

牯岭凤仙花及其传粉昆虫在中国的潜在分布区域分析

苏启陶¹ 杜志喧^{1,2} 周 兵¹ 廖永辉¹ 王呈呈¹ 肖宜安^{1*}

¹井冈山大学生命科学学院, 江西吉安 343009; ²江西农业大学农学院, 南昌 330045

摘 要 牯岭凤仙花(*Impatiens davidii*)为中国特有的珍稀观赏花卉, 野生种群较小, 同时依赖特殊的传粉者三条熊蜂(*Bombus trifasciatus*)授粉, 为特化传粉植物, 传粉资源为限制其种群扩散的重要因素。该研究基于63条牯岭凤仙花分布数据、54条三条熊蜂分布数据、19个环境气候因子, 运用最大熵(MaxEnt)模型模拟预测当前及未来(2050s、2070s) 3种气候代表性浓度路径情景RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5下牯岭凤仙花和三条熊蜂的潜在分布区域。结果表明: 影响牯岭凤仙花分布的主要环境因子为最暖季度降水量。当前气候条件下, 牯岭凤仙花与三条熊蜂具有较高的地理分布重合度、生态位宽度、生态位重合度, 共同分布区域占比高达99.09%, 较大程度上保证了牯岭凤仙花的传粉资源; 在未来3种气候情景下, 牯岭凤仙花分布区域向东北、华北扩张, 适生面积增加6.60–22.19万km²; 三条熊蜂适生区整体略微北移, 适生面积增加4.48–15.50万km²; 两者共同分布区域占牯岭凤仙花适生区域比例降低1.40%–9.00%, 表明未来牯岭凤仙花适生区可能受到气候变化和传粉资源缺失共同影响。

关键词 牯岭凤仙花; 三条熊蜂; 气候变化; MaxEnt模型; 传粉

苏启陶, 杜志喧, 周兵, 廖永辉, 王呈呈, 肖宜安 (2022). 牯岭凤仙花及其传粉昆虫在中国的潜在分布区域分析. 植物生态学报, 46, 785-796. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0108

Potential distribution of *Impatiens davidii* and its pollinator in China

SU Qi-Tao¹, DU Zhi-Xuan^{1,2}, ZHOU Bing¹, LIAO Yong-Hui¹, WANG Cheng-Cheng¹, and XIAO Yi-An^{1*}

¹School of Life Sciences, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China; and ²School of Agriculture Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract

Aims *Impatiens davidii*, a rare ornamental flower endemic to China, had a small wild population and depended on pollination of *Bombus trifasciatus*. As *I. davidii* has a specialized pollination system, pollination resources were one of the important factors limiting its population diffusion.

Methods In this study, the maximum entropy (MaxEnt) model was used to simulate the potential distribution area of the two species based on 63 distribution records of *I. davidii*, 54 distribution records of *B. trifasciatus*, and 19 climatic factors. The potential distribution of the two species under three climate representative concentration pathway scenarios RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 were predicted for the future (2050s, 2070s).

Important findings The results showed that the main environmental factor affecting the distribution of *I. davidii* was precipitation of warmest quarter. Under the current climate conditions, the range overlap, niche overlap, and niche breadth of two species were higher. Approximately 99.09% of the suitable areas of *I. davidii* was overlapped with *B. trifasciatus*, which ensured the pollination resources to a large extent. Under the three future climate scenarios, the distribution area of *I. davidii* will expand to northeast and north China, and the suitable habitat area will increase by 66 000–221 900 km². The suitable habitat area of *B. trifasciatus* moved northward slightly, and increased by 44 800–155 000 km². The proportion of suitable habitat areas of *I. davidii* overlapped with *B. trifasciatus* decreased by 1.40%–9.00%, indicating that the suitable area of *I. davidii* might be affected by climate change and lack of pollination resources in the future.

Key words *Impatiens davidii*; *Bombus trifasciatus*; climate change; MaxEnt model; pollination

收稿日期Received: 2021-03-25 接受日期Accepted: 2021-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(41561012)、江西省教育厅科技项目(GJJ201038和GJJ190574)和江西省自然科学基金(20192BAB214018)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41561012), the Science and Technology Project of Education Department of Jiangxi Province (GJJ201038 and GJJ190574), and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20192BAB214018).

* 通信作者Corresponding author (iyanxiao@163.com)

Su QT, Du ZX, Zhou B, Liao YH, Wang CC, Xiao YA (2022). Potential distribution of *Impatiens davidii* and its pollinator in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 785-796. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0108

全球气候变化一直以来是学者关注的热点问题。大量研究表明,气候变化影响物种的地理分布格局(Kumar, 2012; Liu & Yin, 2013; Pio *et al.*, 2014; O'Connor *et al.*, 2019),物种通常会向适宜的区域转移以应对气候变化(Chen *et al.*, 2011)。由于物种生态位变化远赶不上气候变化速率,气候变化导致的物种生态位范围缩小可能导致许多物种的局部灭绝(Wiens, 2016; He *et al.*, 2019),甚至在物种灭绝前就会直接破坏或消除物种之间互利的生态相互作用(Memmott *et al.*, 2007)。而对于特化传粉植物而言,气候变化对其特化传粉者分布格局的影响,直接关系到植物本身的种群繁衍。因此,分析特化传粉植物及其传粉者在未来气候模式下地理分布格局的变化情况,有助于对特化传粉植物的保护与研究利用(鲁客等, 2020)。

生态位模型是当前研究物种分布格局空间变化的主要方法(Warren *et al.*, 2013; Yackulic *et al.*, 2013; Pio *et al.*, 2014; He *et al.*, 2019),被广泛应用于入侵植物(雷军成和徐海根, 2010; 高末等, 2011)、濒危物种(崔绍朋等, 2018; 王雨生等, 2019)、经济作物(刘超等, 2020)分布区预测,自然保护区生境保护(宋文静, 2016; 晁碧霄等, 2020),动植物疾病防控(孙红云等, 2020),物种灭绝威胁(Pio *et al.*, 2014)等方面。运用生态位模型能够模拟分析物种适生区域生态环境特征,预测未来气候模式下物种的生态位变化格局(Warren *et al.*, 2013),为物种分布动态变化研究提供参考依据(Memmott *et al.*, 2007; Phillips & Dudík, 2008)。

牯岭凤仙花(*Impatiens davidii*)为凤仙花科凤仙花属植物,我国特有种,珍稀观赏花卉,主要分布在浙江、江西、湖南、安徽等地。其具有较为特化的花部特征,花朵两侧对称,色泽金黄,无芳香气味,具有漏斗状或深囊状的唇瓣以及细长的花蜜距,雄蕊、雌蕊位于唇瓣上部。其对生境要求较高,能作为环境指示物种(冯彬等, 2012),亦可开发成为园林物种。我们前期研究发现,其特化的花部结构适应三条熊蜂(*Bombus trifasciatus*)的传粉,且三条熊蜂是其主要的传粉昆虫(未发表数据),说明传粉资源为牯岭凤仙花种群维持扩散的主要限制因素(刘良源等, 2012; 肖月娥, 2014)。

前人对植物与传粉者的研究主要集中在植物与传粉者之间的协同进化(尧金燕等, 2004; 马小丽等, 2017)、相互作用机制(侯佳和范燕萍, 2016; 刘南南等, 2020)、传粉网络(肖宜安等, 2015; 苏启陶, 2019)等方面,而对于物种分布格局研究则主要关注单一物种,很少从空间上去探讨植物与传粉者之间的相互关系。本研究运用最大熵模型(MaxEnt)分析当前气候模式下牯岭凤仙花与其传粉昆虫的潜在分布区域以及对未来气候模式的响应,结合植物与传粉者资源地理分布情况,探讨植物未来分布格局,预测牯岭凤仙花潜在适生区域。我们主要关注以下几个问题以期对牯岭凤仙花开发和保护提供依据: (1)主要环境因子对牯岭凤仙花及其传粉昆虫分布的影响; (2)当前及未来气候模式下牯岭凤仙花适生区域分布格局变化; (3)牯岭凤仙花与其传粉昆虫重叠适生区变化对牯岭凤仙花分布格局的影响。

1 材料和方法

1.1 物种分布数据来源与处理

牯岭凤仙花分布数据来源于GBIF (<https://www.gbif.org/>)、中国植物图像库(<http://ppbc.iplant.cn/>)、福建植物志、浙江植物志、安徽植物志以及实地考察数据,共计93条。其中,GBIF数据45条记录,中国植物图像库28条记录,福建植物志5条记录、浙江植物志6条记录、安徽植物志6条记录,实际考察3条记录。去除重复、无坐标点等信息,剩余63条。在中国植物图像库中通过作者上传的拍摄地点,利用坐标拾取器拾取物种分布的具体经纬度。三条熊蜂数据来源于GBIF以及实际观测的数据,共计220条物种分布点,其中215条记录来源于GBIF,5条记录来源于实际观测。去除重复、相近的分布点信息,剩余54条分布信息(Zhang *et al.*, 2018),具体分布信息如图1所示。

1.2 环境数据来源

环境气候数据来源于世界气候数据库(<https://www.worldclim.org/>),从数据库中下载CCSM4全球气候模式中19个当前及未来2050s (2041–2060年)和2070s (2061–2080年)两个时间段下3种不同代表性浓度路径情景(RCP)气候情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)数据(表1)。RCPs为典型浓度目标,其特征

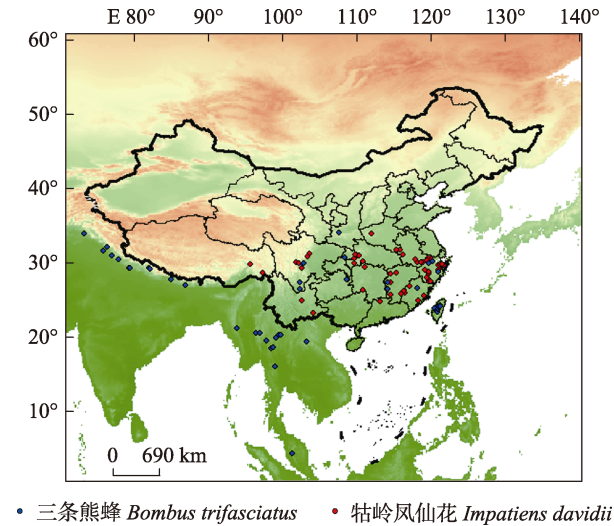


图1 牯岭凤仙花和三条熊蜂空间分布情况。
Fig. 1 Spatial distribution of *Impatiens davidii* and *Bombus trifasciatus*.

为温室气体排放浓度等级未定, 作为常用的气候情景之一应用于IPCC第五次报告中(沈永平和王国亚, 2013), 其中RCP2.6为最低温室气体排放浓度情景, RCP8.5为最高温室气体排放浓度情景。

1.3 环境因子预处理

最大熵模型为典型的分类算法, 需要保持变量最大的不确定性, 让熵达到最大(杨启杰和李睿, 2021)。通过MaxEnt模型对19个环境因子进行建模,

为避免分析结果过拟合, 利用ArcMap软件对建模后的数据开展Pearson的相关性分析, 基于R语言中的pheatmap安装包绘制环境因子相关性热图(图2), 当两个环境因子相关系数大于0.8时, 保留贡献度更大的环境因子(Graham, 2003; Yang *et al.*, 2013)。最终确定10个环境因子用于MaxEnt模型建模, 进行牯岭凤仙花适生区分析, 分别为平均气温日较差、等温性、气温季节性变化标准差、最冷月最低气温、最湿季度平均气温、最干季度平均气温、最湿月降水量、最干月降水量、降水量季节性变化标准差、最暖季度降水量。确定10个环境因子用于三条熊蜂适生区分析, 分别为平均气温日较差、等温性、气温季节性变化标准差、最冷月最低气温、最湿季度平均气温、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量季节性变化标准差、最湿季度降水量。

1.4 模型建立与精度检验

在国家测绘局网站(<https://nfgis.nsdi.gov.cn>)下载中国地图矢量图, 用于底图分析(鲁客等, 2020)。运用MaxEnt模型, 将筛选后的环境因子用于建模, 分别用于当前气候模式下牯岭凤仙花和三条熊蜂的适生区域预测, 通过刀切法(Jackknife), 随机选取25%的分布数据作为测试数据, 75%作为训练数据, 其他参数默认, 确定各个环境因子的重要程度(段

表1 用子物种分布模型的19个环境因子描述
Table 1 Descriptions of the 19 environmental factors used for the calibration of species distribution models

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年平均气温 Mean annual air temperature	℃ × 10
Bio2	平均气温日较差 Mean diurnal range (mean of monthly (maximum temperature – minimum temperature))	℃ × 10
Bio3	等温性 Isothermality	–
Bio4	气温季节性变化标准差 Variation of temperature seasonality	–
Bio5	最暖月最高气温 Maximum temperature of warmest month	℃ × 10
Bio6	最冷月最低气温 Minimum temperature of coldest month	℃ × 10
Bio7	温度年较差 Temperature annual range	℃ × 10
Bio8	最湿季度平均气温 Mean temperature of wettest quarter	℃ × 10
Bio9	最干季度平均气温 Mean temperature of driest quarter	℃ × 10
Bio10	最暖季度平均气温 Mean temperature of warmest quarter	℃ × 10
Bio11	最冷季度平均气温 Mean temperature of coldest quarter	℃ × 10
Bio12	年降水量 Mean annual precipitation	mm
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
Bio15	降水量季节性变化标准差 Variation of precipitation seasonality	–
Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	mm
Bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter	mm
Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	mm
Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter	mm

义忠等, 2020)。所有环境变量的受试者工作特征曲线(ROC)均被设置计算, 运用曲线下面积(AUC)对模型预测结果进行检验(Li *et al.*, 2019), 其值介于0–1之间(其中 $AUC \leq 0.60$, 失败; $0.60 < AUC \leq 0.70$, 精确性较差; $0.70 < AUC \leq 0.80$, 精确性一般; $0.80 < AUC \leq 0.90$, 精确性较高; $0.90 < AUC \leq 1.0$, 精确性非常高), 且AUC越高, 模型越准确(王茹琳等, 2017; 刘超等, 2020)。

1.5 MaxEnt模型预测精度评估

采用ROC曲线分析法, 基于牯岭凤仙花在我国分布的63条分布记录(图1)和筛选后的10个环境因子, 通过MaxEnt模型模拟预测牯岭凤仙花在我国

潜在分布区域, 结果显示其AUC为0.994(图3A)。基于三条熊蜂54条分布记录(图1)和筛选后的10个环境因子, MaxEnt模型模拟预测结果的AUC为0.987(图3B), 两个MaxEnt模型预测结果可信。

1.6 适生区生态特征选择及划分

通过MaxEnt模型运行中, 为了确定第一次估计, 在训练算法的每一次迭代中, 正则化增益的增加被添加到相应变量的贡献中, 如果对Lambda绝对值的变化为负值, 则从其中减去。在第二次估计中, 依次对每个环境变量的训练存在度和背景数据的变量值进行随机排列。最后通过刀切法评估环境因子重要性数据的准确性。将MaxEnt模型结果导入到

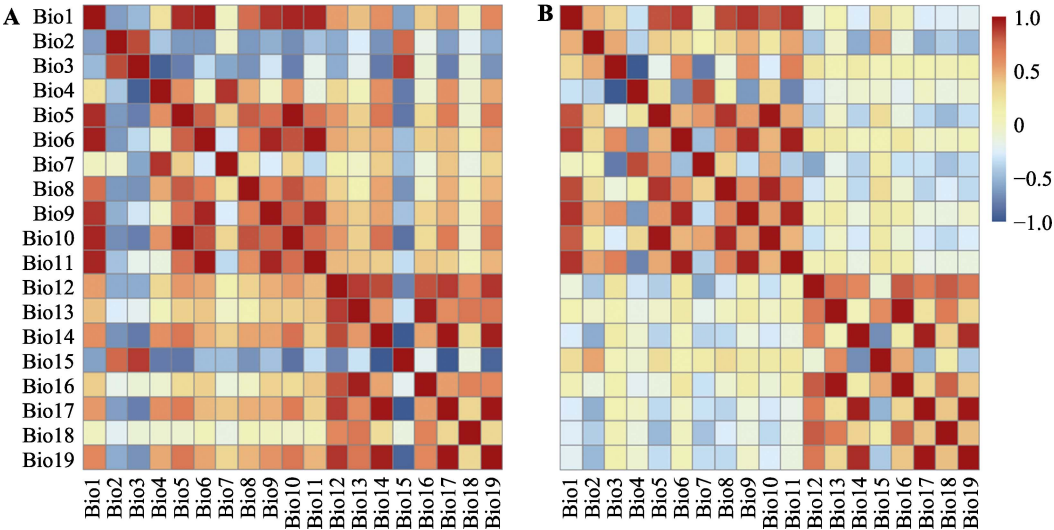


图2 牯岭凤仙花(A)和三条熊蜂(B)的环境因子相关性分析。Bio1–Bio19见表1。
Fig. 2 Correlation coefficients between the environmental factors across the distribution ranges of *Impatiens davidii* (A) and *Bombus trifasciatus* (B). See Table 1 for Bio1–Bio19.

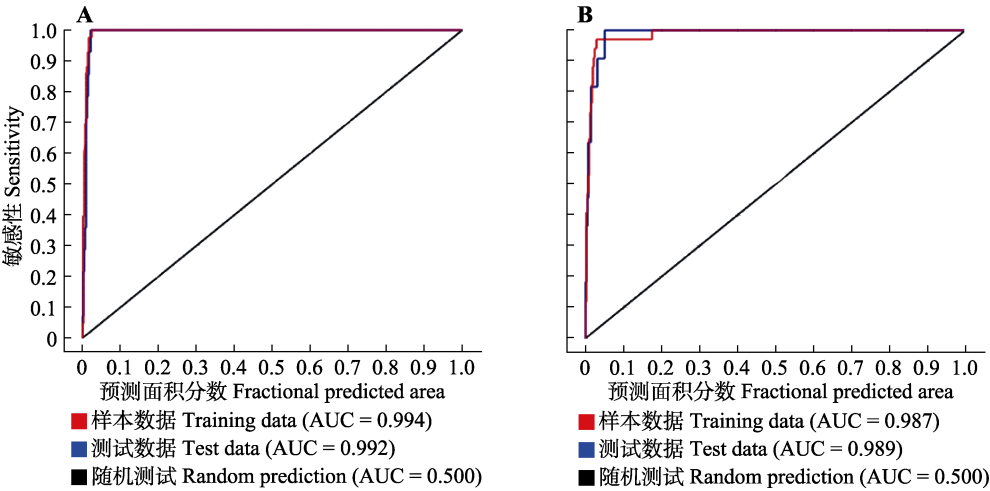


图3 最大熵(MaxEnt)模型的受试者工作特征曲线(ROC)检验。A, 牯岭凤仙花。B, 三条熊蜂。AUC, ROC曲线下与坐标轴围成的面积。
Fig. 3 Receiver operating characteristic curve (ROC) of the maximum entropy (MaxEnt) models. A, *Impatiens davidii*. B, *Bombus trifasciatus*. AUC, area under curve.

ArcMap软件, 借助重分类手段, 依据标准分级中的自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)(鲁克等, 2020; 孟影等, 2020; 杨启杰和李睿, 2021)对物种适宜性等级进行划分。

1.7 生态位重合度、生态位宽度和地理分布重合度分析

生态位重合度是指不同物种之间对环境资源利用的相似度和竞争关系, 生态位宽度则指物种所利用的环境资源总和(Silvertown, 1983; 王文婷等, 2019), 地理分布重合度则表示不同物种地理分布区域重叠情况。基于MaxEnt模型预测结果, 通过ENMTools软件的Niche overlap、Range overlap和Niche breadth等功能分析牯岭凤仙花和三条熊蜂的生态位重合度、地理分布重合度、生态位宽度。生态位重合度通过Schoener's D (D)和Hellinger's-based I (I)表示, 具体为

$$D(P_x, P_y) = 1 - \frac{1}{2} \sum_i |P_{x,i} - P_{y,i}| \quad (1)$$

$$I(P_x, P_y) = 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\sum_i (\sqrt{P_{x,i}} - \sqrt{P_{y,i}})^2} \quad (2)$$

式中, $P_{x,i}$ 和 $P_{y,i}$ 分别代表着分别代表物种 x 和物种 y 中利用资源 i 的数量。 D 和 I 介于0–1之间, 值越大, 生态位重叠度越高(Warren *et al.*, 2010)。根据物种实际分布适生区域结果, 选取地理分布阈值。生态位宽度则采用Levins模型(王文婷等, 2019)。具体为:

$$L_x = - \sum_{i=1}^A P_{x,i} \log P_{x,i} \quad (3)$$

式中, L_x 为物种 x 的生态位宽度, $P_{x,i}$ 为物种 x 利用资源 i 的比例, A 为可利用资源等级数。

2 结果和分析

2.1 牯岭凤仙花适生区环境特征

通过MaxEnt模型模拟(表2)发现, 对牯岭凤仙

花分布影响较大的环境因子主要有最暖季度降水量和气温季节性变化标准差, 其贡献率分别为51.5%和23.4%, 紧接着为降水量季节性变化标准差、最湿月降水量、最冷月最低气温、最干月降水量, 贡献率分别为8.0%、6.4%、6.1%和3.4%, 而最暖季度降水量和气温季节性变化标准差两个环境因子的合计贡献率达74.9%, 通过刀切法分析结果显示与该模型对环境因子贡献率分析结果(图4)一致, 说明影响牯岭凤仙花分布的环境因子主要为最暖季度降水量。一般认为, 当物种存在概率高于50%时, 其对应环境因子的值适合植物生长(麻亚鸿, 2013; 刘超等, 2020; 孟影等, 2020)。仅考虑单一环境因子(图5), 如当最暖季度降水量达490.42 mm, 牯岭凤仙花的存在概率为50%, 最暖季度降水量达536.94 mm, 牯岭凤仙花存在概率最大, 到达69.1%, 而后又随着最暖季度降水量的增加而降低, 到682.32 mm时, 牯岭凤仙花的存在概率降回到50%。当最暖季度降水量大于682.32 mm时, 牯岭凤仙花的存在概率低于50%。所以, 最暖季度降水量在490.42–682.32 mm之间适合牯岭凤仙花生长。根据牯岭凤仙花对环境因子的响应曲线(图5), 牯岭凤仙花适合生长的生态因子范围为: 最暖季度降水量为490.42–682.32 mm, 气温季节性变化标准差为6 854.43–8 629.70, 降水量季节性变化标准差44.70–61.16、最湿月降水量189.6–273.7 mm、最冷月最低气温–4.89–2.74 °C、最干月降水量31.2–58.5 mm。

2.2 当前及未来气候模式下牯岭凤仙花和三条熊蜂分布格局分析

现阶段, 牯岭凤仙花的主要适生区域为华东、华中、华南、西南等区域(图6A), 总适生面积为232.49万km², 占我国国土面积的24.12%。其中高度适生区面积为81.25万km² (表3), 主要分布在浙、苏、闽、皖、赣、鄂、湘、渝、黔等省市, 少部分

表2 影响牯岭凤仙花分布的主要环境变量

Table 2 Major environmental variables that determine the distribution of *Impatiens davidii*

环境变量 Variable	描述 Description	贡献率 Percent contribution (%)
Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	51.5
Bio4	气温季节性变化标准差 Variation of temperature seasonality	23.4
Bio15	降水量季节性变化标准差 Variation of precipitation seasonality	8.0
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	6.4
Bio6	最冷月最低气温 Minimum temperature of coldest month	6.1
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	3.4

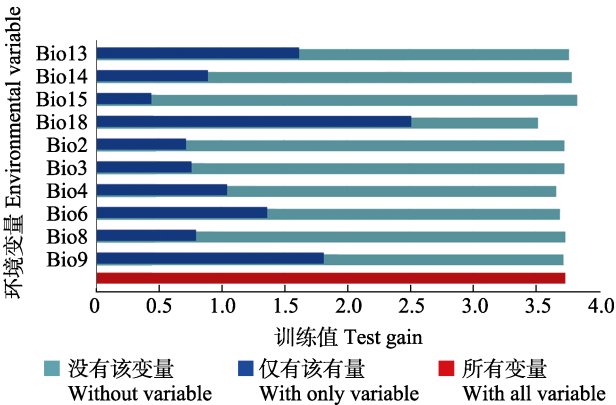


图4 利用刀切法检测环境变量对牯岭凤仙花分布增益的百分比。环境变量描述见表1。
Fig. 4 Effects of environmental variables on the gain of distribution of *Impatiens davidii* using Jackknife test. See Table 1 for description of environmental factors.

分布在川、豫、陕、桂、粤、甘、云等省区。
未来3种不同气候情景(图7)中, 牯岭凤仙花的总适生区面积预计为240.33–259.57万km², 整体往东北、华北扩张, 不同气候情景间表现出一致的趋势, 总适生区面积增加7.85–27.08万km², 以2041–2060年间的RCP8.5情景中增速最大。但是不同适生等级

面积存在差异, 高度适生区面积除2061–2080年间的RCP8.5气候情景降低3.52万km²外, 其余均增加, 增量在3.12–9.46万km²之间; 中度适生区面积在未来RCP2.6和RCP4.5两种气候模式下均减少, 减量在0.89–5.96万km², 而在RCP8.5气候模式下, 2041–2060年间增加3.06万km², 2061–2080年间增加7.24万km²; 而低度适生区面积在未来3种气候模式下均增加, 累计增加6.60–22.19万km²。

通过MaxEnt模型模拟发现, 当前气候模式下, 三条熊蜂在我国的主要适生范围在18°–40° N, 91°–123° E之间, 总适生面积246.82万km², 主要分布在我国华中、华东、华南、西南等区域。其中高度适生区主要分布在西南、华南等地, 以云、川、黔、闽、台五省为主(图6B)。未来气候模式下, 三条熊蜂适生区整体略微北移, 总的适生面积增加4.48–15.50万km²(表3)。其中, 未来3种气候情景下, 低度适生区和中度适生区面积均增加, 低度适生区面积增量在11.11–29.28万km², 中度适生区增量在0.36–14.22万km², 而高度适生区面积则减少8.99–28.00万km²。

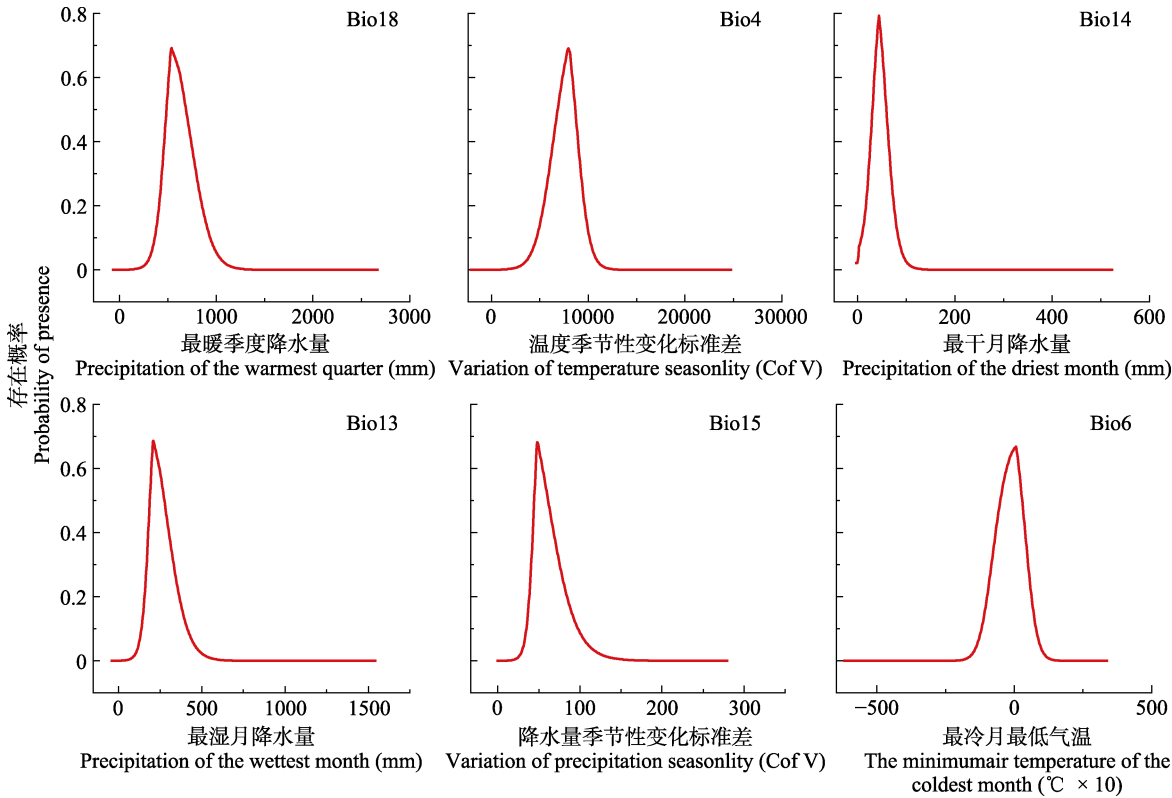


图5 牯岭凤仙花对主要环境因子的响应曲线。环境因子描述见表1。
Fig. 5 Response curves of *Impatiens davidii* to important environmental factors. See Table 1 for description of environmental factors.

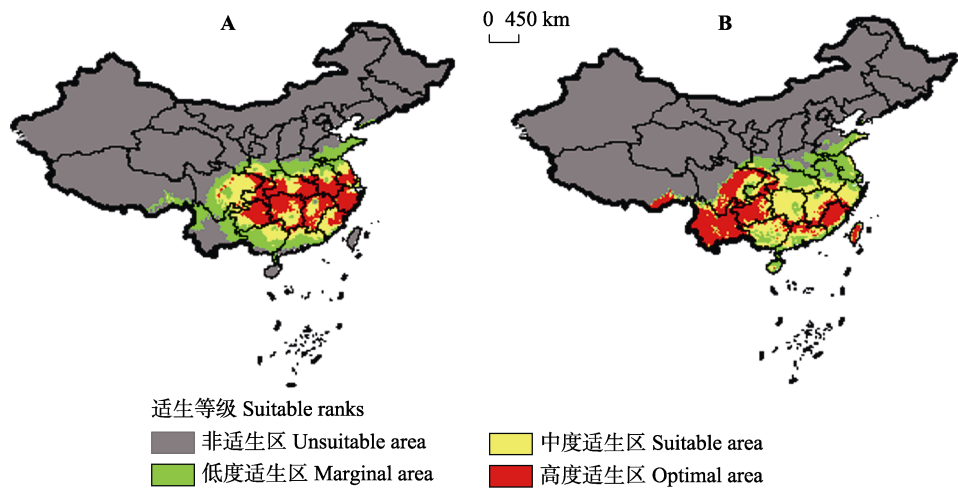


图6 当前气候模式下牯岭凤仙花(A)和三条熊蜂(B)在我国的适生区域分布。
Fig. 6 Potential suitable areas of *Impatiens davidii* (A) and *Bombus trifasciatus* (B) under current climate in China.

表3 当前及未来气候模式下牯岭凤仙花(A)和三条熊蜂(B)的适生面积(万km²)
Table 3 Potential distribution areas of *Impatiens davidii* (A) and *Bombus trifasciatus* (B) under current climate and future climate scenarios ($\times 10^4$ km²)

	物种 Species	当前 Current	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
			2050s	2070s	2050s	2070s	2050s	2070s
非适生区	A	731.36	716.28	723.51	713.52	711.12	704.28	705.45
Unsuitable area	B	717.03	712.54	710.85	710.43	711.38	710.74	701.52
低度适生区	A	82.56	95.42	89.16	92.61	97.31	100.85	104.75
Marginal area	B	69.67	80.78	82.67	88.63	83.26	95.45	98.96
中度适生区	A	68.67	67.78	62.71	67.00	66.81	71.73	75.91
Suitable area	B	87.82	93.06	89.99	88.18	89.91	91.00	102.05
高度适生区	A	81.25	84.37	88.46	90.72	88.60	86.99	77.75
Optimal area	B	89.33	77.47	80.33	76.60	79.30	66.67	61.32

RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5为不同的代表性浓度路径。
RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 are different climate representative concentration pathway scenarios.

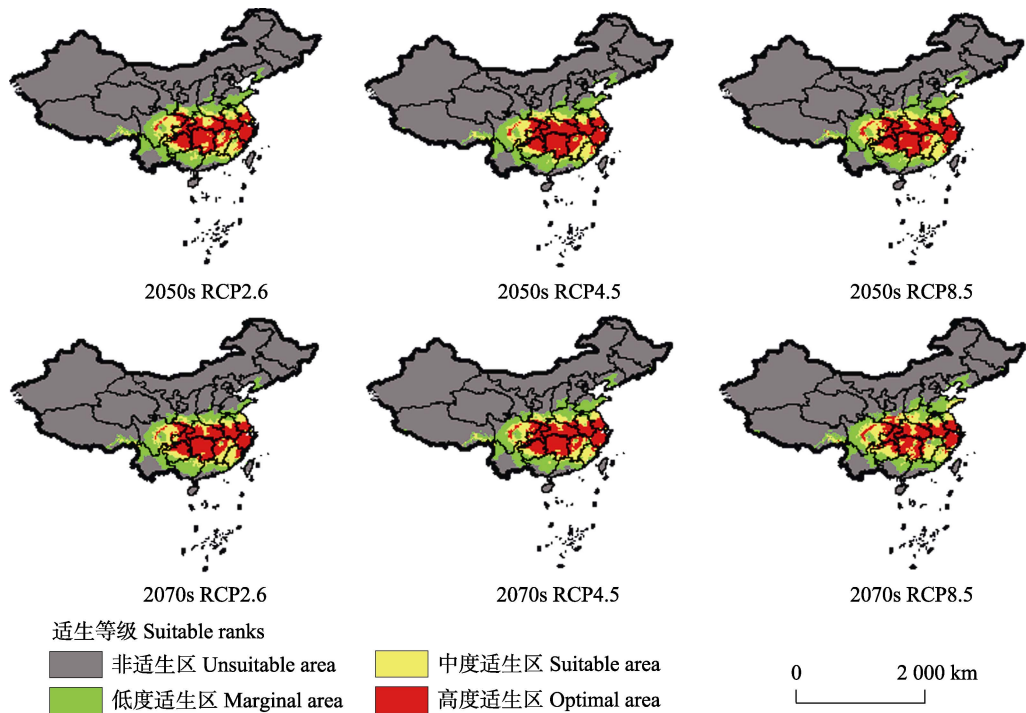


图7 未来气候模式下牯岭凤仙花在中国的适生区分布。RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5为不同的代表性浓度路径。
Fig. 7 Potential suitable area of *Impatiens davidii* under future climate scenarios in China. RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 are different climate representative concentration pathway scenarios.

2.3 牯岭凤仙花与三条熊蜂生态位与地理分布分析

通过ENMTools软件分析两个物种的生态位重合度、生态位宽度和地理分布重合度(表4)发现, 牯岭凤仙花和三条熊蜂的地理分布重合度、生态位重合度均较高, 牯岭凤仙花的生态位宽度大于三条熊蜂。

2.4 牯岭凤仙花与三条熊蜂适生区重叠变化

当前气候模式下, 牯岭凤仙花与三条熊蜂的共同分布区域为230.36万km², 占牯岭凤仙花总分布区域的99.09%。传粉者缺失部分主要分布在四川、甘肃、陕西、河南、湖北、山东、安徽等省份的少部分区域(图8; 表5)。未来气候模式下, 在RCP4.5和RCP8.5两种气候情景中, 牯岭凤仙花与其传粉者的共同分布区占比逐渐减少, 而在RCP2.6中, 可能由于三条熊蜂适生区域增加, 导致在2070s中, 牯岭凤仙花与其传粉者的共同分布区占比较2050s有所增加。在RCP8.5气候情境下, 两者共同分布区占牯岭凤仙花适生区比例最低。牯岭凤仙花适生区整体往东北、华北地区扩散, 而三条熊蜂则略微北移。由于未来两者分布区变化, 牯岭凤仙花与三条熊蜂共同分布区占牯岭凤仙花适生区比例减少1.40%–9.00%。

3 讨论

生态位分布模型是基于物种地理空间信息与生态空间信息, 模拟预测物种的生存空间, 而物种的现实分布情况则为预测结果的部分潜在分布区域(Peterson, 2011; 王文婷等, 2019)。基于MaxEnt模型, 牯岭凤仙花和三条熊蜂预测AUC均高达0.98, 表明预测模型具有极高的准确度(武晓宇等, 2018; 张殷

波等, 2019), 分布预测结果也与实际分布情况相吻合。当前气候模式下, 牯岭凤仙花与三条熊蜂均主要分布在我国的南部地区, 具有较高的地理分布重合度与生态位重合度。其中牯岭凤仙花的生态位宽度大于三条熊蜂, 说明牯岭凤仙花对环境的适应能力更强。

不同物种对环境的适应性存在差异(杨胜男, 2019)。本研究发现, 影响牯岭凤仙花物种分布的主

表4 牯岭凤仙花和三条熊蜂的生态位重合度、生态位宽度、地理分布重合度

Table 4 Niche overlap, niche breadth and range overlap between *Impatiens davidii* and *Bombus trifasciatus*

生态位重合度 Niche overlap		地理分布重合度	生态位宽度
D	I		
0.460 113	0.746 422	0.917 597	0.806 54/0.748 81

D, Schoener's D; I, Hellinger's-based I.

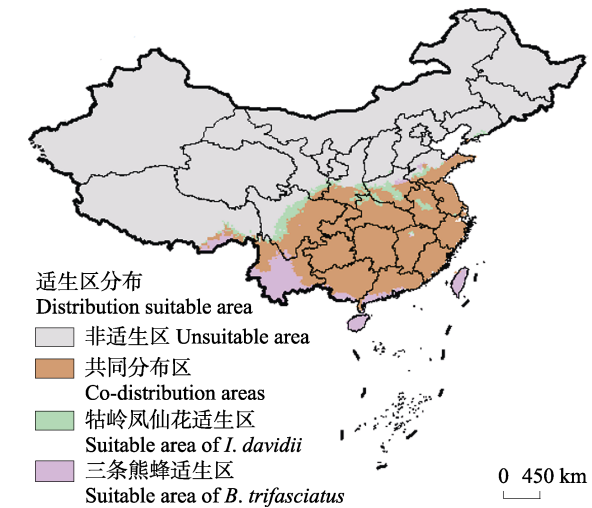


图8 当前气候模式下牯岭凤仙花与三条熊蜂在中国的重叠分布区。

Fig. 8 Change in the predicted habitats overlap between *Impatiens davidii* and *Bombus trifasciatus* under current in China.

表5 不同气候情景下牯岭凤仙花与三条熊蜂适生区重叠分布区的变化(万km²)

Table 5 Change in the predicted habitats overlap between *Impatiens davidii* and *Bombus trifasciatus* under different climate scenarios (×10⁴ km²)

气候情景 Climate scenario	年份 Year	牯岭凤仙花适生区 Suitable area of <i>Impatiens davidii</i>	三条熊蜂适生区 Suitable area of <i>Bombus trifasciatus</i>	共同分布区 Co-distribution areas	共同分布区占牯岭凤仙花 适生区比例 Proportion of co-distribution areas among suitable areas of <i>I. davidii</i> (%)
当前 Current	—	232.485 8	246.821 3	230.359 8	99.09
RCP2.6	2050s	247.570 6	251.302 9	234.374 9	94.67
	2070s	240.335 5	253.000 9	234.780 5	97.69
RCP4.5	2050s	250.328 6	253.418 4	234.172 1	93.55
	2070s	252.722 5	252.472 0	232.631 0	92.05
RCP8.5	2050s	259.570 2	253.112 2	234.699 3	90.42
	2070s	258.401 0	262.325 9	232.793 2	90.09

要环境因子为最暖季度降水量和气温季节性变化, 而影响三条熊蜂分布的主要环境因子则为温度。而两者对未来气候模式的响应主要表现在适生区域变化方位, 牯岭凤仙花在未来气候模式下, 整体往华北、东北方向偏移, 两广的适生区域减少, 辽宁省的适生面积增加, 以RCP8.5情景下增加最多, 而三条熊蜂的适生区域则整体略微北移。在RCP2.6气候情境下气温上升不超过2 °C, 而RCP8.5情景下全球温度上升可达4.8 °C (余元钧等, 2020)。牯岭凤仙花北移, 可能受到环境温度升高的影响。同时降水也是影响植物地理分布的重要因素(Zhao & Running, 2010), 据我们实地野外调查发现, 牯岭凤仙花主要生境位于林下溪畔, 可能对水肥要求较高。本研究发现降水相关的环境因子是影响牯岭凤仙花的适生区分布的关键因子, 与实际结果相符。温度是影响熊蜂发育的主要环境因素, 环境温度达29 °C时, 熊蜂种群发育速度达到最大(安建东, 2004), 而熊蜂属昆虫对环境温度的耐热性较强, 研究发现短舌熊蜂(*Bombus terrestris*)在41 °C还能正常生存(徐希莲等, 2014)。在未来气候模式下, 随着温度的升高, 三条熊蜂的适生区域略微北移, 整体波动较小, 但分布范围的改变可能影响其与开花植物的相互作用关系。

生态位宽度和生态位重合度通常能反映物种的特征与对环境的适应性指标, 生态位宽度越大, 则对环境的适应能力越强, 物种地理分布越广泛, 相应地, 生态位重合度就越高(井光花等, 2015)。由于生境资源有限, 同域物种之间可能存在生态位重叠, 导致物种间竞争加剧(Jiao *et al.*, 2016), 但是对于植物与传粉者间, 生态位重叠则有利于两者间的相互作用关系。对于虫媒植物而言, 传粉资源的大小影响着其繁殖进程, 传粉者与植物间的生态位重叠度变化将直接影响植物繁衍而传粉资源匮乏则可能影响植物应对气候变化下的适应能力(余元钧等, 2020)。本研究发现, 牯岭凤仙花与三条熊蜂具有较高的生态位重叠, 当前气候情境下, 牯岭凤仙花对共同分布区域占比高达99.09%, 较大程度上保证了牯岭凤仙花的传粉资源, 对其繁殖成功提供了重要保障。而未来气候情景下, 共同分布区域占牯岭凤仙花分布区比例最高降低9%, 则意味着牯岭凤仙花在部分适生区域存在传粉者缺失或不足。由于牯岭凤仙花是多年生植物, 种群大小能在短期内得到

保存(Bond, 1994), 但由于传粉资源限制, 导致种群结实率降低, 而影响种群扩散。前人研究发现, 凤仙花种子能随水流漂浮传播(Najberek *et al.*, 2020), 而种群结实率降低则影响种群扩散, 不利于种群的繁衍。三条熊蜂为泛化传粉昆虫, 生态位重叠度降低对其分布影响较小(肖月娥, 2014; 黄艳波等, 2015), 其拥有较广的开花植物资源, 单一植物缺失, 并不影响整体种群生存。

生态位模型是研究当前及未来气候情景下物种分布格局变化的主要手段(沈阳等, 2015; 刘超等, 2020; 鲁客等, 2020), 但该方法存在一定的不足。主要表现在部分数据没有准确的经纬度数据, 存在一定误差。同时, 生态位模型无法规避人为干扰, 如城市基建、开荒等人为生境破坏因素(李小蒙等, 2020)。因此, 在预测结果应用于野外实际调查时, 应结合实际生境情况, 综合考量。

综上所述, 在全球气候变化大背景下, 牯岭凤仙花的生存环境在未来几十年内可能更加严峻, 虽然总体适生面积增加, 但是部分生境受传粉资源缺失或不足、生境破碎化等影响, 其野生种群资源不容乐观。据我们实际野外调查发现, 井冈山地区牯岭凤仙花野生种群较小, 种群较为分散, 容易受到人为因素干扰。因此, 我们建议对牯岭凤仙花野生种群采取有效的保护措施: 一是建立就地保护, 建立自然保护区; 二是迁地保护, 人工引种驯化, 培养, 种子收录到地方种质资源中心; 三是进行组培育苗, 拓展无性繁殖途径。

致谢 感谢井冈山大学科研基金(JZ2001)的支持。

审图号: GS京(2022)0309号

参考文献

- An JD (2004). *Studies on Breeding Technology of Bumble Bee in Captivity*. Master degree dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. [安建东 (2004). 熊蜂(*Bombus lucorum*)的人工繁育技术研究. 硕士学位论文, 中国农业科学院, 北京.]
- Bond WJ (1994). Do mutualisms matter? Assessing the impact of pollinator and disperser disruption on plant extinction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 344, 83-90.
- Chao BX, Hu WJ, Chen B, Zhang D, Chen GC, Yu WW, Ma ZY, Lei GC, Wang YY (2020). Potential suitable habitat of mangroves and conservation gap analysis in Guangdong

- Province with MaxEnt modeling. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 3785-3794. [晁碧霄, 胡文佳, 陈彬, 张典, 陈光程, 俞炜炜, 马志远, 雷光春, 王玉玉 (2020). 基于MaxEnt模型的广东省红树林潜在适生区和保护空缺分析. *生态学杂志*, 39, 3785-3794.]
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024-1026.
- Cui SP, Luo X, Li CW, Hu HJ, Jiang ZG (2018). Predicting the potential distribution of whitelipped deer using the Max-Ent model. *Biodiversity Science*, 26, 171-176. [崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚 (2018). 基于MaxEnt模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 26, 171-176.]
- Duan YZ, Wang C, Wang HT, Du ZY, He YM, Chai GQ (2020). Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 7668-7680. [段义忠, 王驰, 王海涛, 杜忠毓, 贺一鸣, 柴乖强 (2020). 不同气候条件下沙冬青属植物在我国的潜在分布——基于生态位模型预测. *生态学报*, 40, 7668-7680.]
- Feng B, Wu XP, Liu LY (2012). Repair river large Wei Mountain and Lushan Ku Ridge wild *Impatiens* biology of thinking. *Jiangxi Science*, 30, 47-49. [冯彬, 巫县平, 刘良源 (2012). 修河源大汾山与庐山牯岭野凤仙花生物学学习性研究. *江西科学*, 30, 47-49.]
- Gao M, Hu RY, Chen XX, Li WC, Ding BY (2011). Effects of disturbance, topography, and soil conditions on the distribution of invasive plants in Wenzhou. *Biodiversity Science*, 19, 424-431. [高末, 胡仁勇, 陈贤兴, 李伟成, 丁炳扬 (2011). 干扰、地形和土壤对温州入侵植物分布的影响. *生物多样性*, 19, 424-431.]
- Graham MH (2003). Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84, 2809-2815.
- He X, Burgess KS, Gao L, Li D (2019). Distributional responses to climate change for alpine species of *Cyananthus* and *Primula* endemic to the Himalaya-Hengduan Mountains. *Plant Diversity*, 41, 26-32.
- Hou J, Fan YP (2016). *Cymbidium sinense* between the ultra-structure and correspondence insect pollination. *Northern Horticulture*, 24, 83-87. [侯佳, 范燕萍 (2016). 墨兰花部超微结构与昆虫传粉行为的对应性. *北方园艺*, 24, 83-87.]
- Huang YB, Wei YK, Wang Q, Xiao YE, Ye XY (2015). Floral morphology and pollination mechanism of *Salvia liguliloba*, a narrow endemic species with degraded lever like stamens. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 753-761. [黄艳波, 魏宇昆, 王琦, 肖月娥, 叶喜阳 (2015). 舌瓣鼠尾草退化杠杆雄蕊的相关花部特征及传粉机制. *植物生态学报*, 39, 753-761.]
- Jiao SW, Qing Z, Sun GQ, Lei GC (2016). Improving conservation of cranes by modeling potential wintering distributions in China. *Journal of Resources and Ecology*, 7, 44-50.
- Jing GH, Cheng JM, Su JS, Wei L, Shi XX, Jin JW (2015). Response of dominant population niche breadths and niche overlaps to various disturbance factors in typical steppe fenced grassland of China's Loess Plateau region. *Acta Prataculturae Sinica*, 24, 43-52. [井光花, 程积民, 苏纪帅, 魏琳, 史晓晓, 金晶炜 (2015). 黄土区长期封育草地优势物种生态位宽度与生态位重叠对不同干扰的响应特征. *草业学报*, 24, 43-52.]
- Kumar P (2012). Assessment of impact of climate change on Rhododendrons in Sikkim Himalayas using Maxent modelling: limitations and challenges. *Biodiversity and Conservation*, 21, 1251-1266.
- Lei JC, Xu HG (2010). MaxEnt-based prediction of potential distribution of *Solidago canadensis* in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26, 137-141. [雷军成, 徐海根 (2010). 基于MaxEnt的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. *生态与农村环境学报*, 26, 137-141.]
- Li XM, Yu M, Li J (2020). Research progress on plant invasion mechanism. *Bulletin of Biology*, 55, 5-9. [李小蒙, 于明, 李洁 (2020). 植物入侵机制研究进展. *生物学通报*, 55, 5-9.]
- Li Y, Cao W, He XY, Chen W, Xu S (2019). Prediction of suitable habitat for lycophytes and ferns in northeast China: a case study on *Athyrium brevifrons*. *Chinese Geographical Science*, 29, 1011-1023.
- Liu C, Huo HL, Tian LM, Dong XG, Xu JY, Qi D, Zhang Y, Cao YF (2020). Prediction of potential geographical distribution patterns of *Pyrus xerophila* under different climate scenarios. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 4073-4079. [刘超, 霍宏亮, 田路明, 董星光, 徐家玉, 齐丹, 张莹, 曹玉芬 (2020). 不同气候情景下木梨潜在地理分布格局变化的预测. *应用生态学报*, 31, 4073-4079.]
- Liu HY, Yin Y (2013). Response of forest distribution to past climate change: an insight into future predictions. *Chinese Science Bulletin*, 58, 4426-4436.
- Liu LY, Liu X, Wu J (2012). The trace of *Impatiens davidii*. *China Nature*, (2), 20-21. [刘良源, 刘逊, 吴杰 (2012). 牯岭凤仙花探踪. *大自然*, (2), 20-21.]
- Liu NN, Xiao HW, Chen XH, Chi YY, Luo HL, Xiong DJ, Yang BY (2020). Nectar secretion characteristics and their effects on insect pollination of *Goodyera foliosa*, a nectar rewarding orchid. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 28, 265-270. [刘南南, 肖汉文, 陈兴惠, 迟韵阳, 罗火林, 熊冬金, 杨柏云 (2020). 多叶斑叶兰花蜜特征和分泌规律及其对昆虫访花的影响. *热带亚热带植物学报*, 28, 265-270.]
- Lu K, He YM, Mao W, Du ZY, Wang LJ, Liu GM, Feng WJ, Duan YZ (2020). Potential geographical distribution and changes of *Artemisia ordosica* in China under future climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31,

- 3758-3766. [鲁客, 贺一鸣, 毛伟, 杜忠毓, 王莉君, 刘国民, 封文佳, 段义忠 (2020). 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁. 应用生态学报, 31, 3758-3766.]
- Ma XL, He WY, You MS (2017). Interactions between insect herbivores feeding on cruciferous plants and host plant glucosinolates. *Acta Entomologica Sinica*, 60, 1093-1104. [马小丽, 何玮毅, 尤民生 (2017). 取食十字花科植物的植食性昆虫与寄主植物硫苷的互作. 昆虫学报, 60, 1093-1104.]
- Ma YH (2013). *Applying MaxEnt and ArcGis to Predict Mosses Geographic Distribution Range—A Case Study of Huaping Nature Reserve, Guangxi*. Master degree dissertation, Shanghai Normal University, Shanghai. [麻亚鸿 (2013). 基于最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(ArcGis)预测藓类植物的地理分布范围——以广西花坪自然保护区为例. 硕士学位论文, 上海师范大学, 上海.]
- Memmott J, Craze PG, Waser NM, Price MV (2007). Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions. *Ecology Letters*, 10, 710-717.
- Meng Y, Ma JM, Wang YQ, Mo YH (2020). Prediction of distribution area of *Loropetalum chinense* based on Maxent model. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8287-8296. [孟影, 马姜明, 王永琪, 莫燕华 (2020). 基于Maxent模型的檵木分布格局模拟. 生态学报, 40, 8287-8296.]
- Najberek K, Olejniczak P, Berent K, Gasienica-Staszczek M, Solarz W (2020). The ability of seeds to float with water currents contributes to the invasion success of *Impatiens balfourii* and *I. glandulifera*. *Journal of Plant Research*, 133, 649-664.
- O'Connor B, Bojinski S, Rösli C, Schaepman ME (2019). Monitoring global changes in biodiversity and climate is more important than ever as ecological crisis intensifies. *Ecological Informatics*, 55, 101033. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.101033.
- Peterson AT (2011). Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence. *Journal of Biogeography*, 38, 817-827.
- Phillips SJ, Dudík M (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.
- Pio DV, Engler R, Linder HP, Monadjem A, Cotterill FPD, Taylor PJ, Schoeman MC, Price BW, Villet MH, Eick G, Salamin N, Guisan A (2014). Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 20, 1538-1549.
- Shen Y, Yu J, Guo SL (2015). *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 6449-6459. [沈阳, 于晶, 郭水良 (2015). 不同气候变化情境下中国木灵藓属和藓属植物的潜在分布格局. 生态学报, 35, 6449-6459.]
- Shen YP, Wang GY (2013). Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35, 1068-1076. [沈永平, 王国亚 (2013). IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 35, 1068-1076.]
- Silvertown JW (1983). The distribution of plants in limestone pavement: tests of species interaction and niche separation against null hypotheses. *Journal of Ecology*, 71, 819-828.
- Song WJ (2016). *Response of Vegetation Distribution to Climate Change in Central and Eastern China in Recent 50 Years*. Master degree dissertation, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing. [宋文静 (2016). 近50年中国中东部地区植被分布对气候变化的响应. 硕士学位论文, 中国科学院大学, 北京.]
- Su QT (2019). *The Geographical Variation of Pollination Networks of Invasive Plants Solidago canadensis and Bidens frondosa*. Master degree dissertation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang. [苏启陶 (2019). 入侵植物加拿大一枝黄花和大狼把草传粉网络的地理变异. 硕士学位论文, 江西农业大学, 南昌.]
- Sun HY, Xu LS, Feng H, Wang CL, Huang LL (2020). Prediction for potential geographic distribution of *Valsamali* in China based on MaxEnt model. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 29, 461-466. [孙红云, 徐亮胜, 冯浩, 王程利, 黄丽丽 (2020). 基于MaxEnt模型预测苹果树腐烂病在中国的潜在地理分布. 西北农业学报, 29, 461-466.]
- Wang RL, Li Q, Feng CH, Shi ZP (2017). Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 8556-8566. [王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏 (2017). 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 37, 8556-8566.]
- Wang WT, Gao SY, Wang SF (2019). Predictive studies of potential invasive areas for four poisonous weeds in Gansu Grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 5301-5307. [王文婷, 高思雨, 王淑璠 (2019). 甘肃草地4种毒杂草潜在入侵区预测研究. 生态学报, 39, 5301-5307.]
- Wang YS, Wang ZH, Xing HF, Li JW, Sun S (2019). Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involu-crata* Baill in China based on MaxEnt. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 1230-1237. [王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕 (2019). 基于MaxEnt模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学报, 38, 1230-1237.]
- Warren DL, Glor RE, Turelli M (2010). ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 33, 607-611.
- Warren R, van der Wal J, Price J, Welbergen JA, Atkinson I, Ramirez-Villegas J, Osborn TJ, Jarvis A, Shoo LP, Williams SE, Lowe J (2013). Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss.

- Nature Climate Change*, 3, 678-682.
- Wiens JJ (2016). Climate-related local extinctions are already widespread among plant and animal species. *PLOS Biology*, 14, e2001104. DOI: 10.1371/journal.pbio.2001104.
- Wu XY, Dong SK, Liu SL, Liu QR, Han YH, Zhang XL, Su XK, Zhao HD, Feng J (2018). Identifying priority areas for grassland endangered plant species in the Sanjiangyuan Nature Reserve based on the MaxEnt model. *Biodiversity Science*, 26, 138-148. [武晓宇, 董世魁, 刘世梁, 刘全儒, 韩雨晖, 张晓蕾, 苏旭坤, 赵海迪, 冯憬 (2018). 基于MaxEnt模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别. 生物多样性, 26, 138-148.]
- Xiao YA, Zhang SS, Yan XH, Dong M (2015). New advances in effects of global warming on plant-pollinator networks. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3871-3880. [肖宜安, 张斯斯, 闫小红, 董鸣 (2015). 全球气候变暖影响植物-传粉者网络的研究进展. 生态学报, 35, 3871-3880.]
- Xiao YE (2014). *Phylogeography of Iris ensata (Iridaceae), a Disjunct Species in East Asia, and Role of Pollinators on the Persistence of Rear Edge Populations*. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. [肖月娥 (2014). 东亚间断分布植物玉蝉花(*Iris ensata*)亲缘地理学及传粉互作对其后缘种群维持的作用. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Xu XL, Cheng S, Wang FH, Wu J (2014). Measurement of the thermal resistance of *Bombus terrestris* L. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51, 1597-1603. [徐希莲, 程尚, 王凤贺, 吴杰 (2014). 短舌熊蜂耐热性研究. 应用昆虫学报, 51, 1597-1603.]
- Yackulic CB, Chandler R, Zipkin EF, Andrew Royle J, Nichols JD, Campbell Grant EH, Veran S (2013). Presence-only modelling using MAXENT: When can we trust the inferences? *Methods in Ecology and Evolution*, 4, 236-243.
- Yang QJ, Li R (2021). Predicting the potential suitable habitats of *Alsophila spinulosa* and their changes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 538-548. [杨启杰, 李睿 (2021). 桫欏的潜在适生区及其变化. 应用生态学报, 32, 538-548.]
- Yang SN (2019). *Niche Dynamics and Environmental Adaptation of Feirana Species in the Qinling Mountains*. Master degree dissertation, China West Normal University, Nanchong, Sichuan. [杨胜男 (2019). 秦岭地区隆肛蛙属物种的生态位动态与环境适应性. 硕士学位论文, 西华师范大学, 四川南充.]
- Yang X, Kushwaha S, Saran S, Xu J, Roy P (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 51, 83-87.
- Yao JY, Zhao NX, Chen YZ (2004). Brief review of fig-pollinator coevolution and *Ficus* classification. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 271-277. [尧金燕, 赵南先, 陈贻竹 (2004). 榕树-传粉者共生体系的协同进化与系统学研究进展及展望. 植物生态学报, 28, 271-277.]
- Yu YJ, Luo HL, Liu NN, Xiong DJ, Luo YB, Yang BY (2020). Influence of the climate change on suitable areas of *Calanthe sieboldii* and its pollinators in China. *Biodiversity Science*, 28, 769-778. [余元钧, 罗火林, 刘南南, 熊冬金, 罗毅波, 杨柏云 (2020). 气候变化对中国大黄花虾脊兰及其传粉者适生区的影响. 生物多样性, 28, 769-778.]
- Zhang KL, Yao LJ, Meng JS, Tao J (2018). Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 634, 1326-1334.
- Zhang YB, Liu YL, Qin H, Meng QX (2019). Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 496-502. [张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣 (2019). 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测. 应用生态学报, 30, 496-502.]
- Zhao M, Running SW (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329, 940-943.

责任编辑: 李镇清 编辑: 赵航