迁飞性害虫草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布

秦誉嘉[1#]， 蓝 帅[1#]， 赵紫华[1]， 孙宏禹[1]，
朱晓明[2]， 杨普云[2*]， 李志红[1*]

(1. 中国农业大学植物保护学院，北京 100193；2. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125)

摘要 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*，又称秋黏虫，起源于美洲，两年内扩散至非洲撒哈拉以南地区，自 2018 年底入侵我国云南以来，5 个月内已扩散至我国十余个省、市(自治区)。本研究基于 MaxEnt 分别利用草地贪夜蛾目前在全球的所有分布点以及全年分布点(去除季节性分布点)两套分布数据分别预测该虫在我国的潜在地理分布，以期为有关部门对草地贪夜蛾的监测防控提供理论依据。结果表明，我国海南、云南、广西、广东、福建、浙江、江西、湖南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏等省需对草地贪夜蛾进行全年监测及防控，在春、夏、秋季，山东、河南、河北、北京、天津、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆、辽宁等省、市(自治区)也需对该虫进行监测防控。关于该虫的潜在地理分布及潜在经济损失的相关研究仍需进一步开展。

关键词 草地贪夜蛾； MaxEnt； 迁飞性害虫； 潜在地理分布

中图分类号： S 435.132 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.20190605

Potential geographical distribution of the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China

QIN Yujia[1]， LAN Shuai[1]， ZHAO Zihua[1]， SUN Hongyu[1]， ZHU Xiaoming[2]， YANG Puyun[2]， LI Zhihong[1]

(1. *College of Plant Protection*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*;
2. *National Agro-Tech Extension and Service Center*, *Beijing* 100125, *China*)

Abstract *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), the fall armyworm, native to America, has invaded and spread throughout sub-Saharan Africa within two years. It has invaded China in the end of 2018, and spread to ten more provinces within five months. This study used two datasets of all distribution and year-round distribution worldwide of the fall armyworm respectively to predict its potential geographical distribution in China based on MaxEnt in order to offer the theory evidence to the related departments. The results showed that year-round surveillance should be done in Hainan, Yunnan, Guangxi, Guangdong, Fujian, Zhejiang, Jiangxi, Hunan, Guizhou, Sichuan, Chongqing, Hubei, Anhui, Jiangsu provinces, and seasonal surveillance in spring, summer and autumn should be done in Shandong, Henan, Hebei, Beijing, Tianjin, Shanxi, Shaanxi, Ningxia, Gansu, Qinghai, Inner Mongolia, Xinjiang and Liaoning. Further research of potential geographical distribution and potential economic loss are needed.

Key words *Spodoptera frugiperda*； MaxEnt； migratory pest； potential geographical distribution

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (鳞翅目：夜蛾科)为谷物和牧草的重要害虫，可为害 353 种植物[1]。除玉米外，草地贪夜蛾还可以为害其他一些经济重要作物如水稻、甘蔗、高粱、甜菜、番茄、马铃薯、棉花以及牧草等[2]。该虫起源于美洲，从潘帕斯草原、阿根廷北至美国佛罗里达南部及德克萨斯可全年发生，并可季节性迁飞至加拿大的魁北克和安大略[3]。2016 年草地贪夜蛾在非洲西南部的尼日利亚及戛纳大暴发[4]，两年内扩散至整个撒哈拉以南地区并造成严重的经济损失[5]。2018 年草地贪夜蛾在印度发生，也门、斯里兰卡、孟加拉国、尼泊尔、泰国、缅甸、老挝、泰国等

收稿日期： 2019-05-30 **修订日期**： 2019-06-04
基金项目： 国家重点研发计划(2018YFF0214905)；中国博士后科学基金(2019M650908)
* 通信作者 E-mail：yangpy@agri.gov.cn，lizh@cau.edu.cn
# 为并列第一作者

8 个亚洲国家也发现该虫为害[6]。2018 年底，我国云南省普洱市江城县首次发现草地贪夜蛾为害[7]，截至 2019 年 5 月 21 日，该虫已蔓延至我国 14 个省、市（自治区）[8]。因此，明确草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布对于指导其监测预警及防控尤为重要。

MaxEnt 是普林斯顿大学开发的一种基于最大熵理论的物种分布预测模型，在生态领域可表述为物种在没有约束的条件下会尽可能扩散接近均匀分布[9]。该模型只需物种分布信息及环境背景数据，且由于精准度高、界面友好易于操作等优点被广泛应用，利用该模型的研究成果已超过 1 000 余篇[10]，我国学者使用该工具已发表论文 750 余篇[11]。

根据文献报道，草地贪夜蛾各虫态在 0℃以下均无法长时间存活[12-13]。本研究分别利用该虫在全球的所有分布点与全年分布点（去除季节性分布点），利用 MaxEnt 模型对该虫的潜在地理分布进行预测，以期为我国草地贪夜蛾的进一步防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

地理分布数据：草地贪夜蛾的地理分布数据主要来源于全球生物多样性信息网络（global biodiversity information facility，GBIF）（https://www.gbif.org/）、CABI 的 CPC（https://www.cabi.org/cpc）数据库、FAO 中草地贪夜蛾监测有效数据记录、国内报道记录以及国外发表文献[3]（图 1）。

环境变量：来源于 WorldClim（http://www.worldclim.org）1.4 版本的 19 个生物气候学变量，包括 1950－2000 年的最低、平均以及最高温度和降水量[14]，空间分辨率为 5 arc-min（～9 km）。

地图数据：来源于 DIVA-GIS（http://www.divagis.org/）的世界地图和国家基础地理信息中心网站（http://ngcc.sbsm.gov.cn/）的中国国界及省界图（比例尺为 1∶4 000 000）。农业用地类型图由中国农业科学院植物保护研究所提供，已除去水体、林地和城市用地。

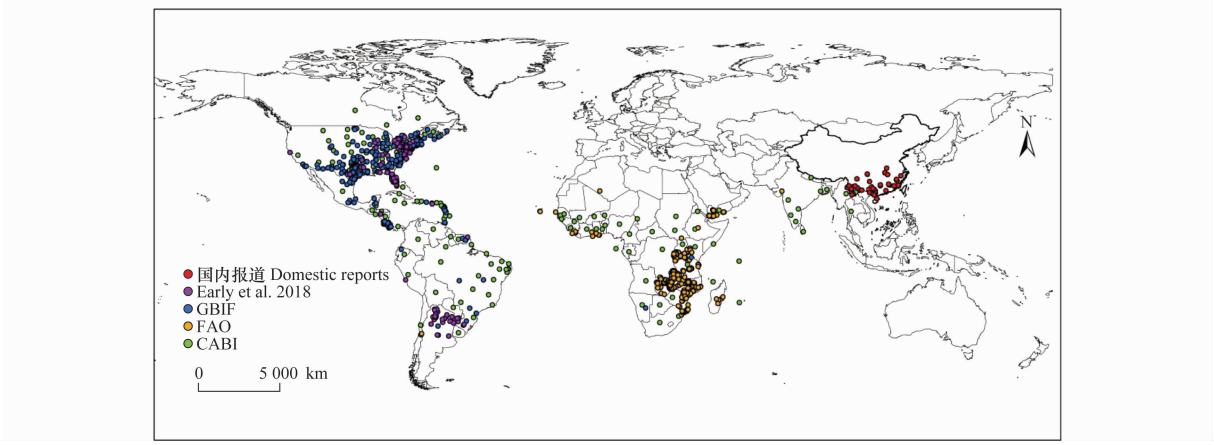


图 1 草地贪夜蛾在全球的分布点（审图号：GS(2012)1601 号）

Fig. 1 Global distribution of the fall armyworm

1.2 方法

1.2.1 数据筛选

为降低取样偏差，将获得的草地贪夜蛾的地理分布数据与环境变量统一至相同精度，即 9 km×9 km，最终获得 1 618 个分布点数据用于模型构建（图 1）。根据 bio6（最冷月的最低气温）去除季节性分布点筛选出 1 271 个全年分布点用于建立模型（图 2）。利用 19 个气候变量对分布数据进行提取，通过相关性分析与因子分析筛选出关键气候变量来建立模型，提高模型的转移能力。

1.2.2 模型预测

将筛选出的地理分布数据、环境变量数据导入 MaxEnt 3.3.3k，随机选取 25%的分布点作为测试集，剩余 75%为训练集。重复次数设为 10 次，重复运行类型设为 Subsample，最大迭代次数设为 5 000 次，添加 10 percentile training presence 阈值[15]，输出 ASCII 文件，再将其导入 ArcGIS 转换为栅格图层并利用自然间断法进行分级。最后根据 ROC（receiver operating characteristic）曲线对模型进行评估，刀切法对关键环境变量贡献率进行评估。

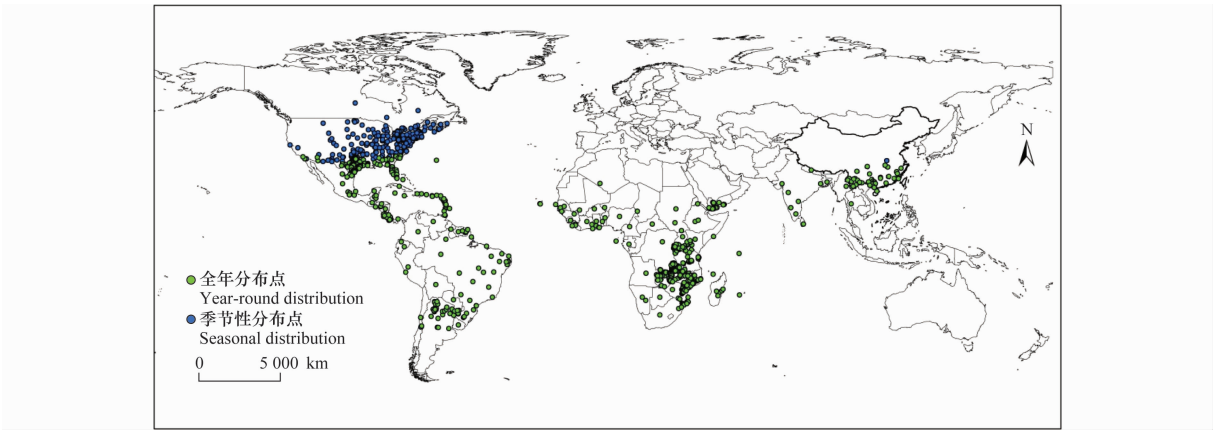


图 2　草地贪夜蛾的全年分布点与季节性分布点(审图号:GS(2012)1601 号)

Fig. 2　Year-round and seasonal distributions of the fall armyworm

2　结果与分析

2.1　基于所有分布点数据的草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布

基于草地贪夜蛾所有分布点的预测结果如下(图 3),高度适生区包括海南、台湾、西藏南部部分地区、云南西南部、广西大部分地区、广东、福建、浙江、江西、湖南东部;中度适生区包括西藏南部部分地区、云南东南部及中部、广西西北部、贵州南部、四川东部、重庆西部、湖南西部、湖北东部、安徽、江苏南部、河南东南部;低度适生区包括西藏南部部分地区、云南中北部、贵州北部、四川东北部、重庆东部、湖北西部、江苏北部、山东、河南北部、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海部分地区、新疆南部、内蒙古西部、河北南部、北京、天津、辽宁南部。

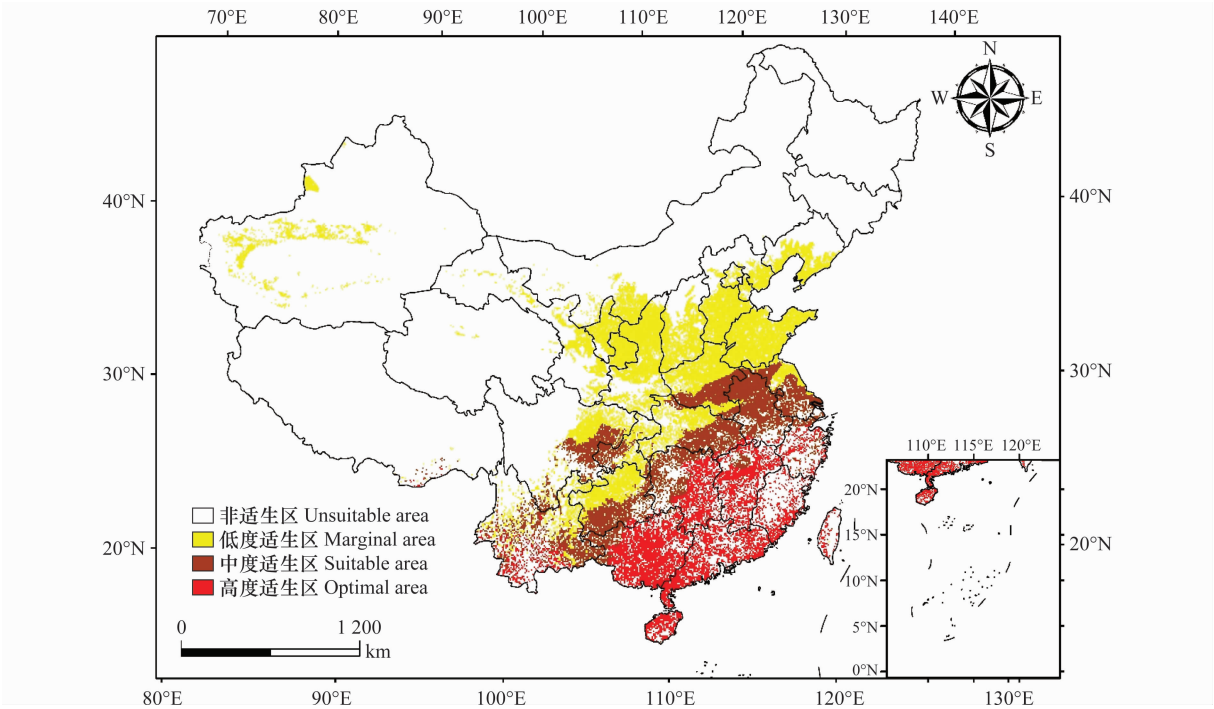


图 3　草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布(基于所有分布点数据)(审图号:GS(2012)1601 号)

Fig. 3　Potential geographical distribution of the fall armyworm (based on dataset of all distribution)

2.2　基于全年分布点数据的草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布

基于草地贪夜蛾的全年分布点,即去除季节性分布点(图 2),预测结果如下(图 4),高度适生区包括广西、广东、福建、浙江、江西、湖南大部分地区,湖北东南部、安徽南部;中度适生区包括云南、贵州大

部分地区，海南、广西、广东、福建、浙江、安徽、湖北、重庆部分地区，西藏、四川、江苏、台湾零星地区；低度适生区包括海南、台湾、西藏、云南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏部分地区。

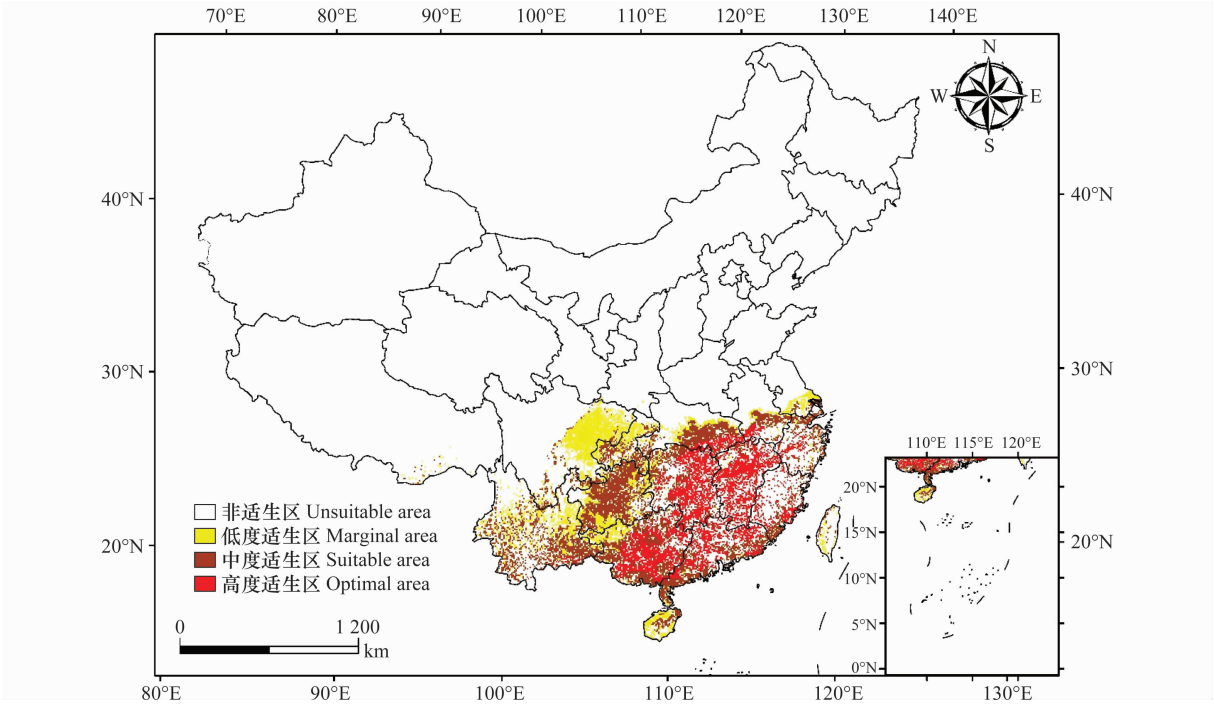


图 4　草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布（基于全年分布点数据）（审图号：GS(2012)1601 号）

Fig. 4　Potential geographical distribution of the fall armyworm (based on dataset of year-round distribution)

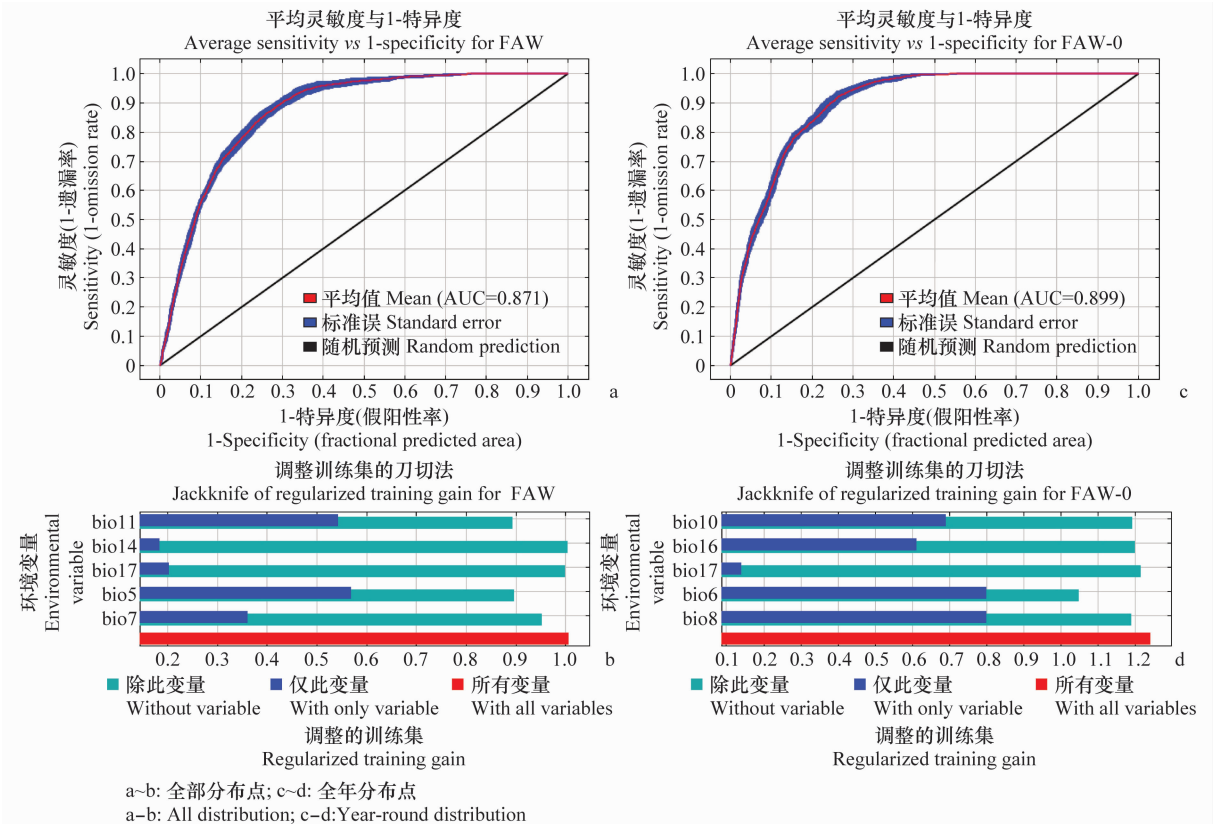


图 5　模型评价及环境变量贡献率

Fig. 5　Model performance and contribution rate of environmental variables

2.3　模型评价及环境变量贡献率

利用草地贪夜蛾目前在全球的所有分布点以及全年分布点(去除季节性分布点)两套分布数据分别预测其在我国的潜在地理分布,重复 10 次运行结果的 ROC 曲线的 AUC 值分别为 0.871 及 0.899,模型表现出较好的拟合优度。基于所有分布点数据,共筛选出 bio11(最冷季节的平均气温),bio14(最干月的降水量),bio17(最干季节的降水量),bio5(最热月的最高气温),bio7(年气温变化范围)5 个关键环境变量进行预测,其中高低温度相关变量 bio5、bio7 贡献率较大。基于全年分布点数据,共筛选出 bio10(最热季节的平均气温),bio16(最湿季节的降水量),bio17(最干季节的降水量),bio6(最冷月的最低气温),bio9(最干季节的平均气温)5 个关键环境变量,其中低温环境变量 bio6 贡献率较大。

3　讨论

草地贪夜蛾自 2016 年入侵非洲,每年造成 24.81 亿～61.87 亿美元潜在经济损失[2],由于其迁飞能力强,突发为害重,受到全球的广泛关注,自 2018 年底入侵自我国云南至今,短短 5 个月已扩散至全国十几个省、市(区)。研究表明,随着西南夏季风的加强,云南和广西全境成为缅甸草地贪夜蛾虫源的主要迁入地[16],自草地贪夜蛾入侵云南后,中国热带及南亚热带地区也成为该虫的虫源地。预测草地贪夜蛾还会继续北进到东北南部的广大区域[17]。另外,根据当前的全球贸易及交通网络情况,非洲也为我国重要的虫源地[3]。除具有充分的虫源外,草地贪夜蛾寄主也十分广泛,超过 300 种植物[1],目前传入我国的草地贪夜蛾为“玉米型”[18],而我国为世界第二大玉米生产国,热带和南亚热带地区云南、广西、广东、海南等地的玉米可为该虫的周年发生提供充足的食物来源,西南-华北-东北产区可为该虫提供季节性发生的食物来源[17]。

本研究分别利用草地贪夜蛾当前所有分布点与全年分布点(去除季节性分布点)两套分布数据预测其在我国的潜在地理分布,以期为该虫的监测预警提供更科学的理论依据。基于草地贪夜蛾全年分布点进行预测的结果表明,海南、云南、广西、广东、福建、浙江、江西、湖南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏等省需对草地贪夜蛾进行全年监测及防控;基于所有分布点进行预测的结果表明,在春、夏、秋季,我国北部的山东、河南、河北、北京、天津、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆、辽宁等省(市、自治区)也需对该虫进行监测防控。

本研究利用 MaxEnt 工具对草地贪夜蛾的潜在地理分布进行了初步研究,物种分布模型主要利用物种的已知分布数据及气候数据,根据一定算法构建模型并投射运算结果预测物种的潜在分布,所以已知分布点对结果预测有很大影响[19-20],本研究中利用两套不同的分布数据得出的预测结果差异显著,鉴于该虫扩散速度快,本研究只能作为阶段性参考依据,对于该物种的潜在分布预测还需根据其最新的分布情况不断跟进以期为相关部门提供可靠的判断依据。

本研究只利用了 MaxEnt 对草地贪夜蛾的潜在地理分布进行研究,而 CLIMEX 工具可以考虑物种的生物学参数及灌溉情景等[21],后续可利用该工具进行比较研究。同时,关于草地贪夜蛾在我国的潜在损失评估也亟待开展,虽然目前入侵我国的尚为“玉米型”,但美洲与非洲均已发现“水稻型”[22-23],因此建议分别针对玉米、水稻、甘蔗等主要寄主开展详细的经济损失评估,通过详细的风险评估结果为相关部门提供更完善的防控措施建议,为“虫口夺粮”站好第一班岗。

参考文献

[1] MONTEZANO D G, SPECHT A, SOSA-GÓMEZ D R, et al. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas[J]. African Entomology, 2018, 26(2): 286-301.

[2] DAY R, ABRAHAMS P, BATEMAN M, et al. Fall armyworm: impacts and implications for Africa [J]. Outlooks on Pest Management, 2017, 28(5): 196-201.

[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]. NeoBiota, 2018, 40: 25-50.

[4] GOERGEN G, KUMAR P L, SANKUNG S B, et al. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa[J/OL]. PLoS ONE, 2016, 11(10): e0165632.

[5] FELDMANN F, RIECKMANN U, WINTER S. The spread of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Africa: What should be done next? [J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2019, 126(5): 97-101.

[6] 刘刚. 全国农技中心通报我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况[J]. 农药市场信息, 2019, 9(24): 59.

[7] 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, 2019, 39(2): 33-35.

(下转 60 页)

侵中国[J]. 植物保护，2018，44(6)：1－10.

[11] CHANDRASENA D I，SIGNORINI A M，ABRATTI G，et al. Characterization of field-evolved resistance to *Bacillus thuringiensis*-derived Cry1F δ-endotoxin in *Spodoptera frugiperda* populations from Argentina [J]. Pest Management Science，2017，74(3)：746－754.

[12] BOTHA A S，ERASMUS A，DU PLESSIS H，et al. Efficacy of Bt maize for control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera：Noctuidae) in South Africa [J/OL]. Journal of Economic Entomology，2019. doi：10.1093/jee/toz048.

[13] 杨学礼，刘永昌，罗茗钟，等. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾[J]. 云南农业，2019(1)：72.

[14] PASHLEY D P，MARTIN J A. Reproductive incompatibility between host strains of the fall armyworm (Lepidoptera：Noctuidae)[J]. Annals of the Entomological Society of America，1987，80(6)：731－733.

[15] PASHLEY D P. Host-associated genetic differentiation in fall armyworm (Lepidoptera：Noctuidae)：a sibling species complex? [J]. Annals of the Entomological Society of America，1986，79(6)：898－904.

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

[17] 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.

[18] STORER N P，BABCOCK J M，SCHLENZ M，et al. Discovery and characterization of field resistance to Bt maize：*Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera：Noctuidae) in Puerto Rico [J]. Journal of Economic Entomology，2010，103(4)：1031－1038.

[19] FATORETTO J C，MICHEL A P，SILVA FILHO M C，et al. Adaptive potential of fall armyworm (Lepidoptera：Noctuidae) limits Bt trait durability in Brazil [J/OL]. Journal of Integrated Pest Management，2017，8(1)：1－10. doi：10.1093/jipm/pmx011.

[20] HUANG F，QURESHI J A，MEAGHER R L，et al. Cry1F resistance in fall armyworm *Spodoptera frugiperda*：single gene versus pyramided Bt maize [J/OL]. PLoS ONE，2014，9(11)：e112958.

[21] HUANG F，QURESHI J A，HEAD G P，et al. Frequency of *Bacillus thuringiensis* Cry1A. 105 resistance alleles in field populations of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*，in Louisiana and Florida [J]. Crop Protection，2016，83：83－89.

[22] JIN Lin，ZHANG Haonan，LU Yanhui，et al. Large-scale test of the natural refuge strategy for delaying insect resistance to transgenic Bt crops [J]. Nature Biotechnology，2015，33(2)：169－174.

（责任编辑：杨明丽）

（上接47页）

[8] 王磊，陈科伟，钟国华，等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨[J/OL]. 环境昆虫学报，2019，http：// kns. cnki. net/kcms/detail/44. 1640. Q. 20190523. 1748. 004. html.

[9] PHILLIP S J，ANDERSON R P，SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling，2006，190(3)：231－259.

[10] MEROW C，SMITH M J，SILANDER J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions：what it does，and why inputs and settings matter [J]. Ecography，2013，36(10)：1058－1069.

[11] 孔维尧，李欣海，邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化[J/OL]. 应用生态学报，2019，https：// doi. org/10. 13287/j. 1001－9332. 201906. 029.

[12] BUENO R C O F，CARNEIRO T R，PRATISSOLI D，et al. Biology and thermal requirements of *Telenomus remus* reared on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* eggs [J]. Ciência Rural，2008，38(1)：1－6.

[13] GARCIA A G，GODOY W A C，THOMAS J M G，et al. Delimiting strategic zones for the development of fall armyworm (Lepidoptera：Noctuidae) on corn in the state of Florida [J]. Journal of Economic Entomology，2017，111(1)：120－126.

[14] HIJMANS R J，CAMERON S E，PARRA J L，et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology：A Journal of the Royal Meteorological Society，2005，25(15)：1965－1978.

[15] YOUNG N，CARTER L，EVANGELISTA P. A MaxEnt model v3. 3. 3 e tutorial (ArcGIS v10)[Z]. Fort Collins，Colorado，2011.

[16] 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.

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

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

[19] 朱耿平，王晓静，刘国卿，等. 悬铃木方翅网蝽在我国的潜在分布分析[J]. 应用昆虫学报，2012，49(6)：1652－1658.

[20] 秦誉嘉，吕文诚，赵守歧，等. 考虑灌溉及气候变化条件下葡萄花翅小卷蛾在中国的潜在地理分布[J]. 植物保护学报，2018，45(3)：599－605.

[21] KRITICOS D J，MAYWALD G F，YONOW T，et al. CLIMEX version 4：Exploring the effects of climate on plants，animals and diseases [Z]. CSIRO，Canberra，2015.

[22] 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(3)：305－316.

[23] COCK M J，BESEH P K，BUDDIE A G，et al. Molecular methods to detect *Spodoptera frugiperda* in Ghana，and implications for monitoring the spread of invasive species in developing countries [J/OL]. Scientific Reports，2017，7(1)：4103.

（责任编辑：杨明丽）