

基于MaxEnt模型预测气候变化下飞扬草在中国的潜在地理分布



李建宇¹ 赵建伟¹ 于文涛² 陈燕婷¹ 史梦竹³ 阮菲¹
傅建炜³ 赵紫华^{4*} 刘万学^{5*}

(1. 福建省农业科学院植物保护研究所, 福建省作物有害生物监测与治理重点实验室, 福州 350013; 2. 福州海关技术中心, 福建省检验检疫技术研究重点实验室, 福州 350001; 3. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福州 350002; 4. 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; 5. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为明确入侵杂草飞扬草 *Euphorbia hirta* Linn. 在中国的潜在地理分布, 基于MaxEnt模型结合ArcGIS地理信息系统软件, 对飞扬草在历史气候及未来气候2个情景下的潜在适生区进行预测, 并采用刀切法分析各环境因子对飞扬草适生区的影响。结果显示, 在飞扬草潜在地理分布变化过程中, 影响最大的环境因子是最湿季度降水量, 其次是最暖季度平均温度。历史气候条件下, 飞扬草在中国的总适生区面积占全国陆地总面积的32.45%, 其中高适生区占13.57%, 中适生区占10.06%, 低适生区占8.82%。未来气候条件下, 预测结果表明2050年飞扬草的潜在适生区将进一步扩张, 其中在高强迫SSP585情景下飞扬草的总适生区面积大于低强迫SSP126情景下的总适生区面积, 而SSP126情景下的高适生区面积则大于SSP585情景下的高适生区面积。表明飞扬草在中国的潜在适生区分布范围较广, 可能在未来进一步扩散至全国, 建议相关部门加强监控, 防止飞扬草进一步入侵和扩散。

关键词: 飞扬草; 最大熵模型; 潜在地理适生区; 入侵植物

Potential geographical distribution of asthma plant *Euphorbia hirta* based on MaxEnt under predicted future climate conditions

Li Jianyu¹ Zhao Jianwei¹ Yu Wentao² Chen Yanting¹ Shi Mengzhu³ Ruan Fei¹
Fu Jianwei³ Zhao Zihua^{4*} Liu Wanxue^{5*}

(1. Fujian Key Laboratory for Monitoring and Integrated Management of Crop Pests, Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, Fujian Province, China; 2. Fujian Key Laboratory for Technology Research of Inspection and Quarantine, Technology Centre of Fuzhou Customs, Fuzhou 350001, Fujian Province, China; 3. Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-Products, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350002, Fujian Province, China; 4. 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; 5. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To predict the potential geographical distribution of an alien invasive weed *Euphorbia hirta* Linn. in China, the suitable areas under historical and future climate conditions were predicted based on the MaxEnt model and ArcGIS software. The Jackknife method was used to analyze the influence of

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2600400), 福建省人民政府与中国农业科学院“5511”协同创新工程(XTCXGC2021017, XTCXGC2021011)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhzhao@cau.edu.cn, liuwanxue@caas.cn

收稿日期: 2023-09-06

various environmental factors on the suitable establishment areas for *E. hirta*. The results showed that in the process of changes in the potential geographical distribution of *E. hirta*, the environmental factor with the greatest influence was the precipitation of the wettest quarter, followed by the mean temperature of warmest quarter. Under historical climate conditions, the potential geographical distribution areas of *E. hirta* in China accounts for 32.45% of total land area, of which the highly suitable area accounts for 13.57%, the moderately suitable area accounts for 10.06%, and the slightly suitable area accounts for 8.82%. Based on future climate conditions, prediction results indicated that the suitable areas of *E. hirta* will further expand in 2050. The total area of potential distribution of *E. hirta* under SSP585 scenario was higher than that under SSP126 scenario, while the areas of highly suitable area of *E. hirta* under SSP126 scenario was higher than that under SSP585 scenario. This indicates that the potentially suitable habitat area of *E. hirta* in China is relatively wide, and it may further spread to the whole country in the future. It is recommended that relevant departments strengthen monitoring to prevent further invasion and spread of *E. hirta*.

Key words: *Euphorbia hirta*; maximum entropy model; potential geographical distribution; invasive plant

全球化进程推进了世界各地经济、交通等方面高速发展,地理阻隔因素逐渐消除,世界各地间的贸易往来日益频繁,使得外来生物入侵风险不断提高(徐海根等,2004)。中国的气候类型和生态系统种类较丰富,极易成为外来物种的定殖地,目前已成为生物入侵最严重的国家之一,34个省份均有外来物种入侵,其中以西南和东南沿海地区最为严重。气候因素是影响物种分布的一个重要因素。近30年来,全球地表平均气温约升高了0.85℃,预计10~30年后平均温度最高将再上升1.5℃(IPCC,2014)。在此期间,中国的年平均气温升高幅度约为0.91℃,已超过同期全球平均升幅(何远政等,2021)。未来气候变化将对植物的分布产生重要影响。如邱晓萍等(2022)预测在未来气候条件下丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bunge 在中国的适宜生境面积将扩大;在未来气候变化条件下,入侵物种黄顶菊 *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze、白花鬼针草 *Bidens alba* (L.) DC 和麦田恶性杂草节节麦 *Aegilops tauschii* Coss. 等的潜在适生区范围也将进一步扩大(房锋等,2013;岳茂峰等,2016;李安等,2020)。气候变化也会使得部分物种的适生区发生收缩,如在未来气候条件下,宽叶酢浆草 *Oxalis latifolia* HBK 在中国的适生区总面积降低(黄昱萌等,2022)。

物种的适生区是指能够满足其生存和繁殖所需条件的区域,而阻止外来物种传入其适生区是防止外来物种在当地造成危害的重要手段之一(张颖,2011)。因此,外来物种的潜在适生区预测具有重要意义。随着生态学统计模型与地理信息系统的发展,通过模型预测物种的潜在地理分布已得到广泛

应用(王雨生等,2019)。目前常见的生态位模型有很多种,如基于物种物候指标的 CLIMEX 模型(Kriticos et al., 2015)、生物气候(bioclimatic, BIO-CLM)模型(Sikder et al., 2006)、基于生态位理论的规则集遗传算法(genetic algorithm for rule set prediction, GARP)模型和最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型(Phillips & Dudík, 2008)等。其中,MaxEnt模型是近年来入侵物种适生区分析中应用最多的模型之一,是以最大熵理论为基础的密度估计和物种分布预测模型。相对于其他模型,MaxEnt模型在物种现实生境模拟、主要生态因子筛选和环境因子对物种生境影响的定量描述方面均表现出了优越的性能,因此成为预测外来物种潜在分布区的首选模型(张颖,2011)。潘铭心等(2022)分析了加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L. 在中国的入侵范围,预测结果直观地体现了该杂草在中国的潜在适生区;Yan et al. (2020)利用MaxEnt模型分析了空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. 在中国的潜在适生区,认为温暖、稳定、多雨的气候环境适合空心莲子草生存;Zhang et al. (2021)采用MaxEnt模型预测了苍耳 *Xanthium italicum* Moretti. 在全球的适生区。

飞扬草 *Euphorbia hirta* Linn., 又称为大飞扬、大乳汁草、节节花,是中国重要的外来入侵生物之一,属于大戟科大戟属植物。飞扬草原产于非洲,现广泛分布于热带和亚热带地区,如日本、印度、印度尼西亚和菲律宾等(徐海根和强胜,2018)。该杂草的花果期长、繁殖力强,占据了本土植物的生长空间,对当地的生物多样性造成威胁。同时,飞扬草也是

外来有害生物螺旋粉虱 *Aleurodicus disperses* Russell 主要的寄主植物,存在向经济作物传播病虫害的风险(李雪枫等,2017)。据报道,中国最早于1820年在澳门采集到飞扬草的标本,目前飞扬草在国内分布于浙江、广西、福建、湖南、湖北、四川、重庆、贵州、广东、广西、海南、云南、香港、澳门和台湾等省(自治区、直辖市)(徐海根和强胜,2018)。目前,对飞扬草的研究主要集中在其化学成分(Kumar et al., 2010; 贤景春和林婉华, 2014; 舒佳为等, 2018)及药用性能(Perera et al., 2018; Mekam et al., 2019)等方面,而有关于飞扬草适生性分析的研究报道较少。本研究基于MaxEnt模型和ArcGIS地理信息系统软件,结合当前和未来的气候数据预测飞扬草在中国的潜在分布区,以期制订防止其在中国进一步扩散蔓延的方案提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

数据来源:飞扬草目前的分布点数据主要来自全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org/>)数据库、国内外公开发表的文献报道以及本课题组在福建省的实地调查数据,共获得1456条分布点数据,实地考察数据556条。排除过于密集的分布点数据,在ArcGIS软件中设置环境变量栅格2.5 min (~5 km),缓冲区2.5 km,每个缓冲区内仅保留1个分布点数据。对数据进行筛选后,最终获得有效分布点坐标1912条。

地图数据:本研究采用的标准地图来自自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

环境数据:本研究采用环境数据共19个,包括11个温度相关环境变量,分别为年平均气温、月平均昼夜温差、平均日温/年温变化范围、温度季节性、最热月份最高温、最冷月份最低温、气温年变化范围、最湿季度平均气温、最干旱季节平均气温、最暖季度平均温度和最冷季节平均气温;8个降水量相关环境变量,分别为年降水量、最湿月份降水量、最干月份降水量、降水的季节变化、最湿季度降水量、最干旱季节降水量、最温暖季节降水量和最冷季节降水量。从WorldClim网站(<https://worldclim.org/>)下载历史气候(1970—2000年)和2050年2种温室气体排放情景(低强迫情景SSP126和高强迫情景SSP585)下的气候数据,空间分辨率选用2.5 arc min。

1.2 方法

1.2.1 关键环境变量的筛选

环境变量的多重共线性通常会对物种和环境因

子之间关系的分析产生影响,因此需要进行环境变量的相关性分析和筛选(赵清等,2022)。利用ArcGIS 10.2软件中的采样功能对1912个飞扬草分布点对应的环境数据进行提取,然后用SPSS 25.0软件对提取的环境变量进行相关性分析和主成分分析,筛选出相关性系数 r 绝对值大于0.8的环境变量,并保留贡献率较大的环境变量,最终筛选获得用于MaxEnt模型拟合的关键环境变量。并通过存在概率阈值评估相关环境因子对飞扬草生长适合度的影响,即当存在概率值大于0.5时,对应的环境变量适合飞扬草的生长。

1.2.2 MaxEnt模型的构建

将飞扬草的分布点数据以及对应的关键环境变量数据导入MaxEnt 3.4.4软件(<https://github.com/mrmaxent/Maxent>),参数设置如下:25%分布点数据为测试集,75%为训练集;采用Subsample的方法,重复运行10次;最大迭代次数设为500,设置10%的训练阈值;选择刀切法对环境变量的重要性进行评估,其他参数采用默认值,结果输出格式为*.asc。

1.2.3 飞扬草适生区等级的划分

将MaxEnt运行结果导入ArcGIS 10.2软件中,使用转换工具将结果转换为raster格式。利用ArcGIS 10.2软件的重分类功能对历史气候(1970—2000年)和2050年的低强迫情景SSP126和高强迫情景SSP585下飞扬草的潜在适生区进行等级划分。本研究利用自然间断点法(张源等,2021),由MaxEnt 3.4.4软件生成飞扬草的适生分布概率 p 值,将这个结果导入到ArcGIS 10.2软件中进行分类,适生区划分为4个等级: $0 \leq p < 0.108$ 为非适生区, $0.108 \leq p < 0.323$ 为低适生区, $0.323 \leq p < 0.530$ 为中适生区, $0.530 \leq p \leq 1.000$ 为高适生区。

1.2.4 MaxEnt模型的精度检测

MaxEnt模型预测的准确性采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积值(area under curve, AUC)表示。 $0.50 \leq AUC < 0.60$ 表示预测失败, $0.60 \leq AUC < 0.70$ 表示预测结果较差, $0.70 \leq AUC < 0.80$ 表示预测结果一般, $0.80 \leq AUC < 0.90$ 表示预测结果较好, $0.90 \leq AUC$ 表示预测结果非常好(洪宇辰等,2018),当AUC越接近1时,预测结果越准确。

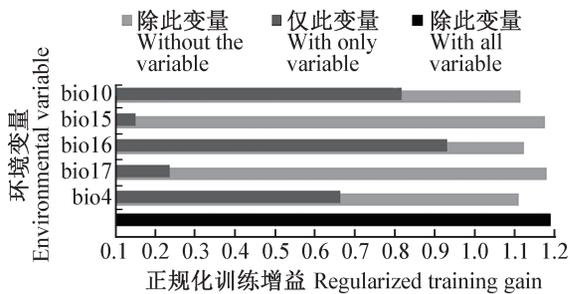
2 结果与分析

2.1 环境变量筛选结果及分析

经相关性分析和主成分分析,去除相关性高的环境变量后,保留5个关键的环境变量,分别为温度

季节性、最暖季度平均温度、降水的季节变化、最湿季度降水量和最干旱季节降水量。对保留的5个影响飞扬草分布的环境变量的贡献率进行分析,结果显示对飞扬草分布区影响最大的环境变量是最湿季度降水量,贡献率为74.50%,其次是最暖季度平均温度,贡献率为11.50%;温度季节性、降水的季节变化和最干旱季节降水量的贡献率分别为10.00%、2.00%和1.90%。

通过刀切法分析各环境变量对飞扬草适生区的影响,结果显示,在“仅此变量”中,最湿季度降水量、最暖季度平均温度和温度季节性的正规化训练增益较高,表明降雨和温度是影响模型预测结果的主要环境变量;在“除此变量”下,最湿季度降水量的正规化训练增益值最低,说明飞扬草分布受到降雨的影响更大(图1)。



bio10: 最暖季度平均温度; bio15: 降水的季节变化; bio16: 最湿季度降水量; bio17: 最干旱季节降水量; bio4: 温度季节性。 bio10: Mean temperature of the warmest quarter; bio15: precipitation seasonality; bio16: precipitation of the wettest quarter; bio17: precipitation of the driest quarter; bio4: temperature seasonality.

图1 关键环境变量对预测飞扬草潜在地理分布的重要性
Fig. 1 Importance of key environmental variables affecting prediction of potential distribution of *Euphorbia hirta*

飞扬草对最湿季度降水量和最暖季度平均温度

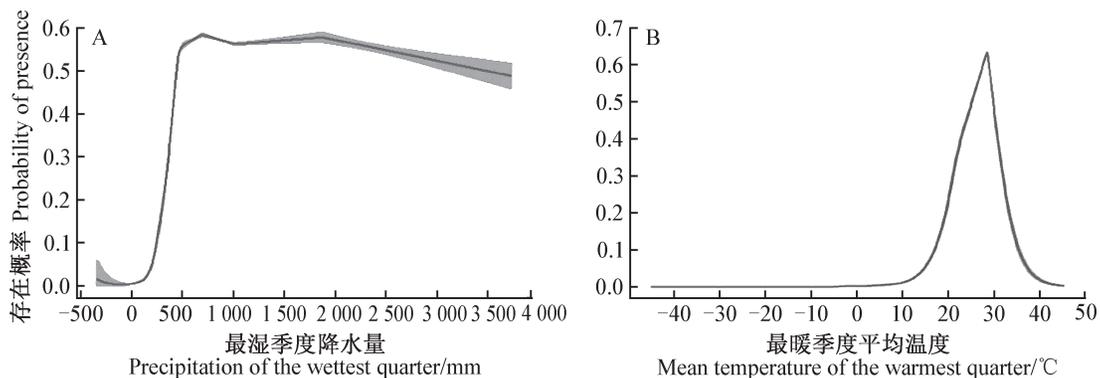


图2 最湿季度降水量(A)和最暖季度平均温度(B)对飞扬草在中国潜在地理分布的影响

Fig. 2 Effects of precipitation of the wettest quarter (A) and mean temperature of the warmest quarter (B) on potential distribution of *Euphorbia hirta* in China

这2个主要环境变量的响应曲线如图2所示,当最湿季度降雨量超过400 mm,适宜飞扬草生存,降雨量在700 mm左右时,飞扬草的存在概率最高(图2-A);当最暖季度平均温度在25~30 °C范围内,适宜飞扬草生存,温度在28 °C左右时飞扬草存在概率最高(图2-B)。

2.2 目前飞扬草在中国的潜在分布区预测

基于MaxEnt模型预测飞扬草的潜在适生区,结果显示飞扬草的适生区主要分布于中国东南部,总适生区面积约为312.77万 km²,约占中国陆地总面积的32.45%。高适生区主要集中于东南沿海地区,如浙江省中部和南部、福建、江西、广东、广西、湖南、海南和台湾等省(自治区),约占中国陆地总面积的13.57%;中适生区主要集中于长江流域的部分省份,如安徽、江苏、湖北、浙江、贵州和四川等省份,面积约占中国陆地总面积的10.06%;低适生区主要分布在山东、河北、河南、陕西和辽宁等省,面积占中国陆地总面积的8.82%。非适生区面积占中国陆地总面积的67.55%(图3)。

2.3 未来气候变化模式下飞扬草的适生区分析

基于未来气候条件下预测飞扬草的潜在适生区,结果显示飞扬草的潜在适生区将进一步扩张。到2050年,在SSP126和SSP585情景下,飞扬草的适生区扩大至全国,仅有少部分地区不适宜飞扬草的生长。在SSP126情景下,西藏自治区(简称西藏)北部、新疆维吾尔自治区(简称新疆)西南部和北部的小部分地区以及甘肃省和青海省的零星地区为飞扬草的非适生区,其他地区均为飞扬草的潜在适生区。低、中和高适生区均在一定程度上往西北移动。低适生区扩张最多,面积占比由原来的8.87%增加到33.54%,其次是高适生区,面积占比由原来的13.64%增加到35.08%(图4-A)。



图3 历史气候条件下飞扬草在中国的潜在适生区

Fig. 3 Potential distribution of *Euphorbia hirta* in China under historical climate

在SSP585情景下,仅新疆和西藏的零星地区为飞扬草的非适生区(图4-B)。适生区面积增加得最多的是中适生区,面积占比由原来的10.06%增加到35.44%。在SSP585情景下,高适生区面积由原来的13.57%增加到30.91%,增加的面积小于SSP126情景下增加的面积(图4-B)。2个排放情景下的低适生区面积增加差别较小。

2.4 MaxEnt模型精确性分析

MaxEnt模型重复运行10次的ROC曲线的AUC平均值为0.89(图5),表明本研究构建的MaxEnt模型的拟合和预测结果较好,对飞扬草的潜在适生区预测结果可靠。

3 讨论

本研究基于目前飞扬草在全球的地理分布数据以及筛选出的关键环境变量,利用MaxEnt模型预测其在历史气候和未来气候条件下的潜在分布区。从预测结果来看,飞扬草的适生区分布受降雨影响最

大,其次是温度。李雪枫等(2017)研究了温度、光照和水分对飞扬草种子的影响,发现飞扬草种子对高温有一定的耐受性,在20~40℃下均有发芽能力,但是发芽率呈先升高后降低的趋势;30℃为种子萌发的最适温度,25℃为幼苗生长的最适温度。本研究中飞扬草对关键环境变量的响应结果显示,最热季节平均气温在25~30℃范围内适合飞扬草生存,最适温度在28℃左右,与李雪枫等(2017)结果较吻合。近年来随着全球气候变暖现象日益严重,各地平均气温不断升高,中国东南沿海地区2021年年平均气温达到20℃以上。本研究预测结果显示,飞扬草的高适生区主要分布在中国热带和亚热带地区,而飞扬草种子萌发的高温耐受能力有利于其在热带地区生长和繁殖(Tanveer et al., 2013; 李雪枫等, 2017)。此外,本研究还发现降雨量也是重要的影响因素之一,李雪枫等(2017)也有类似研究结果,即飞扬草种子萌发和幼苗生长均受到土壤含水量的影响。

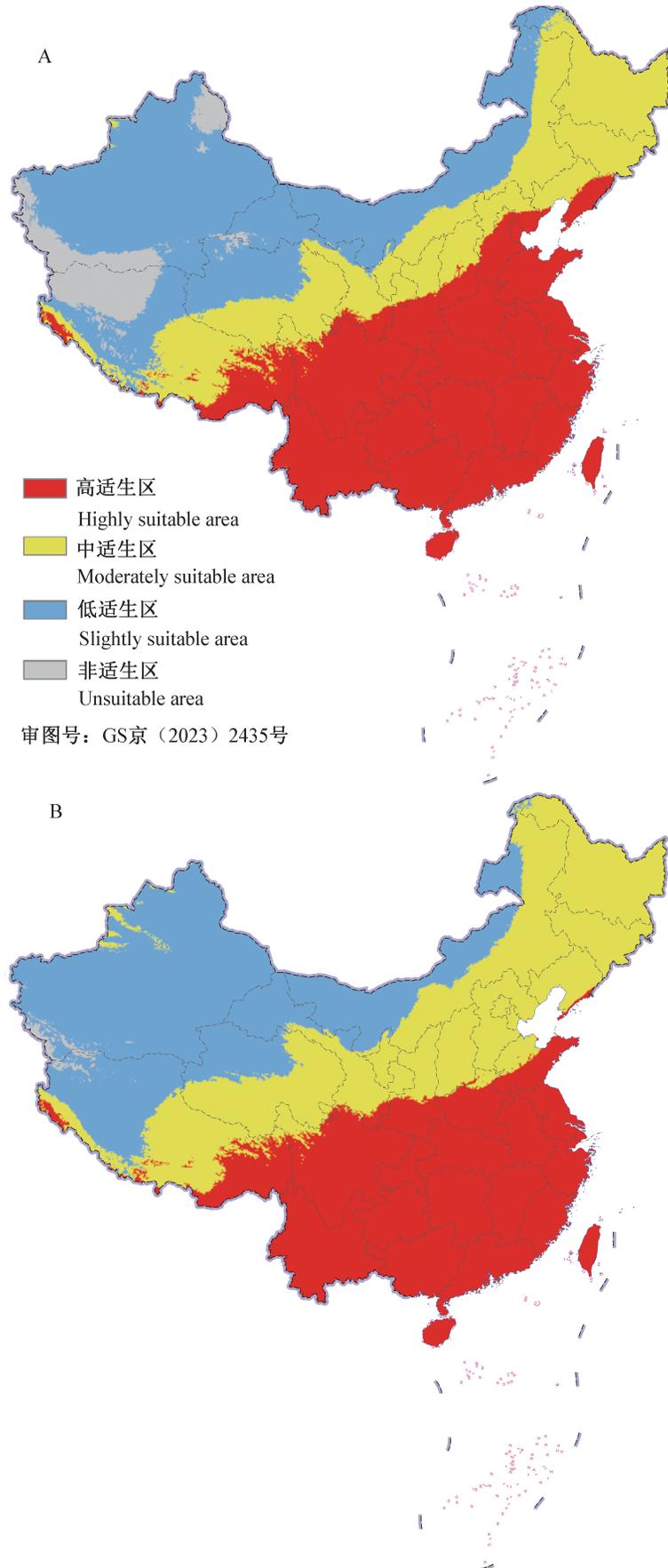


图4 基于未来气候低强迫SSP126(A)和高强迫SSP585(B)情景下飞扬草2050年在中国的潜在适生区
Fig. 4 Potential distribution of *Euphorbia hirta* in China under future climate scenarios SSP126 (A) and SSP585 (B) in 2050

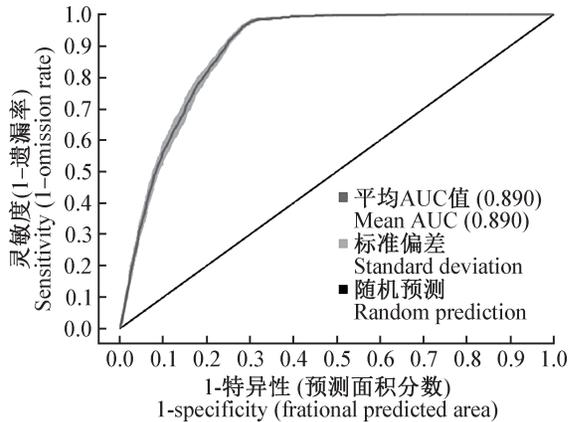


图5 基于MaxEnt模型预测飞扬草潜在地理分布的ROC曲线和AUC值

Fig. 5 ROC curves and AUC value of MaxEnt model for predicting potential distribution of *Euphorbia hirta*

本研究预测结果显示,飞扬草的潜在适生区主要分布于中国华东、华南和华中地区,高适生区的面积占比较高。高平磊(2012)基于MaxEnt模型,使用1960—1990年的平均气候数据,预测得到的飞扬草在中国的潜在适生区面积低于本研究预测结果。预测结果的差异可能是由于本研究使用的是更新的(1970—2000年)气候数据,并且本研究预测的飞扬草适生区域增加了辽宁、河北、河南、山东、山西和陕西等省份,也说明了这10年间飞扬草的适生区范围在扩张。

本研究预测了未来气候条件下飞扬草的潜在适生区,结果表明,2050年中国绝大部分地区均适宜飞扬草生存,说明全球气候变化将促使飞扬草在中国的适生区扩张。在不同强度气候变化背景下,飞扬草各等级的适生区面积存在差异。在低强迫SSP126情景下预测的飞扬草高适生区面积大于高强迫SSP585情景下预测的,而高强迫SSP585情景下预测的飞扬草中适生区面积则大于低强迫SSP126情景下预测的,表明低强迫情景下部分地区飞扬草的适生程度高于高强迫情景下的适生程度。高强迫SSP585情景下全球变暖加剧,极端气候发生的频率更高(向竣文等,2021;赵宗慈等,2021)。

及时且准确的外来入侵生物适生性分析是有效防控外来有害生物跨境和跨地区传播的有效手段之一,可为防控外来入侵生物提供早期预警和决策参考(潘绪斌等,2018)。本研究利用MaxEnt模型预测历史气候和未来气候条件下飞扬草在中国的潜在适生区,结果表明飞扬草在中国的适生区跨度较广,并且未来有进一步扩张的风险。因此,建议相关部门加强监控,防止飞扬草的进一步扩散。

参考文献 (References)

- Fang F, Zhang CX, Huang HJ, Li Y, Chen JC, Yang L, Wei SH. 2013. Potential distribution of Tausch's goatgrass (*Aegilops tauschii*) in both China and the rest of the world as predicted by MaxEnt. *Acta Pratacultural Sinica*, 22(2): 62–70 (in Chinese) [房锋, 张朝贤, 黄红娟, 李燕, 陈景超, 杨龙, 魏守辉. 2013. 基于MaxEnt的麦田恶性杂草节节麦的潜在分布区预测. *草业学报*, 22(2): 62–70]
- Gao PL. 2012. Study on weed ecology for flora, community, risk warning and environmental impact in Shanghai. Master thesis. Shanghai: Shanghai Normal University (in Chinese) [高平磊. 2012. 上海地区杂草生态学研究: 区系、群落、风险预警和环境影响. 硕士学位论文. 上海: 上海师范大学]
- He YZ, Huang WD, Zhao X, Lü P, Wang HH. 2021. Review on the impact of climate change on plant diversity. *Journal of Desert Research*, 41(1): 59–66 (in Chinese) [何远政, 黄文达, 赵昕, 吕朋, 王怀海. 2021. 气候变化对植物多样性的影响研究综述. *中国沙漠*, 41(1): 59–66]
- Hong YC, Yang XP, He Q, Dai XA. 2018. Evaluation of habitat suitability of *Eupatorium* spp. in Sichuan Province based on GIS and MaxEnt model. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 49(5): 759–762 (in Chinese) [洪宇辰, 杨星萍, 贺倩, 戴晓爱. 2018. 基于GIS和MaxEnt模型的川内泽兰属植物生境适宜性评价. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 49(5): 759–762]
- Huang YM, Qin YJ, Zhang Y, Fu WD, Zhang GL, Li ZH, Zhao ZH. 2022. Analysis of the potential geographical distribution of weed *Oxalis latifolia* based on MaxEnt and ArcGIS. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1424–1433 (in Chinese) [黄昱萌, 秦誉嘉, 张岳, 付卫东, 张国良, 李志红, 赵紫华. 2022. 基于MaxEnt和ArcGIS的宽叶酢浆草潜在地理分布分析. *植物保护学报*, 49(5): 1424–1433]
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects.* // Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 59–60
- Kriticos D, Maywald G, Yonow T, Zurcher E, Herrmann N, Sutherst R. 2015. CLIMEX version 4: exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. Canberra: CSIRO, pp. 184
- Kumar S, Malhotra R, Kumar D. 2010. *Euphorbia hirta*: its chemistry, traditional and medicinal uses, and pharmacological activities. *Pharmacognosy Reviews*, 4(7): 58–61
- Li A, Li LT, Gao MM, Chen X, Lu T, Liu SS. 2020. Distribution prediction of invasive species *Flaveria bidentis* in China: based on MaxEnt model and climate change scenario. *Journal of Agriculture*, 10(1): 60–67, 76 (in Chinese) [李安, 李良涛, 高萌萌, 陈曦, 卢彤, 刘帅帅. 2020. 基于MaxEnt模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测. *农学学报*, 10(1): 60–67, 76]
- Li XF, Zhou GY, Wang J. 2017. Effect of temperature, light length and water condition on *Euphorbia hirta* germination and seedling growth. *Pratacultural Science*, 34(7): 1452–1458 (in Chinese) [李雪枫, 周高羽, 王坚. 2017. 温度、光照和水分对飞扬草种子萌发

- 和幼苗生长的影响. 草业科学, 34(7): 1452-1458]
- Mekam PN, Martini S, Nguefack J, Tagliazucchi D, Stefani E. 2019. Phenolic compounds profile of water and ethanol extracts of *Euphorbia hirta* L. leaves showing antioxidant and antifungal properties. South African Journal of Botany, 127: 319-332
- Pan MX, Zhu SR, Zhang Z. 2022. Prediction of suitable habitat of invasive plant of *Solidago canadensis* L. in China. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition), 25(1): 90-96 (in Chinese) [潘铭心, 朱思睿, 张震. 2022. 外来入侵植物加拿大一枝黄花在中国的适生区预测. 西安文理学院学报(自然科学版), 25(1): 90-96]
- 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]
- Perera SD, Jayawardena UA, Jayasinghe CD. 2018. Potential use of *Euphorbia hirta* for dengue: a systematic review of scientific evidence. Journal of Tropical Medicine, 2018: 2048530
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 31(2): 161-175
- Qiu XP, Zhang Y, Zhang YM. 2022. Effects of global climate change on the potential suitable habitats of *Salvia miltiorrhiza* Bunge. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 29(9): 1-10 (in Chinese) [邱晓萍, 张懿, 张咏梅. 2022. 全球气候变化对丹参潜在适宜区分布影响. 中国中医药信息杂志, 29(9): 1-10]
- Shu JW, Shi K, Yang GZ. 2018. Chemical constituents from *Euphorbia hirta* L. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 52(1): 48-52, 57 (in Chinese) [舒佳为, 石宽, 杨光忠. 2018. 飞扬草化学成分的研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 52(1): 48-52, 57]
- Sikder IU, Mal-Sarkar S, Mal TK. 2006. Knowledge-based risk assessment under uncertainty for species invasion. Risk Analysis, 26(1): 239-252
- Tanveer A, Khaliq A, Javaid MM, Chaudhry MN, Awan I. 2013. Implications of weeds of genus *Euphorbia* for crop production: a review. Planta Daninha, 31(3): 723-731
- Wang YS, Wang ZH, Xing HF, Li JW, Sun S. 2019. Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucreta* Baill in China based on MaxEnt. Chinese Journal of Ecology, 38(4): 1230-1237 (in Chinese) [王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 2019. 基于MaxEnt模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学杂志, 38(4): 1230-1237]
- Xian JC, Lin WH. 2014. Study on extraction of total polyphenol in *Euphorbia hirta* Linn and its free radical inhibition rate to hydroxy. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 29(1): 131-134 (in Chinese) [贤景春, 林婉华. 2014. 飞扬草总多酚提取及其对羟基自由基的抑制作用. 云南农业大学学报(自然科学), 29(1): 131-134]
- Xiang JW, Zhang LP, Deng Y, She DX, Zhang Q. 2021. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models. Engineering Journal of Wuhan University, 54(1): 46-57, 81 (in Chinese) [向竣文, 张利平, 邓瑶, 余敦先, 张琴. 2021. 基于CMIP6的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估. 武汉大学学报(工学版), 54(1): 46-57, 81]
- Xu HG, Qiang S. 2018. Alien invasive species in China: Volume 1. Beijing: Science Press, pp. 329-330 (in Chinese) [徐海根, 强胜. 2018. 中国外来入侵生物: 上册. 北京: 科学出版社, pp. 329-330]
- Xu HG, Qiang S, Han ZM, Guo JY, Huang ZG, Sun HY, He SP, Ding H, Wu HR, Wan FH. 2004. The distribution and introduction pathway of alien invasive species in China. Chinese Biodiversity, 12(6): 626-638 (in Chinese) [徐海根, 强胜, 韩正敏, 郭建英, 黄宗国, 孙红英, 何舜平, 丁晖, 吴海荣, 万方浩. 2004. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析. 生物多样性, 12(6): 626-638]
- Yan HY, Feng L, Zhao YF, Feng L, Wu D, Zhu CP. 2020. Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. Global Ecology and Conservation, 21: e00856
- Yue MF, Feng L, Cui Y, Zhang C, Tian XS. 2016. Prediction of the potential distribution and suitability analysis of the invasive weed, *Bidens alba* (L.) DC. Journal of Biosafety, 25(3): 222-228 (in Chinese) [岳茂峰, 冯莉, 崔焯, 张纯, 田兴山. 2016. 基于MaxEnt模型的入侵植物白花鬼针草的分布预测及适生性分析. 生物安全学报, 25(3): 222-228]
- Zhang Y. 2011. Prediction of potential suitable distribution of Compositae invasive species from North America with niche models based on GIS. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [张颖. 2011. 基于GIS的生态位模型预测源自北美的菊科入侵物种的潜在适生区. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- 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]
- Zhang Y, Tang JS, Ren G, Zhao KX, Wang XF. 2021. Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on MaxEnt model. Scientific Reports, 11(1): 16545
- Zhao Q, Chen C, Fan SY, Zhang LJ, Zhang HF. 2022. Prediction of potential distribution of predatory stink bug *Eocanthecona furcellata* based on MaxEnt model. Journal of Plant Protection, 49(4): 1210-1216 (in Chinese) [赵清, 陈超, 范诗羽, 张利军, 张虎芳. 2022. 基于MaxEnt模型预测叉角厉蝽在全球的潜在地理分布. 植物保护学报, 49(4): 1210-1216]
- Zhao ZC, Luo Y, Huang JB. 2021. Global warming and abrupt climate change. Climate Change Research, 17(1): 114-120 (in Chinese) [赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 2021. 全球变暖与气候突变. 气候变化研究进展, 17(1): 114-120]