

基于 MaxEnt 模型预测海南外来入侵植物新记录种—沼生金纽扣在中国的潜在适生区

李晓霞¹, 胡宽义², 曾安逸¹, 董定超^{1*}

1. 中国热带农业科学院科技信息研究所, 海南海口 571101; 2. 北京航空航天大学云南创新研究院, 云南昆明 650051

摘要: 随着全球气温升高及国际贸易往来日益频繁, 全球正面临着外来入侵持续上升的压力, 因此深入了解外来入侵物种的种类及其可能分布范围对于采取有效防控措施至关重要。本研究报道了海南入侵植物新纪录种—沼生金纽扣, 并采用最大熵 (MaxEnt) 模型结合地理信息系统 (ArcGis), 预测沼生金纽扣在中国的主要潜在适生区域, 运用 ROC 曲线分析法进行验证, 并运用刀切法分析影响沼生金纽扣分布的主要环境变量。结果表明: 沼生金纽扣在中国有较大的分布空间和入侵潜力, 主要集中在华南、华中和西南等地区, 其中高、中适生区主要集中在广西、广东、福建、海南和台湾, 低适生区主要集中在江西、湖南、重庆、贵州、湖南和浙江。到 2070 年, 沼生金纽扣在中国的适生区总体呈减少趋势, 总体适生面积由当前的 20.64% 减少到 11.98%, 其中低适生区减少 5.38%, 中、高适生区减少 3.28%, 主要表现在四川、云南、贵州、湖南和浙江的低度适生区面积明显缩小, 中、高度适生区仍然主要集中在海南、广西、广东、福建和台湾。ROC 曲线分析得出平均面积 AUC 值为 0.98, 标准差为 0.004, 表明预测结果可靠。刀切法分析显示, 影响沼生金纽扣在中国潜在地理分布的 4 个关键环境变量分别是 Bio13 (最湿月降水量)、Bio16 (最湿季节降水量)、Bio2 (月平均昼夜温差) 和 Bio11 (最冷季节平均温度), 其相对贡献率分别为 27.6%、22.5%、11.1% 和 8.0%, 说明降水量和温差对沼生金纽扣的分布影响较大; 而对沼生金纽扣在中国潜在地理分布影响最小的 4 个关键环境变量分别是 Sq2 (土壤营养保持能力)、Sq6 (土壤毒性)、Bio9 (最干季节平均温度) 和 Sq5 (土壤含盐量)。沼生金纽扣在华南地区潜在适生区分布面积较大, 需要加强防范和监测, 防止蔓延危害。

关键词: 入侵植物; 沼生金纽扣; 潜在适生区; MaxEnt; ArcGis

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A

MaxEnt Modeling Prediction of the Potential Distribution of *Acmella uliginosa*, a Newly Recorded Invasive Plant in Hainan, China

LI Xiaoxia¹, HU Kuanyi², ZENG Anyi¹, DONG Dingchao^{1*}

1. Institute of Scientific and Technology Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Yunnan Innovation Institute, Beihang University, Kunming, Yunnan 650051, China

Abstract: As global temperature rises and international trade becomes more frequent, the world is facing increasing pressure from invasive species. Therefore, it is crucial to have a deep understanding of the types of invasive species and the possible distribution ranges to take effective prevention and control measures. This paper reported a new record invasive plant species in Hainan, *Acmella uliginosa*, and MaxEnt maximum entropy ecological niche modeling combined with Geographic Information Systems (GIS) was used to predict the primary potential suitable areas for *A. uliginosa* under current and future climatic conditions in China, ROC curve analysis method was used to validate, knife-edge method to was used to analyze the major environmental variables influencing the distribution of the *A.*

收稿日期 2023-09-26; 修回日期 2024-05-09

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 721RC631); 海南省自然科学基金青年基金项目 (No. 323QN299); 海南省哲学社会科学规划项目 (No. HNSK(YB)23-75)。

作者简介 李晓霞 (1983—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 入侵植物生态学及科学普及。*通信作者 (Corresponding author): 董定超 (DONG Dingchao), E-mail: dodiichao@126.com。

uliginosa. *A. uliginosa* had a large distribution space and invasion potential in China, with the main distribution areas concentrated in southern, central and southwestern regions such as Guangxi, Guangdong, Fujian, Hainan and Taiwan. The low suitable area was mainly concentrated in Jiangxi, Hunan, Chongqing, Guizhou, Hunan and Zhejiang. By 2070, the overall suitable area of *A. uliginosa* in China is expected to decrease from 20.64% to 11.98%, with a decrease of 5.38% in low suitable areas and 3.28% in medium and high suitable areas. The area of low suitable areas in Sichuan, Yunnan, Guizhou, Hunan and Zhejiang has significantly reduced. The ROC curve analysis method showed that the average area under the curve (AUC) value is 0.968 with a standard deviation of 0.004, indicating that the prediction results are reliable. The knife-cutting method analysis showed that the four key environmental variables that have the greatest impact on the potential geographical distribution of *A. uliginosa* in China are Bio13 (precipitation of the wettest month), Bio16 (precipitation of the wettest season), Bio2 (mean diurnal temperature range), and Bio11 (mean temperature of the coldest season) are 27.6%, 22.5%, 11.1% and 8.0% respectively, indicating that precipitation and temperature range have a significant impact on the distribution of *Viola palustris*. The four key environmental variables that have the least impact on the potential geographical distribution of *Viola palustris* in China are Sq2 (soil nutrient retention capacity), Sq6 (soil toxicity), Bio9 (mean temperature of the driest season), and Sq5 (soil salinity). The four key environmental variables with the least impact on the potential geographical distribution of aquatic golden buttons in China are Sq6 toxicity, Sq7 operability, Bio1 annual average temperature, and Sq5 soil salt content. The potential suitable area for *A. uliginosa* is large in southern China and needs to be monitored to prevent further spread.

Keywords: invasive plant; *Acmella uliginosa*; potential suitable area; MaxEnt; ArcGis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.09.024

随着全球经济深度融合,各国之间的交通、旅游、经贸等领域的联系日益紧密,以及近年来引种活动日益频繁,导致外来植物的引入频率增加^[1-2]。外来物种的入侵已经对国家的生态安全和粮食安全构成了重大威胁,被认为是 21 世纪五大全球性环境问题之一。因此,开展外来生物入侵的防控已是全球各国政府关注的主要环境问题^[3-5]。海南是我国面向太平洋和印度洋的重要对外开放门户,独特的地理位置和优越的自然气候条件有利于物种的生长,也因此成为外来有害生物入侵压力较重的区域。目前,海南外来入侵生物的新纪录也不断增加,以海南为跳板,扩散至我国其他省(区),将给生态安全和国民经济安全造成威胁^[6-7]。为了摸清底数,研判风险,促进防控,农业农村部于 2022 年启动全国外来入侵物种普查工作,海南是重点普查省份之一。本团队在海南开展普查中,发现外来入侵植物新纪录种—沼生金纽扣,现予以报道,并附以照片及其描述。

预测外来入侵生物潜在分布是制定物种防控策略以阻止其种群蔓延的重要途径之一^[8]。近年来生态位模型(species distribution models)越来越多地被应用于入侵物种、物种引种等适生区的预测及早期预警中,并起到了良好的效果^[9-10]。其中最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型具有模拟精度高、软件运行时间短、操作简便、运行结果稳定、所需样本量小、预测覆盖面积更大、

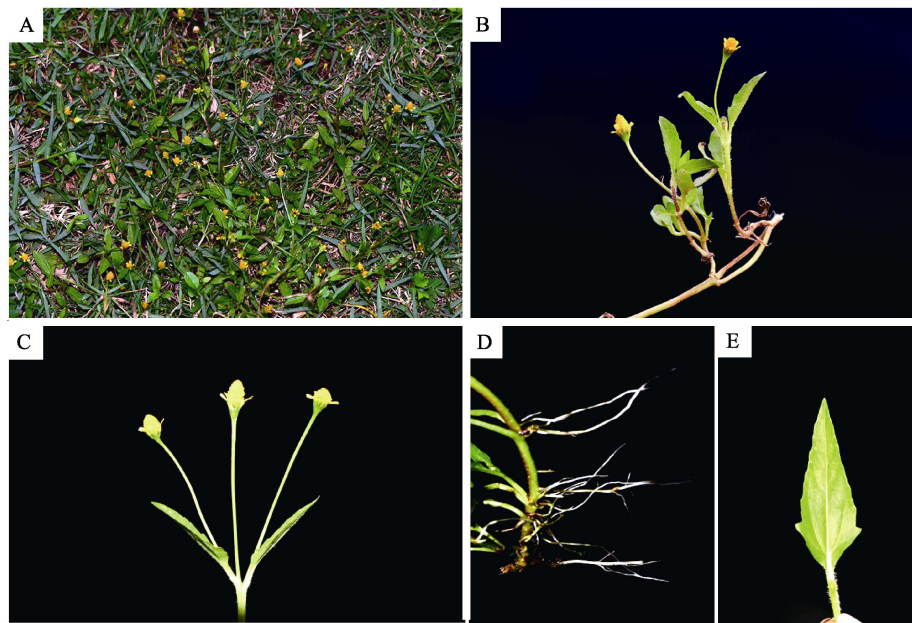
与实际更为相符合等特点在业内得到广泛认可,是目前最常用的物种分布模型之一,已应用于多种病虫害草害适生性的模拟预测^[11-14]。本研究利用采集的沼生金纽扣分布数据,结合气候、高程、土壤因子等环境数据,将 MaxEnt 模型与地理信息系统(ArcGis)相结合,确定影响沼生金纽扣潜在分布的环境因子的潜在适生区变化,预测主要潜在适生区域,以期为预防和制定合理的入侵控制措施提供科学依据。

1 海南外来入侵植物新纪录种—沼生金纽扣^[15]

Acmella uliginosa (Sw.) Cass. in F. Cuvier Dict. Sci. Nat. 24: 331. 1822. *Flora of China* 20-21: 324. 2011.

Hainan (海南): 海口,棠甘村, 2023-04-01, on limestone valley, alt. 24 m, X. X. Li (李晓霞) (图 1); 保亭,七仙岭, 2016-12-23, 中国植物图像库,康瑞华(<http://ppbc.iplant.cn/tu/6247186>)。

一年生草本,高 10~30 cm。茎直立或偶匍匐,绿色至紫色,疏被毛。叶柄长约 1 cm; 叶片披针形,狭卵形至卵形,长 1~5 cm,宽 3~25 mm,两面疏被毛,基部渐狭至楔形,边缘深波状,疏生纤毛,先端锐尖至渐尖。头状花序辐射状,单生或 2~3 个顶生,卵圆形,约 6 mm×5 mm; 花序梗长 1~3 cm,疏生柔毛; 花托约 4 mm×1 mm。舌



A: 植株及生境; B: 植株地上部分; C: 头状花序; D: 根; E: 叶。
A: Plant and habitat; B: Above-ground portion of the plant; C: Capitula; D: Root; E: Leaf.

图 1 沼生金纽扣特征图

Fig. 1 The characteristic figure of *A. uliginosa*

状花 4~7 枚，花冠黄色至橙黄色，约 3 mm。管状花，多数，黄色至橙黄色，具 4 裂片；花冠约 1.5 mm，裂片三角形。瘦果黑色，长约 1.5 mm，具缘毛；冠毛近等长。花期全年。

生境：喜温暖湿润环境，耐旱、耐盐、耐水淹，可在沼泽、湿地、水田、路边、荒地等多种生境中生长。

分布：归化于香港和台湾^[16]，福建、云南、广东、广西、四川有记录。原产于非洲、美洲和亚洲的整个热带地区，归化于太平洋岛屿；现分布于非洲、亚洲西南部、印度洋岛屿、马达加斯加等。

2 沼生金纽扣在中国的潜在适生区预测

2.1 材料与方法

2.1.1 材料 研究对象为海南新发现的入侵归化新记录种—沼生金纽扣。2022 年，项目组在海南调查入侵物种中发现沼生金纽扣在儋州、海口等地的农田、湿地和荒地中相对常见，同时记录其分布信息，为风险预测提供材料和数据支持。

2.1.2 方法 采用 MaxEnt 模型结合地理信息系统 (ArcGis)，预测沼生金纽扣在中国的主要潜在适生区域。沼生金纽扣的分布数据通过以下方式获得：(1) 实地考察。海南的采样点多为实地考

察获得，调查点主要位于海口市和儋州市，发现沼生金纽扣即记为“存在”，GPS 记录经纬度。(2) 查询物种分布数据库。查询的数据库包括全球生物多样性信息网络数据库 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF, <http://www.Gbif.org/>)、国际农业与生物科学中心数据库 (CABI, <http://www.Cabi.org/>)、Inaturalist 自然爱好者社区数据库 (<http://www.inaturalist.org/>)。(3) 检索国内外公开发表的沼生金纽扣相关的期刊论文。

所用的环境因子来自联合国粮农组织世界土壤数据库 (<https://www.fao.org/>) 与 Worldclim 气候数据库 (<https://www.worldclim.org/>)，数据以全球的气象记录信息为基础数据，整合插值生成的全球气候数据^[11]。利用 ArcGis 软件整合研究区的海拔、营养可用性、营养保持能力等 7 个土壤因子以及月平均降水量、月平均最高及最低气温等 19 个生物气候因子 (表 1)。

软件来源：从官网 (<https://www.r-project.org/>) 下载 R4.3.0 软件并载入 Rinat 和 Coordnate Clieaner 程序包；从 GitHub 下载最新版的最大熵分析软件 MaxEnt；从官网 (<http://www.sdmttoolbox.org/>) 下载 ArcGIS 插件 SDMTtoolbox；ArcGIS 10.8 软件由中国热带农业科学院科技信息研究所智慧农业研究中心购买。

表 1 沼生金纽扣潜在地理分布的评价指标
Tab. 1 Evaluation indicators for the potential geographic distribution of *A. uliginosa*

编号 No.	变量/单位 Variables/Unit	指标意义 Significance of variable
GloElev	海拔/m	反映海拔高度
Sq1	营养的可用性/%	土壤质地、土壤有机碳、土壤 pH、总可交换碱
Sq2	营养保持能力/%	土壤有机碳、土壤质地、碱饱和度、土壤与黏土组分的阳离子交换能力
Sq3	支持条件/%	土壤质地、容重、粗碎片、顶点土壤性质和土壤相对根系渗透、土壤深度和土壤体积的影响
Sq4	根部的氧气利用率/%	土壤排水和影响土壤排水的土壤阶段
Sq5	土壤盐含量/%	土壤盐度、土壤溶度和土壤相对盐分条件的影响
Sq6	毒性/%	碳酸钙和石膏
Sq7	可操作性/%	土壤质地、有效土层深度/体积，以及制约土壤管理的土相
Bio1	年平均气温/℃	反映平均温度及其变异幅度
Bio2	月平均昼夜温差/℃	反映温差特点
Bio3	等温性/%	反映温差特点
Bio4	温度季节性变化标准差/℃	反映平均温度及其变异幅度
Bio5	最暖月最高温度/℃	反映极端温度的影响
Bio6	最冷月最低温度/℃	反映极端温度的影响
Bio7	年均温变化范围/℃	反映温差特点
Bio8	最湿季节平均温度/℃	反映水热是否同步
Bio9	最干季节平均温度/℃	反映水热是否同步
Bio10	最暖季节平均温度/℃	反映极端温度的影响
Bio11	最冷季节平均温度/℃	反映极端温度的影响
Bio12	年降水量/mm	反映降雨量及季节性分布
Bio13	最湿月降水量/mm	反映极端水分条件
Bio14	最干月降水量/mm	反映极端水分条件
Bio15	降水量变异系数/mm	反映降雨量及季节性分布
Bio16	最湿季节降水量/mm	反映极端水分条件
Bio17	最干季节降水量/mm	反映极端水分条件
Bio18	最暖季节降水量/mm	反映水热是否同步
Bio19	最冷季节降水量/mm	反映水热是否同步

2.1.3 数据处理 在 inaturalisth 和 GBIF 数据库中获取并整合沼生金纽扣分布数据,利用 Coordinate Clieaner 软件包删除错误分布点,利用 ArcGis 软件 SDMtoolbox 工具箱减少空间自相关和采样偏差,并消除分析区域外的数据记录,最终获得 345 个有效分布点,并将数据存储为.csv 格式,用于 MaxEnt 模型分析。使用 ArcGis 软件 SDMtoolbox 工具箱对 27 个变量 (GloElev、Sq1~Sq7、Bio1~Bio19) 进行裁切和预处理,重新编码为.asc 格式,用于 MaxEnt 模型分析。

3 结果与分析

3.1 研究方法验证与运算

3.1.1 MaxEnt 模型预测能力验证 MaxEnt 模型预测的准确度和可靠性可采用训练集和测试集数

据的受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线进行检验 (图 2)。ROC 曲线是以真阳性率为纵坐标,假阳性率为横坐标所形成的曲线。曲线下面积 (area undercurve, AUC) 是 ROC 曲线与横坐标围成的面积,AUC 值越大表示与随机分布相距越远,环境变量与预测的物种地理分布模型之间相关性越大,即模型预测效果越好^[17]。根据 AUC 的 ROC 评估模型的预测效果,当 $AUC \geq 0.9$,表示模型预测结果优秀;当 $0.7 \leq AUC < 0.9$,表示模型预测结果良好;当 $0.5 \leq AUC < 0.7$,表示模型预测结果可接受;当 $AUC < 0.5$,表示模型预测无效^[12]。在历史气候条件下,重复 10 次运行模型后,平均 AUC 值为 0.98 标准差为 0.004,表明结合现有沼生金纽扣分布数据和筛选后的环境变量,MaxEnt 模型能较好预测

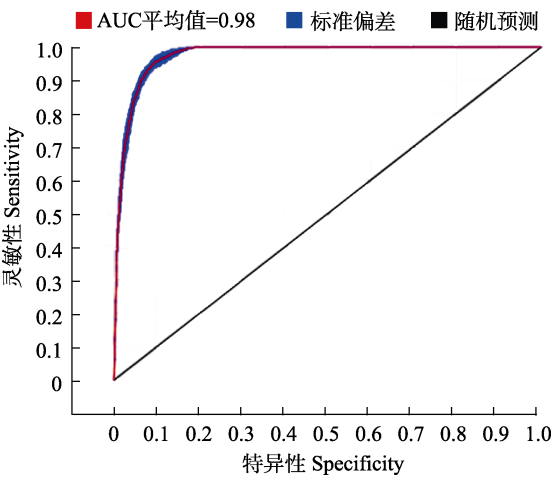


图 2 应用 ROC 曲线检验 MaxEnt 模型的预测结果

Fig. 2 Applying ROC curve to test the prediction results of MaxEnt model

沼生金纽扣在中国的潜在分布，该模型具有较高的可靠性，可用于预测沼生金纽扣在中国的潜在地理分布。

3.1.2 模型运算 将整理好的全国沼生金纽扣分布点数据、历史气候和未来气候变量、研究区的海拔和 7 个土壤因子数据分别导入 MaxEnt 模型中，分别预测历史气候条件下及未来气候条件下沼生金纽扣在中国以及全球的潜在地理分布。沼生金纽扣分布点共 345 个，应用随机种子掉落，千分之五的患病概率，随机选择 25% 的分布点作为测试集，75% 的分布点作为训练集，最大迭代次数设置为 1000，其他为软件默认参数，输出文件为 ASC II 栅格图层。使用最大训练敏感度加特异性逻辑阈值将连续的 MaxEnt 预测结果转换为沼生金纽扣的适生区与非适生区等级划分图，同时参考自然点段法将模型运算结果分为 4 级：SI < 0.08 为非适生区；0.08 ≤ SI < 0.2 为低适生区；0.2 ≤ SI < 0.45 为中适生区；SI ≥ 0.45 为高适生。

3.1.3 沼生金纽扣适生区与环境变量的关系 Maxent 运行的结果表明（表 2），Bio13（最湿月降水量）、Bio16（最湿季节降水量）、Bio2（月平均昼夜温差）和 Bio11（最冷季节平均温度）等 4 个环境变量对运行的结果贡献最大，其相对贡献率分别为 27.6%、22.5%、11.1% 和 8%；Sq2（土壤营养保持能力）、Sq6（土壤毒性）、Bio9（最干季节平均温度）和 Sq5（土壤含盐量）等 4 个环境因素对运行的结果贡献最小，其相对贡献率分别为 0.2%、0.1%、0.1% 和 0%。

表 2 环境变量对 MaxEnt 模型的相对贡献估计值
Tab. 2 Estimates of relative contributions of the environmental variables to the MaxEnt model

编号 No.	贡献百分比 Percent contribution/%	重要性排序 Importance ranking
Bio13	27.6	4.9
Bio16	22.5	4.3
Bio2	11.1	10.2
Bio11	8.0	29.5
Bio12	5.9	3.6
Bio6	5.1	7.8
Gloiland	3.0	1.1
Bio3	2.9	11.4
Bio18	2.1	1.0
Bio15	1.4	1.1
Bio4	1.4	8.7
Bio5	1.3	1.3
Bio8	1.2	2.2
Bio19	1.0	0.7
Bio10	0.8	2.5
Bio7	0.8	0.6
Sq1	0.7	1.5
Bio1	0.7	0.5
Bio17	0.7	1.1
Bio14	0.6	1.0
Sq3	0.4	1.9
Sq7	0.2	0.8
Sq4	0.2	0.5
Sq2	0.2	0.4
Sq6	0.1	1.1
Bio9	0.1	0.1
Sq5	0	0.1

变量重要性的 jackknife 检验结果（图 3）表明，单独使用时增益最大的环境变量是 Bio13（最湿月降水量），因此该变量对沼生金纽扣的生长而言，似乎是最有价值的变量。当省略变量时，收益降低最多的环境变量是 Bio3（等温性），因此，该变量对于结果而言也起到一定的作用。

3.1.4 影响 MaxEnt 预测的主要环境变量分析 MaxEnt 的结果显示，对沼生金纽扣在中国潜在地理分布影响最大的 4 个关键环境变量（图 4）分别是 Bio13（最湿月降水量）、Bio16（最湿季节降水量）、Bio2（月平均昼夜温差）和 Bio11（最冷季节平均温度）。Bio13（最湿月降水量）的单变量正规化训练增益最高、Bio3（等温性）的省略变量正规化训练增益变化最大，表明降水量和

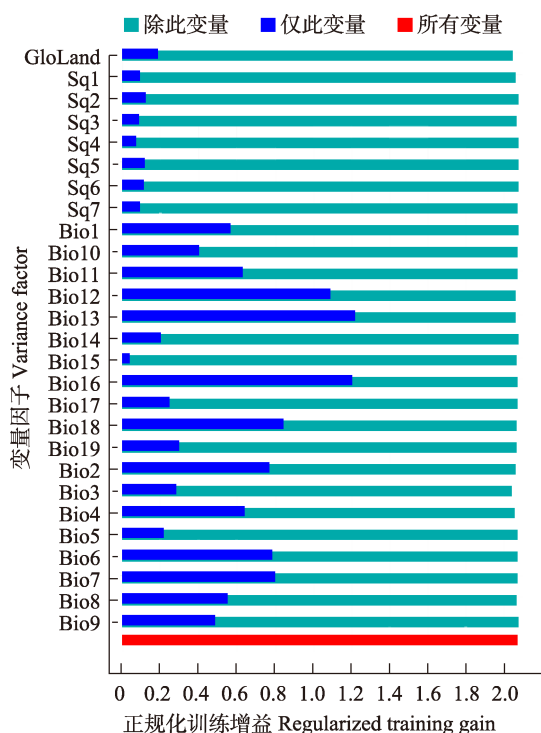


图 3 正规化训练增益

Fig. 3 Regularized training gain

温度是影响模型预测结果的主要因素。

3.2 沼生金纽扣在中国的适生区预测分析

3.2.1 历史环境条件下沼生金纽扣在中国的适生区预测 历史气候条件下,在全国 34 个省级行政区域中,沼生金纽扣的适生区有 17 个省(区)。其中,海南、广西、广东、湖南、重庆、贵州、

湖南、江西、福建、浙江、台湾等省(区)全范围适生;西藏、云南、四川、湖北、江苏、安徽等省(区)部分范围适生;广西、广东、福建、海南、台湾以中、高适生区为主,其余省(区)以低适生区为主。沼生金纽扣在中国的适生区总面积为 $224.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国陆地总面积的 23.29%, 其中高、中和低适宜区面积分别为 2.00×10^4 、 37.05×10^4 、 $184.97 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分别占中国陆地总面积的 0.21%、3.85% 和 19.23% (图 5)。

3.2.2 未来环境条件下沼生金纽扣在中国的潜在适生区预测 未来环境条件下,沼生金纽扣在我国个别省(区)的适生区略有缩小趋势,在我国的适生区总体减少(图 6),总体适生面积由当前的 20.64% 减少到 11.98%, 其中低适生区减少 5.38%; 中、高适生区减少 3.28%。主要表现在四川、云南、贵州、湖南、浙江的低适生区面积明显缩小,中、高度适生区仍然主要集中在海南、广西、广东、福建和台湾。

4 讨论

生态位模型是利用物种已知的分布数据和相关的环境变量,如气候、地形、土壤类型等,来建立一个数学或统计模型推算物种的生态需求,预测物种的实际和潜在分布,以揭示物种与环境之间的关系^[18]。在构建生态位模型时,常见的方法包括最大熵模型、生态位分布模型、物种分布

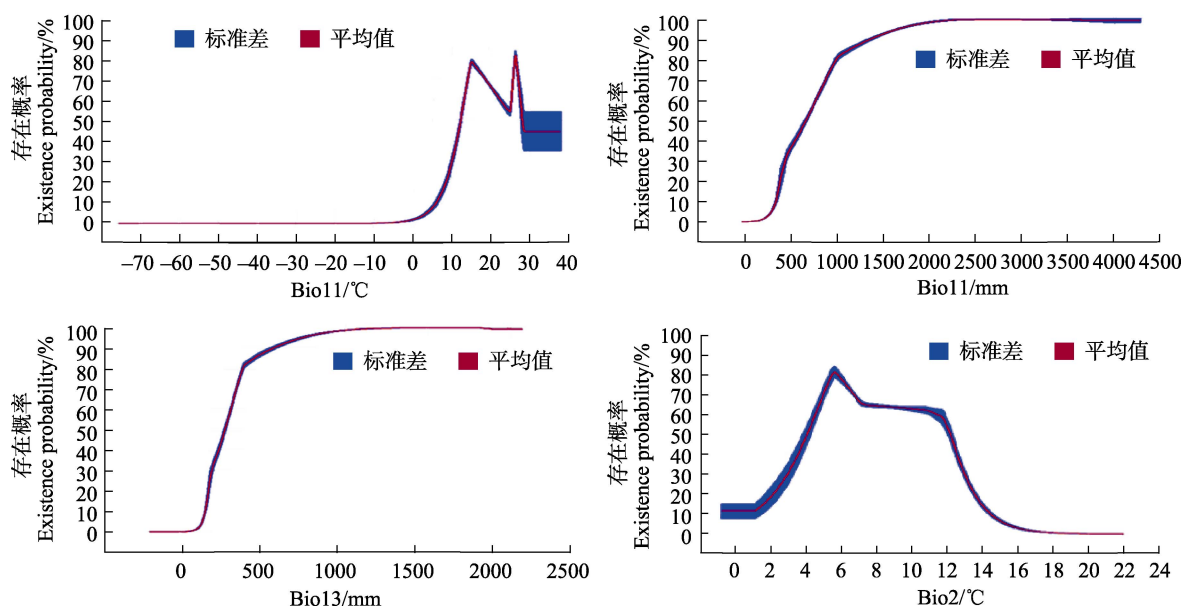


图 4 4 个关键环境变量对沼生金纽扣在中国潜在地理分布的影响

Fig. 4 Influence of four key environmental variables on potential geographical distribution of *A. uliginosa* in China

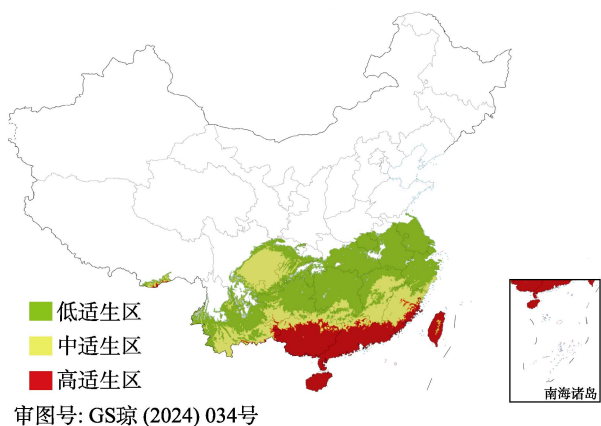


图 5 历史环境条件下沼生金纽扣在我国的适生区

Fig. 5 Suitable habitat of *A. uliginosa* under historical environmental conditions in China

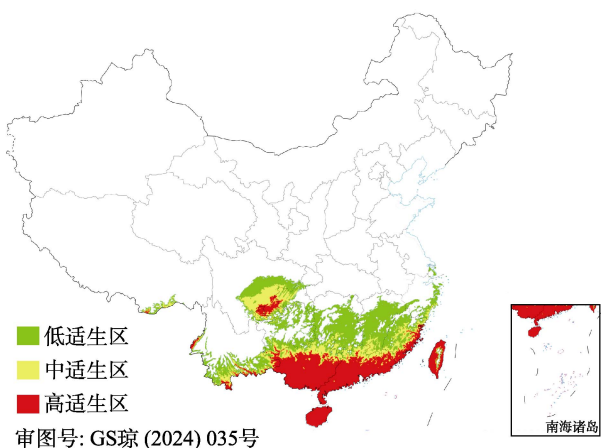


图 6 未来环境条件下沼生金纽扣在我国的适生区

Fig. 6 Suitable habitat of *A. uliginosa* under future environmental conditions in China

模型等, 这些模型可以通过比较物种分布数据和环境因素数据, 确定哪些环境因素对物种分布具有重要影响; 模型还可用于预测物种在不同地理区域的适宜性和分布情况, 为生态保护和管理提供决策支持。近年来, 生态位模型在入侵生物学、保护生物学、全球气候变化等多个领域得到开拓和应用^[11-14]。MaxEnt 模型的模拟结果可揭示物种与环境的关系以及模型中各变量的贡献率, 是目前经过许多研究证明对物种(大小样本数据)分布预测精度最好的模型^[19]。

目前, 对模型精度评价应用最广泛的方法为 ROC 曲线法, 即 AUC 法^[20]。通常情况, MaxEnt 模拟结果准确性选用 ROC 曲线法评价。ROC 曲线与横坐标围成的面积大小是评估模型预测是否准确的度量。利用 MaxEnt 绘制 ROC 曲线, 并计算 AUC 值。AUC 值的范围为 0~1, 数值越接近 1 越达理想状态, 表明模型的精准性越高^[21]。本研

究基于世界范围沼生金纽扣的分布数据, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 10.8 软件对气候因子(历史和未来)、研究区的海拔和 7 个土壤因子在我国及世界范围的适生区进行预测, 其结果经 ROC 曲线分析验证, 得到的模型 ROC 值均大于 0.95。一般认为 $AUC \geq 0.9$ 时, 具有较高精确度。因此, 本研究可信度较高。

MaxEnt 模型检验表明, 对沼生金纽扣分布预测影响最大的因子是 Bio13 (最湿月降水量), 其次是最湿季节降水量、月平均昼夜温差和最冷季节平均温度。因此, 降水量在沼生金纽扣分布特征中扮演着重要角色, 但其相关机制尚不明确。此外, 最湿月降水量的单变量正规化训练增益最高, 等温性的省略变量正规化训练增益变化最大, 表明降水量和温度是影响模型预测结果的主要因素。对沼生金纽扣在中国潜在地理分布影响最小的 4 个关键环境变量分别是 Sq2 (土壤营养保持能力)、Sq6 (土壤毒性)、Bio9 (最干季节平均温度) 和 Sq5 (土壤含盐量), 其相对贡献率分别为 0.2%、0.1%、0.1% 和 0%。

本研究表明, 在未来气候变化的背景下, 沼生金纽扣在我国的低适生区面积有明显变化, 但中高适生区以及适生区的核心区域、大体分布均无明显变化。这与其他研究中的白栎 (*Quercus fabri*)^[22]、白花鬼针草 (*Bidens alba*)^[23] 等的分布预测结果相似。

本研究采用 MaxEnt 模型利用 19 种气候因子(历史和未来)、研究区的海拔和 7 个土壤因子预测沼生金纽扣在中国的潜在地理分布, 并评价了 MaxEnt 模型的效果和准确性。结果表明, MaxEnt 模型具有很高的预测能力和泛化能力, 未出现过拟合或欠拟合现象, 也能够很好地反映沼生金纽扣对环境变量的响应关系和影响因素。但是, 已有研究表明, 外来植物的入侵、扩散受环境因素、地形因素、土壤植被类型、人类交通干扰和物种的相互作用等多种因素的影响^[11]。本研究仅采用与降水量、温度等生物气候因素相关的数据, 未考虑植被类型、人类交通、气候变化以及全球变暖与生物相互作用等其他因素, 这可能导致对适生区的预测存在一定的偏差。未来研究可以综合考虑这些因素, 以提高预测结果的准确性。

综上, 本研究报道了海南新发现的入侵植物沼生金纽扣, 并利用 MaxEnt 模型预测了沼生金纽扣在中国的潜在地理分布和入侵风险, 结果表

明, 沼生金纽扣在中国有较大的分布空间和入侵潜力, 尤其是在华南、华中和西南等地区, 这些地区是我国的重要农业区和生物多样性热点区, 如果沼生金纽扣在这些地区大规模扩散和入侵, 可能会对当地的生态系统和人类社会造成严重的危害。因此, 需要加强对沼生金纽扣的防范和监测, 防止其蔓延为害。

参考文献

- [1] 万方浩, 郭建英, 王德辉. 中国外来入侵生物的危害与管理对策[J]. 生物多样性, 2002, 10(1): 119-125.
WAN F H, GUO J Y, WANG D H. Alien invasive species in China: their damages and management strategies[J]. Biodiversity Science, 2002, 10(1): 119-125. (in Chinese)
- [2] 马金双. 中国入侵植物名录[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
MA J S. The checklist of the Chinese invasive plants[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese)
- [3] PAINI D R, SHEPPARD A W, COOK D C, BARRO P J, WORNER S P, THOMAS M B. Global threat to agriculture from invasive species[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113: 7575-7579.
- [4] CAFFREY J M, BAARS J R, BARBOUR J H, BOETS P, BOON P, DAVENPORT K, DICK J T A, EARLY J, EDSMAN L, GALLAGHER C, GROSS J, HEINIMAA P, HORRILL C, HUDIN S, HULME P E, HYNES S, MACLSAAC H J, MCLOONE P, MILLANE M, MOEN T L, MOORE N, NEWMAN J, O'CONCHUIR R, O'FARRELL M, O'FLYNN C, OIDTMANN B, RENALS T, RICCIARDI A, ROY H, SHAW R, WEYL O, WILLIAMS F, LUCY F E. Tackling invasive alien species in Europe: the top 20 issues[J]. Management of Biological Invasions, 2014, 5(1): 1-20.
- [5] DOHERTY T S, GLEN A S, NIMMO D G, RITCHIE E G, DICKMAN C R. Invasive predators and global biodiversity loss[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(40): 11261-11265.
- [6] 龚治, 彭正强, 马光昌, 万方浩, 孙江华, 胡美姣, 范志伟, 金涛, 温海波. 自由贸易港背景下的海南外来入侵生物防控探讨[J]. 植物保护, 2022, 48(6): 221-231.
GONG Z, PENG Z Q, MA G C, WAN F H, SUN J H, HU M J, FAN Z W, JIN T, WEN H B. Prevention and control of alien invasive species in Hainan under the background of free trade port[J]. Plant Protection, 2022, 48(6): 221-231. (in Chinese)
- [7] 李雷, 刘天鸿. 新海关体制下构建中国自由贸易港检验检疫工作体系的对策建议[J]. 海关与经贸研究, 2018, 39(6): 53-64.
- LI L, LIU T H. Suggestions on building the inspection and quarantine system for China's Free Trade Port (FTP) under the new customs regime[J]. Journal of Customs and Trade, 2018, 39(6): 53-64. (in Chinese)
- [8] UDEN D R, ALLEN C R, ANGELER D G, ANGELE D G, CORRAL L, FRICKE K A. Adaptive invasive species distribution models: a framework for modeling incipient invasions[J]. Biological Invasions, 2015, 17(10): 2831-2850.
- [9] FAND B B, SHASHANK P R, SUROSHE S S, CHANDRASHEKAR K, MESHRAM M, TIMMANNA H N. Invasion risk of the South American tomato pinworm *Tuta absoluta* (Meyrick) in India: predictions based on MaxEnt ecological niche modelling[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2020, 40(3): 561-571.
- [10] ANDERSON ROBERT P. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distribution and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela[J]. Journal of Biogeography, 2010, 37(7): 1378-1393
- [11] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 全占军, 赵相健, 宫璐. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区[J]. 植物保护报, 2016, 43(6): 1041-1048.
LIU X Y, LI J S, ZHAO C Y, QUAN Z J, ZHAO X J, GONG L. Prediction of potential suitable area of *Ambrosia artemisiifolia* L. in China based on MAXENT and ArcGIS[J]. Journal of Plant Protection, 2016, 43(6): 1041-1048. (in Chinese)
- [12] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190: 231-259.
- [13] BOOTH T H, NIX H A, BUSBY J R, HUTCHINSON M F. Bioclim: the first species distribution modeling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies[J]. Diversity and Distributions, 2014(20): 1-9.
- [14] KUMAR S, STOHLGREN J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia[J]. Journal of Ecology and the Natural Environment, 2009, 1(4): 94.
- [15] CHEN T, ZHU H, CHEN J R. Flora of China Vol. 19[M]. Beijing: Sciences Press; St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2011: 324.
- [16] CHUNG S W, HSUT C, CHANG Y H. Taiwan, *Acmella uliginosa* (Swartz) Cassini (Asteraceae): a newly naturalized plant in Taiwan[J]. Taiwan, 2007, 52(3): 276-279, 2007
- [17] 齐国君, 陈婷, 高燕, 雷妍圆, 吕利华. 基于 Maxent 的大洋臀纹粉蚧和南洋臀纹粉蚧在中国的适生区分析[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(2): 219-223.

- QI G J, CHEN T, GAO Y, LEI Y Y, LYU L H. Potential geographic distribution of *Planococcus minor* and *P. lilacinus* in China based on Maxent[J]. Journal of Environmental Entomology, 2015, 37(2): 219-223. (in Chinese)
- [18] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- ZHU G P, QIAO H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24 (10): 1189-1196. (in Chinese)
- [19] WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, PETERSON A T, GRAHAM C H, GUISAN A. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. Diversity and Distribution, 2008, 14(5): 763-773.
- [20] 宋花玲. ROC 曲线的评价研究及应用[D]. 上海: 第二军医大学, 2006.
- SONG H L. Evaluation research and application of ROC curves[D]. Shanghai: Second Military Medical University, 2006. (in Chinese)
- [21] WALTHER G R, POST E, CONVE P, MENZEL A, PARMESAN C, TREVOR J C B, FROMENTIN J M, OVE H G, FRANZ B. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416: 389-395.
- [22] 李璇, 李焱, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区[J]. 林业科学, 2018, 54(8): 153-164.
- LI X, LI Y, FANG Y M. Prediction of potential suitable distribution areas of *Quercus fabri* in China based on an optimized Maxent model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(8): 153-164. (in Chinese)
- [23] 岳茂峰, 冯莉, 崔烨, 张纯, 田兴山. 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[J]. 生物安全学报, 2016, 25(3): 222-228.
- YUE M F, FENG L, CUI Y, ZHANG C, TIAN X S. Prediction of the potential distribution and suitability analysis of the invasive weed, *Bidens alba* (L.) DC[J]. Journal of Biosafety, 2016, 25(3): 222-228. (in Chinese)