

# 基于 Maxent 模型的假臭草潜在分布区预测

郭燕青<sup>1,2</sup>, 史梦竹<sup>2,3</sup>, 李建宇<sup>2,3</sup>, 傅建炜<sup>2,3,4\*</sup>, 吴梅香<sup>1,3\*</sup>

(1. 福建农林大学植物保护学院, 福州 350002; 2. 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, 农业部福州作物有害生物科学观测实验站, 福州 350013; 3. 闽台特色作物病虫害生态防控国家重点实验室, 福州 350002; 4. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福州 350001)

**摘要:** 为有效开展假臭草的防除工作, 运用最大熵值模型(Maxent)和地理信息技术(GIS)对假臭草(*Praxelis clematidea*)在中国的潜在分布区和影响其分布的主导环境变量进行预测。运用 AUC 法对预测精度进行评价, 达到“优秀”水平。结果表明, Maxent 模型预测结果具有较高的可信度。假臭草在中国的潜在适生面积为 785 985 km<sup>2</sup>, 占总国土面积的 8.19%, 主要分布在华南及东南区域, 其中福建、广东、海南和广西省为假臭草的中高适生区。福建省的假臭草分布最为广泛, 61.98%的福建区域适合假臭草的生长, 其中闽南沿海为假臭草的高适生区, 而闽北区域假臭草的种群密度较低。2 月最低温可能是限制假臭草分布的主要气候变量, 贡献率为 61.70%; 最干季度降水量、9 月最高温对假臭草的分布具有一定的影响。假臭草的分布预测为早期监测和预警提供理论依据和技术支持, 防止假臭草的进一步扩散蔓延。

**关键词:** 假臭草; Maxent 模型; 潜在分布区; 生态因子

doi: 10.11926/jtsb.3977

## Prediction of Potential Distribution Area of *Praxelis clematidea* Based on Maxent Model

GUO Yan-qing<sup>1,2</sup>, SHI Meng-zhu<sup>2,3</sup>, LI Jian-yu<sup>2,3</sup>, FU Jian-wei<sup>2,3,4\*</sup>, WU Mei-xiang<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences/ Fujian Key Laboratory for Monitoring and Integrated Management of Crop Pests/ Fuzhou Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests, Ministry of Agriculture, Fuzhou 350013, China; 3. State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Fuzhou 350002, China; 4. Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-Products, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In order to prevent and remove effectively invasive plant *Praxelis clematidea*, the potential distribution area and dominant environment variables were predicted by using the maximum entropy model (Maxent) and the Geographic Information System (GIS) technology. The accuracy of prediction was evaluated at “excellent” level by AUC (area under curve) method. The results showed that the prediction of Maxent model had high reliability. The potential suitable growth area of *P. clematidea* in China was 785 985 km<sup>2</sup>, accounting for 8.19% of all China land area. This species mainly distributed in southern and southeastern China, especially in Fujian, Guangdong, Hainan and Guangxi (high suitable areas). The distribution of *P. clematidea* in Fujian Province was the widest, which 61.98% of the area was suitable for growth. It was high suitable area of *P. clematidea* in coast of south

收稿日期: 2018-08-13 接受日期: 2018-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1202101-4); 福建省科技重大专项(2017NZ0003-1-1); 福建省农业科学院科技创新团队(STIT2017-1-12); 福建农林大学创新科技项目(KFA17386A)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC1202101-4), the Science and Technology Major Project of Fujian (Grant No. 2017NZ0003-1-1), the Science and Technology Innovation Team Construction Project of FAAS (Grant No. STIT2017-1-12), and the Science and Technology Innovation Project of Fujian Agriculture and Forestry University (Grant No. KFA17386A).

作者简介: 郭燕青(1992~), 男, 硕士研究生, 研究方向为昆虫分类与害虫生物防治。E-mail: Anoka@foxmail.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wuivy200@126.com; fjw9238@163.com

Fujian, but the population density in the north of Fujian was low relatively. The minimum temperature in February might be the restrictive variable of the distribution of *P. clematidea* with the contribution rate of 61.7%. Precipitation of the driest quarter and maximum temperature in September have a certain influence on its distribution. These provided a theoretical basis for the prevention and control of *P. clematidea* and some effective measures must be taken to prevent its spread for the further.

**Key words:** *Praxelis clematidea*; Maxent model; Potential distribution area; Ecological factor

假臭草(*Praxelis clematidea*)别名猫腥草, 为一年生草本植物, 隶属于菊科(Compositae)假臭草属, 曾被误认为藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)或熊耳草(*A. houstonianum*)<sup>[1]</sup>, 原产南美洲, 主要分布于阿根廷、巴西以及南美洲等国家<sup>[2]</sup>, 现东半球热带地区也开始发现其踪迹<sup>[3]</sup>。我国于 20 世纪 80 年代首次在香港发现<sup>[4]</sup>, 随后在深圳、海南、福建、广西等省市自治区陆续发现<sup>[5]</sup>。由于其具有很强的扩散性等入侵植物的特征, 国家环保总局在 2014 年将假臭草定义为入侵植物, 并在第三批外来入侵种名单中给予公示确认<sup>[6]</sup>。近年来, 假臭草在我国南方多个地区的农田、果园(如柑橘园)等建立种群<sup>[7]</sup>, 严重破坏环境, 并造成一定的经济损失。

目前用于入侵生物潜在分布区分析的生态模型已有多种, 如 GARP、CLIMEX、BIOCLIM、Domain、SVM 等。采用 Domain 模型和 GARP (genetic algorithm for rule-set production) 生态位模型对假臭草分布进行了分析, 认为高危区为广东、广西、云南、海南大部分地区、福建及台湾沿海区域等, 且水分和温度对其分布具有显著影响<sup>[8]</sup>。最大熵值法(maximum entropy model, Maxent)模型主要是通过物种已知分布点和环境变量找出最大的熵, 从而对物种的分布区进行预测<sup>[9]</sup>。有研究表明, 在物种分布数据不全的情况下, Maxent 模型的预测结果具有非常高的精确度<sup>[10-12]</sup>。本文利用前期野外调查、网上数字标本馆的假臭草分布数据和文献记载的基础上, 结合 26 项环境变量, 利用 Maxent 模型对假臭草的潜在适生区进行预测, 明确假臭草的高适生区和对环境变量的响应特征, 为有效防控假臭草的扩散提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据来源

**分布点数据采集** 外来入侵植物假臭草分布点数据主要来源: ①实地采样调查: 调查的样点

参考中华人民共和国农业行业标准《外来草本植物普查技术规程》(NY/T 1861-2010)规定<sup>[13]</sup>, 每条线路针对生态环境类型, 采取大范围、多点调查的方式调查假臭草的分布情况。用云采集软件(由福建省农业科学院植物保护研究所开发)记录其分布、采集数据和经纬度坐标。②文献资料查阅: 检索国内公开发表的有关假臭草的期刊和学位论文等, 获得其分布地理信息。③从中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、教学标本共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)、中国自然标本馆([www.nature-museum.net](http://www.nature-museum.net/))和中国植物图像库([www.plantphoto.cn](http://www.plantphoto.cn/))中搜索假臭草, 根据查询到的结果, 查看图片所记录的地址。根据查询到的地址使用 GPSspg (<http://www.gpspg.com/latitude-and-longitude.htm>)网站提供的经纬度批量查询功能<sup>[14]</sup>, 以确定经纬度坐标, 输出地址级别为: 区县级别。

**环境变量选取** 本研究选取的环境变量因子有温度相关(Bio01~Bio11)、降水量相关(Bio12~Bio19)的 19 个生物气候因子<sup>[15]</sup>和 7 个单月数据(如太阳辐射、风速、水蒸汽压<sup>[16]</sup>等)(表 1)。26 个环境变量从世界气象数据库(<http://www.worldclim.org/>)中下载。将所有图层进行 ASCII 格式转换备用。

**数据处理** 采用缓冲区分析法对假臭草分布数据进行筛选和校对, 排除人为因素导致分布点过多的数据。排除方法: 由于本文采用的空间分辨率为 2.5 are-minutes (约 4.5 km), 故设置缓冲区为 3 km, 两个分布点在同一个缓冲区时, 保留 1 个点<sup>[17]</sup>。根据 Maxent 软件要求, 将收集的假臭草实际分布点按物种名, 分布点经度和纬度顺序排列, 并生成.CSV 格式文件。

### 1.2 方法

**软件来源** Maxent 模型软件在 [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)<sup>[9]</sup>下载, 版本为 3.3.3k。ArcGIS version 10.5 来源于 <http://www.arcgis.com/features/index.html>。地理数据从国家

表 1 用于 Maxent 模型中的环境变量

Table 1 Environment variables in Maxent model

变量 Variable	描述 Describe
Bio1	年平均温 Annual mean temperature (°C)
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly diurnal range (°C)
Bio3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality (°C)
Bio4	温度变化方差 Variation coefficient of temperature
Bio5	最热月份最高温 Max temperature of the warmest month (°C)
Bio6	最冷月份最低温 Min temperature of the coldest month (°C)
Bio7	年温变化范围 Annual range of temperature (°C)
Bio8	最湿季平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter (°C)
Bio9	最干季平均温度 Mean Temperature of the driest quarter (°C)
Bio10	最暖季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter (°C)
Bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter (°C)
Bio12	年平均降水量 Annual precipitation (mm)
Bio13	最湿月份降水量 Precipitation of the wettest month (mm)
Bio14	最干月份降水量 Precipitation of the driest month (mm)
Bio15	降水量变化方差 Variation coefficient of precipitation
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter (mm)
Bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter (mm)
Bio18	最暖季平均降水量 Mean precipitation of the warmest quarter (mm)
Bio19	最冷季平均降水量 Mean precipitation of the coldest quarter (mm)
P <sub>rec</sub> 01-12	1-12 月降水量 Monthly precipitation (mm)
S <sub>rad</sub> 01-12	1-12 月太阳辐射 Monthly solar radiation (kJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
Wind01-12	1-12 月风速 Monthly wind speed (m s <sup>-1</sup> )
V <sub>apr</sub> 01-12	1-12 月水蒸汽压 Monthly water vapor pressure (kPa)
T <sub>min</sub> 01-12	1-12 月最低温 Monthly minimum temperature (°C)
T <sub>max</sub> 01-12	1-12 月最高温 Monthly maximum temperature (°C)
T <sub>avg</sub> 01-12	1-12 月均温 Monthly average temperature (°C)

基础地理信息系统数据(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)中获得 1:400 万中国地图和中国行政区划图作为底图<sup>[18]</sup>。

**环境变量相关性的检验和筛选** 使用刀切法来判断环境变量对假臭草分布的影响<sup>[19]</sup>。利用 Maxent 模型进行预测时,并非所有的环境变量都对假臭草的分布预测具有影响,因此,需要剔除贡献率低的环境变量后,保留贡献率大于 1.0%的变量进行模型拟合<sup>[20-22]</sup>。使用 Arcgis 的 Spatial Analyst Tools 的 Extract Value to Point 功能将 269 个分布点所对应的环境变量值提取后,用 Spearman 相关系数法计算剩余的环境变量间的相关性,如果相关系数大于 0.8,则二者之间存在共线性关系,只需要保留 1 个环境因子<sup>[23]</sup>。

**模型运行** 将假臭草分布点数据和环境变量数据分别导入 Maxent 软件的“Samples”和“Environment layers”,随机选取 75%的分布点作为训练集(training data)用于模型的建立,剩余的分布点作为测试集(test data),模型迭代 500 次,从而获得 Praxelis-clematidea.asc 文件。将 Praxelis-clematidea.asc 文件导入 ArcGIS 中,用 Extract by Mask 提取出中国及福建省的预测结果。将模型输出的 ASCII 文件

栅格化,利用 Spatial Analyst Tools 里的 Reclassify 功能进行重分类,根据适生区值的大小,将假臭草潜在分布区依次划分为 4 个等级:适生值 <0.12 为非适生区、0.12~0.25 为低适生区、0.25~0.5 为中适生区、>0.5 为高适生区<sup>[24]</sup>。

**Maxent 模型的精度检测** 用受试者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法来检验<sup>[25-27]</sup>。分别以 1-特异性和灵敏度为横坐标和纵坐标,ROC 与横坐标围成的面积即为 AUC (area under curve)值<sup>[28-29]</sup>。为了确定该模式的可靠性,需要对 AUC 值进行评估,一般认为 AUC 值越接近 1,表明所使用的环境变量预测的结果越准确<sup>[30]</sup>。一般认为 0.5~0.6 为预测失败、0.6~0.7 为预测结果较差、0.7~0.8 为预测结果一般、0.8~0.9 为预测结果良好、大于 0.9 表明预测结果优秀<sup>[31-32]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 假臭草在福建及中国的分布情况

本次共调查了福建省 9 个地级市中的 15 个市辖区、12 个县级市、39 个县,共计 66 个县(市、区),

共记录入侵植物分布信息 4 049 条(图 1: A), 其中假臭草分布点信息 179 个。将相近点进行合并, 最终获得 80 个假臭草在福建省的分布点(图 1: B)。将文献和网站中查询到的假臭草分布点与实地考察的分布点进行合并, 最终获得 269 个分布点(图 2)。

### 2.2 ROC 曲线对 Maxent 模型预测结果的精度检测

使用全部环境变量对假臭草分布情况进行预测, 获得 ROC 曲线和 AUC 值, 基于所有环境变量(图 3: A)和主导环境变量(图 3: B)所构建的模拟训

练集和验证数据的 AUC 分别为 0.982 和 0.967, 0.975 和 0.971, 表明预测结果优秀。

### 2.3 影响假臭草分布的环境变量

根据环境变量对假臭草的贡献率, 筛选出 16 个贡献值大于 1.00% 的环境变量, 随后用 Spearman 相关性检测各环境变量间的相关性(表 2), 并剔除相关性大于 0.8 的环境变量, 最终获得 7 个主要的环境变量, 并通过 Maxent 模型分析 7 个环境变量对假臭草潜在分布区的贡献率, 以揭示各环境变量的

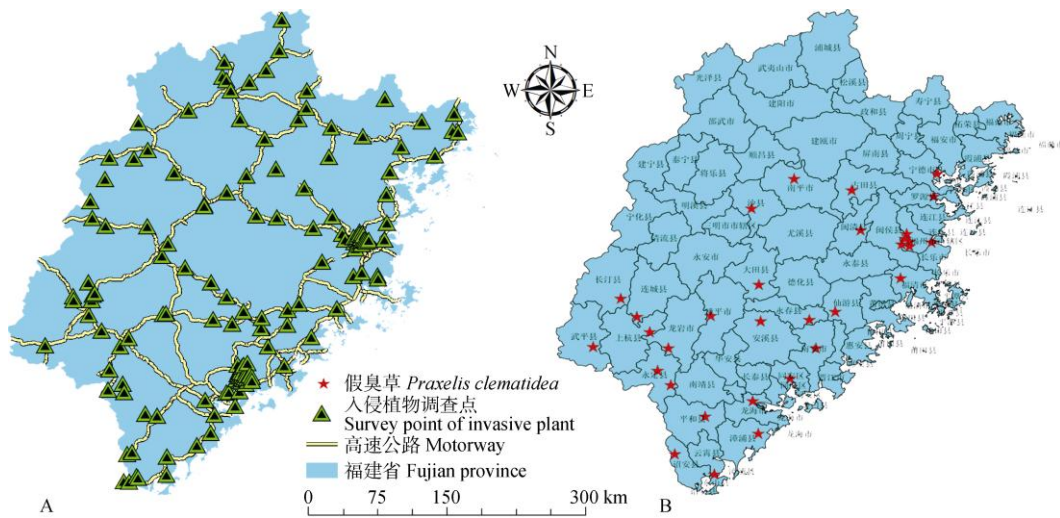


图 1 福建省假臭草分布调查。A: 调查点; B: 分布点。

Fig. 1 Distribution of *Praxelis clematidea* in Fujian Province. A: Investigation area; B: Distribution.

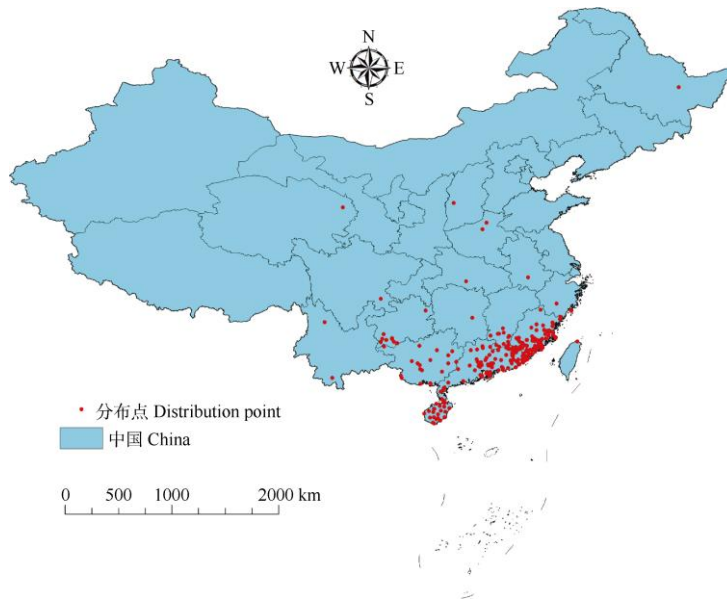


图 2 假臭草在中国的已知分布

Fig. 2 Distribution of *Praxelis clematidea* in China

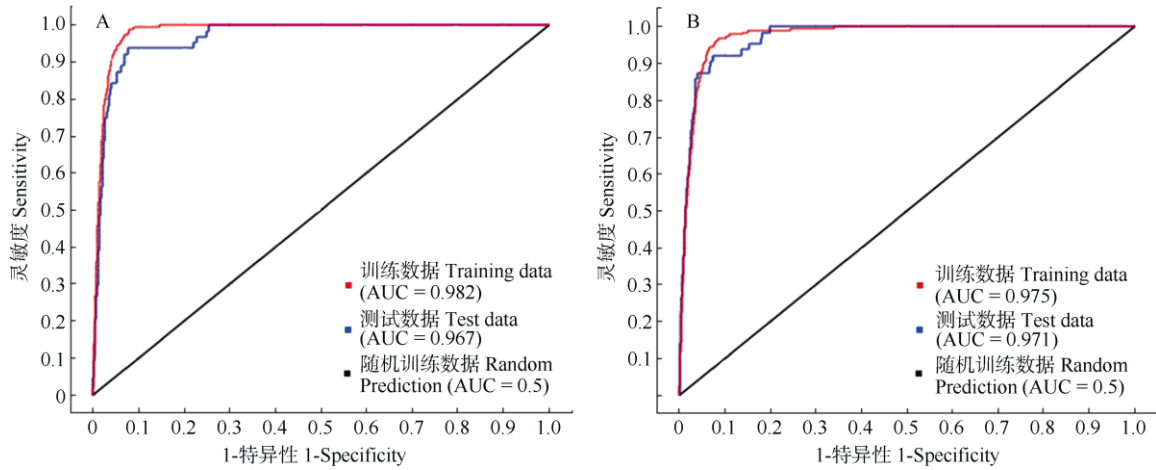


图 3 Maxent 模型对假臭草预测结果的 ROC 曲线验证。A: 基于所有环境变量; B: 基于主导环境变量。

Fig. 3 ROC curve verification of distribution of *Praxelis clematidea* predicted by Maxent model. A: Based on all environment variables; B: Based on major environment variables.

表 2 环境变量间的 Spearman 相关系数

Table 2 Pair-wise Spearman's correlation coefficients among environment variables

	Bio16	Bio17	T <sub>min</sub> 02	S <sub>rad</sub> 05	P <sub>rec</sub> 07	P <sub>rec</sub> 05
Bio17	0.249					
T <sub>min</sub> 02	0.471	-0.412				
S <sub>rad</sub> 05	-0.354	-0.616	0.191			
P <sub>rec</sub> 07	0.728	-0.232	0.635	-0.053		
P <sub>rec</sub> 05	0.705	0.709	0.024	-0.771	0.311	
T <sub>max</sub> 09	0.347	0.056	0.650	-0.163	0.370	0.338

相对重要性。结果表明, 2 月最低温(T<sub>min</sub>02)是影响假臭草分布的主要环境变量, 贡献率高达 61.70%; 其次最干季降水量(Bio17)和 9 月最高温(T<sub>max</sub>09)对假臭草分布的贡献率合计为 28.20%; 影响较小的环

境变量为 5 月太阳辐射(S<sub>rad</sub>05)、5 月降水量(P<sub>rec</sub>05)、7 月降水量(P<sub>rec</sub>07)和最湿季降水量(Bio16), 贡献率合计为 10.1%。

刀切法分析结果表明(图 5)可以看出, 2 月最低温是影响假臭草分布的主要变量, 其训练增益超过 2.0; 最干季降水量、9 月最高温和 5 月降水量是影响假臭草分布的次要环境变量, 训练增益超过 1.4。另外 3 种环境变量的重要性依次为最湿季降水量 > 5 月太阳辐射 > 7 月降水量。这与相对贡献率的结果一致, 所选的环境变量能够较好的反映和刻画其生长特性。

### 2.4 假臭草在福建省和中国的适生区预测

Maxent 模型能够很好地预测假臭草的分布区域。预测结果表明, 假臭草的潜在适生面积为

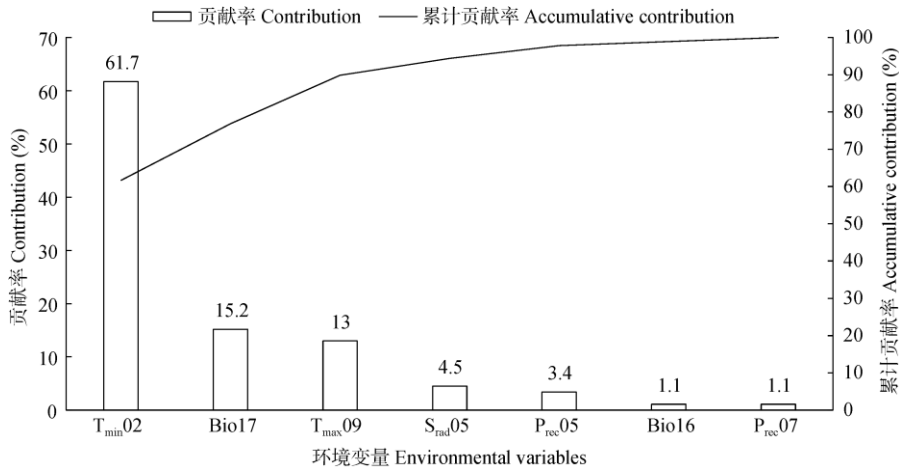


图 4 影响假臭草分布的主要环境变量及其贡献率

Fig. 4 Main environmental variables and their contribution rates affected distribution of *Praxelis clematidea*

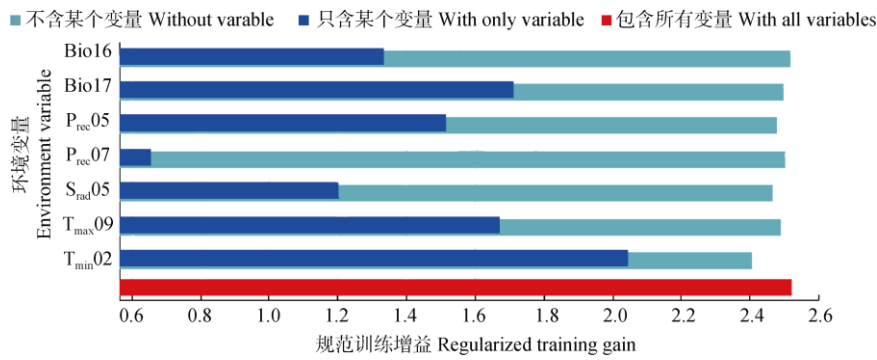


图 5 刀切法检测主要环境变量对假臭草在中国分布影响的重要程度

Fig. 5 Importance of major environmental variables on distribution of *Praxelis clematidea* in China by Jackknife test

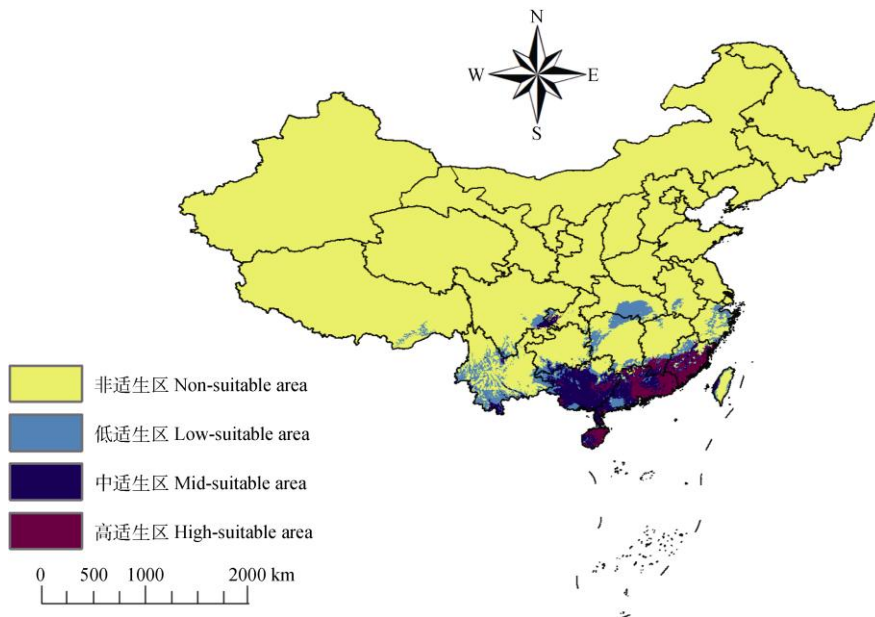


图 6 基于 Maxent 模型预测的假臭草在中国的分布

Fig. 6 Potential distribution of *Praxelis clematidea* in China based on Maxent model

785 985 km<sup>2</sup>, 占总国土面积的 8.19%, 其中高适生区面积为 162 288 km<sup>2</sup>, 中适生区面积为 279 364 km<sup>2</sup>, 低适生区面积为 334 332 km<sup>2</sup>。假臭草主要分布在华南及东南区域, 福建、广东、海南和广西为假臭草的中高适生区(图 6); 福建省东南区域、广东、海南和台湾西部沿海区域均为假臭草的高适生区。

福建省为假臭草分布的高适生区, Maxent 模型运行结果表明, 假臭草在福建省的潜在适生面积为 7 685 km<sup>2</sup>, 占福建省总面积的 61.98%, 其中高适生区面积为 5 700 km<sup>2</sup>, 约占 45.97%, 中适生区面积为 2 210 km<sup>2</sup>, 低适生区面积为 1 760 km<sup>2</sup>。从图 7 可知, 福建省为假臭草分布的高危区域, 闽南沿海区域为假臭草的高适生区, 而在闽北区域假臭草的种群密度较低。

### 2.5 假臭草分布区域的生态特征

对假臭草分布起主要作用的环境变量是 2 月最低温, 其次是最干季降水量和 9 月最高温。根据气候因子相应曲线可判断假臭草存在概率与环境变量值间的关系。一般认为, 当分布概率大于 0.5 时, 其对应生态因子值适合假臭草的生长。

由图 8 可知, 当 2 月最低温度均值 <5℃ 时, 假臭草的分布概率几乎为零, >5℃ 时, 分布概率急剧上升, 在 18℃ 时达到顶峰, 当 9 月最高温为 31℃ 时, 达到假臭草的最适生长条件。以存在 >0.5 概率为适宜范围, 假臭草生长的最低温为 6℃, 适宜的最高温为 29℃~33℃, 即假臭草全年适合生长的温度为 6℃~33℃。



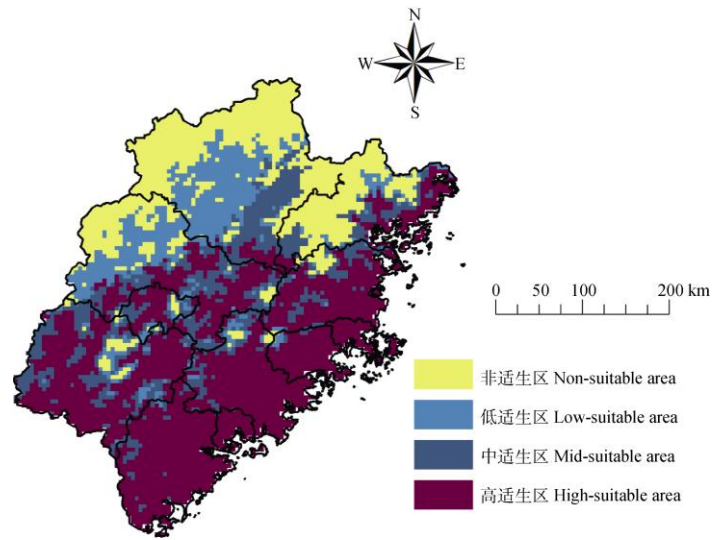


图 7 假臭草在福建省的分布预测

Fig. 7 Potential distribution of *Praxelis clematidea* in Fujian province based on Maxent model

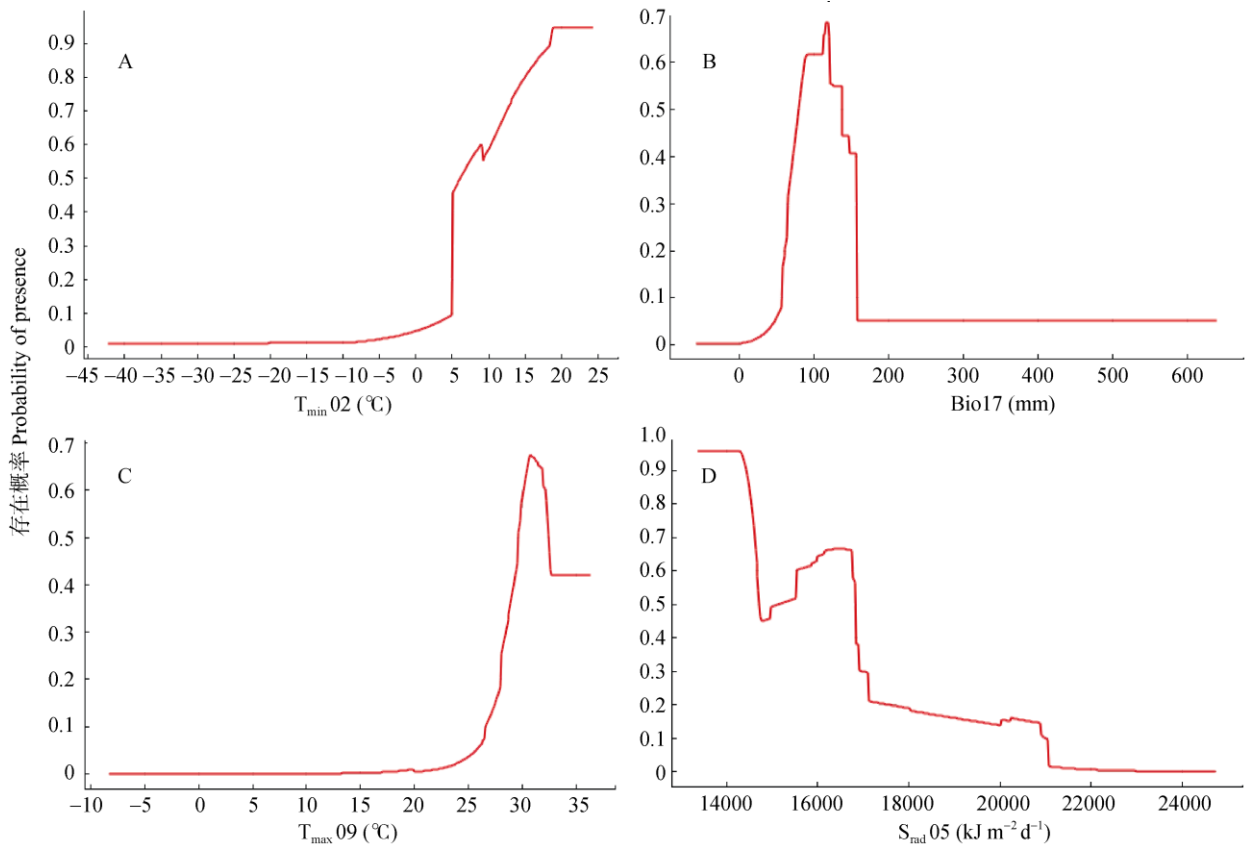


图 8 主要环境变量的响应曲线

Fig. 8 Response curves of main environment factors

最干季降水量达 120 mm 时,假臭草的分布概率达到顶峰。以存在 >0.5 概率为适宜范围,最干季降水量为 90~130 mm; 5、7 月份的降水量为 >160 mm; 最湿季降水量 600~1 000 mm。因此,假臭草在降

水量 90~1 000 mm 时可以生长。

当太阳辐射 <14 300 kJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> 时,假臭草的分布概率达到顶峰,随后开始下降,并在 15 000~17 000 kJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> 间,分布概率上升,随后开始直

线下降。以存在  $>0.5$  概率为适宜范围, 太阳辐射  $<17\ 000\ \text{kJ}\ \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$  时适合假臭草的生长及分布。

### 3 讨论

本研究采用的假臭草分布点数据来源于实地考察、文献和标本信息, 因此, 对建模的分布点数据具有很好的代表性。最大熵值法(Maxent)具有对样本的需求量小, 操作简单和预测精度高等优势<sup>[17]</sup>。基于 Maxent 生态位模型, 将分布数据和环境参数进行结合, 能够找出物种分布规律的最大熵, 结合 ArcGIS 软件<sup>[33]</sup>预测假臭草的潜在分布区在华南及东南的几个省份, 如福建、广东、海南和广西省等。预测区域与我国现今假臭草调查点基本符合。预测结果还表明在浙江、湖南、湖北、四川和云南省等局部区域为适生区, 该预测结果比 Domain 模型和 GARP 模型<sup>[8]</sup>的预测结果更符合假臭草的实际发生状况。

由于 AUC 不受诊断阈值的影响, 且在所有阈值范围内均能提供评价结果, 因此, AUC 法被公认为精度最佳的评价指标<sup>[17,34]</sup>。本研究基于全部环境变量和主导环境变量的模拟训练集 AUC 大于 0.9 (非常接近 1), 预测结果达到“优秀”水平, 说明 Maxent 模型对假臭草的分布预测结果具有较高的可信度<sup>[26]</sup>。

全球气候变化已经对人类社会和自然的各方面造成了巨大影响, 气候变量对物种的分布具有主要的影响<sup>[35]</sup>。温度作为对植物生长发育最重要的外界环境因素之一, 在植物生长发育全过程中起到重要调节作用。本研究基于相关性分析和环境变量的贡献率情况, 用刀切法进行检验, 表明 2 月最低温对假臭草分布预测的贡献率达 61.70%, 可能是影响假臭草分布的限制性变量。低温在种子萌发和幼苗建植期对植株的影响尤其明显, 同时还影响植物的光合作用和生理代谢(如酶活性、相对离子渗透率)<sup>[36-37]</sup>。假臭草种子在低温( $5^{\circ}\text{C}$ )时不能发芽<sup>[38]</sup>, 其种子萌发的生物学零度为  $12.56^{\circ}\text{C}$ <sup>[39]</sup>。9 月最高温对假臭草分布的相对贡献率为 13%, 也是影响假臭草分布的重要因素。假臭草在  $35^{\circ}\text{C}$  以上发芽率明显下降,  $50^{\circ}\text{C}$  时不能发芽<sup>[36]</sup>, 在高温( $30^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$ )和极端高温( $40^{\circ}\text{C}/35^{\circ}\text{C}$ )环境下, 入侵植物五爪金龙(*Ipomoea cairica*)、三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、空心莲子草(*Alernanthera philoxeroides*)和白花鬼针

草(*Bidens alba*)的生长都受到抑制<sup>[40]</sup>。因此, 假臭草对 2 月最低温和 9 月最高温变化的敏感性表明低温和高温均可能对植株生长产生影响, 相关研究有待深入。

除 2 月最低温和 9 月最高温, 环境变量中最干旱季降水量对假臭草分布的相对贡献率为 15.2%, 也是影响假臭草分布的重要因素。在海南, 假臭草在干旱的西部以及比较湿润的东部分布较多<sup>[41]</sup>, 在干旱胁迫下, 假臭草体内的丙二醛、脯氨酸和叶绿素含量等均发生了不同程度的变化<sup>[42]</sup>, 说明最干旱季降水量可能对假臭草的分布产生影响。

本研究中使用的 Maxent 模型是基于理想生态位而进行预测的, 只考虑了非生物因素的影响<sup>[43]</sup>, 但在实际情况中, 还需要考虑生物因素, 比如种间关系, 地质地貌, 土壤类型等<sup>[44]</sup>。因此, 预测结果与假臭草的实际分布区域会有一定偏差。除环境变量外, 还应该增加其它生物因素变量, 以改善模型的预测结果, 这还有待于深入研究。

**致谢** 感谢福建省农业科学院数字农业研究所赵健研究员、陈宏助理研究员和福建省农业科学院植物保护研究所邱荣洲副研究员等开发的云采集软件在数据采集中提供的支持。

### 参考文献

- [1] WANG Z H, CHEN Q B, GUO Z L, et al. Detection and PCR-RFLP analysis of 16S ribosomal DNA of phytoplasma associated with witches' broom of *Praxelis clematidea* [J]. Chin J Trop Crops, 2007, 28(4): 51-66. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2007.04.011.  
王真辉, 陈秋波, 郭志立, 等. 假臭草从枝病植原体 16S rDNA 检测与 PCR-RFLP 分析 [J]. 热带作物学报, 2007, 28(4): 51-56. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2007.04.011.
- [2] ABBOTT J R, WHITE C L, DAVIS S B. *Praxelis clematidea* (Asteraceae), a genus and species new for the Flora of North America [J]. J Bot Res Inst Texas, 2008, 2(1): 621-626.
- [3] WU H R, HU X N, ZHONG G Q, et al. Characteristics of an alien weed: *Eupatorium catarium* Veldkamp [J]. Weed Sci, 2008(3): 69-71. doi: 10.3969/j.issn.1003-935X.2008.03.023.  
吴海荣, 胡学难, 钟国强, 等. 外来杂草假臭草的特征特性 [J]. 杂草科学, 2008(3): 69-71. doi: 10.3969/j.issn.1003-935X.2008.03.023.
- [4] CORLETT R T, SHAW J C. *Praxelis clematidea*: Yesterday South America, today Hong Kong, tomorrow the world? [J]. Mem Hong Kong Nat Hist Soc, 1995, 20(1): 235-236.



- [5] LIU J F, LIU Q, LI C L, et al. Distribution of invasive plants *Eupatorium catarium* along different levels of the highways in Haikou city [J]. Guangdong Agric Sci, 2011, 38(23): 1–5. doi: 10.3969/j.issn.1004–874X.2011.23.001.  
刘吉峰, 刘强, 李朝林, 等. 外来入侵植物假臭草在海口各级公路分布的初步研究 [J]. 广东农业科学, 2011, 38(23): 1–5. doi: 10.3969/j.issn.1004–874X.2011.23.001.
- [6] LIU G. The third list of invasive species from China has been officially announced [J]. Pestic Mark New, 2014(25): 44.  
刘刚. 第三批中国外来入侵物种名单正式公布 [J]. 农药市场信息, 2014(25): 44.
- [7] MAO R Q, YANG W C, HAN S C, et al. A new invasive exotic weed of citrus orchard: *Eupatorium catarium* [J]. S China Fruits, 2008, 37(5): 27–29. doi: 10.13938/j.issn.1007–1431.2008.05.001.  
毛润乾, 杨伟成, 韩诗畴, 等. 柑桔园新入侵性杂草——假臭草 [J]. 中国南方果树, 2008, 37(5): 27–29. doi: 10.13938/j.issn.1007–1431.2008.05.001.
- [8] QIU C H, WANG Q Z, YU Y. Predicted potential distribution of *Praxelis clematidea* in China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2011, 17(6): 774–781. doi: 10.3724/SP.J.1145.2011.00774.  
邱宠华, 王奇志, 余岩. 外来入侵假臭草在中国分布区的预测 [J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 774–781. doi: 10.3724/SP.J.1145.2011.00774.
- [9] PHILLIPS S J, DUD K M, SCHAPIRE R E. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1) [EB/OL]. [2018–02–05] [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent).
- [10] WANG Y S, XIE B Y, WAN F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. Biodiv Sci, 2007, 15(4): 365–372. doi: 10.3321/j.issn:1005–0094.2007.04.005.  
王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372. doi: 10.3321/j.issn:1005–0094.2007.04.005.
- [11] ZHANG H J, CHEN Y, HUANG L J, et al. Predicting potential geographic distribution of *Mikania micrantha* planting based on ecological niche models in China [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2011, 27(S1): 413–418.  
张海娟, 陈勇, 黄烈健, 等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 413–418.
- [12] PADALIA H, SRIVASTAVA V, KUSHWAHA S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: comparison of Maxent and GARP [J]. Ecol Inform, 2014, 22: 36–43. doi: 10.1016/j.ecoinf.2014.04.002.
- [13] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1861–2010 Codes of practice for general surveys of herbaceous alien plants [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.  
中华人民共和国农业部. NY/T 1861–2010 外来草本植物普查技术规程 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [14] SUN X W. Characteristics of regional economic growth in China and regional comparisons based on spatial econometric perspective [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012: 10–13.  
孙向伟. 基于空间计量经济视角的中国区域经济增长特征与地区比较 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 10–13.
- [15] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. Int J Climatol, 2005, 25(15): 1965–1978. doi: 10.1002/joc.1276.
- [16] LUO K H, FU X Y, ZHOU X. Prediction of the potential geographic distribution of *Taiwania flousiana* in Yunnan based on Maxent and GIS [J]. For Invent Plan, 2017, 42(4): 7–10, 16. doi: 10.3969/j.issn.1671–3168.2017.04.002.  
罗开华, 付小勇, 周晓. 基于 Maxent 和 GIS 的云南秃杉潜在分布区预测 [J]. 林业调查规划, 2017, 42(4): 7–10, 16. doi: 10.3969/j.issn.1671–3168.2017.04.002.
- [17] WANG R L, LI Q, FENG C H, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using Maxent ecological niche modeling [J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(24): 8556–8566. doi: 10.5846/stxb201611152326.  
王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8556–8566. doi: 10.5846/stxb201611152326.
- [18] GAO W Q, WANG X F, JIANG Z P, et al. Impact of climate change on the potential geographical distribution pattern and dominant climatic factors of *Quercus variabilis* [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(14): 4475–4484. doi: 10.5846/stxb201412012387.  
高文强, 王小菲, 江泽平, 等. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子 [J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4475–4484. doi: 10.5846/stxb201412012387.
- [19] LIU J H, XIONG X Z, PAN Y Z, et al. Prediction of potential geographical distribution of seed chalcids, *Megastigmus duclouxiana* Roques & Pan [J]. Chin Agric Sci Bull, 2011, 27(10): 39–43.  
刘建宏, 熊小真, 潘涌智, 等. 滇柏大瘿小蜂 *Megastigmus duclouxiana* Roques & Pan 的潜在分布区预测 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 39–43.
- [20] LI L H, LIU H Y, LIN Z S, et al. Identifying priority areas for monitoring the invasion of *Solidago canadensis* based on Maxent and Zonation [J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(9): 3124–3132. doi: 10.5846/stxb201601260182.

- 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 等. 基于 Maxent 和 Zonation 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定 [J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3124–3132. doi: 10.5846/stxb201601260182.
- [21] WEN J, LÜ X M, HONG D X, et al. Potential distribution of *Rhodiola crenulata* in Tibetan Plateau based on Maxent model [J]. China J Chin Mat Med, 2016, 41(21): 3931–3936.
- 文检, 吕秀梅, 洪道鑫, 等. 基于 Maxent 模型的青藏高原大花红景天生态适宜性分析 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(21): 3931–3936.
- [22] GUO J, LIU X P, ZHANG Q, et al. Prediction for the potential distribution area of *Codonopsis pilosula* at global scale based on Maxent model [J]. Chin J Appl Ecol, 2017, 28(3): 992–1000. doi: 10.13287/j.1001-9332.201703.026.
- 郭杰, 刘小平, 张琴, 等. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 992–1000. doi: 10.13287/j.1001-9332.201703.026.
- [23] YANG X Q, KUSHWAHA S P S, SARAN S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills [J]. Ecol Eng, 2013, 51: 83–87. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.004.
- [24] LIU X Y, LI J S, ZHAO C Y, et al. Prediction of potential suitable area of *Ambrosia artemisiifolia* L. in China based on Maxent and ArcGIS [J]. J Plant Prot, 2016, 43(6): 1041–1048. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2016.06.023.
- 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 等. 基于 Maxent 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区 [J]. 植物保护学报, 2016, 43(6): 1041–1048. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2016.06.023.
- [25] WANG R, WAN F H. Prediction of the potential survival area of *Xanthium italicum* in China [J]. Acta Pratacult Sin, 2010, 19(6): 222–230.
- 王瑞, 万方浩. 外来入侵植物意大利苍耳在我国适生区预测 [J]. 草业学报, 2010, 19(6): 222–230.
- [26] TAN Y F, ZUO X Q. Studies on potential suitable growth areas and protection of *Camellia nitidissima* based on GIS and Maxent model [J]. J Trop Subtrop Bot, 2018, 26(1): 24–32. doi: 10.11926/jtsb.3796.
- 谭钰凡, 左小清. 基于 GIS 与 Maxent 模型的金花茶潜在适生区与保护研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(1): 24–32. doi: 10.11926/jtsb.3796.
- [27] ZHANG Q, ZHANG D F, WU M L, et al. Predicting the global areas for potential distribution of *Gastrodia elata* based on ecological niche models [J]. Chin J Plant Ecol, 2017, 41(7): 770–778. doi: 10.17521/cjpe.2016.0380.
- 张琴, 张东方, 吴明丽, 等. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(7): 770–778. doi: 10.17521/cjpe.2016.0380.
- [28] XI C, MU L, LI S, et al. MaxEnt modeling and ArcGIS for predicting the potential distribution of *Pistia stratiotes* L. in Yunnan Province [J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci), 2018, 33(1): 7–16.
- 喜超, 木霖, 李胜, 等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测大藻在云南的潜在适生区 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 7–16.
- [29] WANG Y L, LI H, YANG X, et al. Prediction of geographical distribution of *Vitex trifolia* var. *simplicifolia* under climate change based on the Maxent model [J]. Acta Pratacult Sin, 2017, 26(7): 1–10.
- 王亚领, 李浩, 杨旋, 等. 基于 Maxent 模型和不同气候变化情景的单叶蔓荆潜在地理分布预测 [J]. 草业学报, 2017, 26(7): 1–10.
- [30] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240(4857): 1285–1293. doi: 10.1126/science.3287615.
- [31] GONG Y Y, JIA X X, ZHU Q Q, et al. Potential distribution of *Ipomoea cairica* in China under climate change [J]. J NW Agric For Univ (Nat Sci), 2018, 46(6): 115–123. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.06.015.
- 龚岩岩, 贾晓霞, 朱倩倩, 等. 气候变化背景下五爪金龙在中国的潜在适生区预测 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 115–123. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.06.015.
- [32] VANAGAS G. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg, 2004, 3(2): 319–322. doi: 10.1016/j.icvts.2004.01.008.
- [33] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of Maxent for ecologists [J]. Divers Distrib, 2011, 17(1): 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.
- [34] SONG H L. Evaluation study and application of ROC curve [D]. Shanghai: The Second Military Medical University, 2006: 14–20.
- 宋花玲. ROC 曲线的评价研究及应用 [D]. 上海: 第二军医大学, 2006: 14–20.
- [35] SUTHERST R W. Climate change and invasive species: A conceptual framework [M]// MOONEY H A, HOBBS R J. Invasive Species in a Changing World. Washington, DC: Island Press, 2000: 211–240.
- [36] DU Y D, DUAN S P, CHEN X G, et al. Effects of low temperature stress on germination of tomato seeds [J]. Chin J Ecol, 2010, 29(6): 1109–1113.
- 杜尧东, 段世萍, 陈新光, 等. 低温胁迫对番茄种子萌发的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1109–1113.
- [37] YANG Z Q, ZHANG B, ZHANG J B, et al. Effects of low temperature stresses on photosynthetic characteristics and activity of antioxidant enzymes of tomatoes [J]. J Nat Disasters, 2012, 21(4): 168–174. doi: 10.13577/j.jnd.2012.0424.
- 杨再强, 张波, 张继波, 等. 低温胁迫对番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 168–174. doi: 10.13577/j.jnd.2012.0424.
- [38] KAN L Y, XIE G S, AN F, et al. Seeds germination of invasive plant

- Eupatorium catarium* and its prevention countermeasures in Hainan Province [J]. *Guangxi Agric Sci*, 2008, 39(1): 46–50. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2008.01.012.
- 阚丽艳, 谢贵水, 安锋, 等. 海南省入侵植物假臭草种子萌芽分析及其防治对策 [J]. *广西农业科学*, 2008, 39(1): 46–50. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2008.01.012.
- [39] CHEN W. The biological zero and accumulated temperature for seed germination of six Asteraceae species in eastern Guangdong [J]. *J NW Norm Univ (Nat Sci)*, 2016, 52(4): 93–98. doi: 10.16783/j.cnki.nwnuz.2016.04.020.
- 陈文. 粤东 6 种菊科植物种子萌发的生物学零度和积温 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 93–98. doi: 10.16783/j.cnki.nwnuz.2016.04.020.
- [40] LI X N. High temperature on the photosynthetic ecophysiological characteristics of four alien invasive plants in south China [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- 李晓娜. 高温对华南 4 种入侵植物光合生理的影响 [D]. 广州: 广州大学, 2017.
- [41] KAN L Y, XIE G S, AN F, et al. Analyses of the germination in the invasive plant *Eupatorium catarium* seeds in Hainan Province [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(2): 425–432.
- 阚丽艳, 谢贵水, 安锋, 等. 海南省入侵植物假臭草种子萌芽分析 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(2): 425–432.
- [42] KAN L Y, XIE G S, WANG J K. Effect of drought stress on the growth and eco-physiologic characteristics of invasive plant *Eupatorium catarium* seedlings [J]. *Chin J Trop Crops*, 2009, 30(5): 608–612. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2009.05.010.
- 阚丽艳, 谢贵水, 王纪坤. 干旱胁迫对入侵植物假臭草幼苗生长和生理生态指标的影响 [J]. *热带作物学报*, 2009, 30(5): 608–612. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2009.05.010.
- [43] CAI J Y, ZHANG M M, SU H J, et al. Application of ecological niche models for selection of species habitat [J]. *J Econ Anim*, 2014, 18(1): 47–52, 58. doi: 10.13326/j.jea.2014.0012.
- 蔡静芸, 张明明, 粟海军, 等. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究 [J]. *经济动物学报*, 2014, 18(1): 47–52, 58. doi: 10.13326/j.jea.2014.0012.
- [44] QIAO H J, HU J H, HUANG J H. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models [J]. *Sci Sin Vitae*, 2013, 43(11): 915–927. doi: 10.1360/052013-192.
- 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(11): 915–927. doi: 10.1360/052013-192.