

基于MaxEnt模型对入侵物种藿香蓟的中国潜在适生区预测研究

许威威¹, 安鑫¹, 孙成龙², 陈聪¹

¹华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

²青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.), 是我国生物入侵恶意入侵植物之一, 对被入侵区域的生物多样性构成严重威胁。为了有效防控藿香蓟, 采用最大熵模型(MaxEnt)和ArcGIS软件对藿香蓟当前以及2030s、2050s时期, SSP126、SSP245气候模式下在中国的潜在适生区和影响因素进行预测。结果显示: 当前适生区预测AUC值为0.929, 模型预测结果理想、适生区分布主要受降水和温度的影响。藿香蓟入侵物种的适生区分布范围很广, 主要集中在我国华东地区、华中地区、西南地区的南部以及华南地区和台湾省, 面积为 $6.268 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。随时间推移, 在2030s时期, SSP126、SSP245气候模式下的适生区面积分别为 $6.485 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $6.465 \times 10^5 \text{ km}^2$; 2050s时期, SSP126、SSP245气候模式下的适生区面积分别为 $6.472 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $6.871 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。总体来说, 未来气候变化下, 藿香蓟的适生区呈现出不断扩张的趋势, 建议相关部门基于其潜在适生区的变化趋势制定相应的分级管理策略, 以防止进一步扩散。

关键词

入侵植物, 藿香蓟, MaxEnt模型, 气候变化

Prediction of Potential Suitable Growth Areas for Invasive Species of *Ageratum conyzoides* L. in China Based on the MaxEnt Model

Weiwei Xu¹, Xin An¹, Chenglong Sun², Cong Chen¹

¹College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

²College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao Shandong

文章引用: 许威威, 安鑫, 孙成龙, 陈聪. 基于 MaxEnt 模型对入侵物种藿香蓟的中国潜在适生区预测研究[J]. 农业科学, 2025, 15(5): 658-670. DOI: 10.12677/hjas.2025.155081

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Huoxiangji (scientific name: *Ageratum conyzoides* L.) is one of the invasive alien plant species in China, posing a severe threat to biodiversity in invaded regions. To effectively control *A. conyzoides*, the Maximum Entropy Model (MaxEnt) and ArcGIS software were employed to predict its current and future (2030s, 2050s) potentially suitable growth areas and influencing factors under SSP126 and SSP245 climate scenarios in China. The results showed that the current predicted suitable growth area achieved an AUC value of 0.929, indicating excellent model performance. The distribution was primarily influenced by precipitation and temperature. At present, the suitable growth areas of *A. conyzoides* invasive species are widely distributed, mainly concentrated in southern East China, South China, southern Central China, southern Southwest China, and Taiwan Province, covering an area of $6.268 \times 10^5 \text{ km}^2$. By the 2030s, the suitable growth areas under SSP126 and SSP245 scenarios are projected to expand to $6.485 \times 10^5 \text{ km}^2$ and $6.465 \times 10^5 \text{ km}^2$, respectively. By the 2050s, the areas under SSP126 and SSP245 scenarios are predicted to reach $6.472 \times 10^5 \text{ km}^2$ and $6.871 \times 10^5 \text{ km}^2$, respectively. Overall, under future climate change, the suitable growth areas of *A. conyzoides* are projected to expand continuously. It is recommended that relevant authorities develop tiered management strategies based on the predicted shifts in its potential distribution to prevent further spread.

Keywords

Invasive Plants, *Ageratum conyzoides* L., MaxEnt Model, Climate Change

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.), 原产于中美洲及南美洲热带地区[1], 为菊科藿香蓟属(*Ageratum*)一年生草本植物[2]。20 世纪初作为观赏植物或药用植物引入华南地区[3], 后因繁殖力强、适应性广[4], 逐渐逸生为入侵物种。以种子繁殖为主[5], 单株年产量可达数千粒, 种子细小且具冠毛[6], 可通过风力、动物及人类活动远距离传播[7]。耐贫瘠、抗逆性强, 能在撂荒地、农田、路边等多种生境快速定殖, 形成单一优势群落[8]。藿香蓟作为入侵物种, 通过多维机制对生态系统造成深远影响。其生态位宽度显著高于本地物种[9] (光照、土壤氮和海拔梯度生态位宽度分别达 0.82、0.78 和 0.69), 光合速率[10]比本地植物高 18%~25%, 快速抢占资源并挤压本土植物生存空间。同时, 根系分泌的苯并噁啉类化感物质[11] (如 ageratochromene)可抑制周边植物种子萌发, 导致本地草本发芽率降低 52%~78%, 入侵 5 年后群落物种数从 28 种/m²锐减至 9 种[12], Simpson 多样性指数[13]从 0.82 降至 0.47。入侵区域土壤微生物群落严重失衡, 固氮菌和丛枝菌根真菌丰度分别下降 63%和 64%, 而病原真菌增加 182%, 并通过超富集镉的特性 (地上部 Cd 含量 77.01 mg/kg)干扰重金属循环, 使表层土壤镉含量上升 42% [14]。藿香蓟已在中国华南 (广东、广西)、华东 (福建、浙江)及西南 (云南)等地广泛扩散[15], 常见于低海拔湿润区域[16]。随气候变化及人为干扰加剧, 逐步向长江流域及华北暖温带地区扩散[17], 威胁农业生态系统与自然植被。

学者经过实地考察和实验研究[18], 分析了藿香蓟的生物学特征, 藿香蓟的生物学特征 (如浅根系、强分枝、高繁殖力、化感作用)使其在资源获取、环境适应和种间竞争中占据优势。外来入侵生物能够成功入侵, 不仅取决于它们的入侵性, 也受到环境本身众多因素的影响[19]。气候和地形对于一个物种的生境可入

侵性有重大影响[20]。气候决定物种的“生理可行性”，地形塑造“扩散可能性”，二者共同影响入侵潜力。在全球性环境变化中，气候变化最为敏感，往往由人为因素和环境变化共同导致[21]，气候对于植物分布的影响主要集中在三个方面：1) 温度适应性：物种在原产地的温度适应能力决定了其在新环境中的存活可能。2) 降水与湿度：干旱或高湿环境可能成为筛选机制。如仙人掌在澳大利亚干旱区的入侵成功[22]，得益于其水分储存能力与当地降水模式的匹配。3) 气候波动与极端事件：某些入侵物种(如葛藤)能利用频繁的干扰(如飓风、火灾)快速占据裸露生境[23]，而本地物种恢复较慢。地形的作用同样非常重要，首先地形是物种的扩散屏障与通道，山脉(如安第斯山脉阻隔物种东西迁移[24])、河流或海洋可限制扩散；平坦地形(如北美大平原[25])则促进入侵物种蔓延。其次地形通过影响局部气候(如山谷的逆温层、沿海雾带)创造适宜微生境[26]。例如，新西兰的入侵针叶树在某些山谷中因湿度较高而存活[27]。本研究选取了 Worldclim 上的 19 个气候因子和中国海拔的数据作为主要的参考依据，作为藿香蓟入侵的关键驱动因子分析依据。

近几年预测物种的适生区分布常用最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt) [28]，该模型是基于最大熵理论建立的密度估计与物种分布预测模型[29]，它可以根据物种分布记录进行建模，分析环境因子在物种分布中所起的作用。与其他模型相比 MaxEnt 更具优势，例如 CLIMEX 只能对点进行预测，不能预测面积，缺乏直观性[30]；广义线性模型(GLM)需预先假设变量间的线性或多项式关系，对复杂非线性关系拟合能力弱[31]；生态位因子分析(ENFA)假设物种占据非典型生态位，对广泛分布物种不适用[32]；BIOCLIM 假设物种生态位保守，忽略变量交互[33]。而 MaxEnt 预测效果更好，精度更高[34]；近年来，已有学者利用 MaxEnt 模型对入侵植物加拿大一枝黄花[35]、飞机草[36]、刺萼龙葵[37]等与气候环境因子之间的关系进行了研究，并对其在中国的潜在适生区进行预测，为入侵物种的防治提供了依据。本研究采用 MaxEnt 模型预测藿香蓟在当前和未来不同气候情景下的潜在适宜分布区域，并根据既定标准划分适生等级，从而建立该入侵物种的早期预警机制，为防控工作提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料

2.1.1. 分布点数据

本研究通过多源数据整合的方式系统采集藿香蓟的地理分布数据，具体实施路径如下：1) 基于中国数字植物标本馆(CVH, <https://www.cvh.ac.cn/>)的数字化资源，检索并提取藿香蓟标本记录中的地理坐标信息，优先筛选附有经纬度坐标的记录，对于仅标注地理位置而无坐标的数据，则利用百度地图坐标拾取系统(<https://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/index.html>)进行精确定位并获取坐标信息；2) 查阅近 5 年有关的文献以及近 3 年相关的新闻报道[38]-[41]，通过百度地图坐标拾取系统(<https://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/index.html>)进行坐标拾取及校准；3) 调取全球生物多样性信息平台(GBIF, <https://www.worldclim.org/>)中收录的中国境内藿香蓟物种分布数据。所有数据经 ArcGIS 10.8 软件进行空间去重和精度验证，最终构建包含经纬度坐标、数据来源、采集时间等属性的完整分布数据库。之后对分布点进行经纬度十进制处理，共得到 569 个藿香蓟的经纬度分布点位，为避免结果过度拟合产生误差，采用 ENMTools 对原始分布数据进行筛选，最终保留藿香蓟有效分布经纬度坐标 152 条，将分布点数据按照物种名、经纬度的顺序录入 Excel 表格中，保存时转化为.csv 格式的文件。

2.1.2. 环境变量数据

本研究采用的气候数据涉及降水和温度等相关的 19 个生物气候因素，地形数据是海拔(表 1)。所有气候数据均来源于 WorldClim 全球气候数据库(<https://www.worldclim.org/>)。其中气候数据分为当前和未来(2030s、2050s)，空间分辨率为 5 min，选取 SSP126、SSP245 两种气候模式，SSP126 (SSP1-RCP2.6)和 SSP245 (SSP2-RCP4.5)是 CMIP6 (第六次国际耦合模式比较计划)中两种典型的气候变化情景，分别代表

低碳排和中碳排路径, SSP126 和 SSP245 是气候研究中常用的两种未来情景(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs), 它们结合了社会经济假设与温室气体排放路径, 用于模拟全球气候变化及评估其潜在影响[42]。当前中国路径更符合 SSP245, 因煤炭依赖、区域发展差异和技术商业化节奏, 在全球碳中和背景下, 未来政策与技术发展可能推动其向 SSP126 方向调整[43]。地形数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。以上 20 个图层统一边界、坐标系及分辨率, 并转换成 ASCII 格式的文件。

Table 1. Environmental variables

表 1. 环境变量

编号	环境变量	英文描述
bio1	年平均气温/℃	Annual mean temperature
bio2	昼夜温差月均值/℃	Mean diurnal range
bio3	昼夜温差与年温差比值	Isothermality
bio4	温度季节性变化标准差	Standard deviation of seasonal variation of temperature
bio5	最热月份最高温度/℃	Maximum temperature of warmest month
bio6	最冷月份最低温度/℃	Minimum temperature of coldest month
bio7	年均温变化范围/℃	Temperature annual range
bio8	最湿季度平均温度/℃	Mean temperature of wettest quarter
bio9	最干季度平均温度/℃	Mean temperature of driest quarter
bio10	最暖季度平均温度/℃	Mean temperature of warmest quarter
bio11	最冷季度平均温度/℃	Mean temperature of coldest quarter
bio12	年降水量/mm	Annual precipitation
bio13	最湿月份降水量/mm	Precipitation of wettest period
bio14	最干月份降水量/mm	Precipitation of driest period
bio15	降水量变化方差	Precipitation of wettest quarter
bio16	最湿季度降水量/mm	Precipitation of driest quarter
bio17	最干季度降水量/mm	Precipitation seasonality
bio18	最暖季度降水量/mm	Precipitation of warmest quarter
bio19	最冷季度降水量/mm	Precipitation of coldest quarter
elev	海拔	Altitude

2.2. 研究对象

2.2.1. MaxEnt 模型运行

在 MaxEnt 软件中依次加载分布点文件(.csv)和环境变量文件(.asc), 勾选受试者工作特征曲线(ROC 曲线), 用于评估模型预测精度; 生成适生区概率分布图(取值范围 0~1); 用刀切法(Jackknife)分析各环境变量对模型的贡献率, 将分布点数据按 75%训练集(模型构建)和 25%测试集(模型验证)自动随机划分, 分别用于适生区模型构建和精度检验, 其余参数保持软件默认设置。为降低模型预测的随机性和模拟结果的不确定性, 设置 10 次重复运算, 通过多次随机划分数据降低模型随机性, 结果取平均值; 保持其他参数为软件默认(如正则化乘数、最大迭代次数等)(图 1), 使用 R 程序包“ENMeval”对参数进行了优化, 该方法调整 MaxEnt 模型正则化乘数 RM 和特征组合 FC 参数, 用 MaxEnt 模型修正的 AICc 来评价模型与数据的拟合程度。

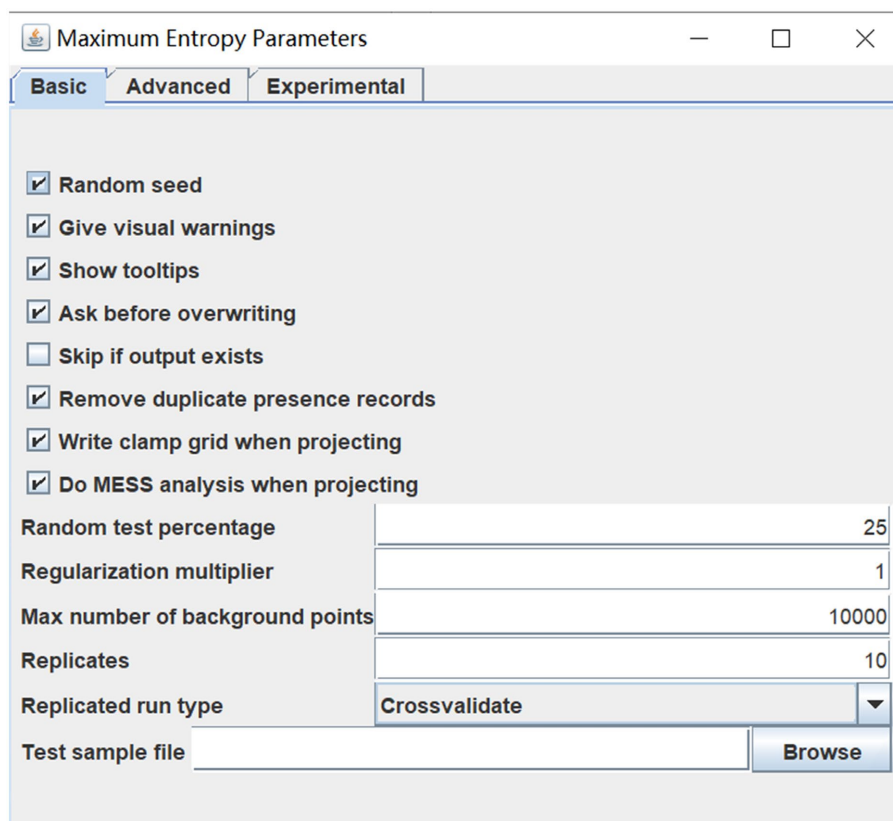


Figure 1. MaxEnt run settings

图 1. MaxEnt 运行设置

2.2.2. 模型评价

本研究采用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic curve, ROC curve)及其曲线下面积(Area Under the Curve, AUC)作为二分类模型的核心评价指标[44]。ROC 曲线通过构建二维坐标系直观表征模型分类效能: 横轴表征假阳性率(False Positive Rate (FPR), 即 1-特异性), 纵轴表征真阳性率(True Positive Rate (TPR), 即敏感性), 通过系统遍历不同分类阈值生成连续轨迹曲线。AUC 值作为量化指标, 反映 ROC 曲线与横轴围成的几何面积, 其理论区间为 0.5 (随机判别)至 1 (完美分类), 该指标具有阈值无关特性, 能综合评价模型在全体分类阈值下的判别能力[45]。研究表明, AUC 值越趋近于 1, 表明模型具有更强的正负类样本区分能力, 当 $AUC > 0.9$ 时通常认为模型具有卓越的分类性能。ROC-AUC 联合分析体系因其对类别不平衡问题的鲁棒性, 已成为机器学习领域评估模型泛化能力的标准[31]。

2.2.3. 环境变量分析

对环境变量的筛选分为两个步骤, 首先在 MaxEnt 程序中输入物种分布数据和 20 个环境变量并运行, 得到每个环境变量对物种分布的贡献率, 去除贡献率小于 0.5% 的环境变量; 第二步用 IBM SPSS 对剩余的贡献率大于等于 0.5% 的环境变量进行相关性分析, 去除相关性较大($|r| > 0.8$)的环境变量, 得到影响藿香蓍的主要环境变量, 而后再进行相关性分析和运行 MaxEnt (图 2)。

2.2.4. 适生区划分

将模型生成的.asc 文件导入 ArcGIS, 采用自然断点法(Jenks)对藿香蓍适生区进行重分类, 划分四个等级: 非适生区($0 < P < 0.1$)、低适生区($0.1 \leq P < 0.3$)、中适生区($0.3 \leq P < 0.6$)和高适生区($P \geq 0.6$) [46]。

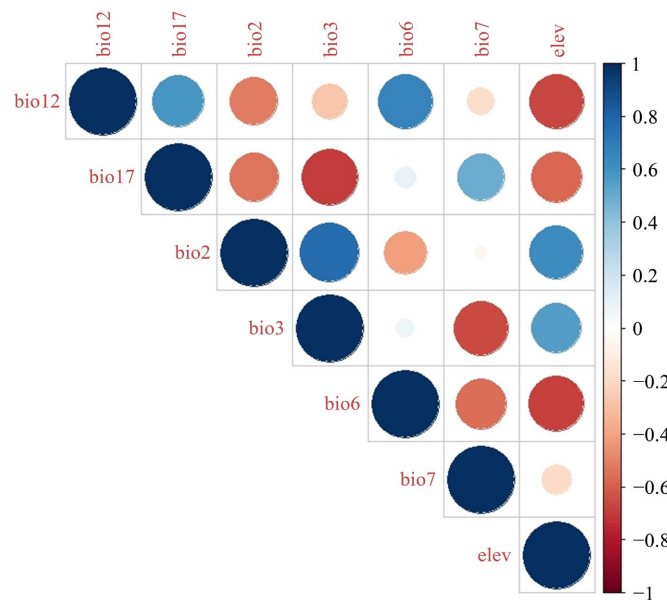


Figure 2. Correlation analysis of major environmental variables
图 2. 主要环境变量相关性分析

3. 结果和分析

3.1. MaxEnt 模型运行评价

对 MaxEnt 模型运行结果进行检验, 得到当前时期 AUC 平均值分别为 0.929 (图 3)。参照模型精度评价标准, 具有较高的准确性; 根据运行结果显示, 影响藁香薷潜在分布的环境变量通过刀切法(Jackknife)进行研究分析(图 4), 得到影响藁香薷分布的主导 4 个环境变量因素(图 5), 包括 bio17 (最干季度降水量)、bio12 (年降水量)、bio7 (年均温变化范围), bio6 (最冷月份最低温度)根据主导环境变量的响应曲线, 得知藁香薷最适生长温度为 18℃~25℃, 年降水量在 1000~1500 mm 的范围内最适宜藁香薷的生长发育。

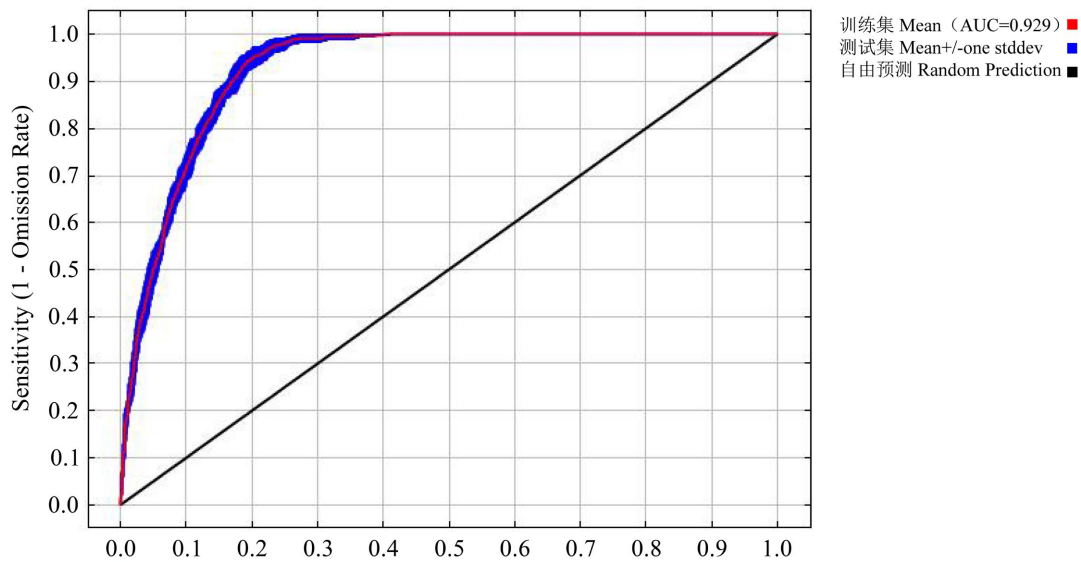


Figure 3. Receiver operating characteristic curve (ROC curve)
图 3. 受试者工作特征曲线(ROC 曲线)

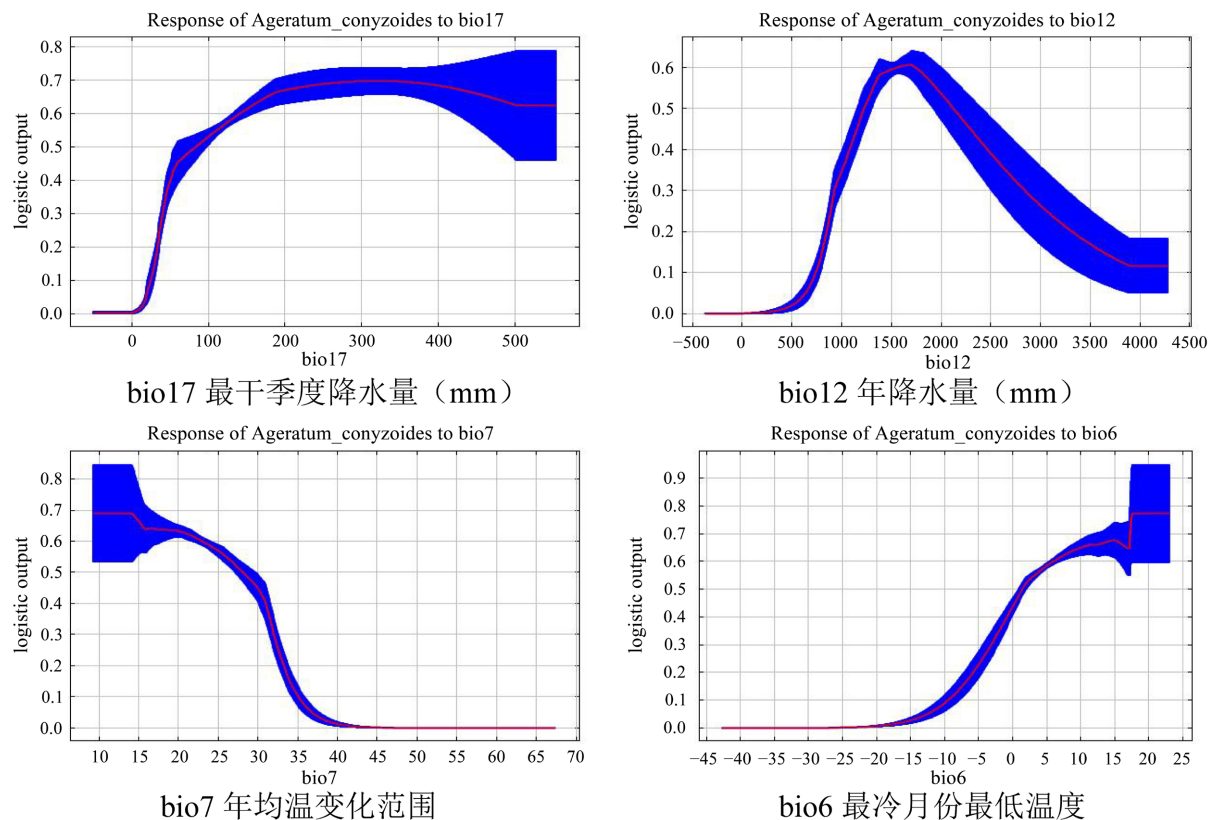


Figure 4. Response curves of the main environmental variables affecting *A. conyzoides*

图 4. 影响藿香蓟的主要环境变量响应曲线

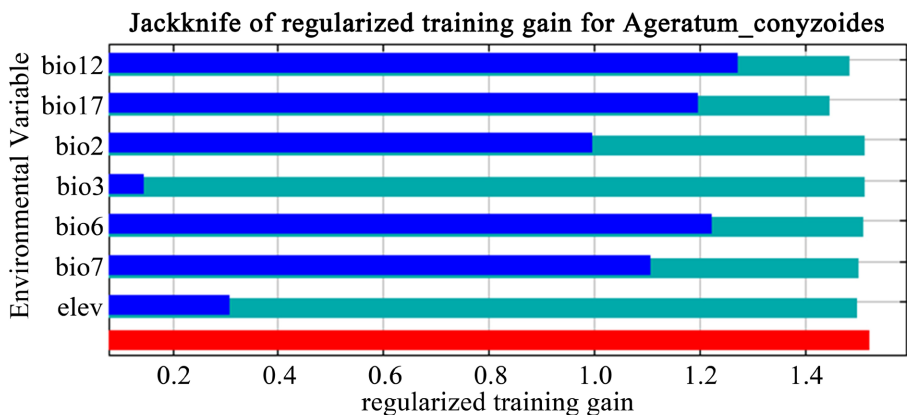


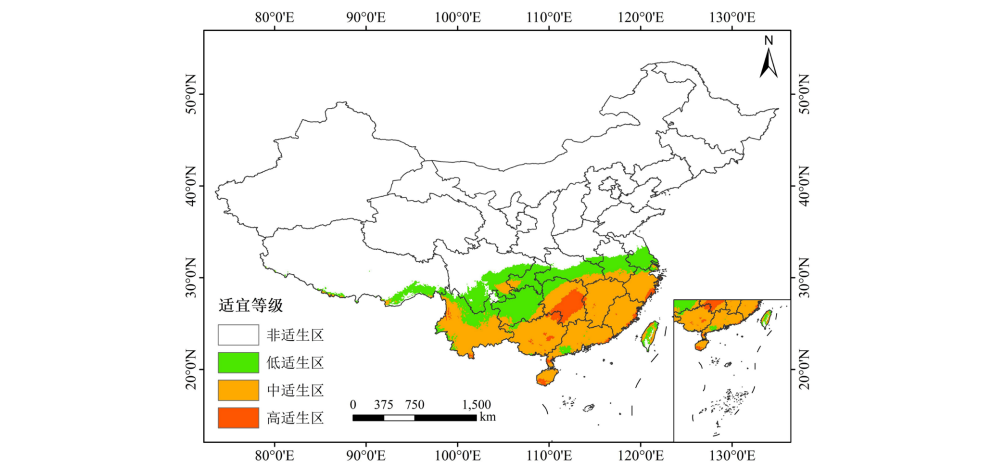
Figure 5. Jackknife method to test the effect of each environmental variable

图 5. 刀切法检验各环境变量的影响

3.2. 当前气候情境下适生区分布

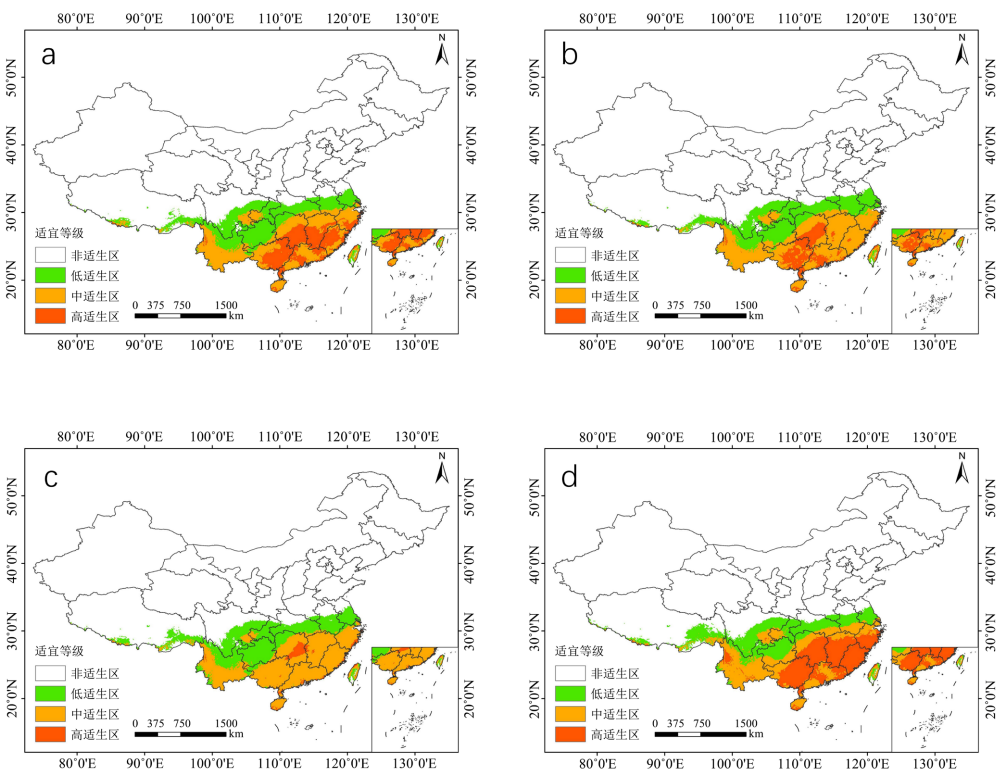
藿香蓟的适生区分布在 $18^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $100\sim 126^{\circ}\text{E}$ 之间, 地理位置较为集中(图 6)。高适生区主要集中在湖南省南部、广西省中部、海南省南部、台湾省西北部以及我国的东南沿海地区, 面积为 $4.0334 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区和低适生区多分布于北纬 30° 以南包括我国的大部分南方省份, 面积分别为 $3.483 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $2.381 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

3.3. 未来气候情境下适生区预测



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 6. Current distribution map of suitable growth areas for *A. conyzoide*
图 6. 当前藿香蓟的适生区分布图

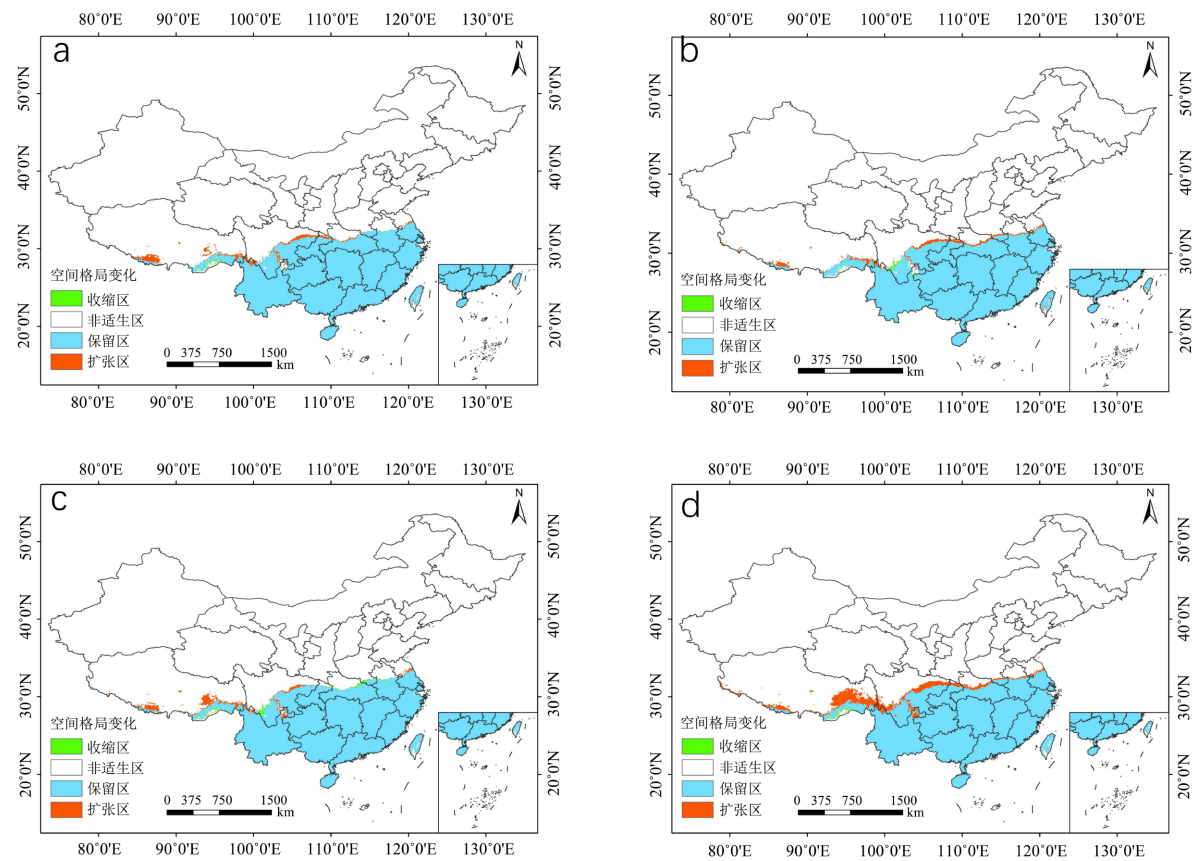


注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 7. Distribution maps of suitable growth areas for *A. conyzoide* under different climate models in different periods in the future: ((a) (b)) Distribution maps of suitable growth areas for SSP126 and SSP245 climate models in the 2030s period, respectively; ((c) (d)) Distribution maps of suitable growth areas for SSP126 and SSP245 climate models in the 2050s period, respectively
图 7. 未来不同时期不同气候模式下藿香蓟的适生区分布图：((a) (b)) 2030s 时期 SSP126、SSP245 气候模式适生区分布图；((c) (d)) 2050s 时期 SSP126、SSP245 气候模式适生区分布图

本研究通过 MaxEnt 模型对不同未来气候条件下外来入侵植物藨香薷潜在适应生境范围进行了预测，未来 2030s 时期，在 SSP126 气候情景下，藨香薷的适生区的总面积相对于当前增加了 3.47%，而高适生区的变化异常明显，从原来的 $4.0334 \times 10^4 \text{ km}^2$ 变化到了 $1.442 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，增加了 257.4%，中适生区为 -27.9%有所减少，低适生区为 6.3%。通过数据可以看出，中适生区逐渐向高适生区过渡，而非适生区转变为了适生区，意味着藨香薷对环境的适应能力变强了，也可能是外来环境改变有益于藨香薷的生存。在 SSP245 气候情景下，藨香薷的高适生区面积增加了 120.1%，中适生区减少了 12.2%，低适生区增加了 5.8%。2050s 时期，在 SSP126 气候情景下，藨香薷的适生区的总面积相对于当前增加了 2.54%，与之前相反的是低适生区的变化相对明显，面积增加了 17.3%。在 SSP245 气候情景下，高适生区发生了巨大变化，面积增加了 434.17%，而中、低适生区则分别缩减了 31.82%和 1.64%(图 7)。综上所述，未来气候条件下，藨香薷适应生境范围呈现出显著扩大趋势，且面积持续增加，非适生区逐渐向适生区转化，其中高适生区面积变化尤为明显。这些变化趋势表明，针对藨香薷的防控工作仍需保持高度警惕，并作出相应的响应策略。

3.4. 藨香薷潜在适生区的变化特征



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 8. Distribution maps of the suitable growth area changes of *A. conyzoides* under different climate models in different periods in the future: ((a) (b)) Distribution maps of the suitable growth area changes of SSP126 and SSP245 climate models in the 2030s period, respectively; ((c) (d)) Distribution maps of climate model suitable area changes for SSP126 and SSP245 in the 2050s period

图 8. 未来不同时期不同气候模式下藨香薷的适生区变化分布图：((a) (b)) 2030s 时期 SSP126、SSP245 气候模式适生区变化分布图；((c) (d)) 2050s 时期 SSP126、SSP245 气候模式适生区变化分布图

Table 2. Changes in the distribution pattern of *A. conyzoides* under different climate scenarios
表 2. 不同气候情景下藿香蓟分布格局变化

气候时期	气候模式	面积(km ²)			面积比例(%)		
		保留区	收缩区	扩张区	保留区	收缩区	扩张区
2030s	SSP126	622,919.5	2300.5	25,628	20.92	0.078	0.86
	SSP245	622,339	2881	24,144.5	20.9	0.097	0.81
2050s	SSP126	618,622.5	6557.5	24,058.5	20.76	0.22	0.81
	SSP245	623,005.5	2214.5	64,134.5	20.92	0.074	2.15

由图 8 和表 2 可知,在未来 2030s、2050s 时期下,SSP126、SSP245 气候模式下,藿香蓟的潜在适生区呈现总体扩张的趋势,不同时期收缩区或扩张区的面积有较大变化。未来 2030s 与 2050s 时期,SSP126 气候模式下,保留区面积略有减少,占全国总面积的比例分别为 20.92%、20.76%,变化明显的是在 SSP126 气候模式下 2050s 时期相对上者收缩区面积显著增加,分别为 0.078%和 0.22%。在 SSP245 气候模式下,与 2030s 时期相比,2050s 时期的扩张区增加明显,分别为 0.81%和 2.15%。从图中可以看出保留区占适生区的大部分,而收缩区和扩张区主要集中在北部和西北部,扩张区和收缩区的分布面积受气候模式的影响较大。

4. 讨论与结论

4.1. 讨论

1) MaxEnt 模型是目前使用最广泛的生态位模型之一,被广泛应用于生物地理学和保护生物学领域的研究[47],过去很多研究采用 MaxEnt 模型的默认参数来构建模型,但由于模型过度拟合导致转移能力较低,对物种分布预测结果造成偏差。本次研究使用 R 程序包“ENMeval”对参数进行了优化,该方法调整 MaxEnt 模型正则化乘数 RM 和特征组合 FC 参数,用 MaxEnt 模型修正的 AICc 来评价模型与数据的拟合程度,优先考虑 AIC 值最小的模型[48]。优化后的模型参数相较于默认设置能够提升模型的转移能力和预测精度,从而更准确地预测物种的潜在分布范围。本研究采用 R 程序包“ENMeval”和 MaxEnt 模型联合实现模型校准和选择,最终选择 FC = LQP、RM = 1 为模型的参数进行建模。经参数优化后模拟得到受试者工作特征曲线下面积 AUC 值为 0.929,表明模型预测能力较好。

2) 为探究不同环境因子对预测结果的影响程度,本研究采用刀切法(Jackknife)对影响物种分布的主要环境变量进行重要性(贡献率)评估。分析结果显示,在影响藿香蓟适生区分布的环境因子中,气候因素中温度和降水具有决定性作用,而地形参数的影响相对有限。研究表明,藿香蓟的生长受温度的影响,其生长环境具有显著的热带和亚热带适应性特征,藿香蓟最适生长温度为 18℃~25℃,其对极端高温敏感,夏季持续 35℃以上会导致植株生长不良。年降水量也是制约藿香蓟生长的重要环境因子,在年降水量 1000~1500 mm 的范围内最适宜藿香蓟的生长发育,未来气候条件下的关键影响因素与当前气候条件下的关键影响因素相似。

3) MaxEnt 模型的预测结果表明,入侵物种藿香蓟的适生区分布很广,主要集中在我国华东地区、华中地区、西南地区的南部以及华南地区和台湾省,值得注意的是,这些分布区域并非一成不变,而是可能随时间迁移而发生变化。在不同的气候模式下,藿香蓟的中度及高度适生区呈现出显著的扩张趋势,不仅面积日益增大,而且正向周边区域扩散,导致低适生区范围逐渐缩小,部分非适生区亦有转变为适生区的迹象,整体呈现出向我国北部及西北部推进的趋势。非本地物种因人为或自然因素进入新环境后,

通过竞争、捕食、寄生或改变生境等方式对当地生态、经济和社会造成严重威胁。入侵物种藿香蓟分布范围广且传播距离远,在中国尚未达到其潜在分布极限,扩散风险持续存在。因此,对于已发生入侵的区域,应实施科学有效的防控策略,以防止其向周边地区蔓延。对于尚未遭受入侵但具备潜在适生条件的区域,则需加强监测与预警,确保一旦发现入侵迹象便能迅速采取行动。而对于目前相对安全的区域,亦需保持高度警觉,制定并完善应急预案。有研究显示,在藿香蓟入侵初期采取管理措施往往能达到最佳效果[49]。相关部门应综合适生区分布和气候变化预测,重点关注已发生或可能遭受入侵的区域,从而进行有效防护。具体藿香蓟的防控要点可分为四个阶段,预防、灭除、调控、长期管理[50],应注意要综合应用多种措施,避免依赖单一方法(避免产生抗药性);化学防控需遵循当地法规,减少环境污染;生物防治需严格评估,防止引入二次入侵物种。通过以上措施,可有效控制藿香蓟的入侵扩散,同时兼顾生态保护与资源利用。

4.2. 结论

本研究采用优化的 MaxEnt 模型模拟当前、未来不同气候情景下藿香蓟在中国的分布情况,得出以下主要结论:藿香蓟入侵物种的适生区分布范围很广,主要集中在我国华东地区、华中地区、西南地区的南部以及华南地区和台湾省,面积为 $6.268 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。随时间推移,在 2030s 时期,SSP126、SSP245 气候模式下的适生区面积分别为 $6.485 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $6.465 \times 10^5 \text{ km}^2$;2050s 时期,SSP126、SSP245 气候模式下的适生区面积分别为 $6.472 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $6.871 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。集中分布在华东地区南部、华南地区、华中地区南部、西南地区南部以及台湾省;bio17(最干季度降水量)、bio12(年降水量)、bio7(年均温变化范围)、bio6(最冷月份最低温度)是影响其生长最重要的环境因子。当前至未来 2 个时期(2030s、2050s)在 SSP126、SSP245 气候模式下,藿香蓟适生区整体呈现扩张趋势,适生区的面积有较程度的变化。本研究为藿香蓟的早期预警和分级防控提供了科学依据,但仍存在一定的局限性:仅聚焦气候与地形因子,未纳入人类活动(如农业扩张、交通网络)及土壤类型等变量,可能低估实际扩散潜力。未来研究可结合土地利用数据、种群扩散模型及遥感动态监测,提升预测精度;同时,需重点关注高适生区的实时监测与跨区域联防联控,制定差异化管理策略(如高适生区优先清除、低适生区加强检疫),以遏制其生态危害。此外,深入解析藿香蓟与本地植物的竞争机制及其对生物多样性的长期影响,将为生态修复提供理论支撑。

参考文献

- [1] 何伟平,宋盛,张瑜飞,等.浙江海岛外来入侵植物调查分析——以嵊泗县花鸟岛为例[J].华东森林经理,2017,31(4):28-32.
- [2] 周颖,周鑫伟,黄再发,等.入侵植物藿香蓟在果园生草中对土壤养分及细菌群落的影响[J].四川农业大学学报,2024,42(6):1308-1315.
- [3] 王莹,陈鹏,方曾红,等.入侵植物藿香蓟在云南的分布、扩散趋势与风险分析[J].西部林业科学,2024,53(3):189-196.
- [4] 陈旭波,章雨希,张亚芬,等.入侵植物藿香蓟表型可塑性对种间竞争的响应[J].植物科学学报,2023,41(1):37-43.
- [5] 张亚芬,郑子洪,陈旭波,等.入侵植物藿香蓟与常见伴生杂草的生态位特征[J].生态学报,2022,42(9):3727-3737.
- [6] 张泰劼,郭文磊,张纯,等.阔叶丰花草与果园几种常见杂草的生理生态特性比较[J].广东农业科学,2020,47(6):70-77.
- [7] 张秋霞,李德宝,夏顺颖,等.云南入侵植物的生物学性状初步研究[J].广西植物,2018,38(3):269-280.
- [8] 习金根,何衍彪,李土荣.芒果园生草栽培主要害虫天敌分布调查[J].广西热带农业,2006(5):4-5.
- [9] 程文磊,殷根深,吴甜,等.滇西南咖啡园杂草多样性调查及生态位分析[J].热带农业科学,2024,44(10):1-10.
- [10] 杨俊.咖啡酸与绿原酸对入侵植物藿香蓟种子萌发和幼苗生长的影响研究[D]:[硕士学位论文].重庆:西南大学,2023.

- [11] 杜浩, 朱文, 赵丽娟, 等. 藿香蓟在农业中的利用及其潜在风险研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2022, 18(3): 211-216.
- [12] 蒋华, 聂江洪, 陈鹏, 等. 紫茎泽兰入侵对高黎贡山百花岭人工林植物群落多样性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(5): 54-62.
- [13] Chibuzo, W.A., Ikechukwu, A.I., Sussan, I.E., *et al.* (2024) Ecological Study and Phytochemical Analysis of *Ageratum Conyzoides* in Three Selected States of South-East Nigeria. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, **10**, 400-417. <https://doi.org/10.9734/ajraf/2024/v10i4345>
- [14] 陈晓辉, 王琼, 吴亮亮, 等. 矿区土壤重金属污染评价及植物修复能力的对比研究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(5): 28-30.
- [15] 毕玉科. 舟山岛外来植物及其入侵性分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [16] 周洁尘. 外来入侵植物提取物对降香黄檀炭疽病菌的抑菌作用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [17] 赵娟娟, 欧阳志云, 郑华, 等. 北京建成区外来植物的种类构成[J]. 生物多样性, 2010, 18(1): 19-28.
- [18] 王硕朋. 藏东南外来入侵植物种类及分布格局研究[D]: [硕士学位论文]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023.
- [19] 郝丽芬, 韩雨轩, 吴乾美, 等. 中国草地外来生物入侵现状与防控建议[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 10-20.
- [20] 贾桂康. 广西外来物种紫茎泽兰、飞机草的入侵生态学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2005.
- [21] 吴阳, 张杰琳, 彭守璋. 中国典型自然植被碳储量对气候变化的动态响应及驱动力分析[J/OL]. 水土保持学报: 1-9. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.012>, 2025-03-12.
- [22] 耿宜佳, 田瑜, 李俊生, 等. 《生物多样性公约》框架下外来入侵物种管控的全球进展、挑战和展望[J]. 生物多样性, 2024, 32(11): 81-90.
- [23] 谭景晨, 赵丽丽, 张淑炜, 等. 干旱胁迫对葛藤种苗生理特性的影响[J]. 农业与技术, 2020, 40(22): 17-20.
- [24] Giannoni, M.S., Trachte, K., Rollenbeck, R., *et al.* (2016) Atmospheric Salt Deposition in a Tropical Mountain Rainforest at the Eastern Andean Slopes of South Ecuador—Pacific or Atlantic Origin? *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 10241-10261. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10241-2016>
- [25] 罗玉洁. 光照和氮沉降对外来植物刺槐、火炬树及三种本地植物的生长和种间关系的影响[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.
- [26] 范庭兴, 段世楠, 何洋, 等. 基于 MaxEnt 模型的高山峡谷区交通干线对大中型林栖兽类分布影响研究[J]. 环境影响评价, 2025, 47(1): 63-70.
- [27] Dwire, A.K., Mellmann-Brown, S. and Gurrieri, T.J. (2018) Potential Effects of Climate Change on Riparian Areas, Wetlands, and Groundwater-Dependent Ecosystems in the Blue Mountains, Oregon, USA. *Climate Services*, **10**, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.10.002>
- [28] 张蜀豫, 李陈, 张炎周. 基于 MaxEnt 模型的环境变量和物种分布数据对四川牡丹潜在适生区域预测的影响[J]. 甘肃林业科技, 2024, 49(4): 49-55+71.
- [29] 王心, 闫子怡, 游崇娟. 基于优化的 MaxEnt 模型预测环状镰孢的潜在适生区[J]. 菌物学报, 2025, 44(2): 31-46.
- [30] 王二国, 游澜清, 易自力, 等. 基于 MaxEnt 模型的芦苇中国潜在分布区预测[J]. 湖南农业科学, 2024(8): 66-72.
- [31] 胡超贵, 董鹏斌, 王辰玥, 等. 基于 MaxEnt 模型和 HPLC 技术的独活潜在适宜种植区预测及品质区化研究[J/OL]. 作物学报: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20250217.0859.002.html>, 2025-03-27.
- [32] 李康杰, 邓海燕, 邹文涛. 气候变化情景下枫香在中国的潜在地理分布[J/OL]. 中南林业科技大学学报: 1-11. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.04.012>, 2025-03-11.
- [33] 张政涛, 林叶彬. 气候变化背景下野生刺梨适生区分布预测[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2025(3): 18-23.
- [34] 姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 5096-5109.
- [35] 焦鑫宇, 李嘉谊, 杨清玉, 等. 入侵植物加拿大一枝黄花在湖北的扩散动态和影响因素研究[J]. 广西植物, 2024, 44(8): 1481-1494.
- [36] 喻三鹏. 飞机草在贵州的生物学特性生态影响及适生区预测研究[D]: [硕士学位论文]. 贵州: 贵州大学, 2022.
- [37] 齐开源, 王雪丽, 苏雅乐, 等. 基于 MaxEnt 模型的科尔沁沙地刺萼龙葵适宜生长区预测[J]. 草业科学, 2024, 41(6): 1279-1287.
- [38] 何海荣, 夏丽敏, 陈丽花, 等. 浙江景宁国家重点管理外来入侵植物调查[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(1): 4-6.
- [39] 杨梦飞, 夏玲, 郭静依, 等. 三亚黄瓜主要种植区周边杂草分布[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(4): 109-114.

- [40] 刘蓉. 西双版纳地区外来入侵物种现状与风险评估[J]. 农村科学实验, 2024(5): 31-33.
- [41] 刘健, 罗应华, 林建勇, 等. 广西涠洲岛和斜阳岛植物多样性调查与分析[J]. 广西林业科学, 2023, 52(5): 629-635.
- [42] Sreejith, M., Remya, G.P., Sreelakshmi, S., *et al.* (2024) A Performance Evaluation of CMIP6 Wind Fields for Robust Forcing in Indian Ocean Wave Climate Studies. *International Journal of Climatology*, **45**, e8744. <https://doi.org/10.1002/joc.8744>
- [43] 闫琪. 气候变化背景下旱地农田温室气体排放模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [44] 梁静, 李秀璋, 张振西, 等. 基于 MaxEnt 模型预测冬虫夏草在青海省的潜在适生区[J]. 草原与草坪, 2025, 45(1): 45-51.
- [45] 王凤改, 胡婧媛, 赵金鹏. 基于 MaxEnt 模型的谷实夜蛾在中国潜在分布预测[J/OL]. 四川农业大学学报: 1-14. <https://doi.org/10.16036/j.issn.1000-2650.202404517>, 2025-03-27.
- [46] 李含文, 张云贵, 李光西, 等. 基于 MaxEnt 模型的云南香料烟气候适生区[J]. 云南农业大学学报, 2025, 40(1): 111-117.
- [47] 窦全慧, 陈程浩, 曾太乙亥, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测龙胆科重要药用植物在青藏高原的生境适宜性研究[J/OL]. 草地学报: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.s.20250318.1817.014.html>, 2025-03-27.
- [48] 李辉煌, 卓莹莹, 巴图巴艺尔, 等. 气候与土地利用变化对塔里木盆地亚洲野猫适宜生境的影响[J/OL]. 兽类学报: 1-23. <https://doi.org/10.16829/j.slxb.150958>, 2025-03-27.
- [49] 王鑫, 赵昕, 黄琴, 等. 四川湿地生态系统外来入侵植物现状及空间分布[J]. 生态学报, 2025(9): 1-12.
- [50] Li, L., Mingyue, Z., Yue, M., Yaqiong, W., Feilong, H., Xiaoqiang, L., *et al.* (2025) Measures, Progress and Prospects of Central-Local Cooperation in the Implementation of the National Biodiversity Strategy and Action Plan. *Biodiversity Science*, **33**, Article 24532. <https://doi.org/10.17520/biods.2024532>