

谢静, 段妮杉, 孔莉洁, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的入侵杂草肿柄菊和金腰箭在中国的潜在适生区预测 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(5): 649-658.
XIE Jing, DUAN Nishan, KONG Lijie, et al. Potential suitable area prediction of invasive weeds *Tithonia diversifolia* A. Gray and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. in China based on the optimized MaxEnt model[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(5): 649-658.

基于优化 MaxEnt 模型的入侵杂草肿柄菊和金腰箭 在中国的潜在适生区预测

谢静, 段妮杉, 孔莉洁, 徐瑞漪, 安若玉, 周利娟

(华南农业大学 植物保护学院/绿色农药国家重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究外来入侵杂草肿柄菊 *Tithonia diversifolia* A. Gray 和金腰箭 *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. 在中国的当前适生区和潜在适生区, 以及影响肿柄菊和金腰箭分布的主要环境变量, 为监测这 2 种杂草的入侵和掌握其扩散分布规律提供理论参考。【方法】对物种分布数据进行拟合分析, 对环境变量进行相关性分析, 使用 ENMeval 对物种分布数据进行模型优化, 将得到的分布数据、环境变量、正则化参数 (Regularization multiplier, RM) 和特征组合参数 (Feature combination multiplier, FC) 导入 MaxEnt 模型进行分布预测, 然后用 ArcGIS 软件绘制当前及潜在分布适生区。【结果】温度季节变化标准差、最冷季度平均温度是影响肿柄菊分布的主要环境变量, 贡献率之和为 70.8%; 年均温度变化范围、年均降水量、最湿月降水量是影响金腰箭分布的主要环境变量, 贡献率之和达 76.7%。这 2 种植物的中、高适生区位于我国西藏南部、云南、广西、广东、福建、海南和台湾。【结论】已成功入侵中国的肿柄菊和金腰箭目前主要分布在中国南部热带亚热带一些区域, 预测有向内陆逐步扩张的趋势, 今后要加强防范。

关键词: 肿柄菊; 金腰箭; MaxEnt 模型; 潜在适生区; 杂草入侵

中图分类号: S451

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)05-0649-10

Potential suitable area prediction of invasive weeds *Tithonia diversifolia* A. Gray and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. in China based on the optimized MaxEnt model

XIE Jing, DUAN Nishan, KONG Lijie, XU Ruiyi, AN Ruoyu, ZHOU Lijuan

(College of Plant Protection, South China Agricultural University/State Key Laboratory
of Green Pesticide, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 This paper aims to study the current and the potential suitable areas of the alien invasive weeds *Tithonia diversifolia* A. Gray and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. in China, and to explore the main environmental variables affecting the distribution of these two plants. It provides a theoretical reference for the invasion monitoring of these two invasive weeds and for mastering their diffusion and distribution patterns. 【Method】 Fit analysis on the species distribution data and correlation analysis on the environmental

收稿日期: 2025-01-15 网络首发时间: 2025-05-12 17:34:33

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20250512.1609.002>

作者简介: 谢静, E-mail: 3463431402@qq.com; 通信作者: 周利娟, 主要从事入侵杂草防控及植物源除草剂等方面研究,
E-mail: zhoulj@scau.edu.cn

基金项目: 广东省农业领域共性关键技术研发创新团队岗位专家项目 (2019KJ134)

variables were employed, and ENMeval was used to optimize the model of the species distribution data. The obtained distribution data, environmental variables, regularization multiplier (RM) and feature combination multiplier (FC) were imported into MaxEnt model for distribution prediction. Then, ArcGIS was used to obtain the current and potential suitable distribution areas. 【Result】 The standard deviation of temperature seasonal change and the average temperature in the coldest quarter were the main environmental variables affecting the distribution of *T. diversifolia*, and the sum of their contribution rates reached 70.8%. The range of annual average temperature change, annual average precipitation and precipitation in the wettest month were the main environmental variables affecting the distribution of *S. nodiflora*, with the sum of their contribution rates reaching 76.7%. The moderate and high suitable areas of these two plants were distributed in southern Tibet, Yunnan, Guangxi, Guangdong, Fujian, Hainan and Taiwan of China. 【Conclusion】 Both *T. diversifolia* and *S. nodiflora* have successfully invaded China, and are currently mainly distributed in some tropical and subtropical areas in southern China. It is predicted that they have a trend of gradually expanding towards the inland. Therefore, stronger precautions should be taken against their invasion.

Key words: *Tithonia diversifolia* A. Gray; *Synedrella nodiflora* L. Gaertn.; MaxEnt model; Potential suitable area; Weed invasion

入侵植物是生物多样性丧失的主要原因之一,相较于本土植物,入侵植物在捕获阳光、争夺土壤水分及养分等方面优势显著,具有更强的竞争能力^[1-2]。如今全球几乎所有区域都受到入侵植物的影响,入侵植物给各地生态系统的平衡与稳定带来极大冲击^[3]。中国生态系统高度多样化,也是植物入侵较严重的国家之一^[4]。入侵杂草众多,其中以菊科最多,多数来源于美洲,肿柄菊 *Tithonia diversifolia* A. Gray 和金腰箭 *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. 位列其中^[5-6]。

肿柄菊和金腰箭原产于中南美洲,现广泛分布于云南、华南等地^[7-8]。肿柄菊入侵后形成密实的大面积单优势种群落^[7],其植株构件间的生长关系随着群落环境变化而改变,有利于入侵不同环境,增强适应环境的能力^[9]。金腰箭入侵后通过高种子产量和快速营养生长扩张种群^[10]。二者常见于农田、路边、林地及河岸等生境,通过生态位竞争严重危害农作物生产,并威胁区域生物多样性^[4,11]。

鉴于肿柄菊和金腰箭的入侵特性及扩散威胁,准确预测其潜在适生区成为生态防控的关键。最大熵模型 (Maximum entropy models, MaxEnt) 是一种物种分布预测的常用软件,只需要物种分布和环境数据,就可以统计分析出物种的当前和未来分布,且只需要少量样本就可以达到较高的精确度^[12],该模型被广泛应用于植物的各种分布区域的模拟,是外来物种潜在适生区预测的首选模型^[13]。本研究通过 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件等对影响入侵植物肿柄菊和金腰箭分布的主导气候因子进行分析,使

用受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic, ROC) 评价模型预测的准确性,并对其当前和未来 (至 2040 年) 不同气候条件下在中国的潜在适生分布区进行研究,以期对肿柄菊和金腰箭这 2 种杂草在中国的生态治理提供可靠的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 物种分布预测方法

物种分布预测方法参考当前主流方法^[14-15]进行,主要包括数据的查找与处理、模型的优化及构建、可视化地图的制作等。首先进行物种分布点收集及处理,继而查找对物种分布产生影响的各类环境因子,并运用 SPSS 软件进行相关性分析,同时使用 ENMeval 对模型进行优化,随后构建 MaxEnt 模型,最终借助 ArcGIS 软件绘制可视化图。

1.2 采用的软件和程序

MaxEnt 软件 3.4.1 版、ArcGIS 软件 10.4.1 版、SPSS Statistics 软件 20.0 版、R 语言 3.6.3 版、ENMeval 程序包以及 Microsoft Excel 2016 版。

1.3 环境变量因子获取

从世界气候数据网站 (<https://www.worldclim.org/>) 下载 2.1 版、分辨率为 5 min (85 km²) 的 1970—2000 年的 19 个生物气候变量 (bio01~bio19) 以及高程 (elev)、坡度 (slope) 和坡向 (aspect) 数据,并于此网站下载国家气候中心系统模式 (BCC-CSM2-MR) 的 4 个气候情景模式 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5) 下 2021—2040 年的世界

范围内 19 个生物气候变量数据 (bio01~bio19), 从联合国粮农组织网站的世界土壤数据库下载

17 个土壤属性变量。总共得到温度、降水量、高程和土壤特征的环境变量数据 39 个 (表 1)。

表 1 环境变量因子
Table 1 Environmental variable factors

变量 Variable	描述 Description	变量 Variable	描述 Description
bio01	年平均温度	elev	高程
bio02	昼夜温差月均值	slope	坡度
bio03	等温性	aspect	坡向
bio04	温度季节变化标准差	awc_class	土壤有效含水量
bio05	最暖月最高温	drainage	土壤排水性
bio06	最冷月最低温	t_bs	表层土壤盐基饱和度
bio07	年均温度变化范围	t_bulk_density	表层土壤容重
bio08	最湿季度平均温度	t_CaCO ₃	表层碳酸钙含量
bio09	最干季度平均温度	t_CaSO ₄	表层硫酸钙含量
bio10	最暖季度平均温度	t_cec_soil	表层土壤阳离子交换能力
bio11	最冷季度平均温度	t_clay	表层黏土含量
bio12	年均降水量	t_ece	表层盐分含量
bio13	最湿月降水量	t_esp	表层碱分含量
bio14	最干月降水量	t_gravel	表层土壤砾石含量
bio15	季节降水量变异系数	t_oc	表层有机碳含量
bio16	最湿季度降水量	t_pH_H ₂ O	表层酸碱度
bio17	最干季度降水量	t_sand	表层和底层沙含量
bio18	最暖季度降水量	t_silt	表层粉沙粒含量
bio19	最冷季度降水量	t_teb	表层交换性盐基
		t_usda_tex_class	表层Usda土壤质地分类

使用 ArcGIS 读取过拟合分析后的物种分布及环境数据, 将提取的环境变量和物种分布数据导入 MaxEnt 模型运行 10 次, 得到环境数据的平均贡献率, 并对提取的环境变量通过 SPSS 进行 Pearson 相关性分析。计算变量间的相关性矩阵, 剔除平均贡献率为 0 的环境变量, 并将相关系数 $R > 0.8$ 的 2 个环境变量中贡献率较低的 1 组舍去。最终, 得到与肿柄菊相关的环境变量因子 25 个: bio02、bio04、bio07、bio10、bio11、bio12、bio14、bio15、bio18、bio19、awc_class、drainage、t_bs、t_CaCO₃、t_CaSO₄、t_cec_soil、t_clay、t_ece、t_esp、t_gravel、t_oc、t_pH_H₂O、t_sand、t_silt、t_teb; 得到与金腰箭相关的变量因子 26 个: bio02、bio04、bio05、bio06、bio07、bio08、bio12、bio13、bio15、bio17、bio18、bio19、awc_class、drainage、t_bs、t_CaCO₃、t_cec_soil、t_clay、t_ece、t_esp、t_gravel、t_oc、t_pH_H₂O、t_sand、t_silt、t_teb。

1.4 物种分布数据拟合分析

通过在中国数字植物标本馆、全球生物多样性

信息网络、中国科学院植物研究所植物标本馆等数字标本库检索目标植物学名, 得到肿柄菊和金腰箭分布点信息, 将相关数据存为 CSV 格式。将去掉无效数据后的物种分布及环境数据通过 ENMeval 软件进行过拟合分析, 对分布数据的经纬度根据栅格大小去掉同一栅格内重复数据, 得到肿柄菊自然分布点 3859 个、金腰箭自然分布点 2402 个。

1.5 标准地图数据获取

从标准地图服务系统 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载 GS(2022)4312 号标准地图。

1.6 物种环境变量因子的分布数据模型优化

使用 R 语言 ENMeval 分别对得到的肿柄菊和金腰箭的环境变量因子进行分布数据模型优化, 将分布数据随机分成 2 部分, 其中, 75% 的数据用于训练集, 25% 的数据用于测试集, 对 MaxEnt 软件中的正则化参数 (Regularization multiplier, RM) 和特征组合参数 (Feature combination multiplier, FC) 进行优化, RM 设置 40 个调控倍频, 从 0.1 到 4.0, 每次增加 0.1。FC 总共有 5 个特征: Linear(L)、

Quadratic(Q)、Hinge(H)、Product(P)、Threshold(T), 设定 29 个特征组合 (H、L、LH、LP、LPH、LPT、LPTH、LQ、LQH、LQP、LQPH、LQPT、LQPTH、LQT、LQTH、LT、P、PH、PT、PTH、Q、QH、QP、QPH、QPT、QT、QTH、T 和 TH), 使用 R 语言程序包对上述 1 160 种参数组合进行测试检验, 用最小赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC) 模型评估 ROC 曲线下面积 (Area under curve, AUC), 用 AUC 评估模拟结果的精确度, 使用 AIC 为“0”的参数组合用于 MaxEnt 模型建模。

1.7 环境变量因子和分布数据的模型运算

分别将肿柄菊和金腰箭相关的环境变量因子和处理后的分布数据输入 MaxEnt 模型, 其中 75% 的分布数据为训练集, 25% 作为测试集, RM 与 FC 选择模型优化后的参数, 制作响应曲线, 分析单个环境变量因子和分布概率之间的关系, 使用刀切法 (Jackknife) 检验环境变量的重要程度。以 AUC 来评价模型的精确度, AUC 越大, 预测结果的精确度越高^[16], 模型重复运行 10 次, 取均值作为模

型运算结果。

1.8 物种分布图的绘制

分别将肿柄菊和金腰箭的 MaxEnt 模型优化后的数据和中国地图数据读入 ArcGIS 软件, 进行掩膜提取, 得到对应物种在我国的分布图, 并利用自然间断点对物种分布图进行重分类, 得到非适生区、低适生区、中适生区和高适生区 4 个等级。

2 结果与分析

2.1 肿柄菊和金腰箭的 MaxEnt 生态位模型预测结果

基于 25 个环境变量因子和肿柄菊 3 859 个分布点数据, MaxEnt 软件调控倍率 RM=1.2, 特征组合 FC 为 LH。经 MaxEnt 10 次重复训练得到的 AUC 为 0.875(图 1a), 预测结果可靠。

基于 26 个环境变量因子和 2 402 个金腰箭分布点数据, MaxEnt 软件调控倍率 RM=3.5, 特征组合 FC 为 LPTH, 经 MaxEnt 10 次重复训练得到的 AUC 为 0.903(图 1b), 预测结果可靠。

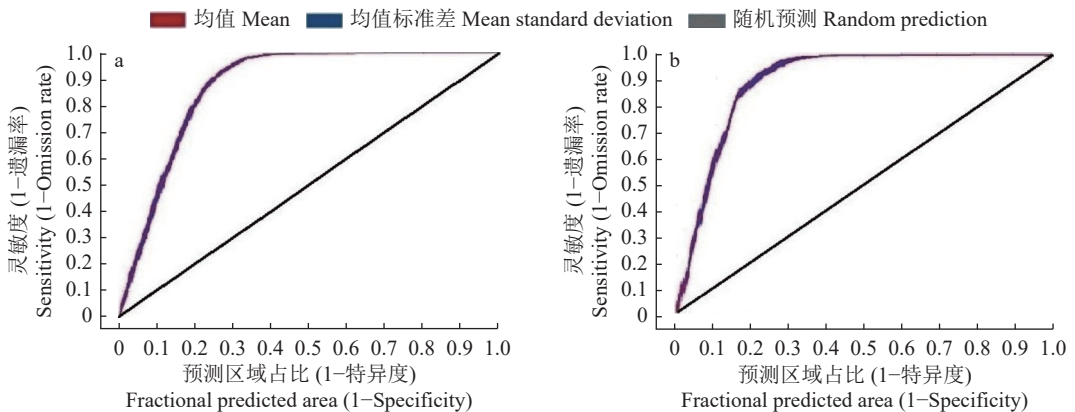


图 1 肿柄菊 (a) 和金腰箭 (b) 生态位模型预测结果

Fig. 1 Prediction results of niche model of *Tithonia diversifolia* A. Gray (a) and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. (b)

2.2 影响肿柄菊和金腰箭分布的环境变量因子

肿柄菊使用 25 个环境因子建立模型, 贡献率前 10 的环境变量因子和贡献率分别为温度季节变化标准差 (bio04, 37.2%), 最冷季度平均温度 (bio11, 33.6%), 最暖季度降水量 (bio18, 6.9%), 高程 (elev, 4.2%), 年均温度变化范围 (bio07, 4.2%), 坡度 (slope, 3.8%), 表层交换性盐基 (t_teb, 2.5%), 最干月降水量 (bio14, 1.3%), 昼夜温差月均值 (bio02, 1.3%) 和土壤有效含水量 (awc_class, 0.9%), 贡献率越高表明植物分布受此环境变量影响的概率越大。前 10 的环境变量因子贡献率之和为 95.9%。

金腰箭使用 26 个相关环境因子建立模型, 贡献率前 10 的环境变量因子和贡献率分别为最湿月

降水量 (bio13, 49.6%), 年均温度变化范围 (bio07, 16.5%), 年均降水量 (bio12, 10.6%), 温度季节变化标准差 (bio04, 3.8%), 表层交换性盐基 (t_teb, 3%), 表层土壤砾石含量 (t_gravel, 2.9%), 昼夜温差月均值 (bio02, 2.6%), 高程 (elev, 2.6%), 最湿季度平均温度 (bio08, 2.3%) 和季节降水量变异系数 (bio15, 1.5%)。前 10 的环境变量因子贡献率之和为 95.4%。

采用刀切法检验环境变量的结果如图 2 所示。综合 MaxEnt 模型和 Jackknife 检验结果可知, 温度季节变化标准差 (bio04)、最冷季度平均温度 (bio11) 是影响肿柄菊分布的主要环境变量, 2 个环境变量因子贡献率之和为 70.8%; 而年均温度变化范围 (bio07)、年均降水量 (bio12)、最湿月降水量

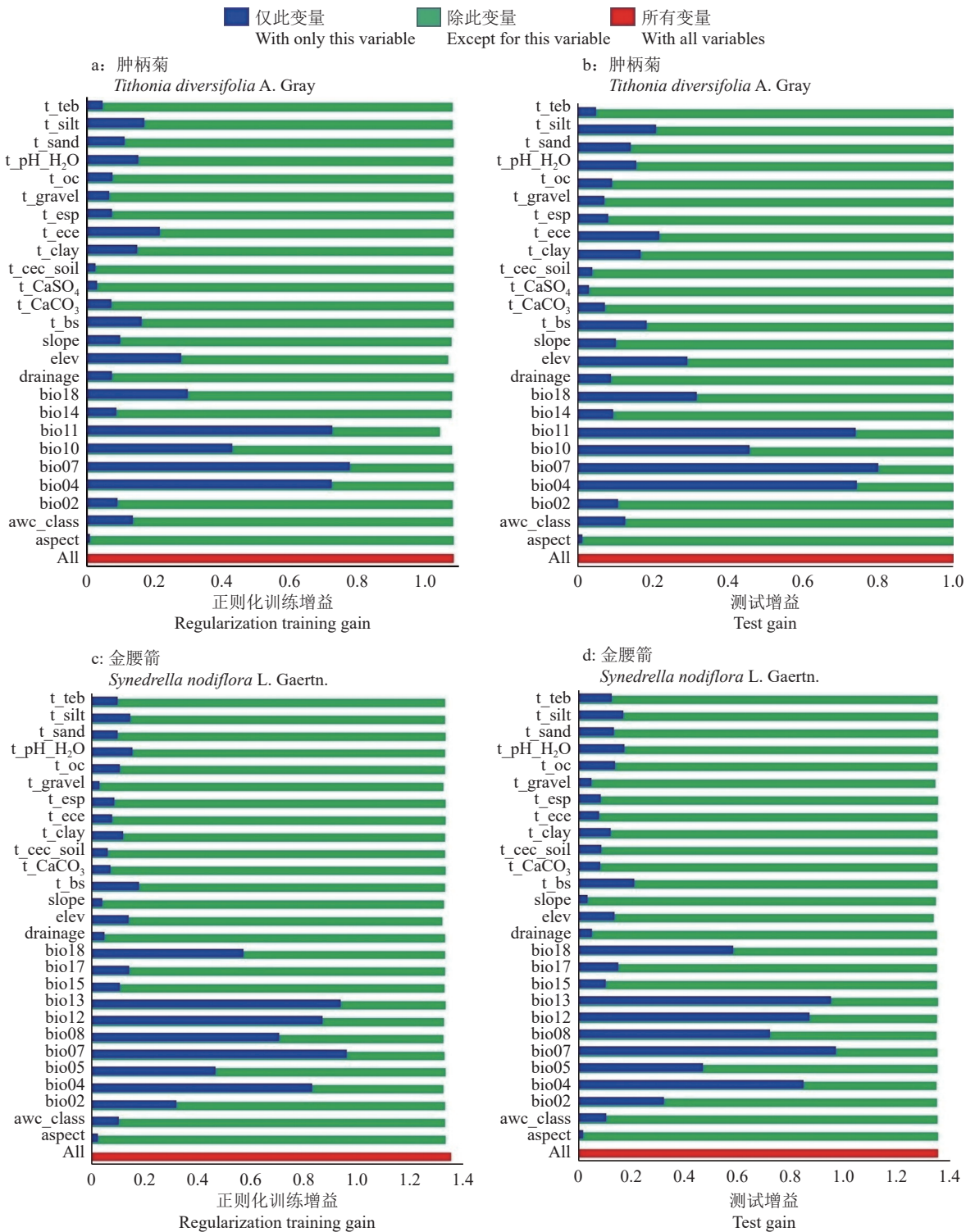


图2 环境变量重要性的刀切法检验结果

Fig. 2 Results of Jackknife method for the importance of the environmental variables

(bio13) 是影响金腰箭分布的主要环境变量, 3 个环境变量因子贡献率之和达 76.7%。

2.3 影响肿柄菊和金腰箭分布的重要环境因子的相关阈值

存在概率 ≥ 0.5 对应的环境因子范围是物种适宜分布的阈值。根据响应曲线 (图 3) 确定影响肿柄菊和金腰箭分布的贡献率高的环境因子的阈值。温

度季节变化标准差 (bio04) 处于 $-200\% \sim 300.02\%$ (图 3a) 以及最冷季度平均温度 (bio11) 处于 $13.38 \sim 22.66 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 3b) 时肿柄菊存在概率 ≥ 0.5 。当年均温度变化范围 (bio07) 处于 $3.69 \sim 18.06 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 3c)、年均降水量 (bio12) 处于 $1542.86 \sim 4563.11 \text{ mm}$ (图 3d) 以及最湿月降水量 (bio13) 处于 $300.05 \sim 2439.07 \text{ mm}$ (图 3e) 时金腰箭存在概率 ≥ 0.5 。

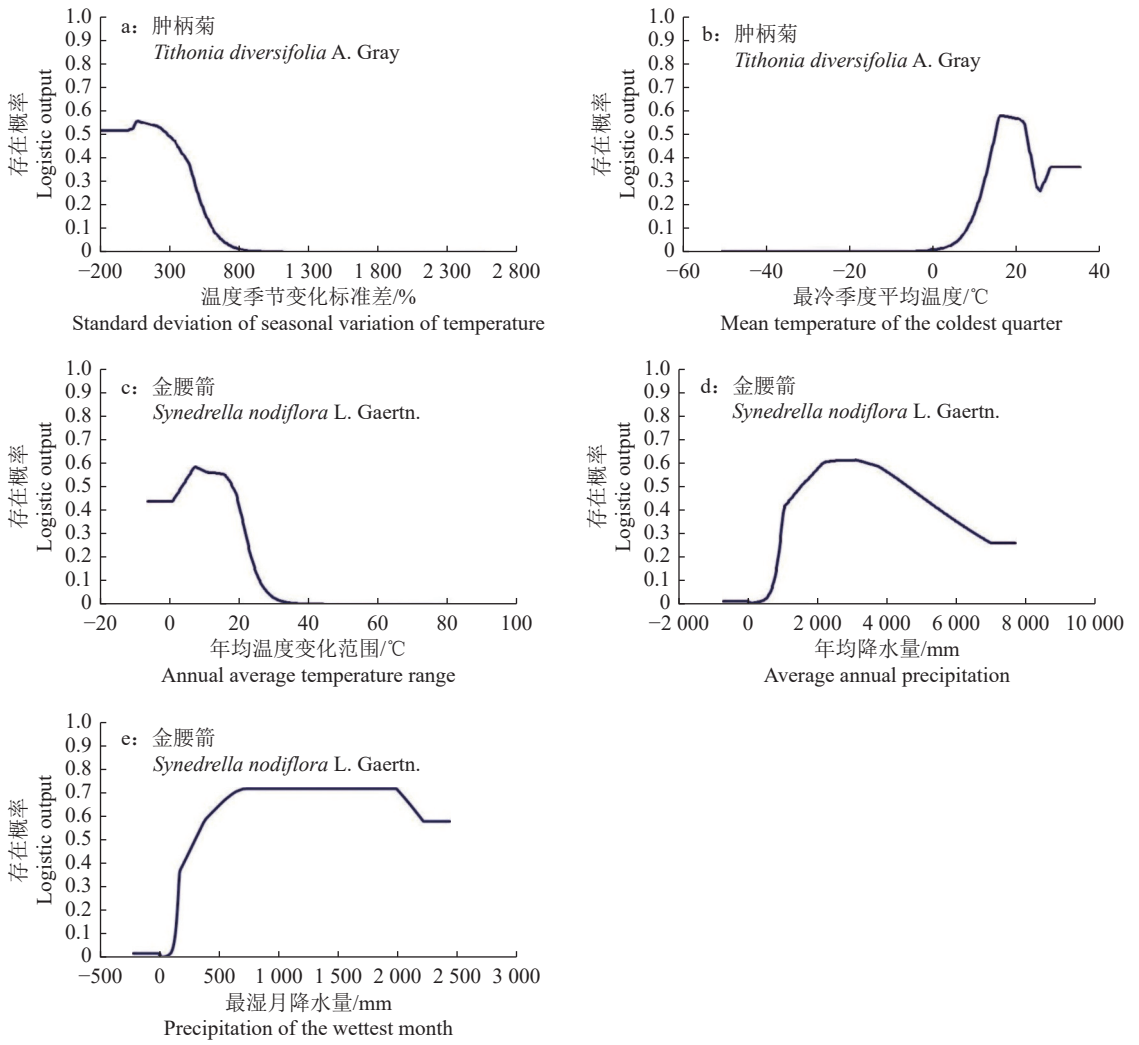


图 3 环境因子响应曲线

Fig. 3 Environmental factor response curve

2.4 肿柄菊和金腰箭在当前气候下的潜在适生分布区

将肿柄菊和金腰箭在 MaxEnt 模型模拟优化后的数据和中国地图数据分别导入 ArcGIS, 得到肿柄

菊和金腰箭在当前气候下的潜在分布区 (图 4)。肿柄菊当前总适生区面积约 152.72 万 km², 约占国土面积的 15.91%, 高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 31.83、42.46 和 78.43 万 km², 肿柄菊的适

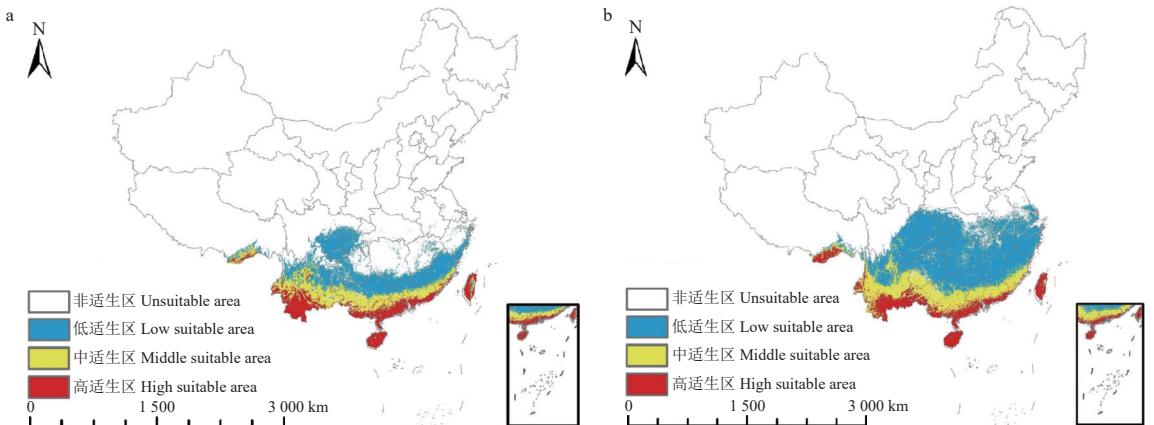


图 4 肿柄菊 (a) 和金腰箭 (b) 在中国的当前适生区

Fig. 4 Current suitable areas of *Tithonia diversifolia* A. Gray (a) and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. (b) in China

生区 (图 4a) 主要在西藏南部、云南、四川、重庆以及华南地区, 其中, 高适生区和中适生区零散分布于我国西藏南部、云南、广西、广东、福建、海南和台湾。金腰箭当前总适生区面积约 250.68 万 km², 约占国土面积的 26.11%, 高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 33.82、56.49 和 160.37 万 km², 金腰箭的适生范围 (图 4b) 主要在西藏南部、云南、

四川、重庆以及华南地区, 其中, 高适生区和中适生区零散分布于我国西藏南部、云南、广西、广东、福建、海南和台湾。

2.5 肿柄菊和金腰箭在未来气候模型下的潜在适生分布区

表 2 为在不同时期气候情景下肿柄菊和金腰箭在中国的潜在适生区面积。

表 2 不同时期气候情景下肿柄菊和金腰箭在中国的潜在适生区面积

Table 2 Potential suitable areas of *Tithonia diversifolia* A. Gray and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. in China under different climate scenarios in different periods

×10⁴ km²

物种 Species	时期 Period	气候情景 Climate scenario	低适生区 Low suitable area	中适生区 Middle suitable area	高适生区 High suitable area	总适生区 Total suitable area
肿柄菊 <i>T. diversifolia</i>	当前 Current		78.43	42.46	31.83	152.72
	2040	SSP1-2.6	145.34	51.93	38.62	235.89
	2040	SSP2-4.5	147.99	52.50	35.91	236.40
	2040	SSP3-7.0	142.08	51.60	36.98	230.67
	2040	SSP5-8.5	142.18	50.33	37.23	229.74
金腰箭 <i>S. nodiflora</i>	当前 Current		160.37	56.49	33.82	250.68
	2040	SSP1-2.6	146.40	123.85	93.78	364.03
	2040	SSP2-4.5	73.23	35.04	19.84	128.11
	2040	SSP3-7.0	145.16	54.02	54.99	254.17
	2040	SSP5-8.5	178.97	39.65	26.29	244.92

SSP1-2.6 情景下, 2040 年肿柄菊总适生区面积约 235.89 万 km², 较当前分布面积增加 83.17 万 km², 主要为低适生区面积增加 66.91 万 km²。金腰箭在此气候情境下 2040 年总适生区面积约 364.03 万 km², 较当前金腰箭分布面积增加约 113.35 万 km², 主要为高适生区增加 59.96 万 km² 和中适生区面积增加 67.36 万 km²。

SSP2-4.5 情景下, 2040 年肿柄菊总适生区面积约 236.40 万 km², 较当前分布面积增加 83.68 万 km², 主要为低适生区面积增加 69.56 万 km²。金腰箭在此气候情境下 2040 年总适生区面积约 128.11 万 km², 较当前分布面积减少 122.57 万 km², 主要为低适生区面积减少 87.14 万 km²。

SSP3-7.0 情景下, 2040 年肿柄菊总适生区面积约 230.67 万 km², 较当前分布面积增加 77.95 万 km², 主要为低适生区面积增加 63.65 万 km²。金腰箭在此气候情境下 2040 年总适生区面积约 254.17 万 km², 较当前分布面积相对变化不大。

SSP5-8.5 情景下, 2040 年肿柄菊总适生区面积约 229.74 万 km², 较当前分布面积增加

77.02 万 km², 主要为低适生区面积增加 63.75 万 km²。金腰箭在此气候情境下 2040 年总适生区面积约 244.92 万 km², 较当前分布面积相对变化不大。

图 5 为 4 种气候情景模式下肿柄菊和金腰箭在中国的适生区, 在 2040 年, SSP1-2.6 (图 5a)、SSP2-4.5 (图 5b)、SSP3-7.0 (图 5c)、SSP5-8.5 情景下 (图 5d) 下肿柄菊总适生区明显增加, 主要为长江以南地区部分非适生区变为低适生区, 广东省、广西壮族自治区和福建省地区部分中适生区变为高适生区, 低适生区变为中适生区。

2040 年金腰箭在 SSP1-2.6 情景下 (图 5e) 总适生区明显增加, 其中川渝地区部分低适生区变为高适生区, 华南地区部分中适生区变为高适生区, 渤海和黄海沿岸区域部分非适生区变为低适生区; 在 SSP2-4.5 情景下 (图 5f) 金腰箭总适生区明显减少, 其中主要变化为华南地区部分低适生区变为非适生区, 广西南部及藏南地区高适生区变为中适生区; 在 SSP3-7.0 情景下 (图 5g) 金腰箭总适生区变化不大, 低适生区面积减小, 同时川渝地区和华南

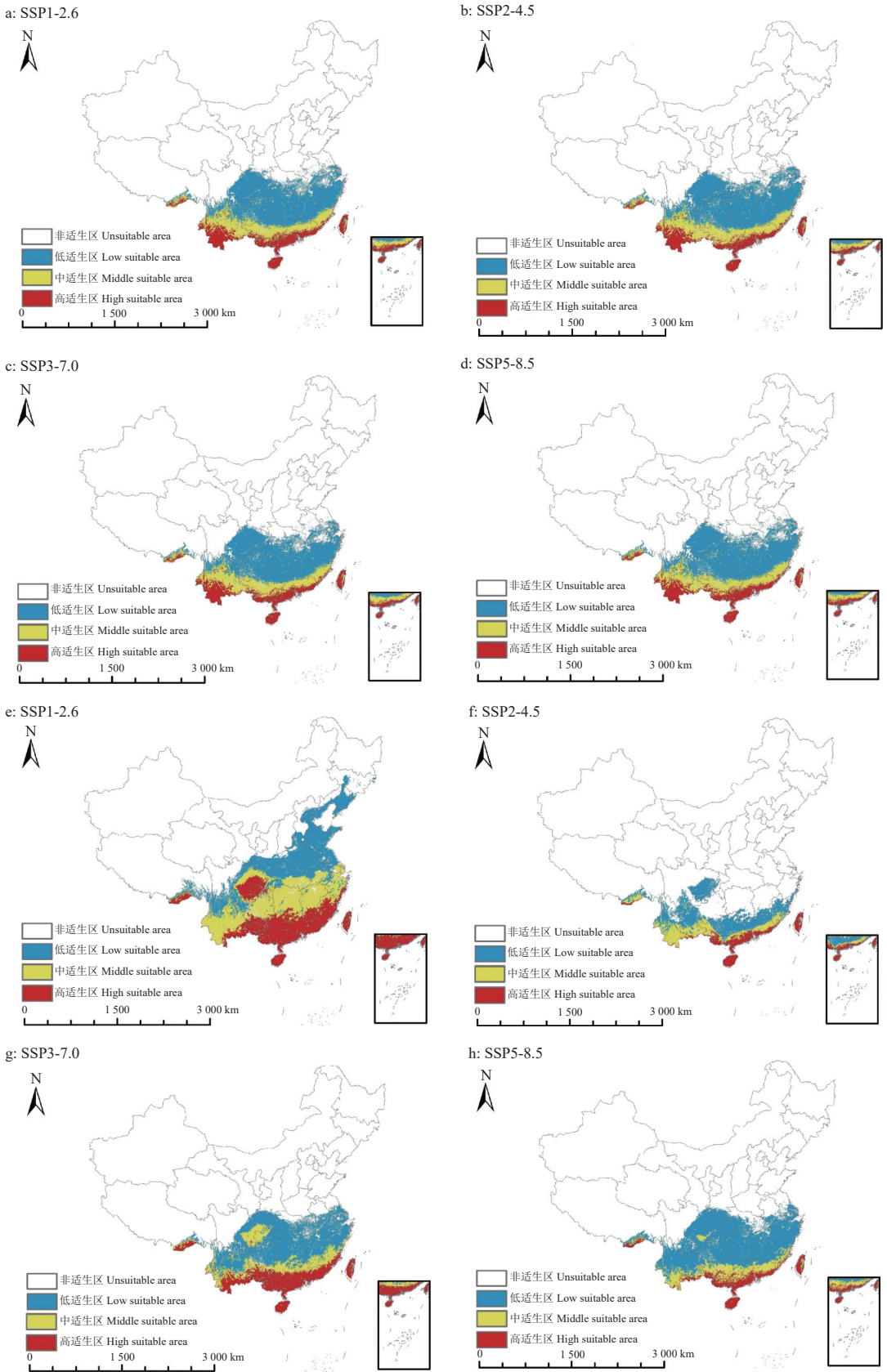


图 5 4 种气候情景模式下肿柄菊 (a~d) 和金腰箭 (e~h) 在中国的适生区

Fig. 5 Suitable areas of *Tithonia diversifolia* A. Gray (a~d) and *Synedrella nodiflora* L. Gaertn. (e~h) in China under four climate scenarios

地区部分低适生区变为中适生区和高适生区; 在 SSP5-8.5 情景下 (图 5h) 金腰箭总适生区变化不

大, 低适生区面积增加, 西藏南部及广西壮族自治区南部的中、高适生区面积减少。

3 结论与讨论

MaxEnt 模型的精度取决于样本的覆盖度、区域和样本量^[17]。本研究通过国内外网站分别收集肿柄菊、金腰箭大量分布数据,经过处理得到肿柄菊分布点 3 859 个,金腰箭分布点 2 402 个,分布点数据数量充足。AUC 是 ROC 下面积,用于衡量模型结果好坏,取值范围为 0~1,数值越大表明环境变量与预测物种地理分布之间的相关性越大,模型判断力越强,模型预测效果越准确^[16],本研究结果显示肿柄菊的 AUC 为 0.875,金腰箭的 AUC 为 0.903,模型预测结果均较为可靠。

植物的分布是光照、气温、降水量、土壤及地形等多种因素综合作用的结果,但在一定尺度上,气候因子是制约植物适生区分布的主要因素^[18-20]。环境因子的数量、种类和精度对模型预测的准确度至关重要^[21-22]。本研究选取了 19 个气候因子、3 个地形因子和 17 个土壤因子,共计 39 个环境因子用于模型预测,预测环境变量范围广泛。环境因子的分辨率为 5 min (85 km²),精度较高。环境变量间存在着较高的空间相关性^[16],为提高模型的精确性,避免引入的无用信息影响模型预测结果,针对不同植物用上述环境因子进行筛选。最终肿柄菊使用 25 个环境因子建立模型,贡献率前 10 的环境变量因子之和为 95.9%。其中,影响肿柄菊分布的主要环境因子为温度季节变化标准差和最冷季度平均温度,贡献率之和达 70.8%,对其分布起决定作用。当温度季节变化标准差为-200%~300.02% 以及最冷季度平均温度为 13.38~22.66 °C 时,肿柄菊存在概率≥0.5。采用 26 个相关环境因子建立金腰箭的模型,贡献率前 10 的环境变量因子之和为 95.4%。其中,影响金腰箭分布的主要环境因子为年均温度变化范围、年均降水量和最湿月降水量,贡献率之和达 76.7%,对金腰箭的分布起决定作用。当环境处于平均温度变化范围 3.69~18.06 °C、年均降水量达到 1 542.86~4 563.11 mm 以及最湿月降水量为 300.05~2 439.07 mm 时,金腰箭存在概率≥0.5。这些气候条件分别为肿柄菊和金腰箭的生存提供了适宜的生态位。

当前肿柄菊已在我国南部热带、亚热带一些省份普遍分布^[23],本研究结果显示肿柄菊当前在中国的高适生区和中适生区分布于我国西藏南部、云南、广西、广东、福建、海南、台湾,总适生面积约 152.72 万 km²。对于未来肿柄菊的分布,不同气候情景下肿柄菊的潜在适生分布面积相差不大,相较

当前入侵分布总适生区明显增加,主要为中国长江以南地区部分非适生区变为低适生区,低适生区约以倍数增加,并且未来中高适生区有向广东、广西和福建区域扩张的趋势,这些地区要加强防范。

现阶段金腰箭的高适生区和中适生区零散分布于我国西藏南部、云南、广西、广东、福建、海南和台湾,总适应区面积为 250.68 万 km²,这与《中国植物志》^[24] 记载基本一致。对于未来金腰箭的分布,不同气候情景下均有逐渐向我国东南部地区扩张的趋势,这些地区要加强监控及防治。

参考文献:

- [1] ADKINS S, SHABBIR A. Biology, ecology and management of the invasive *Parthenium* weed (*Parthenium hysterophorus* L.) [J]. *Pest Management Science*, 2014, 70(7): 1023-1029.
- [2] KARIMMOJENI H, RAHIMIAN H, ALIZADEH H, et al. Competitive ability effects of *Datura stramonium* L. and *Xanthium strumarium* L. on the development of maize (*Zea mays*) seeds [J]. *Plants*, 2021, 10(9): 1922. doi: 10.3390/plants10091922.
- [3] THURKOW F, LORENZ C G, PAUSE M, et al. Advanced detection of invasive neophytes in agricultural landscapes: A multisensory and multiscale remote sensing approach [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(3): 500.
- [4] 王桔红, 陈文, 彭玉姣, 等. 不同入侵程度两种菊科植物化学计量特征及其影响因素 [J]. *广西植物*, 2024, 44(8): 1469-1480.
- [5] HAO Q, MA J S. Invasive alien plants in China: An update [J]. *Plant Diversity*, 2023, 45(1): 117-121.
- [6] WANG F, HUANG J, ZHANG N, et al. Exploring plant characteristics for constructing a pre-border weed risk assessment for China [J]. *Biological Invasions*, 2024, 26(4): 909-933.
- [7] 王四海, 孙卫邦, 成晓. 逃逸外来植物肿柄菊在云南的生长繁殖特性、地理分布现状及群落特征 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 444-449.
- [8] 赵金丽, 马友鑫, 朱华, 等. 云南省南部山地 7 种主要入侵植物沿公路两侧的扩散格局 [J]. *生物多样性*, 2008, 16(4): 369-380.
- [9] 焦杨, 程希平, 王四海. 外来入侵植物肿柄菊的异速生长特征 [J]. *西部林业科学*, 2020, 49(1): 156-161.
- [10] NICHOLAS HIND D J. The typification of *Verbesina nodiflora* L.: The generic type of *Synedrella* Gaertn. (Compositae: Heliantheae: Ecliptinae) [J]. *Kew Bulletin*, 2016, 71(2): 1-5.
- [11] LUO L D, ZHANG P, OU X K, et al. Development of EST-SSR markers for the invasive plant *Tithonia diversifolia* (Asteraceae) [J]. *Applications in Plant Sciences*,

- 2016, 4(7): 1600011. doi: 10.3732/apps.1600011.
- [12] ZHAO X F, LEI M, WEI C H, et al. Assessing the suitable regions and the key factors for three Cd-accumulating plants (*Sedum alfredii*, *Phytolacca americana*, and *Hylotelephium spectabile*) in China using MaxEnt model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852(3): 158202. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158202.
- [13] ZHAO Z Y, XIAO N W, SHEN M, et al. Comparison between optimized MaxEnt and random forest modeling in predicting potential distribution: A case study with *Quasipaa boulengeri* in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842(10): 156867. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156867.
- [14] 张惠惠, 张国帅, 张智, 等. 最大熵模型在植物生态评估领域的应用[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(22): 248-257.
- [15] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295-302.
- [16] 袁俊杰, 龙阳, 李凯兵, 等. 多斑矢车菊在我国的适生性分析及入侵风险评估[J]. *中国植保导刊*, 2024, 44(11): 91-96.
- [17] 贺一鸣, 王驰, 王海涛, 等. 气候变化对蒙古菴潜在适生区的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(2): 540-550.
- [18] 陈剑, 王四海, 杨卫, 等. 外来入侵植物肿柄菊群落动态变化特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 469-477.
- [19] SUN Y M, FERNIE A R. Plant secondary metabolism in a fluctuating world: Climate change perspectives[J]. *Trends in Plant Science*, 2024, 29(5): 560-571.
- [20] WEI L J, WANG G H, XIE C P, et al. Predicting suitable habitat for the endangered tree *Ormosia microphylla* in China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 10330. doi: 10.1038/s41598-024-61200-5.
- [21] 王鹏, 田姗姗, 宋盈盈, 等. 基于 MaxEnt 预测 3 种柃属植物在中国的潜在适生区[J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2024, 46(12): 84-99.
- [22] ESGUERRA D, MUNCH S B. Accounting for observation noise in equation - free forecasting: The hidden-Markov S-map[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2024, 15(8): 1347-1359.
- [23] 吴甜, 申科, 贾涛, 等. 外来植物肿柄菊对入侵生境的生态影响及其防控对策[J]. *生物安全学报 (中英文)*, 2024, 33(1): 7-11.
- [24] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 75 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 65-70.

【责任编辑 霍 欢】