石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟

宁瑶¹ 雷金睿² 宋希强^{1,3*} 韩淑梅^{1,3} 钟云芳^{1*}

¹海南大学热带农林学院, 海口 570228; ²海南省林业科学研究所, 海口 571100; ³海南大学环南海陆域生物多样性研究中心, 海口 570228

摘要 模拟物种的潜在分布区是保护管理受威胁物种的重要手段。该研究对海南岛石灰岩特有种、濒危植物——海南凤仙花(*Impatiens hainanensis*)的潜在适宜生境分布进行预测, 旨在为海南凤仙花的有效保护及重引入工作提供基础的科学依据。研究基于海南凤仙花8个种群分布点和12个环境变量, 利用最大熵模型(MaxEnt)和GIS技术构建海南凤仙花适宜生境预测模型, 模拟了当前时期海南凤仙花在海南岛的潜在分布区; 同时基于5个实际分布数据和5个不存在数据, 采用受试者工作特征曲线下的面积(AUC)、Kappa系数、真实技巧统计值(TSS)及总体精度4个评估指标综合评价模型的预测精度。研究结果表明: 4个评估指标值均在0.9以上, 说明MaxEnt模型能够很好地预测海南凤仙花潜在适宜生境的分布。限制其分布的主要环境因子为坡度、最干季降水量、降水量季节性变异系数。当前, 海南凤仙花的最适宜生境占海南岛总面积的1.8%, 主要分布于白沙西部与南部、昌江中部和南部、东方东部、乐东东北部。海南凤仙花潜在适宜生境分布狭窄, 且破碎化严重, 迫切需要保护。因此建议: 收集海南凤仙花各种群种子, 建立种质资源库; 将东方天安乡、江边乡及乐东东北部(佳西保护区)等可能存在最适宜生境的地区, 作为今后野外深入调查的首选区域和重引入的重点区域。

关键词 局部适应; 生境适宜性; 最大熵模型; 地理信息系统; 海南; 特有植物

宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 韩淑梅, 钟云芳 (2018). 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟. 植物生态学报, 42, 946–954. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0066

Modeling the potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis*, a limestone-endemic plant

NING Yao¹, LEI Jin-Rui², SONG Xi-Qiang^{1,3*}, HAN Shu-Mei^{1,3}, and ZHONG Yun-Fang^{1*}

¹Tropical Agriculture and Forestry College, Hainan University, Haikou 570228, China; ²Forestry Institute of Hainan Province, Haikou 571100, China; and ³Research Center for Terrestrial Biodiversity of the South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract

Aims Modelling potential distribution ranges of threatened species is of great significance for their conservation. In this paper, the distribution of potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis*, a limestone-endemic and endangered plant in Hainan Island, was studied to provide scientific basis for their effective *in situ* conservation and re-introduction of *I. hainanensis*.

Methods Based on eight occurrence sites and 12 environmental variables, the Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm and GIS technology were used to create a model linking the distribution ranges of *I. hainanensis* with environments. With data on five actual distribution sites and five non-occurrence sites, four model evaluation metrics (area under the receiver operating characteristic curve (AUC), kappa coefficient, true skill statistic (TSS), overall accuracy) were used to evaluate the predictive performance and accuracy of this model.

Important findings The results indicated that the indicative value of all four evaluation metrics were above 0.9, indicating that the MaxEnt model can effectively predict the potential suitable habitats of *I. hainanensis*. Slope, precipitation of the driest quarter and coefficients of precipitation variation were the three main environmental factors influencing the distribution of *I. hainanensis*. At present, the most suitable habitat includes western and southern parts of Baisha County, the central and southern parts of Changjiang County, the eastern part of the Dongfang City and northeastern Ledong County, accounting for 1.8% of land area on Hainan Island. Since the potential suitable habitat of *I. hainanensis* is rare and severely fragmented, the protection of this species is urgent. We suggest to collect the seeds of various geographic populations of *I. hainanensis* to establish a germplasm resource bank. The most suitable habitat of the species, including Tian'an Village and Jiangbian Village in

收稿日期Received: 2018-03-28 接受日期Accepted: 2018-09-11

基金项目: 海南省创新研究团队项目(2018CXTD334)和国家自然科学基金(31560229)。Supported by the Hainan Provincial Innovative Research Team Program (2018CXTD334), and the National Natural Science Foundation of China (31560229).

* 通信作者Corresponding author (Song XQ: songstrong@hainu.edu.cn; Zhong YF: zhongzyf@163.com)

Dongfang City, northeast of Ledong County (Jiaxi Reserve), should be selected as the priority places for future extensive field surveys and re-introduction.

Key words local adaption; habitat suitability; Maximum Entropy; GIS; Hainan; endemic plant

Ning Y, Lei JR, Song XQ, Han SM, Zhong YF (2018). Modeling the potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis*, a limestone-endemic plant. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 946–954. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0066

使用最大熵模型(MaxEnt)等物种分布模型预测物种的潜在分布区已成为生物多样性及生物保护领域的研究热点。预测物种的潜在适宜生境分布区对制定有效的生物多样性保护策略(Hernandez *et al.*, 2006), 濒危物种再引入(Rushton *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2015), 森林资源规划(甄江红, 2008), 发现物种未知种群(Engler *et al.*, 2004; Fois *et al.*, 2015), 评估入侵物种传播范围及其威胁(Beaumont *et al.*, 2005)以及气候变化对植被分布的影响(吴建国等, 2010)等具有重要意义, 同时也是有效保护受威胁物种的重要手段(Majid *et al.*, 2015)。MaxEnt模型因具有仅利用物种出现点、易于掌握与使用且在多数情况下模拟精度通常优于其他模型的优点, 使其成为现代物种生境适宜性评价方面应用最广泛的一个工具(Hernandez *et al.*, 2006; Merow *et al.*, 2013)。目前, 该模型已被成功应用于珍稀濒危物种如*Canacomyrica monticola* (Kumar & Stohlgren, 2009), *Vanda bicolor* (Deb *et al.*, 2017), 青钱柳(*Cyclocarya paliurus*) (刘清亮等, 2017), 蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*) (马松梅等, 2014)等的生境评价与分布预测中。Hernandez等(2006)及Deb等(2017)的研究都表明当物种出现点很少(<10), 即使低至4或5个, MaxEnt模型仍能以高精度产生有效的预测结果。尽管目前物种分布模型已广泛用于预测珍稀濒危动植物潜在适宜分布区及其适宜生境分布的变化, 然而研究仅集中于广布种或分布点较多的物种, 对于具有明显狭域性和地域性的特有种, 尤其是单一生境的特有种如石灰岩特有植物却鲜有研究。因此, 开展狭域特有种的适宜生境预测及环境因子对其分布的影响的研究, 对于了解物种适应单一生境的机制具有重要意义, 同时对物种分布模型的发展具有推动作用。

海南凤仙花(*Impatiens hainanensis*)是海南岛特有种, 属海南岛石灰岩特有植物(Francisco-Ortega *et al.*, 2010), 2006年被列为海南省重点保护植物, 其种群自然分布于海拔190–1 300 m的热带山地雨林, 多见于裸露的石灰岩石缝中, 且不同种群的大小及植株生长状况差异明显(钟云芳, 2014)。经调查, 海

南凤仙花主要分布于昌江县及东方市(秦新生等, 2005)。近几十年来, 由于人类活动(如开山采矿、采药)的干扰及外界自然环境尤其是气候变化的影响, 海南凤仙花种群数量和分布面积日益减少, 加上岛屿本地特有种具有地理隔离、分布狭窄的特点, 及石灰岩自然生境易于干旱且先天脆弱, 海南凤仙花的生存发展面临着严峻的威胁(冷欣等, 2005; 吴静等, 2010; 钟云芳, 2014)。因此, 海南凤仙花及其生境保护迫在眉睫, 要对其进行有效的保护必须明确其地理分布范围。但目前关于该物种的具体适宜分布范围, 及限制其地理分布的主要环境因子尚不明确。因此, 本研究以海南岛为研究区, 在进行充分调查野外实际生境的基础上, 基于海南凤仙花野外实际分布点和环境数据, 使用MaxEnt, 结合GIS技术, 模拟该物种当前的潜在适宜分布区, 并分析限制其分布的环境因子, 旨在得到它的潜在适生区, 为海南凤仙花的保护管理和重引入工作提供基础的科学依据, 同时也为海南岛其他珍稀濒危植物, 尤其是生境单一物种的生境分布模拟提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与物种分布数据

海南岛位于中国大陆的南端, 属热带北缘, 是中国最大的热带岛屿。岛内呈现中部高四周低的地势。这种特殊的地貌使得整个岛屿内不同地区的光、温、水、热等气候要素的分配差异显著。受热带季风气候的影响, 海南岛具有明显的干季和湿季之分, 5–11月为湿季, 12月至翌年4月为干季; 岛内阳光充足、日照时间长, 年平均气温在22–35 °C。

海南凤仙花为海南岛特有植物, 现今主要分布在昌江县及东方的石灰岩山地, 多见于山顶裸露的石灰岩缝隙中。经2016年6月至2018年5月期间的野外实地调查, 结合前人研究成果, 得到海南凤仙花种群分布点共13个, 各种群分布信息详见图1及附录I。在ArcGIS 10.2中随机选择其中的8个点用于模型建立, 另外的5个点用作模型检验, 此过程重复10次, 得到10套用于模型运行的分布数据。

DOI: 10.17521/cjpe.2018.0066

图1 海南凤仙花实际地理分布图。

Fig. 1 Actual geographic distribution maps of *Impatiens hainanensis*.

1.2 环境变量和数据处理

本研究选取的环境变量包括地形和气候两部分。地形数据包括海拔、坡度、坡向3个变量, 收集中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>) 90 m分辨率数字高程模型(DEM), 在ArcGIS10.2中运用空间分析模块下的相关工具, 提取得到海拔、坡度、坡向3个栅格图层。

当前时期的气候数据从世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)下载, 采用2.0版的数据。该数据库通过收集全球各个气象观测站1970–2000年的气候数据, 运用ANUSPLIN程序中的薄板平滑样条函数插值法, 以海拔、经度、纬度为自变量, 从而进行全球范围的插值, 得到30"分辨率(约1 km)的全球连续气候数据(Hijmans *et al.*, 2005)。该数据包括19个生物气候变量, 具有明显的生物学意义, 通常被运用于物种分布建模和相关的生态建模中。本研究为进一步提高该气候数据分辨率, 利用海南岛16个气象观测站1981–2010年共30年的累年日值数据集(包括气温和降水等), 通过计算得到19个气候变量。运用这部分数据减去对应站点上的WorldClim数据值, 得到19个气候变量的残差。再以海南岛的经度、纬度及海拔(90 m) 3个栅格图层作为协变量,

对残差进行协同克里格插值, 生成经过地形校正的90 m分辨率的残差空间分布图层19个, 再将残差图层与研究区的WorldClim数据一起叠加, 得到研究区内的19个气候变量栅格图层。

为保证模型的准确预测, 运用ArcGIS 10.2的波段集统计工具检验22个环境变量间的多重共线性, 对于相关性较高($|r| > 0.8$)的变量, 仅保留其中一个, 最终确定选用昼夜温差月平均值、等温性、气温季节性变化标准偏差、气温年较差、最冷季平均气温、年降水量、降水量季节性变异系数、最湿季降水量、最干季降水量、海拔、坡度、坡向12个环境变量(表1)用于MaxEnt模型的预测。所有的环境变量统一坐标WGS-84, 统一边界, 统一分辨率为100 m。

1.3 模型运行

本研究运用MaxEnt 3.3.3k软件进行预测。将随机选取的8个海南凤仙花分布点(10套)和环境数据导入MaxEnt模型, 勾选创建反应曲线和刀切法检验, 其他参数选项默认设定。根据模型自带的Jackknife刀切法检验得到的增益结果和模型贡献率表综合地确定影响海南凤仙花的主导环境因子。通常研究会选取对模型累积贡献率在85%–95%的环境因子, 作为对物种适宜分布区影响比较重大的因子(石慰,

2013; 应凌霄等, 2016)。

模型输出结果为ASCII格式, 可解释为0–1范围的生境适宜值, 将每套数据运行得到的平均的ASCII文件导入ArcGIS 10.2中转为栅格数据, 利用栅格计算器, 求得10套ASCII文件的平均值, 再将该平均值图层与海南岛土地覆被类型图进行相乘, 剔除耕地、草地、水体、城乡工矿地、居民用地等不适生生境(不适生的土地覆被类型栅格单元值为0, 适生的土地覆被类型栅格单元值为1)。再运用重分类功能中的自然间断点分级法(Jenks)进行重分类, 将海南凤仙花的生境适宜性划分为3个等级: 最适宜、次适宜和不适宜。此外, 据秦新生等(2014)的实地考察, 海南岛有石灰岩分布的市县共有6个, 即儋州、白沙、昌江、东方、三亚、保亭, 但并不排除这6个市县以外的地区没有石灰岩的分布, 因为有可能存在未调查区域, 或者其他地区在史前有可能

分布着石灰岩, 因此, 本研究中预测得到的海南凤仙花适宜生境分布在这6个市县外的区域不作剔除, 最终得到海南凤仙花生境适宜性分布。

1.4 模型精度评估

为有效地评价基于小样本建模的模型预测精度, 本研究选取受试者工作特征曲线下面积(AUC)、Kappa系数、真实技巧统计值(TSS)及总体精度4个指标综合评估模型预测的准确性。其中Kappa系数、TSS和总体精度受到阈值的影响, 需要物种不存在数据来协助计算, 因此, 本研究运用褚建民等(2017)提到的具体方法, 随机生成与未参与建模的5个实际分布验证点相对应的5个“真实”不存在数据, 此过程重复10次, 之后通过计算混淆矩阵, 根据相关公式得到10套各评价指标的评估值。具体操作方法在此不做叙述, 可参考褚建民等(2017)文献。4种评价指标的优劣划分见表2。

表1 生境评价数据信息表

Table 1 Data information of habitat evaluation

变量及数据 Variable and data	代码 Code	来源 Source	原始坐标系 Original coordinate system
昼夜温差月平均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max temperature – min temperature))	bio2	世界气候数据库 Worldclim	WGS84
等温性 Isothermality	bio3		
气温季节性变化标准偏差 Standard deviation of air temperature seasonality	bio4		
气温年较差 Air temperature annual range	bio7		
最冷季平均气温 Mean air temperature of coldest quarter	bio11		
年降水量 Annual precipitation	bio12		
降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	bio15		
最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	bio16		
最干季降水量 Precipitation of driest quarter	bio17		
海拔 Elevation	ele	地理空间数据云 Geospatial data cloud (Computer network information center of Chinese academy of sciences)	WGS84
坡度 Slope	slo		
坡向 Aspect	asp		
海南凤仙花分布点 Distribution points of <i>Impatiens hainanensis</i>	–	实地调查 Field survey	WGS84
海南岛土地覆被类型图 Land cover type map of Hainan Island	–	海南省林业厅 Forestry department of Hainan	WGS84

表2 4种评估指标(受试者工作特征曲线下面积、卡帕系数、真实技巧统计值、总体精度)的评价标准

Table 2 The criteria of the four evaluate indexes(area under the receiver operating characteristic curve (AUC), kappa coefficient, true skill statistic (TSS), overall accuracy)

评估指标 Evaluate index	失败 Fail	很差 Very poor	一般 Common	较准确 Good	优秀 Excellent	本实验结果值(平均值±标准偏差) Result value of this experiment (mean ± SD)
AUC	0.50–0.60	0.60–0.70	0.70–0.80	0.80–0.90	0.90–1.00	0.98 ± 0.02
Kappa	0–0.40	0.40–0.55	0.55–0.70	0.70–0.85	0.85–1.00	0.96 ± 0.08
TSS	0–0.40	0.40–0.55	0.55–0.70	0.70–0.85	0.85–1.00	0.96 ± 0.08
Overall accuracy	0–0.40	0–0.55	0.55–0.70	0.70–0.85	0.85–1.00	0.98 ± 0.04

2 结果

2.1 影响海南凤仙花分布的主导环境因子

本研究运用AUC、Kappa系数、TSS和总体精度对模型预测精度的评估结果如表2所示。4个评估指标值均大于0.9, 表明模型的预测水平达到优秀, 模型能够作为海南凤仙花潜在适宜分布区的预测。

根据Jackknife刀切法检验(图2), 较为重要的环境因子主要是坡度、最干季降水量、降水量季节性变异系数3个因子, 它们对模型的预测结果的增益较大, 也就是说这些环境因子对海南凤仙花的分布概率有着很大的影响。在研究选取的12个环境因子中, 贡献率排在前三的依次是坡度(58.9%)、最干季降水量(bio17, 27.5%)、降水量季节性变异系数(bio15, 12.1%), 累积贡献率达到98.5%, 这3个环境因子对模型预测性能起重要影响, 与刀切法检验结果一致。而其他环境因子的贡献率较小或者为0, 表明它们对模型的影响很小。综合来看, 影响海南凤仙花分布的主导环境因子为坡度、最干季降水量、降水量季节性变异系数这3个环境因素。此外本研究根据单因子反应曲线分析得到: 在坡度为50°以下时, 海南凤仙花分布概率随坡度的增加而增加, 且呈现先缓增后急增再缓增的趋势, 在坡度为16.5°–33.0°时增加最快, 当坡度为50°左右时趋于水平; 分布概率随最干季降水量的增加而减小, 在最干季降水量为23 mm左右时, 分布概率最大; 分布概率随着降水量季节性变异的增大而增加, 两者间存在正相关关系。

2.2 海南凤仙花潜在适宜分布区

据图3可知, 海南岛内海南凤仙花的潜在适宜分布区当前主要集中分布于海南岛的西南部和南部地区。总的潜在适宜生境面积为2 871.6 km², 占海南岛总面积的8.2%。整体的适宜生境分布狭窄, 且呈现严重的破碎化。其中最适宜生境面积为 639.0 km², 占海南岛总面积的1.8%, 主要分布在白沙西部与南部、昌江中部和南部、东方东部、乐东北部, 包括白沙西北与昌江交界的付鹅岭、邦溪镇、金波乡、青松乡、南开乡及元门乡, 昌江县的七叉镇、王下乡、叉河镇及鸡心村, 东方的东河镇、天安乡及江边乡, 乐东东北部与东方市及昌江县交界的地区(佳西保护区), 此外, 乐东与五指山市交界处及乐东与三亚交界处也存在很小的最适宜区。次适宜生境面积为2 232.6 km², 占海南岛总面积的6.4%, 分布在白沙县的邦溪镇、荣邦乡、金波乡、青松乡及南开乡, 昌江的保平乡、叉河镇、七叉镇及王下乡, 东方市的东河镇、天安乡、江边乡, 乐东的北部, 及其东部与五指山、三亚交界处, 此外, 五指山市西部地区、三亚北部及保亭西北部和南部有零星的区域可能适宜海南凤仙花生存。

3 讨论

MaxEnt模型运用较少的分布点(8个)也很好地预测了海南凤仙花在当前时期的潜在适宜生境分布区。其最适宜生境主要分布在白沙西部与南部、昌江中部和南部、东方东部、乐东北部等地, 与现今

图2 海南凤仙花环境因子刀切法检验结果。代码请参见表1。

Fig. 2 The jackknife test result of environmental factor for *Impatiens hainanensis*. See Table 1 for the codes.

图3 海南凤仙花在海南岛的潜在适宜生境分布。

Fig. 3 The potential distribution of suitable habitat for *Impatiens hainanensis* in Hainan Island.

已发现的石灰岩地区有着较好的一致性(图3)。海南凤仙花的潜在适宜生境呈现严重的破碎化, 分布范围极为狭窄, 且在多个地方仅零星分布。造成这一现象的原因可能有以下几点: 1)人为原因: 进入工业时代后人类活动对环境的干扰特别大, 开山采矿、采药等严重破坏了植物生长的适宜环境。2)自然原因: 海南凤仙花所处的石灰岩山地生态环境脆弱, 由于其特殊的碳酸盐岩物质组成, 地表渗水严重、保水性差、温度高, 土壤浅薄, 植物群落结构简单, 破坏后自我恢复能力极差等特点, 使海南凤仙花的生长更新存在一定困难(秦新生等, 2012)。同时外界环境气候变化造成的水分、营养胁迫等, 引起海南凤仙花的可塑性向消极反应, 导致其不适应或不利于适应环境, 从而只支持其在某些地方零星分布(Bennington & McGraw, 1996; 胡启鹏等, 2008)。3)自身原因: 因海南凤仙花本身属海岛石灰岩特有种, 形成了独特的传粉通道, 存在严重的传粉者限制, 使其自然结实率较低, 影响其繁殖与扩散(钟云芳, 2014)。

3.1 模型环境因子

MaxEnt分析结果表明影响海南凤仙花分布的主导因子主要是坡度、最干季降水量、降水量季节性变异系数。其中坡度的贡献率高达58.9%, 降水量

季节性变异系数及最干季降水量这2个与水分相关的因子累计贡献率达到39.6%, 说明海南凤仙花分布受限的最主要因素是地形因子(坡度)和水分因子。有研究发现, 在喀斯特山地森林即石灰岩山地, 坡度是所有地形因素中影响草本植物分布的最主要因子(袁铁象等, 2014)。坡度不仅影响山地地表水源及土壤养分的流向, 同时影响土壤厚度, 进而影响植物的分布格局。本研究中, 坡度是所有环境因子中影响海南凤仙花分布的最重要因素, 在50°的坡度范围内, 海南凤仙花都可以生长。据野外观察, 在低海拔的海南凤仙花种群生长于坡度较缓的环境, 而在中高海拔尤其是高海拔, 种群分布的坡度较陡, 说明海南凤仙花已适应石灰岩复杂多变的地形, 且在较陡的生境也可以生长。降水量季节性变异越大, 海南凤仙花的分布概率越大, 说明在不同季节间降水量差异越大的地区, 越可能适合海南凤仙花生存。由于特殊的地质二元结构和水分的快速漏失, 石灰岩地区植物的水分来源主要依赖于近期的降水(聂云鹏等, 2011; Deng *et al.*, 2012), 而在热带季风气候的影响下, 海南凤仙花生境地区水分资源的季节性变化十分明显。海南凤仙花的繁殖特性与生境地这种水分的时空变异紧密相关, 海南凤仙花的花期集中在雨季, 可充分利用季节性的降水资源, 从

而保障繁殖成功,并演化出了相应的生理生态机制,如其肉质且基部膨大的根茎可以贮藏大量的水分(钟云芳,2014)。Lasky等(2016)的研究表明,为了响应石灰岩这种干湿季变化,植物通常是选择在雨季集中开花结实,而本研究野外实地观察发现,海南凤仙花的开花高峰期处于6–10月,且10月结实的植株非常多,本研究结果与其观点一致。

本研究模型预测选取的环境因子因数据来源获取的原因,只考虑了温度、水分等气候因子及地形因子,未考虑土壤、物种适应性、生物竞争等其他因素,存在一定的不足之处。土壤直接为植物提供生长发育所需的水分及营养,对物种的分布结构有着明显的限制作用(高福元,2012)。目前将土壤因素作为预测因子模拟物种分布的研究还较少。这可能是由于要获取一个研究区内连续分布的土壤属性较为困难,尤其是对于大尺度的研究;此外,在研究过去和未来时期的物种分布时,也没有能够相匹配的土壤属性,因此限制了研究的进行。物种对环境的适应性并不是恒定的,随着环境的改变,物种表现出可塑性,通过自然选择及遗传变异将这种可塑性转化为环境适应性(胡启鹏等,2008)。而当前开展的研究都是假定物种与环境的关系是均衡的,物种在新环境下仍保持原有的环境关系,这将导致模型预测的偏差及不稳定性,因此,寻找合适的方法将物种的适应机制结合物种分布模型进行预测可以有效地提高结果的准确性(许仲林等,2015)。

3.2 保护建议

经本课题组实地调查,发现开山采矿及村民上山采药等人为活动,不仅直接造成生态系统的失调,也使海南凤仙花的适宜生境受到了严重的破坏,尤其是皇帝洞的种群,植株数量明显减少,对海南凤仙花及其生境的保护已迫在眉睫。本研究结果表明霸王岭保护区、俄贤岭、皇帝洞及猕猴岭等地区的生境适宜性较高,同时这几个地区也是海南凤仙花种群分布的核心区,建议加强这些地方的保护力度,尤其是昌江王下乡的皇帝洞至今未处于保护区内,可建立自然保护区,采取就地保护和迁地保护相结合的措施,保护处于隔离破碎化状态的种群。东方天安乡、江边乡及乐东东北部(佳西保护区)等可能存在最适宜生境的地区,作为今后野外深入调查的首选区域和重引入的重点区域。此外建议收集各种群海南凤仙花种子建立种质资源库同时加强其遗传

多样性研究。由于受地理隔离的影响,海南凤仙花不同种群间的基因交流极少,可以考虑以人工授粉的方式实现不同种群间的基因交流,促进其发展与进化。最后,在今后开展的保护工作中,应着重研究海南凤仙花的生理生态特征,探讨其适应石灰岩的内在机制,同时开展石灰岩地区的专项研究,为更好地保护海南凤仙花及石灰岩特有植物提供科学指导。

致谢 感谢海南霸王岭国家级自然保护区护林员赵莫强同志,海南大学热带农林学院戚山江、刘宇、胡翔宇、黄蔚霞同学在野外过程中的协助。感谢中国热带农业科学院环境与植物保护研究所卢辉博士的指导与支持。感谢海南大学科研启动基金(kygd1625和kyqd1642)资助。

参考文献

- Aguilar SV, Melgoza CA, Villarreal GF, Wehenkel C, Pinedo AC (2015). Modeling the potential distribution of *Picea chihuahuana* Martínez, an endangered species at the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*, 6, 692–707.
- Beaumont LJ, Hughes L, Poulsen M (2005). Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, 186, 250–269.
- Bennington CC, McGraw JB (1996). Environment-dependence of quantitative genetic parameters in *Impatiens pallida*. *Evolution*, 50, 1083–1097.
- Chu JM, Li YF, Zhang L, Li B, Gao MY, Tang XQ, Ni JW, Xu XQ (2017). Potential distribution range and conservation strategies for the endangered species *Amygdalus pedunculata*. *Biodiversity Science*, 25, 799–806. [褚建民, 李毅夫, 张雷, 李斌, 高明远, 唐晓倩, 倪建伟, 许新桥 (2017). 濒危物种长柄扁桃的潜在分布与保护策略. 生物多样性, 25, 799–806.]
- Deb CR, Jamir NS, Kikon ZP (2017). Distribution prediction model of a rare orchid species (*Vanda bicolor* Griff.) using small sample size. *American Journal of Plant Sciences*, 8, 1388–1398.
- Deng Y, Jiang ZC, Qin XM (2012). Water source partitioning among trees growing on carbonate rock in a subtropical region of Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 66, 635–640.
- Engler R, Guisan A, Rechsteiner L (2004). An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology*, 41, 263–274.
- Fois M, Fenu G, Lombraña AC, Cogoni D, Bacchetta G (2015). A practical method to speed up the discovery of unknown

- populations using species distribution models. *Journal for Nature Conservation*, 24, 42–48.
- Francisco-Ortega J, Wang FG, Wang ZS, Xing FW, Liu H, Xu H, Xu WX, Luo YB, Song XQ, Gale S, Boufford DE, Maunder M, An SQ (2010). Endemic seed plant species from Hainan Island: A checklist. *The Botanical Review*, 76, 295–345.
- Gao FY (2012). *A Study on Melica przewalskyi Population Spatial Pattern and Response to Soil Moisture in Degraded Alpine Grassland*. Master degree dissertation, Northwest Normal University, Lanzhou. [高福元 (2012). 高寒退化草地甘肃臭草种群空间分布格局对土壤水分的响应. 硕士学位论文, 西北师范大学, 兰州.]
- Hernandez PA, Graham CH, Master LL, Albert DL (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29, 773–785.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hu QP, Guo ZH, Li CY, Ma L (2008). Advance at phenotypic plasticity in plant responses to abiotic factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 44, 135–142. [胡启鹏, 郭志华, 李春燕, 马履 (2008). 植物表型可塑性对非生物环境因子的响应研究进展. 林业科学, 44, 135–142.]
- Kumar S, Stohlgren TJ (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canaomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology & the Natural Environment*, 1, 94–98.
- Lasky JR, Uriarte M, Muscarella R (2016). Synchrony, compensatory dynamics, and the functional trait basis of phonological diversity in a tropical dry forest tree community: Effects of rainfall seasonality. *Environmental Research Letters*, 11, 115003. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/115003.
- Leng X, Wang ZS, An SQ, Feng J, Liu YH, Wang GM (2005). ISSR analysis of genetic diversity of *Ilex integra*, an insular endemic plant. *Biodiversity Science*, 13, 546–554. [冷欣, 王中生, 安树青, 冯珏, 刘玉虹, 王国明 (2005). 岛屿特有种全缘冬青遗传多样性的ISSR分析. 生物多样性, 13, 546–554.]
- Liu QL, Li Y, Fang SZ (2017). Identification of potential cultivation region for *Cyclocarya paliurus* in China based on MaxEnt model. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science)*, 41, 25–29. [刘清亮, 李垚, 方升佐 (2017). 基于MaxEnt模型的青钱柳潜在适宜栽培区预测. 南京林业大学学报(自然科学版), 41, 25–29.]
- Ma SM, Nie YB, Geng QL, Wang RX (2014). Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalus mongolica*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 262–269. [马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 王荣学 (2014). 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响. 植物生态学报, 38, 262–269.]
- Majid A, Ahmad H, Saqib Z, Ali H (2015). Potential distribution of endemic *Scutellaria chamaedrifolia* geographic information system and statistical model approach. *Pakistan Journal of Botany*, 47, 51–56.
- Merow C, Smith MJ, Silander JA (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069.
- Nie YP, Chen HS, Wang KL (2011). Seasonal variation of water sources for plants growing on continuous rock outcrops in limestone area of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1029–1037. [聂云鹏, 陈洪松, 王克林 (2011). 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异. 植物生态学报, 35, 1029–1037.]
- Qin XS, He KS, Liu LW, Sun JM, Qi XM, Shi H (2012). Floristic and ecological characteristics of the community with *Impatiens hainanensis* in xianling limestone mountain, Hainan. *Journal of South China Agricultural University*, 33, 361–367. [秦新生, 何科稣, 刘立武, 孙君梅, 齐旭明, 施浩 (2012). 海南俄贤岭石灰岩山地海南凤仙花所在群落植物区系及生态特征. 华南农业大学学报, 33, 361–367.]
- Qin XS, Zhang RJ, Chen HF, Wang FG, Tian HZ, Xing FW (2005). The resource and conservation on the rare and endangered plants in limestone regions in Hainan Island. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science)*, 44, 291–298. [秦新生, 张荣京, 陈红锋, 王发国, 田怀珍, 邢福武 (2005). 海南岛石灰岩地区珍稀濒危植物及其保护. 中山大学学报(自然科学版), 44, 291–298.]
- Qin XS, Zhang RJ, Xing FW (2014). Flora of seed plants in the limestone areas of Hainan. *Journal of South China Agricultural University*, 35, 90–99. [秦新生, 张荣京, 邢福武 (2014). 海南石灰岩地区的种子植物区系. 华南农业大学学报, 35, 90–99.]
- Rushton SP, Ormerod SJ, Kerby G (2004). New paradigms for modelling species distributions? *Journal of Applied Ecology*, 41, 193–200.
- Shi W (2013). *Effects of Climate Change on Distribution of Larix gmelinii in Northeast China*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [石慰 (2013). 气候变化对中国东北兴安落叶松分布的影响. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Wu J, Qin F, Wang W, Chen P, Gao SH, Xu HJ, Lin Q, Zhu CQ, Yu YC (2010). Research progress of soil and peculiar plants in limestone areas of China. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 37, 50–54. [吴静, 秦飞, 王维, 陈平, 高世虎, 徐辉筠, 林琴, 朱朝芹, 俞元春 (2010). 我国石灰岩地区特有植物研究进展. 江苏林业科技, 37, 50–54.]

- Wu JG, Lü JJ, Zhou QF (2010). Potential effects of climate change on the distribution of six desert plants in China. *Chinese Bulletin of Botany*, 45, 723–738. [吴建国, 吕佳佳, 周巧富 (2010). 气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响. *植物学通报*, 45, 723–738.]
- Xu ZL, Peng HH, Peng SZ (2015). The development and evaluation of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 557–567. [许仲林, 彭焕华, 彭守璋 (2015). 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 35, 557–567.]
- Ying LX, Liu Y, Chen ST, Shen ZH (2016). Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model. *Biodiversity Science*, 24, 453–461. [应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊 (2016). 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. *生物多样性*, 24, 453–461.]
- Yuan TX, Zhang HP, Ou ZY, Tan YB (2014). Effects of topography on the diversity and distribution pattern of ground plants in karst montane forests in Southwest Guangxi, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2803–2810. [袁铁象, 张合平, 欧芷阳, 谭一波 (2014). 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响. *应用生态学报*, 25, 2803–2810.]
- Zhen JH (2008). *Landscape Dynamics and Suitability Assessment of Endangered Plant *Tetraena Mongolica*'s Habitats*. PhD dissertation, Inner Mongolian Agricultural University, Huhhot. [甄江红 (2008). 濒危植物四合木生境的景观动态与适宜性评价研究. 博士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特.]
- Zhong YF (2014). *Conservation Ecology of *Impatiens hainanensis* (Balsaminaceae), Endemic Species in Hainan Island*. PhD dissertation, Hainan University, Haikou. [钟云芳 (2014). 海南凤仙花保育生态学研究. 博士学位论文, 海南大学, 海口.]

责任编辑: 倪 健 责任编辑: 李 敏

附录I 野外调查的海南凤仙花13个种群的基本情况

Supplement I Basic information for the 13 *Impatiens hainanensis* populations investigated in the field

地点 Sites	种群编码 Populations code	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)
俄贤岭 Exian Moutain	Pop1	109.094° E	19.013° N	945
	Pop 2	109.098° E	19.010° N	890
	Pop 3	109.097° E	19.007° N	1 000
	Pop 4	109.109° E	19.104° N	490
	Pop 5	109.112° E	19.013° N	1 050
王下乡 Wangxia Village	Pop6	109.117° E	19.024° N	450
	Pop7	109.109° E	19.019° N	590
	Pop8	109.128° E	19.018° N	350
	Pop9	109.129° E	19.019° N	460
皇帝洞 Huangdidong	Pop10	109.137° E	18.960° N	250
猕猴岭保护区 Mihouling Reserve	Pop11	109.065° E	18.929° N	480
	Pop12	109.065° E	18.928° N	400
	Pop13	109.063° E	18.927° N	340

扫码加入读者圈
听语音, 看问答