

基于MaxEnt模型预测油菜茎基溃疡病菌在我国的潜在地理分布



顾昕敏¹ 王 俊² 田艳丽^{1,3*} 胡白石^{1,3}

(1. 南京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, 南京 210095;

2. 新疆维吾尔自治区植物保护站, 乌鲁木齐 830001; 3. 新疆农业科学院植物保护研究所,

新疆农业生物安全重点实验室, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 为明确油菜茎基溃疡病菌 *Leptosphaeria maculans* 在我国的潜在适生性, 基于该病菌的全球分布数据和相关气候数据, 使用MaxEnt模型以及ArcGIS软件对当前气候条件下及未来低强迫SSP126和高强迫SSP585情景下病菌在我国的潜在地理分布进行预测。结果显示: 影响油菜茎基溃疡病菌在我国潜在分布的主要环境变量包括年平均气温、最干月降水量、等温性和年降水量, 贡献率分别为31.1%、29.0%、16.5%和14.7%。当前气候条件下, 油菜茎基溃疡病菌在我国的适生区主要分布在华东、华中和西南部分地区, 东北、华北、华南和西北零星地区, 总适生区面积占我国陆地总面积的14.58%。未来气候低强迫SSP126和高强迫SSP585情景下, 油菜茎基溃疡病菌的适生区仍主要分布在华东、华中和西南地区, 但面积均呈现缩减趋势, 且中、高适生区面积缩减更为明显。为保障我国油菜产业的健康发展, 应密切监测气候变化, 强化检疫与防控措施, 以有效应对油菜茎基溃疡病菌的潜在威胁。

关键词: 油菜茎基溃疡病菌; MaxEnt模型; 潜在地理分布; 气候变化

Prediction of the potential geographical distribution of fungal pathogen *Leptosphaeria maculans* in China based on MaxEnt model

Gu Xinmin¹ Wang Jun² Tian Yanli^{1,3*} Hu Baishi^{1,3}

(1. Key Laboratory of Plant Quarantine Pests Monitoring and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu Province, China; 2. Plant Protection and Quarantine Station of Province, Urumqi 830001, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Biosafety, Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: To clarify the potential suitability of fungal pathogen *Leptosphaeria maculans* in China, the MaxEnt model and ArcGIS software were used to predict the potential geographical distribution of *L. maculans* in China under current climatic conditions and future SSP126 and SSP585 scenarios, based on its global distribution and related bioclimatic data. The results revealed that the main environmental variables influencing the potential distribution of *L. maculans* in China included annual mean temperature, precipitation of driest month, isothermality, and annual precipitation, with contribution rates of 31.1%, 29.0%, 16.5%, and 14.7%, respectively. Under current climatic conditions, suitable areas for *L. maculans* included parts of eastern China, central China, and southwestern China, with scattered areas in

northeastern China, northern China, southern China, and northwestern China, collectively covering 14.58% of China's total land area. Under future SSP126 and SSP585 scenarios, the suitable areas of *L. maculans* were still mainly in eastern China, central China, and southwestern China, but the area showed a decreasing trend, with moderately and highly suitable areas demonstrating a more pronounced reduction. To ensure the healthy development of China's rapeseed industry, we should closely monitor climate change and strengthen quarantine and control measures to effectively respond to the potential threat posed by *L. maculans*.

Key words: *Leptosphaeria maculans*; MaxEnt model; potential geographical distribution; climate change

油菜黑胫病又称油菜黑腿病,其病原菌主要有2种,分别为油菜茎基溃疡病菌 *Leptosphaeria maculans* (无性态 *Plenodomus lingam*) 和油菜黑胫病菌 *L. biglobosa* (无性态 *P. biglobosus*), 其中油菜茎基溃疡病菌具有极强的致病力,是引起世界各地油菜黑胫病广泛传播及油菜减产的主要原因(Howlett et al., 2001; West et al., 2001; Alnajjar et al., 2022)。油菜茎基溃疡病一般年份可导致油菜减产10%~20%,病害流行时可达30%~50%,甚至更高(West et al., 2001; Hwang et al., 2016),据估计,全球每年因该病所造成的油菜产量损失高达15亿美元(Zhang et al., 2014)。我国是油菜生产大国,油菜种植面积约700万hm²,年产量约1400万t(胡志勇等, 2024),主栽油菜品种普遍对油菜茎基溃疡病菌缺乏抗性,且我国许多地区的农艺和气候条件都有利于该病菌的生存。据报道,若油菜茎基溃疡病菌在我国长江流域发生,每年将造成4.95亿美元的经济损失(Fitt et al., 2006; 2008)。我国也是油菜籽进口大国,每年从加拿大、澳大利亚等国进口300万t以上的油菜籽(孙颖等, 2015),且多次从进境油菜籽和蔬菜种子中截获油菜茎基溃疡病菌,该病菌随国际贸易传入我国的风险不断增加(张慧丽等, 2021),严重威胁我国油菜生产安全。油菜茎基溃疡病菌的危害性极强,对其传播风险进行科学评估,明确该病菌在我国的潜在适生性,对于该病菌的有效监测和防控具有重要意义。

物种分布模型也称生态位模型,可基于物种的分布信息及其分布点的环境信息来预测物种当前或未来的潜在地理分布,已在生物地理学、保护生物学、生态学等领域得到广泛应用(Elith & Leathwick, 2009; Elith et al., 2011)。目前,常用的物种分布模型包括规则集遗传算法(genetic algorithm for rule set prediction, GARP)模型、最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型、领域模型、生物气候(bioclimatic

prediction, BioClim)模型以及广义线性模型(generalized linear model, GLM)等(Phillips et al., 2006; 魏鹏等, 2022)。MaxEnt模型是Phillips et al. (2004)开发的一种物种生态位模型,该模型基于最大熵理论预测物种的潜在分布,因预测性能好、操作简单而被广泛应用于多种有害生物的适生性分析(王茹琳等, 2019)。吴卓瑾等(2023)利用MaxEnt模型对当前及未来情景下梨火疫病病菌 *Erwinia amylovora* 在全球的潜在地理分布进行了预测,并筛选出关键环境变量,认为该病菌对我国大部分地区存在潜在威胁;杜志宏等(2022)采用MaxEnt模型预测了当前及未来气候条件下麦瘟病菌 *Magnaporthe oryzae triticum* 在全球和我国的潜在适生区,并对影响其分布的气候因子进行了分析,认为未来气候情景下麦瘟病菌在我国的中、高风险区面积将呈扩增趋势;汤思琦等(2023)基于MaxEnt模型预测了栎树猝死病菌 *Phytophthora ramorum* 在当前和未来气候条件下的潜在适生区,并分析了关键环境变量,未来气候条件下该病菌的潜在适生区增加,且高风险区质心有北移的趋势。目前,关于油菜茎基溃疡病菌潜在分布预测的研究较少,孙颖等(2015)曾利用MaxEnt和GARP两种模型评估了当前气候条件下油菜茎基溃疡病菌在我国的定殖可能性,但未探究未来气候变化对该病菌潜在分布的影响。

本研究基于油菜茎基溃疡病菌的全球分布数据,结合相关气候数据,采用MaxEnt模型定量评估当前及未来不同情景下油菜茎基溃疡病菌在我国的潜在适生性,以期对油菜茎基溃疡病的监测、预警以及防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

气候数据:1970—2000年的19个生物气候变量来源于Worldclim (<https://www.worldclim.org/>),空间

分辨率为2.5 arc min,分别为年平均气温、月平均昼夜温差、等温性、温度季节性变动系数、最热月最高气温、最冷月最低气温、温度年较差、最湿季平均气温、最干季平均气温、最暖季平均气温、最冷季平均气温、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量季节性变异系数、最湿季降水量、最干季降水量、最暖季降水量以及最冷季降水量;未来气候数据(2041—2060年)选择第6次国际耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)中的中国(北京)气候中心气候系统模式的中等分辨率(Beijing Climate Center climate system model 2 medium resolution, BCC-CSM2-MR)中的共享社会经济路径(shared socioeconomic pathway, SSP)低强迫情景SSP126和高强迫情景SSP585(魏鹏等,2022;闫子怡等,2023)。

分布数据:通过查阅相关文献资料,收集并整理油菜茎基溃疡病菌的全球分布点,使用Google Earth卫星图获取分布点的经纬度信息,剔除重复和无效数据。

地图数据:1:1 000万中国矢量地图下载自自然资源部(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

1.2 方法

1.2.1 分布数据及气候变量筛选

为避免MaxEnt模型的过拟合,在ArcGIS 10.8软件中使用SDM Toolbox插件中的SDM Tools工具去除分布点的空间自相关,使10 km×10 km网格内至多存在1个分布点,最终筛选得到675个油菜茎基溃疡病菌分布数据。

环境变量之间往往存在多重共线性,这使得变量对响应的单独影响变得难以分析,因为它们对响应的影响可能是变量之间的真实协同关系或虚假相关(Graham, 2003)。为提高模型预测的准确性,需对环境变量进行筛选。首先,将本试验选取的19个生物气候变量与筛选后的分布数据导入MaxEnt模型,使用刀切法评估各变量对初始模型的贡献值;其次,使用ENMtools软件进行Pearson相关性分析,得到各变量之间的相关性大小,保留相关性系数 $|r| < 0.8$ 的变量,当 $|r| \geq 0.8$ 时,保留初始模型中贡献率高的变量(Jiang et al., 2018; 方焱等, 2022),最终筛选得到关键环境变量。

1.2.2 油菜茎基溃疡病菌潜在分布的预测方法

向MaxEnt 3.4.4软件中导入筛选后的油菜茎基溃疡病菌分布数据和关键环境变量数据,采用自举法(bootstrap),随机选取25%的分布数据作为测试

集,剩余75%作为训练集,重复运行10次,最大迭代次数为5 000,预测结果输出为asc格式。选择刀切法分析各变量对油菜茎基溃疡病菌潜在分布预测的重要程度,刀切图中“仅此变量”条带越长说明变量包含的有用信息越多、对模型预测越重要,“除此变量”条带越短说明变量对增益的影响越大、具有的独特信息越多。利用MaxEnt软件绘制关键环境变量的响应曲线,响应曲线反映了模型预测的存在概率对所选变量的依赖性,即存在概率如何随着各环境变量的变化而变化,据此可分析适宜油菜茎基溃疡病菌生存的气候特征。

1.2.3 MaxEnt模型的精度评价

采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)下方面积(area under curve, AUC)检验MaxEnt模型的预测精度。AUC是对ROC曲线整体的概括,它提供了一个不受特定阈值和其他因素影响的单一衡量标准,AUC在0.5~1.0之间,当AUC=0.5,无预测能力;当 $0.5 < AUC \leq 0.7$,低预测能力;当 $0.7 < AUC \leq 0.9$,中等预测能力;当 $0.9 < AUC < 1.0$,高预测能力;当AUC=1.0,完美预测能力(Fielding & Bell, 1997; Vanagas, 2004)。

1.2.4 油菜茎基溃疡病菌适生区的等级划分

将MaxEnt模型的预测结果导入ArcGIS 10.8软件中,使用ArcGIS自带的转换工具Conversion Tools将预测结果转化为栅格文件,再利用空间分析工具Spatial Analyst Tools中的重分类Reclassify工具进行适生等级划分,采用自然间断点分级法(Jenks)将模型预测结果按照输出的适生概率划分为4个等级(刘勇等, 2023),即 $[0, 0.08]$ 为非适生区, $[0.08, 0.28]$ 为低适生区, $[0.28, 0.56]$ 为中适生区, $[0.56, 1]$ 为高适生区。根据重分类所得的各等级适生区的栅格数,统计当前气候、未来SSP126以及SSP585情景下油菜茎基溃疡病菌各级适生区的面积并计算占比。

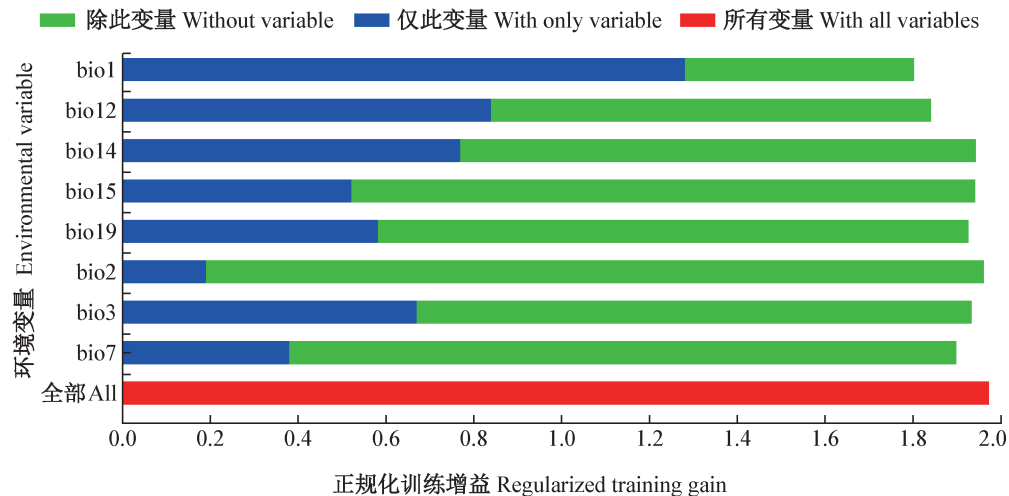
2 结果与分析

2.1 关键环境变量筛选结果

对19个环境变量进行Pearson相关性分析,结合变量的贡献值,最终筛选得到8个关键环境变量,贡献率由高到低分别为年平均气温、最干月降水量、等温性、年降水量、温度年较差、最冷季降水量、月平均昼夜温差以及降水量季节性变异系数,各变量的贡献率分别为31.1%、29.0%、16.5%、14.7%、4.7%、2.3%、1.2%和0.5%。

使用刀切法检验8个关键环境变量对模型预测的重要性,结果显示,年平均气温、年降水量为模型预测提供了较多有效信息,且具备更多其他变量所没有的独特信息,对油菜茎基溃疡病菌的分布影响最大;此外,最干月降水量和等温性对模型预测也较

为重要(图1)。对4个主要环境变量的单因子响应曲线进行分析,结果表明,油菜茎基溃疡病菌在年平均气温7~12℃、最干月降水量40~50 mm、等温性30~36、年降水量400~700 mm区间时的生境适宜度最佳(图2)。



bio1: 年平均气温; bio12: 年降水量; bio14: 最干月降水量; bio15: 降水量季节性变异系数; bio19: 最冷季降水量; bio2: 月平均昼夜温差; bio3: 等温性; bio7: 温度年较差。bio1: Annual mean temperature; bio12: annual precipitation; bio14: precipitation of driest month; bio15: precipitation seasonality; bio19: precipitation of coldest quarter; bio2: mean diurnal range; bio3: isothermality; bio7: temperature annual range.

图1 筛选后环境变量对MaxEnt模型的重要性

Fig. 1 Importance of screened environmental variables to MaxEnt model

2.2 MaxEnt模型的精度评价

MaxEnt模型重复运行10次所得平均AUC值为0.958(图3),表明MaxEnt模型具有良好的预测性能,所预测的油菜茎基溃疡病菌潜在分布结果可靠。

2.3 油菜茎基溃疡病菌在我国的潜在地理分布

当前气候条件下,MaxEnt模型预测的油菜茎基溃疡病菌高适生区主要分布在安徽省、江苏省部分地区,山东省零星地区;中适生区主要分布在云南、山东、安徽、江苏、河南等省份部分地区,新疆、西藏、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、四川、贵州等省份零星地区;低适生区主要分布在贵州省、上海市全境,吉林、辽宁、河北、山东、河南、安徽、江苏、浙江、福建、湖南、湖北、陕西、重庆、广西、云南、四川等省市部分地区,黑龙江、内蒙古、天津、山西、江西、广东、新疆、西藏等省份零星地区(图4)。

未来气候条件下,MaxEnt模型预测的油菜茎基溃疡病菌潜在地理分布结果显示,与当前气候条件的预测结果相比,2041—2060年油菜茎基溃疡病菌的适生区呈现收缩态势。2041—2060年SSP126情景下,油菜茎基溃疡病菌的中、高适生区主要集中在山东省、河南省、安徽省、江苏省部分地区,且面积明

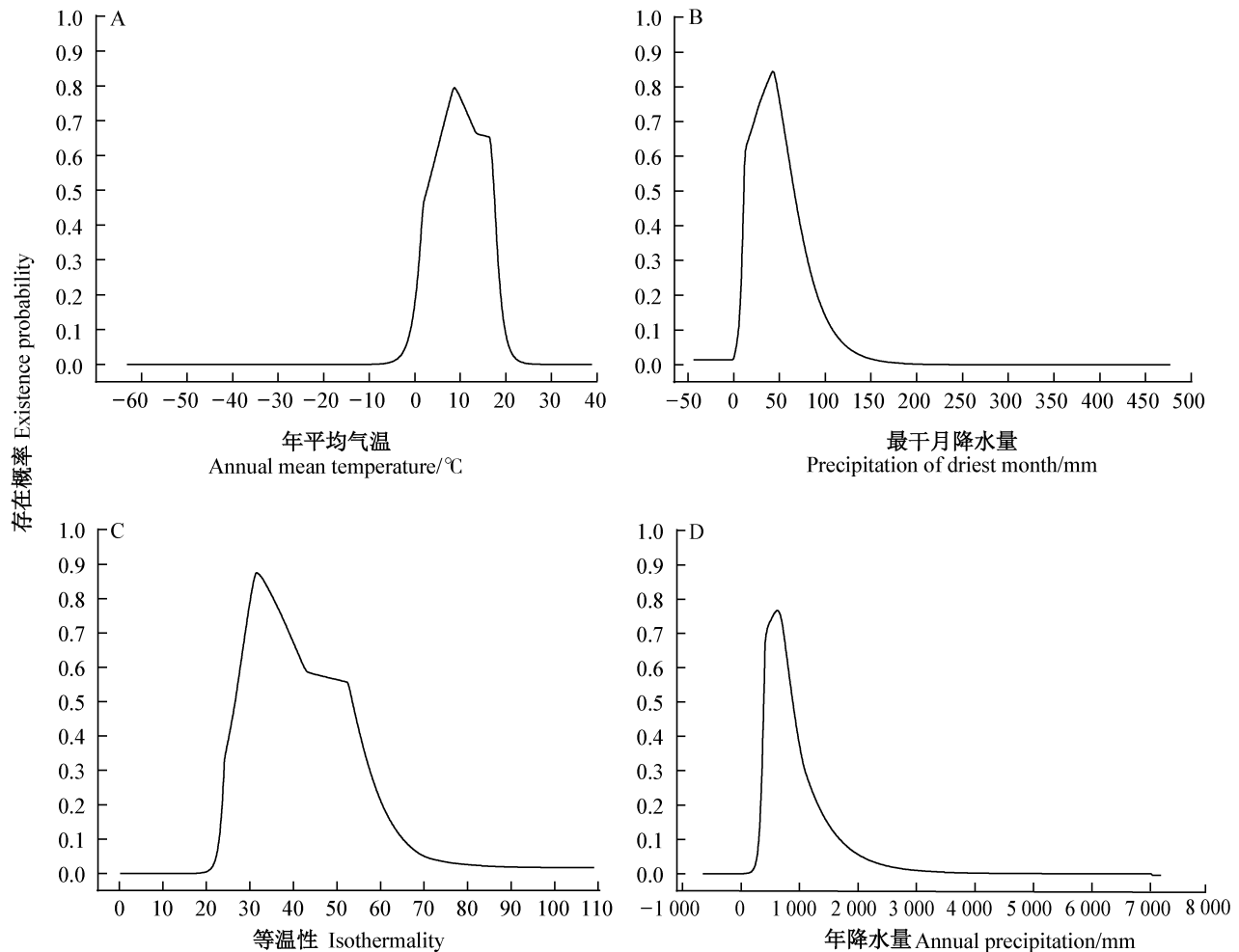
显缩减,原西南和东北地区中适生区几乎完全消失,仅余极少分布;低适生区主要集中在华东、华中、西南部分地区,其中,华东、华中地区适生范围大幅减少,原东北地区低适生区也有所缩减;其余各地区,除内蒙古自治区适生区域略有增加外,原适生区面积基本略有缩减(图5)。

2041—2060年SSP585情景下,油菜茎基溃疡病菌的高适生区完全消失,中适生区变化趋势与SSP126情景下基本一致,低适生区主要集中在华东、华中和西南部分地区,其中,华中地区适生范围有所增加,西南地区低适生区有所缩减;此外,内蒙古自治区、江西省适生区略有增加,而东北及其他地区适生面积有所减少(图5)。

当前气候、2041—2060年SSP126以及SSP585情景下油菜茎基溃疡病菌各级适生区面积占我国陆地总面积的比例如表1所示。当前气候条件下,油菜茎基溃疡病菌的总适生区面积占我国陆地总面积的14.58%,其中高适生区占0.14%、中适生区占1.54%、低适生区占12.90%。2041—2060年SSP126情景下,油菜茎基溃疡病菌的总适生区面积占我国陆地总面积的8.90%,其中高适生区占0.04%、中适

生区占0.69%、低适生区占8.18%；2041—2060年SSP585情景下,油菜茎基溃疡病菌的总适生区面积占我国陆地总面积的13.04%,其中高适生区完全消失、中适生区占0.58%、低适生区占12.46%。与当前气候条件相比,2041—2060年SSP126与SSP585情

景下,油菜茎基溃疡病菌的适生区面积均呈现下降趋势,且SSP585情景下的高适生区、中适生区减幅大于SSP126情景,而低适生区面积减幅小于SSP126情景(表1)。



曲线表示10次重复平均值。The curves show the mean response of the 10 replications.

图2 主要环境变量的响应曲线

Fig. 2 Response curves of main environmental variables

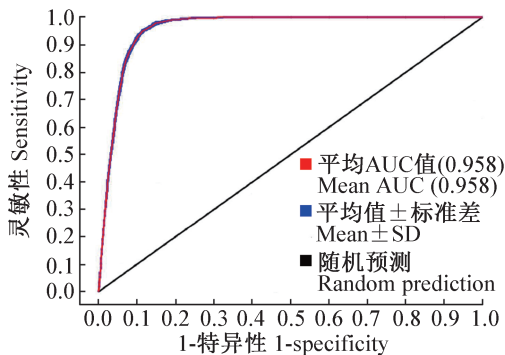


图3 油菜茎基溃疡病菌预测结果的ROC曲线及AUC值

Fig. 3 ROC curves and AUC values of predicted results for

Leptosphaeria maculans

3 讨论

使用物种分布模型来评估环境因子与物种地理分布之间的关系时,环境变量的选择将直接影响模型的预测结果(Stockwell, 2006; 汤思琦等, 2023)。本研究共筛选出8个关键环境变量,刀切法检验结果表明,年平均气温、年降水量、最干月降水量以及等温性是影响油菜茎基溃疡病菌在我国潜在地理分布的主要环境变量。温度、湿度、降雨等是影响油菜茎基溃疡病菌生存的主要环境因素(West et al., 2001; Fitt et al., 2008)。温度和降雨可直接影响病菌子囊孢子的释放模式,一定程度的低温(13~

18 ℃)和连续降雨(≥ 2 mm)会加速假囊壳的发育以及子囊孢子的释放(Guo & Fernando, 2005; Dawidziuk et al., 2012; Lob et al., 2013),高湿条件则有利于

子囊孢子的萌发(West et al., 2001)。本研究所筛选的环境变量与影响油菜茎基溃疡病菌生存的实际环境因素相符,证明了预测模型的可信性。

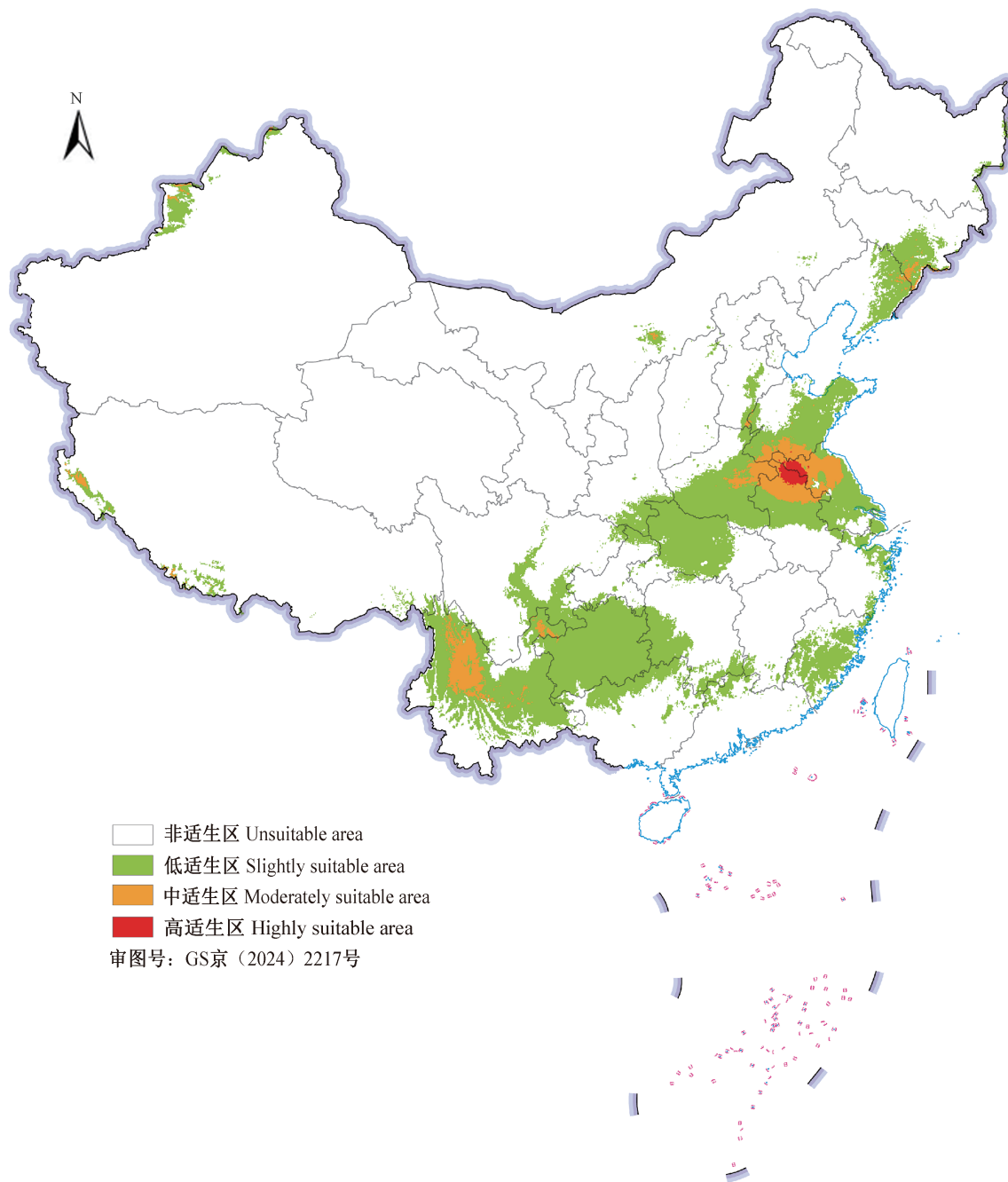


图4 当前气候条件下油菜茎基溃疡病菌在中国的潜在地理分布

Fig. 4 Potential geographical distribution of *Leptosphaeria maculans* in China under current climatic conditions

孙颖等(2015)研究显示油菜茎基溃疡病菌在西北地区以及内蒙古、西藏自治区分布较广,且GARP模型预测的中、高适生区也集中分布于上述地区,与本研究结果存在差异,本研究发现油菜茎基溃疡病菌在新疆、内蒙古、西藏、陕西等省区适生范围较小,在青海、甘肃、宁夏等省区无分布,中、

高适生区则主要集中在云南、山东、安徽、江苏、河南等省区,究其原因可能是近几年油菜茎基溃疡病菌的发生范围扩大,研究所用气候数据有所更新,分布数据和气候数据不同。

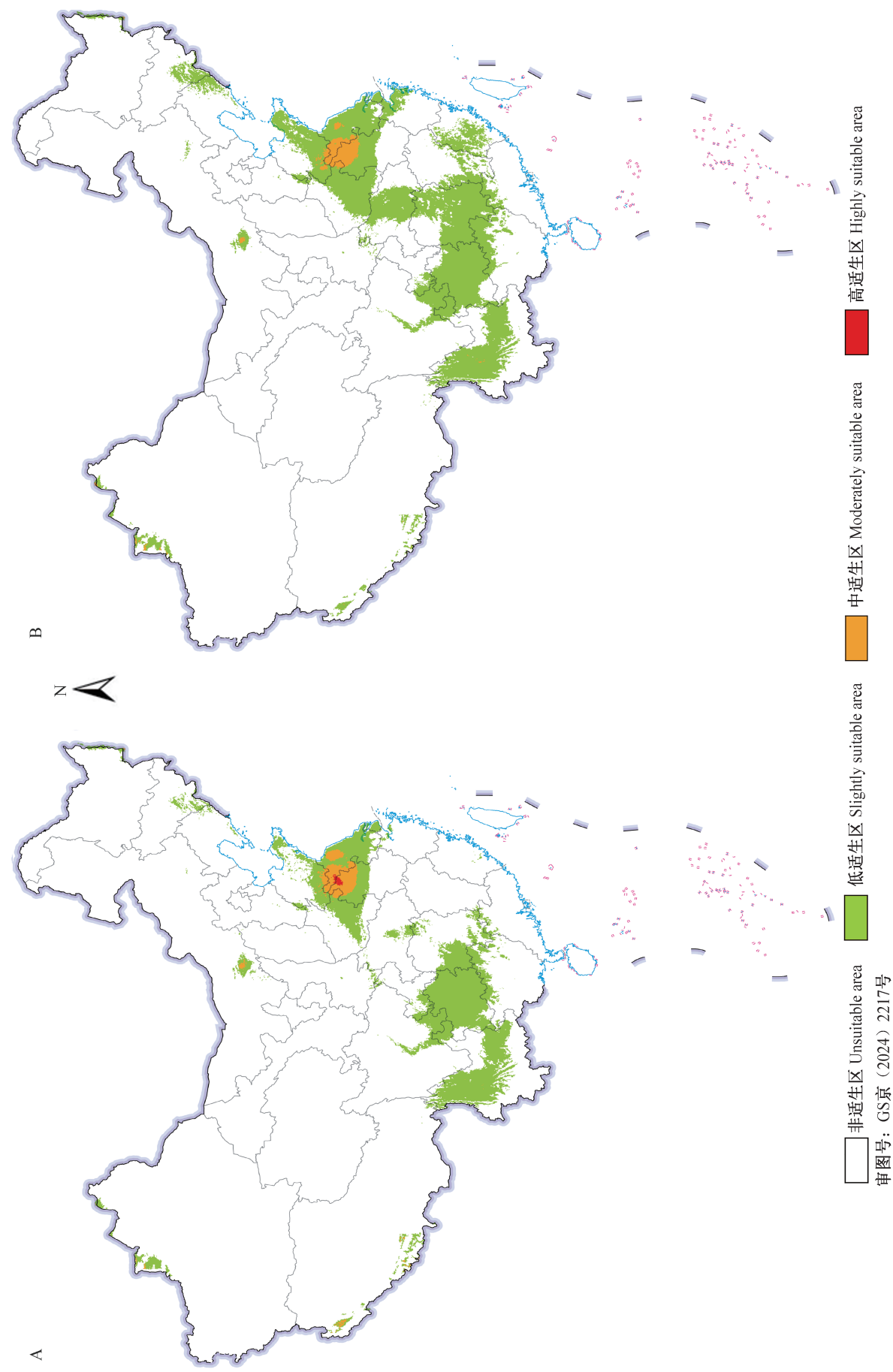


图 5 未来气候条件 SSP126(A) 和 SSP585(B) 不同情景下油菜茎基溃疡病菌在中国的潜在地理分布

Fig. 5 Potential geographical distribution of *Leptosphaeria maculans* in China in different scenarios of SSP126 (A) and SSP585 (B) under future climatic conditions

表1 不同气候情景下油菜茎基溃疡病菌在中国的适生区面积占比

Table 1 Proportion of suitable area of <i>Leptosphaeria maculans</i> in China under different climate scenarios %					
时间 Time	气候情景 Climate scenario	低适生区 Slightly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	高适生区 Highly suitable area	总适生区 Total suitable area
1970—2000	—	12.90	1.54	0.14	14.58
2041—2060	SSP126	8.18	0.69	0.04	8.90
	SSP585	12.46	0.58	0.00	13.04

已有研究表明,全球气候变化会影响油菜茎基溃疡病菌的有性繁殖,包括子囊孢子释放起始时间、持续时间以及释放高峰期等指标(Kaczmarek et al., 2016),因此,本研究也对未来气候情景下油菜茎基溃疡病菌的潜在地理分布进行了预测。与CMIP5相比,CMIP6增加了对特定社会发展路径的考虑,倡导基于SSP的新排放情景,可为区域气候预估提供更加合理的模拟结果(O'Neill et al., 2014; Wang et al., 2022);CMIP6中国家气候中心开发的BCC-CSM2-MR气候系统模式可以较好地模拟全球气温演变、东亚大气环流以及中国降水气候分布等(Wu et al., 2019; 辛晓歌等, 2019; Xin et al., 2020)。因此,本研究选用了BCC-CSM2-MR中的SSP126和SSP585两种情景。油菜茎基溃疡病是一种喜湿低温病害,苗期雨后病害易流行(Fitt et al., 2006),未来气候条件下油菜茎基溃疡病菌的适生区面积缩减,推测是受到全球气候变暖的影响。近年来,随着全球气候变暖的加剧,我国气候也同步发生了很多变化,未来我国气候变暖的趋势仍将持续,且变暖幅度相较全球明显更大(姜大膀和富元海, 2010),将不利于油菜茎基溃疡病菌的侵染和流行。

油菜是我国重要的油料作物,其中以冬油菜为主,冬油菜种植面积和产量均占全国90%以上,种植区主要在长江流域,包括四川、贵州、云南、重庆、湖北、湖南、安徽、江西、河南信阳、江苏、浙江、上海等省市(地区);春油菜种植较少,主要集中在东北和西北地区(李丹阳等, 2021)。本研究预测的油菜茎基溃疡病菌潜在适生区不仅与我国长江流域油菜主产区重合度较高,而且与北方油菜产区也有一定的重合,说明我国两大油菜产区均有适宜油菜茎基溃疡病菌生存。因此,应重点开展对油菜主产区油菜茎基溃疡病菌的调查和监测,降低病菌定殖扩散的可能性。

油菜茎基溃疡病菌危害性极强,为保障我国油菜生产安全,应密切监测气候变化,同时加强对该病菌的检疫与监测,制订相应的防控策略,本研究的预测结果则可为此提供一定的参考。尽管MaxEnt模

型预测精度高,但基于已知分布信息和气候因子的预测实际上并不能准确反映物种的实际分布,而是更侧重于解释适合物种分布的气候特征,并据此分析其潜在分布(Wang et al., 2018);此外,物种的生态位并非仅受气候因素影响,其他因素如物种间的相互作用、寄主分布、物种的扩散能力和适应能力、地形地貌等均会影响物种的潜在分布(赵晶晶等, 2015; 张源等, 2021; Koot et al., 2022);WorldClim数据库仅包含1970—2000年的气候数据,缺少近20年的最新数据,下一步应补充缺失的气候数据,并综合考虑物种与其他因素之间的相互作用,提高MaxEnt模型的预测准确性。

参考文献 (References)

- Alnajjar D, von Tiedemann A, Koopmann B. 2022. Efficacy of blackleg major resistance genes in *B. napus* in Germany. *Pathogens*, 11 (4): 461
- Dawidziuk A, Kaczmarek J, Podlesna A, Kasprzyk I, Jedryczka M. 2012. Influence of meteorological parameters on *Leptosphaeria maculans* and *L. biglobosa* spore release in central and eastern Poland. *Grana*, 51(3): 240–248
- Du ZH, Liu W, Cao XR, Nie X, Fan JR, Wang BT, Zhou YL, Liu WX, Xu XM. 2022. Suitability analysis of wheat blast in the world and China under climate change scenarios based on MaxEnt. *Plant Protection*, 48(5): 158–166 (in Chinese) [杜志宏, 刘伟, 曹学仁, 聂晓, 范洁茹, 王保通, 周益林, 刘万学, 徐向明. 2022. 气候变化情景下基于MaxEnt的麦瘟病在全球及中国的适生性分析. *植物保护*, 48(5): 158–166]
- Elith J, Leathwick JR. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40: 677–697
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudik M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1):43–57
- Fang Y, Ma C, Yang F, Zhao SQ, Zhu JQ, Liu H, Ma J, Yang DG, Li ZH, Kang FF. 2022. Prediction of the potential geographic distribution of *Spodoptera ornithogalli* in China based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1417–1423 (in Chinese) [方焱, 马晨, 杨菲, 赵守岐, 朱景全, 刘慧, 马健, 杨东果, 李志红, 康芬芬. 2022. 基于MaxEnt模型预测黄条灰翅夜蛾在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 49(5): 1417–1423]

- Fielding AH, Bell JF. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1): 38–49
- Fitt BDL, Brun H, Barbetti MJ, Rimmer SR. 2006. World-wide importance of *Phoma* stem canker (*Leptosphaeria maculans* and *L. biglobosa*) on oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology*, 114(1): 3–15
- Fitt BDL, Hu BC, Li ZQ, Liu SY, Lange RM, Kharbanda PD, Butterworth MH, White RP. 2008. Strategies to prevent spread of *Leptosphaeria maculans* (*Phoma* stem canker) onto oilseed rape crops in China: costs and benefits. *Plant Pathology*, 57(4): 652–664
- Graham MH. 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84(11): 2809–2815
- Guo XW, Fernando WGD. 2005. Seasonal and diurnal patterns of spore dispersal by *Leptosphaeria maculans* from canola stubble in relation to environmental conditions. *Plant Disease*, 89(1): 97–104
- Howlett BJ, Idnurm A, Pedras MSC. 2001. *Leptosphaeria maculans*, the causal agent of blackleg disease of brassicas. *Fungal Genetics and Biology*, 33(1): 1–14
- Hu ZY, Xian MZ, Li J. 2024. Current situation and development trends of rapeseed variety improvement in China. *Journal of China Agricultural University*, 29(3): 50–62 (in Chinese) [胡志勇, 鲜孟筑, 李俊. 2024. 我国油菜品种改良现状及发展趋势. *中国农业大学学报*, 29(3): 50–62]
- Hwang SF, Strelkov S, Peng G, Ahmed H, Zhou QX, Turnbull G. 2016. Blackleg (*Leptosphaeria maculans*) severity and yield loss in canola in Alberta, Canada. *Plants*, 5(3): 31
- Jiang DB, Fu YH. 2012. Climate change over China with a 2 °C global warming. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 36(2): 234–246 (in Chinese) [姜大膀, 富元海. 2012. 2 °C全球变暖背景下中国未来气候变化预估. *大气科学*, 36(2): 234–246]
- Jiang XL, An M, Zheng SS, Deng M, Su ZH. 2018. Geographical isolation and environmental heterogeneity contribute to the spatial genetic patterns of *Quercus kerrii* (Fagaceae). *Heredity*, 120(3): 219–233
- Kaczmarek J, Kędziora A, Brachaczek A, Latunde-dada AO, Dakowska S, Karg G, Jędryczka M. 2016. Effect of climate change on sporulation of the teleomorphs of *Leptosphaeria* species causing stem canker of brassicas. *Aerobiologia*, 32: 39–51
- Koot EM, Morgan-Richards M, Trewick SA. 2022. Climate change and alpine-adapted insects: modelling environmental envelopes of a grasshopper radiation. *Royal Society Open Science*, 9(3): 211596
- Li DY, Chen XH, Wu CY. 2021. Problems in rapeseed production in China and suggestions on mechanization measures. *Agriculture Machinery Technology Extension*, (12): 24–26 (in Chinese) [李丹阳, 陈兴和, 吴传云. 2021. 我国油菜生产面临的问题及机械化措施建议. *农机科技推广*, (12): 24–26]
- Liu Y, Fang Y, Zhang Y, Wang ZM, Ma J, Gao J, Yang DG, Wei YD, Kang FF. 2023. Prediction of the potential geographical distribution of *Solanum sisymbriifolium* in China. *Plant Quarantine*, 37(6): 52–56 (in Chinese) [刘勇, 方焱, 张莹, 王仲敏, 马健, 高建, 杨东果, 魏亚东, 康芬芬. 2023. 基于MaxEnt模型预测蒜芥茄在中国的潜在地理分布. *植物检疫*, 37(6): 52–56]
- Lob S, Jaspers MV, Ridgway HJ, Jones EE. 2013. *Leptosphaeria maculans*/*L. biglobosa* disease progression in oilseed rape and timing of ascospore release under New Zealand conditions. *New Zealand Plant Protection*, 66: 214–222
- O’Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3): 387–400
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. // *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada, pp. 655–662
- Stockwell DRB. 2006. Improving ecological niche models by data mining large environmental datasets for surrogate models. *Ecological Modelling*, 192(1–2): 188–196
- Sun Y, Zhou GL, Małgorzata J, Chen Y, Yi JP. 2015. Assessment of potential establishment of fungus *Leptosphaeria maculans* in China. *Journal of Plant Protection*, 42(4): 523–530 (in Chinese) [孙颖, 周国梁, Małgorzata J, 陈艳, 易建平. 2015. 油菜茎基溃疡病菌在中国定殖的可能性评估. *植物保护学报*, 42(4): 523–530]
- Tang SQ, Wu Y, Liang DD, Guo K. 2023. Prediction of the potential ecological distribution of *Phytophthora ramorum* in China under future climate change. *Acta Ecologica Sinica*, 43(1): 388–397 (in Chinese) [汤思琦, 武扬, 梁定东, 郭恺. 2023. 未来气候变化下栎树猝死病菌在中国的适生性分析. *生态学报*, 43(1): 388–397]
- Vanagas G. 2004. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 3(2): 319–322
- Wang L, Li Y, Li M, Li LC, Liu FG, Liu DL, Pulatov B. 2022. Projection of precipitation extremes in China’s mainland based on the statistical downscaled data from 27 GCMs in CMIP6. *Atmospheric Research*, 280: 106462
- Wang RL, Guo X, Li Q, Wang MT, You C. 2019. Potential distribution and suitability regionalization of kiwifruit canker disease in Sichuan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(12): 4222–4230 (in Chinese) [王茹琳, 郭翔, 李庆, 王明田, 游超. 2019. 四川省猕猴桃溃疡病潜在分布预测及适生区域划分. *应用生态学报*, 30(12): 4222–4230]
- Wang RL, Li Q, He SS, Liu Y, Wang MT, Jiang G. 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLoS ONE*, 13(2): e0192153

- 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茎叶甲在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 49(5): 1400–1410]
- West JS, Kharbanda PD, Barbetti MJ, Fitt BDL. 2001. Epidemiology and management of *Leptosphaeria maculans* (*Phoma* stem canker) on oilseed rape in Australia, Canada and Europe. *Plant Pathology*, 50(1): 10–27
- Wu TW, Lu YX, Fang YJ, Xin XG, Li L, Li WP, Jie WH, Zhang J, Liu YM, Zhang L, et al. 2019. The Beijing Climate Center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 12(4): 1573–1600
- Wu ZJ, Liang T, Shi J. 2023. Prediction of the global potential geographical distribution of fire blight pathogen *Erwinia amylovora* by using the MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 50(6): 1518–1527 (in Chinese) [吴卓瑾, 梁特, 石娟. 2023. 基于MaxEnt模型预测梨火疫病病菌的潜在地理分布. *植物保护学报*, 50(6): 1518–1527]
- Xin XG, Wu TW, Zhang J, Yao JC, Fang YJ. 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 40(15): 6423–6440
- Xin XG, Wu TW, Zhang J, Zhang F, Li WP, Zhang YW, Lu YX, Fang YJ, Jie 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]
- Yan ZY, Cui YQ, You CJ. 2023. Prediction of potential suitable distribution areas of oak wilt pathogen *Bretziella fagacearum* in China under climate change. *Journal of Plant Protection*, 50(6): 1528–1539 (in Chinese) [闫子怡, 崔亚琴, 游崇娟. 2023. 气候变化下栎枯萎病菌在中国的潜在适生区预测. *植物保护学报*, 50(6): 1528–1539]
- Zhang HL, Li XL, Chen XF, Lü Y, Duan WJ. 2021. Quarantine identification of *Leptosphaeria maculans* on *Hordeum vulgare* imported from Australia. *Plant Protection*, 47(4): 52–58 (in Chinese) [张慧丽, 李雪莲, 陈先锋, 吕燕, 段维军. 2021. 进境澳大利亚大麦夹杂油菜茎基溃疡病菌的检疫鉴定. *植物保护*, 47(4): 52–58]
- Zhang XX, White RP, Demir E, Jędryczka M, Lange R, Islam M, Li ZQ, Huang YJ, Hall A, Zhou G, et al. 2014. *Leptosphaeria* spp., *Phoma* stem canker and potential spread of *L. maculans* on oilseed rape crops in China. *Plant Pathology*, 63(3): 598–612
- Zhang Y, Qin YJ, Zhao ZH, Tu XB, Zhang ZH, Li ZH. 2021. The potential geographical distribution of desert locust in China. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 90–95 (in Chinese) [张源, 秦誉嘉, 赵紫华, 涂雄兵, 张泽华, 李志红. 2021. 沙漠蝗在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 48(1): 90–95]
- Zhao JJ, Gao D, Feng JN. 2015. Potential geographic distribution of *Daktulosphaeria vitifoliae* Fitch in China based on MaxEnt model. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 43(11): 99–104, 112 (in Chinese) [赵晶晶, 高丹, 冯纪年. 2015. 基于MaxEnt模型的葡萄根瘤蚜在中国的适生性分析. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 43(11): 99–104, 112]

(责任编辑:王璇)