



基于最大熵模型的中国兜兰属植物潜在分布模拟

黄智聪, 舒江平, 严岳鸿, 陈建兵

引用本文:

黄智聪,舒江平,严岳鸿,陈建兵. 基于最大熵模型的中国兜兰属植物潜在分布模拟[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(1): 17-26.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4703>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析

Effect of Climate Change in Future on Geographical Distribution of Widespread *Quercus acutissima* and Analysis of Dominant Climatic Factors

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 661-668 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3898>

气候变化背景下紫楠在中国的适宜分布区模拟

Predicting Suitable Distribution Areas of *Phoebe sheareri* in China under Climate Change

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 435-444 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4201>

未来气候变化对孑遗植物鹅掌楸地理分布的影响

Potential Impacts of Climate Change in Future on the Geographical Distributions of Relic *Liriodendron chinense*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 151-161 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4322>

浙闽樱桃地理分布模拟及气候限制因子分析

Modeling the Geographical Distribution Pattern and Climatic Limited Factors of *Cerasus schneideriana*

热带亚热带植物学报. 2017, 25(4): 315-322 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3702>

滇黄精的潜在分布与气候适宜性分析

Potential Geographical Distribution of *Polygonatum kingianum* and Its Climatic Suitability Analysis

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 439-448 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3874>

向下翻页, 浏览PDF全文

基于最大熵模型的中国兜兰属植物潜在分布模拟

黄智聪¹, 舒江平^{1,2}, 严岳鸿¹, 陈建兵^{1*}

(1. 深圳市兰科植物保护研究中心, 广东 深圳 518114, 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 基于已知分布点和 20 个环境因子, 该研究利用 MaxEnt 模型模拟在现在(1970—2000 年)气候条件和 2 种不同共享经济路径情景下(SSP1-2.6、SSP5-8.5)未来(2081—2100 年)兜兰属(*Paphiopedilum*)植物的潜在分布格局, 找出影响物种分布的环境因子。结果表明, 兜兰属植物的最适宜分布区位于滇东南地区、贵州西南、广西西部、广东南部、海南北部。影响该属植物分布的主要环境因子是年降水量、年温度变化和最干旱季降水量。随着全球变暖, 适生区有向北和西北方向扩张的趋势, 逐渐往西北亚热带方向延伸。在 SSP5-8.5 的情景下, 高适生区出现大幅度收缩。在未来气候情景下, 不同种群分布区变化规律并不一致, 其分布格局响应气候变化的趋势也有所不同, 因此该文针对分布区变化趋势不同的物种提出了不同的保护策略。

关键词: 兜兰属; 最大熵模型; 气候因子; 气候变化

doi: 10.11926/jtsb.4703

Simulation of Potential Distribution of *Paphiopedilum* in China Based on MaxEnt Model

HUANG Zhicong¹, SHU Jiangping^{1,2}, YAN Yuehong¹, CHEN Jianbing^{1*}

(1. Orchid Conservation and Research Centre of Shenzhen, Shenzhen 518114, Guangdong, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Based on the known distribution and 20 environmental factors, the potential distribution pattern of genus *Paphiopedilum* was simulated by using MaxEnt model under two different sharing economy scenarios (SSP1-2.6, SSP5-8.5) in the present (1970—2000) and the future (2081—2100). The contribution rate of climate factors was analyzed to find out the dominant climate factors affecting species distribution and their variation range. The results showed that the most suitable distribution areas of the genus were located in southeast Yunnan, southwest Guizhou, western Guangxi, southern Guangdong and northern Hainan. The main environmental factors affecting the distribution of the genus were annual precipitation, annual temperature range and precipitation in the driest season. With global warming, the suitable area had a tendency to expand northward and northwestward, gradually extending to the northwest subtropical direction. Under the SSP5-8.5 scenario, the high suitability area showed a large shrinkage. In the future climate scenarios, the distribution patterns of different populations are not consistent, and their distribution patterns respond to climate change trends. Therefore, different conservation strategies are proposed for species with different distribution trends.

Key words: *Paphiopedilum*; Maximum entropy model; Dominant climate factor; Climate change

物种的分布区是物种重要的空间特征, 与物种灭绝、生态入侵、生态位幅度密切相关, 对物种的

起源、扩散和演化研究具有重要意义^[1]。在全球气候变化的背景下, 进行物种潜在分布区的模拟和主

收稿日期: 2022-07-15 接受日期: 2022-09-21

基金项目: 中央林业改革发展基金项目(粤财资环[2019]5 号)资助

This work was supported by the National Forestry Reform and Development Fund (Grant No. [2019]5).

作者简介: 黄智聪(1987 年生), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为兰科植物保护。E-mail: 342972251@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cjb@cnocc.cn

导因子分析,可以为有效保护和可持续利用植物资源提供科学依据。气候是影响物种自然地理分布最重要的因素之一,全球气候变化对物种的分布格局和生物多样性产生显著影响^[2-3]。气候变化导致的物种栖息地丧失和破碎化已经严重威胁到自然分布范围狭小的濒危物种,加剧其灭绝风险^[4-5]。在过去的 100 年里,全球平均气温上升约 0.85 °C,且预测未来气温仍将持续快速上升,未来冬季变暖幅度将大于春季^[6]。全球变暖导致植物物候发生显著变化,冬季升温导致开花-展叶时间间隔延长,但春季升温导致开花-展叶时间间隔缩短,这种季节性升温幅度的差异可能导致开花-展叶时间间隔向不同的方向改变,改变植物的营养分配、繁殖以及种间关系,并影响生态系统的结构和功能,进而影响生态系统碳循环、水循环和能量平衡^[7]。研究植物适宜生境对气候变化的响应,对于展现物种形成、迁移的变化,提出合理有效的种质资源保护对策,有着重要的理论与现实意义。物种分布模型^[8]是利用物种的分布数据,并结合其生境下的环境变量推测物种的基础生态位,再结合不同时期的环境数据模拟不同时期物种的潜在分布区。其中,由美国学者 Phillips 等^[9]开发的熵法(MaxEnt)生态位模型具有建模快、精度高等优点,即便较小的样本量也能获得具有较高精度和稳定性的模型^[10]。朱莹莹等^[11]研究了我国特有珍稀植物水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)种群分布对气候变化的响应,结果表明,在不同气候情境下我国水杉生境有较低的适宜程度。张佳琦等^[12]研究了裸果木(*Gymnocarpus przewalskii*)分布格局的变化,认为在未来气候情景下其适生区明显缩小。Hu 等^[13]分析了侧柏(*Platycladus orientalis*)在未来气候变化下的潜在分布,结果表明侧柏的分布可能会随着气候的变暖而增加。不同物种的采样分布不同和影响物种分布的环境因素不同,其结果也有差异。然而兰科植物的地理分布格局如何响应未来气候变化仍知之甚少。

兜兰属(*Paphiopedilum*)是兰科植物最具观赏价值的类群之一,是热带及亚热带地区的林下多年生草本植物,大多数生于地面或积土的岩石表面或岩缝中,少数着生于树上,主要生存在排水、通风好,有一定荫蔽,又能透光而且湿润的环境下。全世界约有 79 种,主要分布于东南亚至喜马拉雅山低地和中国西南部,只有少数物种到达新几内亚和所罗门群岛^[14]。我国兜兰属植物资源非常丰富,约占

全世界的三分之一,但由于过度采集、走私出境以及生境破坏等原因,近 20 年来其数量急剧减少,濒临灭绝^[15-18]。目前,兜兰属所有野生种均被列入《国家重点保护野生植物(第二批)》名录和《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)附录I中。然而,兜兰属的生存状况及其适宜分布区对未来气候变化的响应尚未得到深入研究。

在未来不同气候情景下,兜兰属植物的地理分布格局将呈现怎样的变化?影响分布格局的主导气候因子是否随物种的不同而变化?兜兰属的保护策略该如何制定?本研究采用 MaxEnt 模型与 GIS 技术相结合的方法,根据物种资源分布信息,结合当代和未来气候环境数据,研究其在我国的潜在适生分布区及其主导气候因子,以为兜兰属植物的野外调查、分类学与生物地理学研究提供理论依据,同时为兜兰属植物的保护提供参考。

1 材料和方法

1.1 数据收集与处理

1.1.1 物种分布信息

依据《中国植物志》^[19]、《中国兜兰属植物》^[14]、文献以及标本记录记载的分布和性状描述,查阅兜兰属植物的历史分布点,记录物种的海拔、生境类型等信息。

物种分布信息来源于 3 个方面:一是根据兰科中心的野外调查数据,分布点经纬度信息由 GPS 实地定位获得;二是通过查阅文献,找出其分布地点,用百度拾取坐标查找相应的经纬度坐标;三是通过中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)和全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org/>)获取标本采集地经纬度信息。

《中国物种名录》(2022 版)^[20]记载中国兜兰属包含 30 种,但在数据收集过程中,根茎兜兰(*P. arenum*)、紫斑兜兰(*P. notatisepalum*)、天伦兜兰(*P. tranlienianum*)和文山兜兰(*P. wenshanense*)等 4 种由于分布信息单一或未收集到县级以下的具体分布点,因此未纳入计算。本研究列入兜兰属模型计算的物种为 26 种,分别为卷萼兜兰(*P. appletonianum*)、杏黄兜兰(*P. armeniacum*)、小叶兜兰(*P. barbigerum*)、巨瓣兜兰(*P. bellatulum*)、红旗兜兰(*P. charlesworthii*)、同色兜兰(*P. concolor*)、德氏兜兰(*P. delenatii*)、长瓣兜兰(*P. dianthum*)、白花兜兰(*P.*

emersonii)、红花兜兰(*P. erythroanthum*)、瑰丽兜兰(*P. gratrixianum*)、广东兜兰(*P. guangdongense*)、绿叶兜兰(*P. hangianum*)、巧花兜兰(*P. helenae*)、亨利兜兰(*P. henryanum*)、带叶兜兰(*P. hirsutissimum*)、波瓣兜兰(*P. insigne*)、麻栗坡兜兰(*P. malipoense*)、硬叶兜兰(*P. micranthum*)、飘带兜兰(*P. parishii*)、紫纹兜兰(*P. purpuratum*)、白旗兜兰(*P. spicerianum*)、虎斑兜兰(*P. tigrinum*)、秀丽兜兰(*P. venustum*)、紫毛兜兰(*P. villosum*)和彩云兜兰(*P. wardii*)。

为了保证数据的准确性,对收集到的物种分布数据进行过滤处理。去除人工试验样地及人工温室栽培的条目,去除重复的标本条目,以及经纬度和小地点信息都没有的条目,去掉分布信息与《中国植物志》记载明显不符的条目以及物种鉴定有误的分布数据。对所有数据按照 MaxEnt 模型要求进行标准化处理,并且为了防止在进行最大熵模型分析时出现过拟合现象,将兜兰属所有物种的分布数据进行筛选,在 2.5 km²以内的物种分布点仅保留 1 个,共计得到 274 个具有经纬度信息的兜兰属物种分布

点。另外,由于经过筛选后部分物种的种群分布点过于稀少和集中,因此本次研究中仅对 14 物种进行了最大熵模型分析。

1.1.2 气候环境数据

本研究选取当代(1970—2000 年)和未来(2081—2100 年)的 20 个环境数据(表 1),均来源于世界气候数据库 WorldClim (<http://worldclim.org>),空间分辨率为 2.5 min。当代气候数据是根据 1970—2000 年全球不同气象站点记录的气候数据经插值法生成。未来(2081—2100 年)气候数据选择 CMIP6 计划中精度为 2.5 min 的 BCC-CSM2-MR 模式下的两组极端的共享经济路径: SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两组数据。SSP1-2.6 描述了 1 个全球二氧化碳排放量在 2050 年左右被削减到净零的世界,到本世纪末温度稳定比世纪初高 1.8 °C; SSP5-8.5 描述目前的二氧化碳排放水平到 2050 年大约翻一番,到 2100 年,二氧化碳排放水平将降低至与世纪前叶接近,全球平均气温将比世纪初高 4.4 °C^[21]。数据经 ArcGIS 10.6 软件剪裁为中国范围并转换为 ASCII 格式。

表 1 环境变量及其描述

Table 1 Environmental variables and their descriptions

代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description
Bio01	年均温 Annual mean temperature	Bio11	最冷季度均温 Mean temperature of coldest quarter
Bio02	日平均温度变化范围 Mean diurnal temperature range	Bio12	年平均降水量 Annual precipitation
Bio03	等温性 Isothermality	Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
Bio04	温度季度性变化 Temperature seasonality	Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
Bio05	最热月最高温 Max temperature of warmest month	Bio15	降水量变异系数 Precipitation seasonality (coefficient of variation)
Bio06	最冷月最低温 Min temperature of coldest month	Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio07	年温度变化范围 Temperature annual range	Bio17	最干旱季度降水量 Precipitation of driest quarter
Bio08	最湿季度均温 Mean temperature of wettest quarter	Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter
Bio09	最干季度均温 Mean temperature of driest quarter	Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter
Bio10	最暖季度均温 Mean temperature of warmest quarter	Elev	海拔 Elevation

1.2 方法

1.2.1 建立模型

采用 MaxEnt Version 3.4.4 (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent)模拟兜兰属植物在不同气候情境下的潜在分布格局,设置训练集为 75%,测试集为 25%进行模拟分析。将物种分布数据与气候环境数据一起导入 MaxEnt 中,选择刀切法,绘制响应曲线并制作预测图,所使用的底图为自然资源部监制的 GS(2019)1823 号中国地图。

1.2.2 模型精度检验

采用受试者工作特征曲线(receiver operator

characteristic curves, ROC)对模型的精度进行评价。ROC 曲线与横坐标所围成区域面积(AUC)的大小具有不受临界值影响的特性,可用于评价预测模型的准确性^[22-24]。

利用刀切法测试可以评估环境变量对模型的影响程度,从而判断不同环境变量对生态布局的重要性,其环境因子贡献率是评估环境变量对模型影响程度的重要指标,多数研究者将累积贡献率超过某一特定值之前的气候因子作为影响物种分布的主导因子,该特定值通常根据各自研究物种的特性和结果主观选择。本文中累计贡献率超过 70%时

参与累积的因子作为主导因子,其中贡献率大于 10%的为最关键因子^[25]。通过利用单一的变量而不考虑其他变量的模型生成的单变量响应曲线可估算物种的适宜生存环境的范围^[26]。

1.2.3 适生区等级的划分

MaxEnt 结果输出文件为 ASCII 格式,将其加载到 ArcGIS 10.6 中,使用“ArcToolbox”中的“格式转换工具”转换为栅格数据,利用“重分类工具”将兜兰属植物的生境适宜性按照“自然间断点分级法”划分成 4 类,即非适生区、低适生区、中适生区和高适生区,并计算各适生区的面积及其占比。

2 结果和分析

2.1 模型准确性检验

运用 MaxEnt 模型基于 20 个环境变量模拟并重复 10 次运算,兜兰属植物的潜在分布区 AUC 值为 0.868~0.998 (图 1)。

2.2 影响兜兰属植物分布的主导气候因子

最大熵模型模拟结果表明,对兜兰属地理分布影响较大的气候因子有最干旱季降水量、年降水量、年温度变化范围、最冷季降水量。为了减少气候因子之间的自相关,利用 ArcGis 软件提取兜兰属物种 274 个分布点的气候变量,利用 SPSS26 软件进行相关性分析,保留相关系数 $<|0.8|$ 的因子,对于相关系数 $\geq|0.8|$ 的,保留贡献率更高的 1 个,最后筛选出 7 个气候因子(年平均温度、日温度平均变化范围、等温线、年温度变化范围、年降水量、降水

量变异系数、最干旱季的降水量),用筛选过的环境因子进行分析预测,结果显示当前气候情景下对兜兰属植物全属地理分布影响排名前三的气候因子仍为年降水量 34%、年温度变化范围 24.3%、最干旱季度降水量 22.2%,其贡献率综合达到 80.5%。刀切法检验结果表明(图 2),变量单独使用时,年温度变化范围在受试变量中测试增益最突出;省略变量时,减少增益最多的环境变量是降水量变异系数。

通过兜兰属因子的单变量响应曲线(图 3),若以物种存在概率 0.5 为最适阈值,年温度的变化为 10 °C~23 °C 时,物种的存在概率基本保持在 0.5~0.7 的区域,说明该温差范围是适合物种生存的舒适区;当年温差在 20 °C~22 °C 时,物种的存在概率达到峰值 0.7,说明这个温差对物种而言是一种最适宜的生境温度;年温差超过 22 °C 时,物种的存在概率就逐渐降低。最干旱降水量在 0~80 mm 时存在概率呈上升趋势,超过 80 mm 之后存在概率逐渐降低,在 50~120 mm 区间时物种存在概率处于 0.5~0.6 区域,说明该降水量范围是适合兜兰属物种生存的舒适区,并且最干旱季降水量在 80 mm 时存在概率达到峰值 0.66,说明该降水量是一种最适宜的生境,当最干旱降水量超过 120 mm 时,物种存在概率开始降低。年降水量在 1 200~2 400 mm 区域时存在概率均处于 0.5~0.7 区域,说明该降水量区间是适合物种生存的舒适区;年降水量超过 2 000 mm 后存在概率逐渐下降。

14 种植物的最大熵模型模拟结果还表明,大部分兜兰属物种的分布同时受到多个环境因子影响

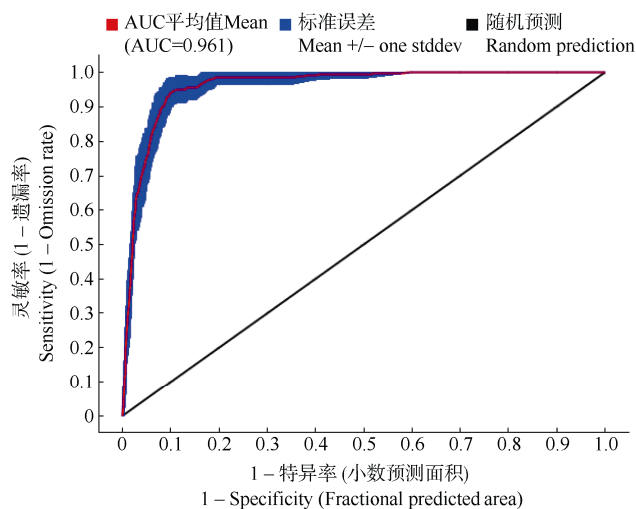


图 1 兜兰属当前气候条件下分布预测的 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curve of distribution prediction of *Paphiopedilum* under current climate

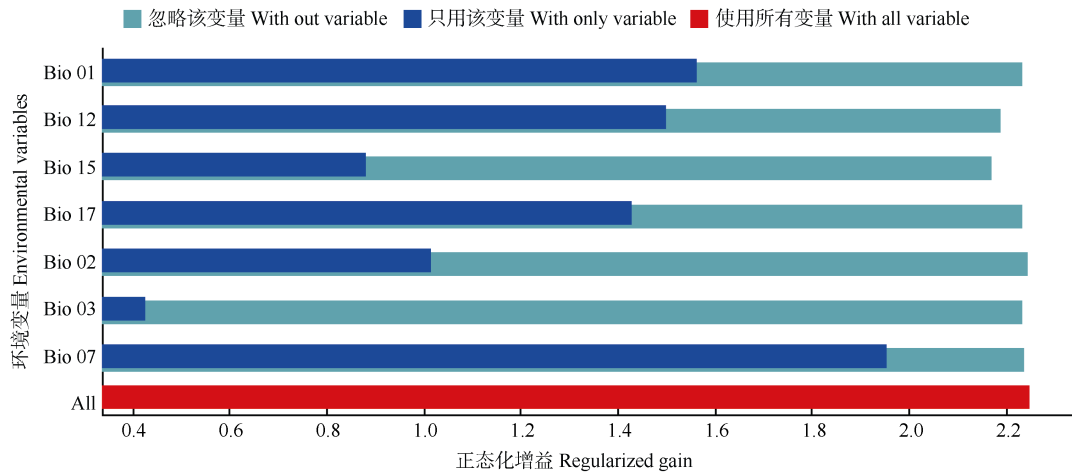


图 2 刀切法检验的环境变量对兜兰属植物分布的贡献率。环境变量代码见表 1。下同

Fig. 2 Contribution rate of environmental variables by Jackknife test. Environmental variable code see Table 1. The same below

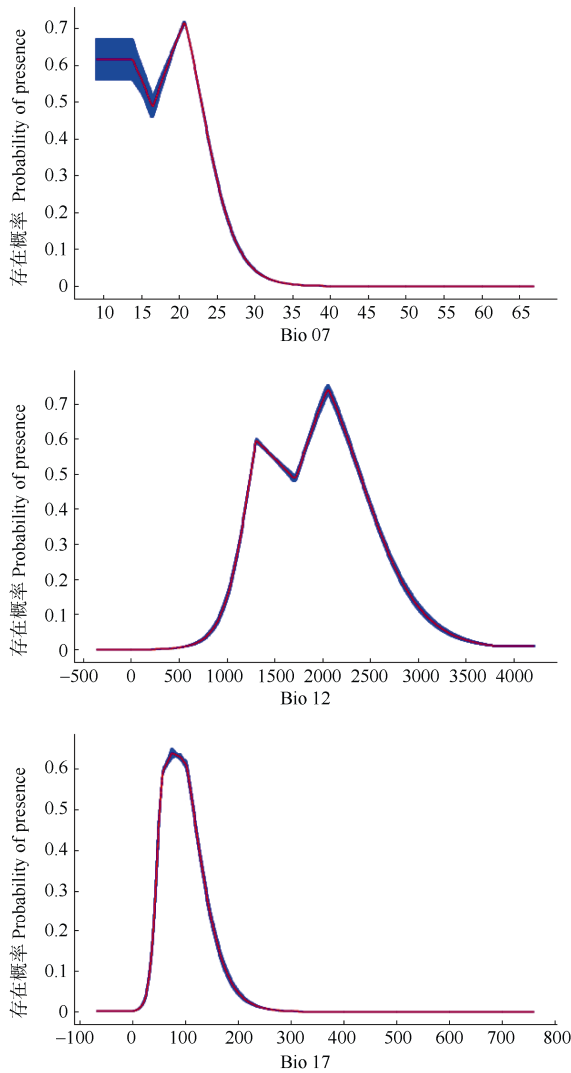


图 3 影响兜兰属潜在分布的主导因子响应曲线。■: 平均值; ■: 标准误差。

Fig. 3 Response curve of dominant factors affecting latent distribution of *Paphiopedilum*. ■: Mean; ■: Standard error.

(图 4), 其中最干旱季降水量、最暖季降水量、年降水量和年温度变化范围对大多数兜兰属物种的分布有显著影响。少数物种分布的主导环境因子(累积贡献率大于 70%)仅为单、双气候因子, 卷萼兜兰主要受年温度变化范围影响、秀丽兜兰主要受等温性影响, 杏黄兜兰、格力兜兰主要受等温性和温度季节性变化影响, 巧花兜兰主要受年温度变化范围和最冷月最低温度的影响, 麻栗坡兜兰主要受年温度变化范围和最干燥月降水量的影响。

2.3 当代及未来情景下兜兰属植物的潜在地理分布格局

选取当代气候情景和 2081—2100 年 2 条共享社会经济途径(SSP1-2.6 和 SSP5-8.5), 利用 MaxEnt 模型对兜兰属植物和属下 14 个种的潜在地理分布格局进行模拟, 得到不同情景下的适生区面积(图 5、6)。

当代气候条件下, 兜兰属植物的高适生区面积为 $27.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区面积为 $32.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 SSP1-2.6 情景下, 兜兰属植物高、中适生区面积和占比均有扩大, 面积增大大幅度为 4.3%和 31.9%, 达到 28.58×10^4 和 $42.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 SSP5-8.5 情景下, 高适生区大幅缩减 51%, 中适生区扩张 16.7%, 总适生区的范围比当代扩张了 15.8%。

到 21 世纪末, 在 SSP1-2.6 情景下, 分布在较北地区的巨瓣兜兰、小叶兜兰、同色兜兰、带叶兜兰、长瓣兜兰、硬叶兜兰、秀丽兜兰、紫毛兜兰和华南地区的紫纹兜兰、卷萼兜兰的适生区扩张, 而杏黄兜兰、格力兜兰的适生区收缩。在 SSP5-8.5 情景下, 杏黄兜兰、带叶兜兰、巨瓣兜兰、同色兜兰、长瓣兜兰、格力兜兰、紫纹兜兰、紫毛兜兰的适生

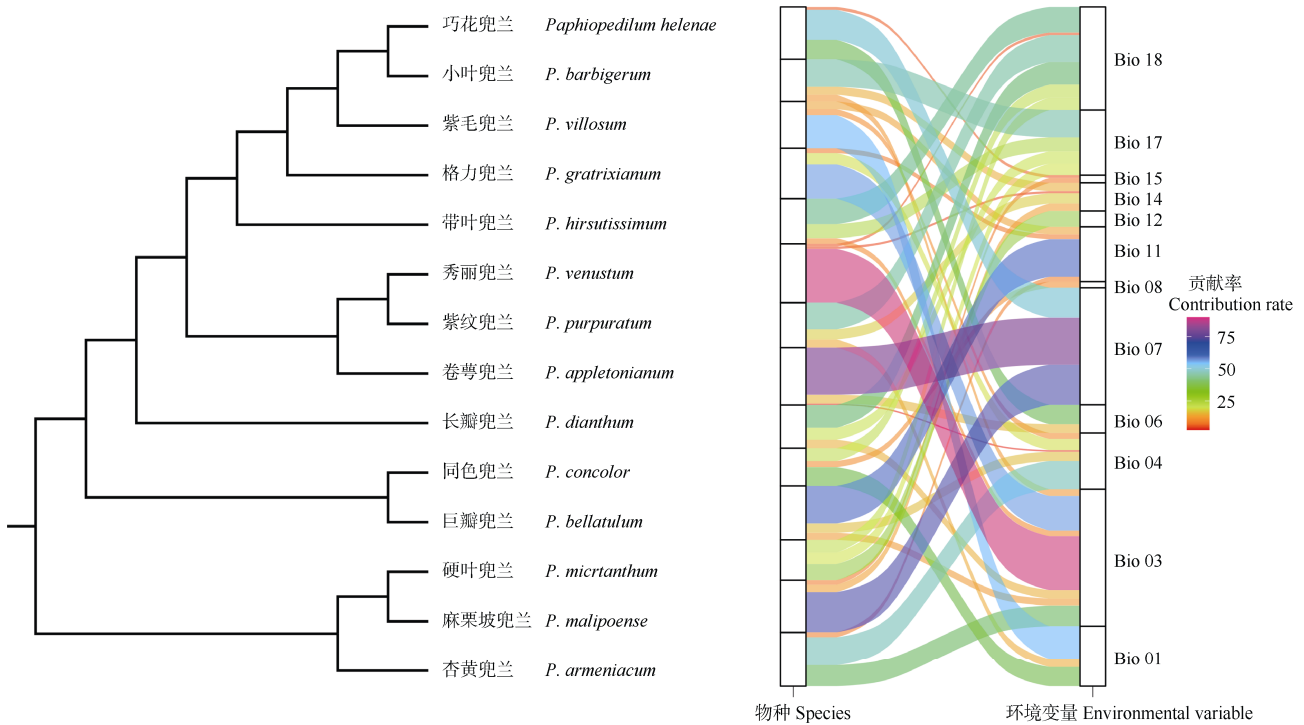


图 4 不同植物类群与环境变量的关系

Fig. 4 Relationships between different plant groups and environmental variables

区扩张, 而卷萼兜兰、小叶兜兰、硬叶兜兰、秀丽兜兰的适生区收缩; 在 2 种气候情景下, 巧花兜兰和麻栗坡兜兰的适生区都有不同程度的收缩, 在 SSP5-8.5 情景下收缩幅度更大。

计算各物种主导气候因子的变异范围, 发现在同时受到多个环境因子影响的物种中, 紫纹兜兰适宜生境的气候因子变异范围较大, 气候适应性较强, 而长瓣兜兰适宜生境的气候因子变异范围较为狭窄, 对气候的要求较苛刻。

当代气候条件下, 紫纹兜兰潜在分布区与现存记载的分布区域较为吻合, 分布于福建、广东、广西南部, 以及云南东南部和香港。紫纹兜兰在中国的适生总面积为 $21.04 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高度适生区面积和 中度适生区面积分别为 2.68×10^4 和 $6.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。SSP1-2.6 情景下, 2081—2100 年紫纹兜兰的高、中度适生区面积都呈增加趋势, 增加幅度为 15.4% 和 19.5%; 在 SSP5-8.5 情景下, 2081—2100 年紫纹兜兰高、中适生区范围略有增加, 幅度为 5% 和 7%。

当代气候条件下, 长瓣兜兰的高、中适生区主要分布于云南东南部、广西西部、贵州南部, 零星分布于四川南部、重庆西南部和广东西南部, 与现有的野外种群记载较为吻合。长瓣兜兰在中国的适

生总面积为 $25.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高度适生区面积和 中度适生区面积分别为 3.91×10^4 和 $5.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 SSP1-2.6 情景下(2081—2100 年), 高度适生区和中 度适生区面积分别扩大 23% 和 6%; 而在 SSP5-8.5 情景下(2081—2100 年), 高度适生区面积缩小 43%, 中度适生区面积扩大 18.5%。

3 结论和讨论

3.1 兜兰属植物的分布格局

本研究利用最大熵模型模拟了兜兰属 14 种植物在 1970—2000 年和 2 种气候情景下 2081—2100 年的分布区, 根据模型的 ROC 曲线和 AUC 值, 本次模拟的结果是理想、可靠的。影响兜兰属的主要环境因子是年降水量、年温度变化范围和最干旱季度降水量, 降水是影响兜兰属物种分布的最主要因素。

前人^[27]研究表明, 中国的南亚热带地区是兜兰属的生态多样性中心。本研究结果也表明在当代气候条件下, 兜兰属的最适宜分布区位于滇东南地区、贵州西南、南部地区、广西西部、广东南部和海南北部。结合中心野外实地调查与标本、文献的数据, 在全国范围内本预测结果与兜兰属的实际野

植物 Species	当代 Current	SSP1.26: 2081—2100年	SSP5.85: 2081—2100年	SSP1.26与 当代相比	SSP5.85与 当代相比
兜兰属 <i>Paphiopedilum</i>				32.69%	15.84%
卷萼兜兰 <i>P. appletonianum</i>				2.74%	-5.48%
杏黄兜兰 <i>P. armeniacum</i>				-4.59%	2.28%
小叶兜兰 <i>P. barbigerrum</i>				22.19%	-5.25%
巨瓣兜兰 <i>P. bellatulum</i>				117.09%	160.34%
同色兜兰 <i>P. concolor</i>				40.74%	78.87%
长瓣兜兰 <i>P. dianthum</i>				15.46%	12.18%
格力兜兰 <i>P. gratixianum</i>				-3.81%	21.34%

图 5 不同气候变化情景下兜兰属的潜在分布格局及其变化趋势。↑: 扩张趋势; ↓: 收缩趋势; 颜色条: -6%~160%。下同
 Fig. 5 Potential distribution pattern and change trend of *Paphiopedilum* under different climate change scenarios. ↑: Expansory trend; ↓: Contraction trend; Color bar: -6%~160%. The same below

外分布区基本相吻合, 且高适生区也符合兜兰属的起源和演化中心。

我国亚热带地区主要受东亚季风的影响, 其中西部地区主要受印度洋西南季风的影响, 而东部地

区主要受太平洋季风的影响, 季风带来的大量降水造就了我国亚热带丰富的生物多样性。随着全球气温升高, 中国区域极端降水发生频率增强, 且我国西南地区降水强度增加更为显著^[28]。与当代气候相

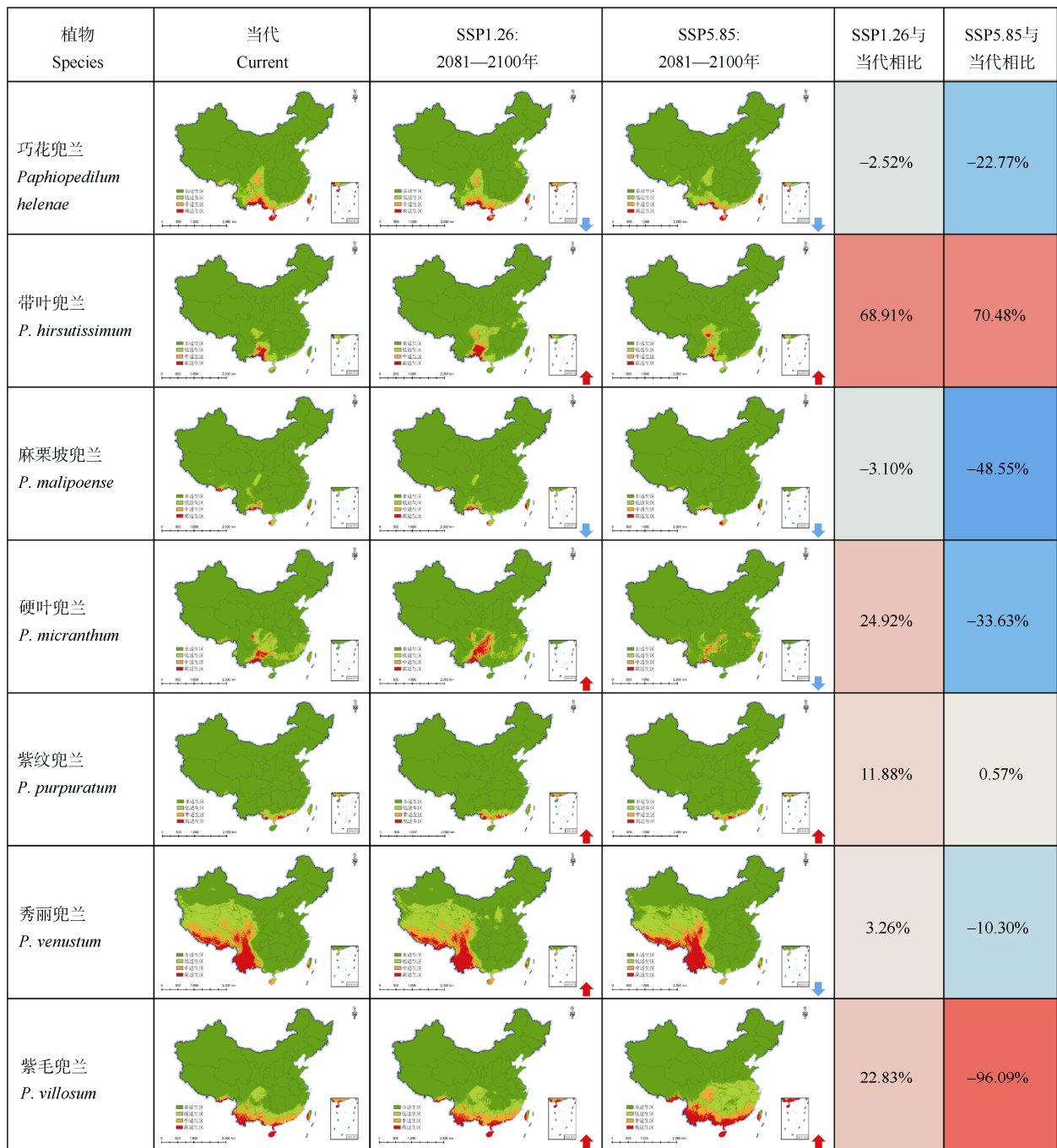


图 6 不同气候变化情景下兜兰属的潜在分布格局及其变化趋势

Fig. 6 Potential distribution pattern and change trend of *Paphiopedilum* under different climate change scenarios

比, 在 2 种不同的未来气候情景下兜兰属植物的适生区均呈扩张趋势, 虽然整体适生区的破碎化区域链接成带状, 但是若仅针对高适生区而言破碎化愈加严重。随着全球变暖, 兜兰属植物的生境适生区有向北和西北方向扩张的趋势, 逐渐往西北亚热带方向延伸, 这可能与气候变暖条件下亚热带北界向北推移有很大的关联^[29]。在 SSP5-8.5 的情景下, 整体适生区范围虽是呈扩张趋势, 但高适生区出现

了大幅度的收缩, 这表明随着全球温度的上升和降水的增加, 部分不适生区将变成可适生区, 然而温度的剧烈上升和降水量的大幅度增加, 也将导致物种的部分原生境不再适合其生存。

3.2 兜兰属植物的保护策略

虽然兜兰属物种有地生、石上附生和树上附生之分, 但是生于地面的兜兰其生境要求与附生兜兰也大致相近^[14], 因此在对兜兰属物种进行保护时,

首先要保证其附生的环境。在未来气候情景下,不同种群的分布区变化规律并不一致,其分布格局响应气候变化的趋势也有所不同,因此我们建议对不同变化趋势的物种采用不同的保护策略。但首先要做的应该是在物种的高适生区加强力度开展资源调查,寻找可能存在的新种群的信息,为后续开展工作提供更准确的种群数据。例如紫纹兜兰等对气候的适应性较强的,未来能适应温度、降水变化幅度较大的环境的物种,表明其具有迁地保护和就地保护的生物学基础。在原产地因人为因素造成种群大幅缩减的当前,应尽快将一些植株迁往异地予以保存,并开展人工繁育,在其未来新增或原有的高适生区域,开展物种的迁地、就地保护或者野外回归工作,稳定种群数量和扩大种群规模。又比如长瓣兜兰这类虽对气候要求较为苛刻,但是在未来情境下分布区仍然呈扩张趋势的,首要是开展种质资源的收集工作,再者,从保护其原有生境入手,减少人为活动造成的损害,确保原生境为物种提供维持其生存的环境,开展就地保护工作和加强动态监测的力度。在未来气候变化而新增的高适生区,应在衡量该区域物种多样性和生态位竞争的前提下,尝试人为主动地、有管理地开展物种辅助迁移^[30],从而使其种群未来的存续性更高。

而对于未来情景下缩减明显的物种,例如巧花兜兰,其高适生区稳定存在的地区可能会成为将来应对气候变化的避难所。在过去气候变化的过程中,避难所为生物体提供了在不利条件下维持其生存和生物多样性的环境,在应对未来全球气候变暖可能会导致的极端高温等不利事件下,避难所同样可以为生物提供生存保障,其保护值得优先考虑^[31],应特别重视对这些区域原生境的保护,确保在不对避难所的生境造成人为损伤的前提下开展小幅度的干预,提高物种的生存率。加强和做好对种群的长期监测工作,做好种质资源的保存工作,防止物种灭绝,在合适的条件下开展物种的回归工作。

针对以上研究结果,为了更好的开展兜兰属物种的保护工作,应根据模型结果开展实地调查,摸清遗漏区的资源现状,收集更多物种的种群信息。对于兜兰属植物分布密集地区(云南东南部、广西西部),应当扩大当地国家级自然保护区的面积,减少保护空缺区域,或将省级、县级自然保护区升级为国家级保护区。从现有保护区的整体分布来看,我国南方的保护区总体上呈现片断化不连续格局,并

未建立较为连续的自然保护区,今后应在多样性高的区域优先进行自然保护区网络建设,提高相邻自然保护区的连通性、减少人为经济活动对其生存构成的威胁^[32],维持生境的稳定和连续。对物种开展野外回归、濒危小种群复壮、生境优化等保护工作后还需开展长期的管理和野外监测,以确保兜兰属种群的自然繁衍、适应性进化和遗传多样性。

参考文献

- [1] ZHANG W J, CHEN J K. Advances in study of the distribution area of species [J]. Biodiv Sci, 2003, 11(5): 364–369. [张文驹, 陈家宽. 物种分布区研究进展 [J]. 生物多样性, 2003, 11(5): 364–369. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2003.05.002.]
- [2] VELOZ S D, WILLIAMS J W, BLOIS J L, et al. No-analog climates and shifting realized niches during the late quaternary: Implications for 21st-century predictions by species distribution models [J]. Glob Change Biol, 2012, 18(5): 1698–1713. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02635.x.
- [3] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. Ecol Lett, 2012, 15(4): 365–377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.
- [4] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change [J]. Nature, 2004, 427(6970): 145–148. doi: 10.1038/nature02121.
- [5] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. Nature, 2003, 421(6918): 57–60. doi: 10.1038/nature01333.
- [6] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1054–1062.
- [7] WANG S X, WU Z F, GONG Y F, et al. Climate warming shifts the time interval between flowering and leaf unfolding depending on the warming period [J]. Sci China Life Sci, 2022, 65(11): 2316–2324. doi: 10.1007/s11427-022-2094-6.
- [8] ELITH J, LEATHWICK J R. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time [J]. Ann Rev Ecol Evol Syst, 2009, 40: 677–697. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
- [9] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecol Model, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [10] XU Z L, PENG H H, PENG S Z. The development and evaluation of species distribution models [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(2): 557–567. [许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557–567. doi: 10.5846/stxb201304030600.]
- [11] ZHU Y Y, XU X T. Effects of climate change on the distribution of wild population of *Metasequoia glyptostroboides*, an endangered and endemic species in China [J]. Chin J Ecol, 2019, 38(6): 1629–1636. [朱

- 莹莹, 徐晓婷. 气候变化对我国特有濒危物种水杉野生种群分布的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1629–1636. doi: 10.13292/j.1000-4890.201906.018.]
- [12] ZHANG J Q, XU Z P, WAN T, et al. Study on potential distribution areas of *Gymnocarpus przewalskii* in China under future climatic conditions [J]. J Plant Resour Environ, 2019, 28(3): 51–57. [张佳琦, 徐振朋, 宛涛, 等. 未来气候条件下裸果木在中国的潜在分布区研究 [J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 51–57. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.07.]
- [13] HU X G, JIN Y Q, WANG X R, et al. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis* [J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0132326. doi: 10.1371/journal.pone.0132326.
- [14] LIU Z J, CHEN X Q, CHEN L J, et al. The Genus *Paphiopedilum* in China [M]. Beijing: Science Press, 2009: 8–10. [刘仲健, 陈心启, 陈利君, 等. 中国兜兰属植物 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 8–10.]
- [15] LUO Y B, JIA J S, WANG C L. A general review of the conservation status of Chinese orchids [J]. Biodiv Sci, 2003, 11(1): 70–77. [罗毅波, 贾建生, 王春玲. 中国兰科植物保育的现状和展望 [J]. 生物多样性, 2003, 11(1): 70–77. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2003.01.010.]
- [16] LUO Y B, JIA J S, WANG C L. Conservation strategy and potential advantages of the Chinese *Paphiopedilum* [J]. Biodiv Sci, 2003, 11(6): 491–498. [罗毅波, 贾建生, 王春玲. 初论中国兜兰属植物的保护策略及其潜在资源优势 [J]. 生物多样性, 2003, 11(6): 491–498. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2003.06.009.]
- [17] WANG Z, CONG L, LIU Y. A review of *Paphiopedilum* research [J]. Sci Silv Sin, 2006, 42(7): 113–119. [王贞, 丛磊, 刘燕. 兜兰属植物研究现状 [J]. 林业科学, 2006, 42(7): 113–119. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.07.020.]
- [18] CHEN S C. Orchids and their conservation in China [C]// Proceedings of the 5th Asia Pacific Orch Conference & Show. 1996: 49–52.
- [19] Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Agendae Academiae Sinicae Editta. Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 17 [M]. Beijing: Science Press, 2006: 52–72. [中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 17 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52–72.]
- [20] Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences. Catalogue of Life China: 2022 [OL]. (2022-05-26) <http://www.sp2000.org.cn/>.
- [21] ZHOU T J, CHEN Z M, CHEN X L, et al. Interpreting IPCC AR6: Future global climate based on projection under scenarios and on near-term information [J]. Climate Change Res, 2021, 17(6): 652–663. [周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. IPCC AR6 报告解读: 未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652–663. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.239.]
- [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. [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] DENG F, LI X B, WANG H, et al. The suitability of geographic distribution and the dominant factors of alfalfa based on MaxEnt model in Xilin Gol [J]. Pratac Sci, 2014, 31(10): 1840–1847. [邓飞, 李晓兵, 王宏, 等. 基于 Maxent 模型评价紫花苜蓿在锡林郭勒盟的分布适宜性及主导因子 [J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1840–1847. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2013-0686.]
- [24] ZHOU Y, YI Y J, YANG Y F, et al. Predicting geographical distributions of homonoia riparia lour by using maximum entropy [J]. Water Resour Hydropower Technol, 2019, 50(5): 73–81. [周扬, 易雨君, 杨雨风, 等. 基于最大熵模型预测水杨柳的潜在生境分布 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 73–81. doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.05.009.]
- [25] ZHANG X Q. Geographical distribution and climatic suitability of typical eco-economical tree species in the dryland of northwest China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. [张晓芹. 西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.]
- [26] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter [J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.
- [27] WANG Y Q. The geography of Chinese species of *Paphiopedilum* [J]. Guihaia, 2000, 20(4): 289–294. [王英强. 中国兜兰属植物生态地理分布 [J]. 广西植物, 2000, 20(4): 289–294. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2000.04.001.]
- [28] CHEN X C, XU Y, YAO Y. Changes in climate extremes over China in a 2 °C, 3 °C, and 4 °C warmer world [J]. Chin J Atmos Sci, 2015, 39(6): 1123–1135. [陈晓晨, 徐影, 姚遥. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估 [J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1123–1135. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224.]
- [29] MIAO Q L, DING Y Y, WANG Y. Impact of climate warming on the northern boundary of subtropical zone of China [J]. Geogr Res, 2009, 28(3): 634–642. [缪启龙, 丁园圆, 王勇. 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响 [J]. 地理研究, 2009, 28(3): 634–642. doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.2009.03.008.]
- [30] STE-MARIE C, NELSON E A, DABROS A, et al. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept [J]. For Chron, 2011, 87(6): 724–730. doi: 10.5558/tfc2011-089.
- [31] NOSS R F. Beyond kyoto: Forest management in a time of rapid climate change [J]. Conserv Biol, 2001, 15(3): 578–590. doi: 10.1046/j.1523-1739.2001.015003578.x.
- [32] TARABON S, DUTOIT T, ISSELIN-NONDEDEU F. Pooling biodiversity offsets to improve habitat connectivity and species conservation [J]. J Environ Manag, 2021, 277: 111425. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111425.