

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.02.008

基于 MaxEnt 模型的腐烂茎线虫在内蒙古地区适生区预测

杨帆¹, 赵远征², 张晓明³, 王东^{1*}, 周洪友^{1*}
¹内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 内蒙古呼和浩特 010018; ²内蒙古自治区农牧业科学院植物保护研究所, 内蒙古呼和浩特 010031; ³内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古呼和浩特 010018

摘要:【目的】为保障马铃薯产业健康发展,加强腐烂茎线虫的检疫防控工作,对其在内蒙古地区的适生区进行预测分析。【方法】根据腐烂茎线虫在我国最新的分布和环境数据,通过 MaxEnt 生态位模型和 ArcGIS 软件,预测当前和未来气候条件下腐烂茎线虫在内蒙古地区的适生区。【结果】MaxEnt 模型的 AUC 平均值为 0.929,预测结果准确可靠。预测结果显示:当前气候条件下腐烂茎线虫在内蒙古地区的适生区面积为 41.8 万 km²,占全区面积的 35.31%。研究表明,在 2021—2040 年和 2041—2060 年,腐烂茎线虫在内蒙古地区的总适生区面积将不断扩大;其中在 SSP1_2.6 气候情景下,在赤峰市、通辽市和兴安盟将出现腐烂茎线虫的高适生区;在 SSP3_7.0 气候情景下,在鄂尔多斯市、赤峰市、通辽市将出现腐烂茎线虫高适生区。利用 Jackknife 刀切法计算得到影响腐烂茎线虫分布的主导环境因子为温度季节性变化方差、最湿月降雨量、最冷季平均温、昼夜温差月均温、最湿季平均温。【结论】腐烂茎线虫在内蒙古地区有进一步扩散的风险,建议在未来气候情景下出现腐烂茎线虫高度适生区的盟市,应加强调运检疫和疫情监测,防止腐烂茎线虫进一步扩散。
关键词: 腐烂茎线虫; MaxEnt; 潜在适生区; 气候模式



开放科学标识码
(OSID 码)

Potential prediction of *Ditylenchus destructor* in Inner Mongolia based on MaxEnt

YANG Fan¹, ZHAO Yuanzheng², ZHANG Xiaoming³, WANG Dong^{1*}, ZHOU Hongyou^{1*}
¹College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
²Institute of Plant Protection, Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China;
³College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China

Abstract: 【Aim】To ensure the stable and healthy development of the potato industry, strengthen the quarantine and control of *Ditylenchus destructor*, a prediction and analysis of fitness zone in Inner Mongolia was conducted. 【Method】Based on the latest distribution and environmental data of *D. destructor* in China, the suitability zones of *D. destructor* in Inner Mongolia under current and future climatic conditions were predicted by MaxEnt ecological niche model and ArcGIS software. 【Result】The mean AUC of the MaxEnt model was 0.929, with accurate and reliable prediction results. The prediction results showed that under the current climatic conditions, the *D. destructor* had a suitable area of 4.18×10^5 km² in Inner Mongolia, accounting for 35.31% of the total area. It showed that the total area of the fitness zone of *D. destructor* in Inner Mongolia Autonomous Region would be expanding in 2021—2040 and 2041—2060; among them, under the SSP1_2.6 climate scenario, high fitness zones of *D. destructor* may appear in Chifeng, Tongliao and Hinggan League; under the SSP3_7.0 climate scenario, high fitness zones of *D. destructor* may appear in Erdos, Chifeng and Tongliao. Further, the Jackknife method identified temperature seasonality, precipitation of the wettest month, mean temperature of the coldest quarter, mean diurnal range, and mean temperature of the wettest quarter as the main environmental factors affecting the distribution of *D. destructor*. 【Conclusion】The *D. destructor* has the risk of further spread in the Inner Mongolia region. It is recommended that in future climate scenarios should strengthen the transfer of quarantine and epidemic monitoring to prevent further expansion of *D. destructor* in cities with highly suitable areas for *D. destructor*.

收稿日期(Received): 2022-12-30 接受日期(Accepted): 2023-03-29
基金项目: 内蒙古自治区重点研发项目(2022YFHH0036); 中央引导地方科技发展资金(2021ZY0005); 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0005)
作者简介: 杨帆, 男, 硕士研究生。研究方向: 有害生物综合防治。E-mail: 1330214926@qq.com
* 通信作者(Author for correspondence), 王东, E-mail: wangdong19852008@163.com; 周洪友, E-mail: hongyouzhou2002@aliyun.com

Key words: *Ditylenchus destructor*; MaxEnt; potential suitable area; climate scenario

腐烂茎线虫 *Ditylenchus destructor* Thorne 是国际上公认的植物检疫性线虫,已知寄主多达 120 多种,主要危害甘薯 *Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill、马铃薯 *Solanum tuberosum* L.、甜菜 *Beta vulgaris* L.、胡萝卜 *Daucus carota* var. *sativa* Hoffm. 和大蒜 *Allium sativum* L. 等农作物(Ni et al., 2023; Sugita et al., 2022; Yoshiga, 2020)。腐烂茎线虫最早在北美洲被发现,目前在亚洲、欧洲、美洲、非洲和大洋洲均有报道(EPPO, 2021)。在我国,腐烂茎线虫主要分布在河南、河北、山东、陕西、辽宁、吉林和内蒙古等地(姜培等, 2020),根据 2022 年 7 月 1 日中华人民共和国农业农村部印发的《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录》,已明确其在 10 个省(区、市)、72 个县(市、区、旗)均有分布。该线虫引起的病害世界分布广,具有流行性、突发性、隐蔽性等特点(王东等, 2021),在美国可导致马铃薯平均减产 10% (Basson et al., 1991)。在我国,腐烂茎线虫主要危害马铃薯和甘薯(郭全新和简恒, 2010),一般发病地块可减产 20%~30%,严重发病地块可造成绝产绝收(赵艳群等, 2021)。

内蒙古自治区是我国重要的马铃薯商品薯和种薯生产基地,马铃薯产业对地区经济发展具有重要意义(王东等, 2020)。近年来,在内蒙古鄂尔多斯、通辽等地的马铃薯田块相继发现腐烂茎线虫危害(曹春玲等, 2020; 霍宏丽等, 2022),随着种薯的大范围调运,腐烂茎线虫在内蒙古地区的扩散蔓延风险日益加重。

目前,用于物种潜在分布区预测的常用生态位模型包括生物气候模型(biological climatic model, BIOCLIM)、气候动态模型软件(match climate and compare location model, CLIMEX)、最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)和规则集遗传算法模型(genetic algorithm for rule-set prediction model, GARP)(王茹琳等, 2018)。其中,MaxEnt 模型是一种基于最大熵理论的物种空间分布模型(赵懿, 2022),可以在分布点较少的情况下获得较好的预测结果,具有操作简单、适用范围广和精准度高等优点(郭飞龙等, 2020),已广泛应用于物种生境评价和潜在分布区预测等研究领域(卢小雨等, 2019; 玛丽娜·金额斯等, 2022)。研究人员利用

MaxEnt 模型已成功预测了多种植物寄生线虫的潜在分布区,包括松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle (韩阳阳等, 2015)、苹果根结线虫 *Meloidogyne mali* Itoh, Ohshima & Ichinohe (方亦午等, 2020)、列尾剑线虫 *Xiphinema diversicaudatum* (Micoletzky) Thorne (林伟等, 2020) 和相似穿孔线虫 *Radopholus similis* (Cobb) Thorne (王运生等, 2007) 等;针对腐烂茎线虫,洪波等(2017)、杨鹄溶等(2022)利用该模型,已分别对其在山西和陕西省的适生区进行了预测,但在内蒙古地区的研究尚未见报道。

本研究采用共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)下的未来气候模式,该路径考虑了社会经济、土地利用对区域气候变化发展的影响(翁宇威等, 2020; 张丽霞等, 2019)。SSP1_2.6 表示可持续性发展,走低物质增长和较低的资源强度和能源强度的绿色发展路线,在 2100 年该情景下的辐射强迫将达到 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; SSP3_7.0 表示局部发展,由于区域竞争,即经济发展缓慢,国际社会对解决环境问题的重视程度低,导致一些区域的环境严重退化,走崎岖不平的发展路线,在 2100 年该情景下的辐射强迫将达到 $7.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Riahi et al., 2017)。本研究选择上述 2 种路线,是为预测在可持续发展(SSP1_2.6)和局部发展(SSP3_7.0)的气候模式下腐烂茎线虫在 2021—2040 年和 2041—2060 年 2 个时间段的潜在分布区。本研究基于现有腐烂茎线虫在我国的分布数据,综合利用预测工具 MaxEnt 和软件 ArcGIS,对当前气候条件及未来气候情景下的腐烂茎线虫在内蒙古地区的潜在分布区进行了预测,旨在为今后内蒙古马铃薯腐烂茎线虫的检疫和防控工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 分布数据的收集及筛选

根据全球生物多样性信息平台(<https://www.gbif.org/>)的数据和 2022 年中华人民共和国农业农村部印发的《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录》并结合相关文献报道(陈诚等, 2015; 姜培等, 2020; 李惠霞等, 2016; 张淑玲等, 2019),共获得腐烂茎线虫的 79 个分布点。为了避免分布数据出现过拟合现象,通过 EMDtools 工具对分布数

据筛选后,保留有效数据用于构建 MaxEnt 模型(王亚锋等,2022)。

1.2 环境数据收集

环境数据源自全球气候数据库网站(<https://www.worldclim.org/data/index.html>),下载空间分辨率为 2 min 的环境数据,选择当前(1971—2000 年)和未来(2021—2040 年、2041—2060 年)这 3 个时间段的 19 个环境数据(表 1)。未来气候数据选择第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)中 BCC-CSM2-MR 的数据(杨启杰和李睿,2021),包含共享社会经济路径(SSPs)中的可持续发展(SSP1_2.6)、局部发展(SSP3_7.0)情景 2 种模式。

表 1 19 个环境因子列表
Table 1 List of 19 environmental factors

变量代码 Variable code	变量描述 Variable description
bio1	年均温 Annual mean temperature/℃
bio2	昼夜温差月均温 Monthly mean diurnal temperature/℃
bio3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality (Bio2/Bio7)×100
bio4	温度季节性变化方差 Standard deviation of temperature seasonal change×100
bio5	最热月最高温 Max temperature of warmest month/℃
bio6	最冷月最低温 Min temperature of coldest month/℃
bio7	年温度变化范围 Range of annual temperature/℃
bio8	最湿季平均温 Mean temperature of the wettest quarter/℃
bio9	最干季平均温 Mean temperature of the driest quarter/℃
bio10	最暖季平均温 Mean temperature of the warmest quarter/℃
bio11	最冷季平均温 Mean temperature of the coldest quarter/℃
bio12	年均降雨量 Annual mean precipitation/mm
bio13	最湿月降雨量 Precipitation during the wettest month/mm
bio14	最干月降雨量 Precipitation during the driest month/mm
bio15	降雨量变化方差 CV of precipitation×100
bio16	最湿季降雨量 Precipitation in the wettest quarter/mm
bio17	最干季降雨量 Precipitation in the driest quarter/mm
bio18	最暖季降雨量 Precipitation in the warmest quarter/mm
bio19	最冷季降雨量 Precipitation in the coldest quarter/mm

1.3 环境因子的筛选

软件 MaxEnt 预试验运行后得到环境因子贡献率,选取贡献率大于 0.9 环境数据(文检等,2016),并利用软件 IBM SPSS Statistics 20 对贡献率 0.9 以上的环境数据进行相关性分析,所得结果通过软件 R i386 3.6.3 制作成热图(图 1),当 2 个环境变量相关系数大于 0.85,保留贡献率较大环境因子。

1.4 模型预测及评估

将筛选后的分布数据和环境数据导入 MaxEnt v3.4.4 软件中建模运算,模型参数设置为随机选取

75%分布点数据为训练集,剩余 25%分布点为测试集,绘制相应曲线并开启刀切法(Jackknife)计算环境变量对腐烂茎线虫分布的影响,设定模型运算 1000 次,设置 10 次重复,其余选项采用默认设定。通过 ROC(receiver operating characteristic curve)曲线对 MaxEnt 模型运算结果进行评判,其中 ROC 曲线的特异度(1-specificity)为横坐标,以灵敏度(1-o-mission rate)为纵坐标,曲线下的面积为 AUC(area under curve)值(李单琦等,2020;刘攀峰等,2020)。AUC 值的取值范围为 0~1,一般将 AUC 值划分为 4 个指标:预测结果较差($0.6 \leq AUC < 0.7$)、预测结果一般($0.7 \leq AUC < 0.8$)、预测结果良好($0.8 \leq AUC < 0.9$)、预测结果优秀($0.9 \leq AUC$)(李佳慧等,2021;Swets,1988)。

1.5 适生等级划分

将结果文件导入 ArcGIS 10.4.1 软件中,结合空间分析工具(spatial analyst tools)中的重分类命令(reclassify),利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)(卢林等,2022)将适生区分为 4 个等级:非适生区($0 \leq P < 0.07$)、低适生区($0.07 \leq P < 0.23$)、中适生区($0.23 \leq P < 0.49$)、高适生区($P \geq 0.49$)。

1.6 主要环境因子响应曲线的建立

综合 Jackknife 检验、贡献率、置换重要值和相关性系数分析确定主要环境因子,从 MaxEnt 软件运行结果文件中获取主要环境因子的相应曲线结果文件,并通过软件 GraphPad Prism 8.0.2 绘制环境因子响应曲线,明确腐烂茎线虫在不同环境因子作用下的适生条件。

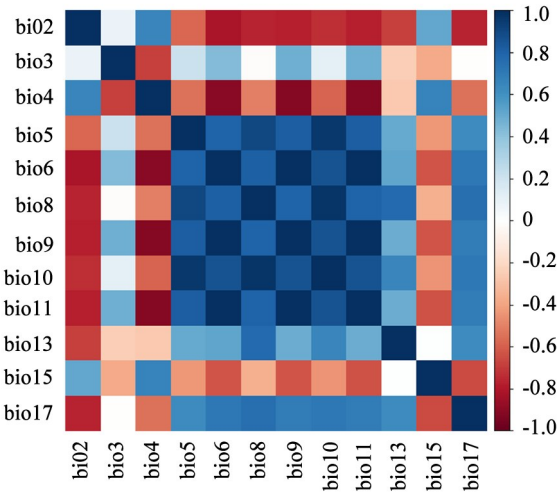


图 1 环境因子相关性分析热图
Fig.1 Heat map for correlation analysis of environmental factors

2 结果与分析

2.1 基于 MaxEnt 的精确度评价

利用 AUC 值对软件运算结果的准确性进行评价,结果如图 2 所示,AUC 值为 0.929,表示该软件对于内蒙古地区腐烂茎线虫分布的预测准确性高。

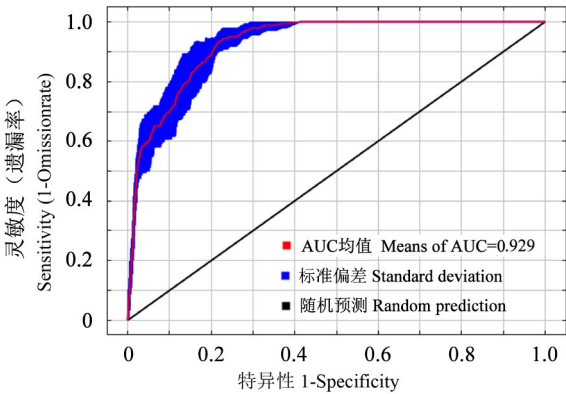


图 2 腐烂茎线虫在内蒙古地区的地理分布预测结果的 ROC 曲线

Fig.2 ROC curve of predicted distributions of *D. destructor* in Inner Mongolia

2.2 内蒙古地区腐烂茎线虫的潜在分布区域预测

2.2.1 当前气候下的分布区预测 如图 3 所示,在当前气候条件下,腐烂茎线虫在内蒙古自治区的适生区面积分布广、经纬跨度较大,其适生面积为41.8 万 km²,占整个内蒙古地区总面积的 35.31%。低适生区的面积占比为 23.03%,分布于内蒙古自治区的 10 个地级行政区,包括巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市;中适生区的面积占比为 12.3%,集中分布于内蒙古的东南和西南部,涉及到的地级行政区包括鄂尔多斯市、呼和浩特市、乌兰察布市、赤峰市和通辽市;当前气候下未预测到腐烂茎线虫在内蒙古地区的高适生区。

2.2.2 未来气候情景下的分布区预测 如表 2 所示,在未来环境条件下,腐烂茎线虫在内蒙古自治区的适生区面积整体呈扩大趋势。在 SSP1_2.6 气候情景下,2021—2040 年和 2041—2060 年高适生区面积分别增长 0.06% 和 2.39%,中适生区面积分别增长 4.85% 和 4.50%,低适生区面积分别增长 8.33% 和 5.37%;在 SSP3_7.0 气候情景下,2021—2040 年和 2041—2060 年高适生区面积分别增长 0 和 0.71%,中适生区面积分别增长 2.32% 和 5.66%,低适生区面积分别增长 8.96% 和 9.89%。

如图 4 所示,未来气候情景下与当前气候情景下的适生区相比,腐烂茎线虫的适生区面积整体呈增长趋势。在 SSP1_2.6 气候情景下,预测内蒙古地区出现腐烂茎线虫的高适生区;2021—2040 年,高适生区零星分布,总面积为 709.8 km²,主要分布于赤峰市的红山区、喀喇沁旗、宁城县和通辽市的科尔沁左翼后旗、库伦旗;2041—2060 年,高适生区将呈带状分布,总面积达 28273.7 km²,分布区域将扩展至内蒙古 3 个地级行政区的 12 个旗(县),包括赤峰市的红山区、元宝山区、喀喇沁旗、宁城县、敖汉旗和翁牛特旗,通辽市的科尔沁区、开鲁县、库伦旗、科尔沁左翼后旗、科尔沁左翼中旗,以及兴安盟的科尔沁右翼中旗。在 SSP3_7.0 环境条件下,腐烂茎线虫的高适生区在 2021—2040 年未出现,而在 2041—2060 年鄂尔多斯市鄂托克前旗、乌审旗和赤峰市的喀喇沁旗以及通辽市的库伦旗、科尔沁左翼后旗均有分布。

2.3 影响腐烂茎线虫潜在分布区的主要环境因子

通过软件 MaxEnt 处理后,选取贡献率大于 0.9 的环境因子,在通过软件将剩余环境因子进行相关性分析,最终筛选获得了 8 个环境数据:温度季节性变化方差(bio4)、最湿月降雨量(bio13)、最冷季平均温(bio11)、昼夜温差月均温(bio2)、最湿季平均温(bio8)、最干季降雨量(bio17)、降雨量变化方差(bio15)、昼夜温差与年温差比值(bio3),其中贡献率与置换重要值如表 3 所示。

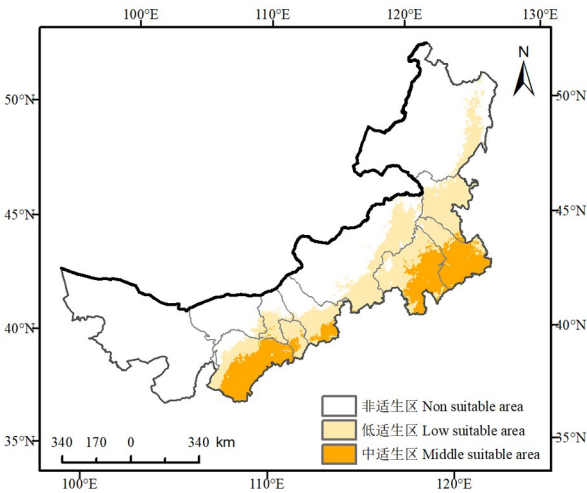


图 3 当前气候下腐烂茎线虫在内蒙古地区的潜在分布区[审图号:蒙 S(2023)032 号]

Fig.3 Potential distribution of *D. destructor* in Inner Mongolia under current climatic conditions

表 2 不同气候情景下腐烂茎线虫在内蒙古地区的适生区面积占比
Table 2 Proportion of adaptive regions of *D. destructor* in Inner Mongolia under different climate scenarios

适生区类型 Type of suitable area	当前 Current	SSP1_2.6		SSP3_7.0	
		2021—2040	2041—2060	2021—2040	2041—2060
非适生区 Non suitable are	64.69	51.45	52.44	54.41	48.43
低适生区 Low suitable are	23.03	31.36	28.40	31.99	32.92
中适生区 Middle suitable are	12.28	17.13	16.78	14.60	17.94
高适生区 High suitable are	0	0.06	2.39	0	0.71

单位 Unit: %

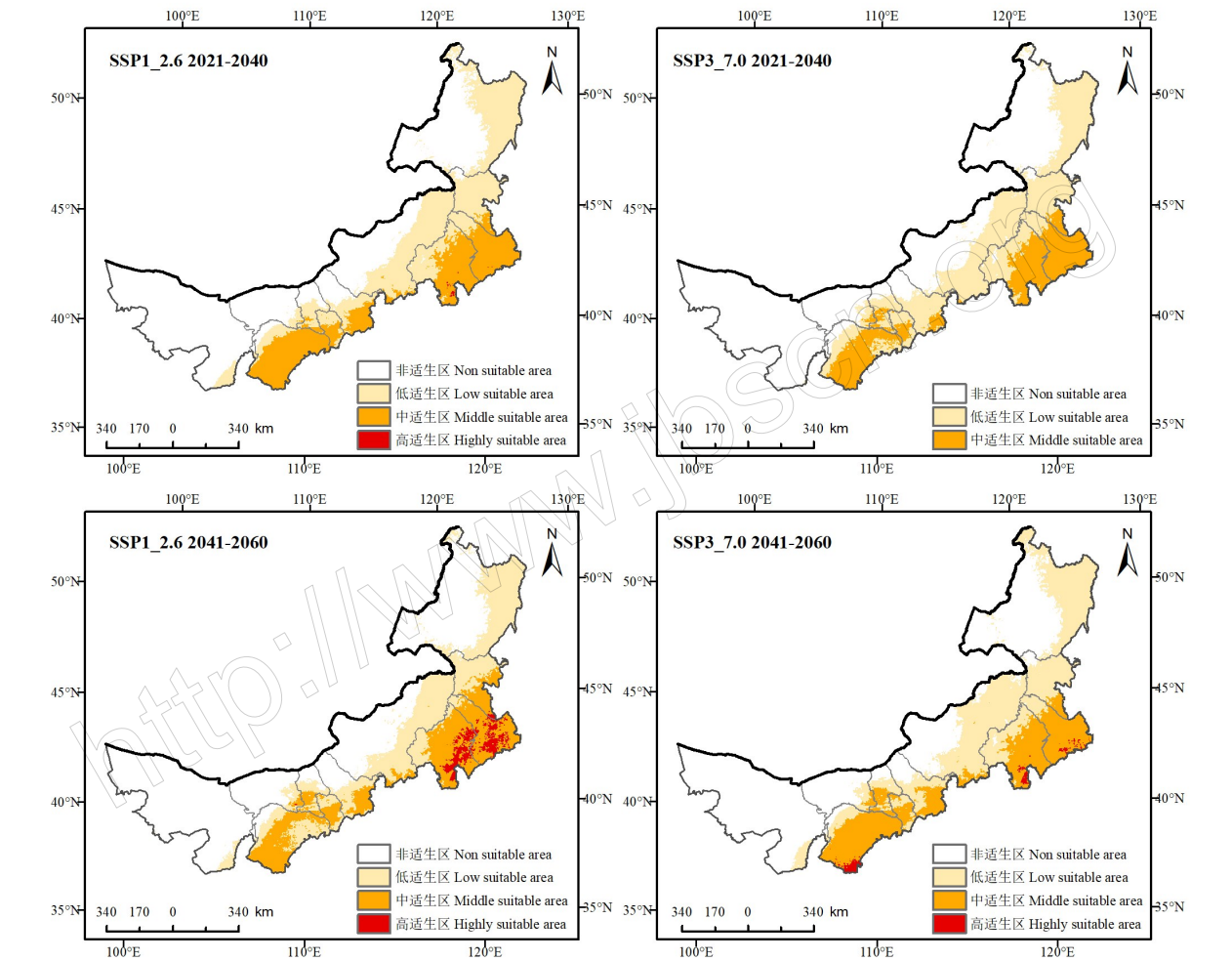


图 4 未来气候情景下腐烂茎线虫在内蒙古地区的潜在分布区[审图号:蒙 S(2023)032 号]

Fig.4 Potential distribution of *D. destructor* in Inner Mongolia under future climatic conditions

表 3 环境因子贡献率和置换重要值
Table 3 Environmental factor contribution rate and displacement important values

变量代码 Variable code	贡献百分率 Percent contribution/%	置换重要值 Replace important values
bio4	25.7	15.1
bio13	25.6	41.0
bio11	14.2	2.6
bio2	13.6	16.1
bio8	12.4	17.8
bio17	3.8	1.3
bio15	2.8	4.6
bio3	1.8	1.5

2.4 主导环境因子的响应曲线

利用 Jackknife 刀切法分析各生态因子对腐烂茎线虫分布适宜度(图 5),再结合环境因子的贡献率和重要性最终确定 bio4、bio13、bio11、bio2、bio8 这 5 个环境变量为主导环境因子。根据主要环境因子变量响应曲线来判断腐烂茎线虫的存在概率与环境因子之间的关系,当腐烂茎线虫的存在概率大于 0.5 时,所对应环境因子所在的区间范围有利于腐烂茎线虫的发生。温度季节性变化方差在

911.94~1121.32 时,有利于腐烂茎线虫的发生,在 947.43 时最适宜(图 6A);最湿月降雨量在 129.44~220.11 mm 时,有利于腐烂茎线虫的发生,在 190.51mm 时最适宜(图 6B);最冷季平均温在 -2.38~4.34 ℃ 时,有利于腐烂茎线虫的发生,在 2.78 ℃ 时最适宜(图 6C);昼夜温差月均温在 9.31~11.59 ℃ 时,有利于腐烂茎线虫的发生,在 9.91 ℃ 时最适宜(图 6D);最湿季平均温在 23.24~29.13 ℃ 时,有利于腐烂茎线虫的发生,在 26.60 ℃ 时最适宜(图 6E)。这些环境因子的区间范围,以及最适宜与腐烂茎线虫的生物学特征基本一致。

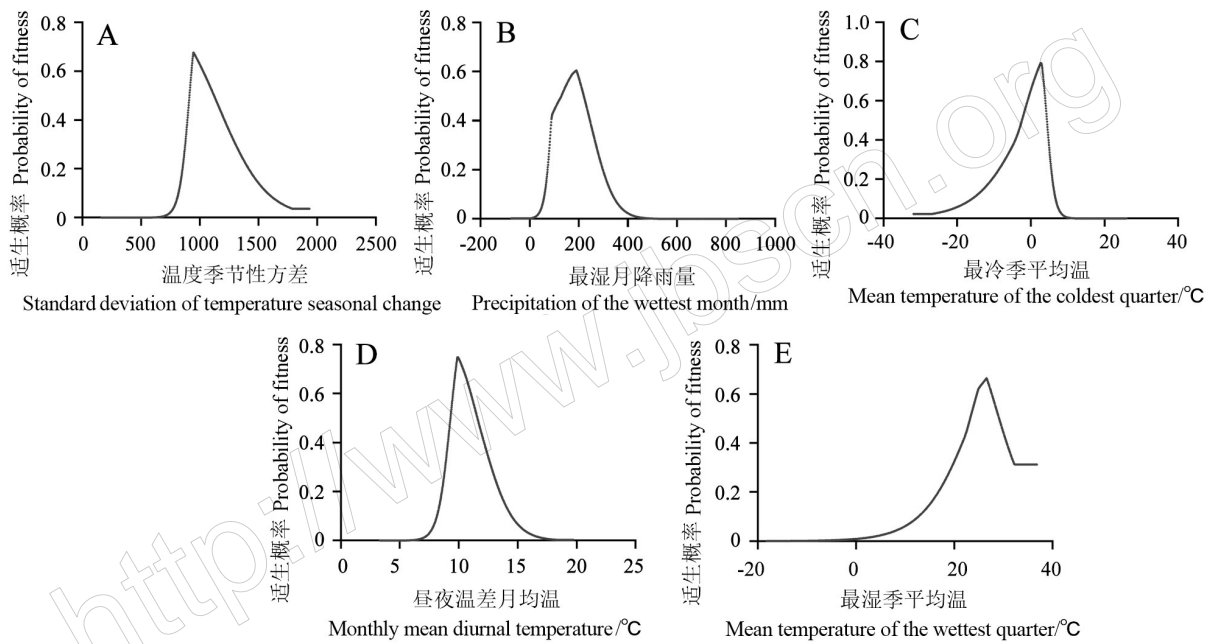


图 6 腐烂茎线虫主导环境因子相应曲线
Fig.6 The response curves of *D. destructor* to main environmental factors

3 讨论

本研究基于气候环境变量与腐烂茎线虫在我国的分布数据,通过软件 MaxEnt 模型预测了腐烂茎线虫在内蒙古地区的潜在分布区。结果表明:当前气候下,内蒙古地区腐烂茎线虫的适生区面积占总面积的 35.31%,中低适生区主要集中在内蒙古东南部地区,非适生区集中在内蒙古西北地区和内蒙古东北低纬度地区,这与现阶段腐烂茎线虫在内蒙古的分布地点基本一致(姜培等,2020);未来气候模式下,腐烂茎线虫在内蒙古自治区的适生区面积总体呈扩大趋势,其中在 SSP1_2.6 气候情景下,总适生区面积在 2021—2040 年和 2041—2060 年分别增长 13.24% 和 12.25%;在 SSP3_7.0 气候情景下,总适生区面积在 2021—2040 年和 2041—2060

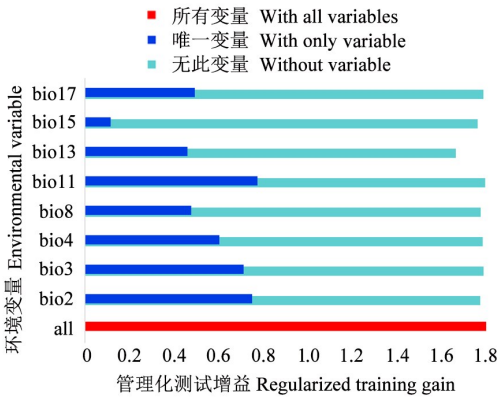


图 5 腐烂茎线虫分布预测结果(刀切法)
Fig.5 Jackknife results of prediction process of *D. destructor*

年分别增长 10.28% 和 16.26%。通过对腐烂茎线虫当前和未来气候模式下的适生区面积分析发现,未来气候模式下腐烂茎线虫适生区面积不断扩大,推断未来腐烂茎线虫在内蒙古地区存在进一步传播蔓延的风险。据报道,鄂尔多斯市鄂托克前旗的马铃薯田块曾出现腐烂茎线虫危害(曹春玲等,2020),这与未来气候下预测出的腐烂茎线虫高适生区高度重合,进一步说明了预测的可靠性。

根据分布预测结果刀切图和主要环境因子结果分析,发现对腐烂茎线虫分布影响最大的环境因子包括温度季节性变化方差、最湿月降雨量、最冷季平均温、昼夜温差月均温、最湿季平均温度。可见,温度和湿度是影响腐烂茎线虫分布的主要因素。其中,最冷季平均温适宜范围为 -2.38~4.34

℃,而多数学者也认为腐烂茎线虫对低温具有较好的适应性(黄文坤等,2012)。预测的最湿季平均温度适宜范围为 23.24~29.13℃,这与已知的影响腐烂茎线虫生长繁殖的最适温度(20~27℃)较接近(刘维志,2000);研究表明,温度在 15~20℃以及相对湿度在 90%~100%时,腐烂茎线虫对马铃薯的危害最严重(赵洪海等,2021)。

内蒙古地区作为我国马铃薯的主要产区,在马铃薯生产、加工、运输、销售等各个环节均可能存在腐烂茎线虫传播蔓延的风险。本研究在当前气候和未来气候情景下开展预测,可为腐烂茎线虫在内蒙古地区的发生提供早期预警,为该线虫的有效防控提供理论依据。建议在未来气候情景下出现高度适生区的盟市,应加强调运检疫和疫情监测,防止腐烂茎线虫进一步扩散,特别在未来 2 种气候模式下都出现高适生区的赤峰、通辽两市应当提高警惕,密切关注腐烂茎线虫的发生情况,严防腐烂茎线虫进一步传播蔓延,以保障马铃薯产业健康稳定发展。

本研究模型是基于气候因子和腐烂茎线虫现有的分布数据进行的预测,而物种的实际分布情况还受到海拔高度、地势地貌、土壤环境以及种间相互作用等因子的影响(Soberón & Peterson, 2021)。后续研究中需综合考虑非生物因素和生物因素的影响,持续追踪腐烂茎线虫在我国的最新发生动态,以进一步完善其适生区研究。

参考文献

曹春玲, 郭江岸, 姜凯, 融晓君, 董奇彪, 李海峰, 2020. 内蒙古马铃薯腐烂茎线虫的发生与防控. 青海农技推广 (2): 35-36.

陈诚, 骆景霞, 任青, 吴方, 2015. 腐烂茎线虫在驻马店的发生原因及控制对策. 中国植保导刊, 35(10): 76-78.

曹春玲, 郭江岸, 姜凯, 融晓君, 董奇彪, 李海峰, 2020. 内蒙古马铃薯腐烂茎线虫的发生与防控. 青海农技推广 (2): 35-36.

黄文坤, 何旭峰, 丁中, 彭德良, 2012. 马铃薯腐烂茎线虫的遗传变异及其与生态因子的相关性. 农业生物技术学报, 20(1): 62-69.

方亦午, 刘乐乐, 郭恺, 陈先锋, 顾建锋, 2020. 基于 Max-Ent 的苹果根结线虫在中国的适生区预测. 植物检疫, 34(5): 68-73.

郭全新, 简恒, 2010. 危害马铃薯的茎线虫分离鉴定. 植物

保护, 36(3): 117-120.

郭飞龙, 徐刚标, 牟虹霖, 李赞, 2020. 伯乐树潜在地理分布时空格局模拟. 植物科学学报, 38(2): 185-194.

霍宏丽, 席先梅, 白全江, 李星星, 王新荣, 融晓君, 2022. 内蒙古自治区鄂尔多斯市马铃薯腐烂茎线虫种类鉴定研究. 植物病理学报, 52(4): 721-726.

韩阳阳, 王焱, 项杨, 叶建仁, 2015. 基于 Maxent 生态位模型的松材线虫在中国的适生区预测分析. 南京林业大学学报(自然科学版), 39(1): 6-10.

洪波, 张锋, 李英梅, 刘晨, 张淑莲, 陈志杰, 2017. 马铃薯腐烂茎线虫在陕西省的适生性分析//绿色生态可持续发展与植物保护——中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社: 38-44.

姜培, 冯晓东, 王晓亮, 朱莉, 秦萌, 李潇楠, 闫硕, 2020. 近年来我国腐烂茎线虫为害与防控形势. 中国植保导刊, 40(7): 87-90.

李单琦, 胡苑, 韩彩霞, 陈陆丹, 张志勇, 钟爱文, 魏宗贤, 彭焱松, 2020. 基于 MaxEnt 模型的濒危观赏植物福建柏潜在适生区预测. 植物科学学报, 38(6): 743-750.

李惠霞, 徐鹏刚, 李健荣, 坚晋卓, 赵鹏, 彭德良, 2016. 甘肃肃西地区马铃薯线虫病病原的分离鉴定. 植物保护学报, 43(4): 580-587.

李佳慧, 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 刘益鹏, 张天宇, 张国防, 刘宝, 2021. 入侵植物三裂叶豚草在中国的潜在适生区预测. 生物安全学报, 30(4): 263-274.

刘维志, 2000. 植物线虫学. 北京: 中国农业出版社.

林伟, 水克娟, 闫邦奇, 张卫东, 廖力, 迟远丽, 2020. 裂尾剑线虫在中国的适生性分析. 植物检疫, 34(4): 59-63.

刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 杜兰英, 2020. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析. 生态学报, 40(16): 5674-5684.

卢林, 张志伟, 林美英, 赵梓伊, 肖能文, 王琦, 2022. 基于 MaxEnt 模型预测胸窗萤在北京市的潜在适生区. 植物保护学报, 49(4): 1217-1224.

卢小雨, 蒋露, 叶奕优, 王林聪, 徐浪, 郭强, 余道坚, 2019. 基于 MaxEnt 模型的朱红毛斑蛾在我国的潜在地理分布. 环境昆虫学报, 41(6): 1268-1275.

玛丽娜·金额斯, 阿依努尔·吐松, 艾尼瓦尔·吐米尔, 2022. 基于 MaxEnt 模型的新疆饼干衣属地衣生境评价//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会论文集(二). 北京: 中国环境科学学会: 1379-1388.

王东, 孟焕文, 赵远征, 张文兵, 赵英杰, 刘万友, 王煜, 周洪友, 2020. 内蒙古马铃薯黄萎病绿控技术示范效果. 中国植保导刊, 40(10): 71-74.

王东, 张姐, 赵远征, 孟焕文, 梁东超, 周洪友, 2021. 内蒙

- 古马铃薯主栽品种对腐烂茎线虫病的室内抗性评价. 河南农业科学, 50(9): 105–116.
- 王茹琳, 李庆, 何仕松, 刘原, 2018. 中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究. 中国生态农业学报, 26(1): 27–37.
- 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英, 2007. 相似穿孔线虫在中国的适生区预测. 中国农业科学, 40(11): 2502–2506.
- 王亚锋, 付志玺, 郭云霞, 陶振华, 马蓓, 郑跃鸣, 2022. 入侵性杂草皱叶果芥在中国的适生区预测及分析. 生物安全学报, 31(4): 356–363.
- 文检, 吕秀梅, 洪道鑫, 谢彩香, 张静, 张艺, 2016. 基于Maxent模型的青藏高原大花红景天生态适宜性分析. 中国中药杂志, 41(21): 3936–3931.
- 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿, 2022. 共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望. 气候变化研究进展, 16(2): 215–222.
- 杨鹄溶, 李恩, 徐玉梅, 赵增旗, 2022. 腐烂茎线虫在山西省的适生区预测. 福建农林大学学报(自然科学版), 51(1): 39–45.
- 杨启杰, 李睿, 2021. 杪櫟的潜在适生区及其变化. 应用生态学报, 32(2): 538–548.
- 赵艳群, 刘忠雄, 赵文忠, 任飞娥, 丁华, 康静, 王宝青, 2021. 不同药剂对马铃薯腐烂茎线虫病的田间防效. 中国植保导刊, 41(12): 70–72.
- 赵懿, 2022. 基于生态位模型预测不同气候情景下的杉木潜在适生区. 硕士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学.
- 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌, 2019. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 5(5): 519–525.
- 张淑玲, 李惠霞, 徐鹏刚, 刘永刚, 于洪涛, 刘向, 2019. 黑龙江腐烂茎线虫群体的分离和鉴定. 植物病理学报, 49(6): 756–762.
- 赵洪海, 梁晨, 张浴, 段方猛, 宋雯雯, 史倩倩, 黄文坤, 彭德良, 2021. 腐烂茎线虫(*Ditylenchus destructor* Thorne, 1945)生物学研究进展. 生物技术通报, 37(7): 45–55.
- BASSON S, DE WAELE D G, MEYER A J, 1991. Population dynamics of *Ditylenchus destructor* on peanut. *Journal of Nematology*, 23(4): 485–490.
- EPPO, 2021. *Ditylenchus destructor*. [2022–12–01]. <https://gd.eppo.int/taxon/DITYDE/distribution>.
- NI C, HAN B, LIU Y, MUNAWAR M, LIU S, LI W, SHI M, LI H, PENG D, 2023. Populations of the potato rot nematode *Ditylenchus destructor* parasitizing Chinese herbal medicines diagnosis and characterization of the ribosomal DNA-ITS¹. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(6): 1763–1781.
- RIAH K, VAN VUUREN D.P, KRIEGLER E, EDMONDS J, ONEILL B.C, FUJIMORI S, BAUER N, CALVIN K, DEL-LINK R, FRICKO O, 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42: 153–168.
- SUGITA Y, SOBAGAKI T, YOSHIGA T, 2022. Low-oxygen tolerance of *Ditylenchus destructor* (Tylenchida: Anguinidae). *Applied Entomology and Zoology*, 57: 131–136.
- SWETS J A, 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240: 1285–1293.
- SOBERÓN J, PETERSON T, 2004. Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359: 689–698.
- YOSHIGA T, 2020. *In vitro* culture method of *Ditylenchus destructor* (Tylenchida: Anguinidae) using garlic. *Applied Entomology and Zoology*, 55: 435–437.

(责任编辑:郭莹)