

草地贪夜蛾迁飞行为与监测技术研究进展

江幸福*, 张蕾, 程云霞, 宋琳琳

(植物病虫害生物学国家重点实验室, 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 原产于美洲的热带和亚热带地区, 广泛分布于美洲大陆。2016 年入侵到非洲, 迅速蔓延到撒哈拉以南的整个区域。2018 年入侵到印度。联合国粮农组织 (FAO) 发出警告, 草地贪夜蛾很有可能从印度蔓延到东南亚及中国南部为主的亚洲地区。为掌握草地贪夜蛾在国外的发生与迁飞为害规律, 加强我国对草地贪夜蛾的入侵控制和监测预警, 本文综述了草地贪夜蛾在美国、加勒比海国家、墨西哥以及非洲国家的迁飞行为规律、性诱剂、灯光诱捕以及迁飞路径的分子鉴定等监测预警技术的研究进展, 从而为我国植保人员对该虫的监测提供技术指导。针对草地贪夜蛾在世界范围内的迁飞规律和入侵特点, 结合我国农作物种植结构以及气候特点, 提出加强对草地贪夜蛾的监测与检疫的建议。

关键词 草地贪夜蛾(秋黏虫); 迁飞规律; 监测技术; 检疫

中图分类号: S 433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018512

Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)

JIANG Xingfu, ZHANG Lei, CHENG Yunxia, SONG Linlin

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), is native to tropical and subtropical regions of the Americas and widely distributed in the American continent. It invaded Africa in 2016 and thereafter spread rapidly to the entire sub-Saharan region. In 2018, it was firstly reported in India. Food and Agriculture Organization (FAO) has warned that the species is likely to spread from India to Southeast Asia and southern part of China. To better understand the occurrence and migration of this species in the world, as well as to strengthen its monitoring and early warning technologies and invasion control in China, the research advances in the migration, sex pheromone trap, light trap and molecular identification of migrant population source of the fall armyworm in America, Caribbean, Mexico and African countries were summarized; we hope this review will provide some technical guidance for monitoring the species invading China. Finally, according to the features of migration and damage caused by the fall armyworm in the world, combined with the planting structure of crops and climate characteristics in China, we put forward some suggestions for strengthening the monitoring and quarantine of the fall armyworm in China.

Key words *Spodoptera frugiperda*; feature of migration; monitoring technology; quarantine

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 又名秋黏虫(英文名 fall armyworm), 是一种典型的远距离迁飞害虫^[1-2], 可为害粮食作物(玉米、水稻和麦类等)、经济作物(果树、蔬菜、花卉、棉花和花生等)以及绿肥(黑麦草等)等 80 多种植物。原产于美洲热带和亚热带地区, 广泛分布于美洲大陆, 是当地重要的农业害虫。2016 年在非洲尼日利亚和加纳首次发现草地贪夜蛾入侵, 目前已蔓延至撒哈拉以南的

非洲大陆大部分地区, 造成非洲国家的玉米产量损失达 20%~50%^[3]。根据草地贪夜蛾的生物学习性, 结合全球范围内不同区域的物候学特征分析表明, 南亚、东南亚和澳大利亚的气候条件也适合草地贪夜蛾生存定殖^[3]。2018 年, 印度首次报道草地贪夜蛾在印度的卡纳塔克邦发生与为害后, 随即在印度的其他 5 个邦也发现有其为害, 与印度气候相似的东南亚国家也面临草地贪夜蛾入侵的潜在重大威

收稿日期: 2018-12-14

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201403031); 国家自然科学基金(31672019, 31871951); 国家重点研发计划(2017YFD0201701, 2017YFD0201802); 国家绿肥产业技术体系(CARS-22); 北京市自然科学基金(6172030)

* 通信作者 E-mail: xfjiang@ippcaas.cn

胁^[4-5]。我国与印度接壤,南部地区处于热带或亚热带气候,种植的农作物适宜草地贪夜蛾取食为害,是草地贪夜蛾入侵风险较高的国家^[3,6]。联合国粮农组织(FAO)发出警告,草地贪夜蛾很有可能从印度蔓延到东南亚及中国南部为主的亚洲地区^[7]。一旦草地贪夜蛾入侵我国,不仅会在我国南部地区定殖为害,而且其远距离迁飞行为将会造成其在我国南北广大地区迁飞为害,严重威胁我国农业生产和粮食安全。

为应对草地贪夜蛾有可能入侵我国造成危害,加强风险控制,本文综述了草地贪夜蛾的迁飞行为习性、其在全球范围内的远距离迁飞规律,以及主要监测预警技术的研究进展,旨在帮助我国植保技术人员加强对草地贪夜蛾的监测与早期预警,有效防范草地贪夜蛾的入侵为害。

1 草地贪夜蛾迁飞行为研究进展

1.1 飞行行为与飞行生理

利用昆虫飞行磨吊飞系统对草地贪夜蛾的飞行行为及其飞行能源物质利用的研究表明,草地贪夜蛾的飞行能力很强。室内吊飞下平均飞行速度可达 3 km/h 左右。草地贪夜蛾飞行过程中动用的飞行能源物质为糖类和脂类,特别是甘油三酯是成虫飞行主要的能源物质^[8-9]。在田间,通常是在傍晚时分的玉米地或其他作物地旁,草地贪夜蛾通常在风的作用下起飞到几米高的空中。飞行方向通常是逆风或与风向成一定角度飞行,夜间迁飞飞行的高度通常集中在大气边界层顶 600 m 左右的高空^[10]。

1.2 迁飞的证据

尽管草地贪夜蛾并没有像东方黏虫 *Mythimna separata*^[11] 和帝王蝶 *Danaus plexippus*^[12] 那样有最直接的标记-释放-回收试验证明其远距离迁飞行为,但通过对其阶梯式季节性种群动态调查、气象轨迹分析、墨西哥湾海捕以及种群遗传学等方面的研究,系统地证明了草地贪夜蛾是一种远距离迁飞害虫。

阶梯式季节性种群发生:根据草地贪夜蛾无滞育特性以及田间耐低温能力,已经明确其在美国只能在德克萨斯和佛罗里达州的南部地区才能越冬。通过对美国不同纬度地区虫情调查发现,每年春季越冬代草地贪夜蛾可向北飞行大约 480 km 产卵为害,下一代羽化出的成虫继续向北飞行。这样每隔一个月左右产下的后代可继续向北迁飞,到秋季草地贪夜蛾就会在美国中东部大部分地区甚至迁飞到加拿大的魁北克和安大略省发生为害,最远的继代迁飞距

离可达 1 700 km^[13],但每年的风场和寄主植物也会影响草地贪夜蛾向北迁飞飞行的具体位置^[2,14]。

轨迹分析:Rose 等^[15]报道了美国草地贪夜蛾的一次远距离迁飞行为。1973 年 9 月,草地贪夜蛾突然在加拿大的苏圣玛丽发生为害,应用轨迹分析回推法分析表明,这批草地贪夜蛾很可能来自美国的密西西比州。因为当年 8 月份的最后两周密西西比地区黑光灯下草地贪夜蛾种群数量非常大,且当时天气条件有利于草地贪夜蛾向北迁飞。轨迹分析还表明,如果天气条件适宜,草地贪夜蛾将会在 30 h 内迁飞距离达 1 600 km,这说明草地贪夜蛾具有很强的迁飞能力。

跨越墨西哥湾(海捕试验):草地贪夜蛾在美国东部大发生时,这些虫源通常被认为来自墨西哥和西印度群岛^[16],这意味着草地贪夜蛾能够跨越墨西哥湾。海捕试验确实证明了春季草地贪夜蛾可以跨越墨西哥湾向北迁飞,而秋季也能跨越海湾向热带地区回迁,部分年份在墨西哥湾捕捉到草地贪夜蛾的地点离陆地有 200 km 以上^[17]。Baust 等开展的一次海捕试验表明,1978 年 10 月 1 日晚,在德克萨斯州加尔维斯顿东南 160 km 的一个石油平台上捕捉到 1 头草地贪夜蛾,还发现有大量的草地贪夜蛾在这个平台上休息至少 2 h 后飞走了^[17]。这说明草地贪夜蛾在跨越墨西哥湾过程中可利用石油平台休息后再继续跨海飞行。Spark 等报道从 1973 年 9 月到 10 月期间就在离海岸不同距离的 4 个石油平台上的黑光灯下捕捉到包括草地贪夜蛾在内的 177 种昆虫,最远的平台离海岸有 160 km^[18]。另外,美国路易斯安那州立大学昆虫迁飞专家 Johnson 研究团队也于 1983—1984 年陆续在墨西哥湾多次海捕到草地贪夜蛾^[2]。

种群遗传学:种群遗传标记能够很好地鉴定出昆虫虫源关系,以便分析其迁飞与基因交流之间的关系。Johnson^[2]研究团队早期应用同工酶标记系统研究了来自西半球的加勒比地区不同地理种群的草地贪夜蛾遗传结构。结果表明遗传差异主要存在于草地贪夜蛾不同的寄主型(或寄主品系:玉米型 CS 和水稻型 RS),而在相同的寄主型内的种群遗传差异不明显。这也在一定程度上说明了草地贪夜蛾的远距离迁飞行为习性导致基因交流频繁,不同地理种群间遗传差异不明显。

1.3 在美国的迁飞

1797 年,美国的两位科学家 Smith 和 Abbot 首次在上报道草地贪夜蛾在佐治亚州的谷草上大发生为害^[19],随后美国便有了多年草地贪夜蛾大发

生的记录^[16]。因此,美国专家对草地贪夜蛾的生物学及其迁飞为害研究最为详细。草地贪夜蛾迁飞行为最初是根据其在不同区域首次出现的日期并结合其越冬行为提出来的^[14,16]。这种迁飞行为规律后来也被轨迹分析以及气象学研究结果进一步验证^[15,20-21]。但这些迁飞路线很难从试验角度直接证明。直到美国迁飞昆虫专家 Nagoshi 教授发现了美国佛罗里达和德克萨斯两个越冬虫源地的草地贪夜蛾玉米型(玉米品系草地贪夜蛾)线粒体细胞色素氧化酶I(COI)基因的单倍型种类与比例不同,根据不同地区的草地贪夜蛾 COI 基因的单倍型种类及其比值,结合其种群动态就可以很好地鉴定出虫源性^[22-23]。

Nagoshi 等利用草地贪夜蛾单倍型分子标记研究发现,宾夕法尼亚州中部的草地贪夜蛾起源于德克萨斯州,表明了从德克萨斯到美国东北部的迁飞路径的存在^[24]。进一步利用单倍型比例鉴定出美国不同发生为害区的虫源,从而推测出草地贪夜蛾在美国有两条主要的迁飞路线。第一条是美国南部的德克萨斯越冬种群向北迁飞到美国中部的堪萨斯州、内布拉斯加州和爱荷华州,同时还可以沿着密西西比河向东北迁飞到伊利诺伊州和明尼苏达州,并进一步到达宾夕法尼亚州。第二条迁飞路线为佛罗里达的越冬种群沿着大西洋海岸向阿巴拉契亚山脉以东迁飞。当然德克萨斯越冬种群向东北迁飞的草地贪夜蛾可与佛罗里达种群形成混合发生区^[25]。Westbrook 等也从气象学角度应用 HYSPLIT 轨迹分析模型对草地贪夜蛾不同冬季繁殖区的迁飞路线进行了模拟,模拟结果也表明草地贪夜蛾在美国的季节性从南向北进行迁飞,最远可迁飞到加拿大^[13]。

1.4 在加勒比海地区的迁飞

加勒比海地区是南美洲和北美洲重要的联系纽带,该地区的一些岛屿将美国的佛罗里达和南美的委内瑞拉联系起来。草地贪夜蛾是否会通过加勒比海的岛屿在南美洲和北美洲两个大陆之间进行远距离迁飞呢? Nagoshi 等应用草地贪夜蛾单倍型分子标记对这些地区的草地贪夜蛾种群遗传结构的研究表明,在南美洲的秘鲁、玻利维亚、巴拉圭、特立尼达和多巴哥、阿根廷和巴西等国家采集的草地贪夜蛾种群间的遗传相似性非常高,似乎为一个大的同质种群^[25],而在小安的列斯群岛,草地贪夜蛾可以从波多黎各向南迁飞至巴巴多斯,但这些草地贪夜蛾与南美洲国家的草地贪夜蛾单倍型遗传差异明显,表明这些地区草地贪夜蛾并不会进一步迁飞到南美洲国家。气象因子与轨迹分析也表明,加勒比地区的风

的模式不利于草地贪夜蛾沿着小安的列斯群岛的南北方向持续飞行,因此小安的列斯群岛并不是两个西半球大陆之间草地贪夜蛾活动的主要渠道。

1.5 在墨西哥的迁飞

如上所述,尽管多次墨西哥湾草地贪夜蛾海捕试验表明其可以跨越墨西哥湾进行跨海迁飞,但墨西哥草地贪夜蛾的来源及其迁飞途径还不完全清楚。Nagoshi 等同样应用草地贪夜蛾单倍型表达谱鉴定了墨西哥、美国南部(德克萨斯和佛罗里达)以及南美洲(阿根廷和巴西)的草地贪夜蛾遗传结构,结果表明,墨西哥草地贪夜蛾的遗传结构与美国的德克萨斯以及南美洲种群最为相近,表明这些区域的草地贪夜蛾来源有共同之处,但同时墨西哥种群还显示出一些特有的单倍型种类,这说明墨西哥草地贪夜蛾在一定程度上与国外虫源包括邻近的德克萨斯州的种群之间的迁飞虫源交流也是有限的^[27]。Quintero 等应用 AFLP 分子标记技术对墨西哥 10 个州的草地贪夜蛾种群的遗传结构进行了研究,发现种群间遗传差异主要存在于不同的寄主型间,而不同地理来源的种群差异不明显^[28]。

1.6 在非洲国家间的迁飞

自 2016 年首次在非洲尼日利亚和加纳发现草地贪夜蛾发生为害后,目前已在撒哈拉以南的非洲大陆大部分地区广泛发生。如此快速地在非洲大陆发生可能也与其在北美地区大范围的迁飞为害类似,即远距离迁飞行为可能是其快速蔓延为害的原因之一。气候模型分析也表明,草地贪夜蛾不仅可以在撒哈拉以南的非洲地区不同国家之间进行迁飞,还有可能迁飞到北非国家,甚至季节性迁飞到欧洲国家。并且根据适宜生境分析,东南亚、南亚各国以及中国和澳大利亚均是其潜在入侵区域^[3]。Nagoshi 等利用草地贪夜蛾单倍型比例鉴定了非洲 6 国(布隆迪、刚果民主共和国、肯尼亚、圣多美、坦桑尼亚和多哥)草地贪夜蛾的遗传多样性。结果发现 6 个非洲国家不同地区的草地贪夜蛾单倍型种类相似性较高,表明这些种群可能来自于同一个人入侵点,但不同国家的种群单倍型比例存在显著差异,表明这些国家之间的虫源交流和迁飞行为受到一定程度的限制。同时单倍型表达谱还表明佛罗里达和大安的列斯群岛的草地贪夜蛾可能是一小部分非洲国家草地贪夜蛾的来源^[29]。

2 草地贪夜蛾监测预警技术研究进展

由于迁飞害虫的发生为害具有突发性,高效实用的监测技术与早期预警是实现迁飞害虫有效防控的

重要手段。美国对草地贪夜蛾的监测预警技术研究非常系统,可为我国加强对草地贪夜蛾入侵的监测提供借鉴。目前,草地贪夜蛾监测预警技术主要包括雷达监测、性诱剂监测、灯光监测以及分子标记等。

2.1 雷达监测

Wolf 等应用雷达和性诱剂以及灯光监测墨西哥湾迁飞的昆虫,结果表明:草地贪夜蛾能够穿越墨西哥湾,因此墨西哥湾的南部如古巴和尤卡坦半岛的草地贪夜蛾也可能是美国中北部草地贪夜蛾发生的虫源地^[30]。后来,Wolf 等再次利用昆虫雷达和气象资料证明了美国高纬度地区平原和其他北部地区发生的草地贪夜蛾均是通过迁飞来自于德克萨斯州和墨西哥东北部的里奥格兰德河下游,这也是美国首次通过雷达监测证明美国中部草地贪夜蛾远距离迁飞的证据^[31]。

Westbrook 利用摄像、网捕以及雷达观测了草地贪夜蛾的迁飞行为^[32]。结果表明,雷达监测有助于揭示草地贪夜蛾在美洲大陆间的迁飞模式,草地贪夜蛾的迁飞模式主要与温度和风速的垂直分布有关,草地贪夜蛾种群迁飞方向主要与风向相关,但通常与风向保持一定的角度差。同时,还可以利用 X 波段雷达和多普勒雷达的反射率数据估算空中草地贪夜蛾迁飞种群的密度。这说明雷达在草地贪夜蛾迁飞行为中的监测有重要作用。

2.2 性诱剂监测

Sekul 和 Sparks 最早鉴定出草地贪夜蛾性信息素特征成分为(Z)-9-十四烯-1-醇乙酸酯(Z9-14:Ac)^[33],但这种成分的诱芯在田间却诱不到雌蛾^[34-35]。进一步又鉴定出草地贪夜蛾的第二种性信息素化合物为(Z)-9-十二烯-1-醇乙酸酯(Z9-12:Ac)^[33]。以此单一化合物或与少量的 Z9-14:Ac 混合制定诱芯均能诱到雌蛾,但这种诱芯所需的 Z9-12:Ac 的量较大,且持续期只有 1~2 周^[36-37]。因此,Tumlinson 等重新鉴定出草地贪夜蛾性信息素成分有 7 种,分别为十二烷-1-醇乙酸酯、(Z)-7-十二烯-1-醇乙酸酯(Z7-12:Ac)、11-十二烯-1-醇乙酸酯、(Z)-9-十四烯醛、Z9-14:Ac、(Z)-11-十六烷醛和(Z)-11-十六烷基-1-醇乙酸酯,田间诱蛾试验表明,Z7-12:Ac 和 Z9-14:Ac 具有高效诱蛾活性的重要有效组分^[38]。

尽管以上对草地贪夜蛾性诱剂的研制能在田间诱捕到雌蛾,但均没有考虑到草地贪夜蛾两种不同的寄主型的遗传差异及其性信息素成分的差异。因此,Groot 等^[39-40]对采自佛罗里达草地贪夜蛾的玉米型和水稻型雌蛾性信息素的特征成分鉴定时发现,对雄蛾有吸引力的四种化合物分别是:主要成分

为 Z9-14:Ac,关键第二信息素组分为 Z7-12:Ac,缺少此物质草地贪夜蛾雄蛾不被吸引^[38,41-46]。另外两种成分分别为 Z11-16:Ac 和 Z9-12:Ac,也对诱蛾效果有增效作用。但玉米型和水稻型草地贪夜蛾雌蛾性腺中这 4 种化合物的比例是不同的,玉米型 Z11-16:Ac 显著高于水稻型的,而 Z7-12:Ac 则显著低于水稻型的。两型杂交的雌蛾所含的 Z9-14:Ac 和 Z11-16:Ac 的含量与其母代类似,表明是母系遗传或母性效应,而其他两个成分则表现为玉米型的显性遗传^[39]。但 Lima 和 McNei^[47]对采自路易斯安那的不同寄主型的草地贪夜蛾雌蛾性外信息素特征成分鉴定结果表明,玉米型雌蛾主要成分 Z9-14:Ac 含量较高,而 Z11-16:Ac 和 Z7-12:Ac 含量低于水稻型的,这种差异可能与草地贪夜蛾的地理种群有关。

昆虫性诱剂效果与不同地理种群是显著相关的,在北美和欧洲对当地草地贪夜蛾有很好诱蛾效果的性诱剂却对南美洲的哥斯达黎加^[43]、墨西哥^[44]和巴西的草地贪夜蛾诱蛾效果很差。因此,巴西学者 Batista-Pereira 鉴定了采自当地的雌蛾性外激素的特征成分和比例^[46]。结果鉴定出 Z7-12:Ac、E7-12:Ac、乙酸十二酯(12:Ac)、Z9-12:Ac、Z9-14:Ac、Z-10-14Ac、Z11-16:Ac 8 种成分,其中 E7-12:Ac 是草地贪夜蛾性外激素中首次报道,但 8 种成分中只有 Z9-14:Ac, Z7-12:Ac, and E7-12:Ac 三种化合物有触角电位反应。田间试验表明 Z7-12:Ac+Z9-14:Ac 和 Z7-12:Ac+Z9-14:Ac+Z11-16:Ac 的诱蛾效果无显著差异,但 Z7-12:Ac+Z9-14:Ac+E7-12:Ac 配方诱蛾效果明显好于 Z7-12:Ac+Z9-14:Ac,表明 E7-12:Ac 是巴西草地贪夜蛾种群性诱剂中的重要活性成分。

Meagher 研究了联合应用花的香精(苯乙醛)与草地贪夜蛾性诱剂是否有增效作用^[48]。结果表明,花香精不仅无增效作用,相反却一定程度地降低了性诱剂的诱蛾效果。墨西哥学者对草地贪夜蛾性诱剂诱捕器的类型、颜色、大小与诱捕效果的关系进行研究,与商业公司出售的以及水盆诱捕器相比,自制的塑料瓶式诱捕器诱蛾效果较好,塑料瓶式诱捕器的大小(容积分别为 3.78、10 和 20 L)对诱蛾效果无明显影响,但黄色塑料瓶式诱捕器诱蛾效果明显好于蓝色和黑色的。尽管使用的诱芯是按照当地田间采集到的雌蛾中鉴定的性外激素化合物的比例配制的,但在田间还是诱到一定的双翅目、鞘翅目和膜翅目等非靶标昆虫^[49],这说明不同地区的草地贪夜蛾性信息素还需进一步研究。

2.3 灯光监测

在美国,草地贪夜蛾灯光诱捕主要用于海上诱

捕试验。如在研究草地贪夜蛾跨越墨西哥湾的海上诱捕试验中,即在离海岸不同距离的石油平台上设置黑光灯进行诱捕或监测,结果表明黑光灯下可诱到包括草地贪夜蛾在内的 20 多种昆虫^[17]。Spark 等进一步利用灯光诱捕研究了草地贪夜蛾的跨海迁飞^[18]。其设置的灯光监测设备为标准的漏斗式灯光诱蛾器,诱蛾器直径为 38 cm,高度为 46 cm,并设置有 4 个挡板,灯管为 15 W 的黑光灯,分别放置在离海岸为 32、74、106 和 160 km 石油平台上。诱捕器下面装有 1 L 容量的收集昆虫的容器,里面放有柴油或福尔马林以杀死捕获的昆虫。由于石油平台上没有电源设施,因此,灯光诱捕器是由一个 12 V 的电池供电,并由光电池控制灯的开关,以便黑光灯在日落和日出之间的时间段工作。

2.4 分子鉴定

研究发现,尽管草地贪夜蛾两个寄主间形态学上无差异,但在遗传学有差异,特别是在线粒体 CO I 基因的多态性有显著差异^[23,50-51]。即使是在草地贪夜蛾玉米型种群内,其线粒体 CO I 基因的单倍型种类与比例也有差异^[23-24]。根据线粒体 CO I 基因的多态性,将草地贪夜蛾玉米型群体划分为 4 类。CS-h4 单倍型在佛罗里达占主导地位,而 CS-h2 为德克萨斯种群的主要类型。如果种群内的 h4/h2 比值等于或大于 1.5 则表明与佛罗里达种群遗传相似,而比值为 0.5 或更小则表明与德克萨斯种群遗传关系较近^[23-24]。根据这一标准,许多学者将世界范围内草地贪夜蛾种群的入侵来源或迁飞虫源与美国的原产地(佛罗里达和德克萨斯种群)进行遗传比较,从而揭示其可能的入侵来源或迁飞虫源地。应用这种分子鉴定方法不仅可以准确鉴定草地贪夜蛾的寄主型种类,还可以监测种群遗传结构、遗传多样性以及虫源关系。监测结果对于阐明草地贪夜蛾的迁飞模式、迁飞路线和入侵虫源等具有重要意义。

3 技术对策与政策建议

综上所述,目前草地贪夜蛾已经从美洲大陆传播到非洲大陆和亚洲的印度,并有进一步向东南亚国家和我国入侵的趋势^[3]。草地贪夜蛾的传播或入侵不仅与全球贸易运输携带有关,而且与草地贪夜蛾较强的远距离迁飞能力密不可分。鉴于我国与印度相邻,我国南部地区的气候与农作物种植结构与印度有相似之处,且两国之间的货物贸易频繁。因此,印度的草地贪夜蛾入侵我国的风险较高,且一旦入侵我国,其远距离迁飞行为习性将会导致草地贪

夜蛾在我国从南到北的广大地区发生为害,势必会威胁我国的农业生产和国家粮食安全。因此,从监测与防控角度提出防范草地贪夜蛾入侵我国的一些技术对策和政策建议。

3.1 加强草地贪夜蛾迁飞种群监测

鉴于目前草地贪夜蛾已在印度的 6 个邦发生为害^[4],且成虫具有较强的远距离迁飞能力,通过跨境迁飞或贸易运输入侵我国的风险均较高。因此,建议我国植保技术人员加强对草地贪夜蛾迁飞种群的监测预警。可利用当前我国较为完善的农作物病虫害监测预警区域监测站在我国西南和华南地区设置监测点(如广西、云南、贵州、广东等),在培训植保技术人员对草地贪夜蛾形态识别与基础生物学等基础上,利用区域站的高空探照灯、黑光灯、虫情测报灯以及田间普查等技术手段,或根据已报道的草地贪夜蛾性诱剂有效特征成分与配方合成草地贪夜蛾性诱剂,配以合适的诱捕器,加强对草地贪夜蛾迁飞的监测,做好早期预警。一旦发现疑似样本,可进行分子鉴定确定其种类与寄主型。

3.2 建议将草地贪夜蛾列为我国进境检疫性有害生物

草地贪夜蛾于 2016 年首次入侵到非洲国家,根据其较强的迁飞能力,不排除成虫从非洲国家迁飞到欧洲大陆进行远距离迁飞入侵,且国际贸易有可能将该虫携带入侵。因此,2017 年欧洲食品安全局就将草地贪夜蛾列为检疫性有害生物^[52]。目前,草地贪夜蛾已在印度发生,且我国与非洲、美洲国家以及印度国际贸易频繁。因此,建议我国将草地贪夜蛾列为进境有害生物名录加以检疫控制。

3.3 加强草地贪夜蛾监控技术研究储备

草地贪夜蛾是一种典型的迁飞害虫,草地贪夜蛾在美洲发生的历史最为悠久,对其发生为害规律、迁飞规律、监测技术和综合防控技术研究最为系统。尽管目前我国没有开展草地贪夜蛾的研究工作,但为了积极防范该虫的入侵,制定应急防控方案,有关部门和单位可加强与美国专家学术交流,借鉴美国对草地贪夜蛾防控的成功经验以及 FAO 推荐的相关防控方案,做好草地贪夜蛾监测与防控技术研究储备,并制定应急防控方案。即便该虫侵入我国,也能及时、有效地采取防控措施和根除手段,使经济损失降到最低,从而保障我国农业生产和国家粮食安全。

3.4 积极参与草地贪夜蛾防控国际行动

尽管我国尚未有草地贪夜蛾发生为害,但我国有多个研究团队长期从事东方黏虫、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、草地螟 *Loxostege sticticalis*、甜

菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 以及水稻“两迁”害虫的迁飞规律、监测技术与防控研究,取得了多项控制迁飞性害虫的综合防控技术成果,实现了我国对迁飞害虫的有效控制,保障了我国农业生产安全。这些迁飞害虫的研究成果对草地贪夜蛾的防控有很好的借鉴意义。因此,我国专家可借鉴已有的迁飞害虫研究成果,积极参与 FAO 和 CABI 等有关国际组织实施的国际草地贪夜蛾防控行动中,对促进我国与“一带一路”国家的农业植保技术合作以及提高我国对草地贪夜蛾的防控水平均有重要意义。

参考文献

- [1] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. The Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82 - 87.
- [2] JOHNSON S J. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the western hemisphere [J]. International Journal of Tropical Insect Science, 1987, 8(4/5/6): 543 - 549.
- [3] EARLY R, GONZÁLEZ-MORENO P, MURPHY S T, et al. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm [J]. BioRxiv, 2018: 391847.
- [4] BHOSALE J. Fall armyworm, considered threat for global food security spreads from maize to sugarcane in India [EB/OL]. [2018 - 10 - 09] <https://economictimes.indiatimes.com/news/economy/agriculture/fall-armyworm-considered-threat-for-global-food-security-spreads-from-maize-to-sugarcane-in-india/articleshow/66129005.cms>.
- [5] SHARANABASAPPA, KALLESHWARASWAMY C M, ASOKAN R, et al. First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest on maize in India [J]. Pest Management in Horticultural Ecosystems, 2018, 24(1): 23 - 29.
- [6] 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.
- [7] 粮农组织 (FAO): 秋粘虫可能从印度蔓延到亚洲其他地区, 东南亚和中国南部首当其冲 [EB/OL]. [2018 - 8 - 14]. <https://news.un.org/zh/story/2018/08/1015522>.
- [8] NAYAR J K, VAN HANDEL E. Flight performance and metabolism of the moth *Spodoptera frugiperda* [J]. Journal of Insect Physiology, 1971, 17(12): 2475 - 2479.
- [9] HANDEL E V. Lipid utilization during sustained flight of moths [J]. Journal of Insect Physiology, 1974, 20(12): 2329 - 2332.
- [10] GLICK P A. The distribution of insects, spiders, and mites in the air [J]. Technical Bulletins, 1939, 673: 1 - 150.
- [11] 李光博, 王恒祥, 胡文绣. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验 [J]. 植物保护学报, 1964, 3(2): 101 - 110.
- [12] URQUHART F A, URQUHART N R. Autumnal migration routes of the eastern population of the monarch butterfly (*Danaus p. plexippus* L.; Danaidae; Lepidoptera) in North America to the overwintering site in the Neovolcanic Plateau of Mexico [J]. Canadian Journal of Zoology, 1978, 56(8): 1759 - 1764.
- [13] WESTBROOK J K, NAGOSHI R N, MEAGHER R L, et al. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(2): 255 - 267.
- [14] SNOW J W, COPELAND W W. Fall armyworm; use of virgin female traps to detect males and to determine seasonal distribution [J]. USDA Prod Res Rep, 1969, 110: 1 - 9.
- [15] ROSE A H, SILVERSIDES R H, LINDQUIST O H. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lep.: Noctuidae) [J]. Canada Entomologist, 1975, 107: 567 - 576.
- [16] LUGINBILL P. The fall army worm [M]. US Department of Agriculture, 1928.
- [17] BAUST J G, BENTON A H, AUMANN G D. The influence of off-shore platforms on insect dispersal and migration [J]. Bulletin of the Entomological Society of America, 1981, 27(1): 23 - 25.
- [18] SPARKS A N, JACKSON R D, CARPENTER J E. Insects captured in light traps in the gulf of Mexico [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1986, 79(1): 132 - 139.
- [19] SMITH S J E, ABBOT J. The natural history of the rarer lepidopterous insects of Georgia: including their systematic characters, the particulars of their several metamorphoses, and the plants on which they feed. Collected from the observation of Mr. John Abbot, many years resident in that country [M/OL]. T. Bensley, 1797. oai: biodiversitylibrary.org.item/5969.
- [20] WOLF W W, SPARKS A N, PAIR S D, et al. Radar observations and collections of insects in the gulf of Mexico [M]// DANTHANARAYANA W. Insect flight dispersal and migration. Springer, Berlin, Heidelberg, 1986: 221 - 234.
- [21] MITCHELL E R, MCNEIL J N, WESTBROOK J K, et al. Seasonal periodicity of fall armyworm, (Lepidoptera: Noctuidae) in the Caribbean basin and northward to Canada [J]. Journal of Entomological Science, 1991, 26(1): 39 - 50.
- [22] NAGOSHI R N, SILVIE P, MEAGHER R L. Comparison of haplotype frequencies differentiate fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) corn-strain populations from Florida and Brazil [J]. Journal of Economic Entomology, 2007, 100(3): 954 - 961.
- [23] NAGOSHI R N, MEAGHER R L, FLANDERS K, et al. Using haplotypes to monitor the migration of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) corn-strain populations from Texas and Florida [J]. Journal of Economic Entomology, 2008, 101(3): 742 - 749.
- [24] NAGOSHI R N, FLEISCHER S, MEAGHER R L. Texas is the overwintering source of fall armyworm in central Pennsylvania; implications for migration into the northeastern United States [J]. Environmental Entomology, 2009, 38(6): 1546 - 1554.
- [25] NAGOSHI R N, MURUA M G, HAY-ROE M, et al. Genetic characterization of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) host strains in Argentina [J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105(2): 418 - 428.
- [26] NAGOSHI R N, FLEISCHER S, MEAGHER R L, et al. Fall armyworm migration across the Lesser Antilles and the poten-

- tial for genetic exchanges between North and South American populations [J/OL]. *PLoS ONE*, 2017, 12(2): e0171743.
- [27] NAGOSHI R N, ROSASGARCÍA N M, MEAGHER R L, et al. Haplotype profile comparisons between *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations from Mexico with those from Puerto Rico, South America, and the United States and their implications to migratory behavior [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108(1): 135 - 144.
- [28] QUINTERO V P, LOPEZ J L A, MONDACA E C, et al. Genetic characterization of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Mexico using AFLP markers [J]. *Southwestern Entomologist*, 2015, 40: 545 - 553.
- [29] NAGOSHI R N, GOERGEN G, TOUNOU K A, et al. Analysis of strain distribution, migratory potential, and invasion history of fall armyworm populations in northern Sub-Saharan Africa [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3710.
- [30] WOLF W W, SPARKS A N, PAIR S D, et al. Radar observations and collections of insects in the gulf of Mexico [M]// *Insect Flight*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1986: 221 - 234.
- [31] WOLF W W, WESTBROOK J K, RAULSTON J, et al. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, 328(1251): 619 - 630.
- [32] WESTBROOK J K. Noctuid migration in Texas within the nocturnal aeroecological boundary layer [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2008, 48(1): 99 - 106.
- [33] SEKUL A A, SPARKS A N. Sex pheromone of the fall armyworm moth: isolation, identification, and synthesis [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1967, 60(5): 1270 - 1272.
- [34] MITCHELL E R, DOOLITTLE R E. Sex pheromones of *Spodoptera exigua*, *S. eridania*, and *S. frugiperda*: bioassay for field activity [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1976, 69(3): 324 - 326.
- [35] SPARKS A N. Pheromones: Potential for use in monitoring and managing populations of the fall armyworm [J]. *Florida Entomologist*, 1980: 406 - 410.
- [36] MITCHELL E R. Monitoring adult populations of the fall armyworm [J]. *Florida Entomologist*, 1979, 62(2): 91 - 98.
- [37] JONES R L, SPARKS A N. (Z)-9-Tetradecen-1-ol acetate: A secondary sex pheromone of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1979, 5(5): 721 - 725.
- [38] TUMLINSON J H, MITCHELL E R, TEAL P E A, et al. Sex pheromone of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1986, 12(9): 1909 - 1926.
- [39] GROOT A T, MARR M, SCHÖFL G, et al. Host strain specific sex pheromone variation in *Spodoptera frugiperda* [J/OL]. *Frontiers in Zoology*, 2008, 5(1): 20. DOI: 10.1186/1742 - 9994 - 5 - 20.
- [40] GROOT A T, MARR M, HECKEL D G, et al. The roles and interactions of reproductive isolation mechanisms in fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) host strains [J]. *Ecological Entomology*, 2010, 35: 105 - 118.
- [41] MITCHELL E R, TUMLINSON J H, MCNEIL J N. Field evaluation of commercial pheromone formulations and traps using a more effective sex pheromone blend for the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1985, 78(6): 1364 - 1369.
- [42] DESCOINS C, SILVAIN J F, LALANNE-CASSOU B, et al. Monitoring of crop pests by sexual trapping of males in Guadeloupe and Guyana [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 21(1/2): 53 - 56.
- [43] ANDRADE R, RODRIGUEZ C, OEHLISCHLAGER A C. Optimization of a pheromone lure for *Spodoptera frugiperda* (Smith) in Central America [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2000, 11(6): 609 - 613.
- [44] MALO E A, CRUZ-LOPEZ L, VALLE-MORA J, et al. Evaluation of commercial pheromone lures and traps for monitoring male fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in the coastal region of Chiapas, Mexico [J]. *Florida Entomologist*, 2001, 84(4): 659 - 664.
- [45] FLEISCHER S J, HARDING C L, BLOM P E, et al. *Spodoptera frugiperda* pheromone lures to avoid nontarget captures of *Leucania phragmatidicola* [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 98(1): 66 - 71.
- [46] BATISTA-PEREIRA L G, STEIN K, DE PAULA A F, et al. Isolation, identification, synthesis, and field evaluation of the sex pheromone of the brazilian population of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2006, 32(5): 1085 - 1099.
- [47] LIMA E R, MCNEIL J N. Female sex pheromones in the host races and hybrids of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Chemoecology*, 2009, 19(1): 29 - 36.
- [48] MEAGHER JR R L. Trapping fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) adults in traps baited with pheromone and a synthetic floral volatile compound [J]. *Florida Entomologist*, 2001, 84(2): 288 - 292.
- [49] MALO E A, CRUZ-ESTEBAN S, GONZÁLEZ F J, et al. A home-made trap baited with sex pheromone for monitoring *Spodoptera frugiperda* males (Lepidoptera: Noctuidae) in corn crops in Mexico [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(4): 1674 - 1681.
- [50] LEVY H C, GARCIA-MARUNIAK A, MARUNIAK J E. Strain identification of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) insects and cell line: PCR-RFLP of cytochrome oxidase C subunit I gene [J]. *Florida Entomologist*, 2002, 85(1): 186 - 190.
- [51] NAGOSHI R N, MEAGHER R L, ADAMCZYK JR J J, et al. New restriction fragment length polymorphisms in the cytochrome oxidase I gene facilitate host strain identification of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) populations in the south-eastern United States [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2006, 99(3): 671 - 677.
- [52] JEGER M, BRAGARD C, CAFFIER D, et al. Pest categorisation of *Spodoptera frugiperda* [J/OL]. *EFSA Journal*, 2017, 15: e04927. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4927>.