



气候变化下马铃薯块茎蛾在中国的适生区 分析

林昌进^{1,2,4,5}, 胡海琴^{2,3}, 石一涵^{2,3}, 周子钦^{2,3}, 刘晨曦⁴, 高玉林⁵,
陈李林^{2,3*}

(1. 福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002; 2. 农林生物安全全国重点实验室, 福建农林大学植物保护学院, 福建 福州 350002; 3. 福建农林大学安溪茶学院(数字经济学院), 福建 泉州 362406; 4. 中国农业科学院植物保护研究所中美生物防治实验室, 北京 100193; 5. 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* 是世界性重要害虫, 也是重要的检疫性害虫之一。本研究基于马铃薯块茎蛾当前在中国分布点和环境变量因子, 利用 MaxEnt 模型预测当前及未来两种气候背景下马铃薯块茎蛾在中国的潜在适生范围及程度。结果表明: 马铃薯块茎蛾当前在我国的总适生区面积约 $363.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国陆地面积的 37.9%; 高适生区主要集中在西南和中原地区。影响马铃薯块茎蛾潜在分布的主要环境变量因子为最冷月份最低温、最冷季降水量、温度季节变动和最热月份最高温度。未来气候情景下, 马铃薯块茎蛾潜在适生区面积呈缓慢扩大趋势, 主要特征是南方沿海各省部分高、低适生区转变为中适生区, 低适生区继续向北扩张。通过对未来气候变暖条件下的马铃薯块茎蛾适生区及适生程度进行科学预测, 以为马铃薯块茎蛾防控提供理论指导。

关键词: 烟草潜叶蛾; MaxEnt 模型; 气候变化; 适生区

中图分类号: Q968.1; 文献标识码: A

Analysis of the suitable distribution areas of *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) in China under climate change

LIN Chang-Jin^{1,2,4,5}, HU Hai-Qin^{2,3}, SHI Yi-Han^{2,3}, ZHOU Zi-Qin^{2,3}, LIU Chen-Xi⁴, GAO Yu-Lin⁵, CHEN Li-Lin^{2,3*} (1. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian Province, China; 2. State Key Laboratory of Agricultural and Forestry Biosecurity, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Anxi College of Tea Science (College of Digital Economy), Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362406, Fujian Province, China; 4. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Sino-American Biological Control Laboratory, Beijing 100193,

基金项目: 中美生物防治国际合作计划(59-0212-9-001-F)、福建农林大学大学生创新训练项目(202410389014)

作者简介: 林昌进, 男, 硕士研究生, 研究方向为生物化学与分子生物学, E-mail: 1046965257@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 陈李林, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为茶树病虫害生态调控和茶叶质量安全, E-mail: llchen@fafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-12-31; 修回日期 Revision received: 2024-08-13; 接受日期 Accepted: 2024-08-13

China; 5. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Beijing 100193, China)

Abstract: *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae) is an important pest worldwide and one of the major quarantine pests. Based on the current distribution points and environmental variables of *P. operculella* in China, this study used the maximum entropy model (MaxEnt) to predict the potential range and extent of *P. operculella* in China under current and future climate scenarios. The results showed that the total suitable area for *P. operculella* in China was approximately 363.6 km², accounting for 37.9% of the national land area. The high-suitability areas were mainly concentrated in the southwest and central plains. The key environmental variables affecting the potential distribution of *P. operculella* were the minimum temperature in the coldest month, the precipitation in the coldest season, seasonal temperature variation, and the maximum temperature in the hottest month. Under future climate scenarios, the potential suitable areas of *P. operculella* expand gradually, with the characteristics of some high- suitability and low-suitability areas transforming to medium- suitability areas in southern coastal provinces, and low-suitability areas expanding northward continuedly. This study provides theoretical guidance for the prevention and control of *P. operculella* by scientifically predicting its suitable regions and extents under future climate warming conditions.

Key words: *Phthorimaea operculella*; MaxEnt model; climate change; suitable regions

马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* Zeller 隶属鳞翅目 Lepidoptera 麦蛾科 Gelechiidae 茄麦蛾属 *Phthorimaea*, 亦称烟草潜叶蛾、马铃薯麦蛾, 是一种危害性极强的世界性农业害虫 (Rondon, 2010; 薛冬等, 2014)。主要为害茄科植物, 尤以马铃薯、烟草最为严重 (郭志祥等, 2014; 闫俊杰等, 2019)。马铃薯块茎蛾起源于美洲 (Rondon, 2010), 一年可发生 2~11 代 (闫俊杰等, 2019), 幼虫潜叶蛀食寄主植物叶片和嫩芽, 可导致植株无法健康生长甚至死亡; 幼虫蛀食马铃薯块茎, 可导致马铃薯表皮皱缩甚至腐烂, 严重影响马铃薯品质产量。马铃薯块茎蛾的发生使马铃薯减产 20%~30% (杨淼等, 2020); 使烟草减产 5%~10%, 最高减产 50% (郑朝政, 2008)。当藏有马铃薯块茎蛾的马铃薯薯块储藏时间超过 4 个月, 马铃薯块茎蛾对贮藏的马铃薯危害率将高达 100% (Rondon, 2010)。据报道马铃薯块茎蛾主要是通过越南传入我国云南并逐渐向其他省份传播 (曹骥等, 1981), 该虫逐渐成为西南马铃薯产区的主要害虫 (徐进等, 2019)。

全球气候变暖对地球上所有生物造成不同程度的影响 (张品茹, 2023)。而昆虫作为变温动物, 气候变暖将直接影响昆虫的繁殖、发育、生存和分布 (Kocmánková *et al.*, 2009)。生物入侵是指入侵物种被有意或无意的人类活动从原产区引入, 并在当地自行繁殖和扩散, 破坏生态系统平衡的现象 (何维明, 2020)。气候变暖将塑造新的生态位, 这可能促使害虫从旧生态位转移到新生态位, 间接导致害虫发生生物入侵 (Skendžić *et al.*, 2021)。研究表明受气候变暖的影响, 均延长了烟蚜 *Myzus persicae* Sulzer、棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 和麦长管蚜 *Sitobion avenae* Fabricius 这 3 种蚜虫的发生时间和迁徙季节 (Xue *et al.*, 2020)。Parmesan 等 (1999) 对欧洲的 35 种非迁徙蝴蝶进行研究, 发现在上个世纪 35 种蝴蝶中约

22 种的分布范围向北移动了 35~240 km。气候变化将对害虫分布产生重大影响，预测气候变暖后昆虫的适生区变化有助于为控制害虫扩张提供参考依据。

生态位模型是通过将物种的样本分布信息和对应的环境变量因子信息进行关联，并根据相应算法，对目标物种分布进行预测的模型（Anderson and Martinez-Meyer, 2004）。随着研究人员对生态位模型的深入研究，目前生态位模型被广泛用于预测气候变化对物种分布、濒危物种保护等领域（朱耿平等，2013）。当前主流的预测物种潜在分布的生态位模型有 CLIMEX、Domain、GARP 和 MaxEnt 等，其中 MaxEnt 模型因其预测结果相比同类型的生态位模型准确性更高（王运生等，2007；Moreno *et al.*, 2011）而被广泛用于入侵生物柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama（刘丹等，2021；王茹琳等，2021）、橙带蓝尺蛾 *Milionia basalis* Walker（罗集丰等，2020）、菊方翅网蝽 *Corythucha marmorata* Uhler（王志华等，2019）、菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* Say（徐养诚等，2021）和舞毒蛾 *Lymantria dispar* L.（王艳君等，2021）等害虫的适生区预测。目前国内关于马铃薯块茎蛾的研究主要侧重于生物学特征及综合防控，鲜见对其适生区预测研究（闫俊杰等，2019）。因此，本研究以马铃薯块茎蛾的现有地理分布数据和环境变量为基础，运用 MaxEnt 模型，结合 ArcGIS 软件，系统研究气候变化对马铃薯块茎蛾在中国适生区分布的影响，探究环境变量对马铃薯块茎蛾分布的影响，揭示影响其分布的主导气候因子，并评估其潜在的生态风险。研究结果可为马铃薯块茎蛾监测预警和可持续防控提供数据支撑，以期促进马铃薯产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 数据收集

1.1.1 马铃薯块茎蛾分布数据

本研究数据主要来源于全球生物多样性数据库（<https://www.gbif.org/>）、国内外公开发表的文献资料及实地调查。为避免分布点距离过近导致模型预测过度拟合，通过 ArcGIS 缓冲区功能对分布点进行筛选，设置半径 0.5 km 缓冲区，并剔除距离小于 1 km 的重复分布点，最终获得 120 个马铃薯块茎蛾的有效分布点（图 1）。

地理底图：选用国家测绘地理信息局（<http://www.sbsm.gov.cn/>）的 1 : 400 万中国矢量地图，审图号是 GS（2020）4372 号，通过 ArcGis 空间分析工具获取 3 个地形因子（海拔、坡向和坡度）。



图 1 马铃薯块茎蛾在中国的分布点

Fig. 1 Distribution of *Phthorimaea operculella* in China

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4372 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2020) 4372 downloaded from the Standard Map Service Website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

1.1.2 环境变量因子数据与处理

从世界气候网站 (<https://www.worldclim.org>) 获取相关环境变量因子数据，共下载了 19 个环境变量因子 (表 1)。利用 ArcGis 10.6 提取马铃薯块茎蛾在全国已知分布点环境变量因子数据，然后使用 SPSS 对获取的数据变量进行主成分分析，筛选出相关系数 $|r| > 0.8$ 的环境变量因子，通过对所筛选的数据进行 Pearson 相关性分析，避免变量空间自相关。删除相关系数 $|r| > 0.8$ 的变量中贡献较小的变量因子，最终得到 6 个影响马铃薯块茎蛾分布的主要环境变量因子，分别为日平均气温 (Bio2)、等温性 (Bio3)、温度季节变动 (Bio4)、最冷月份最高温度 (Bio5)、最冷月份最低温度 (Bio6) 和最冷季降水量 (Bio19) (表 2)。

表 1 环境变量因子及其相关信息

Table 1 Environment variables and the relative information

环境变量 Environmental variables	描述 Description
Bio1	年平均气温 (°C) Annual mean temperature
Bio2	日平均气温 (°C) Mean diurnal range
Bio3	等温性 Isothermality
Bio4	温度季节变动 Temperature seasonality
Bio5	最热月份最高温度 (°C) Max temperature of the warmest month
Bio6	最冷月份最低温度 (°C) Min temperature of the coldest month

Bio7	年平均温度差 (°C) Annual range of temperature
Bio8	最湿季均温 (°C) Mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干季均温 (°C) Mean temperature of the driest quarter
Bio10	最暖季均温 (°C) Mean temperature of the warmest quarter
Bio11	最冷季均温 (°C) Mean temperature of the coldest quarter
Bio12	年均降水量 (mm) Annual precipitation
Bio13	最湿月降水量 (mm) Precipitation of the wettest month
Bio14	最干月降水量 (mm) Precipitation of the driest month
Bio15	季节降水量变化 (mm) Variation coefficient of precipitation
Bio16	最湿季降水量 (mm) Precipitation of the wettest quarter
Bio17	最干季降水量 (mm) Precipitation of the driest quarter
Bio18	最暖季降水量 (mm) Mean precipitation of the warmest quarter
Bio19	最冷季降水量 (mm) Mean precipitation of the coldest quarter

表 2 马铃薯块茎蛾环境变量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of environmental variables of *Phthorimaea operculella*

	Bio2	Bio3	Bio4	Bio5	Bio6	Bio19
Bio2	1.000					
Bio3	0.591	1.000				
Bio4	0.017	-0.781	1.000			
Bio5	-0.475	-0.592	0.412	1.000		
Bio6	-0.613	0.160	-0.644	0.384	1.000	
Bio19	-0.646	-0.383	-0.020	0.580	0.563	1.000

1.2 研究方法

1.2.1 MaxEnt 模型预测

利用 MaxEnt 软件 3.4.1 来预测马铃薯块茎蛾在中国的潜在适生区。将马铃薯块茎蛾分布点数据和环境变量因子数据导入 MaxEnt 软件中，进行模型运算，选取其中 25% 的分布点作为测试集，剩下 75% 的分布点作为训练集，使用刀切法分析（即每次忽略一个环境因子变量，然后基于剩下的环境因子变量来对物种的适生区进行预测，默认最大迭代次数 5000，重复数设置为 10，其他参数采用默认值，输出结果为 Logistic 格式。

1.2.2 模型精度评估

MaxEnt 模型采用 ROC (Receiver operating characteristic) 曲线分析法对模型预测进行精度评估 (李白尼等, 2009), ROC 曲线的横坐标表示假阳性率 (1-特异性), 纵坐标表示真阳性率 (灵敏度), 通过 ROC 曲线与横坐标所形成的面积大小即为 AUC 值, AUC 值取值 0~1, AUC 值越大预测结果越准确 (王运生等, 2007)。常以 AUC 值评价模型的精度, 当 $0.5 \leq AUC < 0.6$ 时, 代表预测失败; 当 $0.6 \leq AUC < 0.7$ 时, 代表预测效果较差; 当 $0.7 \leq$

AUC < 0.8 时，代表预测效果一般；当 $0.8 \leq \text{AUC} < 0.9$ 时，代表预测效果好；当 $0.9 \leq \text{AUC} < 1.0$ 时，代表预测效果极好（魏淑婷等，2019）。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测的准确性评价

根据 MaxEnt 重复 10 次的预测结果显示测试样本遗漏率与预测遗漏率基本吻合，说明本次模型预测的结果很好。AUC 平均值 0.877，平均标准偏差为 0.012，预测效果良好，说明此次 MaxEnt 的预测结果准确性高，可用于马铃薯块茎蛾的适生区分析（图 2、图 3）。

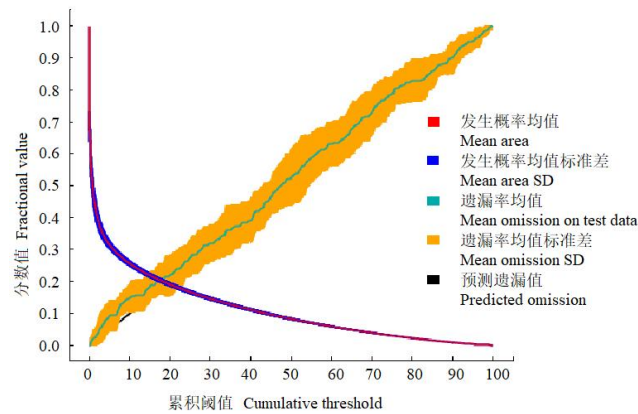


图 2 MaxEnt 模型预测遗漏率

Fig. 2 Prediction omission of MaxEnt model

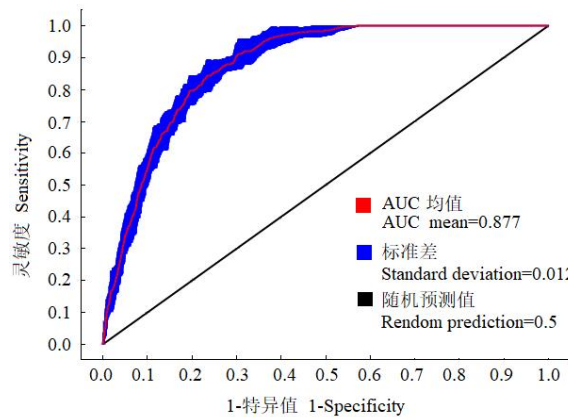


图 3 马铃薯块茎蛾在中国的地理分布预测 ROC 曲线

Fig. 3 Prediction of ROC curve for the geographical distribution of *Phthorimaea operculella* in China

2.2 当前气候背景下马铃薯块茎蛾的分布预测

预测结果显示，马铃薯块茎蛾在我国的潜在地理分布范围十分泛，除在东北三省没有分布以及青海省、内蒙古自治区零星分布外，其它省、自治区和直辖市均为其潜在分布区。通过对适生区的面积进行统计，当前马铃薯块茎蛾在我国的总适生区面积约为 $363.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国陆地面积的 37.88%（表 3，图 4）。其中高适生区面积 $131.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国陆地面积的 13.69%；中适生区面积 $144.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国陆地面积的 15.03%；低适

生面积 $87.93 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国陆地面积的 9.16%（表 3；图 4）。高适生区主要集中在西南和中原地区，包括云南、贵州、四川、重庆、湖北、河南、湖南、安徽北部、陕西南部、广西西部、广东西北部，另外在西藏自治区、福建、浙江、山东、江苏、山东、河北、山西、甘肃等也有小部分高适生区；中适生区也主要分布在上述省区，还包括上海、新疆西部、北京中部、天津南部、海南北部、台湾东部、宁夏回族自治区南部与甘肃省交界处；低适生区主要分布在新疆、甘肃、陕西、宁夏、山西、河北、北京、天津、浙江、福建、海南、西藏自治区等省区。

表 3 不同气候情景下马铃薯块茎蛾在中国的适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 3 The suitable area of *Phthorimaea operculella* in China under different climate scenarios ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

气候情景	高适生区	中适生区	低适生区	总适生区面积
Climate scenario	High suitable area	Moderate suitable area	Low suitable area	Total suitable area
当前 Current	131.42	144.26	87.93	363.61
2050年 SSP2_45	116.54	168.24	88.64	373.42
2070年 SSP2_45	126.44	154.07	88.56	369.08
2050年 SSP5_85	133.84	146.88	87.07	367.78
2070年 SSP5_85	137.54	149.68	88.22	375.44

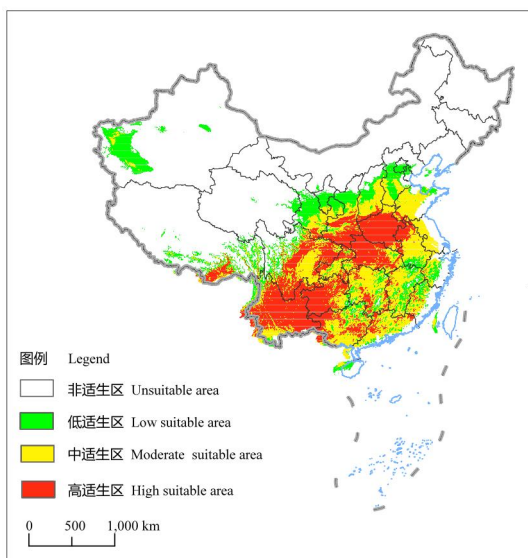


图 4 当前气候背景下马铃薯块茎蛾在中国的适生区预测

Fig. 4 Potentially suitable distribution regions of *Phthorimaea operculella* under the current scenarios in China

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4372 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2020) 4372 downloaded from the Standard Map Service Website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

2.3 未来气候背景下马铃薯块茎蛾的分布预测

与当前气候背景下的预测结果相比，在未来 SSP2_45 和 SSP5_85 两种气候情景下，马

铃薯块茎蛾在我国的潜在适生区范围呈缓慢向北扩散的趋势，总适生区面积逐渐扩大，其中青海省和内蒙古自治区适生区面积明显增加。在 SSP2_45 气候情景下，2050 和 2070 年马铃薯块茎蛾低适生区面积较当前气候背景下没有太大变化；中适生区分布面积分别增加 2.50% 和 1.02%；高适生区面积分别减少 1.55% 和 0.52%（图 5）。在 SSP5_85 气候情景下，2050 和 2070 年马铃薯块茎蛾的高适生区面积较当前气候背景下分别增加 0.25% 和 0.64%；中适生区面积分别增加 0.27% 和 0.56%；而低适生区面积较当前气候背景下分别减少 0.09% 和 0.03%（图 5）。

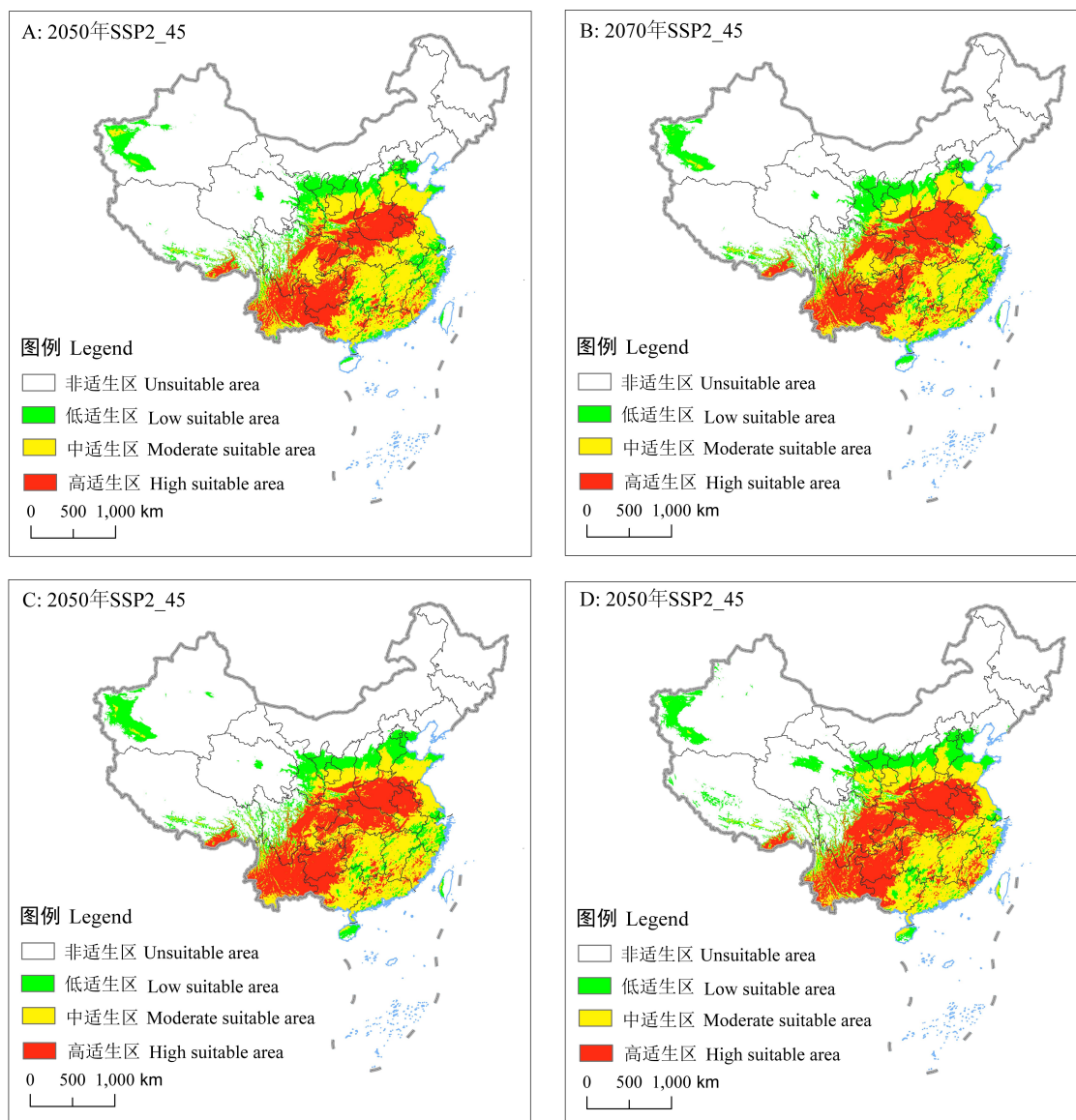


图 5 气候变化情景下马铃薯块茎蛾在中国的适生区分布

Fig. 5 Suitable distribution for *Phthorimaea operculella* in China under changing climate scenarios

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4372 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2020) 4372 downloaded from the Standard Map Service Website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

2.4 马铃薯块茎蛾主要环境变量因子与其适生性的关系

以贡献率、置换重要性及刀切法检验为评判指标，评判影响马铃薯块茎蛾适生区分布的主要环境变量因子。通过模型模拟可知 6 个环境变量因子日平均气温 (Bio2)、等温性 (Bio3)、温度季节变动 (Bio4)、最热月份最高温度 (Bio5)、最冷月份最低温度 (Bio6) 和最冷季降水量 (Bio19) 对马铃薯块茎蛾的地理分布贡献率分别为 4.3%、2.9%、2.6%、4.7%、61.5% 和 23.9%。其中最冷月份最低温度 (Bio6) 和最冷季度降水量 (Bio19) 在预测的贡献率排名靠前；在置换重要值中，最冷月份最低温度 (Bio6)、温度季节变动 (Bio4)、最冷季降水量 (Bio19) 和最热月份最高温度 (Bio5) 排名靠前 (表 4)。通过 MaxEnt 模型中正规化训练增益的刀切法获得各个变量对预测物种存在概率的相对重要性。其显示的值是 1 次重复运行的平均值。在单独使用的变量中，最冷月份最低温度 (Bio6) 获得最高的正规化训练增值，既说明该变量本身对马铃薯块茎蛾的地理分布预测有很大的重要性；去除 Bio6，利用其他变量预测，与用所有变量预测的增值相比，减少增益最多，表明最冷季降水量 (Bio19) 对马铃薯块茎蛾地理分布预测影响最大，不能被其他变量所代替 (图 6)。综上所述，影响马铃薯块茎蛾分布的主要环境变量因子是最冷月份最低温度 (Bio6)、最冷季降水量 (Bio19)、温度季节变动 (Bio4) 和最热月份最高温度 (Bio5)。

根据这 4 个主要环境变量因子可知影响马铃薯块茎蛾分布的主要环境变量因子是降水和温度。从降水来看，最冷季节降水量在 -50~250 mm 之间均适合马铃薯块茎蛾生存；从温度来看，最冷月最低温在 -25~25℃ 之间，最适温度为 9℃；最热月最高温在 -5~45℃ 之间，最适温度为 38℃；温度季节变化范围为 400~1 500℃ (图 7)。

表 4 各环境变量因子对马铃薯块茎蛾分布影响的贡献值

Table 4 Contribution rate of each environmental variables to *Phthorimaea operculella* distribution

环境变量	贡献百分率 (%)	置换重要值 (%)
Environmental variables	Percent contribution	Permutation importance
bio6	61.5	57.2
bio19	23.9	9.7
bio4	4.7	12.8
bio2	4.3	5.4
bio3	2.9	5.6
bio5	2.6	9.4

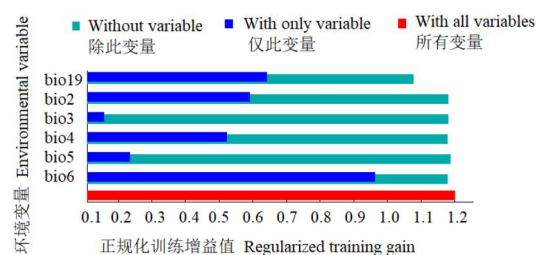


图 6 刀切法分析环境变量因子的重要程度

Fig. 6 Jackknife test of the importance of environmental variables

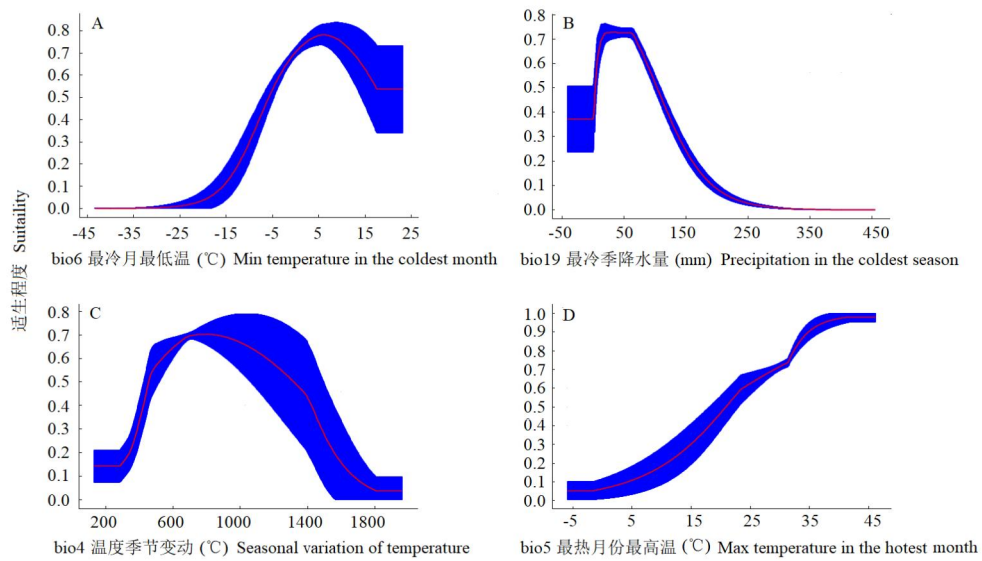


图 7 主导环境变量因子响应曲线

Fig. 7 Response curves of domained environmental variables

3 结论与讨论

本研究采用 MaxEnt 模型预测了马铃薯块茎蛾在中国的地理分布格局及影响其分布的环境变量因子，AUC 平均值 0.877，说明模型预测分布与物种实际分布高度拟合，结果准确可靠。预测结果显示，在当前气候背景下，中高适生区最主要集中在我国中部和南部地区与 Jung 等（2019）用 CLIMEX 模型预测的结果相似。MaxEnt 模型的刀切法检验结果显示，影响马铃薯块茎蛾分布格局的环境变量因子分别是最冷月份最低温度、最冷季降水量、温度季节变动和最热月份最高温度，从预测结果来看，马铃薯块茎蛾的适生区分布受温度影响最大，其次是降雨。

温度是对昆虫影响最大的环境因子之一，昆虫的生长发育、繁殖、地理分布和入侵能否成功均受到温度的影响（石保坤等，2014；Renault *et al.*，2018；Umeda and Paine，2019）。金秀萍等（2005）研究发现马铃薯块茎蛾全世代发育起点温度为 9.04°C，卵、幼虫和蛹的发育起点温度分别为 9.37°C、10.75°C 和 10.35°C，22~29°C 是马铃薯块茎蛾生长发育的适温区，当温度低于 10°C 或者高于 35°C 时马铃薯块茎蛾种群的生长发育将受到限制，这与本研究预测的最冷月份最适温度 9°C 和最热月份最适温度 38°C 的结果相符；此外有研究表明温度越高马铃薯块茎蛾发育越快，当温度达到 32°C 时发育历期最短，平均世代周期仅需 16~17 d（Golizadeh and Zalucki，2012；Golizadeh *et al.*，2012），这意味着未来气候变暖将加速马铃薯块茎蛾的生长发育。Bale 等（2002）指出温度升高，会增加植食性昆虫的取食量以及扩散能力，甚至是改变种群动态，这与未来气候变暖背景下马铃薯块茎蛾在中国适生区扩大的预测结果一致。

降雨或者暴雨影响害虫的生存，直接导致其种群发生变化（常晓娜等，2008）。降雨积水会影响土壤中越冬的害虫（Skendžić *et al.*, 2021），暴雨会将若虫冲走（Shrestha, 2019），对害虫种群产生重大影响。而前人研究发现马铃薯块茎蛾喜干厌湿（Meisner *et al.*, 1974）；土壤含水量越高幼虫存活率越低（Foot, 1979）；同时，Langford 和 Cory（1932）研究发现马铃薯块茎蛾的危害程度与降水量成反比，这说明降水直接影响马铃薯块茎蛾的越冬存活以及种群规模。符合本次研究的预测结果，降雨是影响马铃薯块茎蛾适生区分布的另一个重要因子，适合马铃薯块茎蛾的最冷季降水量范围在-50~250 mm，当最冷季降水量超过 80 mm 时，马铃薯块茎蛾的适生程度急剧下降。

综上所述，对马铃薯块茎蛾分布影响最大的两个因子是温度和降水，当前气候背景下马铃薯块茎蛾的中高适生区集中在我国的中部和西南地区；未来 2050 和 2070 年马铃薯块茎蛾在我国的适生区将向北扩张，内蒙古自治区、青海省马铃薯块茎蛾的潜在适生区扩大，马铃薯块茎蛾的中高适生区依旧集中在我国中部和西南地区，这与王丽丽等（2024）的研究结果一致。一方面，这可能与马铃薯块茎蛾传入我国的途径有关。马铃薯块茎蛾是从越南传入云南并成功定殖，并从云南这个中转站向外省传播（曹骥等，1981）；另一方面，西南地区是干旱灾害频发地区（胡光成等，2020；张强等，2020；宋琳琳等，2021），这给喜干厌湿的马铃薯块茎蛾提供了理想的定殖条件，以致于在当前甚至未来 2050 和 2070 年都是马铃薯块茎蛾的中高适生区。马铃薯广泛种植于我国大部分省份（徐宁等，2021），为马铃薯块茎蛾提供了有利的寄生条件，根据种植区域可划分为北方一作区、中原二作区、南方冬作区和西南混作区（滕宗璠等，1989）。结合本研究结果中原二作区和西南混作区是马铃薯块茎蛾的高适生区，可通过综合防治技术对马铃薯块茎蛾进行防治，减少损失；南方冬作区大部分是马铃薯块茎蛾的中低适生区，可通过生物或者化学防治手段进行防治，防止马铃薯块茎蛾大规模爆发；虽然北方一作区只有少部分是马铃薯块茎蛾的中低适生区，但也应加强监测预警，防止害虫发生危害。在未来气候背景下东北、甘肃、西南等地区是未来马铃薯的主要种植区域，新疆等是未来马铃薯种植的主要发展区域（张志良等，2023）。而根据本研究结果未来西南地区仍然是马铃薯块茎蛾的高适生区，应防范害虫大规模爆发风险；甘肃和新疆地区是马铃薯块茎蛾的中低适生区，应防范害虫进一步扩张；东北地区虽然不是马铃薯块茎蛾的适区，也要防范害虫入侵风险。

参考文献（References）

- Anderson RP, Martinez-Meyer E. Modeling species' geographic distributions for preliminary conservation assessments an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador [J]. *Biological Conservation*, 2004, 116 (2): 167-179.
- Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, *et al.* Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8 (1): 1-16.
- Cao J, Chen Z, Wen JH. The distribution of *Phthorimaea operculella* (Zeller) in China: I. limit factors for northward distribution [J]. *Zoological Research*, 1981, 4 (1): 327-332. [曹骥, 陈仲梅, 文家慧. 烟潜叶蛾在我国分布一、向北分布的限界因子 [J]. 动物学研究, 1981, 4 (1): 327-332]
- Chang XN, Gao HJ, Chen FJ, *et al.* Effects of environmental moisture and precipitation on insects [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (4): 619-625. [常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 等. 环境湿度和降雨对昆虫的影响 [J]. 生态学杂志, 2008, 27 (4): 619-625]

- Foot MA. Bionomics of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae), at Pukekohe [J]. *New Zealand Journal of Zoology*, 1979, 6 (4): 623-636.
- Golizadeh A, Razmjou J, Dastjerdi HR, et al. Effects of temperature on development, survival, and fecundity of potato tuberworm, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) on potato tubers [J]. *American Journal of Potato Research*, 2012, 89 (2): 150-158.
- Golizadeh A, Zalucki MP. Estimating temperature-dependent developmental rates of potato tuberworm, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Insect Science*, 2012, 19 (5): 609-620.
- Guo ZX, He CX, Xu H, et al. Study on preference of *Phthorimaea operculella* to solanaceae host plants [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27 (6): 2381-2384. [郭志祥, 何成兴, 许胡兰, 等. 马铃薯块茎蛾对几种茄科植物的嗜食性研究 [J]. 西南农业学报, 2014, 27 (6): 2381-2384]
- He WM. Biological invasions: are their impacts precisely knowable or not? [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28 (2): 253-255. [何维明, 生物入侵的影响是否准确可知? [J]. 生物多样性, 2020, 28 (2): 253-255]
- Huang GC, Zhou J, Lu J, et al. Monthly drought index (1951-2016) and 8-day frequency soil moisture (2007-2016) dataset in southwest China [J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2020, 4 (3): 248-256. [胡光成, 周杰, 卢静, 等. 中国西南地区历年月度干旱指数 (1951-2016) 和 8 天频率土壤湿度 (2007-2016) 数据集 [J]. 全球变化数据学报 (中英文), 2020, 4 (3): 248-256]
- Jin XP, Li ZY, Chen B, et al. Experimental population life tables of potato tuber moth at different temperatures [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 1 (6): 773-776. [金秀萍, 李正跃, 陈斌, 等. 不同温度下马铃薯块茎蛾实验种群生命表研究 [J]. 西南农业学报, 2005, 1 (6): 773-776]
- Jung JM, Lee SG, Kim KH, et al. The potential distribution of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) based on climate and host availability of potato [J]. *Agronomy*, 2019, 10 (1): 12.
- Kocmánková E, Trnka M, Juroch J, et al. Impact of climate change on the occurrence and activity of harmful organisms [J]. *Plant Protection Science*, 2009, 45 (Special Issue): S48-S52.
- Langford G, Cory E. Winter survival of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1932, 27 (1): 210-213.
- Li BN, Wei W, Ma J, et al. Maximum entropy niche based modeling (MaxEnt) of potential geographical distributions of fruit flies (Diptera: Tephritidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*. 2009, 52 (10): 1122-1131. [李白尼, 魏武, 马骏, 等. 基于最大熵值法生态位模型 (MaxEnt) 的三种实蝇潜在适生性分布预测(英文) [J]. 昆虫学报, 2009, 52 (10): 1122-1131]
- Liu D, Yao JY, Yu YW, et al. Suitable distribution changes of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* in China under global warming [J]. *Journal of Plant Protection*, 2021, 48 (4): 872-881. [刘丹, 姚俊萌, 余焰文, 等. 气候变暖背景下柑橘木虱在中国的适生区变化 [J]. 植物保护学报, 2021, 48 (4): 872-881]
- Luo JF, Hong CD, Fang YR, et al. Prediction of potential geographic distribution of *Milonia basalis* Walker in China [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49 (6): 107-111. [罗集丰, 洪纯丹, 方怡然, 等. 橙带蓝尺蛾在中国的潜在分布预测研究 [J]. 西部林业科学, 2020, 49 (6): 107-111]
- Meisner J, Ascher KDS, Lavie D. Factors influencing the attraction to oviposition of the potato tuber moth, *Gnorimoschema operculella* Zeller [J]. *Angewandte Entomologie*, 1974, 77 (1): 179-189.
- Moreno R, Zamora R, Molina JR, et al. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forests using maximum entropy (MaxEnt) [J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6 (6): 364-370.
- Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, et al. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming [J]. *Nature*, 1999, 399 (1): 579-583.
- Renault D, Laparie M, McCauley SJ, et al. Environmental adaptations, ecological filtering, and dispersal central to insect invasions [J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63 (1): 345-368.
- Rondon SI. The potato tuberworm: A literature review of its biology, ecology, and control [J]. *American Journal of Potato Research*, 2010, 87 (2): 149-166.
- Shi BK, Hu CX, Huang JL, et al. Modeling the influence of temperature on development, survival and oviposition of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (20): 5868-5874. [石保坤, 胡朝兴, 黄建利, 等. 温度对褐飞虱发育、存活和产卵影响的关系模型 [J]. 生态学报, 2014, 34 (20): 5868-5874]
- Shrestha S. Effects of climate change in agricultural insect pest [J]. *Acta Scientific Agriculture*, 2019, 3 (1): 74-80.
- Skendžić S, Zovko M, Živković IP, et al. The impact of climate change on agricultural insect pests [J]. *Insects*, 2021, 12 (5): 440.
- Song LL, Zhang Q, Yu RL, et al. The applicable analysis of PDSI and self-calibrating PDSI drought indices in southwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41 (2): 242-251. [宋琳琳, 张强, 任余龙, 等. PDSI 及 sc_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析 [J]. 中国沙漠, 2021, 41 (2): 242-251]

- Teng ZF, Zhang C, Wang YZ. Study on China's potato-cultivation divisions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 1 (2): 35-44. [滕宗璠, 张畅, 王永智. 我国马铃薯适宜种植地区的分析 [J]. 中国农业科学, 1989, 1 (2): 35-44]
- Umeda C, Paine T. Temperature can limit the invasion range of the ambrosia beetle *Eurwallacea nr. fornicatus* [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2019, 21(1): 1-7.
- Wang LL, Yang CQ, Wang Y, et al. Ecological niche shift and suitable area expansion of a globally invasive species *Phthorimaea operculella* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 797-805. [王丽丽, 杨采青, 王瑛, 等. 全球入侵物种马铃薯块茎蛾生态位转移及适生区扩展 [J]. 应用生态学报, 2024, 35 (3): 797-805]
- Wang RL, Wang YL, Chen DD, et al. Analysis of the potential distribution of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama in southwest China using the MaxEnt model [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (1): 84-90, 96. [王茹琳, 王闫利, 陈东东, 等. 基于 MaxEnt 模型的柑橘木虱在西南地区潜在分布模拟 [J]. 植物保护, 2021, 47(1): 84-90, 96]
- Wang YJ, Gao T, Shi J. Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43 (9): 59-69. [王艳君, 高泰, 石娟. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43 (9): 59-69]
- Wang YS, Xie BY, Wan FJ, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15 (4): 365-372]
- Wang ZH, Yu JY, Shen J, et al. Prediction of potential distribution of the invasive Chrysanthemum Lace Bug, *Corythucha marmorata* in China based on Maxent [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 626-633. [王志华, 于静亚, 沈锦, 等. 入侵害虫菊方翅网蝽在中国的潜在分布预测 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 626-633]
- Wei ST, Li T, Lin YC. Prediction of the potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in Sichuan province using MaxEnt model [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2019, 38 (1): 37-46. [魏淑婷, 李涛, 林玉成. 基于 MaxEnt 模型预测四川省松材线虫的潜在适生区 [J]. 四川动物, 2019, 38 (1): 37-46]
- Xu J, Zhu JH, Yan YL, et al. Status of major diseases and insect pests of potato and pesticide usage in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (16): 2800-2808. [徐进, 朱杰华, 杨艳丽, 等. 中国马铃薯病虫害发生情况与农药使用现状 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (16): 2800-2808]
- Xu N, Zhang HL, Zhang RH, et al. Current situation and prospect of potato planting in China [J]. *Chinese Potato Journal*, 2021, 35 (1): 81-96. [徐宁, 张洪亮, 张荣华, 等. 中国马铃薯种植业现状与展望 [J]. 中国马铃薯, 2021, 35 (1): 81-96]
- Xu YC, Liu XC, Wang T, et al. Potential suitable distribution of *Acanthoscelides obtectus* (Say) based on the MaxEnt model [J]. *Journal of Biosafety*, 2021, 30 (3): 213-219. [徐养诚, 刘孝贤, 王婷, 等. 基于 MaxEnt 模型的菜豆象全球潜在适生区预测 [J]. 生物安全学报, 2021, 30 (3): 213-219]
- Xue D, Chen D, Fan XJ, et al. The supercooling point of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (5): 860-864. [薛冬, 陈丹, 范秀娟, 等. 烟草潜叶蛾的过冷却点测定 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (5): 860-864]
- Xue WY, Jie LJ, Huan LH, et al. Investigating the impact of climate warming on phenology of aphid pests in China using long-term historical data [J]. *Insects*, 2020, 11 (3): 167.
- Yan JJ, Zhang M, Gao YL. Biology, ecology and integrated management of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2019, 62 (12): 1469-1482. [闫俊杰, 张梦迪, 高玉林. 马铃薯块茎蛾生物学、生态学及综合治理 [J]. 昆虫学报, 2019, 62 (12): 1469-1482]
- Yan M, Xiao GL, Zheng YQ, et al. Physiological responses of potato to potato tuber moth feeding infestation [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51 (4): 844-852. [杨淼, 肖关丽, 郑亚强, 等. 马铃薯对马铃薯块茎蛾取食危害的生理响应 [J]. 南方农业学报, 2020, 51 (4): 844-852]
- Zhang PR. Climate change and global biodiversity [J]. *Ecological Economy*, 2023, 39 (2): 5-8. [张品茹. 气候变化与全球生物多样性 [J]. 生态经济, 2023, 39 (2): 5-8]
- Zhang Q, Yao YB, Li YH, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78 (3): 500-521. [张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 2020, 78 (3): 500-521]
- Zhang ZL, He ZH, Ru XY, et al. Influence of future climate change on the climate suitability of potato cultivation in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56 (18): 3530-3542. [张志良, 和志豪, 茹晓雅, 等. 未来气候变化对中国马铃薯种植气候适宜性的影响 [J]. 中国农业科学, 2023, 56 (18): 3530-3542]
- Zheng CZ. The occurrence and damage of *Phthorimaea operculella* (Zeller) in tobacco fields of Longshan county and its

comprehensive control measures [J]. *China Plant Protection*, 2008, 28 (7): 30-31. [郑朝政. 龙山县烟田烟草潜叶蛾的发生为害和综防措施 [J]. 中国植保导刊, 2008, 28 (7): 30-31]

Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, *et al.* Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21 (1): 90-98. [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用 [J]. 生物多样性, 2013, 21 (1): 90-98]