

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.01.004

基于 MaxEnt 模型的蜜柑大实蝇在我国的适生区预测

杜丽燕, 晏文杰, 彭金凤, 李亚迎, 刘怀, 李广云

西南大学 植物保护学院/长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为探究蜜柑大实蝇(*Bactrocera tsuneonis*)对我国柑橘产业造成的潜在威胁, 通过其在全球的地理分布数据, 采用 MaxEnt 模型对当前气候条件下和未来气候情景下蜜柑大实蝇在我国的适生区进行预测。结果发现, 最暖季度降水量、温度变化方差对 MaxEnt 模型的累积贡献率最大, 分别为 64.5% 和 19.6%。在当前气候条件下, 蜜柑大实蝇在我国适生区主要分布在南部和东部, 其中重庆、贵州、江苏和广西, 四川、福建的东部, 湖南的西部, 广东的北部, 江西的中部地区等为高度适生区。在未来两种温室气体排放情景 SSP126 和 SSP585 下, 适生区面积均增加, SSP126 情景下分布中心由湖北向陕西迁移, SSP585 情景下分布中心由湖北向甘肃迁移, 总体有向北方和西北方扩增的趋势。本研究明确了蜜柑大实蝇未来在我国的潜在地理分布, 为其监测和治理提供了理论依据。

关键词: 蜜柑大实蝇; MaxEnt 模型;

适生区; 影响因子

中图分类号: S436.661

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)01-0028-09

Prediction of Suitable Living Areas of *Bactrocera tsuneonis* (Miyake) in China Based on the MaxEnt Model

DU Liyan, YAN Wenjie, PENG Jinfeng,
LI Yaying, LIU Huai, LI Guangyun

Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River (Ministry of Education)/
College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To explore the potential threat of *Bactrocera tsuneonis* in China's citrus industry, the

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2601000); 重庆市科技局技术创新与应用发展专项(2024TIAD-KPX0104); 重庆市博士后留渝资助项目。

作者简介: 杜丽燕, 研究生, 主要从事农业昆虫与害虫防治方面的研究。

通信作者: 李广云, 博士, 讲师。

MaxEnt model was used to predict the suitable habitat areas of *B. tsuneonis* in China under current climate conditions and future climate scenarios based on its global geographic distribution data. The results showed that the cumulative contribution of precipitation and temperature variance in the warmest quarter to the MaxEnt model was the largest, which was 64.5% and 19.6%, respectively. Under the current climate conditions, the suitable living areas of *B. tsuneonis* in China are mainly distributed in the south and east. Specifically, Chongqing, Guizhou, Jiangsu and Guangxi, eastern Sichuan and Fujian, western Hunan, northern Guangdong and central Jiangxi are highly suitable areas for this pest. Under the two greenhouse gas emission scenarios SSP126 and SSP585 in the future, the suitable living areas will increase, and the distribution center will migrate from Hubei to Shanxi under the SSP126 scenario, and from Hubei to Gansu under the SSP585 scenario, with an overall trend of expansion to the north and northwest. In this study, the potential geographical distribution of *B. tsuneonis* in China was predicted, providing a theoretical basis for the prevention and management of this pest.

Key words: *Bactrocera tsuneonis* (Miyake); MaxEnt model; suitable living area; environmental factors

柑橘种类繁多,且用途十分广泛,除作为水果食用外,在医药、保健等方面还有很大的市场潜力。柑橘产业作为全球农业中重要的组成部分之一有着广泛的经济和社会影响。根据世界柑橘组织的数据,在 2021 年夏至 2022 年冬的柑橘产季,全球柑橘产量达到 1.585 亿 t。其中我国柑橘产量居世界首位,达 4 460 万 t,占全球总产量的 28%。由于柑橘生长周期长,作为常绿果树极易遭受病虫害。目前,柑橘产业的发展面临着诸多威胁,而病虫害是造成柑橘减产最重要的原因之一^[1]。

随着全球气候变暖和国际贸易的加强,越来越多的入侵性害虫扩散危害并造成严重损失。在我国入侵性的柑橘害虫,如橘小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)、橘大实蝇(*Bactrocera minax*)和蜜柑大实蝇(*Bactrocera tsuneonis*)对柑橘危害极大^[2-3]。这些害虫的治理是保障我国柑橘产业可持续健康发展的重要前提。在入侵性害虫的监测和治理中,潜在适生区的预测是进行风险评估的重要步骤,同时也对害虫的防控有重要价值。目前,已有一些学者对入侵柑橘的实蝇在我国的适生区进行了预测^[3-6]。

蜜柑大实蝇是我国禁止进境的危险性有害生物,于 2021 年被列入我国农业植物检疫性有害生物名单^[7]。它是柑橘类水果专食性的害虫,寄主范围广泛,包括多种柑橘类植物,有酸橙、甜橙、橘、乳橘、金橘、大红橘、圆金橘、厚叶金橘和温州蜜柑等^[8]。雌成虫在交配后将卵产在未成熟的柑橘果实的表皮下,卵孵化成幼虫后在果肉内蛀食危害,可造成果实的局部腐烂或全部腐烂,被蛀后的果实常在未成熟时黄中带红并且极易脱落^[9]。据报道,在蜜柑大实蝇发生严重的果树种植区果实的虫果率达到 20%~30%,严重时可达 100%^[10],严重影响柑橘的产量和质量。

我国最早于 1960 年在广西西宁和凭祥发现蜜柑大实蝇。与桔大实蝇相比,蜜柑大实蝇的分布范围较窄,以往仅分布于湖南、四川、云南等省和广西壮族自治区的局部地区^[7]。但根据最近的相关报道,蜜柑大实蝇在我国有进一步扩散的趋势。2016 年在广东省怀集县柑橘园中诱捕到蜜柑大实蝇^[10-11]。为了明确该害虫的潜在入侵风险,已有一些研究分析了当前气候下该害虫在我国的潜在分布^[3]。本文将利用已报道的蜜柑大实蝇的分布资料,采用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 对蜜柑大实蝇在我国的适生性进行了预测,明确气候变化条件下该害虫的适生区变化

情况, 以期为蜜柑大实蝇的监测预警及防治措施制订提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

蜜柑大实蝇的地理分布数据从国门生物安全基础数据信息资源平台(2024)、EPPO(2024)、Global Database 和世界生物多样性信息交换平台等网站进行收集汇总。经过整理和筛选, 去除其中重复、无效和分布过密的记录点, 最终获得 49 个分布点, 并以.csv 格式保存。

环境变量从 Worldclim(<http://www.worldclim.org>) 下载, 未来环境数据的时间范围为 2041—2060 年、2061—2080 年。未来气候数据选择我国(北京)气候中心气候系统模式的中等分辨率气候系统模式(The Beijing climate center climate system model 2 medium resolution, BCC-CSM2-MR)及两种共享社会经济路径(shared socioeconomic pathway, SSP), 即 SSP126(低温温室气体排放情景下)和 SSP585(高温温室气体排放情景下)。环境变量包括 19 个气候变量, 即年平均温度 bio_1、昼夜温差月均值 bio_2、昼夜温差与年温差比值 bio_3、温度变化方差 bio_4、最暖月最高温度 bio_5、最冷月最低温度 bio_6、年气温变化范围 bio_7、最湿季度平均温度 bio_8、最干季度平均温度 bio_9、最暖季度平均温度 bio_10、最冷季度平均温度 bio_11、年降水量 bio_12、最湿月份降水量 bio_13、最干月份降水量 bio_14、降水量变化方差 bio_15、最湿季度降水量 bio_16、最干季度降水量 bio_17、最暖季度降水量 bio_18 和最冷季度降水量 bio_19。

1.2 方 法

1.2.1 蜜柑大实蝇分布数据处理和关键环境变量的筛选

将不同时期的环境变量数据导入到 ArcGIS 10.6 软件中, 利用提取分析工具将环境变量数据按照 49 个样点的经纬度进行提取获得分布点的环境数据。为了避免环境变量之间存在多重线性重复及自相关对模型准确性的影响, 对环境变量进行了筛选。首先利用 MaxEnt 软件, 采用刀切法获得每个环境变量的贡献率, 使用 ArcGIS 10.6 软件提取所有蜜柑大实蝇分布点的环境变量信息, 然后应用 ENMTools 软件通过相关性分析计算各环境变量之间的相关性系数, 当两个环境变量的相关系数绝对值 $|R|$ 大于 0.8 时保留贡献率较大的环境变量用于 MaxEnt 模型构建。

1.2.2 MaxEnt 模型准确性检验

MaxEnt 模型的预测准确性通过受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线下面积(Area Under Curve, AUC)来判断^[12-13]。当 $0.5 \leq \text{AUC 值} < 0.6$ 时, 模型预测失败; 当 $0.6 \leq \text{AUC 值} < 0.7$ 时, 模型预测结果较差; 当 $0.7 \leq \text{AUC 值} < 0.8$ 时, 模型预测结果一般; 当 $0.8 \leq \text{AUC 值} < 0.9$ 时, 模型预测结果良好; 当 $0.9 \leq \text{AUC 值} < 1.0$ 时, 模型预测结果优秀^[14]。AUC 值越接近 1, 表明模型预测结果与环境变量之间的相关性越高, 预测结果的准确度就越高^[15-16]。

1.2.3 基于 MaxEnt 模型的蜜柑大实蝇适生区预测

利用 MaxEnt 所建的模型对当前气候条件下、未来低温温室气体排放情景下和高温温室气体排放情景下蜜柑大实蝇的适生区进行预测, 将蜜柑大实蝇地理分布数据和筛选获得的关键环境变量数据分别导入 MaxEnt 软件中进行预测。本研究利用 MaxEnt 软件随机选取 25% 的蜜柑大实蝇分布点数据作为测试集, 验证模型的准确性, 剩余 75% 作为训练集建立模型, 重复运行 10

次,在重复运行规则中选择子样本,最后结果取 10 次重复的平均值,最多迭代次数为 5 000;模型输出采用 Logistic 形式,生成并分析关键环境变量的响应曲线,并采用刀切法评估关键环境变量对蜜柑大实蝇分布的重要性,输出其他参数保持默认,最后文件以 .asc 格式输出。将预测结果(文件格式为 .asc)分别导入 ArcGIS10.6 软件中,通过格式转换工具把该数据转换为栅格(Raster)格式;随后使用提取分析中的重分类(Reclassify)工具,采用自然断点法对栅格数据进行划分,得到蜜柑大实蝇的适生区分布范围;通过与研究区域的行政区划图叠加得到蜜柑大实蝇的适生区分布图。MaxEnt 软件模拟蜜柑大实蝇的输出图层数据取值范围为 $[0, 1]$,值越高代表着其适生程度越高。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告中对物种分布可能性的定义,结合模型输出结果和适生指数将蜜柑大实蝇的适生等级分为 4 级:高适生区($p \geq 0.66$)、中适生区($0.33 \leq p < 0.66$)、低适生区($0.05 \leq p < 0.33$)和非适生区($p < 0.05$)。

1.2.4 蜜柑大实蝇适生区面积变化与分布中心迁移

以当前情景下蜜柑大实蝇的适生区为参考,使用 MaxEnt 模型对未来气候情景的适生区进行交叉检验,来预测和计算未来气候情景下其适生区面积变化的情况,并通过追踪图层中心的变化来确定从当前至未来 4 个情景的适生区分布中心及迁移路线。

2 结果与分析

2.1 蜜柑大实蝇的关键环境变量筛选和检验

通过对 19 个环境变量数据进行主成分分析和 ENMTTools 相关性分析,共筛选到 8 个关键环境变量用于蜜柑大实蝇在我国的适生区的模型构建,分别为最暖季度降水量、温度变化方差、最冷月最低温度、昼夜温差月均值、降水量变化方差、最干月份降水量、最冷季度降水量、最湿月份降水量。通过刀切法评估关键环境变量对蜜柑大实蝇分布的重要程度,发现最暖季度降水量和最湿月份降水量的“仅此变量”正则化训练增益最高,说明这 2 个环境变量对蜜柑大实蝇分布的影响最大(图 1)。8 个环境变量中最暖季度降水量、温度变化方差、最冷月最低温度、昼夜温差月均值、降水量变化方差、最干月份降水量、最冷季度降水量和最湿月份降水量对 MaxEnt 模型的累积贡献率分别为 64.5%、19.6%、6.2%、4.2%、2.7%、1.1%、1% 和 0.6%。

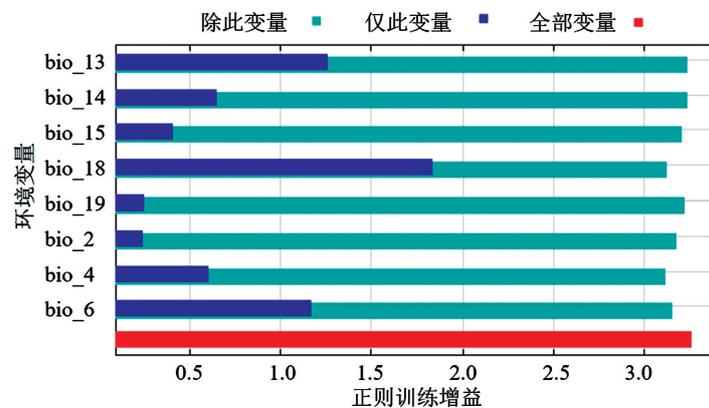


图 1 影响蜜柑大实蝇地理分布的关键环境变量的刀切法分析结果

关键环境变量响应曲线(图 2)表明,适宜蜜柑大实蝇生存的最暖季度降水量最适值为

600 mm, 当最暖季度降水量在 200~600 mm 时, 蜜柑大实蝇的存在概率随降水量的增加而增加; 当大于 600 mm 时, 蜜柑大实蝇的存在概率随降水量的增加而缓慢下降。适宜蜜柑大实蝇生存的温度变化方差最适值为 660, 小于 660 时, 蜜柑大实蝇的存在概率随温度变化方差的增加而升高; 超过 660 时, 蜜柑大实蝇的存在概率缓慢下降。

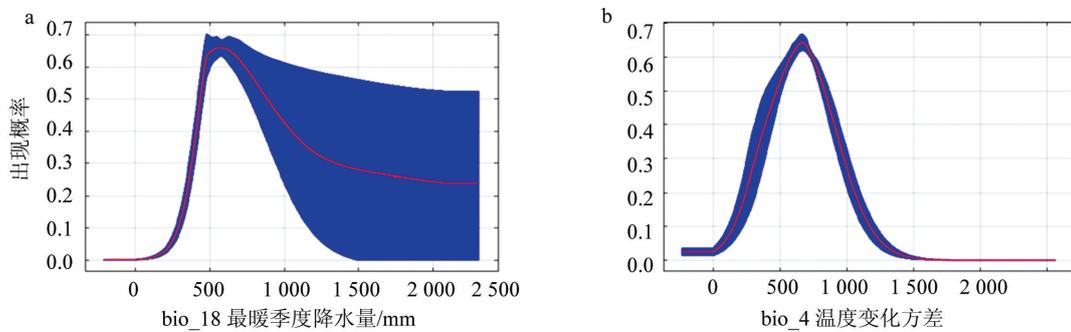


图2 蜜柑大实蝇对主要环境变量最暖季度降水量(a)和温度变化方差(b)的响应曲线

2.2 蜜柑大实蝇适生区的预测模型及精度

MaxEnt 模型重复运行 10 次后, 蜜柑大实蝇训练数据的平均 AUC 值为 0.990(图 3), 表明基于 MaxEnt 模型的蜜柑大实蝇在我国的适生区预测结果可靠。

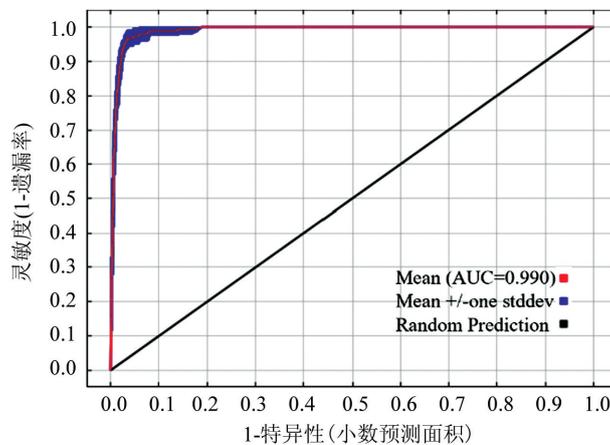
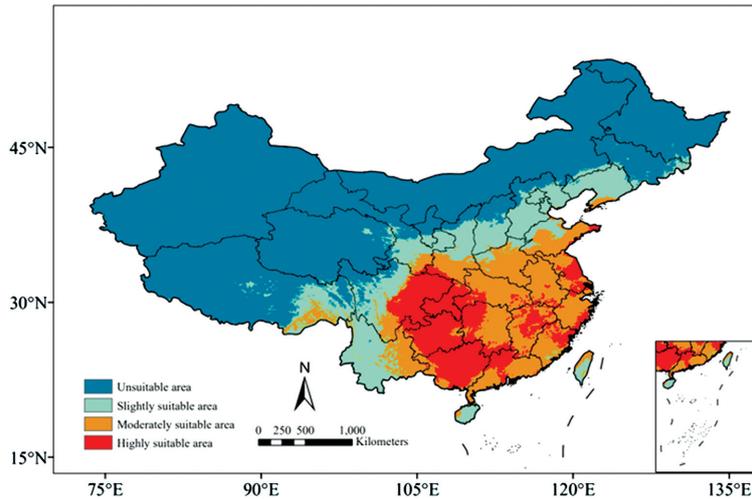


图3 模型适用性检验 AUC 值

2.3 当前气候条件下蜜柑大实蝇的我国适生区分布

当前气候下蜜柑大实蝇在我国的适生区分布较广(图 4), 高适生区主要分布于四川、重庆、贵州、广西、湖南、广东、江西、江苏、浙江、福建等 10 个省(区、市), 面积约为 88.50 万 km^2 , 约占我国总面积的 9.20%。中适生区主要分布于云南、四川、陕西、湖北、湖南、江西、河南、安徽、山东、广东等 10 个省, 面积约为 146.28 万 km^2 , 约占我国国土面积的 15.20%。低适生区主要分布于西藏、云南、甘肃、陕西、山西、河北、辽宁等 7 省(区), 面积达到 134.21 万 km^2 , 约占我国国土面积的 13.95%。我国北部和西部绝大部分为非适生区。



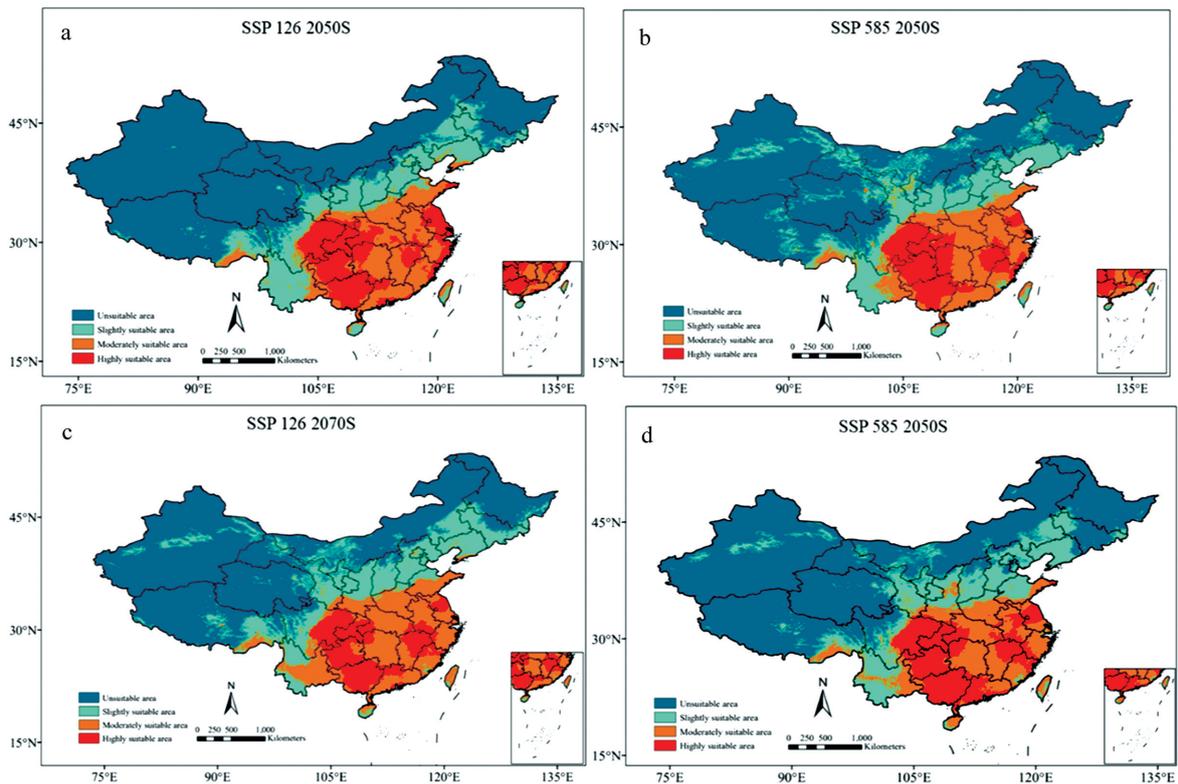
基于自然资源部标准地图服务网站的标准地图制作,底图边界无修改,审图号:GS(2022)1873号。

图 4 当前气候条件下蜜柑大实蝇在我国的适生区分布

2.4 未来气候条件下蜜柑大实蝇的我国适生区分布

低温室气体排放情景 SSP126 下,2041—2060 年蜜柑大实蝇的适生区面积达 394.09 万 km^2 ,较当前适生区增加 2.57%,约占我国陆地总面积的 40.92%,其中高适生区和低适生区面积增加,表现为江苏、湖北高适生区面积增加以及吉林低适生区面积扩张;中适生区面积减小,主要表现为云南大部分中适生区转变为低适生区和甘肃中适生区面积减小(图 5a 和表 1)。高温温室气体排放情景 SSP585 下,2041—2060 年蜜柑大实蝇的适生区面积进一步扩大到 423.68 万 km^2 ,约占我国陆地总面积的 43.99%。与当前气候条件相比,蜜柑大实蝇适生区面积整体增加 5.64%,低适生区和中适生区面积增加,表现为新疆、内蒙古等地区出现大面积低适生区,宁夏、青海地区出现中适生区;高适生区略有收缩,表现为湖南、广东高适生区面积减小(图 5b 和表 1)。

在低温室气体排放情景 SSP126 下,2061—2080 年蜜柑大实蝇的适生区总面积为 410.78 万 km^2 ,约占我国陆地总面积的 42.65%。与当前气候条件相比较,高适生区和低适生区面积增加,表现为云南、广东部分中适生区转变为高适生区,新疆、内蒙古等地区出现低适生区;中适生区面积减小,山东大部分地区由中适生区转变为低适生区,但蜜柑大实蝇总适生区面积增加 4.30%(图 5c 和表 1)。高温温室气体排放情景 SSP585 下,2061—2080 年蜜柑大实蝇的适生区面积达 453.43 万 km^2 ,约占我国陆地总面积的 47.08%,较当前气候条件,蜜柑大实蝇总适生区面积增加 8.73%。中适生区面积增加 2.27%,主要表现为云南、河南中适生区面积扩张和广东的部分高适生区转变为中适生区;低适生区的面积增加 7.85%,表现为甘肃、新疆、内蒙古、宁夏、陕西、山西、吉林地区低适生区面积扩张;高适生区面积降低 1.39%,江西、安徽高适生区面积扩增,广东、福建、江苏、湖南高适生区有部分转变为中适生区,缩减面积大于扩增面积(图 5d 和表 1)。



基于自然资源部标准地图服务网站的标准地图制作,底图边界无修改,审图号:GS(2022)1873号。

图5 SSP126和SSP585下蜜柑大实蝇2041—2060年和2061—2080年在中国的适生区分布

表1 蜜柑大实蝇在中国的适生区及其面积占比

时间	不适生区 占比/ %	不适生区 面积/ 万 km ²	低度适生 区占比/ %	低度适生 区面积/ 万 km ²	中度适生 区占比/ %	中度适生 区面积/ 万 km ²	高度适生 区占比/ %	高度适生 区面积/ 万 km ²
目前	61.65	593.19	13.95	134.21	15.20	146.28	9.20	88.50
2041—2060年(SSP126)	59.08	569.06	17.30	166.60	14.34	138.13	9.28	89.36
2041—2060年(SSP585)	56.01	539.46	20.63	198.69	14.99	144.42	8.37	80.57
2061—2080年(SSP126)	57.35	552.37	19.01	183.06	13.83	133.19	9.81	94.52
2061—2080年(SSP585)	52.92	509.71	21.80	209.93	17.47	168.27	7.81	75.23

2.5 气候变化下蜜柑大实蝇适生区分布中心及迁移变化趋势

在SSP126情景下,蜜柑大实蝇从当前到2060年分布中心在湖北内部向东北方迁移,距离为260.2 km,2061—2080年分布中心由湖北向陕西迁移,距离为565.2 km,整体分布中心由湖北向陕西方向迁移距离为525.1 km(图6a)。在SSP585情景下,当前到2060年分布中心由湖北向甘肃迁移,距离为723.58 km,2061—2080年分布中心在甘肃内部向东南方向迁移,距离为161.4 km,整体分布中心由湖北向甘肃方向迁移,距离为566.1 km(图6b)。在本研究中,蜜柑大实蝇在SSP126和SSP585两种情景下分布中心均向西北方向发生了明显迁移。

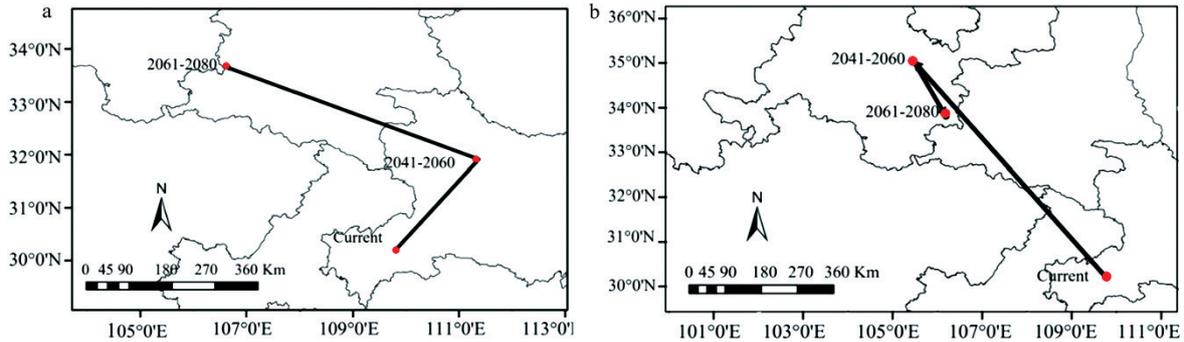


图 6 SSP126(A)和 SSP585(B)下蜜柑大实蝇分布中心迁移

3 讨论

本研究使用 MaxEnt 模型对当前和未来气候变暖条件下蜜柑大实蝇在我国的适生区分布范围进行了预测,并以此来评估在气候变化下蜜柑大实蝇在我国入侵的风险。通过研究,发现最暖季度降水量、温度变化方差对蜜柑大实蝇适生区分布的影响最大,贡献率分别为 64.5% 和 19.6%。当前气候条件下,蜜柑大实蝇适生区占我国总面积的 38.35%,主要分布在重庆、四川、贵州、广西和湖南等地区。在气候变暖条件下,蜜柑大实蝇的适生区进一步增加,总的适生面积增加至我国总面积的 47.08%,且分布中心向西北方向迁移。

在影响蜜柑大实蝇适生区分布的重要气候因子中,最暖季度降水量和最湿月份降水量对蜜柑大实蝇分布的影响最大,表明降水量是决定蜜柑大实蝇适生区分布的关键因素。当最暖季节的降水量在 600 mm 左右,最湿月份降水量在 200 mm 左右时有利于蜜柑大实蝇的发生。一方面,降水会直接影响蜜柑大实蝇的适合度。降雨量与相对湿度、水汽压和土壤湿度等密切相关,这些环境因子将会影响蜜柑大实蝇的求偶交配、产卵和化蛹。蜜柑大实蝇的活动节律受天气影响,在晴天更为活跃^[17],有利于求偶交配和寻找产卵场所,其老熟幼虫随受害果掉落后入土化蛹^[17],因此土壤的湿度将直接影响其化蛹以及蛹的羽化率。另一方面,降水量也可能通过影响蜜柑大实蝇寄主植物的分布间接决定了其分布区域。

当前气候条件下,蜜柑大实蝇中高适生区主要分布在重庆、四川、贵州、广西和湖南等地区,这些地区都是我国柑橘种植面积较大的地区。该结果与 CLIMEX 模型预测的结果具有一致性^[3]。未来低温室气体排放情景 SSP126 下,蜜柑大实蝇在我国的适生区面积呈扩张趋势,其中高适生区扩增明显;未来高温温室气体排放情景 SSP585 下蜜柑大实蝇在我国的适生区也呈扩张趋势。该结果表明了在一定程度内温度升高有利于蜜柑大实蝇的存活和扩散,但是过高的温度则会影响蜜柑大实蝇的生存。这一发现与之前的研究结果相吻合,即蜜柑大实蝇的活动最适温度介于 22 °C 和 29 °C 之间,而 36~38 °C 则为其生存的极限高温阈值^[3]。

在全球气候变暖的大背景下,目前的不适生区或适生程度低区极有可能随着气候的变化而逐渐成为蜜柑大实蝇的适生区。目前蜜柑大实蝇在我国虽然还没有达到最大的潜在分布范围,但仍有继续扩散的可能。其分布中心在两种不同气候变化情境下均向西北方向发生了明显迁移,将来可能对甘肃和西藏等地区的少量柑橘种植区产生潜在风险。蜜柑大实蝇属于高度危险等级的检疫害虫^[18],目前蜜柑大实蝇在我国分布于四川、云南、湖南、广东、广西、台湾等省(区)^[19],这些地区的柑橘类果实和带土苗木很可能成为其传播的媒介,为了保障我国柑橘生产的安全发展,必须认真执行国家检疫法规,严防蜜柑大实蝇的传布蔓延。各地区之间需要协调配合,认真履行检疫职责,这对于控制蜜柑大实蝇扩散、减少其危害造成的损失、保障促进柑橘贸易具有重要意义。

本研究通过 MaxEnt 模型探明了未来气候变化下蜜柑大实蝇在我国的分布格局变化,发现

在该害虫分布区域有进一步扩大且分布中心有向西北方向迁移的趋势,为其监测和治理提供了理论依据。但是其他非生物因素和生物因子对昆虫分布也有重要影响^[20-21],因此该研究尚有一定的局限性。例如,在该模型中由于未考虑寄主植物的分布导致结果中发现新疆和内蒙古等地区出现了蜜柑大实蝇的低适生区。未来研究中应充分考虑土地利用类型、寄主植物的分布和天敌等因素,并增加蜜柑大实蝇的分布样点数量,可进一步提高模型的准确性。

参考文献:

- [1] 李吴洁,危疆树,王玉超,等.基于改进YOLOv5的柑橘病虫害检测[J].南京农业大学学报,2024,47(5):1000-1008.
- [2] REN X M, YANG Y S, GUO R X, et al. Yeast Mediates the Interspecific Interaction between Introduced *Bactrocera dorsalis* and Indigenous *Bactrocera minax* [J]. Pest Management Science, 2023, 79(1): 428-436.
- [3] 王俊伟,李志红,陈洪俊,等.蜜柑大实蝇在中国的适生性研究[J].植物检疫,2009,23(1):1-4.
- [4] 周国梁,陈晨,叶军,等.利用GARP生态位模型预测桔小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)在中国的适生区域[J].生态学报,2007,27(8):3362-3369.
- [5] YANG H J, HUANG X, YANG Y C, et al. Meta-Analytic and MaxEntModel Prediction, the Distribution of the *Bactrocera Minax* (Diptera: Tephritidae), in China under Changing Climate [J]. Journal of Economic Entomology, 2024, 117(2): 470-479.
- [6] XIA Y L, ZHAO J P, DING J, et al. Geographical Distribution of Two Major Quarantine Fruit Flies (*Bactrocera minax* Enderlein and *Bactrocera dorsalis* Hendel) in Sichuan Basin Based on Four SDMS [J]. PeerJ, 2024, 12: e16745.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. SN/T1384-2004 蜜柑大实蝇鉴定方法[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [8] 张岳,李永青,陈吉祥,等.云南昭通蜜柑大实蝇和橘大实蝇的DNA条形码鉴定[J].植物检疫,2019,33(4):41-45.
- [9] 中华人民共和国动植物检疫局,农业部植物检疫实验所.中国进境植物检疫有害生物选编[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [10] 侯柏华,欧阳革成,马骏,等.广东橘园生境实蝇多样性及优势种的季节动态[J].环境昆虫学报,2018,40(5):1027-1035.
- [11] HOU B H, OUYANG G C, LU H L, et al. First Detection of *Bactrocera Tsuneonis*(Diptera: Tephritidae) in Guangdong Province of China [J]. Florida Entomologist, 2018, 101(3): 533-535.
- [12] CHEN P F, WILEY E O, MCNYSET K M. Ecological Niche Modeling as a Predictive Tool: Silverand Bighead Carps in North America [J]. Biological Invasions, 2007, 9(1): 43-51.
- [13] 邵慧,田佳倩,郭柯,等.样本容量和物种特征对BIOLIM模型模拟物种分布准确度的影响——以12个中国特有落叶栎树种为例[J].植物生态学报,2009,33(5):870-877.
- [14] HANLEY J A, MCNEIL B J. The Meaning and Use of the Area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve [J]. Radiology, 1982, 143(1): 29-36.
- [15] SWETS J A. Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems [J]. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [16] YANG J T, HUANG Y, JIANG X, et al. Potential Geographical Distribution of the Edangred Plant Isoetes under Human Activities Using MaxEnt and GARP [J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 38: e02186.
- [17] 杨文钊,秦誉嘉,王晓亮,等.蜜柑大实蝇研究进展[J].中国植保导刊,2022,42(4):21-28.
- [18] 赵永田.蜜柑大实蝇入侵四川的风险分析[J].中国植保导刊,2021,41(4):76-78,100.
- [19] 马苗,姜春燕,秦萌,等.全国农业植物检疫性昆虫的分布与扩散[J].应用昆虫学报,2018,55(1):1-11.
- [20] XUE Y T, LIN C T, WANG Y Z, et al. Ecological Niche Complexity of Invasive and Native Cryptic Species of the *Bemisia Tabaci* Species Complex in China [J]. Journal of Pest Science, 2022, 95(3): 1245-1259.
- [21] WEI X J, XU D P, LIU Q W, et al. Predicting the Potential Distribution Range of *Bactrocera Horsfieldi* under CMIP6 Climate Change Using the MaxEntModel [J]. Journal of Economic Entomology, 2024, 117(1): 187-198.