

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200254

## 气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测

黄睿智<sup>1</sup> 于涛<sup>1</sup> 赵辉<sup>2</sup> 张声凯<sup>3</sup> 景洋<sup>3</sup> 李俊清<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 河南省林业科学研究院, 河南 郑州 450008;  
3. 蓬莱市大柳行镇农业综合服务中心, 山东 烟台 265615)

**摘要:**【目的】分析极小种群濒危植物梓叶槭在中国当代和未来的潜在分布区, 揭示未来气候变化条件下梓叶槭的分布动态。【方法】以梓叶槭为研究对象, 基于现有的梓叶槭分布位点、气候数据集和海拔数据, 利用优化的 MaxEnt 模型和 GIS 技术, 模拟当前、2050s(2041—2060 年)和 2090s(2081—2100 年)(SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585)气候情景下梓叶槭的分布格局, 划分适生等级, 采用受试者工作曲线(ROC)下的面积(AUC), 评价模拟的精度。以刀切法分析气候变量贡献率, 找出制约梓叶槭分布的主导气候变量。基于分布面积比( $N_a$ )、生境变化程度( $N_e$ )比较梓叶槭在不同气候条件下的地理分布动态。【结果】梓叶槭主要适生区分布在我国西南地区, 9 种气候情景下训练集与测试集 AUC 值均大于 0.995, 表明模型模拟精度极高。最暖季降雨量、温度季节性变化标准差、海拔贡献率最高, 分别为 56.1%、18.2% 和 10.9%。【结论】气候变化背景下梓叶槭将丧失大量高适生区, 生境破碎化趋势严重, 中高强度排放情景 SSP370 对梓叶槭潜在分布区影响较小。本研究可为濒危物种梓叶槭的就地与迁地保护提供依据。

**关键词:** 梓叶槭; MaxEnt; 潜在分布区; 气候因子

**中图分类号:** S792.35; S717.2/7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)05-0033-11

**引文格式:** 黄睿智, 于涛, 赵辉, 等. 气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33-43. Huang Ruizhi, Yu Tao, Zhao Hui, et al. Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 33-43.

### Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China

Huang Ruizhi<sup>1</sup> Yu Tao<sup>1</sup> Zhao Hui<sup>2</sup> Zhang Shengkai<sup>3</sup> Jing Yang<sup>3</sup> Li Junqing<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Forest Resources Ecosystem Process, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. Henan Academy of Forestry Sciences, Zhengzhou 450008, Henan, China;  
3. Comprehensive Agricultural Service Center of Daliuxing Town, Penglai City, Yantai 265615, Shandong, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to analyze the potential distribution areas of extremely small population of endangered plant *Acer catalpifolium* in China today and in the future, reveal the distribution dynamics of *A. catalpifolium* under future climate change. [Method] Taking *A. catalpifolium* as the research object, based on the existing *A. catalpifolium* distribution sites, climate data and altitude data, using the MaxEnt model and GIS technology to simulate the current, 2050s (2041–2060) and 2090s (2081–2100) (SSP126, SSP245, SSP370 and SSP585) distribution pattern of *A. catalpifolium* under climate scenarios, classify the fitness level and use the area under the receiver operating characteristic curve (ROC) (AUC) to evaluate the accuracy of simulation, analyze the contribution rate of climate variables with the knife-cut method to find out the dominant climate variables that restrict the distribution of *A. catalpifolium*; compare the geographic distribution of *A. catalpifolium* under different climatic conditions based on the distribution

收稿日期: 2020-08-18 修回日期: 2020-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503106), 国家林业和草原局委托项目(2019073051)。

第一作者: 黄睿智。主要研究方向: 珍稀植物迁地保护。Email: 1549080873@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。

责任作者: 李俊清, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态学。Email: lij@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

area ratio ( $N_a$ ) and the degree of habitat change ( $N_e$ ) dynamic. [Result] The main suitable areas for *A. catalpifolium* were distributed in southwestern China. The AUC values of the training set and the test set under the nine climatic scenarios were both greater than 0.995, indicating that the model simulation accuracy was extremely high. The warmest season rainfall, temperature seasonal variation standard deviation and altitude had the highest contribution rates, which were 56.1%, 18.2% and 10.9%, respectively. [Conclusion] Under the background of climate change, *A. catalpifolium* will lose a large number of highly suitable areas, and the habitat fragmentation will be more serious than the trend. The medium-to-high intensity emission scenario SSP370 has little impact on the potential distribution area of *A. catalpifolium*. This study can provide a basis for the in-situ and ex-situ conservation of the endangered species of *A. catalpifolium*.

**Key words:** *Acer catalpifolium*; MaxEnt; potential distribution area; climate factor

植物-气候的相互作用及关系是植物学、生态学和地理学等相关领域探讨的热点问题<sup>[1-2]</sup>。从工业革命到现在的 100 多年间, 人类的活动导致全球气候发生了剧烈变化, 据 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)第五次报告显示, 人类活动排放了大量 CO<sub>2</sub> 等温室气体, 导致全球气温升高, 1880—2012 年, 全球地表平均温度升高了 0.85 °C, 预计至 21 世纪末(2081—2100 年), 与基准期(1986—2005 年)相比, 全球地表平均温度将升高 0.3 ~ 4.8 °C<sup>[3]</sup>, 在全球气候变化的大环境下, 未来的几十年乃至几百年气候变暖可能通过影响生物的分布和植被的组成进而改变陆生生态系统的结构和功能。已有研究表明某些物种的灭绝是由气候变化引起的<sup>[4]</sup>, 气候变化会导致某些物种的适宜分布区面积减少, 生境破碎化, 加速全球生物多样性的丧失<sup>[5]</sup>, 因此预测由气候变化而导致濒危物种的适宜分布区及其未来的迁移趋势, 可为濒危植物就地保护和迁地保护提供依据, 为生物多样性保护和策略的制定提供科学支撑。

以生态位理论为基础的物种分布模型(species distribution models, SDMs)结合 GIS 技术对物种潜在分布进行预测的技术已广泛应用于自然保护区规划, 气候变化对物种分布的影响, 生物入侵风险评估, 土地利用变化等领域的研究中<sup>[6-10]</sup>。物种分布模型(SDMs)利用已知的物种居群的分布位点以及与之相关联的气候因子数据, 基于一定的算法来模拟物种在过去、目前和未来的潜在分布区, 主要的模型有生态位因子分析模型<sup>[11]</sup>(ecological niche factor analysis, ENFA)、最大熵值模型<sup>[12]</sup>(maximum entropy, MaxEnt)、广义线性模型<sup>[13]</sup>(generalized linear model, GLM)、基于规则集的遗传算法<sup>[14]</sup>(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP)等模型。研究表明, MaxEnt 模型优于其他同类物种分布模型<sup>[15]</sup>, 具有建模简单, 预测结果精确, 易于解释等优点, 在数据残缺不全或者样本量比较少的时候, MaxEnt 依然具有

较高的稳定性<sup>[16]</sup>(AUC(the area under the receiver operating characteristic curve)值变化平稳)且预测结果与实际分布一致性高。MaxEnt 模型结合 GIS 技术在对濒危植物独叶草(*Kingdonia uniflora*)<sup>[17]</sup>、蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)<sup>[18]</sup>和黄槿(*Hibiscus tiliaceus*)<sup>[19]</sup>等植物的潜在分布区的预测效果与实际分布吻合度高, 在国外, MaxEnt 模型也被广泛应用在冬青树<sup>[20]</sup>(*Ilex khasiana*)和高山杨梅<sup>[21]</sup>(*Canacomyrica monticola*)等濒危物种潜在分布和适应性评价中。

梓叶槭(*Acer catalpifolium*)为中国特有的珍稀濒危树种, 国家 II 级保护植物, 属 120 种极小种群濒危植物, 具有很高的科研和利用价值<sup>[22]</sup>。目前该树种零星分布于我国西南地区, 加之人类大量的砍伐, 不合理的毁林耕种和天然更新困难, 导致其数量稀少, 生境破碎化严重, 处于极度濒危状态。因此对梓叶槭的保护迫在眉睫, 本研究以梓叶槭的分布位点和气候数据集为基础, 利用 MaxEnt 模型和 GIS 技术对梓叶槭的潜在分布区进行预测, 分析限制其分布的环境因子, 旨在为其迁地保护、域外引种和扩繁等提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 梓叶槭分布数据

梓叶槭地理分布数据来源于中国植物志(<http://www.iplant.cn>), 国家标本平台([www.niss.org.cn](http://www.niss.org.cn)), 全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org>)以及国内外公开发表过的文献和实地考察。分布数据仅选取野生梓叶槭分布记录, 人工实验样地及人工温室栽培的梓叶槭不作为记录。通过对错误和重复的数据进行筛选和删除, 最后获得 45 个梓叶槭在中国的分布数据信息(图 1)。

### 1.2 气候变量筛选

从全球气候数据库 WorldClim2.1(<http://www.worldclim.org>)分别下载当代(1970—2000 年)、2050s

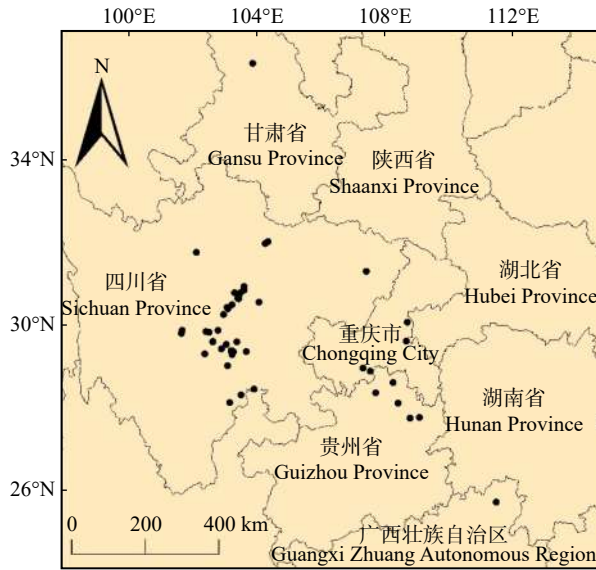


图 1 梓叶槭分布点位图

Fig. 1 Location point map of *Acer catalpifolium*

(2041—2060 年)和 2090s(2081—2100 年)SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 气候模式下的 19 个气候变量和高程数据,分辨率为 2.5 m。未来气候情景 SSP126、SSP245、SSP370、SSP585 分别代表低、中低、中和高 4 种排放模式。

为了避免气候变量间的自相关,利用 ArcGIS10.2 软件提取 45 个梓叶槭分布点的气候变量信息,利用 SPSS23.0 软件的 Pearson 相关系数法分析气候变量的相关性,保留相关系数 $|r| < 0.9$ 的气候因子,对于 $|r| \geq 0.9$ 的环境因子,保留贡献率较大的一个,最后筛选出 10 个环境因子,如表 1 所示。

### 1.3 软件及地图数据

本研究运用 MaxEnt 模型(version3.4.1)和美国环境系统研究所研发的 ArcGis10.2 软件,使用的基本地图数据来自于国家基础地理信息系统网(<http://www.nfgis.nsd.gov.cn/>)提供的 1:4 000 000 中国地图和中国行政区划图。

### 1.4 最优模型的运行与结果评价

#### 1.4.1 最优模型

利用 R 软件调用的 ENMeval 函数包检验梓叶槭 MaxEnt 模型在不同参数条件下预测精度,主要通过调整调控倍率(regularization multiplier, RM)和特征组合(feature combination, FC)两个参数来对 MaxEnt 模型进行优化<sup>[23-24]</sup>, MaxEnt 软件默认设置为 RM = 1, FC = LQHPT(L 为线性, Q 为二次型, H 为较链型, P 为乘积型, T 为阈值型),在 R 中设置 RM 为 0.5 ~ 4, 每次增加 0.5, 共 8 个, FC 设置为 L、LQ、H、LQH、LQHP 和 LQHPT 共 6 个特征组合,利用 ENMeval 包将上述 48 组参数组合逐一检验,依据 Akaike 信息量准则(akaike information criterion, AICc)、Akaike

表 1 环境变量信息

Tab. 1 Environment variable information

类型 Type	变量 Variable	描述 Description
气候因子 Climate factor	Bio2	月均气温日较差 Daily range of monthly average temperature/°C
	Bio3	等温性 Isothermality/°C
	Bio4	温度季节性变化标准差 SD of seasonal temperature change
	Bio7	气温年较差 Annual temperature range/°C
	Bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter/°C
	Bio12	年降水量 Annual precipitation/mm
	Bio15	降水量变异系数 Variation coefficient of precipitation
	Bio18	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter/mm
	Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter/mm
地形因子 Topographic factor	海拔 Altitude/m	

信息量准则变化(delta akaike information criterion, delta AICc)、训练集 AUC 和测试 AUC 值之差(the difference of training AUC and testing AUC, AUC. DIFF)和 10% 遗漏率(10% training omission rate, OR10)来评估模型性能。AICc 可综合反映模型的拟合优度和复杂性<sup>[25-27]</sup>, 具有最低 AICc 和较高 AUC 值的模型被认为是最佳模型。

#### 1.4.2 MaxEnt 模型的运行

将 WorldClim 中下载的 2.1 版本气候数据,通过 ArcGIS 中的转换工具逐一转换成 asc 文件,使之可以在 MaxEnt 模型中运行。将物种分布点的数据用 Excel 保存为用逗号隔开的 CSV 格式文件,以便 MaxEnt 软件识别,与气候变量一起导入到 MaxEnt 模型中,随机选取 25% 的梓叶槭分布点作为预测数据集,剩余 75% 的数据集作为训练数据集,选择刀切法(Jackknife),勾选最佳参数组合,模型迭代 500 次,从而获得模型运行结果的 ASC 文件。

#### 1.4.3 MaxEnt 模型的精度检测

ROC 曲线以其曲线本身与横坐标轴和纵坐标轴围成的面积 AUC 值的大小作为衡量模型准确度的指标来评价模型预测的精度<sup>[28]</sup>, AUC 的取值范围为 0 ~ 1, 其取值越大表示与随机分布相聚越远,预测的效果越好。采用 ROC 曲线分析法对模型的预测结果进行精度检测,当 AUC 值介于 0.5 ~ 0.6 时,表示模型预测失败;当 AUC 值介于 0.6 ~ 0.7 时,表示预测结果较差;当 AUC 值介于 0.7 ~ 0.8 时,表明预测效果一般;当 AUC 值介于 0.8 ~ 0.9 时,表示预测效

果好;当 AUC 值介于 0.9~1 时,表示预测效果非常好。

1.4.4 梓叶槭适生区等级划分

将 ASC 文件导入 ArcGIS 中,转换成栅格文件后进行可视化处理,利用 ArcGIS 中 Reclassify 功能划分生境适宜性指数(habitat suitability index, HSI)<sup>[29]</sup>。HSI < 0.2, 为非适生区;0.2 ≤ HSI < 0.4, 为低适生区;0.4 ≤ HSI < 0.6 为中适生区;HSI ≥ 0.6, 为高适生区(表 2)。

1.4.5 不同气候情景下分布区变化估算

利用 ArcGis10.2 软件的重分类工具对梓叶槭各个情景下的适生等级重分类,以 HSI ≥ 0.4 作为物种存在/不存在的阈值<sup>[30]</sup>。基于不同时期梓叶槭分布面积比(N<sub>a</sub>)和生境变化程度(N<sub>e</sub>)来比较当代、2050s 和 2090s 不同气候情景模式下梓叶槭的居群分布变化动态,计算公式如下:

$$N_a = \text{当前分布区面积} / \text{其他时期分布区面积} \quad (1)$$

$$N_e = 1 - \left( \frac{\text{其他时期和当前生态位重叠区域}}{\text{当前分布面积}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 最优模型及模型准确性评价

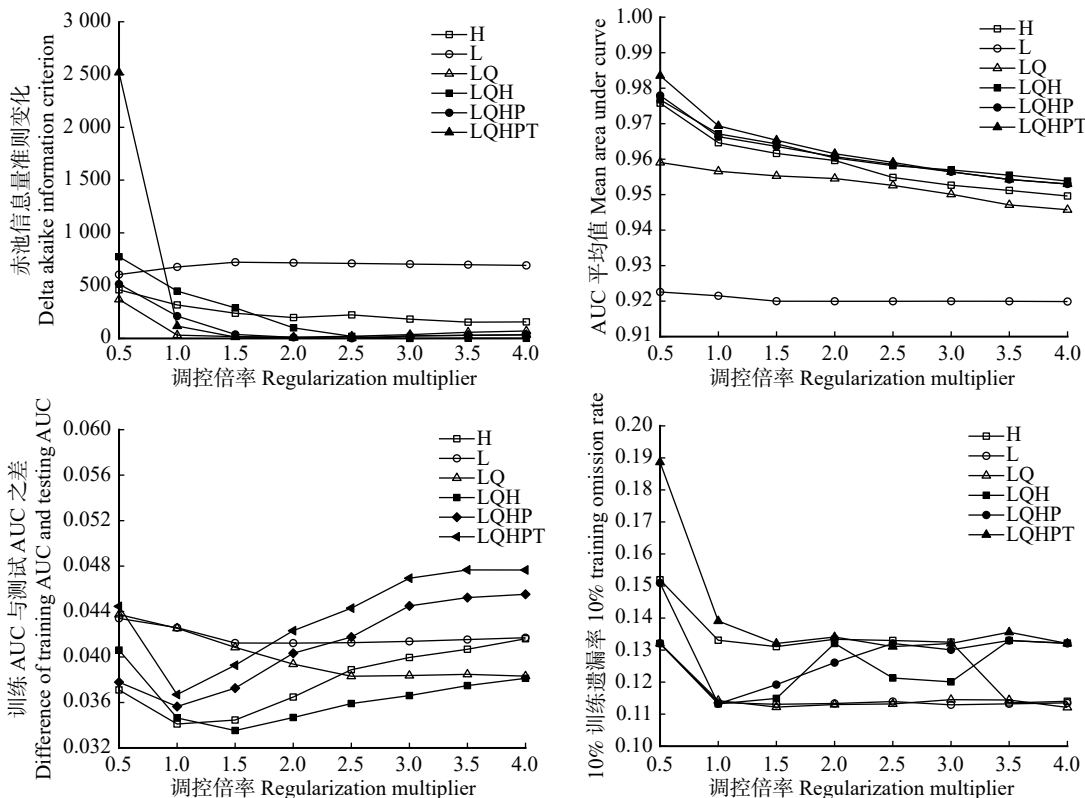
利用 MaxEnt 模型对梓叶槭的潜在分布区进行模拟,如图 2、表 3 所示。当模型默认设置为 FC = LQHP, RM = 1 时, AICc = 1307.603, deltaAICc = 211.5816, 当参数设置为 FC = LQH, RM = 3 时, AICc = 1096.021, deltaAICc = 0, 既正则化参数为 3, 特征组合为线性 + 二次型 + 铰链型(LQH)时 MaxEnt 模型的 AICc 值最低, deltaAICc 值为 0(图 2、表 3), 此时模型的 AUC 值为 0.996, 与默认参数下 MaxEnt 的 AUC.DIFF 和 OR10 差别不大, 因此选择 FC = LQH, RM = 3 为最终的参数设置。

利用筛选出的参数组合,对梓叶槭当代、

表 2 适生区划分

Tab. 2 Division of suitable distribution area

生境适宜性指数 Habitat suitability index (HSI)	评价等级 Evaluation level	生境适宜性指数 HSI	评价等级 Evaluation level
HSI < 0.2	非适生区 Unsuitable area	0.4 ≤ HSI < 0.6	中适生区 Medium-suitable area
0.2 ≤ HSI < 0.4	低适合生区 Low-suitable area	HSI ≥ 0.6	高适生区 High-suitable area



AUC 为受试者工作特征曲线下面积。L 为线性;H 为铰链型;Q 为二次型;P 为乘积型;T 为阈值型。下同。AUC, the area under the receiver operating characteristic curve. L, linearity; H, hinge type; Q, quadratic type; P, product type; T, threshold type. The same below.

图 2 不同参数设置下梓叶槭的 MaxEnt 模型评估结果

Fig. 2 MaxEnt model evaluation results of *A. catalpifolium* under different parameter settings

表 3 不同参数组合下梓叶槭 MaxEnt 模型的赤池化信息量准则 (AICc)

Tab. 3 Akaike information criteria (AICc) for MaxEnt model of *A. catalpifolium* under different parameter combinations

参数组合 Parameter combination	不同正则化参数下梓叶槭MaxEnt模型的AICc值 AICc value of <i>A. catalpifolium</i> MaxEnt model under different regularization parameters							
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
L	1701.19	1773.05	1818.27	1812.36	1806.35	1800.20	1794.03	1787.76
H	1557.06	1412.83	1334.19	1293.49	1319.24	1278.62	1249.96	1252.36
L + Q	1465.43	1127.27	1113.02	1108.63	1116.15	1132.10	1154.42	1166.25
L + H + Q	1869.88	1544.06	1385.27	1195.73	1116.06	1096.02	1098.19	1096.88
L + H + Q + P	1610.69	1307.60	1134.10	1105.80	1096.47	1119.45	1125.41	1130.05
L + H + Q + P + T	3615.42	1213.23	1108.74	1103.12	1097.55	1119.45	1125.41	1130.05

2050s 和 2090s 的分布区进行预测, 9 种情景下训练集和测试集数据的 AUC 值均大于 0.995, 表明模型拟合效果好, 预测准确度极高。

### 2.2 当代梓叶槭潜在分布区

基于 MaxEnt 预测结果, 划分梓叶槭在各个时期潜在分布并进行可视化处理, 如图 3 所示。梓叶槭的潜在分布区比较局限, 这与梓叶槭当前分布相吻合。当前气候条件下梓叶槭高适宜生境集中分布于我国西南地区的大巴山西南面的广元市, 四川盆地西缘的绵阳、成都、雅安和乐山, 云贵高原北面的昭通北部、宜宾、泸州、六盘水和毕节, 以及重庆南部地区, 呈“C”字型分布; 中适宜生境主要分布于我国西南地区以及陕西、甘肃南部、广西北部。当代梓叶槭高适生区面积为 19.33 万 km<sup>2</sup>(表 4), 约占全国陆地面积的 2%, 四川省为当代梓叶槭高适生面积最大的省份, 其高适生面积为 11.24 万 km<sup>2</sup>(表 4), 占当代全国梓叶槭高适生面积的 58.1%。

### 2.3 气候变化梓叶槭分布格局的影响

在气候变化背景下, 选取 2050s 和 2090s 各 4 种气候环境情景, 利用优化的 MaxEnt 模型对梓叶槭地理分布进行模拟得到各个时期不同气候情景下梓叶槭分布图(图 4), 以及各时期背景下各省高适生区面积(表 4)。结果表明, 两个时期共 8 种情景下梓叶槭

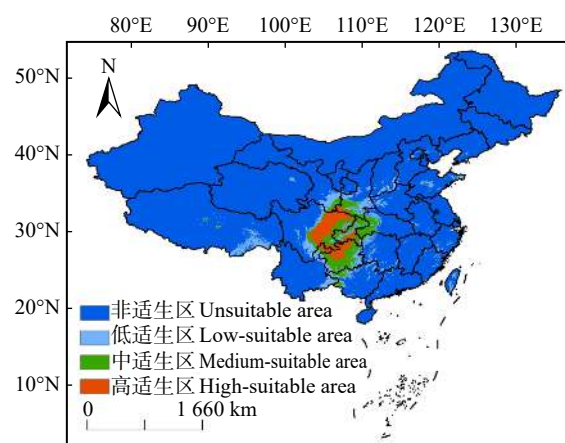


图 3 当前气候下梓叶槭在中国的适宜生境分布

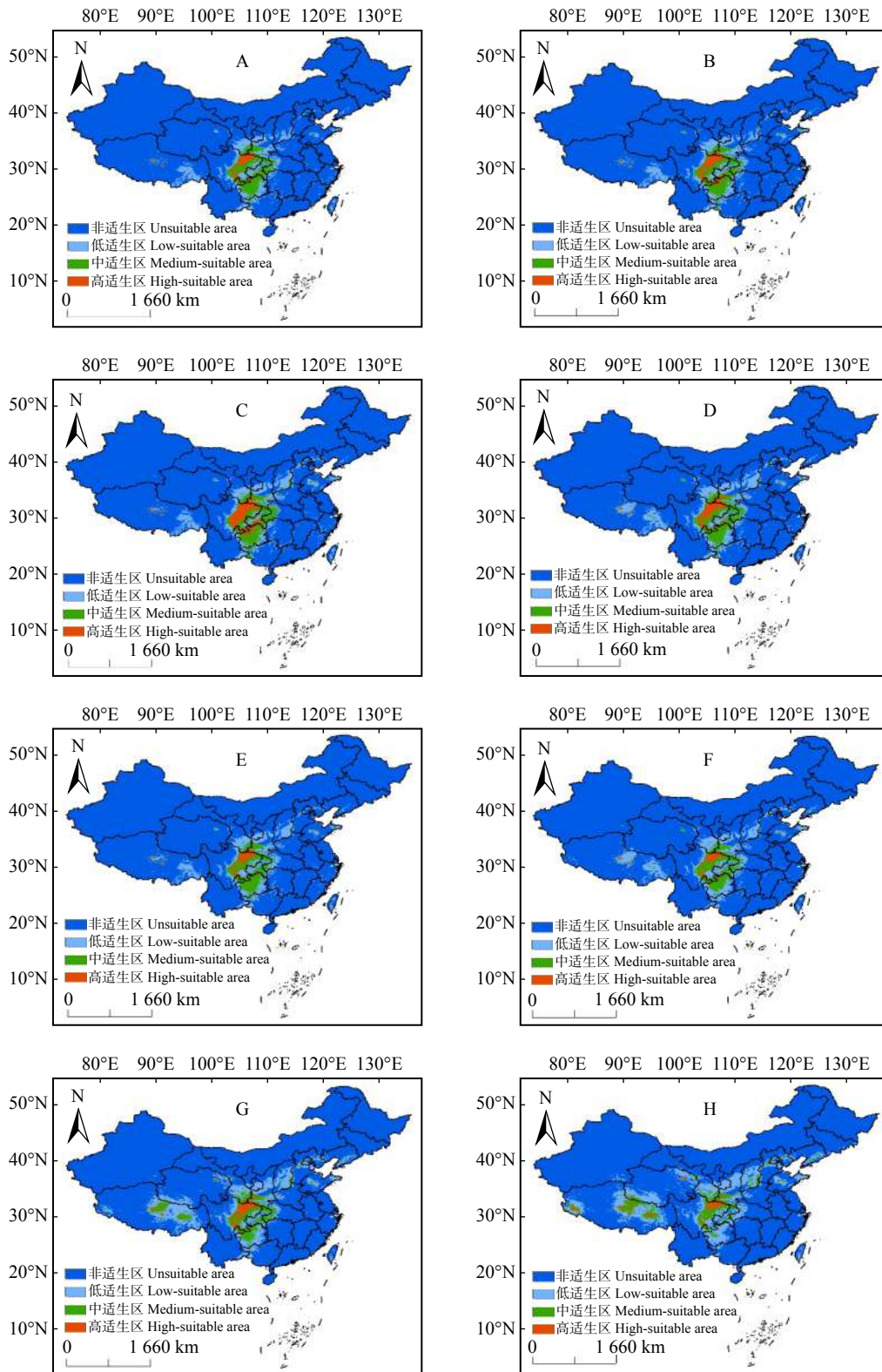
Fig. 3 Distribution of suitable habitats for *A. catalpifolium* in China under current climate

高适生区面积均减少, 其中 2050s SSP370 气候背景下梓叶槭高适生区面积减少最少, 其高适生面积为 17.5 万 km<sup>2</sup>, 相比较当代梓叶槭高适生面积减少了仅 9.5%, 2090s SSP245 情景下梓叶槭在全国的高适生区面积最小, 仅为 6.56 万 km<sup>2</sup>, 相比较当代缩减了 66.1%。四川省在各个时期均为梓叶槭高适生区面积分布最大的省份, 未来 2 个时期共 8 种情景下梓叶槭在四川省的高适生面积均减少, 其中 2090s SSP585 气候情景下梓叶槭在四川的高适生面积为

表 4 当代、2050s 和 2090s 梓叶槭在各省高适生区面积

Tab. 4 Contemporary and future areas of *A. catalpifolium* in each province in 2050s and 2090s

地区 Area	当代 Current	2050s				2090s			
		SSP126	SSP245	SSP370	SSP585	SSP126	SSP245	SSP370	SSP585
中国 China	193 339	73 589	109 951	175 007	122 267	74 423	65 586	102 581	90 359
四川 Sichuan	112 362	53 723	74 792	109 322	80 072	53 011	47 383	65 395	36 302
贵州 Guizhou	41 161	3 314	11 175	20 910	3 297	2 273	2 481	503	—
云南 Yunnan	9 492	2 308	4 113	6 334	2 412	1 475	1 596	1 926	694
陕西 Shaanxi	10 105	4 098	6 806	15 331	18 769	7 778	3 907	13 821	10 383
重庆 Chongqing	16 188	3 865	6 014	13 519	5 494	2 288	2 530	503	69
西藏 Tibet	313	3 455	3 698	3 959	5 348	4 080	5 747	11 598	30 298



A ~ D. 2050s SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 气候情景; E ~ H. 2090s SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 气候背景。A~D: SSP126, SSP245, SSP370 and SSP585 climate scenarios in 2050s; E~H: SSP126, SSP245, SSP370 and SSP585 climate backgrounds in 2090s.

图4 不同时期不同气候背景下梓叶槭适宜性生境分布

Fig. 4 Distribution of suitable habitats for *A. catalpifolium* in different periods and climates

3.63 万  $\text{km}^2$ , 占该时期全国高适生区面积的 40.2%, 相比较当代四川省高适生区面积减少了 67.7%。而西藏自治区在未来 8 种情景下梓叶槭的高适生面积均有不同程度增加, 且随着排放强度的增加而增加,

其中 2090s SSP585 模式下梓叶槭高适生区面积最大, 为 3.03 万  $\text{km}^2$ 。

采用 ArcGIS10.2 软件统计梓叶槭在当代和未来不同气候情景下的分布动态(表 5), 以梓叶槭中高

适生区作为其潜在分布区。结果显示, 2050s 4 种气候情景 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 下与当代梓叶槭相比生境变化程度 ( $N_e$ ) 分别为 24.9%、19.6%、7.2% 和 19.1%, 分布面积比 ( $N_a$ ) 分别为 1.28、1.19、0.97 和 1.09; 仅 SSP370 模式下梓叶槭生境变化趋势为略微扩张, 生境变化程度较小, 除该时期外, 其余 3 个时期梓叶槭潜在分布区均有 9% ~ 28% 的缩小。随着时间的推移, 2090s 4 种气候情景 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 下与当代梓叶槭相比生境变化程度 ( $N_e$ ) 分别为 27.9%、31.7%、31.6% 和 55.7%, 与当代分布面积比 ( $N_a$ ) 相比分别为 1.30、1.34、1.00 和 1.05; 仅 SSP370 气候背景下梓叶槭潜在分布区保持不变, 其他 3 个时期梓叶槭潜在分布区有可能有 5% ~ 30% 的收缩, 其中 SSP585 气候背景下梓叶槭生境变化程度最大。结合梓叶槭高适生区分布情况可以发现, 在未来两个时期共 8 种气候背景下梓叶槭生境破碎化严重, 大量高适生区将会丧失并转化为中适生区。

#### 2.4 限制梓叶槭分布的主要环境因子

将筛选出的 10 个气候因子作为指标对梓叶槭

适生区进行模拟, 得出影响梓叶槭分布的 6 个主要气候因子贡献率和重要值(表 6)。结果显示, 在 19 个气候变量中, 对梓叶槭分布格局影响最大的是最暖季降水量(Bio18), 其贡献率达 56.1%, 表明最暖季降雨量是影响梓叶槭分布的最重要气候因子, 此外温度季节性变化标准差(Bio4)、海拔(Alt)、最冷季降雨量(Bio19)、最冷季均温(Bio11)和月均气温日较差(Bio2)也是影响梓叶槭分布的重要气候因子, 贡献率分别为 18.2%、10.9%、3.8%、3.6% 和 2.8%。6 个环境因子贡献率合计为 95.4%。

#### 2.5 影响梓叶槭潜在分布主要气候因子阈值

利用 MaxEnt 模型绘制影响梓叶槭分布的主要环境因子的响应曲线如图 5 所示。影响梓叶槭分布的 6 种主要气候变量最暖季降水量(Bio18)、温度季节性变化标准差(Bio4)、海拔(Alt)、最冷季降雨量(Bio19)、最冷季均温(Bio11)和月均气温日较差(Bio2)均具有 1 个峰值, 达到峰值前, 梓叶槭分布概率随环境因子的升高而升高, 达到峰值后梓叶槭分布概率随环境因子的升高降低或保持不变。各个环境因子的阈值分别为最暖季降水量(479 ~ 2 382.6 mm)、温

表 5 气候变化下梓叶槭分布动态

Tab. 5 Distribution dynamics of *A. catalpifolium*

气候情景 Climate scenario	当前与其他时期分布面积比 Distribution area ratio in current and other periods ( $N_a$ )	生境变化程度 Habitat change extent ( $N_e$ )/%	生境变化趋势 Habitat change trend
当代 Current	1	0	不变 No change
2050s SSP126	1.28	24.9	收缩 Contraction
2050s SSP245	1.19	19.6	收缩 Contraction
2050s SSP370	0.97	7.2	扩张 Expansion
2050s SSP585	1.09	19.1	收缩 Contraction
2090s SSP126	1.30	27.9	收缩 Contraction
2090s SSP245	1.34	31.7	收缩 Contraction
2090s SSP370	1.00	31.6	不变 No change
2090s SSP585	1.05	55.7	收缩 Contraction

表 6 主要气候因子对梓叶槭分布的贡献率和重要值

Tab. 6 Contribution rates and important values of major climatic factors to the distribution of *A. catalpifolium*

代号 Code	环境因子 Environmental factor	贡献率 Contribution rate/%	重要值 Importance value
Bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter	56.1	0.8
Bio4	温度季节性变化标准差 SD of temperature seasonal change	18.2	1.5
Alt	海拔 Altitude	10.9	0.8
Bio19	最冷季降雨量 Precipitation of the coldest quarter	3.8	1.1
Bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter	3.6	57.7
Bio2	月均气温日较差 Daily range of monthly average temperature	2.8	0
合计 Total		95.4	61.9

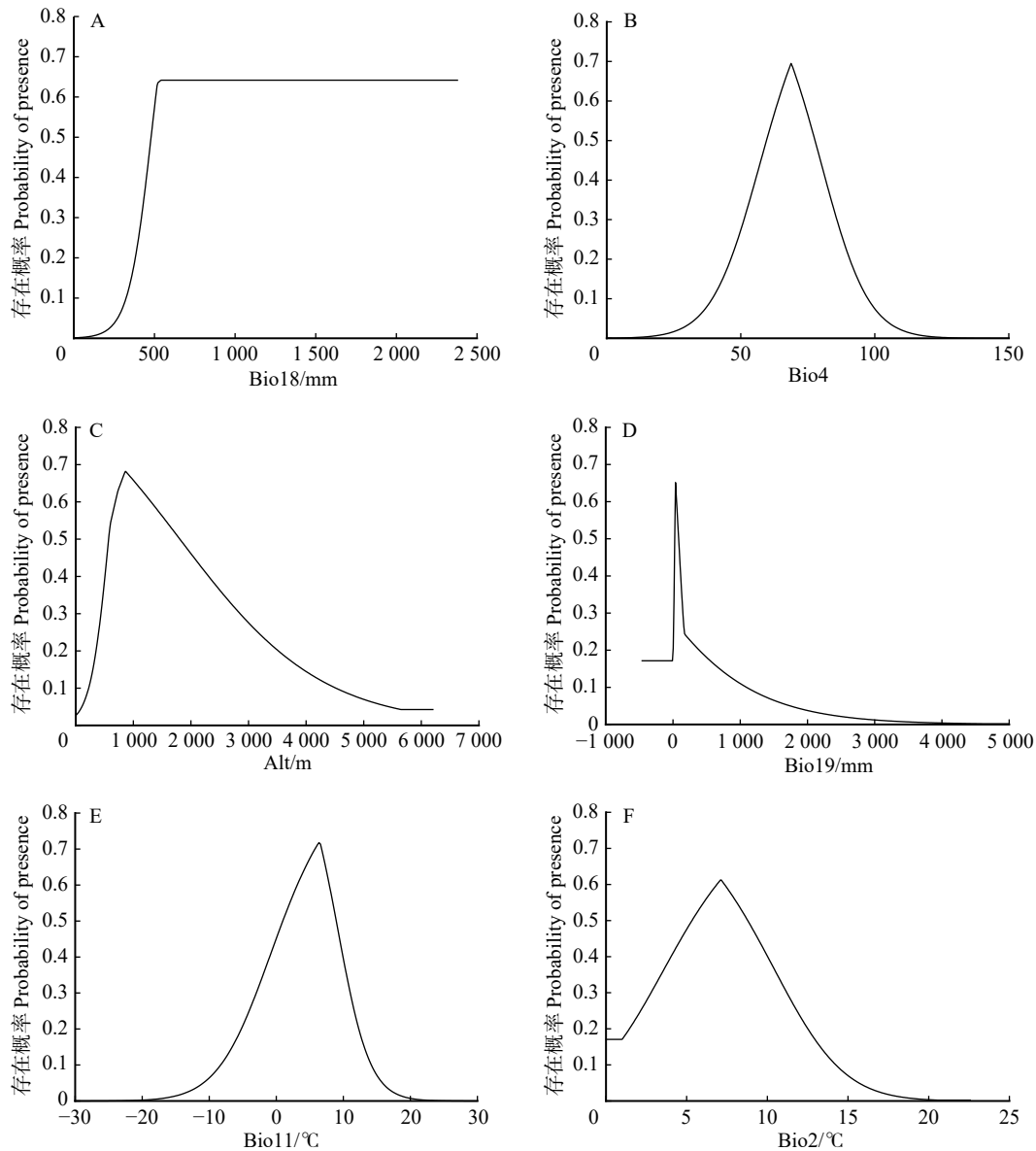


图5 梓叶槭分布对6个环境因子的响应曲线

Fig. 5 Response curves of *A. catalpifolium* distribution to 6 environmental factors

度季节性变化标准差(59.7 ~ 77.3)、海拔(577 ~ 1 805 m)、最冷季降雨量(26.2 ~ 82.4 mm)、最冷季均温(1.1 ~ 8.8 °C)和月均气温日较差(5.3 ~ 8.8 °C)。

### 3 讨论与结论

MaxEnt 最大熵值模型是目前表现最好、应用最广泛的生态位模型。在物种分布预测, 迁移路线, 物种入侵的入侵线路, 自然保护区设计和全球气候变化对物种适应区域的影响等生态学热点问题中有很好的参考价值<sup>[31]</sup>。大多数研究者在使用 MaxEnt 模型预测物种潜在分布区时, 习惯采用模型的默认参数简单的运行模型, 得到物种的潜在分布区以及气候因子的响应曲线, 而 MaxEnt 模型属于高度复杂的机械学习式模型, 其默认参数来自早期对 226 个物种的测试<sup>[32]</sup>。研究者发现, 在默认参数下模拟物种

的潜在分布, 易产生过度拟合、复杂度较高的现象, 降低了 MaxEnt 模型的预测精度, 并可能产生难以解释的结果, 因此有必要对模型的运行参数进行优化。本文利用 R 的 ENMeval 包筛选出具有最小 AICc 和较大 AUC 值的正则化参数和特征组合来约束模型的复杂度, 可以有效的避免模型的过度拟合, 得到较好的预测结果。

气候变化可能会对植物的地理分布产生复杂的影响, 孟艺宏等<sup>[33]</sup>人研究发现双花木属(*Disanthus*) 植物潜在分布区面积在未来将会发生不同程度(30% ~ 65%)的收缩, 吴建国<sup>[34]</sup>研究发现气候变化背景下 7 种濒危荒漠植物适宜分布范围将会减少, Bezeng 等<sup>[35]</sup>模拟了南非 162 种植物未来的潜在分布区, 发现超过 50% 的植物适生区减少, 其余或有不同程度的扩张。本研究发现, 当代是梓叶槭高适



生区分布最广、面积最大的时期。未来两个时期 4 种气候情境(SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585)下梓叶槭在低纬度地区的四川盆地的西南缘和云贵高原北部的高适生区丢失严重,高适生区面积将整体将减少 9.5%~66.1%,大量高适生区转变成中适生区。然而随着排放强度的增加,2050s 和 2090s 梓叶槭在西藏的高适生区面积逐渐增大,在 2090s SSP585 情景下达到最大,这可能于全球气温升高,导致原本不适合梓叶槭生长的地方逐渐变成其适生区。有研究表明,随着未来气候的变化,植物适生区有向高海拔和高纬度迁移的趋势<sup>[36-37]</sup>,本研究结果正好与其一致。以  $HSI \geq 0.4$  划分梓叶槭潜在分布区,仅 2050s SSP370 和 2090s SSP370 气候背景下梓叶槭潜在分布区面积表现为扩张和不变,说明中高排放强度情景对梓叶槭的潜在分布区影响较小。

在大地理区域内,气候因子(温度和降水)是决定物种潜在地理分布的重要因子<sup>[38]</sup>。张兴旺等<sup>[39]</sup>认为温度和降水是影响黄山花楸(*Sorbus amabilis*)潜在地理分布格局的共同因子。贾翔等<sup>[40]</sup>认为主导红松(*Pinus koraiensis*)地理分布的因子为年降雨量、降雨量季节性变异系数、海拔和年平均温度。本研究发现最暖季降水量、温度季节性变化标准差、海拔、冷季节降雨量、最冷季节均温和月均气温日较差是影响梓叶槭分布的主要环境因子。共 5 个气候因子与温度和降水有关,其中最暖季节降雨量对梓叶槭的分布贡献率最大,达到了 56.1%。结合梓叶槭天然分布地的环境特征发现,梓叶槭的适生区夏季雨量充沛,多云雾且湿度大,气温柔和,正好与梓叶槭天然分布地气候因子相符合。

在全球气候变化背景下,人类的活动必然会对野生濒危植物栖息地的生态环境带来深刻的变化,从而影响其地理分布<sup>[41]</sup>。研究气候变化对濒危物种分布格局的影响可以预测物种面临的生态风险,对濒危植物的保护和管理具有重要意义<sup>[42]</sup>。本研究发现,梓叶槭在未来气候变化背景下高适生区退化严重,因此应该对已发现的梓叶槭分布区进行优先保护,通过对梓叶槭就地保护地点观察和动态监测,建立起就地保护小区,加强管理,同时选取适当的地区对其进行迁地保护,使这一珍贵的物种资源得以保存。

#### 参 考 文 献

- [1] 蒋霞,倪健. 西北干旱区 10 种荒漠植物地理分布与大气候的关系及其可能潜在分布区的估测[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 98-107.  
Jiang X, Ni J. Species-climate relationships of 10 desert plant species and their estimated potential distribution range in the arid
- lands of northwestern China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(1): 98-107.
- [2] 王娟,倪健. 植物种分布的模拟研究进展[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 1040-1053.  
Wang J, Ni J. Review of modelling the distribution of plant species[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 1040-1053.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth assessment report (AR5) [EB/OL]. (2013-06-07) [2018-07-08]. <http://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>.
- [4] Sharma E, Chettri N, Tsering K, et al. Climate change impacts and vulnerability in the eastern himalayas[M]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2009.
- [5] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [6] 王运生,谢丙炎,万方浩,等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.  
Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365-372.
- [7] 周海涛,那晓东,臧淑英,等. 最大熵(Maxent)模型在物种栖息地研究中的应用[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(3): 149-151.  
Zhou H T, Na X D, Zang S Y, et al. Applications of maximum entropy (Maxent) model in species habitat study[J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(3): 149-151.
- [8] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等. 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, et al. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(1): 90-98.
- [9] 艾科拜尔·木哈塔尔,热木图拉·阿卜杜克热木,马合木提·哈拉克. 基于生态位模型的艾比湖国家级自然保护区马鹿生境评价[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3919-3925.  
Ekbar M, Rahmutulla A, Mahmut H. Assessing habitat suitability for cervuselaphus in the Ebinur Lake National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3919-3925.
- [10] 苏旭坤,董世魁,刘世梁,等. 阿尔金山自然保护区土地利用/覆被变化对藏野驴栖息地的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 141-148.  
Su X K, Dong S K, Liu S L, et al. Effects of land use/land cover change (LUCC) on habitats of Tibetan wild donkey in Aerjin Mountain National Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 141-148.
- [11] Basille M, Calenge C, Marboutin C, et al. Assessing habitat selection using multivariate statistics: some refinements of the ecological-niche factor analysis[J]. Ecological Modelling, 2008, 211(1): 233-240.
- [12] Niven R K. Jaynes' MaxEnt, steady state flow systems and the maximum entropy production principle[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1193: 397-404.
- [13] Gotway C A, Stroup W W. A generalized linear model approach

- to spatial data analysis and prediction[J]. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Stats*, 1997, 2(2): 157-178.
- [14] David R B S, Lan N R. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of data analysis[J]. *Mathematics & Computers in Simulation*, 1992, 33(5-6): 385-390.
- [15] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5232-5240.
- Cao X P, Wang J R, Lu S S, et al. Simulation of the potential distribution patterns of *Picea crassifolia* in climate change scenarios based on the maximum entropy (Maxent) model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [16] 季乾昭, 王荣兴, 黄志旁, 等. 样本量与研究范围变化对 MaxEnt 模型准确度的影响: 以黑白仰鼻猴为例[J]. *兽类学报*, 2019, 39(2): 126-133.
- Ji Q Z, Wang R X, Huang Z P, et al. Effects of sample size and study range on accuracy of MaxEnt in predicting species distribution: a case study of the black-and-white snub-nosed monkey[J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2019, 39(2): 126-133.
- [17] 徐军, 曹博, 白成科. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3354-3359.
- Xu J, Cao B, Bai C K. Prediction of potential suitable distribution of endangered plant *Kingdonia uniflora* in China with MaxEnt[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3354-3359.
- [18] 马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 等. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 262-269.
- Ma S M, Nie Y B, Geng Q L, et al. Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalus mongolica*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3): 262-269.
- [19] 吴志华, 詹妮, 尚秀华, 等. 我国黄槿气候特征及适生区分析[J]. *桉树科技*, 2020, 37(2): 45-52.
- Wu Z H, Zan N, Shang X H, et al. Climatic characteristics analysis of *Hibiscus tiliaceus* and prediction of its suitable range in China[J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2020, 37(2): 45-52.
- [20] Adhikari D, Barik S, Upadhaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 37-43.
- [21] Sunil K, Thomas J S. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia[J]. *Journal of Ecology Environment*, 2009, 1(4): 94-98.
- [22] 张宇阳, 马文宝, 于涛, 等. 梓叶槭的种群结构和群落特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 697-703.
- Zhang Y Y, Ma W B, Yu T, et al. Population structure and community characteristics of *Acer catalpifolium* Rehd[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, 24(4): 697-703.
- [23] Muscarella R, Galante P J, Soley-Guardia M, et al. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models[J]. *Methods in Ecology & Evolution*, 2015, 5(11): 1198-1205.
- [24] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- Zhu G P, Qiao H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [25] Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle[C]. Budapest: the Committee of Second International Symposium on Information Theory, 1973.
- [26] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(2): 335-342.
- [27] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, et al. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar[J]. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102-117.
- [28] Lobo J M. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 17(2): 145-151.
- [29] 冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 等. 气候变化对子遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2481-2492.
- Ran Q, Wei H Y, Zhao Z F, et al. Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2481-2492.
- [30] 郭飞龙, 徐刚标, 牟虹霖, 等. 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, Mu H L, et al. Simulation of potential spatiotemporal population dynamics of *Bretschneidera sinensis* Hemsl. based on MaxEnt model[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(2): 185-194.
- [31] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学中的应用[J]. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295-302.
- Xing D L, Hao Z Q. The principle of maximum entropy and its applications in ecology[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(3): 295-302.
- [32] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [33] 孟艺宏, 徐瑛, 姜小龙, 等. 双花木属植物潜在分布区模拟与分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2816-2825.
- Meng Y H, Xu X, Jiang X L, et al. Potential distribution modeling and analysis of *Disanthus Maxim.*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2816-2825.
- [34] 吴建国. 气候变化对 7 种荒漠植物分布的潜在影响[J]. *应用与*

- 环境生物学报, 2010, 16(5): 650–661.
- Wu J G. Effects of climate changes on distribution of seven desert plants in China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2010, 16(5): 650–661.
- [35] Bezeng S B, Morales-Castilla I, Bank M V D, et al. Climate change may reduce the spread of non-native species[J]. Ecosphere, 2017, 8(3): 1–14.
- [36] Mckeeney D W, Pedlar J H, Lawrence K, et al. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees[J]. *BioScience*, 2007, 57(11): 939–948.
- [37] Lenoir J, Gegout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. *Science*, 2008, 320: 1768–1771.
- [38] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的尺度分布格局及其气候解释[J]. *生物多样性*, 2008, 16(5): 470–476.
- Feng J M. Spatial patterns of species diversity of seed plants in China and their climatic explanation[J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16(5): 470–476.
- [39] 张兴旺, 李垚, 谢艳萍, 等. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(4): 33–43.
- Zhang X W, Li Y, Xie Y P, et al. Effect of climate change on potential geographical distribution of *Sorbus amabilis*[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, 27(4): 33–43.
- [40] 贾翔, 王超, 金慧, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型评价红松适宜分布区[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2570–2576.
- Jia X, Wang C, Jin H, et al. Assessing the suitable distribution area of *Pinus koraiensis* based on an optimized MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8): 2570–2576.
- [41] 苏维词. 贵州喀斯特地区珍稀濒危植物及其保护[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(2): 111–116.
- Su W C. Rare and endangered plants in Guizhou karst regions with the consideration of their conservation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 111–116.
- [42] Austin M P, Niel K P V. Improving species distribution models for climate change studies: variable selection and scale[J]. *Journal of Biogeography*, 2011, 38(1): 1–8.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑 石福臣)