

DOI: 10.5846/stxb201911252549

孟影, 马姜明, 王永琪, 莫燕华. 基于 Maxent 模型的榿木分布格局模拟. 生态学报, 2020, 40(22): 8287-8296.

Meng Y, Ma J M, Wang Y Q, Mo Y H. Prediction of distribution area of *Loropetalum chinense* based on Maxent model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8287-8296.

基于 Maxent 模型的榿木分布格局模拟

孟 影^{1,2,3}, 马姜明^{1,2,3,*}, 王永琪^{1,2,3}, 莫燕华^{1,2,3}

1 广西师范大学可持续发展创新研究院, 桂林 541006

2 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541006

3 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006

摘要:应用最大熵模型(Maxent)模拟榿木(*Loropetalum chinense*)在末次间冰期(last inter glacial, LIG)、末次盛冰期(last glacial maximum, LGM)和当代(Present)等不同时期的中国潜在分布格局,分析影响其分布的主导生物气候因子。结果显示:(1)历史气候的变迁,榿木由末次间冰期经末次盛冰期进入当代,适生区面积呈现增加趋势。当代适生区面积占比最大,适生程度也较高;(2)训练数据和测试数据的 AUC 值分别为 0.947 和 0.954,均达到了极高的精度;(3)刀切法检测表明,影响榿木分布的主导环境因子依次为 bio14(最干月份平均降雨量)、bio17(极干季降雨量)、为 bio19(极冷季平均降雨量)和 bio15(湿度变化方差),其适生值范围分别是 23—93 mm, 98—300 mm, 110—350 mm 和 42%—65%;(4)较纬度而言,经度是影响我国榿木分布格局的主要因子;(5)我国榿木当代的潜在地理分布主要在北回归线以北的区域,总面积为 162.55 万 km², 占国土总面积的 16.93%,高适生区集中于广西北部、江西东部,以及湖南南部、福建东部等地区。本研究较为准确地模拟了榿木在 3 个不同时期的适生分布,为深入分析榿木现代分布格局的形成提供科学依据。

关键词:榿木;潜在分布格局;Maxent 模型;末次间冰期;末次盛冰期;当代

Prediction of distribution area of *Loropetalum chinense* based on Maxent model

MENG Ying^{1,2,3}, MA Jiangming^{1,2,3,*}, WANG Yongqi^{1,2,3}, MO Yanhua^{1,2,3}

1 Institute for Sustainable Development and Innovation, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

2 Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, China, Guilin 541006, China

3 College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

Abstract: The maximum entropy model (Maxent) was used to simulate the potential distribution areas of *Loropetalum chinense* in China in different periods such as the last inter glacial (LIG), the last glacial maximum (LGM) and the present. Key biological factors affecting *Loropetalum chinense* distribution were analyzed. The results showed that: (1) the change of historical climate from the last inter glacial period to the last inter glacial, and then to the present, the suitable area of *L. chinense* increased. The proportion of present suitable area was the largest, and the suitable degree was also higher. (2) the area under the curve (AUC) values of training data and test data were 0.947 and 0.954, respectively, which had reached a very high precision. (3) the dominant environmental factors affecting the distribution of *L. chinense* by Jackknife testing showed that bio14 (Precipitation of Driest Month), bio17 (Precipitation of Driest Quarter), bio19 (Precipitation of Coldest Quarter) and bio15 (Precipitation Seasonality) successively. The range of suitable value was 23—93 mm, 98—300 mm, 110—350 mm and 42%—65%, respectively. (4) Compared with the factor of latitude, the

基金项目:国家自然科学基金项目(31660197);桂林市可持续发展重大专项(20190205, 20180107-3);广西创新驱动发展专项课题(桂科AA17204087-7)

收稿日期:2019-11-25; 修订日期:2020-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mjming03@163.com

longitude was main factor affecting the distribution area of *L. chinense* in China. (5) The potential geographical distribution of the *L. chinense* in China was mainly in the north to the Tropic of Cancer, with a total area of 162.55 million km², accounting for 16.93% of the national territorial area. The highly suitable areas were mainly in the north of Guangxi, the east of Jiangxi, the south of Hunan and the east of Fujian Province. This study accurately simulated the suitable distribution of *L. chinense* in three different periods, and provided scientific basic for analyzing the formation of modern distribution of *L. chinense*.

Key Words: *Loropetalum chinense*; potential distribution areas; Maxent model; last inter glacial; the last glacial maximum; present

理解和预测物种如何应对全球气候变化是生态学研究的核心问题之一^[1], 基于 Maxent 模型可以检测物种潜在分布区对于历史上气候变化的应对措施, 从而预测未来全球气候变暖对于不同物种可能造成的潜在影响。Maxent 模型应用于预测保护物种、入侵种和药用植物的潜在分布格局, 不但具有良好的模型预测效果, 而且具有较好的稳定性^[2]。模型推出后广泛应用于竹叶花椒 (*Zanthoxylum armatum*)^[3]、红松 (*Pinus koraiensis*)^[4]、美味猕猴桃 (*Actinidia deliciosa*)^[5]、假臭草 (*Praxelis clematidea*)^[6]、黄杉 (*Pseudotsuga sinensis*) 林^[7]、互花米草 (*Spartina alterniflora*)^[8]、双花木属 (*Disanthus*)^[9] 等物种的潜在分布研究, 但是对于分布较广的优势物种与环境之间的关系及其分布格局的研究较少。

气候变化下物种的潜在分布格局发生变化, 适生区也发生变迁。古气候记录显示, 金缕梅科 (Hamamelidaceae) 的化石证据发掘很丰富, 最早的化石记录普遍发现于晚白垩纪^[10]。在末次盛冰期和末次间冰期气候不断旋回中, 极大影响了现代植物的分布^[11]。末次间冰期以来, 全球气候波动事件频繁, 强烈地影响了植物的历史动态变化, 塑造了现代分布格局^[12]。末次盛冰期以来, 全球气候环境发生了从低温—升温—高温的转变, 涵盖了不同时间段的植被格局及演替特征^[13]。例如: 张爱平等准确地模拟了 3 种云杉属 (*Picea*) 植物末次间冰期、末次盛冰期、全新世中期和现代的适生分布区分布, 推测了青扦 (*Picea wilsonii*) 和紫果云杉 (*Picea purpurea*) 的生物避难所^[12]。李璇等模拟白栎 (*Quercus fabri*) 在末次盛冰期的结果显示: 高度适生区集中在华中地区, 随气候的变暖逐渐向北移动^[14]。Bertrand 等已经证实了气候变暖会影响植物迁徙向高海拔或高纬度地区^[15]。

檵木 (*Loropetalum chinense*) 为金缕梅科檵木属 (*Loropetalum*) 一种木本植物^[16], 广泛分布于我国中部、南部及西南各省, 喜生于向阳的丘陵及山地, 在广西北部及中部, 无论是“土山”生境还是喀斯特“石山”生境, 在景观上通常能形成以檵木为优势种的天然林斑块, 这尤其对于喀斯特石山生境的植被恢复具有非常重要的意义^[17]。目前, 有关檵木的研究主要为其功能成分研究^[18]、药理价值^[19]、种群空间格局及关联性^[20], 以及檵木群落的土壤生态化学计量学特征^[21]、凋落叶的分解研究^[22]、群落老龄林植物叶性状^[23]等, 而其潜在分布及其与气候的关系研究尚不清楚。因此, 本研究将以檵木为研究对象, 基于最大熵模型 (Maxent) 模拟当代、末次间冰期、末次冰期等不同时期的潜在分布, 研究历史气候变化对檵木分布格局的影响, 揭示檵木对冰期和暖期的响应变化, 对于探讨檵木发挥其生态优势提供现实意义。本研究试图回答以下问题: (1) 气候因子是如何影响檵木的地理分布, 其分布的主导气候因子是什么? (2) 明确檵木的气候适宜性, 划分各等级的潜在适宜级别。(3) 不同时期檵木潜在分布区如何应对气候变化? 这些问题的解决不仅能够为檵木作为优势树种的选择提供有力支撑, 也为石漠化地区生态治理提供理论基础。

1 数据来源及研究方法

1.1 样品数据

檵木地理分布信息: 检索全球生物多样性信息平台 (GBIF) 和中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn/>) 等数据库获得檵木标本的采集地信息, 檵木最新分布点参考中国知网、读秀、万方等国内已公开发表的

论文数据。然后,对这些具体到县的地理信息借助高德拾取器(<https://lbs.amap.com/console/show/picker>)来确定它的地理坐标,并转化为 WGS84 地理坐标^[24]。本研究除去经纬度重复和采集地不详的标本信息,共选取了 227 个櫟木的地理位点。并用 Excel 编辑櫟木现有分布的经纬度信息,格式为.csv;用 ArcGIS 转换图层的格式并剪切需要的区域。

1.2 环境数据

从 WorldClim 数据库(<http://www.worldclim.org>)下载,本文通过 ArcGIS 软件提取了 19 个历史气候数据,其中包括 11 个温度数据和 8 个降雨数据^[25]。它们总体反映了温度及降水的每年每季每月的平均值、最高温、最低温、最大降雨量、最小降雨量等数值(表 1)。

表 1 Maxent 模型中的 19 个环境变量

Table 1 The 19 environmental variables in the Maxent model

变量及描述 Variables and description	单位 Unit
bio1=年平均气温 Annual Mean Temperature	℃
bio2=昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min Temp))	℃
bio3=昼夜温差与年温差百分比 Mean Annual Temperature Range (bio2/bio7) (×100)	%
bio4=温度变化方差 Temperature Seasonality	℃
bio5=极热月份最高温 Max Temperature of Warmest Month	℃
bio6=极冷月份最低温 Min Temperature of Coldest Month	℃
bio7=年温度变化范围 Temperature Annual Range (bio5-bio6)	℃
bio8=雨季均温 Mean Temperature of Wettest Quarter	℃
bio9=极干季度均温 Mean Temperature of Driest Quarter	℃
bio10=极热季度均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	℃
bio11=极冷季度均温 Mean Temperature of Coldest Quarter	℃
bio12=年均降雨量 Annual Precipitation	mm
bio13=极湿月降雨量 Precipitation of Wettest Month	mm
bio14=极干月降雨量 Precipitation of Driest Month	mm
bio15=湿度变化方差 Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	%
bio16=极湿季降雨量 Precipitation of Wettest Quarter	mm
bio17=极干季降雨量 Precipitation of Driest Quarter	mm
bio18=极热季平均降雨量 Precipitation of Warmest Quarter	mm
bio19=极冷季平均降雨量 Precipitation of Coldest Quarter	mm

1.3 地图数据地图数据

中国国界和省级行政区划图矢量底图来源于国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

1.4 研究方法

A. 数据准备: 用 Excel 编辑的物种现有分布的经纬度信息,格式为.csv。

B. 打开 Maxent.bat, 将櫟木的分布点数据和 19 个环境数据导入 MaxEnt 软件,在右下角“Output directory”中设定输出文件夹的位置,文件格式选择.asc。在相关参数设置中,25%是用于验证模型,75%是软件将随机选取,最大迭代次数为 500。为了使运行结果精确性高,次数设置为 10 次。

C. 点击“Run”开始运行,运算完成后会在已设定的输出文件夹中生成多个文件。然后根据文件夹的数据结果进行分析。

通过 Maxent 自身提供的模块,即刀切法测定不同环境变量对櫟木潜在适生区预测的贡献。该方法分别计算模拟 3 个变量的训练得分情况。判定标准为:“仅此变量”时分值比例较高,说明该因子的预测能力精确度较高,对物种分布贡献较大,“除此变量”时的分值比例降低时,说明该变量具有较多的独特信息,对物种分布较为重要。

Maxent 模型采用 ROC(receiver operating characteristic) 曲线分析法对风险预测结果进行精度检验^[26-27]。ROC 曲线的下面积(AUC 值)作为评价模型准确性的指标,该值范围为[0,1],越接近数值 1 表示与随机分布距离越远,获得最大 AUC 值的方案作为推荐的预测研究方案。

2 结果与分析

2.1 全国櫟木的分布图

将 227 个櫟木分布点导入 ArcGIS 生成的地理分布图(图 1),可以看出櫟木样点分布东至浙江、西至四川、南至广西、北至湖北。从标本的分布密度来看,主要集中分布于中国的中部、南方以及西南省市等地区,但这种分布与采集标本的强度、频率和质量是密切相关的,不能反映其客观地理分布格局和可能的潜在分布区域。

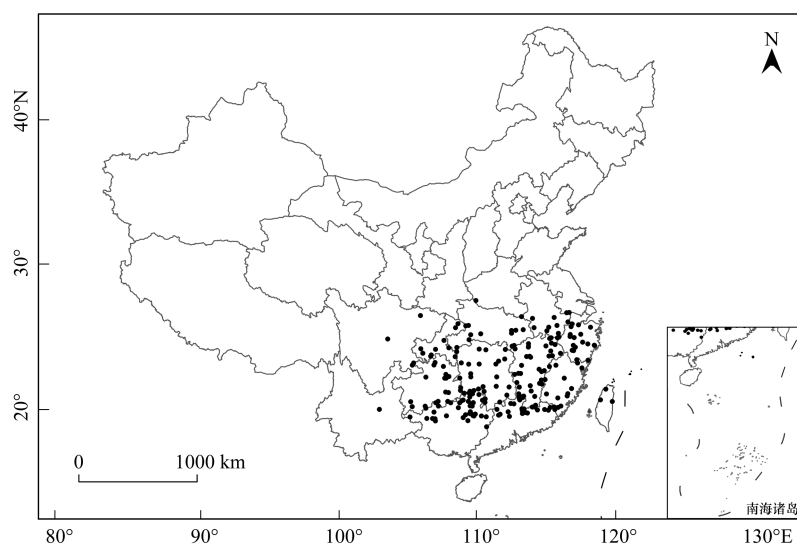


图 1 全国櫟木分布点

Fig.1 The distribution point of *Lorpetalum chinense* in China

2.2 櫟木空间分布格局

櫟木空间分布的经度范围在 102—122° E,分布的平均经度是 113.07° E,标准差是 4.279°;櫟木分布的纬度范围 23—34° N,分布的平均纬度是 27.03° N,标准差是 2.235°(图 2);这表明櫟木在经度分布范围较宽,而纬度分布范围较窄。数据离散程度的变异系数表明经度、纬度的集中程度,变异系数值越小代表稳定性越高(或者不改变性)。经度因子的变异系数值为 0.038,纬度因子的变异系数值为 0.082,即经度因子的稳定性较大,较纬度因子而言,我国櫟木分布格局主要受经度因子的影响。

2.3 降水量分析

根据櫟木物种分布数据和气候因子的描述统计表(表 2),8 个降水量因子变异系数绝对值大小顺序:湿度变化方差(bio15)<年降水量(bio12)<暖季降水量(bio18)<雨季降水量(bio16)<最湿月降水量(bio13)<干季降水量(bio17)<最干月降水量(bio14)<冷季降水量(bio19)。因此,湿度变化方差、年降水量、暖季降水量为限制櫟木分布的主要降水因子。

2.4 温度因子分析

表 1 可知,11 个温度因子中变异系数的绝对值大小顺序:最热月份极高温(bio5)<最热季均温(bio10)<温差日较差值(bio2)<雨季均温(bio8)<年温度较差(bio7)<年均气温(bio1)<昼夜温差与年温差百分比(bio3)<温度变化方差(bio4)<最冷季均温(bio11)<最干季均温(bio9)<最冷月份极低温(bio6)。因此,最热

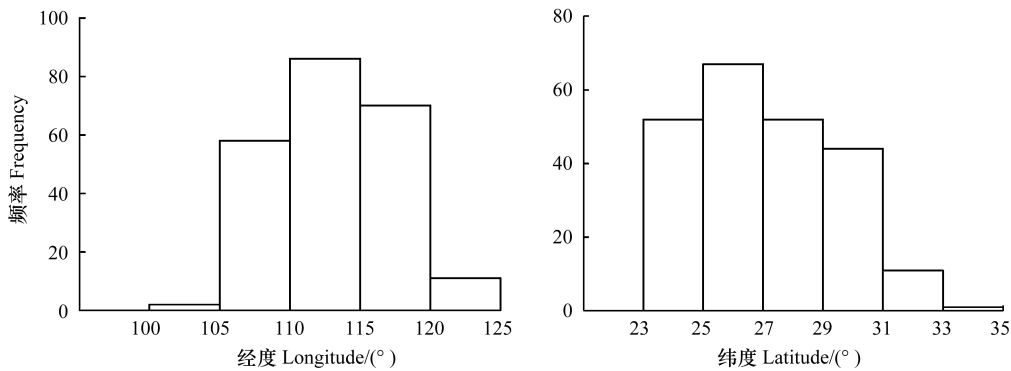


图 2 榿木经度、纬度频率分布

Fig.2 Longitude and latitude frequency distribution of *Lorpetalum chinense*

月份极高温、最热季均温、温差日较差值为限制榿木分布的主要温度因子。

表 2 气候因子的描述统计结果

Table 2 The description of the statistical results of climate factors

气候因子 Climate factor	样本数 Sample point	平均值 Average	标准差 Standard deviation	标准误差 Standard error	极小值 Minimum value	极大值 Maximum value	变异系数 Variable coefficient
bio1/℃	227	17.114	1.879	0.124	10.559	21.283	0.109
bio2/℃	227	7.896	0.651	0.043	5.820	10.143	0.082
bio3/%	227	28.174	3.116	0.206	22.516	41.244	0.111
bio4/℃	227	741.159	95.337	6.327	405.735	913.622	0.129
bio5/℃	227	30.934	1.932	0.128	24.924	34.420	0.062
bio6/℃	227	2.682	2.773	0.184	-4.576	11.147	1.033
bio7/℃	227	28.252	2.968	0.197	16.728	34.375	0.105
bio8/℃	227	22.286	2.112	0.140	16.830	27.261	0.095
bio9/℃	227	9.125	3.178	0.211	1.408	19.534	0.348
bio10/℃	227	25.784	1.669	0.111	19.152	28.398	0.065
bio11/℃	227	7.610	2.545	0.169	1.407	15.376	0.334
bio12/mm	227	1508.317	231.269	15.351	876.000	2693.000	0.153
bio13/mm	227	256.444	45.855	3.043	153.000	405.000	0.179
bio14/mm	227	36.484	12.562	0.833	7.000	143.000	0.344
bio15/%	227	59.636	8.349	0.554	26.2502	96.601	0.139
bio16/mm	227	680.625	113.691	7.545	397.000	1089.000	0.167
bio17/mm	227	136.511	45.799	3.039	25.000	462.000	0.335
bio18/mm	227	564.101	89.621	5.948	368.000	1089.000	0.159
bio19/mm	227	160.555	56.949	3.779	25.000	488.000	0.355

2.5 基于刀切法的环境变量重要性分析

受到极端气候条件影响下,预测物种潜在分布格局的限制更为显著^[11,17],因此,按照影响数值大的气候因子中,择优选择反映极值气候因子的原则。由图 3 可知,用刀切法(Jackknife)检测在基于气候温度、水分等要素所选择的 19 个环境变量对榿木适生性分布的贡献大小。bio14(最干月份降雨量)对应的深蓝条最长,3 个时期预测百分比均达到了 75% 以上,表明它对预测榿木的分布有重要影响。按照气候因子得分值的大小,影响榿木潜在分布的环境因子还包括 bio17(最干季度降雨量),其次为 bio19(最冷季度降雨量),bio15(湿度变化方差),bio2(昼夜温差月均值)。温度的高低和水分的有效性都会影响榿木的生理活动和生化过程。

模型生成的各气候因子响应曲线显示预测分布概率随环境变量的变化趋势,响应曲线反映各环境变量对模型预测的影响。一般认为,当分布概率值>0.5 时,其对应的生态因子的值适合植物生长^[4]。图 4 可见, bio14(最干月降雨量)、bio17(极干季降雨量)、bio19(极冷季平均降雨量)和 bio15(湿度变化方差)的响应曲线均呈单峰曲线,说明榿木对这些环境变量有明显的适应性。bio14(最干月降雨量)小于 15 mm 时,榿木分布概率几乎为零;降雨量大于 15 mm 分布概率急剧上升,降雨量约 45 mm 时,分布概率达到峰值,此时降雨量范围是榿木最适的生存条件。随后分布概率又急剧降低,当降雨量达到 170 mm 左右时,分布概率几乎减小为 0。当分布概率>0.5 时称为生存概率,即生存概率在 0.5—1 之间为适生范围,榿木最干月降雨量的适应范围约为 23—93 mm。除 bio14 外,对当代榿木生态适宜区预测贡献最大 bio17(极干季降雨量),降雨量达到 160 mm 时,分布概率达到峰值,此时降雨量达到榿木最适生存条件;若以生存概率>0.5 适应范围,降雨量的适应范围约 98—300 mm。bio19(极冷季平均降雨量)在 200 mm 时达到峰值,为榿木最适的生存条件;若以生存概率>0.5 为适应范围,降雨量的适应范围约 110—350 mm。bio15(湿度变化方差)湿度范围在 52%时达到峰值;生存概率>0.5 为适应范围,湿度变化方差范围在 42%—65%。

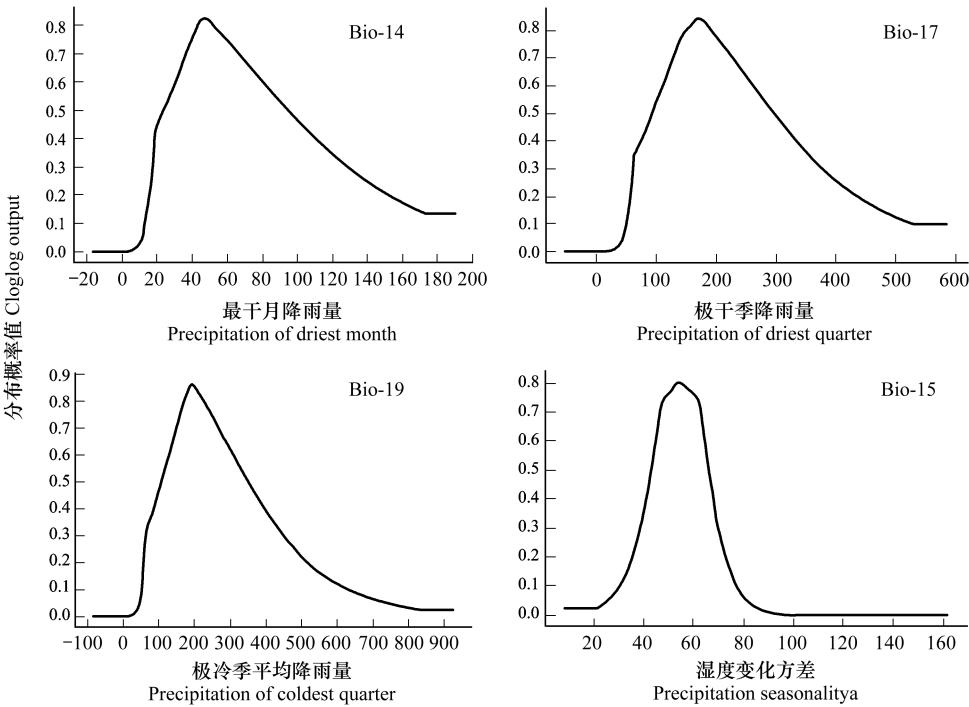


图 4 主要气候因子的响应曲线
Fig.4 Response curves of major climate factors

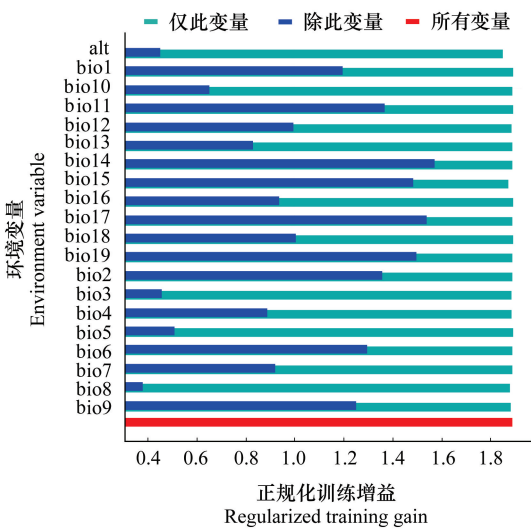


图 3 刀切法检测主要环境变量对榿木在中国分布影响的重要程度
Fig.3 Importance of major environmental variables on distribution of *Loropetalum chinense* in China by Jackknife test
bio1: 年平均气温; bio2: 昼夜温差月均值; bio3: 昼夜温差与年温差百分比; bio4: 温度变化方差; bio5: 极热月份最高温; bio6: 极冷月份最低温; bio7: 年温度变化范围; bio8: 雨季均温; bio9: 极干季度均温; bio10: 极热季度均温; bio11: 极冷季度均温; bio12: 年均降雨量; bio13: 极湿月降雨量; bio14: 极干月降雨量; bio15: 湿度变化方差; bio16: 极湿季降雨量; bio17: 极干季降雨量; bio18: 极热季平均降雨量; bio19: 极冷季平均降雨量; Alt: 海拔

2.6 模型评估

从 Maxent 软件输出的遗漏率、发生概率与累积阈值关系函数图(图 5)中可以看出测试集遗漏率与预测遗漏率基本吻合,说明模型与训练数据的拟合越好,测试数据和培训数据是独立的。

基于最大熵模型,对中国地区金缕梅科櫟木在末次冰期(LGM)、末次间冰期(LIG)和当代这 3 个不同时期的潜在分布区进行了模拟,结果如图 6 所示。在所有模拟过程中,训练集和验证集 AUC 数值分别为 0.947 和 0.954,模拟结果数值大于随机模型数值(0.5),说明投影分布与所收集数据吻合。

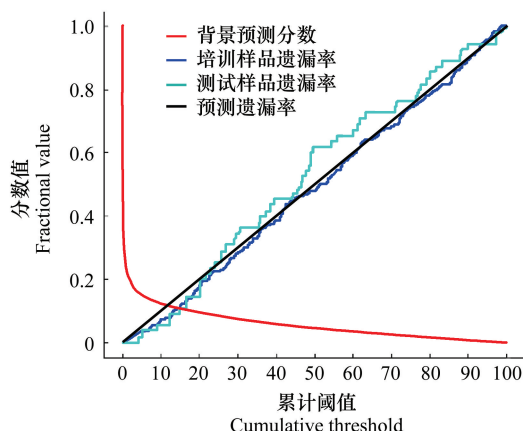


图 5 测试集遗漏率

Fig.5 Omission on test sample

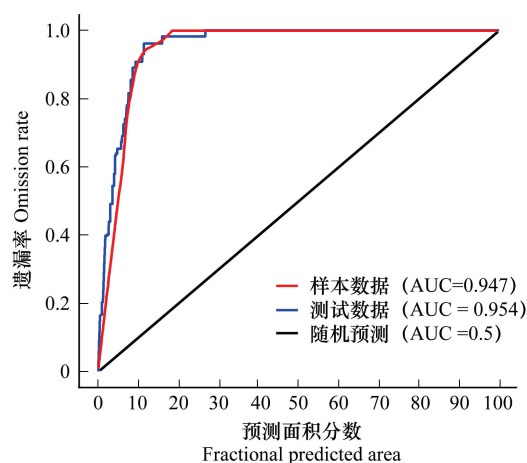


图 6 櫟木预测结果 AUC 图

Fig.6 *Lorpetalum chinense* prediction the result of AUC chart

AUC: 曲线下的面积 Area Under Curve

2.7 櫟木分布格局模拟分析

櫟木适生等级划分应用 ArcGIS 软件将 MaxEnt 软件输出的 ASC II 格式文件转为 Raster 格式文件,利用 ArcGIS 的统计分析功能计算在各等级的分布面积^[8, 28]。MaxEnt 模型默认适生等级为 10 级,根据櫟木在全国的实际分布情况,利用 ArcGIS 的“重分类工具”将櫟木的生境适宜性按照“自然间断点分级法”划分为 4 个等级^[29]: 不适生区: $P < 0.23$; 低适生区: $0.23 \leq P < 0.54$; 中适生区: $0.54 \leq P < 0.85$; 高适生区: $0.85 \leq P < 1$ 。

在 LIG 时期,櫟木总面积为 43.48 万 km^2 , 占国土总面积的 4.53% (表 3), 其中高、中、低度适生区总面积分别是 0.56 万 km^2 , 3.51 万 km^2 , 39.41 万 km^2 , 占全国总面积的 0.05%、0.37% 和 4.1%。分布区主要在广西、广东、福建浙江南部以及台湾北部区域,櫟木的高度适生区集中在台湾北部、中适生区分布于福建东南部(图 7)。与当代和 LGM 时期相比, LIG 时期适生区向南移,有明显的收缩以及片段化现象,适生区总面积占比最小。

末次冰期 LGM, 櫟木的潜在地理分布区总面积为 153.76 万 km^2 , 占国土总面积的 16.01%。其中中、低度适生区总面积分别是 103.83 万 km^2 , 49.93 万 km^2 , 占全国总面积的 10.82% 和 5.2% (表 3)。见图 8 可知櫟木中适生区的区域主要集中分布在福建、浙江南部、重庆西部、贵州东部、湖南南部以及江西有零星分布。末次

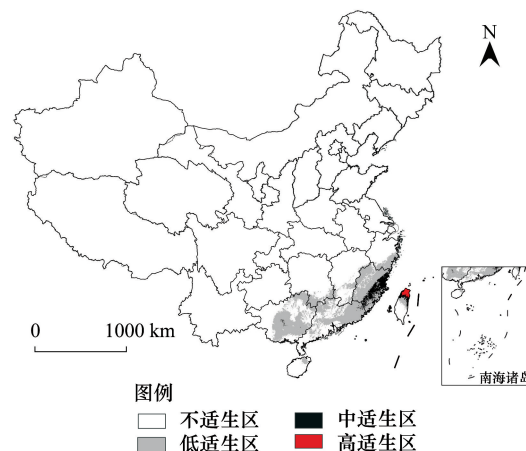


图 7 LIG 时期櫟木在中国的潜在地理分布图

Fig.7 LIG period potential geographical distribution of *Lorpetalum chinense* in China

LIG: 末次间冰期 last interglacial

冰期(LGM)没有明显的高适宜区分布,低适生区占比最大。相比末次间冰期,櫟木在 LGM 时期的潜在分布区向北迁移。

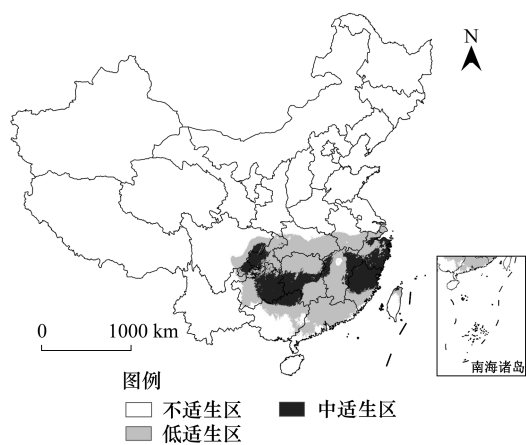


图 8 LGM(末次冰期)櫟木在中国的潜在地理分布图
Fig. 8 LGM period potential geographical distribution of *Loropetalum chinense* in ChinaLGM: 末次冰期 last glacial maximum

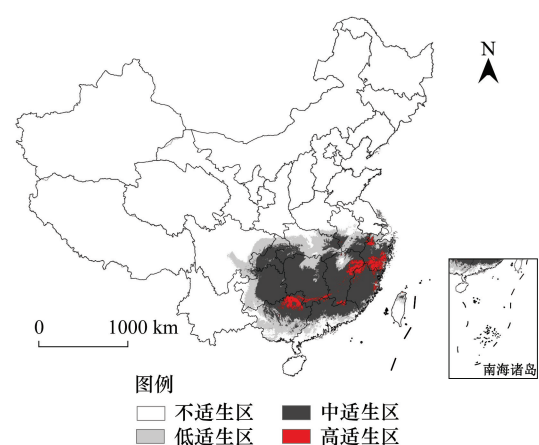


图 9 当前气候条件下櫟木在中国的潜在地理分布图
Fig.9 Current potential geographical distribution of *Loropetalum chinense* in China

表 3 当前、LIG、LGM 櫟木在我国的适生面积

Table 3 Projected suitable area of <i>Loropetalum chinense</i> in China						
适生程度 Degree of fitness	末次盛冰期 LGM/ ($\times 10^4$ km ²)	末次间冰期 LIG/ ($\times 10^4$ km ²)	当代 Current/ ($\times 10^4$ km ²)	末次盛冰期 LGM/%	末次间冰期 LIG/%	当代 Current/%
低适生区 Low suitable area	103.83	39.41	51.79	10.82	4.11	5.39
中适生区 Medium suitable area	49.93	3.51	102.4	5.2	0.37	10.67
高适生区 High suitable area	0	0.56	8.36	0	0.05	0.87
适生区总面积 Total area of suitable area	153.76	43.48	162.55			
适生区面积比例 Proportion of suitable area				16.01	4.53	16.93

LIG: 末次间冰期 last interglacial; LGM: 末次冰期 last glacial maximum

当代我国櫟木的潜在地理分布主要在北回归线以北的区域,总面积为 162.55 万 km², 占国土总面积的 16.93%, 其中高、中、低度适生区总面积分别是 8.36 万 km², 102.4 万 km², 51.79 万 km², 占全国总面积的 0.87%、10.67% 和 5.39%(表 3)。高度适生区主要分布于广西北部、江西东部、以及湖南省南部、福建东部等地区。低度适生区主要分布于湖北、贵州西部、四川南部、广西南部、安徽南部。中度适生区主要分布于重庆、贵州、湖南、广东、江西、福建以及湖南东部(图 7)。当代适生区总面积相比于 LIG, LGM 两个时期的潜在分布区总面积有明显扩增的现象。在气候变暖的条件下,櫟木适生区域增大,适生程度也有所提高。

3 结论与讨论

已有的关于櫟木生境及适宜性的研究,地域记载于 1979 年《中国植物志》北回归以南未见踪迹,根据全球生物多样性信息平台和中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)等数据库获得当代櫟木标本的采集地信息,预测结果表明:櫟木当代主要分布区为江西、贵州、四川、重庆、安徽、湖南、广西、广东、福建等地区,集中在亚热带季风性湿润性气候,因而具有连续性的分布特性,这与櫟木阳性喜光、喜温暖、湿润的微酸性土壤

等环境需求一致^[9]。榿木经度分布点范围在 102°—123°E、纬度分布点范围在 23°—34°N,与中国植物志中对该物种的分布范围描述基本一致^[30]。

通过 AUC 检验的结果,可以看出 Maxent 模型对榿木的预测结果是比较可靠的,Maxent 模型是基于当前存在数据进行分析的模型,模型结果可用于当前存在的榿木种群。全国尺度下对榿木适宜性分布的主导环境因子有最干月份平均降雨量、极干季降雨量、极冷季平均降雨量、湿度变化方差,其中降水因子起主导作用。本研究表明,分布区降水变化特征可作为研究榿木生态学特征的重要气候因素。从 4 项环境因子的适宜范围可知,榿木适宜生长在湿润的环境中^[9]。洪文君等的研究发现,榿木具有较强的适应性以及耐阴性特征、自身对水分条件有较高的依赖性是一致的^[31]。基于 Maxent 模型得出的榿木潜在分布区域均具有相似的气候特点,作为生态恢复力较强的物种^[12],可为分布区进行植被恢复时提供树种选择。

末次间冰期与末次冰期榿木适宜性划分发现:LGM 时期适宜区的分布明显发生了北移,有分布扩增的现象,与方炎明等研究的变迁分析表明:末次间冰期开始转暖,气候的波动影响植被带的迁移,降雨量增多,植被带呈现北移状态的结果是一致的^[32]。Maxent 模型对榿木在间冰期至当代的适生区进行预测时发现,其高适生区范围向南进行扩张。与 Gong 等研究的中国亚热带常绿阔叶林中的榿木的种群模拟,表明气候变化导致亚热带植被物种的地理分布发生南移的结果是一致的^[33],在喀斯特地貌石漠化恢复过程中,榿木具备适应资源贫瘠的能力和较高的生产力,属于优势种和先锋种^[34]。有助于改善初期的生态环境,为石漠化地区进行植被恢复提供理论依据。因此需要相关部门紧密配合,加强榿木的保护和推广工作。

参考文献 (References):

- [1] 安芷生, 艾莉. 尚未完成的地质年代代表——第四纪悬而未决的前程. 地层学杂志, 2005, 29(2): 99-103.
- [2] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843-852.
- [3] Xu D P, Zhuo Z H, Wang R L, Ye M, Pu B. Modeling the distribution of *Zanthoxylum armatum* in China with Maxent modeling. Global Ecology and Conservation, 2019, 19: e00691.
- [4] 贾翔, 王超, 金慧, 赵莹, 刘丽杰, 陈庆红, 李冰岩, 肖影, 尹航. 基于优化的 Maxent 模型评价红松适宜分布区. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2570-2576.
- [5] 王茹琳, 王明田, 罗家栋, 刘原, 吴世权, 文刚, 李庆. 基于 Maxent 模型的美味猕猴桃在中国气候适宜性分析. 云南农业大学学报: 自然科学, 2019, 34(3): 522-531.
- [6] 郭燕青, 史梦竹, 李建宇, 傅建伟, 吴梅香. 基于 Maxent 模型的假臭草潜在分布区预测. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(3): 250-260.
- [7] 李望军, 冯图, 周瑞伍, 何斌, 崔涛, 邓芳芳, 彭明春. 基于 Maxent 模型的贵州省天然黄杉林的潜在分布预测研究. 西部林业科学, 2019, 48(3): 47-52.
- [8] 张丹华, 胡远满, 刘森. 基于 Maxent 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2329-2337.
- [9] 孟艺宏, 徐璟, 姜小龙, 徐刚标. 双花木属植物潜在分布区模拟与分析. 生态学报, 2019, 39(8): 2816-2825.
- [10] 张志耘, 路安民. 金缕梅科: 地理分布、化石历史和起源. 植物分类学报, 1995, 33(4): 313-339.
- [11] 邹旭, 彭冶, 王璐, 李垚, 张往祥, 刘雪. 末次盛冰期以来气候变化对中国山荆子分布格局的影响. 植物科学学报, 2018, 36(5): 676-686.
- [12] 张爱平, 王毅, 熊勤犁, 伍小刚, 孙晓铭, 黄艳蒙, 张林, 潘开文. 末次间冰期以来 3 种云杉属植物的历史分布变迁及避难所. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2411-2421.
- [13] 李小强, 赵超, 周新郢. 末次盛冰期以来中国东北地区特征时期植被格局. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(8): 1213-1230.
- [14] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. 林业科学, 2018, 54(8): 153-164.
- [15] Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, Riofrío-Dillon G, De Ruffray P, Vidal C, Pierrat J C, Gégout J C. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. Nature, 2011, 479(7374): 517-520.
- [16] 王勇, 甄爱国, 朱旺新. 吴家山森林公园野生榿木开发与利用. 湖北林业科技, 2018, 47(2): 77-79.
- [17] 马姜明, 吴蒙, 占婷婷, 梁士楚. 漓江流域岩溶区榿木群落不同恢复阶段物种组成及多样性变化. 生态环境学报, 2013, 22(1): 66-71.
- [18] 任轶林, 于晓英, 符红艳, 史爱琴. 榿木属植物主要功能成分研究进展. 湖南农业科学, 2013, (15): 41-43.
- [19] 周璟, 王耀晟, 吴宗贵. 榿木药用价值研究概述. 中华中医药杂志, 2014, 29(7): 2283-2286.
- [20] 涂洪润, 李娇凤, 刘润红, 梁士楚, 兰泽南, 章欣仪, 康馨丹, 姜勇. 桂林岩溶石山榿木种群空间格局及其关联性. 应用生态学报, 2019,

- 30(8): 2621-2630.
- [21] 梁月明, 李强, 潘复静. 岩溶区不同恢复阶段灌木根际土壤生态化学计量学特征. 水土保持通报, 2017, 37(5): 123-127.
- [22] 涂春艳, 黄炳惠, 杨慧, 白冰, 莫碧琴, 曹建华. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区灌木和马尾松凋落叶分解研究. 中国岩溶, 2018, 37(3): 379-387.
- [23] 莫燕华, 马姜明, 苏静, 秦佳双, 潘小梅, 菅瑞. 桂林岩溶石山灌木群落老龄林植物叶性状. 广西植物, 2019, 39(8): 1059-1068.
- [24] 董光, 何兰, 程武学. 基于 MaxEnt 和 GIS 技术的桔梗适宜性分布区划研究. 中药材, 2019, 42(1): 66-70.
- [25] 陈积山, 刘杰淋, 朱瑞芬, 李信恺, 邸桂俐, 张强, 毛东杰, 孔晓蕾. 基于 MaxEnt 分析我国羊草分布区的生物气候特征. 草地学报, 2019, 27(1): 35-42.
- [26] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. Global Change Biology, 2011, 17(1): 377-399.
- [27] 李振华, 王艳芳, 伊勒泰, 张艾华, 任凯, 张春红, 毕雅琼, 李旻辉. 阿拉善地区荒漠肉苁蓉生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2015, 40(5): 785-792.
- [28] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [29] 王晓娟, 王光剑, 马光良, 陈洪. 基于 GIS 和 MaxEnt 模型的合江方竹中国潜在分布区预测. 世界竹藤通讯, 2019, 17(5): 9-15, 26-26.
- [30] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1993: 116-117.
- [31] 洪文君, 黄久香, 申长青, 许建新, 庄雪影. 3 种灌木属植物结构解剖及环境适应性评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 61-66.
- [32] 方炎明, 王挺, 张金池. 京杭大运河沿线第四纪植被变迁分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 109-115.
- [33] Gong W, Liu W Z, Gu L, Kaneko S, Koch M A, Zhang D X. From glacial refugia to wide distribution range: demographic expansion of *Loropetalum chinense* (Hamamelidaceae) in Chinese subtropical evergreen broadleaved forest. Organisms Diversity & Evolution, 2016, 16(1): 23-38.
- [34] Avolio M L, Forrester E J, Chang C C, La Pierre K J, Burghardt K T, Smith M D. Demystifying dominant species. New Phytologist, 2019, 223(3): 1106-1126.