岸、尼日尔、贝宁和肯尼亚[28]。在阿根廷，*Campoletis grioti*、*C. insularis* 和 *A. marmoratus* 为常见寄生蜂，其多样性受杀虫剂、栽培措施和气候等因素影响[29]。2019 年末草地贪夜蛾入侵中国后，*T. remus* 已成为主要天敌之一[30]。寄生蜂可寄生卵、幼虫或两者兼有，基于其繁殖性能、寄主选择和扩散能力，可通过人工大量繁殖后以高密度条带(>25,000 卵/m^2)释放于战略区域(每公顷 20~40 个点)，寻找草地贪夜蛾卵或幼虫进行控制。该技术成本低、对水稻型或玉米型生物型无偏好，尤其适用于缺乏关联天敌的新入侵地区(如非洲)，是草地贪夜蛾可持续治理的可行选择[31]。

5. 监测方法

监测是指系统追踪害虫在特定生态系统中所造成侵染的存在、密度、分布与危害程度，旨在为及时采取干预措施、保护作物、维持生态平衡并最大限度降低环境损害提供依据[32]。草地贪夜蛾的监测主要通过灯诱、性信息素诱捕和定期田间巡查三种方式开展。灯诱监测利用草地贪夜蛾成虫的趋光特性进行诱集与监测，尽管其雌雄成虫的单灯捕获率通常低于其他鳞翅目害虫，但近年来灯诱已与其他防控措施相结合，如与“推拉(push-pull)”栽培策略联用——通过种植驱避植物保护主栽作物，可较单纯灯诱捕获更多个体，从而有效阻止成虫进入作物田[33]。性信息素诱捕监测通过释放化学信号在空气中远距离诱集雄虫，具有灵敏度高、操作简便等优点[34]。由于不同地理种群的信息素组成存在明显差异，研究者建议应针对特定区域优化诱芯配方，以保证监测准确性。实践表明，基于性信息素诱捕的监测可有效预测草地贪夜蛾的发生动态，通过雄虫种群变化预判卵和幼虫的出现，从而指导农民合理确定施药时机与次数，避免盲目用药[35]。Cruz 等证实，在玉米田中将性信息素诱捕作为决策工具具有良好可行性：在不施用化学杀虫剂的情况下，卵块早期死亡率可高达 91%；仅当监测到钻蛀危害并捕获至少三龄幼虫时才施药，此时幼虫仍处于三、四龄的敏感阶段，较未监测田块中依据高龄、强抗药性幼虫施药更易取得理想防效[36]。田间巡查是农民根据作物生育期定期查看、搜寻卵块及叶片被害状的常规监测手段，其核心是确定被害株率(%)并据此明确采取防治措施的行动阈值；例如，当幼苗被害株率达 20%时，即认为有必要施用

化学杀虫剂[37]。综上，若将本综述所涉及的各类防治技术与成熟的监测方法在同一区域有机结合，将显著提升整体防控成效。例如，在淹没式防治中，同步化处理可使寄生蜂释放与靶标虫态(卵、幼虫)相吻合，并配合生物合理农药、植物源杀虫剂及生物农药的精准施用，从而在草地贪夜蛾种群达到可能造成重大经济损失的密度之前及时控制其危害[32]。

6. 不同防治策略的协同整合与综合害虫管理

单一防治策略往往难以实现对草地贪夜蛾的持续有效控制，而基于综合害虫管理(Integrated Pest Management, IPM)理念的多策略协同整合已成为该虫可持续治理的核心范式。IPM 强调在充分掌握害虫种群动态、作物生育期及生态环境特征的基础上，优先采用环境友好型措施，将化学防治、生物防治和农业防治等手段有机组合，以最低的环境代价实现最优的防控效果[38]。

化学防治在应急控害中具有速效性强、操作便捷的优势，但长期单一使用易诱导抗性并造成环境污染；植物源农药源于天然次生代谢物，具有多靶标作用机制、低残留和对非靶标生物安全性高等特点，可作为化学农药的有效替代或补充；生物防治利用天敌昆虫、昆虫病原微生物及其代谢产物，具有持续的种群压制效果和良好的生态兼容性，但见效相对缓慢、受环境条件制约较大；性信息素监测则可为上述各类干预措施提供精准的时序决策依据，使防治窗口与害虫最敏感虫期高度吻合。各类防治策略的多维比较如表 1 所示。

Table 1. Multi-dimensional comparison of major management strategies for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*)
表 1. 草地贪夜蛾主要防治策略的多维比较

防治策略	效力	环境友好性	抗性风险	成本	应用便捷性	适用场景
化学杀虫剂	速效、高致死率	较低(非靶标影响、残留)	高(多机制抗性已报道)	中等	高(机械化喷施)	暴发性为害应急防控
植物源农药	中等(拒食、驱避为主)	高(天然降解、低残留)	低(多靶标机制)	中等偏高	中等	中低发生期预防与补充防控
生物防治(Bt/真菌)	中等、持效期长	高(靶标特异性强)	中(Bt 抗性已有报道)	低(规模推广后)	中等	常发区持续种群压制
寄生蜂释放	中等、生态调控	高	极低	较高(初期建体系)	中等	新入侵区及有机农业
性信息素监测	间接(决策支持)	极高	无	低	高	所有种植体系预警与决策
Push-Pull 策略	中高(驱避 + 诱集双重效应)	高	极低	较高(初始设置)	较低(一次设置持续生效)	小农户及间作体系

在不同农业生态系统中，最优防控组合方案存在显著差异。对于大田玉米种植体系，建议以性信息素诱捕监测为先导，结合定期田间巡查确定防治阈值；在幼虫低龄高峰期优先喷施 Bt 制剂或印楝素等生物农药；当虫口密度超出生物防治的控制能力时，再选用甲氧虫酰肼等低毒化学杀虫剂进行应急干预，从而实现“监测先行–生物防控为主–化学药剂兜底”的三级响应模式[31]。对于有机农业或小农户间作体系，“推–拉”策略已被证明是一种行之有效的生态调控方案[33]，在玉米行间种植山蚂蝗(Desmodium spp.)等驱避植物释放挥发性次生代谢物将成虫驱离主栽作物(“推”)，同时在田块周边种植 Napier 草(Pennisetum purpureum)等诱集植物吸引成虫产卵(“拉”)，并借助天敌寄生蜂的自然控制作用实现对草地贪夜蛾种群的持续压制。其作用机理如图 3 所示。

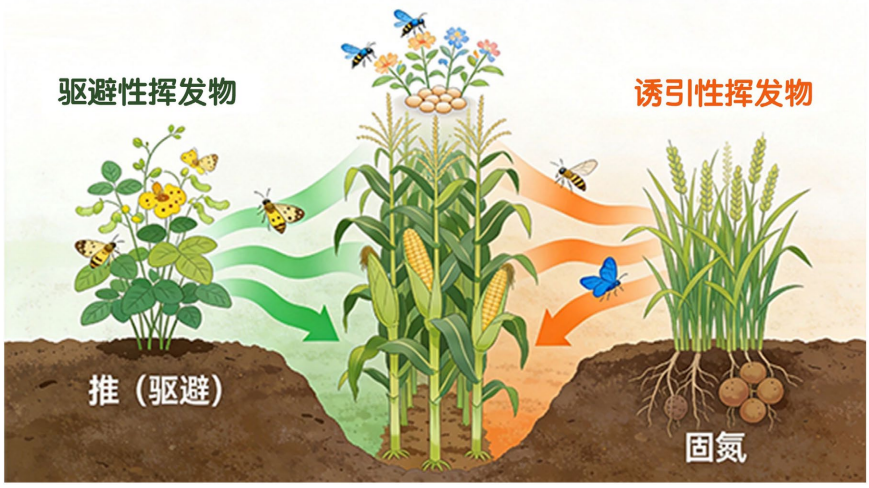


Figure 3. Schematic representation of the underlying mechanism of the push–pull pest management strategy
图 3. “推–拉”(Push-Pull)策略作用机理示意图

此外，寄生蜂的大规模繁殖与田间释放也是 IPM 框架下的重要组成部分。以夜蛾黑卵蜂(*Telenomus remus*)为例，其田间应用流程涵盖室内规模化繁育、质量检测、冷链运输、田间定点释放及种群效果评估等关键环节(图 4)。研究表明，在战略区域以高密度条带方式释放(每公顷 20~40 个释放点)，可有效寄生草地贪夜蛾卵块，尤其适用于缺乏本地关联天敌的新入侵地区[28] [30]。值得强调的是，化学杀虫剂与昆虫病原真菌的联合应用已被证实具有协同增效作用[24]。在 IPM 框架下，这种联合策略可在不显著提高化学药剂用量的前提下增强对高龄幼虫的防效，同时降低对非靶标节肢动物的杀伤，有利于维护田间天敌群落多样性。因此，未来的草地贪夜蛾防控策略应以 IPM 理念为核心，依据不同农业生态系统的资源禀赋和害虫发生规律，因地制宜地组合化学、生物、植物源和农业生态调控手段，构建以监测预警为基础、以绿色防控为主体的可持续治理技术体系。



Figure 4. Schematic workflow of field release and practical application of parasitoid wasps
图 4. 寄生蜂田间释放与应用流程示意图

7. 前沿防控技术进展

近年来，以 RNA 干扰(RNAi)和 CRISPR/Cas9 基因编辑为代表的新一代分子生物技术为草地贪夜蛾的精准防控开辟了全新路径，展现出传统化学农药难以比拟的靶标特异性和环境安全性。RNAi 技术通过

向害虫导入双链 RNA (dsRNA)，特异性地沉默其关键功能基因，从而实现精准的分子水平防控。研究表明，靶向草地贪夜蛾几丁质合成酶基因(SfCHS1)的 dsRNA 经口饲喂后可导致幼虫表皮畸形、蜕皮障碍，死亡率显著提高[39]；靶向 V-ATPase 亚基基因和肌动蛋白基因的 dsRNA 同样表现出显著的致死效应[40]。然而，dsRNA 在田间的稳定性差、易被核酸酶快速降解是制约其实际应用的主要瓶颈。近年来，基于纳米载体(如层状双氢氧化物纳米片、壳聚糖纳米颗粒)的 dsRNA 递送系统可有效延长 dsRNA 在叶面的持留时间，并提高害虫取食效率，为 RNAi 生物农药的田间应用提供了新思路[41]。CRISPR/Cas9 基因编辑技术在草地贪夜蛾中的成功应用为害虫功能基因组学研究和新型防控工具开发提供了强大的分子平台。利用该技术，研究者已成功实现了草地贪夜蛾卵色基因的敲除和嗅觉受体基因的功能鉴定[42]；基于 CRISPR/Cas9 的研究还进一步揭示了钙粘蛋白(SfCad)不参与 Cry1Ab 和 Cry1Fa 的作用机制，为解析 Bt 抗性机理提供了直接证据[19]。此外，利用 CRISPR 技术对昆虫病原真菌(如绿僵菌)进行遗传改造，过表达特定毒力基因，可显著增强其对草地贪夜蛾的杀虫活性，为开发下一代工程化微生物杀虫剂奠定了基础[43]。

8. 未来研究方向

基于本综述的系统梳理与分析，未来草地贪夜蛾可持续防控研究应重点聚焦以下四个方向：(1) 利用宏基因组学技术发掘本土高效的昆虫病原微生物资源。从草地贪夜蛾入侵地土壤中系统采集和筛选本土昆虫病原细菌、真菌和病毒资源，结合宏基因组学和培养组学等手段解析其多样性与杀蛀活性，通过体外生测和田间验证评估其应用潜力，为生物农药研发提供新的菌株资源。(2) 开发基于挥发物的早期为害预警技术。利用气相色谱－质谱联用(GC-MS)和电化学传感器技术，系统鉴定草地贪夜蛾取食诱导的植物挥发物标记物，开发基于挥发性有机化合物(VOCs)的实时田间监测装置，实现虫害早期诊断与预警。(3) 深入解析草地贪夜蛾对 Bt 蛋白和新型化学杀虫剂的代谢抗性机制。结合转录组学、蛋白质组学和代谢组学等多组学手段，系统阐明该虫对 Cry 蛋白、Vip 蛋白及新型作用靶标化合物的代谢解毒途径和靶标位点突变机制，为抗性监测和治理策略的制定提供分子依据。(4) 评估气候变化对种群动态和适生区分布的影响。利用物种分布模型(SDMs)预测不同气候情景下草地贪夜蛾在中国及全球的扩散趋势与适生区变化，特别是评估伊犁河谷等边疆玉米产区面临的潜在风险，为跨境和区域防控策略的前瞻性部署提供科学依据。

9. 结论与展望

综上所述，草地贪夜蛾的防控已形成化学防治、植物源农药与生物防治相结合的多元策略体系。然而，该虫极强的环境适应性和抗药性不仅制约着防治成效，也持续推动其地理扩散，给防控带来长期挑战。化学防治在应急控害中仍具有不可替代的地位，但开发作用机制新颖、毒性低且在低剂量下保持高效的杀虫化合物依然是当务之急；其中，以 GABA 受体拮抗剂为代表的氟虫腈类化合物最具发展潜力，凸显了针对该虫特异性靶标酶设计抑制剂的现实需求。天然产物虽通常需在较高浓度下才表现出理想活性，却为合成或半合成新型杀虫活性物质提供了重要的结构模板与思路，合成酰胺、柠檬苦素类衍生物等即是典型例证。以 Bt 作物为代表的生物防治在草地贪夜蛾治理中成效显著，而通过聚合多个杀虫蛋白基因开发第二代 Bt 作物、解析其他微生物的作用机制等研究仍在持续深入；寄生蜂在不同区域的害虫综合治理中亦发挥着关键作用，其优势类群呈现明显的地理分异，美国和墨西哥北部以 *Chelonus* 属为主，中南美洲以 *Trichogramma* 属为主，而在草地贪夜蛾新近扩散的非传统分布区(如巴西)，*Telenomus remus* 则占据主导。就伊犁河谷而言，玉米是当地重要的粮食与饲粮作物，种植规模大、生育期集中，且河谷气候温凉湿润、灌溉条件良好，一旦草地贪夜蛾定殖，极易在连片玉米田内迅速暴发。因此，应立足本

地生产实际，将上述策略与新疆玉米种植制度有机衔接：一方面加强性信息素监测与田间普查，依托边境与迁飞通道构建早期预警网络，把握三、四龄敏感虫期精准施药；另一方面优先推广 Bt 制剂、昆虫病原真菌和寄生蜂等环境友好措施，并以苦楝、印楝等植物源农药为补充，减少化学农药用量、延缓抗性产生。未来仍需持续改进、设计并开发新型防治策略，在与监测手段深度融合的基础上，为不同作物提供更高效的防控选择，最终构建起适应伊犁玉米产业、兼具防效与生态友好性的草地贪夜蛾可持续治理体系。此外，RNAi 和 CRISPR/Cas9 等前沿分子技术为草地贪夜蛾的精准防控提供了全新工具，未来应着力推进这些技术从实验室走向田间应用。在监测预警层面，应积极开发基于挥发性有机化合物的早期为害诊断技术，结合遥感与气象数据构建智能化的种群预测模型，实现从被动应对到主动预警的范式转变。最终，通过多策略协同整合、多尺度监测预警和多学科交叉融合，构建起适应不同农业生态系统的草地贪夜蛾可持续治理技术体系，为保障国家粮食安全和农业生态安全提供坚实科技支撑。

基金项目

伊犁师范大学校级项目(2023YSQN003)。

参考文献

[1] Montezano, D.G., Specht, A., Sosa-Gómez, D.R., Roque-Specht, V.F., Sousa-Silva, J.C., Paula-Moraes, S.V., *et al*. (2018) Host Plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, **26**, 286-300. https://doi.org/10.4001/003.026.0286

[2] 汤怀武, 梁艳辉. 草地贪夜蛾防控技术[J]. 农业知识, 2022(6): 23-25.

[3] 吴孔明. 草地贪夜蛾防控手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.

[4] Yang, X.M., Song, Y.F., Sun, X.X., *et al*. (2021) Population Occurrence of the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in the Winter Season of China. *Journal of Integrative Agriculture*, **20**, 772-782. https://doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63292-0

[5] Groot, A.T., Marr, M., Schöfl, G., Lorenz, S., Svatos, A. and Heckel, D.G. (2008) Host Strain Specific Sex Pheromone Variation in *Spodoptera frugiperda*. *Frontiers in Zoology*, **5**, Article 20. https://doi.org/10.1186/1742-9994-5-20

[6] Carvalho, R.A., Omoto, C., Field, L.M., Williamson, M.S. and Bass, C. (2013) Investigating the Molecular Mechanisms of Organophosphate and Pyrethroid Resistance in the Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*. *PLOS ONE*, **8**, e62268. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062268

[7] Paredes-Sánchez, F.A., Rivera, G., Bocanegra-García, V., Martínez-Padrón, H.Y., Berrones-Morales, M., Niño-García, N., *et al*. (2021) Advances in Control Strategies against *Spodoptera frugiperda*. A Review. *Molecules*, **26**, Article 5587. https://doi.org/10.3390/molecules26185587

[8] Zamora, M.C., Martínez, A.M., Nieto, M.S., *et al*. (2008) Activity of Several Biorational Insecticides against the Fall Armyworm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, **31**, 351-357.

[9] Rosas-García, N.M., Herrera-Mayorga, V., Mireles-Martínez, M., Villegas-Mendoza, J.M. and Rivera, G. (2014) Toxic Activity of n-Oxide Derivatives against Three Mexican Populations of *Spodoptera frugiperda*. *Southwestern Entomologist*, **39**, 717-726. https://doi.org/10.3958/059.039.0403.

[10] Dent, W.H., Pobanz, M.A., Geng, C., Sparks, T.C., Watson, G.B., Letherer, T.J., *et al*. (2016) Discovery of the Aryl Heterocyclic Amine Insecticides: Synthesis, Insecticidal Activity, Field Results, Mode of Action and Bioavailability of a Leading Field Candidate. *Pest Management Science*, **73**, 774-781. https://doi.org/10.1002/ps.4431

[11] Jiang, X., Yang, S., Yan, Y., Lin, F., Zhang, L., Zhao, W., *et al*. (2020) Design, Synthesis, and Insecticidal Activity of 5,5-Disubstituted 4,5-Dihydropyrazolo[1,5-a]quinazolines as Novel Antagonists of GABA Receptors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **68**, 15005-15014. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02462

[12] Romanelli, G.P., Virla, E.G., Duchowicz, P.R., Gaddi, A.L., Ruiz, D.M., Bennardi, D.O., *et al*. (2010) Sustainable Synthesis of Flavonoid Derivatives, QSAR Study and Insecticidal Activity against the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lep.: Noctuidae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 6290-6295. https://doi.org/10.1021/jf100073j

[13] He, H., Qin, X., Dong, F., Ye, J., Xu, C., Zhang, H., *et al*. (2020) Synthesis, Characterization of Two Matrine Derivatives and Their Cytotoxic Effect on Sf9 Cell of *Spodoptera frugiperda*. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 17999. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75053-1

[14] Alves, D.S., Machado, A.R.T., Campos, V.A.C., Oliveira, D.F. and Carvalho, G.A. (2016) Selection of Annonaceae Species for the Control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and Metabolic Profiling of *Duguetia lanceolata* Using Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Journal of Economic Entomology*, **109**, 649-659. https://doi.org/10.1093/jee/tov396

[15] Lizarazo, K., Mendoza, C. and Carrero, R. (2008) Effect of Plant Extracts of Polygonum Hydropiperoides, *Solanum nigrum* and *Calliandra pittieri* in *Spodoptera frugiperda*. *Agronomía Colombiana*, **26**, 427-434.

[16] Fontes, E.M.G. and Laumann, R. (2019) Special Section on Biological Control. *Neotropical Entomology*, **48**, 873-874. https://doi.org/10.1007/s13744-019-00745-x

[17] Stenberg, J.A., Sundh, I., Becher, P.G., Björkman, C., Dubey, M., Egan, P.A., *et al*. (2021) When Is It Biological Control? A Framework of Definitions, Mechanisms, and Classifications. *Journal of Pest Science*, **94**, 665-676. https://doi.org/10.1007/s10340-021-01354-7

[18] Ramrez-Lepe, M. and Ramrez-Suero, M. (2012) Biological Control of Mosquito Larvae by Bacillus Thuringiensis Subsp. Israelensis. In: *Insecticides—Pest Engineering*, InTech, 239-264. https://doi.org/10.5772/29139

[19] Zhang, J., Jin, M., Yang, Y., Liu, L., Yang, Y., Gómez, I., *et al*. (2020) The Cadherin Protein Is Not Involved in Susceptibility to Bacillus Thuringiensis Cry1ab or Cry1fa Toxins in *Spodoptera frugiperda*. *Toxins*, **12**, Article 375. https://doi.org/10.3390/toxins12060375

[20] Williams, T., Cisneros, J., Penagos, D.I., Valle, J. and Tamez-Guerra, P. (2004) Ultralow Rates of Spinosad in Phagostimulant Granules Provide Control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Maize. *Journal of Economic Entomology*, **97**, 422-428. https://doi.org/10.1603/0022-0493-97.2.422

[21] Schroeder, L., Mar, T.B., Haynes, J.R., Wang, R., Wempe, L. and Goodin, M.M. (2019) Host Range and Population Survey of *Spodoptera frugiperda* Rhabdovirus. *Journal of Virology*, **93**, 10.1128/jvi.02028-18. https://doi.org/10.1128/jvi.02028-18

[22] Pidre, M.L., Sabalette, K.B., Romanowski, V. and Ferrelli, M.L. (2019) Identification of an Argentinean Isolate of *Spodoptera frugiperda* Granulovirus. *Revista Argentina de Microbiología*, **51**, 381-385. https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.10.003

[23] Lezama, R., Molina, J., López, M., *et al*. (2005) Effect of Entomopathogen Fungus Metarhizium Anisopliae on the Control of the Cogollero Corn Worm in the Field. *Avances en Investigación Agropecuaria*, **9**, 1-6.

[24] Rivero-Borja, M., Guzmán-Franco, A.W., Rodríguez-Leyva, E., Santillán-Ortega, C. and Pérez-Panduro, A. (2018) Interaction of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* with Chlorpyrifos Ethyl and Spinosad in *Spodoptera frugiperda* Larvae. *Pest Management Science*, **74**, 2047-2052. https://doi.org/10.1002/ps.4884

[25] Murillo, H. (2014) Predation of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) Eggs in Cotton and Corn in El Espinal, Tolitna, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, **40**, 63-66. https://doi.org/10.1177/012004881404000111

[26] Molina-Ochoa, J., Carpenter, J.E., Heinrichs, E.A., *et al*. (2003) Parasitoids and Parasites of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas and Caribbean Basin: An Inventory. *Florida Entomologist*, **86**, 254-289.

[27] Meagher, R.L., Nuessly, G.S., Nagoshi, R.N. and Hay-Roe, M.M. (2016) Parasitoids Attacking Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Sweet Corn Habitats. *Biological Control*, **95**, 66-72. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.01.006

[28] Kenis, M., du Plessis, H., Van den Berg, J., Ba, M., Goergen, G., Kwadjo, K., *et al*. (2019) *Telenomus remus*, a Candidate Parasitoid for the Biological Control of *Spodoptera frugiperda* in Africa, Is Already Present on the Continent. *Insects*, **10**, Article 92. https://doi.org/10.3390/insects10040092

[29] Murúa, M.G., Molina-Ochoa, J. and Fidalgo, P. (2009) Natural Distribution of Parasitoids of Larvae of the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Argentina. *Journal of Insect Science*, **9**, 1-17. https://doi.org/10.1673/031.009.2001

[30] Chen, W., Li, Y., Wang, M., Mao, J. and Zhang, L. (2021) Evaluating the Potential of Using *Spodoptera litura* Eggs for Mass-Rearing *Telenomus remus*, a Promising Egg Parasitoid of *Spodoptera frugiperda*. *Insects*, **12**, Article 384. https://doi.org/10.3390/insects12050384

[31] Harrison, R.D., Thierfelder, C., Baudron, F., Chinwada, P., Midega, C., Schaffner, U., *et al*. (2019) Agro-Ecological Options for Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith) Management: Providing Low-Cost, Smallholder Friendly Solutions to an Invasive Pest. *Journal of Environmental Management*, **243**, 318-330. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.011

[32] Prasanna, B., Huesing, J.E., Eddy, R., *et al*. (2018) Fall Armyworm in Africa: A Guide for Integrated Pest Management. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:90981205

[33] Liu, Y.J., Zhang, D.D., Yang, L.Y., *et al*. (2021) Analysis of Phototactic Responses in *Spodoptera frugiperda* Using Helicoverpa Armigera as Control. *Journal of Integrative Agriculture*, **20**, 821-828. https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62863-7

[34] Gebreziher, H.G. and Gebreziher, F.G. (2020) Effect of Integrating Night-Time Light Traps and Push-Pull Method on Monitoring and Deterring Adult Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda)*. *International Journal of Entomology Research*, **5**, 28-32.

[35] Guerrero, A., Malo, E.A., Coll, J. and Quero, C. (2014) Semiochemical and Natural Product-Based Approaches to Control Spodoptera Spp. (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Pest Science*, **87**, 231-247. https://doi.org/10.1007/s10340-013-0533-7

[36] Cruz, I., Figueiredo, M.D.L.C., Silva, R.B.D., Silva, I.F.D., Paula, C.d. and Foster, J.E. (2012) Using Sex Pheromone Traps in the Decision-Making Process for Pesticide Application against Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda* [Smith] [Lepidoptera: Noctuidae]) Larvae in Maize. *International Journal of Pest Management*, **58**, 83-90. https://doi.org/10.1080/09670874.2012.655702

[37] Tepa-Yotto, G.T., Tonnang, H.E.Z., Goergen, G., Subramanian, S., Kimathi, E., Abdel-Rahman, E.M., *et al*. (2021) Global Habitat Suitability of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera, Noctuidae): Key Parasitoids Considered for Its Biological Control. *Insects*, **12**, Article 273. https://doi.org/10.3390/insects12040273

[38] Peshin, R., Bandral, R.S., Zhang, W., Wilson, L. and Dhawan, A.K. (2009) Integrated Pest Management: A Global Overview of History, Programs and Adoption. In: *Integrated Pest Management*: *Innovation-Development Process*, Springer, 1-49. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3_1

[39] Lu, J. and Shen, J. (2024) Target Genes for RNAi in Pest Control: A Comprehensive Overview. *Entomologia Generalis*, **44**, 95-114. https://doi.org/10.1127/entomologia/2023/2207

[40] Muthusamy, R., Ramkumar, G., Senthil-Nathan, S., Prabhu, N. and Madhiyalagan, N. (2026) Gene Silencing Strategy for Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda*) Control Utilizing dsRNA Targeting vATPase. *Phytoparasitica*, **54**, Article No. 51. https://doi.org/10.1007/s12600-026-01366-y

[41] Ma, Z.Z., Cao, L.J., Chen, J.C., *et al*. (2024) A Nanocarrier-Mediated dsRNA Oral Delivery Enhances RNAi Efficiency in Thrips. *Entomologia Generalis*, **44**, 601-611. https://doi.org/10.1127/entomologia/2024/2388

[42] Han, W.K., Tang, F.X., Gao, H.L., *et al*. (2023) Co-CRISPR: A Valuable Toolkit for Mutation Enrichment in the Gene Editing of *Spodoptera frugiperda*. *Insect Science*, **30**, 625-636. https://doi.org/10.1111/1744-7917.13122

[43] Wei, J., Jiang, C., Chen, Y., Yang, X. and Li, Q. (2025) Functional Characterization of Hsk1 and Chit1 Genes in the Virulence of *Metarhizium guizhouense* Xct1 via CRISPR-Cas9-Mediated Gene Editing. *Pest Management Science*, **82**, 3625-3639. https://doi.org/10.1002/ps.70484