

基于最大熵模型的海南杜鹃在中国的潜在地理分布

云英英, 范秋云, 史佑海*

海南大学海南省热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南海口 570228

摘要: 海南杜鹃 (*Rhododendron hainanense* Merr.) 具有较高的观赏价值和生态价值, 研究其生态需求和适生范围, 对于海南杜鹃的保护与栽培应用具有重要意义。本研究主要应用最大熵模型 (MaxEnt) 和地理信息系统 (ArcGIS), 基于海南杜鹃现有地理分布信息和气候因子, 模拟海南杜鹃在中国的潜在分布区, 并具体分析影响海南杜鹃潜在分布的关键环境因子及适宜阈值。结果表明: 在当代气候情景下 (1970—2000 年), 用最大熵模型 (MaxEnt) 对海南杜鹃适生区进行模拟的准确度较高, 气温和降水对海南杜鹃的影响较大, 其中影响海南杜鹃潜在分布的主导因子为最暖季降水量 (bio18) 和平均气温日较差 (bio2)。平均气温日较差 (bio2) 在 5~7 °C 区间、最暖季降水量 (bio18) 在 610~3990 mm 区间的气候环境有利于海南杜鹃生长, 在一定范围内海南杜鹃的出现概率会随着降水量的增大而增大。在中国区域, 海南杜鹃比较适应海南、广西、广东、台湾、四川东部、重庆以及贵州等地的气候环境, 当代气候情景下总适生区面积为 $132.36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区范围整体上会随着未来气候的变化而有所增大。本研究旨在为海南杜鹃的保护与应用推广提供科学依据。

关键词: 海南杜鹃; 最大熵模型; 气候响应; 潜在地理分布

中图分类号: S685.21

文献标志码: A

Potential Geographical Distribution of *Rhododendron hainanense* Based on MaxEnt Model

YUN Yingying, FAN Qiuyun, SHI Youhai*

Hainan Key Laboratory for Biology of Tropical Ornamental Plant Germplasm, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: *Rhododendron hainanense* Merr. has high ornamental and ecological value. It is of great significance for the protection and application of this plant through the study of ecological requirement and applicable range. In this paper, MaxEnt model and ArcGIS were used to simulate the potential geographical distribution of *R. hainanense* in China, based on the existing geographic distribution information, climate factors of this plant. And the key environmental factors, affecting the potential distribution of *R. hainanense* and suitable thresholds are analyzed. The results showed that under the contemporary climate scenario (1970—2000), the maximum entropy model (MaxEnt) can predict the suitable area of *R. hainanense* with high accuracy. The temperature and precipitation have a great influence on *R. hainanense*. The main factors affecting the potential distribution of *R. hainanense* are precipitation of warmest quarter (bio18) and mean diurnal range (bio2). When the precipitation of warmest quarter (bio18) is between 610–3990 mm and the mean diurnal range (bio2) is 5–7 °C, the climate environment is suitable for the growth of *R. hainanense*. In a certain range, the probability of presence of *R. hainanense* will increase with the increase of precipitation. In China, the suitable habitat area of *R. hainanense* is mainly distributed in Hainan, Guangxi, Guangdong, Taiwan, eastern Sichuan, Chongqing and Guizhou. The total suitable habitat area of *R. hainanense* under contemporary climate scenarios is $132.36 \times 10^4 \text{ km}^2$. The purpose of this paper is to provide a scientific basis for the protection and application for the species.

Keywords: *Rhododendron hainanense*; MaxEnt Model; climate response; potential geographical distribution

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.05.018

收稿日期 2023-02-20; 修回日期 2023-04-09

基金项目 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室开放项目 (No. hnhmzd202202)。

作者简介 云英英 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 园林植物资源与利用。*通信作者 (Corresponding author): 史佑海 (SHI Youhai), E-mail: shiyouhai@163.com。

海南杜鹃 (*Rhododendron hainanense* Merr.) 为杜鹃花科杜鹃花属常绿灌木, 原产中国海南、广西、广东及越南北部^[1]。该植物花色鲜艳、花期长, 扦插易活, 有较强的耐热性且有利于稳固河岸^[2-4], 具有较高的观赏价值和园林应用潜力。目前海南杜鹃分布点较少, 仍处于野生未开发利用状态, 其种植和园林应用尚未得到推广。导致这一现状的原因之一是海南杜鹃具体的生态适应幅尚未得到量化, 科学的栽培管理体系尚未成熟。在地理区域大尺度范围, 气候是制约物种地理区域分布的主导因子, 气候变化对物种的分布格局存在较大影响^[5-6]。在全球气候变化剧烈的背景下, 分析影响海南杜鹃地理分布的主导气候因子及潜在适生区, 研究其气候适应性, 有助于海南杜鹃的保护与推广应用工作^[7]。

基于分布情况与环境生态位理论, 有利于研究植物和环境的关系^[8]。由 Peterson & Vieglais 提出的生态位模型 (Ecological Niche Modeling) 是利用物种的分布数据和相关环境变量构建模型, 判断物种的生态需求, 并将运算结果投射到不同的时间和空间中, 预测物种的潜在分布^[9-10]。生态位模型中最常用的最大熵模型 (Maximum Entropy Model, MaxEnt) 是由 PHILLIPS 等^[11]以最大熵理论 (The Theory of Maximum Entropy)^[12]为基础, 构建的模拟物种地理尺度空间分布模型, 运用最大熵模型预测植物适生区, 有助于判断植物的适生性^[13-14]。最大熵模型对样本量的要求不高, 在样本量较少的情况下也能获得较好的模拟效果^[15-17]。最大熵模型以其预测精度高、适用性强等优点^[18-19],

已被广泛运用于濒危动植物保护、作物种植区划、气候对物种分布影响以及亲缘地理学等领域^[20-22]。

目前海南杜鹃的研究主要集中在保育^[3, 23]、繁殖栽培技术^[2, 24-25]及耐热性^[4, 26]等方面, 关于适生区域及地理分布的影响因素等研究较少见报道。本研究依托海南杜鹃的地理分布及气候数据, 运用 MaxEnt 算法构建海南杜鹃物种分布模型, 着重研究以下问题: (1) 分析确定影响海南杜鹃适宜性分布的主导环境因子及其阈值, 把握海南杜鹃的气候环境需求; (2) 海南杜鹃在中国的潜在适宜分布格局, 以及在气候变化背景下海南杜鹃适宜分布范围的变化。本研究结果将为海南杜鹃的保护与栽培应用提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据及预处理

海南杜鹃的原始分布数据来自实地调查及中国数字植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn/>), 剔除其中分布信息不明的点和重叠点, 最终获得 20 个有效分布点 (图 1)。

1.2 环境数据及预处理

本研究所用的环境数据来源于世界气候数据库 Worldclim (<https://www.worldclim.org/>) 的 19 个气候数据 (表 1), 当代气候数据选择 1970—2000 年的气候因子, 未来气候选择 2070s 中的具有气候模拟优势的 CSM4 系统气候因子^[27]。空间分辨率均为 2.5 arc minutes。

为了避免在构建最大熵模型时环境变量的多

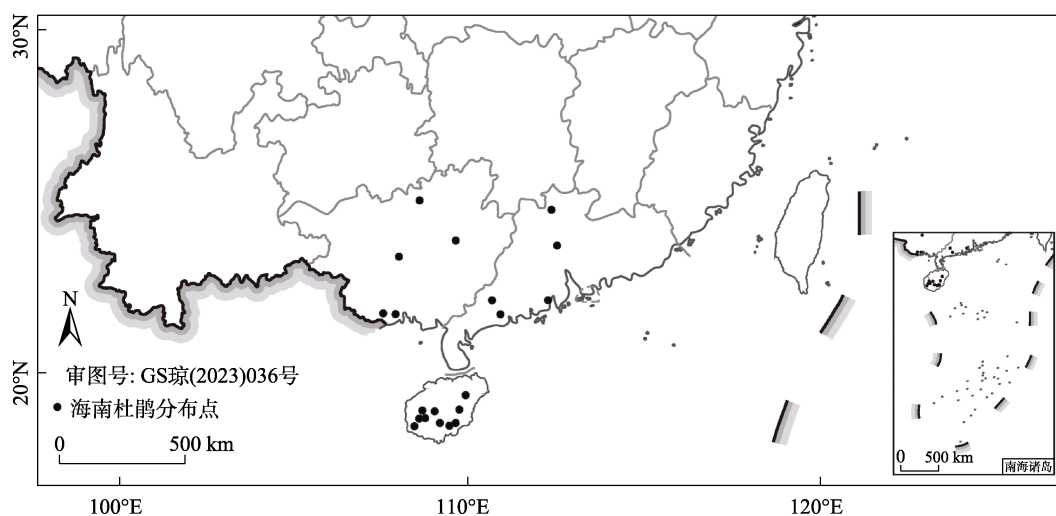


图 1 用于模型运算的海南杜鹃分布点

Fig. 1 Distribution information of *R. hainanense* used in MaxEnt model

表 1 研究采用的环境因子
Tab. 1 Environmental variables used in this study

代码 Code	环境因子 Environmental variables	代码 Code	环境因子 Environmental variables
bio1	年平均气温	bio11	最冷季平均气温
bio2	平均气温日较差	bio12	年降水量
bio3	等温性[(bio2/bio7)×100]	bio13	最湿月降水量
bio4	气温季节性变动系数（标准差×100）	bio14	最干月降水量
bio5	最热月最高气温	bio15	降水量的季节性变化（变异系数）
bio6	最冷月最低气温	bio16	最干季降水量
bio7	气温年较差（bio5-bio6）	bio17	最湿季降水量
bio8	最湿季平均气温	bio18	最暖季降水量
bio9	最干季平均气温	bio19	最冷季降水量
bio10	最暖季平均气温	alt	海拔

重共线性导致模型过度拟合，从而影响模拟的准确性^[28]，本研究首先把 19 个气候变量导入 MaxEnt 模型进行模拟并记录下百分比贡献率，接着应用 SPSS 软件对各气候因子进行 Pearson 相关性检验，如果气候因子间的 Pearson 相关系数（ r ） ≥ 0.8 ，则选择其中贡献率最高的因子^[29]。筛选后得到 7 个气候变量（表 2），用于参与海南杜鹃的潜在分布建模。

表 2 用于模型运算的环境变量
Tab. 2 Environment variables used in MaxEnt model

环境变量的		
代码	中文名称	环境变量的英文名称
Code	Chinese name of environment variables	English name of environment variables
bio2	平均气温日较差	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp - min temp)
bio6	最冷月最低气温	Min temperature of coldest month
bio8	最湿季平均气温	Mean temperature of wettest quarter
bio10	最暖季平均气温	Mean temperature of warmest quarter
bio14	最干月降水量	Precipitation of driest month
bio15	降水量的季节性变化（变异系数）	Precipitation seasonality (coefficient of variation)
bio18	最暖季降水量	Precipitation of warmest quarter

1.3 模型构建及潜在适生区分布可视化

将.csv 格式的海南杜鹃分布点经纬度信息表和 7 个气候变量同时导入 MaxEnt3.4.1 软件，在模型参数设置中开启刀切法（Jackknife）来评价各环境变量的权重，同时开启绘制各环境因子的响应曲线，输出类型为逻辑值（Logistic），在设置中勾选 Write plot data 和 Random seed，选取 75%的地理分布点作为训练集数据（Training data），25%作为测试集数据（Test data），重复运

行类型设置为 Subsample,重复运行次数为 10 次，其余选项保持默认设置，分别模拟当代和未来不同气候情景下海南杜鹃的潜在分布区^[7, 30]。将 MaxEnt 软件生成的预测结果文件导入 ArcGIS 10.2 软件，对预测文件进行中国区域的掩膜提取，并运用重分类工具参考自然间断点分级法（Jenks natural breaks）对海南杜鹃的潜在分布区划分适生等级^[27]，最终将海南杜鹃的适生区分为 4 个等级：非适生区（ $P<0.08$ ）、低适生区（ $0.09\leq P<0.27$ ）、中适生区（ $0.27\leq P<0.53$ ）和高适生区（ $P\geq 0.53$ ）。

2 结果与分析

2.1 模型预测评价

应用 MaxEnt 模型的受试者评价特征曲线（Receiver Operating Characteristic Curve，ROC）得到的 AUC 值对海南杜鹃适生性分布结果进行精度评估，AUC 值越接近 1 表示模型预测结果精度越高，AUC 值表示为：0.50~0.60（失败），0.60~0.70（较差），0.70~0.80（一般），0.80~0.90（好），0.90~1.0（非常好）^[31]。结果显示，本研究 10 次运行结果得到的平均训练 AUC 值和平均测试 AUC 值分别为 0.999 和 0.998，远大于随机预测的 AUC 值（0.5），表明 MaxEnt 模型对海南杜鹃适生区模拟的准确度较高。

2.2 海南杜鹃潜在地理分布的影响因子

运用 Jackknife 刀切法来衡量各环境因子的重要度^[32-33]（图 2），综合分析 MaxEnt 模型运行得到的气候变量贡献率和训练增益可知，单独使用时增益最高的环境变量是最暖季降水量（bio18），当平均气温日较差（bio2）被省略时环境变量的增益减少得最多，由此可见，影响海南杜鹃潜在

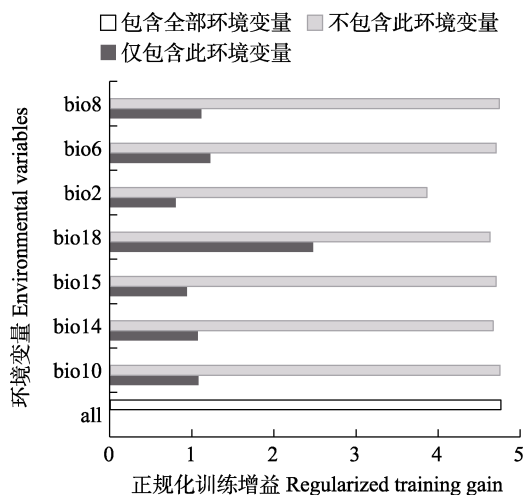


图 2 评估环境变量对海南杜鹃分布相对重要性的刀切检验结果

Fig. 2 Jackknife test for evaluating relative importance of environmental variables for *R. hainanense*

分布的主导因子为最暖季降水量 (bio18) (贡献率为 48.6%) 和平均气温日较差 (bio2) (贡献率为 22.9%), 气温和降水是影响海南杜鹃地理分布的主要环境因素。基于 MaxEnt 模型运算结果绘制海南杜鹃对环境因子的响应曲线 (图 3), 进一步分析主要环境因子对海南杜鹃分布的影响, 并统计分布概率大于 0.5 时对应的各环境变量值,

得出适宜海南杜鹃生长的各环境变量值范围 (表 3) [34-35]。结果显示在气温方面, 当平均气温日较差 (bio2) 在 5~7 °C 区间 (图 3A)、最冷月最低气温 (bio6) 在 6~15 °C 区间 (图 3B)、最湿季平均气温 (bio8) 在 23~27 °C 区间 (图 3C)、最暖季平均气温 (bio10) 在 24~29 °C 区间 (图 3D) 时海南杜鹃的出现概率较高, 表明平均气温日较差较小和较温暖的气候环境更适宜海南杜鹃的生长。在降水方面, 最干月降水量 (bio14) 的适宜范围为 19~47 mm (图 3E), 最暖季降水量 (bio18) (图 3F) 的适宜范围为 610~3990 mm, 且在一定范围内, 海南杜鹃的出现概率随着最暖季降水量 (bio18) 的提高而显著提高, 表明海南杜鹃受降水量的影响较大, 降水量的提高有利于海南杜鹃的生长。

2.3 海南杜鹃在当代气候条件下的潜在地理分布

经 MaxEnt 模型预测出海南杜鹃在当代气候条件下 (1970—2000 年) 的潜在地理分布区 (图 4)。在 20 个有效分布记录点的适生指数值中最高的是广东台山市四九乡古兜山 (0.86), 最低的是广东乳源县东坪镇梯下村 (0.31), 平均值为 0.64。海南杜鹃在当代气候条件下在我国的潜在分布区

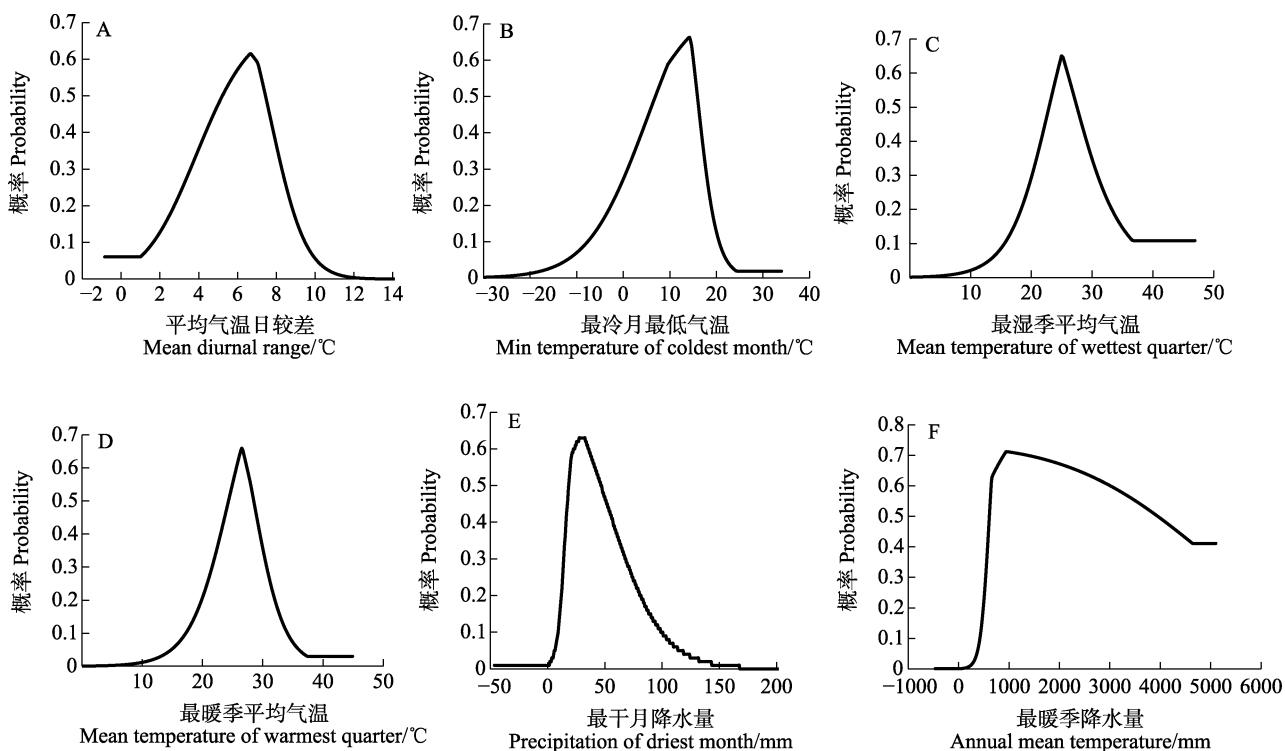


图 3 海南杜鹃对主要环境变量的响应曲线

Fig. 3 Response curve of *R. hainanense* to main environmental variables

表 3 主要环境变量的贡献率及适宜范围
Tab. 3 Contribution rate and suitable range of main environment variables

环境变量 Environment variables	贡献率 Contribution rate/%	适宜区间 Suitable range
最暖季降水量/mm	48.6	610~3990
平均气温日较差/℃	22.9	5~7
降水量的季节性变化(变异系数)	15.9	64~85
最干月降水量/mm	8.6	19~47
最冷月最低气温/℃	3.0	6~15
最暖季平均气温/℃	0.7	24~29
最湿季平均气温/℃	0.2	23~27

主要位于中南和东南部，其中海南、广西、广东、台湾、四川东部、重庆以及贵州等地较适宜海南杜鹃分布。海南杜鹃在中国区域内的总适生区面积为 $132.36\times10^4\text{ km}^2$ ，其中高适生区面积为 $24.67\times10^4\text{ km}^2$ ，中适生区面积为 $33.88\times10^4\text{ km}^2$ ，低适生区面积为 $73.81\times10^4\text{ km}^2$ 。

2.4 海南杜鹃在未来气候情景下的分布预测

对未来气候情景下（2070s）海南杜鹃的潜在适生区分布情况进行预测（图 5），结果表明与当代气候情景相比，海南杜鹃的总适生区范围整体上会随着未来气候的变化而有所增大，总适生区面积由当前的 $132.36\times10^4\text{ km}^2$ 增加至 $143.19\times10^4\text{ km}^2$ ，

适生区呈现由近海地区向内陆扩展的趋势。

3 讨论

3.1 适生区模拟精度

研究所用的环境变量和种群分布数据等会对物种适生区模拟结果的准确性产生影响。在环境变量的选取上，本研究应用 SPSS 软件对气候变量进行了 Pearson 相关性分析，剔除了相关性较大的气候变量，这在一定程度上减小了过度拟合的影响，提高了模拟结果的可靠性^[36]，所采用的分布点数据基本覆盖已知分布范围，但分布点数据较少，这可能会在一定程度上影响适生区模拟的精度。海南杜鹃的潜在分布区预测结果显示，用于评估模型模拟效果的 AUC 值非常接近 1，且当前气候情景下的潜在分布区与实际分布基本一致，表明在地理区域范围用最大熵模型（MaxEnt）对海南杜鹃适生区进行模拟的准确度较高。本研究仅从气候方面对海南杜鹃进行区域尺度上的潜在分布模拟，但影响海南杜鹃地理分布的因素还有很多，包括历史地理事件、土壤、光照、地形地势以及种间关系等，适生区预测结果可能会与实际适生区存在一定的偏差。在今后的研究中还需要考虑更多因素，进一步把握海南杜鹃的地

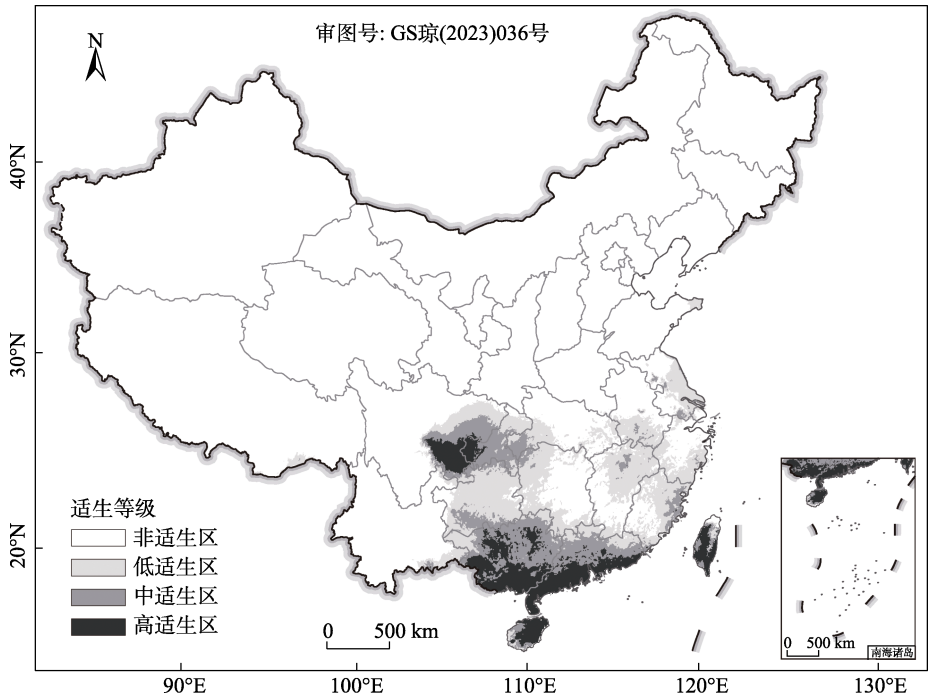


图 4 海南杜鹃在当前气候条件下的潜在分布区
Fig. 4 Ecological suitability distribution of *R. hainanense* at present

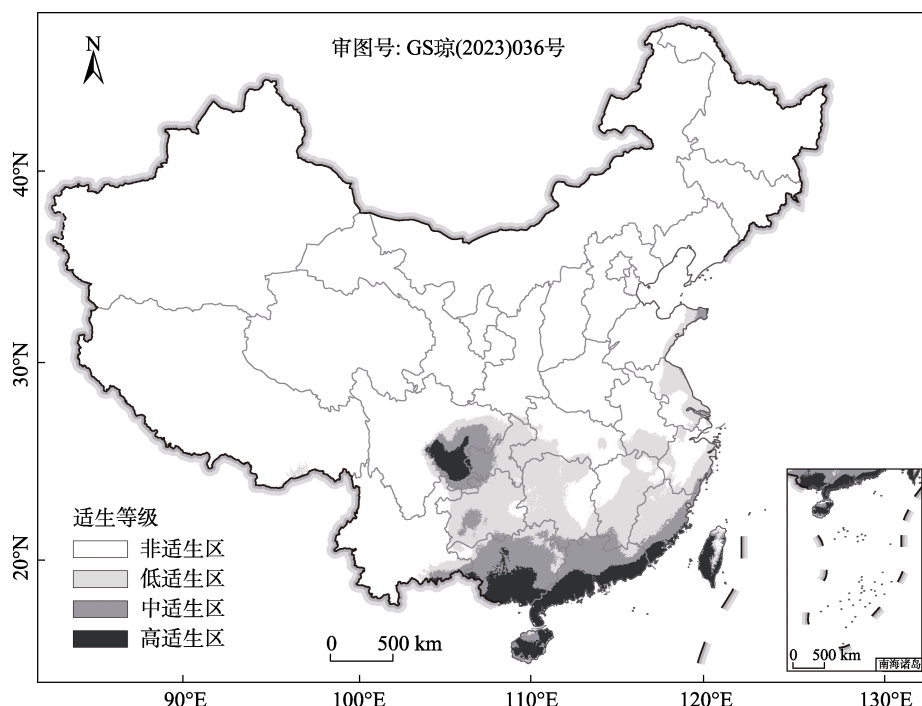


图 5 海南杜鹃在未来气候情景下的潜在地理分布区 (2070s)

Fig. 5 Ecological suitability distribution of *R. hainanense* in 2070s

理分布格局成因及生态需求,为海南杜鹃的保护与应用提供更科学有力的依据。

3.2 影响潜在分布的关键因子

热量和水分是决定大尺度地理区域上海南杜鹃生存的主要环境因子^[37]。在一定范围内降水量的提高有利于海南杜鹃的生长,最冷月份最低气温(bio6)较低的气候环境则不利于海南杜鹃的生存。在中国区域内海南杜鹃总适生区范围整体上会随着未来气候的变化而有所增大,适生区主要分布于中国的中南和东南部,其中东南部的适生区域呈沿海分布的现象较为明显,且海南杜鹃常生于沟谷溪流附近,表明温暖、湿润的气候条件更适宜海南杜鹃的生存。

3.3 海南杜鹃资源保护与应用

海南杜鹃具有较高观赏价值和生态价值,作为耐热性较强的杜鹃花属植物,随着未来气候的变化,海南杜鹃的适宜分布范围呈现由近海地区向内陆扩展的趋势,总适生区范围有所增大,在生产实践和园林应用上具有很大的潜力。然而目前实际分布点较少,基本都以野生状态存在,且在野外实地调研中发现,海南杜鹃部分分布点受到人类活动的干扰较为严重,其数量在大幅度减少,甚至部分野外种群有消失的风险,亟待对海南杜鹃开展保护工作。今后应进一步研究影响海

南杜鹃分布的限制性因子,以就地保护为主,加强环境监测,保护海南杜鹃野生资源及生境,同时加强海南杜鹃种质资源的收集与保存。当遇到不可避免的环境和人为因素时,应及时采取迁地保护等措施。海南杜鹃现有分布点少,且分布范围较为局限,基本都野生于沟谷的溪流两岸,推测其现有分布成因与地形地势、自身繁育特点和自然条件下种子的传播能力等有着密切的联系。海南杜鹃扦插易活,对环境具有一定的适应能力,在今后工作中可考虑人为干预,采取组织培养扩繁及扦插等繁殖方式,将海南杜鹃的人工繁殖的种苗回归种植于野外适生区,扩大其分布范围和种群规模,以此助推海南杜鹃种质野外资源的保护。

参考文献

- [1] 史佑海,李绍鹏,梁伟红,宋希强,谭金红.海南野生杜鹃花属植物种质资源调查研究[J].热带作物学报,2010,31(4): 551-555.
SHI Y H, LI S P, LIANG W H, SONG X Q, TAN J H. Germplasm resources of *Rhododendron* in Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(4): 551-555. (in Chinese)
- [2] 陈怡超,宋希强,赵莹,史佑海.基质和激素对海南杜鹃扦插生根的影响[J].热带生物学报,2018,9(3): 328-332.
CHEN Y C, SONG X Q, ZHAO Y, SHI Y H. Effects of sub-

- strate and hormone on cutting propagation of *Rhododendron hainanense*[J]. Journal of Tropical Biology, 2018, 9(3): 328-332. (in Chinese)
- [3] 陈怡超, 赵莹, 宋希强, 任明迅. 海南杜鹃在河岸带弯道两侧的空间分布格局和年龄结构差异[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 841-849.
CHEN Y C, ZHAO Y, SONG X Q, REN M X. Difference in spatial distribution patterns and population structures of *Rhododendron hainanense* between both sides of riparian bends[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(8): 841-849. (in Chinese)
- [4] 刘宇, 宋希强, 史佑海, 赵莹. 高温胁迫下海南杜鹃和白花杜鹃的生理响应比较分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(17): 5827-5834.
LIU Y, SONG X Q, SHI Y H, ZHAO Y. Physiological responses comparison of *Rhododendron hainanense* and *Rhododendron mucronatum* (Blume) G. Don under high temperature stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(17): 5827-5834. (in Chinese)
- [5] 刘丹, 李玉堂, 洪玲霞, 国红, 谢阳生, 张卓立, 雷相东, 唐守正. 基于最大熵模型的吉林省主要天然林潜在分布适宜性[J]. 林业科学, 2018, 54(7): 1-15.
LIU D, LI Y T, HONG L X, GUO H, XIE Y S, ZHANG Z L, LEI X D, TANG S Z. The suitability of potential geographic distribution of natural forest types in Jilin province based on maximum entropy models[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(7): 1-15. (in Chinese)
- [6] 谢春平, 韩维栋, 王华晨, 刘大伟, 杨通文, 王章芬. 中国桃金娘的地理分布及气候限制性因子分析[J]. 热带作物报, 2022, 43(2): 409-417.
XIE C P, HAN W D, WANG H C, LIU D W, YANG T W, WANG Z F. Geographical distribution of *Rhodomyrtus tomentosa* and the limiting climate factors in China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(2): 409-417. (in Chinese)
- [7] 孙杰杰, 江波, 邱浩杰, 郭佳欢, 袁位高, 吴丹婷, 徐璇, 吴初平, 焦洁洁, 沈爱华. 基于最大熵模型预测榉树在浙江省的潜在适生区[J]. 林业资源管理, 2019(4): 37-45.
SUN J J, JIANG B, QIU H J, GUO J H, YUAN W G, WU D T, XU X, WU C P, JIAO J J, SHEN A H. A prediction on the potential suitable areas of *Zelkova schneideriana* in Zhejiang province using maximum entropy model[J]. Forest Resources Management, 2019(4): 37-45. (in Chinese)
- [8] 王刚. 黄山杜鹃地理分布模拟及 ISSR 遗传多样性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
WANG G. Modelling the geographic distribution and study on the ISSR genetic diversity of *Rhododendron maculiferum*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [9] PETERSON A T, VIEGLAIS D A. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem[J]. BioScience, 2001, 51(5): 363-371.
- [10] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
ZHU G P, LIU G Q, BU W J, GAO Y B. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(1): 90-98. (in Chinese)
- [11] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological modelling, 2006, 190: 231-259.
- [12] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620.
- [13] 周扬, 易雨君, 杨雨风, 王文君. 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.
ZHOU Y, YI Y J, YANG Y F, WANG W J. Predicting geographical distributions of *Homonoia riparia* Lour. by using maximum entropy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 73-81. (in Chinese)
- [14] 崔相艳, 王文娟, 杨小强, 李述, 秦声远, 戎俊. 基于生态位模型预测野生油菜的潜在分布[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1117-1128.
CUI X Y, WANG W J, YANG X Q, LI X, QIN S Y, RONG J. Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1117-1128. (in Chinese)
- [15] WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, PETERSON A T, GRAHAM C H, GUISON A. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. Diversity & Distributions, 2010, 14(5): 763-773.
- [16] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, ALBERT D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods[J]. Ecography, 2006, 29(5): 773-785.
- [17] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
CHEN X M, LEI Y C, ZHANG X Q, JIA H Y. Effects of sample sizes on accuracy and stability of Maximum Entropy model in predicting species distribution.[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 53-59. (in Chinese)
- [18] 张琴, 张东方, 吴明丽, 郭杰, 孙成忠, 谢彩香. 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.

- ZHANG Q, ZHANG D F, WU M L, GUO J, SUN C Z, XIE C X. Predicting the global areas for potential distribution of *Gastrodia elata* based on ecological niche models[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(7): 770-778. (in Chinese)
- [19] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 刘凤权. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3069.
- CAO X F, QIAN G L, HU B S, LIU F Q. Prediction of potential suitable distribution area of *Flaveria bidentis* in China based on niche models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3063-3069. (in Chinese)
- [20] 白君君, 侯鹏, 赵燕红, 徐海涛, 张兵. 物种生境适宜性模型及验证的研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1423-1432.
- BAI J J, HOU P, ZHAO Y H, XU H T, ZHANG B. The research progress of species habitat suitability models and verification[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7): 1423-1432. (in Chinese)
- [21] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9-12.
- ZHANG L. Application of maxent maximum entropy model in predicting potential distribution range of species[J]. The Biological Bulletin, 2015, 50(11): 9-12. (in Chinese)
- [22] 欧阳泽怡, 欧阳硕龙, 吴际友, 周志春, 李志辉, 董帅昌. 最大熵模型在植物适生区预测应用中的研究进展[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(1): 83-88.
- OUYANG Z Y, OUYANG S L, WU J Y, ZHOU Z C, LI Z H, DONG S C. Progress of the application of prediction of potential suitable distribution of plants based on Maxent[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2022, 49(1): 83-88. (in Chinese)
- [23] 陈怡超. 海南杜鹃保育生物学初步研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- CHEN Y C. Preliminary study on conservation biology of *Rhododendron hainanense*[D]. Haikou: Hainan University, 2018. (in Chinese)
- [24] 赵霞, 陈怡超, 曾晓鹏, 李子馨, 郑威彬, 李一凡, 霍少洁, 宋希强, 赵莹. 海南杜鹃的组织快繁体系优化[J]. 分子植物育种, 2022, 20(13): 4447-4454.
- ZHAO X, CHEN Y C, ZENG X P, LI Z X, ZHENG W B, LI Y F, HUO S J, SONG X Q, ZHAO Y. Optimization of tissue rapid propagation system of *Rhododendron hainanense*[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(13): 4447-4454. (in Chinese)
- [25] 史佑海, 张海宽, 杨敏. 海南杜鹃扦插繁殖技术初探[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6362-6363.
- SHI Y H, ZHANG H K, YANG M. Preliminary study on the cuttage propagation technology of *Rhododendron hainanense*[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(11): 6362-6363. (in Chinese)
- [26] 李铮. 海南杜鹃热诱导基因 *RhRCA1* 的表达及转录调控分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LI Z. Studies on the expression profile and transcriptional regulation of a thermal inducible gene *RCA1* in *Rhododendron hainanense*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [27] 肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 张灿瑜, 张晓妍, 李朗, 李捷. 闽楠(*Phoebe bournei*, Lauraceae)地理分布及随气候变化的分布格局模拟[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5703-5712.
- XIAO J H, DING X, CAI C N, ZHANG C Y, ZHANG X Y, LI L, LI J. Simulation of the potential distribution of *Phoebe bournei* with climate changes using the maximum entropy (MaxEnt) model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5703-5712. (in Chinese)
- [28] 李宁宁, 张爱平, 张林, 王克清, 罗红燕, 潘开文. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测[J]. 植物研究, 2019, 39(3): 395-406.
- LI N N, ZHANG A P, ZHANG L, WANG K Q, LUO H Y, PAN K W. Predicting potential distribution of two species of spruce in Qinghai-Tibet Plateau under climate change[J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(3): 395-406. (in Chinese)
- [29] 陆双飞, 殷晓洁, 韦晴雯, 张超, 马东旭, 刘雪莲. 气候变化下西南地区植物功能型地理分布响应[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 310-324.
- LU S F, YIN X J, WEI Q W, ZHANG C, MA D X, LIU X L. The geographical distribution response of plant functional types to climate change in southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 310-324. (in Chinese)
- [30] 梁春, 罗清, 陆祖正, 谢振兴, 覃茜, 黄欣怡. 基于 Maxent 与 GIS 的我国建兰地理分布预测及关键生物气候因子分析[J]. 北方园艺, 2017(9): 199-204.
- LIANG C, LUO Q, LU Z Z, XIE Z X, QIN Q, HUANG X Y. Prediction of geographical distribution and analysis of key bioclimatic factors of Chinese *Cymbidium ensifolium* based on Maxent and GIS[J]. Northern Horticulture, 2017(9): 199-204. (in Chinese)
- [31] 王娟娟, 曹博, 白成科, 张琳琳, 车乐. 基于 Maxent 和 ArcGIS 预测川贝母潜在分布及适宜性评价[J]. 植物研究, 2014, 34(5): 642-649.
- WANG J J, CAO B, BAI C K, ZHANG L L, CHE L. Potential distribution prediction and suitability evaluation of *Fritillaria cirrhosa* D. Don based on Maxent modeling and GIS[J]. Plant Research, 2014, 34(5): 642-649. (in Chinese)
- [32] EFRON B, STEIN C. The jackknife estimate of variance[J].

- Anrals of Statistics, 1981, 9(3): 586-596.
- [33] 李响, 张成福, 贺帅, 王雨晴, 苗林. MaxEnt 模型综合应用研究进展分析[J]. 绿色科技, 2020(14): 14-17.
- LI X, ZHANG C F, HE S, WANG Y Q, MIAO L. Research progress analysis ont he comprehensive application of Max-Ent model[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(14): 14-17. (in Chinese)
- [34] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- ZHANG H, ZHAO H X, WANG H. Potential geographical distribution of *Populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6552-6563. (in Chinese)
- [35] 汪雁楠, 赖国桢, 黄建建, 刘丽婷, 余良森, 温强, 龚春. 浙江红花油茶潜在适生区分布及其对未来气候变化的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(5): 989-997.
- WANG Y N, LAI G Z, HUANG J J, LIU L T, YU L S, WEN Q, GONG C. Potential distribution of *Camellia chekiangoleosa* under future climate change[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(5): 989-997. (in Chinese)
- [36] 郭飞龙, 徐刚标, 牟虹霖, 李赞. 伯乐树潜在地理分布时空格局模拟[J]. 植物科学学报, 2020, 38(2): 185-194.
- GUO F L, XU G B, MOU H L, LI Z. Simulation of potential spatiotemporal population dynamics of *Bretschneidera sinensis* Hemsl. based on MaxEnt model[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(2): 185-194. (in Chinese)
- [37] 陆双飞, 陈禹衡, 周斯怡, 殷晓洁. 西南地区松属乔木对气候变化的响应[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 466-477.
- LU S F, CHEN Y H, ZHOU S Y, YIN X J. Responses of Pinus species to climate change in southwestern China[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5): 466-477. (in Chinese)