

气候变化背景下烟草粉斑螟入侵中国的全程风险评估



彭 硕^{1,2} 伍绍龙³ 杨海林⁴ 宋 凡¹ 苗 圃^{5*} 赵紫华^{1,2*}

(1. 中国农业大学植物保护学院, 农业农村部植物检疫性有害生物监测防控重点实验室, 北京 100193; 2. 三亚中国农业大学研究院, 海南 三亚 572025; 3. 湖南省烟草公司, 长沙 410004; 4. 云南省烟草公司 玉溪市公司, 玉溪 653100; 5. 河南省烟草公司洛阳市公司, 洛阳 471000)

摘要: 为制订烟草粉斑螟 *Ephestia elutella* 的精准管理方案, 从入侵阶段出发, 基于收集的生物学及生态学信息以及 MaxEnt 模型对烟草粉斑螟入侵中国的跨境传入风险、定殖适生风险以及扩散暴发风险进行评估, 并提出相应的风险管理措施。结果表明, 烟草粉斑螟个体体积小, 为害隐蔽不易识别, 传入途径多样, 具有高跨境传入风险; 未来气候条件下其在全球及在中国的总适生区面积呈扩张趋势, 具有高定殖适生风险; 其繁殖能力强, 寄主广泛, 传播途径广, 为害后果严重, 具有高扩散暴发风险, 最终评估烟草粉斑螟入侵中国的全程风险水平为高风险水平。应采取科学的监测和防控方法, 分阶段精准防控烟草粉斑螟入侵, 警惕其进一步扩散为害。

关键词: 烟草粉斑螟; MaxEnt 模型; 跨境传入风险; 定殖适生风险; 扩散暴发风险

Thorough risk assessment of tobacco moth *Ephestia elutella* in China under the climate change environment

Peng Shuo^{1,2} Wu Shaolong³ Yang Hailin⁴ Song Fan¹ Miao Pu^{5*} Zhao Zihua^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Surveillance and Management for Plant Quarantine Pests of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya 572025, Hainan Province, China; 3. Hunan Province Tobacco Company, Changsha 410004, Hunan Province, China; 4. Yuxi Branch, Yunnan Province Tobacco Company, Yuxi 653100, Yunnan Province, China; 5. Luoyang Company of Henan Province Tobacco Company, Luoyang 471000, Henan Province, China)

Abstract: In order to develop precise management plans for tobacco moth *Ephestia elutella*, the risks of cross-border introduction, establishment, and explosion starting from the invasion process were assessed, and consistent risk management measures were proposed based on the collection of biological and ecological information, with MaxEnt model. The results revealed a high cross-border risk of *E. elutella*, attributed to its small body size, hidden damage, and diverse pathways. The total suitable areas of *E. elutella* showed a tendency of global expansion under future climate conditions, particularly in China, indicating a high-risk level for establishment. The species was thought to pose a high risk of explosion, given its high reproductive capacity, wide range of hosts, extensive pathways, and severe consequences upon invasion. In conclusion, *E. elutella* was thought to have high overall risk of invasion in China. It is recommended to adopt scientific monitoring, prevention, and control methods, and to implement accurate measures in a phased manner to prevent its further expansion and damage.

Key words: *Ephestia elutella*; MaxEnt model; cross-border risk; establishment risk; explosion risk

烟草粉斑螟 *Ephestia elutella* 又称为烟草粉螟、烟草螟,属鳞翅目螟蛾科粉斑螟属 *Ephestia*,是一种重要的储烟害虫(杜艳丽和李子忠,2000),目前在全球范围内的温带地区广泛分布,在国外主要分布在欧洲,在国内主要分布在云南、贵州、湖南、湖北、江西和安徽等省,在主产烟区云南省和贵州省为害最重(潘周云等,2022),被判断为外来有害生物。烟草粉斑螟常以幼虫直接取食烟叶为害,导致烟叶破碎,表面穿孔,成丝率下降,从而影响进一步加工;此外,其幼虫取食后还会留下虫尸、虫粪及丝状物,降低烟草等级,影响成烟品质(张皓等,2012;邓红英等,2018)。烟草粉斑螟个体较小,繁殖能力强,为害广泛,隐蔽性强,极易暴发成灾(张皓,2002)。据统计,全球每年因储烟害虫造成的烟草损失约5 000亿美元;在中国,每年储存烟叶的虫损率达到1.64%,带来的经济损失高达215亿元(黄景崇,2007;韩顺财,2022)。因此,明确该害虫入侵中国的全程风险,采取相应的防控措施对于防控该害虫具有重要意义。

外来物种入侵分为传入、定殖、潜伏、扩散和暴发5个阶段,涉及外来物种、传入途径以及易被入侵的生态系统3个方面(万方浩等,2009;赵紫华,2021),这3个方面对于入侵的完成缺一不可。跨境传入阶段涉及外来物种本身以及传入途径,一定程度上物种能否发生生境转移决定了其能否成为外来物种,而生境转移则需要传入途径介导;定殖适生阶段取决于外来物种与新入侵环境之间的相互作用;扩散暴发阶段可以看作是另一阶段的进入和定殖,更像是外来物种在新栖息地的“二次入侵”(彭硕,2023)。跨境传入、定殖适生以及扩散暴发等阶段在生物入侵进程中都发挥着相应的作用,缺一不可,因此在风险评估过程中,更应预测其入侵全过程的风险,即进行全程风险评估,从而提出更科学、更精准的入侵防控方案。国外学者对外来物种的全程风险评估进行了积极探索,建立了多指标综合评估体系、植物有害生物影响度量系统等(王聪等,2022);在国内多指标综合评判法被广泛用于风险评估(蒋青等,1994;1995;李志红和秦誉嘉,2018)。当前,应对外来物种入侵进行全程风险评估,及早确定各阶段入侵风险,将对外来物种入侵的防控转移至入侵前阶段(赵紫华等,2019),相应管理措施也将分阶段、分力度地精准投入落实。积极开展外来物种全程风险评估将有助于一线口岸检疫工作,也有助于实现外来物种防控重心的转移和分阶段管理,从而及早预警风险,守护国门生物安全。

鉴于烟草粉斑螟对中国烟草产业的为害,从烟草粉斑螟的跨境传播和分布情况及进一步扩散的角度出发,以中国为风险评估区域,基于采集的烟草粉斑螟数据以及广泛使用的MaxEnt模型,对烟草粉斑螟入侵中国的跨境传入风险、定殖适生风险、扩散暴发风险以及全程风险进行评估,掌握其入侵过程中各阶段的风险及全程风险,给出精准的管理方案,以期为其他有害生物防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

数据来源:烟草粉斑螟的形态学特征、生物学特征、传入途径、传播途径、寄主和限定情况等数据及信息主要通过公开发表的文献、数据集以及国内外网站等收集。主要文献包括孟国玲等(1990)、沈兆鹏(1994)、高家合等(2000)、杜艳丽和李子忠(2000)、张皓(2002)、高家合(2008)、张皓等(2012)和韩顺财(2022)等;主要网站包括国门生物安全基础数据信息资源平台(<http://www.pestchina.com/>)、全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org>)、国际应用生物科学中心入侵物种纲要(<https://www.ca-bidigitallibrary.org/product/qi>)以及全球入侵物种资料库(<http://www.iucngisd.org/gisd/>)、ButterflyHouse(<http://www.butterflyhouse.com.au/>)等。

分布数据:自全球生物多样性信息网络数据库下载烟草粉斑螟的分布数据,利用国际应用生物科学中心入侵物种纲要数据库以及国内外公开发表的文献等对其校正和补充。

环境变量:共选择19个生物气候学变量,分别为年平均气温、月平均昼夜温差、平均日温、气温季节性变化、最热月最高温、最冷月最低温、年气温变化范围、最湿季节平均气温、最干季节平均气温、最热季节平均气温、最冷季节平均气温、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水季节变化、最湿季节降水量、最干季节降水量、最暖季节降水量和最冷季节降水量,其数据均来自世界气候(WorldClim,<http://www.worldclim.org/>)网站下载。选择1970—2000年作为历史气候条件,选择2041—2060年作为未来气候条件,环境数据图层的空间分辨率为5 min×5 min。

地图数据:从自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)下载世界地图作为底图。

所用软件:使用SPSS 26.0软件进行因子分析和相关性分析,使用MaxEnt 3.4.1(

sityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/) 软件进行烟草粉斑螟潜在地理分布预测,使用 ArcGIS 10.2 软件和 R 语言 4.2.2 (<https://www.r-project.org/>) 对结果进行可视化。

1.2 方法

1.2.1 烟草粉斑螟全程风险评估方案

烟草粉斑螟跨境传入风险的评估:根据外来物种的体型大小、远距离传播虫态及传入途径评估其跨境传入风险。传入途径分自然传入、人为有意传入和人为无意传入,人为无意传入进一步分为运输偷渡者、运输污染物、逃逸、释放和廊道等途径。如果外来物种体型越小、远距离传播虫态越难识别、传入途径越广,则该外来物种跨境传入风险水平越高,对其跨境传入风险进行定性。若同时具有利于传入的体型、远距离传播虫态以及传入途径,则认为其具有高传入风险;若仅具有有利于传入的途径,则认为具有中传入风险;若仅具有有利于传入的体型和远距离传播虫态,则认为其具有低传入风险。烟草粉斑螟成虫整体呈浅灰褐色,前翅颜色深于后翅,有暗白色条纹,成虫体长 6~9 mm,翅展 14~16 mm;卵椭圆形,呈乳白色,长约 0.5 mm,宽约 0.4 mm;幼虫通常共 6 日龄,一般由乳白色至淡粉色再至乳黄色,老熟幼虫体长 10~15 mm;蛹长约 7.0~8.5 mm,呈淡褐色(杜艳丽和李子忠,2000;韩顺财,2022)。烟草粉斑螟可随运输污染物和运输偷渡者传入,如烟叶、卷烟以及烟草产品包装材料和运输工具等。

烟草粉斑螟定殖适生风险的评估:根据 MaxEnt 潜在地理分布结果评估烟草粉斑螟定殖适生风险,并对其定性。若历史气候条件下具有一定面积的烟草粉斑螟中、高适生区,并且在未来气候条件下其保持不变或有所增加,则认为其具有高定殖风险;若历史气候条件下具有一定面积的烟草粉斑螟中、高适生区,并且在未来气候条件下其有所减小,则认为其具有中定殖风险;若历史气候条件下仅具有一定面积的烟草粉斑螟低适生区或较小面积的中适生区,在未来气候条件下高适生区或中适生区明显扩张,则认为其具有中定殖风险,反之则认为其具有低定殖风险。

烟草粉斑螟扩散暴发风险的评估:根据外来物种的生活史、繁殖能力、传播途径、寄主以及在新生境中的管理及限定措施和经济重要性评估其扩散暴发风险。传播途径分为商品携带、繁殖材料、动物媒介以及飞行。如果外来物种繁殖能力强,传播途径广,寄主广泛,管理及限定措施少,经济重要性高,则

其扩散暴发风险水平高,对其扩散暴发风险进行定性。高繁殖力是高扩散风险的基础,在高繁殖力前提下,传播途径、寄主和管理及限定措施三者其一利于扩散,则认为其具有高扩散风险;其中,若受严格管制,则认为其具有中扩散风险;若繁殖力水平较低,不需要考虑传播途径、寄主和管理及限定措施,则认为其具有低扩散风险。烟草粉斑螟的生活史因环境条件而不同,其最适发育温度为 25~28 °C,最适相对湿度为 75% 左右,在中国主要烟草种植区一般 1 年发生多代,世代重叠现象明显(张皓,2002;韩顺财,2022);烟草粉斑螟繁殖能力较强,单雌产卵量可达 114 粒(高家合等,2000)。从传播途径来看,烟草粉斑螟可通过繁殖材料和商品携带传播;从寄主来看,烟草粉斑螟寄主多样,包括烟草、粮食、贮藏干果和可可等,主要以幼虫为害烟草(韩顺财,2022);烟草粉斑螟在各国的限定情况不同,在中国其被限定为有害生物,在菲律宾、马来西亚和匈牙利等国其被限定为检疫性有害生物(国门生物安全基础数据信息资源平台 <http://www.pestchina.com/>)。

综合烟草粉斑螟的跨境传入风险、定殖适生风险以及扩散暴发风险水平(图 1),评估其全程入侵风险水平。

1.2.2 烟草粉斑螟分布数据处理及关键环境变量筛选

对获得的烟草粉斑螟分布数据进行整理,利用 Excel 2021 对整理后的烟草粉斑螟分布数据进行初步去重复,在 ArcGIS 10.2 软件中使用 SDM Tools 工具对去重复后的分布数据中空间自相关分布点进行删除,将其转为栅格格式,空间分辨率为 5 min×5 min,删除不符合要求的分布点数据。在关键环境变量筛选过程中,采用 ArcGIS 10.2 软件对所有环境变量采样,使用 SPSS 26.0 软件对采样数据进行因子分析和 Pearson 相关性分析,若 2 个因子间的相关性 ≥ 0.8 ,保留贡献率较大的变量,在 R 语言 4.2.2 中使用 corplot 工具包进行环境变量相关性的分析及可视化。预运行 MaxEnt 3.4.1 软件,进一步删除不符合要求的分布点,去除贡献率为 0 的变量。将数据按物种、经度和纬度顺序储存为 .csv 文件,筛选出关键环境变量用于 MaxEnt 建模。

1.2.3 基于 MaxEnt 评估烟草粉斑螟的定殖适生风险

在定殖适生风险评估中,选用第 6 次国际耦合模式比较计划中北京气候中心气候系统模型的低强迫情景 SSP126 和高强迫情景 SSP585 进行未来气候条件下物种潜在适生区的预测(辛晓歌等,2019;魏鹏等,2022)。将处理好的烟草粉斑螟分布数据及环

境数据导入到 MaxEnt 模型中,分别预测历史及未来气候条件下烟草粉斑螟的潜在地理分布。烟草粉斑螟分布点共 454 个,随机选择 25% 的分布点作为测试集,剩下的 75% 分布点作为训练集,重复运行 10 次,重复运行规则选择 Subsample,最大迭代次数为 5 000。采用受试者工作特征(receiver operating characteris-

tic, ROC) 曲线下面积(area under curve, AUC) 检验模型精度,当 AUC 值 ≥ 0.9 时模型预测结果优秀,当 $0.7 \leq \text{AUC 值} < 0.9$ 时模型预测结果良好,当 $0.5 \leq \text{AUC 值} < 0.7$ 时模型预测结果可接受,当 AUC 值 < 0.5 时模型预测无效(Peterson et al., 2008; 徐艳玲等, 2022)。

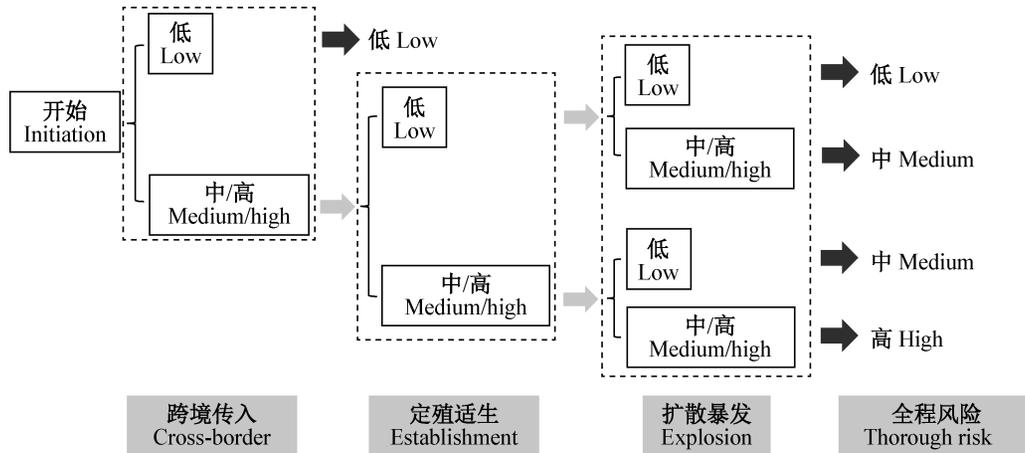


图 1 基于入侵阶段的烟草粉斑螟全程风险评估方案

Fig. 1 Thorough risk assessment scheme for *Ephestia elutella* based on invasion stages

在 ArcGIS 10.2 中使用自然间断点分级法对烟草粉斑螟适生区进行等级划分,当 $0 \leq \text{适生指数} < 0.07$ 时,为非适生区;当 $0.07 \leq \text{适生指数} < 0.25$ 时,为低适生区;当 $0.25 \leq \text{适生指数} < 0.47$ 时,为中适生区;当 $0.47 \leq \text{适生指数} \leq 1.00$ 时,为高适生区;在 ArcGIS 10.2 中使用重分类工具计算历史及未来气候条件下烟草粉斑螟各等级适生区面积。

2 结果与分析

2.1 烟草粉斑螟跨境传入风险

烟草粉斑螟各发育阶段体型均较小,远距离传播虫态常为幼虫,无便于快速识别的体色及形态特征,为害较隐蔽,故其跨境传入风险为高风险水平。

2.2 烟草粉斑螟定殖适生风险

2.2.1 关键环境变量及 MaxEnt 模型精度

经 Pearson 相关性分析,从 19 个生物环境变量中共筛选出了 4 个关键环境变量,分别为最冷月最低温、降水季节变化、月平均昼夜温差和最湿季节降水量(图 2~3),其对 MaxEnt 模型的贡献率分别为 45.4%、18.3%、18.2% 和 18.1%。最冷月最低温对烟草粉斑螟分布的影响最大,并且该关键环境变量具备更多其他变量所没有的独特信息,月平均昼夜温差对烟草粉斑螟分布的影响最小(图 3)。MaxEnt 模型的平均 AUC 值为 0.961,模型预测结果为优秀(图

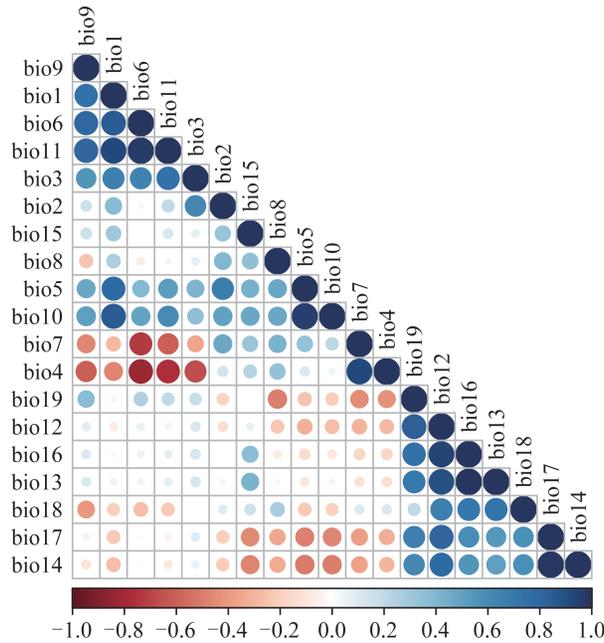
4),表明该模型可用于烟草粉斑螟适生区的预测。

2.2.2 不同气候条件下烟草粉斑螟适生区面积

历史气候条件下,烟草粉斑螟适生区在全球广泛分布,覆盖除南极洲外的其他 6 大洲,主要分布在欧洲,总适生区面积为 2 501.15 万 km^2 (表 1),高适生区主要集中在英国、法国、德国和波兰等欧洲国家,在中国和日本等亚洲国家也有小面积分布(图 5-A);烟草粉斑螟在中国的适生区主要分布在中国南方,总适生面积为 252.59 万 km^2 (表 1),高适生区主要分布在湖北省、湖南省以及浙江省、安徽省等长江三角洲地区(图 5-A)。

未来气候 2 种情景下,除高强迫情境 SSP585 下低适生区面积有所缩小外,烟草粉斑螟在全球的低、中和高适生区面积均较历史气候条件下扩张,总适生区面积均增加,分别为 2 821.12 万 km^2 和 2 836.69 万 km^2 (表 1,图 5-B~C)。未来气候低强迫情景 SSP126 下,烟草粉斑螟在中国的低适生区和中适生区面积均较历史气候条件下增加,高适生区面积较历史气候条件下减小,总适生区面积较历史气候条件下增加(表 1,图 5-B);未来气候高强迫情景 SSP585 下,烟草粉斑螟在中国的低适生区面积较历史气候条件下增加,中适生区和高适生区面积均较历史气候条件下减小,总适生区面积较历史气候条件下增加(表 1,图 5-C)。根据烟草粉斑螟适生区变化,未来气候条

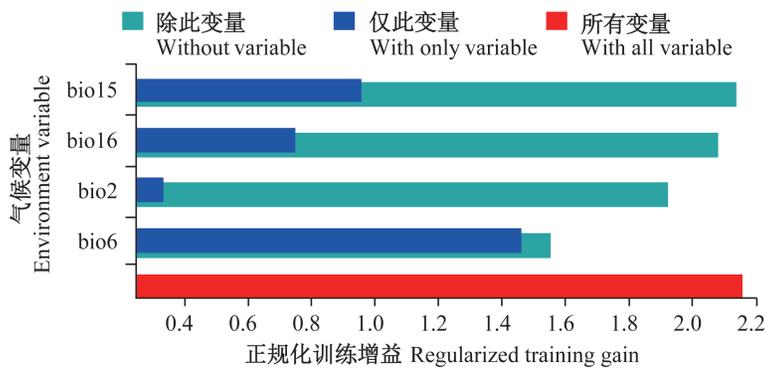
件下将烟草粉斑螟在中国定殖适生风险评估为高风险水平。



bio1: 年平均气温; bio2: 月平均昼夜温差; bio3: 平均日温; bio4: 气温季节性变化; bio5: 最热月最高温; bio6: 最冷月最低温; bio7: 气温年变化范围; bio8: 最湿季节平均气温; bio9: 最干季节平均气温; bio10: 最热季节平均气温; bio11: 最冷季节平均气温; bio12: 年降水量; bio13: 最湿月降水量; bio14: 最干月降水量; bio15: 降水季节变化; bio16: 最湿季节降水量; bio17: 最干季节降水量; bio18: 最暖季节降水量; bio19: 最冷季节降水量。
 bio1: Annual mean temperature; bio2: mean diurnal range; bio3: isothermality; bio4: temperature seasonality; bio5: maximum temperature of the warmest month; bio6: minimum temperature of the coldest month; bio7: temperature annual range; bio8: mean temperature of the wettest quarter; bio9: mean temperature of the driest quarter; bio10: mean temperature of the warmest quarter; bio11: mean temperature of the coldest quarter; bio12: annual precipitation; bio13: precipitation of the wettest month; bio14: precipitation of the driest month; bio15: precipitation seasonality; bio16: precipitation of the wettest quarter; bio17: precipitation of the driest quarter; bio18: precipitation of the warmest quarter; bio19: precipitation of the coldest quarter.

图2 影响烟草粉斑螟分布的19个环境变量的Pearson相关性分析

Fig. 2 Pearson correlation analysis of 19 environmental variables influencing the distribution of *Ephestia elutella*



bio2: 月平均昼夜温差; bio6: 最冷月最低温; bio15: 降水季节变化; bio16: 最湿季节降水量。 bio2: Mean diurnal range; bio6: minimum temperature of the coldest month; bio15: precipitation seasonality; bio16: precipitation of the wettest quarter.

图3 4个关键环境变量影响烟草粉斑螟分布的重要程度

Fig. 3 Importance of four key environmental variables influencing the distribution of *Ephestia elutella*

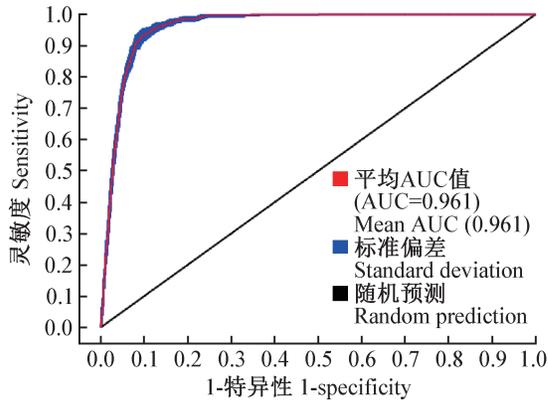


图4 MaxEnt模型的精度

Fig. 4 Accuracy of MaxEnt model

2.3 烟草粉斑螟扩散暴发风险水平

综合烟草粉斑螟生活史、繁殖能力、传播途径以及限定情况,并考虑到其是中国烟草产业的重要害虫,是为害最严重的储烟害虫之一,经济影响较大,故将其在中国的扩散暴发风险评估为高风险水平。

2.4 烟草粉斑螟的全程风险等级及风险管理措施

根据烟草粉斑螟进入中国的高跨境传入风险、高定殖适生风险以及高扩散暴发风险,评估烟草粉斑螟入侵中国的全程风险为高风险水平。采取管理措施如下:第一,做好检疫及管理,对进口烟草及烟草产品进行严格检疫,并对检疫出烟草粉斑螟的产品进行检疫处理;第二,做好熏蒸处理,选择科学熏蒸方式,选择适宜的熏蒸时期,安排合理的熏蒸顺序,及时处理新入库的烟叶,控制外来虫源;第三,采取物理防治措施,使用气调防虫、温度杀虫和电离辐射技术控虫等方式,也可以使用拍打和抖动等机械

杀虫方式;第四,选用生物防治方法,如使用白僵菌 *Beauveria bassiana*、苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* 等进行防治,也可利用麦蛾茧蜂 *Habrobracon hebetor* 等寄生性天敌;第五,采用化学防治手段,如用50%敌敌畏乳油100~200倍液进行喷雾等;第六,也可以采取空仓消毒、改良包装方式、区分烟叶储存区域和人工诱杀成虫等综合防治手段进行害虫控制,同时利用诱虫板等做好虫害监测和调查。

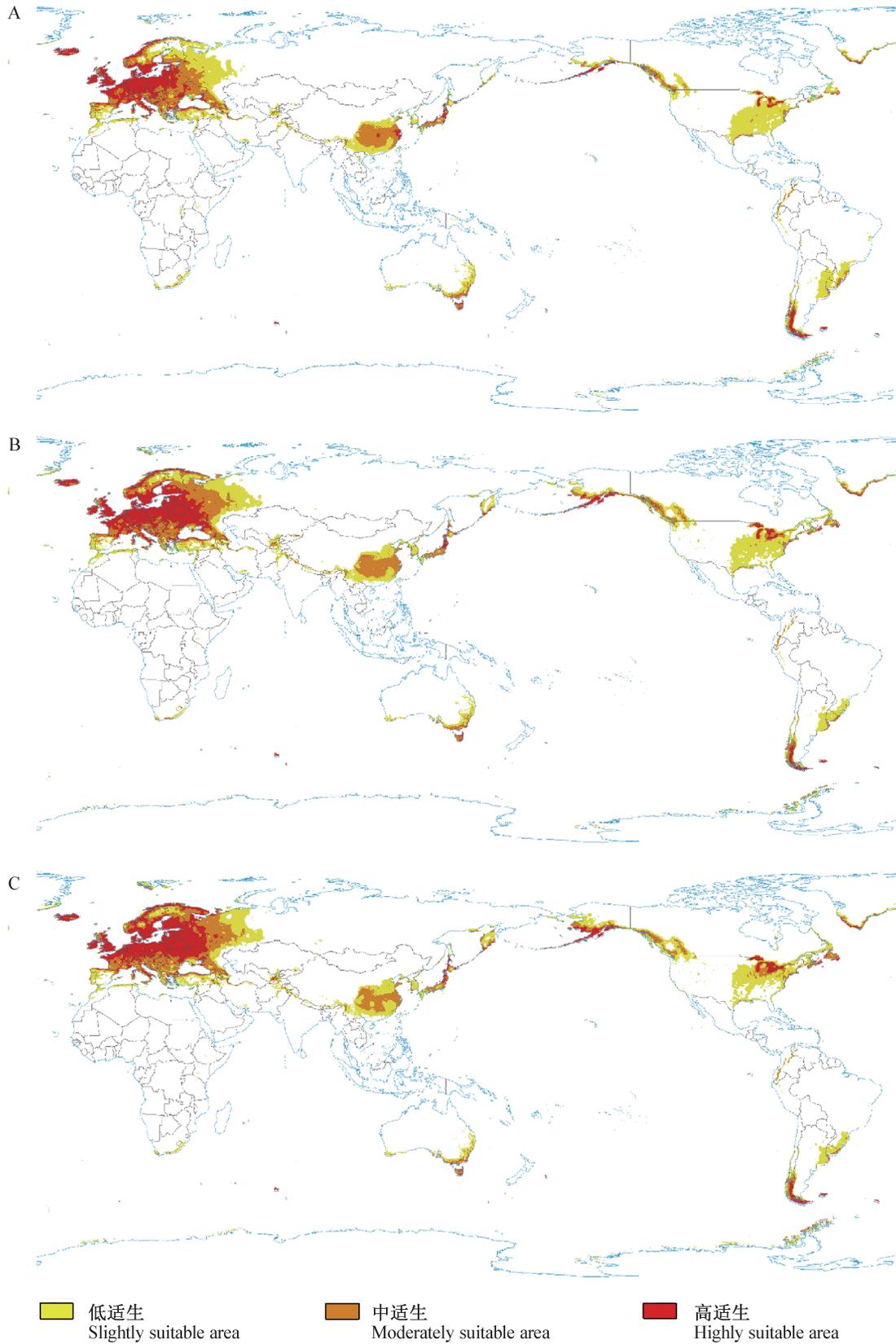
3 讨论

本研究发现,烟草粉斑螟具有高跨境传入风险,高定殖适生风险以及高扩散暴发风险,全程风险水平为高风险水平。烟草粉斑螟具有高跨境传入风险的原因主要是其较难被检疫识别,其体型较小,幼虫为害隐蔽,并且在入库初期往往为害较轻,极大地增加了对其检疫和监测的难度,同时也便于其随包装材料以及烟草商品传入。在口岸检疫工作中,截获的入侵昆虫也往往具有体型较小、易于藏匿等特点(施宗伟和姚仁国,2004)。此外,尽管国内烟草产业发达,但仍无法满足市场需求,一定数量的烟草及其产品需要进口(李瑞滔,2016),因此极易引入新虫源,加速其跨境传入,从而进一步扩散为害。扩散暴发可以看作是另一种方式的传入,入侵可以看作是“进入-定殖”的迭代过程(潘绪斌等,2018)。高跨境传入风险,高定殖适生风险,而且烟草粉斑螟本身具有较高的繁殖力、较好的适应性以及多样的寄主和传播途径,极大地促进了其在已发生地区的进一步扩散入侵。

表1 不同气候条件下烟草粉斑螟在全球和中国的适生区面积

Table 1 Suitable areas of *Ephestia elutella* in the world and in China under different climate conditions

气候条件 Climate condition	全球 In the world				
	非适生区 Unsuitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	低适生区 Slightly suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	中适生区 Moderately suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	高适生区 Highly suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	总适生区 Total suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)
历史气候条件 Historical climate condition	19 514.22	1 215.52	744.69	540.94	2 501.15
低强迫情景 SSP126 Low forcing scenario SSP126	19 099.15	1 232.96	866.10	722.06	2 821.12
高强迫情景 SSP585 High forcing scenario SSP585	19 083.57	1 190.65	855.66	790.39	2 836.69
气候条件 Climate condition	在中国 In China				
	非适生区 Unsuitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	低适生区 Slightly suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	中适生区 Moderately suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	高适生区 Highly suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)	总适生区 Total suitable area/ ($\times 10^4$ km ²)
历史气候条件 Historical climate condition	710.11	113.63	129.41	9.56	252.59
低强迫情景 SSP 126 Low forcing scenario SSP126	701.94	125.79	134.57	0.40	260.76
高强迫情景 SSP 585 High forcing scenario SSP585	706.38	149.34	106.76	0.22	256.32



审图号: GS京(2023)2435号

A: 历史气候条件下; B: 低强迫情景 SSP126 下; C: 高强迫情景 SSP585 下。A: Historical climate condition; B: low forcing scenario SSP126; C: high forcing scenario SSP585.

图5 不同气候条件下烟草粉斑螟在全球的适生区

Fig. 5 Global suitable areas of *Ephestia elutella* under different climate conditions

基于MaxEnt模型的定殖风险评估结果表明,未来气候条件下烟草粉斑螟在全球的高适生区呈扩张趋势,并且集中在欧洲,一方面是由于欧洲全年温和湿润的海洋性气候极适宜烟草粉斑螟定殖和扩散,另一方面是由于气候变暖提高了烟草粉斑螟的繁殖能力及适应性。高家合等(2000)通过室内试验也发现,一定范围内烟草粉斑螟的发育速度随温度升高而加快,卵孵化率和幼虫世代存活率随湿度升高而增加。本研究通过Pearson相关性分析筛选出月平均昼夜温差、最冷月最低温、降水季节变化和最湿季节降水量4个影响烟草粉斑螟潜在地理分布的关键环境因素,表明温度和降水是影响其分布的主要因素;未来气候条件下烟草粉斑螟在中国适生区也主要集中在水热条件更充沛的南方,这与中国烟草种植省重叠,再加上中国烟草产区及各适生区在地理位置上分布连续,推测烟草粉斑螟有极大扩散及暴发的可能。因此,应格外关注烟草粉斑螟的进一步入侵扩散,并且考虑储藏害虫以及烟草产品的特殊性,应采用经济、高效和绿色的防治方法。

在研究外来物种入侵的过程中,一方面要警惕新物种的传入风险,另一方面也要警惕已发生物种,基于“桥头堡”效应向新生境进一步扩散的风险(Lombaert et al., 2010; Blumenfeld & Vargo, 2020)。基于此,提出以下几点建议:(1)完善数据记录及收集,建立分布及特征数据库。及时进行外来物种相关信息的储存、收集及共享,基于大数据技术建立外来物种分布及入侵特征数据库,掌握外来物种的时空分布规律及入侵特征。(2)加强理论创新,优化风险评估方法。聚焦入侵阶段,从入侵物种本身、入侵途径以及易被入侵的生态系统出发,基于数学及生态学建模建立更加完善的风险评估体系,针对重要外来物种进行全程风险评估。(3)基于入侵阶段创新科学的防控和综合防治方法,如通过包装材料的改良减少其跨境传播载体,从而减少其传播概率;通过仓库低温杀虫等,及时干预其进一步暴发为害等。(4)完善法律法规,加强监管监测。以《中华人民共和国生物安全法》为依据,进一步加强疫情监测、现场查验、实验室检测、调运检疫、隔离检疫和检疫处置等标准,进一步做好商品引入管理、国门口岸防控和国内调运检疫三大关口,将对入侵生物的防控前移,防微杜渐,治早治小。

参 考 文 献 (References)

Blumenfeld AJ, Vargo EL. 2020. Geography, opportunity and bridge-

heads facilitate termite invasions to the United States. *Biological Invasions*, 22(11): 3269–3282

Deng HY, Ou HD, Jin X, Wang XQ, Li Y, Tian TA, Yang H, Yang MF. 2018. Population dynamics and resource of *Ephestia elutella* (Hübner) in the tobacco warehouses in Guiyang of Guizhou Province. *Plant Protection*, 44(6): 172–176 (in Chinese) [邓红英, 欧后丁, 金鑫, 王秀琴, 李跃, 田太安, 杨洪, 杨茂发. 2018. 贵阳市烟仓烟草粉螟消长动态及虫源分析. *植物保护*, 44(6): 172–176]

Du YL, Li ZZ. 2000. Study on biology of *Ephestia elutella*. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 19(6): 431–435, 473 (in Chinese) [杜艳丽, 李子忠. 2000. 烟草粉螟 *Ephestia elutella* 的生物学特性. *山地农业生物学报*, 19(6): 431–435, 473]

Gao JH. 2008. Study on biological characteristics and biological control of *Ephestia elutella* Hübner. Master thesis. Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese) [高家合. 2008. 烟草粉螟生物学特性及生物防治的研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学]

Gao JH, Wang G, Li TF, Wang YQ, Deng JH, Wu XF, Song CM. 2000. Studies on the biology of *Ephestia elutella* Hübner. *Journal of Southwest Agricultural University*, 22(1): 45–48 (in Chinese) [高家合, 王革, 李天飞, 王颖琦, 邓建华, 吴兴富, 宋春满. 2000. 烟草粉螟的生物学特性研究. *西南农业大学学报*, 22(1): 45–48]

Han SC. 2022. Effect of microwave on *Ephestia elutella* (Hübner) and economic threshold. Master thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese) [韩顺财. 2022. 微波处理对烟草粉螟的防治效果及经济阈值研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学]

Huang JC. 2007. The characteristics of damage and integrated pest management of storage pest of tobacco in Guangdong. *Guangdong Agricultural Sciences*, 34(12): 57–59 (in Chinese) [黄景崇. 2007. 广东烟叶仓储害虫发生危害特点及综合防治. *广东农业科学*, 34(12): 57–59]

Jiang Q, Liang YB, Wang NY, Yao WG. 1994. Preliminary establishment of index system for pest risk assessment. *Plant Quarantine*, 8(6): 331–334 (in Chinese) [蒋青, 梁忆冰, 王乃杨, 姚文国. 1994. 有害生物危险性评价指标体系的初步确立. *植物检疫*, 8(6): 331–334]

Jiang Q, Liang YB, Wang NY, Yao WG. 1995. Study on quantitative analysis method of pest risk assessment. *Plant Quarantine*, 9(4): 208–211 (in Chinese) [蒋青, 梁忆冰, 王乃杨, 姚文国. 1995. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. *植物检疫*, 9(4): 208–211]

Li RT. 2016. A study on the international competitiveness of China's tobacco industry. Master thesis. Kunming: Yunnan University (in Chinese) [李瑞滔. 2016. 中国烟草产业的国际竞争力研究. 硕士学位论文. 昆明: 云南大学]

Li ZH, Qin YJ. 2018. Review on the quantitative assessment models for pest risk analysis and their comparison. *Plant Protection*, 44(5): 134–145 (in Chinese) [李志红, 秦誉嘉. 2018. 有害生物风险分析定量评估模型及其比较. *植物保护*, 44(5): 134–145]

Lombaert E, Guillemaud T, Cornuet JM, Malausa T, Facon B, Estoup

- A. 2010. Bridgehead effect in the worldwide invasion of the bio-control harlequin ladybird. *PLoS ONE*, 5(3): e9743
- Meng GL, Gong XW, Gui LY, Chen B. 1990. Observation on *Ephesia elutella* (Hübner). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 27(1): 16–18 (in Chinese) [孟国玲, 龚信文, 桂连友, 陈斌. 1990. 烟草粉斑螟的观察. *昆虫知识*, 27(1): 16–18]
- Pan XB, Wang C, Yan J, Zhu SF. 2018. Impacts of economic globalization and climate change on biological invasion. *China Plant Protection*, 38(4): 65–69, 33 (in Chinese) [潘绪斌, 王聪, 严进, 朱水芳. 2018. 经济全球化与气候变化对生物入侵的影响浅析. *中国植保导刊*, 38(4): 65–69, 33]
- Pan ZY, Tian JX, Bao ZY, Deng RK. 2022. Dynamic analysis of *Ephesia elutella* (Hübner) in different tobacco storage areas. *Agricultural Technology Service*, 39(1): 32–34 (in Chinese) [潘周云, 田景先, 包正元, 邓瑞康. 2022. 不同烟叶存放区烟草粉斑螟发生动态分析. *农技服务*, 39(1): 32–34]
- Peng S. 2023. The invasion realms and risk of non-native insects in the Belt and Road. Master thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [彭硕. 2023. “一带一路”国家外来昆虫的入侵区系及风险评估. 硕士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Peterson AT, Papeş M, Soberón J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1): 63–72
- Shen ZP. 1994. Biology on *Ephesia elutella* (Hübner). *Grain Storage*, (5): 50–51 (in Chinese) [沈兆鹏. 1994. 烟草粉斑螟的生物学. *粮食储藏*, (5): 50–51]
- Shi ZW, Yao WG. 2004. Elementary analysis on invasive characteristics of alien insect species and prevention strategy. *Entomological Knowledge*, 41(4): 371–374 (in Chinese) [施宗伟, 姚文国. 2004. 从口岸截获疫情浅析外来昆虫入侵特点和防范对策. *昆虫知识*, 41(4): 371–374]
- Wan FH, Guo JY, Zhang F. 2009. Research on biological invasions in China. Beijing: Science Press, pp. 1–316 (in Chinese) [万方浩, 郭建英, 张峰. 2009. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社, pp. 1–316]
- Wang C, Ding ZW, Jiang P, Pan XB. 2022. Systematic review and perspective of the application of multi-index comprehensive evaluation method. *Plant Protection*, 48(6): 187–192, 206 (in Chinese) [王聪, 丁子玮, 姜培, 潘绪斌. 2022. 多指标综合评价方法应用的系统回顾与展望. *植物保护*, 48(6): 187–192, 206]
- Wei P, Qin YJ, Wang ZY, Zhao SQ, Li ZH. 2022. Prediction of the potential geographical distribution of western corn rootworm *Diabrotica virgifera virgifera* in China under climate change based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1400–1410 (in Chinese) [魏鹏, 秦誉嘉, 王振营, 赵守歧, 李志红. 2022. 基于MaxEnt模型预测气候变化下玉米根萤叶甲在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 49(5): 1400–1410]
- Xin XG, Wu TW, Zhang J, Zhang F, Li WP, Zhang YW, Lu YX, Fang YJ, Xie WH, Zhang L, et al. 2019. Introduction of BCC models and its participation in CMIP6. *Climate Change Research*, 15(5): 533–539 (in Chinese) [辛晓歌, 吴统文, 张洁, 张芳, 李伟平, 张艳武, 路屹雄, 房永杰, 颀卫华, 张莉, 等. 2019. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍. *气候变化研究进展*, 15(5): 533–539]
- Xu YL, Qin YJ, Zhang Y, Zhang Y, Fu WD, Zhang GL, Li ZH, Zhao ZH. 2022. Potential geographical distribution of alien invasive bur cucumber *Sicyos angulatus* in China based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1440–1449 (in Chinese) [徐艳玲, 秦誉嘉, 张源, 张岳, 付卫东, 张国良, 李志红, 赵紫华. 2022. 基于MaxEnt模型预测外来入侵植物刺果瓜在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 49(5): 1440–1449]
- Zhang H. 2002. Occurrence, damage and control of *Ephesia elutella* (Hübner) in Shaanxi Province. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [张皓. 2002. 陕西省烟草粉斑螟的发生危害与防治研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Zhang H, Zhang DS, Hua BZ. 2012. Seasonal history and population dynamics of tobacco moth *Ephesia elutella* (Hübner). *Acta Tabacaria Sinica*, 18(2): 28–32 (in Chinese) [张皓, 张德胜, 花保祯. 2012. 烟草粉斑螟 *Ephesia elutella* (Hübner) 生活史与种群动态研究. *中国烟草学报*, 18(2): 28–32]
- Zhao ZH. 2021. Invasion ecology. Beijing: Science Press, pp. 1–301 (in Chinese) [赵紫华. 2021. 入侵生态学. 北京: 科学出版社, pp. 1–301]
- Zhao ZH, Su M, Li ZH, Hui C. 2019. Invasion ecology of alien species. *Journal of Plant Protection*, 46(1): 1–5 (in Chinese) [赵紫华, 苏敏, 李志红, 惠苍. 2019. 外来物种入侵生态学. *植物保护学报*, 46(1): 1–5]

(责任编辑:张俊芳)