

基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测

王雨生¹ 王召海^{1*} 邢汉发¹ 厉静文² 孙 硕¹

(¹ 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; ² 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘 要 珙桐为我国特有珍稀树种, 预测珙桐潜在适生区可为珙桐物种保护与研究提供重要参考。基于 387 条中国境内样本分布数据和 27 个环境因子, 利用 MaxEnt 模型与地理信息系统 (geographic information system, GIS), 对珙桐在中国的潜在适生区进行预测, 并通过受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线对模型精度进行验证。结果表明: ROC 曲线下面积 (AUC) 平均值为 0.951, 模型预测结果准确性较高, 适合珙桐的潜在适生区预测; 珙桐潜在适生区主要位于四川、云南、贵州、湖南、湖北、重庆、陕西和西藏等地区, 高适生区呈不规则环状分布, 西起横断山区, 北达秦岭-武当山-荆山一线, 东抵张家界-雪峰山一带, 南至贵阳, 在西藏东南部的雅鲁藏布江河谷和安徽西部的大别山地区也有分布; 气温年较差、年降水量、最冷月最低温、昼夜温差、降水量变异系数等 5 个环境因子对珙桐潜在适生区预测影响最大, 其他环境因子, 如地形、土壤、水文等影响较小。

关键词 珙桐; MaxEnt 模型; 潜在分布; 环境因子

Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucrata* Baill in China based on MaxEnt. WANG Yu-sheng¹, WANG Zhao-hai^{1*}, XING Han-fa¹, LI Jing-wen², SUN Shuo¹ (¹ College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014; ² Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China).

Abstract: *Davidia involucrata* Baill is a rare and precious tree species in China. The prediction of its suitable habitats can provide important reference for its protection and research. Based on 387 sample distribution and 27 environmental factors in China, the MaxEnt model and geographic information system (GIS) were used to predict the potential suitable habitats. The accuracy of the model was verified by receiver operating characteristic curve (ROC). The results showed that the mean value of the area under ROC curve was 0.951, and the accuracy of the model was high, which was suitable for predicting potential suitable habitats of *D. involucrata*. The potential suitable habitats for *D. involucrata* were mainly located in Sichuan, Yunnan, Guizhou, Hunan, Hubei, Chongqing, Shanxi, and Tibet. The highly potential suitable habitats distributed in an irregular circular shape, with the Hengduan Mountains to the west, the Qinling-Wudang-Jinshan Mountains to the north, the Zhangjiajie-Xuefeng Mountains to the east and the south to Guiyang. In addition, they are also distributed in the Yarlung Zangbo River Valley in the southeast of Tibet and the Dabie Mountains in western Anhui. The major factors determining the potential suitable distribution were annual temperature range, annual precipitation, minimum temperature of coldest month, diurnal temperature difference, and annual precipitation variation coefficient. Other environmental factors, such as topography, soil, hydrology, had limited influence on the distribution of *D. involucrata*.

Key words: *Davidia involucrata* Baill; MaxEnt model; potential distribution; environmental factor.

珙桐系珙桐科珙桐属落叶乔木,是中国特有的孑遗植物,已被确定为一级保护树种并被列入珍稀濒危植物红皮书,其有“活化石”之称,现仅局限于中国西南亚热带山区(傅立国,1991;禹玉婷等,2006)。珙桐对生境要求特殊,种群年龄结构呈衰退型,自我更新困难(占玉燕等,2010),加之气候变化、人为干扰,使得其天然适生环境不断压缩(吴刚等,2000)。目前,对于珙桐的研究多集中于生物学特征(苏智先等,1999;胡进耀等,2003)、群落种间关系(朱利君等,2006)、形态解剖(罗世家,2002)、遗传与引种(彭玉兰等,2003;宋丛文等,2004)等方面,在地理分布上限于对局部地区的研究(喻理飞,2002;马宇飞等,2005),而对其大尺度潜在自然分布区与生境因子的研究仍然较少。大尺度珙桐适生区预测,有利于揭示珙桐自然分布规律,探究影响珙桐自然分布的关键环境因子,对其自然保护区规划与物种保护、维持生态多样性具有重要意义(Xiao *et al.*, 2011;胡秀等,2014)。

目前,研究物种分布状态与生境条件多采用野外调查的方式(张家勋等,1995;苏智先等,1999),该方法虽直观准确,但调研周期长、成本高,也难以真实反映物种全部分布区。随着生态学统计模型与地理信息系统(geographic information system, GIS)的发展,通过模型预测物种的地理分布已得到广泛应用(Yang *et al.*, 2013)。张清华等(2000)基于统计学理论,利用生态信息系统 GREEN 计算珙桐物种分布,该方法需要专家先验知识和足够数量的物种分布数据、环境因子数据,工作量较大且效率不高。吴建国等(2009)利用分类和回归树模型,预测珙桐潜在分布,效率有所提高,但该模型对物种样本数据要求较高,选择不当极易影响模型精度。最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt)基于生态位理论,利用已有物种实际分布资料与环境变量,探究物种已知分布区的环境特征与潜在分布区域的非随机关系(张路,2015)。该模型的优点是无需开展野外调查,成本低,建模快;同时,利用机器学习方法,不必过多依靠先验经验,仅通过有限的物种样本存在数据,准确预测物种分布(Philips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011; Chikerema *et al.*, 2017)。同时,MaxEnt 模型较其他潜在分布区预测模型预测精度较高(曹向峰等,2010;张海娟等,2011; Padalia *et al.*, 2014),现已被广泛用于预测党参(郭杰等,2017)、独叶草(徐军等,2015)、金花茶(谭钰凡等,2018)等野生濒危

物种分布预测和黄顶菊(曹向峰等,2010)、薇甘菊(张海娟等,2011)、豚草(柳晓燕等,2016)等入侵物种防护。

本文将 MaxEnt 模型与地理信息系统(GIS)相结合,选取 387 条样本数据与 27 个环境因子数据进入模型,探究珍稀植物珙桐的潜在适生区,并对其适生等级与环境因子进行评价,以期为珙桐生物多样性保护、野生资源就地与迁地研究提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 样本数据 珙桐样本数据主要来源于中国植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn>)与国家标本平台(NSII, www.nsii.org.cn),通过编程方式快速获取样本分布信息,共计 7500 余条。由于大部分样本点位置不准确,不能精确表达样本采集的详细地理位置,故需要通过数据清理等流程筛选有效数据,去除位置不明确的样本点。经数据筛选与去重,借助高德地图提供的地理编码工具,获得样本点经纬度。在此基础上,查阅相关文献,重点选择珙桐原地样本点,去除研究所、公园景区、实验林场等人工干预较多的区域,获得珙桐样本数据共计 387 条(图 1)。

1.1.2 环境因子数据 本文共选用环境因子 27 个(表 1),包括:气候因子 19 个(BIO01-BIO19)、地形因子 3 个(Altitude、Aspect、Slope)、土壤因子 3 个(AWC、T_texture、T_oc、T_ph)、土地利用因子 1 个(LUCC)、水文因子 1 个(River_distance)。气候与

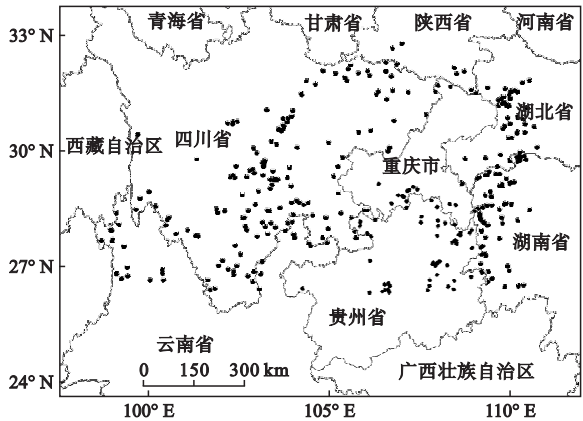


图 1 珙桐样本点在中国分布示意图
Fig.1 Distribution of specimen records of *Davidia involu-crata* Baill in China

表 1 本文中所选用的环境因子
Table 1 Environmental factors

因子类型	因子代码	描述
气候	BIO01	年平均气温
	BIO02	昼夜温差月均值
	BIO03	等温性
	BIO04	温度季节性变化标准差
	BIO05	最暖月最高温
	BIO06	最冷月最低温
	BIO07	气温年较差
	BIO08	最湿季平均气温
	BIO09	最干季平均气温
	BIO10	最暖季节平均温
	BIO11	最冷季平均温度
	BIO12	年降水量
	BIO13	最湿月降水量
	BIO14	最干月降水量
	BIO15	降水量变异系数
	BIO16	最湿季降水量
	BIO17	最干季降水量
	BIO18	最暖季降水量
	BIO19	最冷季降水量
地形	Alt	海拔
	Aspect	坡向
	Slope	坡度
土壤	AWC	土壤有效水含量
	T_oc	土壤顶层有机碳含量
	T_ph	土壤顶层酸碱度
	Soil_texture	顶层土壤质地
土地利用	LUCC	土地利用
水文	River_distance	距主要河流距离

地形数据来自 WorldClim 环境数据库 (www.worldclim.org), 以 1970—2000 年生物环境因子均值为结果, 空间分辨率为 30'' (~1 km²), 坡度因子与坡向因

子由 ArcGIS 软件生成。土壤因子来源于黑河计划数据管理中心、寒区旱区科学数据中心所提供的基于世界土壤数据库 (HWSD) 的土壤数据集 (v1.1) (<http://westdc.westgis.ac.cn>), 土地利用数据、河流分布由中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台 (www.resdc.cn/Default.aspx) 提供。除此之外, 考虑到水文条件对物种潜在分布的影响, 本文引入水文因子作为新的环境因子, 由河流分布数据经投影坐标转换后, 经 ArcGIS 软件进行直线距离分析后生成。

为保证环境因子数据空间分辨率一致, 将上述数据使用最邻近法重采样, 分辨率选择与最低的 WorldClim 环境数据库相同。

由于本文选用环境因子较多, 因子间易产生多重共线性问题, 增加模型复杂性, 影响模型相应关系与贡献度判断。为克服多重共线性问题, 本文参考 Yang 等 (2013) 提出的方法, 运用多重共线性分析来检验环境因子间的相关性, 对于两因子之间相关性绝对值 $|r| > 0.8$, 只选用一个因子进入模型。在此之前, 需要将环境因子输入 MaxEnt 模型, 获得每个环境因子的贡献度, 并以此作为多重共线性因子剔除的依据, 即对于存在较强相关性的因子, 选择贡献度较高的因子进入模型。

根据因子相关性分析结果与贡献度评价, 筛选出的环境变量 (表 2) 包括: 昼夜温差月均值 (BIO02)、等温性 (BIO03)、最冷月最低温 (BIO06)、气温年较差 (BIO07)、年降水量 (BIO12)、降水量变异系数 (BIO15)、海拔 (Alt)、坡向 (Aspect)、坡度

表 2 环境因子多重共线性检验
Table 2 Multi-collinearity test among environmental factors

	Alt	Aspect	Slope	AWC	T_oc	T_ph	Soil_t	LUCC	River_d	BIO02	BIO03	BIO06	BIO07	BIO12	BIO15
Alt	1														
Aspect	0.01	1.00													
Slope	0.37	0.02	1												
AWC	0.73	0.00	0.23	1											
T_oc	0.16	0.00	0.10	0.17	1										
T_ph	-0.24	-0.02	-0.23	-0.24	-0.20	1									
Soil_t	-0.08	0.01	0.09	-0.14	0.18	-0.31	1								
LUCC	-0.28	-0.04	-0.27	-0.16	-0.07	0.23	-0.07	1							
River_d	0.15	0.02	-0.18	0.09	-0.09	0.05	-0.13	-0.05	1						
BIO02	0.31	-0.01	-0.24	0.17	-0.10	0.20	0.19	-0.06	0.16	1					
BIO03	0.64	0.00	0.37	0.41	0.09	-0.25	0.01	-0.22	0.19	0.22	1				
BIO06	-0.40	-0.01	0.13	-0.29	-0.02	-0.17	0.29	0.10	-0.27	-0.70	0.19	1			
BIO07	-0.21	0.00	-0.46	-0.17	-0.14	0.35	-0.28	0.09	0.29	0.70	-0.51	-0.77	1		
BIO12	-0.38	0.01	0.19	-0.23	0.11	-0.33	0.36	-0.02	-0.39	-0.81	0.00	0.79	-0.69	1	
BIO15	0.27	-0.02	-0.08	0.21	0.02	0.13	-0.23	0.00	0.17	0.42	0.04	-0.54	0.36	-0.43	1

(Slope)、土壤有效水含量(AWC)、土壤顶层有机碳含量(T_{oc})、土壤顶层酸碱度(T_{ph})、顶层土壤质地(Soil_texture)、土地利用(LUCC)、距主要河流直线距离(River_distance),共15个。

1.1.3 地图数据 本文所使用的基本地图数据来自国家基础地理信息系统网(<http://www.nfgis.nsdi.gov.cn/>)所提供的1:4000000中国地图和中国行政区划图。

1.2 分析方法

1.2.1 MaxEnt 模型的构建与参数选择 MaxEnt 模型以最大熵理论为基础,其原理是在服从于一定限定条件的情况下,通过计算目标地区概率分布的最大熵来估计物种的概率分布。将物种在环境空间的未知概率分布记为 π ,定义未知概率分布 π 在一个有限集 X 中, X 为研究区域中的像素集合; x 表示由 X 分成的各网格点, $\pi(x)$ 为点 x 处的非负分布概率,且满足 $\sum \pi(x) = 1$ 。选择熵最大的分布作为最优分布,其概率为 $\hat{\pi}$,则有概率分布的最大熵为(Phillips *et al.*, 2006;Phillips *et al.*, 2008):

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi} \ln \hat{\pi}(x)$$

将珙桐样本数据与环境因子数据作为限定条件,中国作为研究区域 X ,模型将已知样本数据迭代,目标地区的概率分布不断增加,其最大熵也不断增加,直至达到收敛阈值,此时熵最大值所确定的分布即为最优分布。

为提高模型对于环境变量的限制水平,将“linear feature”(用于约束均值)、“quadratic feature”(用于约束方差)、“product feature”(用于约束协方差)3个参数加入模型,同时又引入“hinge features”参数以平滑预测结果,减少训练数据的过拟合(Moreno *et al.*, 2011;Yackulic *et al.*, 2013;Phillips *et al.*, 2017)。

考虑到模型运算结果会受到所选样本集的影响,本文随机迭代模型10次,取平均值用于评价模型的有效性,以预测平均结果作为物种潜在分布预测结果(Flory *et al.*, 2012)。模型提供刀切法(jack-knife)检验,用于测度每个环境因子对模型构建的贡献度。

1.2.2 MaxEnt 模型的精度验证 常用的物种分布模型评价指标有:总体准确度(overall accuracy)、灵敏度(sensitivity)、特异度(specificity)、Kappa 统计量、TSS(true skill statistic)和 AUC。研究表明,除 AUC 外,均易受到物种分布率与阈值的影响,评价

精度不稳定(王运生等,2007)。

本文 MaxEnt 模型采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC 曲线)分析法验证模型精度。ROC 曲线基于非阈值依赖判断模型精度,通过改变判断阈值,获得以假阳性率(实际没有该物种分布而被预测为阳性的概率)为横坐标,真阳性率(实际有该物种分布且预测为阳性的概率)为纵坐标的曲线,该曲线与横坐标所围成的面积即为 AUC(Area Under Curve)值,该值在 0~1,用以测度模型预测结果的准确性。一般认为,AUC<0.6 表明预测结果失败,>0.8 表明预测结果较好,>0.9 即为优秀(Hanley *et al.*, 1982)。

1.2.3 适生区划分 借鉴相关文献(雷军成等, 2010;胡秀等,2014)的方法,将选择部分引种样本与其他相关样本数据加入预测结果图,依据珙桐实生区分布结果,确定珙桐潜在适生区的适生等级,并检验预测模型的准确性。同时,利用 ArcGIS 软件的空间统计功能,可计算不同潜在适生区面积及比例。

2 结果与分析

2.1 珙桐在中国潜在适生区预测结果

经过 MaxEnt 模型预测分析,得到珙桐在中国的潜在适生区分布结果。按照分布概率 P 确定珙桐适生区等级划分: $P<0.1$ 为非适生区, $0.1 \leq P<0.3$ 为低适生区, $0.3 \leq P<0.6$ 为中适生区, $P \geq 0.6$ 为高适生区(图 2)。

珙桐适生区主要集中于中国西南部山区。其中,高适生区主要分布于四川东部、陕西南部、湖北西部、湖南西北部、贵州北部等地的山区地带,呈圆

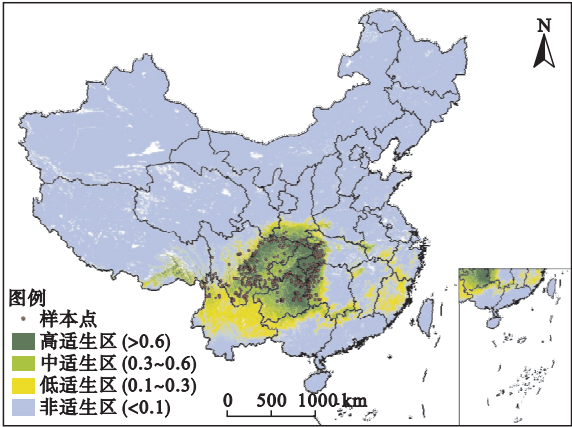


图 2 珙桐在中国潜在适生区预测结果
Fig.2 Potential suitable habitats of *Davidia involucreta* Baill in China

环状,西起横断山区,北达秦岭-武当山-荆山一线,东抵张家界-雪峰山一带,南至贵阳,西藏东南部的雅鲁藏布江河谷和安徽西部的大别山地区也有高适生区分布。中适生区主要分布于高适生区周边邻域地带,同时,在云南西北部及南岭地区也有分布。低适生区分布较为广泛,较高中适生区分布地有明显向东、向南移动的趋势,福建、云南等省份占比较大。

珙桐适生区面积计算结果表明,珙桐在我国的潜在适生区面积约为 1438757 km²;其中,高适生区面积约 356292 km²,所占比重最小,约为 25%;中适生区面积约 425577 km²,所占比重次之,约为 30%;低适生区面积约 656888 km²,面积较大,分布最为广泛。

统计各省份的潜在适生区分布情况,可以发现:四川、云南、贵州、湖南、湖北、重庆、陕西和西藏等省份潜在适生区分布较为集中,其面积总和约占全国潜在适生区面积的 80.39%(表 3)。具体结果如下:

(1)四川省是我国珙桐潜在适生区分布的主要省份之一,其潜在适生区面积约占全国总面积的 21.37%,高适生区与中适生区面积占比更高。

(2)云南省潜在适生区面积次之,约占全国总面积的 17.57%,除最南端外基本都有适生区分布。以低适生区为主,面积约占全国低适生区面积的 31.89%,高适生区与中适生区面积比重均较小,说明云南省的珙桐生长条件并非十分优越。

(3)贵州省潜在适生区分布十分广泛,基本覆盖贵州省全境,约占全国潜在适生区面积的 12.02%。自东向西依次为高、中、低适生区纵列分布,以高适生区与中适生区为主,占比分别为 21.74%、17.45%。

表 3 珙桐潜在适生区在重点省份的面积统计
Table 3 Area statistics of potential suitable habitats of *Davidia involucrata* Baill

省份	高适生区 (km ²)	中适生区 (km ²)	低适生区 (km ²)	总面积 (km ²)	占全国比 (%)
四川省	106937	120522	80029	307488	21.37
云南省	5869	37346	209510	252725	17.57
贵州省	77472	74251	21219	172942	12.02
湖南省	31741	37827	34242	103810	7.22
湖北省	50988	19207	21062	91257	6.34
重庆市	50009	30216	1164	81389	5.66
陕西省	19637	37327	21639	78603	5.46
西藏自治区	9231	20187	39036	68454	4.76
占全国比(%)	98.76	88.56	65.14	80.39	-

2.2 模型精度评价

珙桐 MaxEnt 预测模型的 AUC 平均值为 0.951,明显大于随机预测分布模拟值 0.5,预测结果达到优秀水平(图 3)。结果表明,本文基于 Maxent 模型预测出的珙桐分布记录不具有随机性,模型得到的珙桐在中国潜在适生区预测结果可靠且精度较高。

2.3 环境因子对珙桐潜在适生区预测的影响

从 MaxEnt 模型刀切法分析结果可以看出(图 4):①使用单环境因子建模时,BIO07(气温年较差)、BIO12(年降水量)、BIO06(最冷月最低温)、BIO02(昼夜温差月均值)、BIO15(降水量变异系数)这 5 个因子对模型增益效果最为明显,即说明这 5 个环境因子对珙桐潜在适生区预测模型的贡献较大;②单独使用 Aspect(坡向)、AWC(土壤有效水含量)、BIO03(等温性)、Soil_texture(土壤质地)4 个环境因子建模时,模型增益效果较差,即说

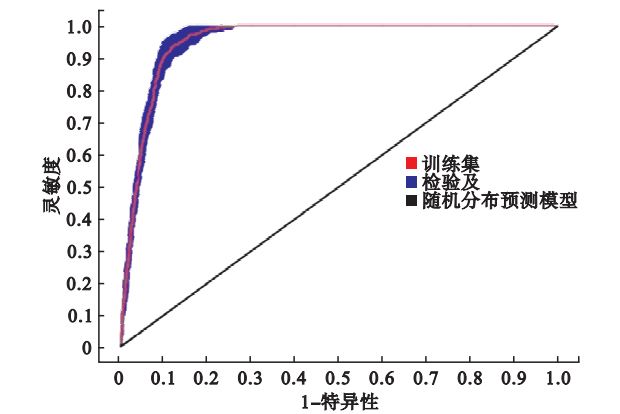


图 3 MaxEnt 模型对珙桐预测结果的 ROC 曲线验证
Fig.3 ROC curve verification of prediction process for *Davidia involucrata* Baill by Maxent model

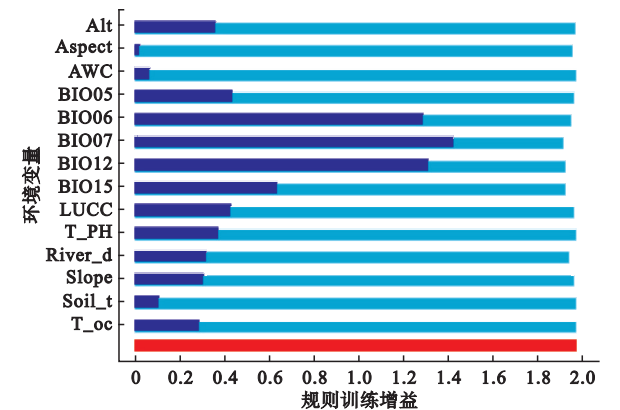


图 4 基于刀切法的环境变量重要性分析
Fig.4 Importance analysis of environmental factors by Jackknife method

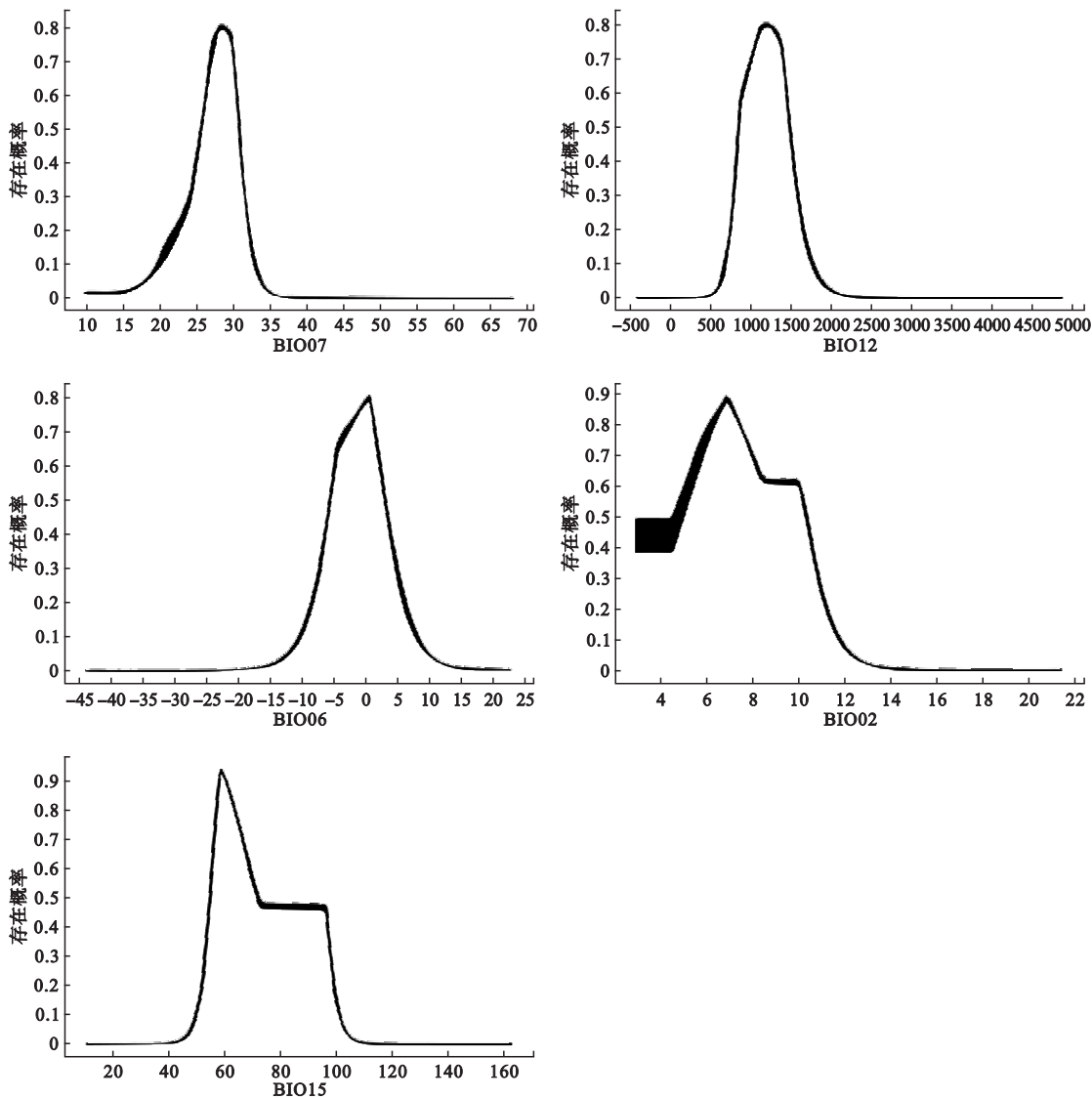


图 5 主导环境因子与珙桐存在概率关系
Fig.5 Relationship between dominant environmental factors and the probability of *Davidia involucrata* Baill presence

明这 3 个环境因子对模型的贡献较小;③当去掉环境变量 BIO07(气温年较差)时,模型预测结果降低最为明显,说明 BIO07 包含珙桐潜在适生区预测所需要的重要信息。综上所述,较土壤、地形、土地利用、水文等环境因子,气候因子对珙桐潜在分布的影响最大。

为明确主导环境因子参数与珙桐存在概率的关系,本文绘制了仅使用单一环境因子 (BIO02、BIO06、BIO07、BIO12、BIO15) 的响应曲线(图 5)。结果表明,珙桐的存在概率随环境条件的改变波动较大。气温年较差对珙桐生长影响最大,当气温年较差>35℃时,珙桐分布概率极小;在 15~30℃时,分布概率增长迅速,28℃左右达到高值。年降水量

对珙桐生长影响较大,随着降水增加存在概率急剧增长,并在 1000~1300 mm 分布概率达到最大,后迅速递减,当>2000 mm 时,存在概率几乎为 0。当最冷月最低温<-15℃时,珙桐存在概率较低,随着温度升高而增长;在-5~2℃时,存在概率达到最高,后迅速下落。以存在概率>0.6 为条件,其他环境因子:昼夜温差月均值、降水量变异系数的范围分别是 5~10℃、55%~70%。

3 讨论

本文利用 MaxEnt 模型对珙桐在中国的潜在适生区进行预测,通过参数优化与模型迭代方式,避免模型预测偶然性,最终依据模型预测的存在概率将

研究区划分为4个适生等级:高适生区(≥ 0.6)、中适生区(0.3~0.6)、低适生区(0.1~0.3)和非适生区(< 0.1)。结果表明,珙桐集中分布于中国西南山区,适生等级大致呈环形分布;不同适生等级分布区差别较大,高适生区分布较为集中,占比较小,中低适生区则分布明显广泛,比重大。经检验,该结果与珙桐已知分布区基本一致(苏智先等,1994;张家勋等,1995;刘海洋等,2012)。较张清华等(2000)研究,本文所提出的物种分布预测方法效率更高,且在涵盖其计算结果的情况下,预测出更多潜在适生区:四川盆地、云南北部、福建东部等地,经与物种样本库比对发现以上地区确有该物种分布;同时,本文预测的高、中适生区与Tang等(2013)预测结果高度一致,也说明该方法能够较为准确预测珙桐潜在适生区。

环境因子分析表明,气候因子对珙桐潜在适生区预测的影响最大,气温年较差、年降水量、最冷月最低温、昼夜温差月均值、降水量变异系数5个因子作用较大。珙桐生长对气温及降水量变化较为敏感,不耐严寒,适宜生长于气温年较差变化较小,降水较多的山区地带。苏智先等(1999)基于物候学原理对珙桐进行实地观察,进行环境因子分析,本研究结果与其结果具有一致性,同时又避免了长时间的观察记录。Tang等(2013)仅选取气候因子加入模型,本文选用27个环境因子,涉及气候、地形、土壤、水文及土地利用等多个方面,在模型参数选择上更加强调对环境因子的限制,有效避免过拟合现象,使得预测结果更加接近珙桐潜在分布。

MaxEnt模型预测物种分布的准确度取决于提供的物种实际分布数据和环境因子数据,样本选择不当或环境因子遗漏均会造成误差(Pearson *et al.*, 2006; Meynard *et al.*, 2007)。一方面,本文选取样本数据量较大,通过交替调参和验证,有助于提高模型预测与验证精度。另一方面,本文选取的气候、地形、土壤、水文、土地利用5类共27个因子多为物种生境分析常用因子,其他因子,如小气候、微地貌、生物相互影响等,难以获得大尺度数据,故不易探究其与物种分布的关系。

参考文献

曹向锋,钱国良,胡白石,等. 2010. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, **21**(12): 3063-3069.

- 傅立国. 1991. 中国植物红皮书. 北京: 科学出版社.
- 郭杰, 刘小平, 张琴, 等. 2017. 基于Maxent模型的党参全球潜在分布区预测. 应用生态学报, **28**(3): 992-1000.
- 胡秀, 吴福川, 郭微, 等. 2014. 基于MaxEnt生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测. 林业科学, **50**(5): 27-33.
- 胡进耀, 苏智先, 黎云祥. 2003. 珙桐生物学研究进展. 中国野生植物资源, **22**(4): 15-19.
- 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**(2): 137-141.
- 刘海洋, 金晓玲, 薛会雯, 等. 2012. 珙桐的群落特征及种群生态学研究进展. 中国农学通报, **28**(22): 1-4.
- 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 等. 2016. 基于MAXENT模型和ArcGIS预测豚草在中国的潜在适生区. 植物保护学报, **43**(6): 1041-1048.
- 罗世家. 2002. 珙桐种子的解剖研究. 湖北民族学院学报: 自然科学版, **20**(4): 18-19.
- 马宇飞, 李俊清. 2005. 湖北七姊妹山珙桐种群结构研究. 北京林业大学学报, **27**(3): 12-16.
- 彭玉兰, 胡运乾, 孙航. 2003. 光叶珙桐的等位酶分析及其生物地理学意义. 植物分类与资源学报, **25**(1): 55-62.
- 宋丛文, 包满珠. 2004. 利用RAPD标记对珙桐地理种群遗传分化的研究. 林业科学研究, **17**(5): 605-609.
- 苏智先, 张素兰. 1999. 珙桐种群生殖物候及其影响因子研究. 西华师范大学学报: 自然科学版, **20**(4): 313-318.
- 谭钰凡, 左小清. 2018. 基于GIS与Maxent模型的金花茶潜在适生区与保护研究. 热带亚热带植物学报, **26**(1): 24-32.
- 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. 2008. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, **15**(4): 365-372.
- 吴刚, 肖寒, 李静, 等. 2000. 珍稀濒危植物珙桐的生存与人为活动的关系. 应用生态学报, **11**(4): 493-496.
- 吴建国, 吕佳佳. 2009. 气候变化对珙桐分布的潜在影响. 环境科学研究, **22**(12): 1371-1381.
- 徐军, 曹博, 白成科. 2015. 基于MaxEnt濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测. 生态学杂志, **34**(12): 3354-3359.
- 禹玉婷, 徐刚标, 汪晓萍. 2006. 珙桐研究进展. 经济林研究, **24**(4): 92-94.
- 喻理飞. 2002. 贵州柏箐喀斯特台原区珙桐群落特征研究. 贵州科学, **20**(3): 44-47.
- 占玉燕, 刘艳红, 熊文娟. 2010. 珙桐濒危原因研究现状及展望. 湖北林业科技, (1): 41-43.
- 张路. 2015. MAXENT最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. 生物学通报, **50**(11): 9-12.
- 张海娟, 陈勇, 黄烈健, 等. 2011. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测. 农业工程学报, **27**(s1): 413-418.
- 张家勋, 李俊清, 周宝顺, 等. 1995. 珙桐的天然分布和人工

- 引种分析. 北京林业大学学报, **17**(1): 25–30.
- 张清华, 郭泉水, 徐德应, 等. 2000. 气候变化对我国珍稀濒危树种珙桐地理分布的影响研究. 林业科学, **36**(2): 47–52.
- 朱利君, 苏智先, 胡进耀, 等. 2006. 珙桐群落种间关系的研究. 广西植物, **26**(1): 32–37.
- Chikerema SM, Gwitira I, Murwira A, *et al.* 2017. Comparison of GARP and Maxent in modelling the geographic distribution of *Bacillus anthracis* in Zimbabwe. *Zimbabwe Veterinary Journal*, **35**: 1–6.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, *et al.* 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, **17**: 43–57.
- Flory AR, Kumar S, Stohlgren TJ, *et al.* 2012. Environmental conditions associated with bat white-nose syndrome mortality in the north-eastern United States. *Journal of Applied Ecology*, **49**: 680–689.
- Hanley JA, McNeil BJ. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, **143**: 29–36.
- Meynard CN, Quinn JF. 2007. Predicting species distributions: A critical comparison of the most common statistical models using artificial species. *Journal of Biogeography*, **34**: 1455–1469.
- Moreno R, Zamora R, Molina JR, *et al.* 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, **6**: 364–370.
- Padalia H, Srivastava V, Kushwaha SPS. 2014. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, **22**: 36–43.
- Pearson RG, Thuiller W, Araújo MB, *et al.* 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, **33**: 1704–1711.
- Phillips SJ, Anderson RP, Dudík M, *et al.* 2017. Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, **40**: 887–893.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**: 231–259.
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, **31**: 161–175.
- Tang CQ, Dong YF, Herrando-Moraira S, *et al.* 2017. Potential effects of climate change on geographic distribution of the Tertiary relict tree species *Davidia involucrata* in China. *Scientific Reports*, **7**: 43822.
- Xiao J, Xu W, Kang D, *et al.* 2011. Nature reserve group planning for conservation of giant pandas in North Minshan, China. *Journal for Nature Conservation*, **19**: 209–214.
- Yackulic CB, Chandler R, Zipkin EF, *et al.* 2013. Presence-only modelling using MAXENT: When can we trust the inferences. *Methods in Ecology & Evolution*, **4**: 236–243.
- Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, *et al.* 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, **51**: 83–87.

作者简介 王雨生,男,1994年生,硕士研究生,主要从事遥感技术应用研究。E-mail: wangys1115@163.com
责任编辑 张敏
