

基于MaxEnt和ArcGIS对珍贵树种红锥适生区与主导环境因子分析*

徐 放 杨晓慧 潘 文 廖焕琴
张卫华 杨会肖 陈新宇 叶龙华

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 红锥 *Castanopsis hystrix* 是我国华南地区重要的珍贵树种, 研究红锥自然分布与环境因子之间的关系, 对红锥未来的推广具有重要的参考价值。依据数据库及实地调查获得的 256 个有效红锥分布样点和 21 个环境数据, 应用最大熵模型 (MaxEnt) 和 ArcGIS 软件对红锥适生区影响因素和空间分布进行分析。结果表明: 15 次 MaxEnt 模拟的训练数据和测试数据的 AUC 平均值分别为 0.990 和 0.987, 表明结果较为准确, 具有很高的参考价值。红锥在全国的适生区主要在广东省、广西壮族自治区、台湾省和四川盆地、湖南省南部、重庆市中部、云南省南部和西藏自治区雅鲁藏布江峡谷以南地区, 总面积为 49.44 万 km²。适生区和边缘适生区主要分布在高适生区的外围, 以上区域与红锥天然分布区域基本吻合。模拟结果显示最暖月降水量、最冷月平均气温和年平均降水量是影响红锥分布的主要环境因子, 最暖月降水量在 500 mm 以上、最冷月平均气温 0 ℃ 以上、年平均降水量 1 500~2 500 mm 的地区最适合红锥的生长, 可以开展大规模的推广, 边缘适生区可以尝试开展引种试验。

关键词 最大熵模型; 红锥; 适生区; 环境因子

中图分类号: S722.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 05-0029-09

Prediction of Potential Suitable Distribution Areas and Analysis of Dominant Environmental Factors of *Castanopsis hystrix* Based on MaxEnt Model and ArcGIS

XU Fang YANG Xiaohui PAN Wen LIAO Huangqin
ZHANG Weihua YANG Huixiao CHEN Xinyu YE Longhua

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract *Castanopsis hystrix* is an important and precious tree species in South China. Studying the relationship between the natural distribution and environment factors would provide important reference for the future promotion of *C. hystrix*. Based on the 256 distribution locations and 26 environmental data obtained from the database and field survey, the maximum entropy model (MaxEnt) and ArcGIS software were used to analyze the influence factors and spatial distribution of the suitable distribution area. The results show that the average AUC of the training set and test set of 15 MaxEnt simulations are 0.990 and 0.987, respectively, indicating that the simulations are relatively accurate and have high reference value. The suitable distribution areas for *C.*

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2018KJCX007)。

第一作者: 徐放 (1987—), 男, 副研究员, 主要从事红锥新品种选育与高效栽培研究, E-mail: xufang@sinogaf.cn。

hystrix in China are mainly in Guangdong, Guangxi, Taiwan and the Sichuan Basin, southern Hunan, central Chongqing, southern Yunnan and the area south of the Yarlung Zangbo River Gorge in Tibet, with a total area over 494 400 km². The suitable distribution areas and marginal suitable distribution areas are mainly distributed in the periphery of the highly suitable distribution areas, and the above areas are basically consistent with the natural distribution areas of *C. hystrix*. The simulation results show that the warmest month's precipitation, the coldest month's average temperature, and the annual average precipitation are the main environmental factors affecting the distribution of *C. hystrix*. The warmest month's precipitation above 500 mm, the coldest month's average temperature above 0 °C, and the annual average areas with a rainfall of 1 500-2 500 mm are most suitable for the growth of *C. hystrix*, and large-scale promotion can be carried out in these area. In the marginal suitable distribution areas, introduction experiments can be tried.

Key words MaxEnt; *Castanopsis hystrix*; suitable distribution areas; environmental factors

红锥 *Castanopsis hystrix* 是我国南方地区重要的珍贵树种, 主干通直、材质坚硬耐腐, 可作为优良的锯材使用, 培育周期远小于楠木 *Phoebe zhen-nan*、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 等珍贵树种, 2017 年被列入《中国主要栽培珍贵树种参考名录》^[1]。另外, 其种子富含淀粉, 凋落物丰富, 可以很好的为动物提供食物并改良土壤和涵养水源, 有利于维系森林生态稳定, 提升生物多样性^[2-4]。可以作为纯林造林, 亦可与杉木 *Cunninghamia lanceolata*、湿地松 *Pinus elliottii*、火力楠 *Michelia macclurei*、木荷 *Schima superba* 等树种进行混交, 其生长均可保持良好的状态, 是当前华南地区生态公益林营建和残次林改造的重要树种^[5-7]。我国红锥资源较为丰富, 但从上世纪 30 年代起, 大量红锥林地遭到砍伐, 造成了自然资源的损失和森林生态的破坏。因此, 在适宜的区域大面积推广红锥种植, 对提升林地生态功能, 增加我国珍贵树种用材战略储备具有重要的意义。

物种的地理分布与空间格局, 是该物种对环境因子长期作用的结果, 是物种的重要特征, 也是植物生态学的重要研究领域^[8-11]。基于环境因子对物种的适生区域进行推断是对物种保护、引种和利用的重要前提。目前红锥相关研究大多集中于新品种选育^[12]、组培繁育^[13]、遗传多样性分析^[14]、高效栽培^[15]和生态功能^[16]等方面, 适生栽培区划相关研究尚未开展。红锥自然分布区遍布华南地区, 西藏林芝地区亦有天然分布。物种分布模型 (SDMs) 是根据物种现有分布信息和环境因子信息, 通过特定算法计算出二者关系, 从而推算该物种可能的分布区域^[17-19]。目前

物种分布预测已经发展出多种模型, 主要有 BIO-CLIM^[20]、GARP^[21]、CLIMEX^[22] 和 DOMAIN^[23] 等, 近年来基于最大熵模型的 MaxEnt (Maximum entropy) 方法被广泛应用于分布区的分析中^[24], 该方法已经被证明相较于其他模型具有更高的精确性, 且可以更灵活的设置约束条件, 在小样本情况下具有更明显的优势^[25]。以往类似研究中, 各物种来源大多使用中国数字植物标本馆、全球生物多样性信息网络等数据库中的标本采样位置, 本研究增加了近 20 年来本研究团队进行采样的地点, 具有更高的参考价值 and 可信度。

本研究在整合各数据库内信息与实地调查数据的基础上, 应用 MaxEnt 模型与 ArcGIS 软件对红锥的适生区域进行模拟, 解析影响红锥分布的关键环境因子, 并进一步分析适生区的环境特征, 以期对红锥的保护、引种和高效栽培提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 红锥分布数据来源与处理

本研究红锥分布点来源为两部分, 其中数据库来源为全球生物多样性信息平台 GBIF, <http://www.gbif.org/>, 中国数字植物标本馆 (CVH, <http://www.cvh.org.cn/cms/>) 和中国自然保护区资源平台 (<http://www.papc.cn/>), 在 3 个数据库中共收集到 869 条分布数据; 同时加入本研究团队自 1999 年起实地调查广东省、广西壮族自治区、云南省、湖南省、海南省、福建省等 6 个地区红锥天然林分布数据共计 85 条。为了避免相同环境的过度拟合, 参照许斌等^[26]的方法, 在 1 km 的环境网格

数据中至保留 1 个分布点，最终共获得 256 个有效红锥分布点，其中 204 个样点分布在中国，另有 52 个分布点位于印度尼西亚、越南、缅甸、柬埔寨等东南亚国家。

1.2 环境因子数据

选择 WorldClim (www.worldclim.org) 数据库中 1970—2000 年 19 个气候因子平均数据集、光照强度、风速、水汽压与海拔数据 (表 1)，共计 26 个环境因子。在 ArcGIS 中将环境因子的 tiff 文件转化为 bil 格式，为了避免环境因子过多导致拟合的准确性降低，先利用现有分布数据 (25 % 作为测试集，75 % 作为训练集) 在 MaxEnt 3.4.1 软件下运行，利用 Jackknife 法检验各环境因子对适生区预测的贡献率。考虑到变量的独立性，利用 AcrGIS 10.8 软件中的波段集统计 (Band collection statistics) 工具分析各个气候因子的相关性，获得 26 个环境因子的相关系数矩阵，对相关系数大于 0.8 的两个变量，根据前述贡献率计算结果，剔除贡献率较低的环境因子，最终保留年平均温度 (bio01)、昼夜温差月均值 (bio02)、最冷月最低气温 (bio06)、年温度变化范围 (bio07)、年均降水量 (bio12)、最干月降水量 (bio14)、最暖季度平均降水量 (bio18)、海拔 (ele)、最冷月光照 (srad_c)、最热月光照 (srad_h) 共计 10 个环境因

子预测红锥的适生区。

1.3 MaxEnt 模型模拟

以 MaxEnt 软件计算出的 ROC (Receiver operating characteristic curve) 曲线下方面积 AUC (Area under curve) 值评估模型的预测精度，认为 AUC 值大于 0.9 时，模型估计较为准确。在运算中设置 25 % 的分布点为测试集，剩余的 75 % 分布点为训练集，为提升运算结果的准确性，重复 15 次运算，随机测试百分比设定为 25 %，其余使用默认数值进行运算，获得的 ASC 栅格图层导入 ArcGIS 软件即获得适生概率。根据模型预测出的红锥的适生概率 (P)，将预测结果分为 5 个等级，(1) 不适生区 ($P \leq 0.1$)，(2) 低适生区 ($0.1 < P \leq 0.3$)，(3) 边缘适生区 ($0.3 < P \leq 0.5$)，(4) 适生区 ($0.5 < P \leq 0.7$)，(5) 高适生区 ($0.7 < P \leq 1$) [27]。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型精准度评估

15 次模拟的 AUC 值分布情况见图 1，训练数据的平均值为 0.990，测试数据的平均值为 0.987，说明采用 MaxEnt 模型具有很好的预测精度。选取 15 次模拟中每组训练数据 AUC $\times$ 75%+ 测试数据 AUC $\times$ 25% 所得值最大的一组作为分析对象得出

表 1 研究中选取的环境因子
Table 1 Environmental factors involved in the study

环境因子 Environment factors	单位 Unit	环境因子 Environment factors	单位 Unit
年平均温度 (bio01)	℃	最干月份降水量 (bio14)	mm
昼夜温差月均值 (bio02)	℃	雨量变化方差 (bio15)	/
昼夜温差与年温差比值 (bio02/bio07 $\times$ 100)(bio03)	/	最湿季度降水量 (bio16)	mm
温度变化方差 (bio04)	/	最干季度降水量 (bio17)	mm
最热月份最高温 (bio05)	℃	最暖季度平均降水量 (bio18)	mm
最冷月份最低温 (bio06)	℃	最冷季度平均降水量 (bio19)	mm
年温度变化范围 (bio05-bio06)(bio07)	℃	海拔 (ele)	m
最湿季度平均温度 (bio08)	℃	最冷月太阳辐射 (srad01)	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$
最干季度平均温度 (bio09)	℃	最热月太阳辐射 (srad07)	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$
最暖季度平均温度 (bio10)	℃	最冷月水汽压 (varp01)	kPa
最冷季度平均温度 (bio11)	℃	最热月水汽压 (varp07)	kPa
年平均降水量 (bio12)	mm	最冷月平均风速 (wind01)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
最湿月份降水量 (bio13)	mm	最热月平均风速 (wind07)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

第 8 次模拟的 AUC 最大, 其训练集的 AUC 值为 0.990, 测试集的值 0.992 (表 2)。

2.2 适生区预测结果

由图 2 可知红锥在我国的高适生区主要分布在广东省、广西壮族自治区、台湾省全境和云南南部、贵州西南部、福建东部、海南中部、四川盆地、重庆中部、雅鲁藏布江峡谷南部, 另外在安徽南部和浙江南部有零星高适生区分布。在高适生区外围, 依次分布适生区、边缘适生区和低适生区。利用 ArcGIS 软件计算出我国境内红锥高适生区面积约为 49.44 万 km^2 , 适生区面积, 其高

适生区、适生区和边缘适生区的范围也与数据库中红锥的自然分布区基本一致, 也从另一个方面证明了模型的准确性。

2.3 MaxEnt 模型中各环境因子的贡献率

利用刀切法对各环境变量对红锥分布的贡献率进行分析, 其中对红锥分布贡献率最高的 3 个环境变量分别为最暖季度平均降水量 (bio18)、最冷月份最低温 (bio06) 和年平均降水量 (bio12), 3 个环境变量的贡献率分别为 51.2%、20.1% 和 17.0%。其他环境变量对分布的贡献率均在 4.4% 以下 (表 3)。

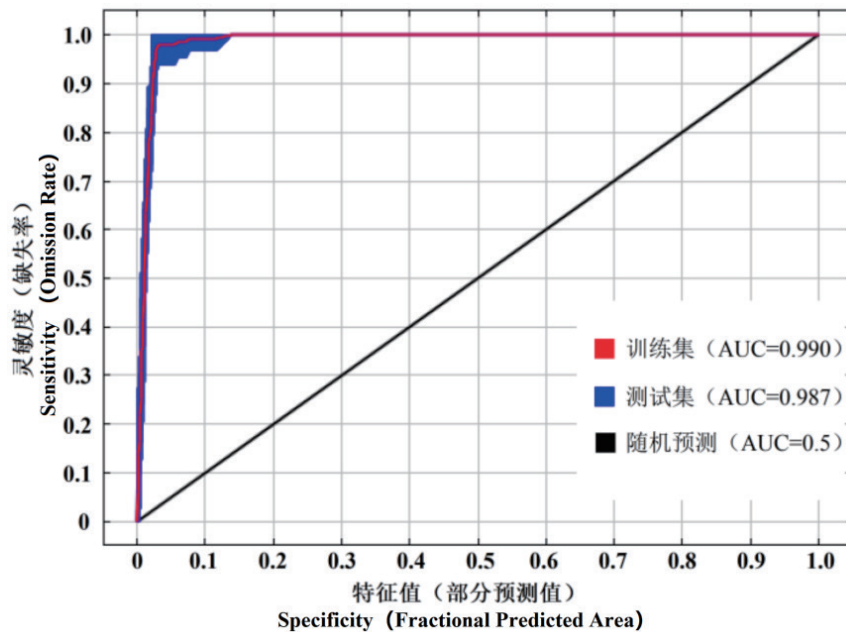


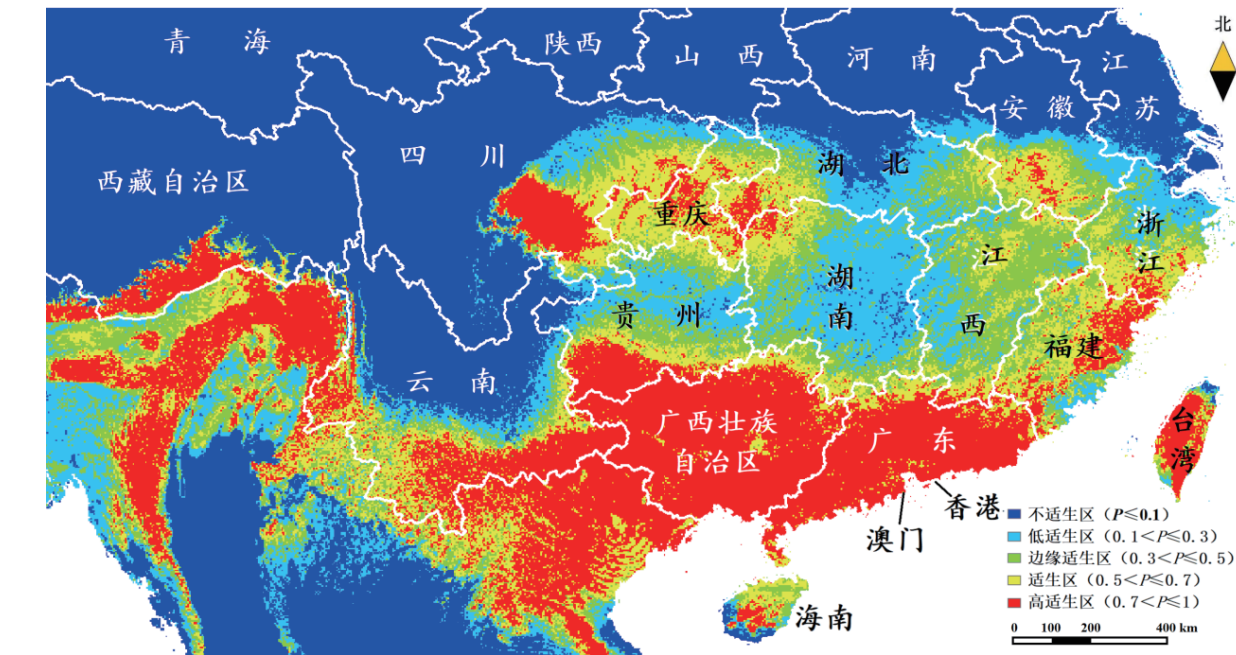
图 1 MaxEnt 模型预测的 ROC 曲线

Figure 1 Predicted ROC curve in MaxEnt model

表 2 15 次模拟获得的训练数据和测试数据的 AUC 值

Table 2 AUC values of training data and test data obtained by 15 simulations

次数 No.	训练数据 Training data	测试数据 Test data	次数 No.	训练数据 Training data	测试数据 Test data
1	0.990 4	0.986 8	9	0.990 1	0.990 7
2	0.990 1	0.991 0	10	0.990 3	0.980 7
3	0.990 2	0.979 4	11	0.990 2	0.989 0
4	0.990 2	0.990 5	12	0.990 1	0.987 6
5	0.990 1	0.989 7	13	0.990 2	0.987 9
6	0.990 2	0.989 2	14	0.990 1	0.988 0
7	0.990 3	0.985 4	15	0.990 4	0.983 7
8	0.990 2	0.992 1	均值	0.990 0	0.987 0



注：P 为适生概率。
Note: P indicates probability of fit.

图 2 红锥在我国的适生区分布
Figure 2 Potential distribution of *C. hystrix* in China

表 3 10 个环境因子对红锥分布的贡献率
Table 3 The contribution rate of 10 environmental factors to the distribution of *C. hystrix*

环境变量 Environment variable	贡献率 /% Contribution rate
最暖季度平均降水量 (bio18)	51.2
最冷月份最低温 (bio06)	20.1
年平均降水量 (bio12)	17.0
昼夜温差月均值 (bio02)	4.4
最干月份降水量 (bio14)	3.4
年平均温度 (bio01)	2.2
年温度变化范围 (bio07)	1.0
最冷月太阳辐射	0.4
最热月太阳辐射	0.2
海拔	0.1

2.4 红锥分布对各环境变量的响应

MaxEnt 模拟结果中的响应曲线可以量化环境变量和该物种适宜栖息地的分布，并获取该物种最佳生长环境阈值信息。本研究选取最暖季度平均降水量 (bio18)、最冷月份最低温 (bio06) 和年平均降水量 (bio12) 3 个环境变量进行分析。图中横坐标为环境变量的数值，纵坐标为此环境

变量下红锥分布出现的逻辑斯蒂值（分布概率），其数值的高低反映了此条件下红锥的适生性。由图 3 可见，最暖季平均降水量达到 500 mm 以上时，分布概率提升，总体呈现“S”型增长（图 3a）。红锥在最冷月气温 0~15℃ 的条件下呈现了较高的分布概率 (>0.4)，最冷月平均气温为 10℃ 时分布概率最高 (0.87)，而在最冷月平均气温大于 15℃ 时，分布概率急剧下降，在最冷月平均气温 25℃ 以上时分布概率降为 0（图 3b）。而年均降水在 1 000 mm 以上时，分布概率明显上升，年均降水量 1 500~2 500 mm 时分布概率达到最大，而在年均降水量达到 2 500 mm 以上时分布概率呈现逐步下降的趋势（图 3c）。

3 结论与讨论

以往大多适生区模拟研究中，分布数据取自各电子标本数据库，此类数据来源方便，本研究加入了研究团队对红锥主要分布区 6 个省分实地调查的数据，可以提升模拟的准确性。本研究中 15 次 MaxEnt 模拟的结果显示其测试集的平均 AUC 值达到 0.987，高于同类研究中通常使用的 0.9 的阈值 [25, 28-30]，也证明了该模型具有很好的模拟效果，适生度 $P>0.3$ 的区域与红锥自然分布区

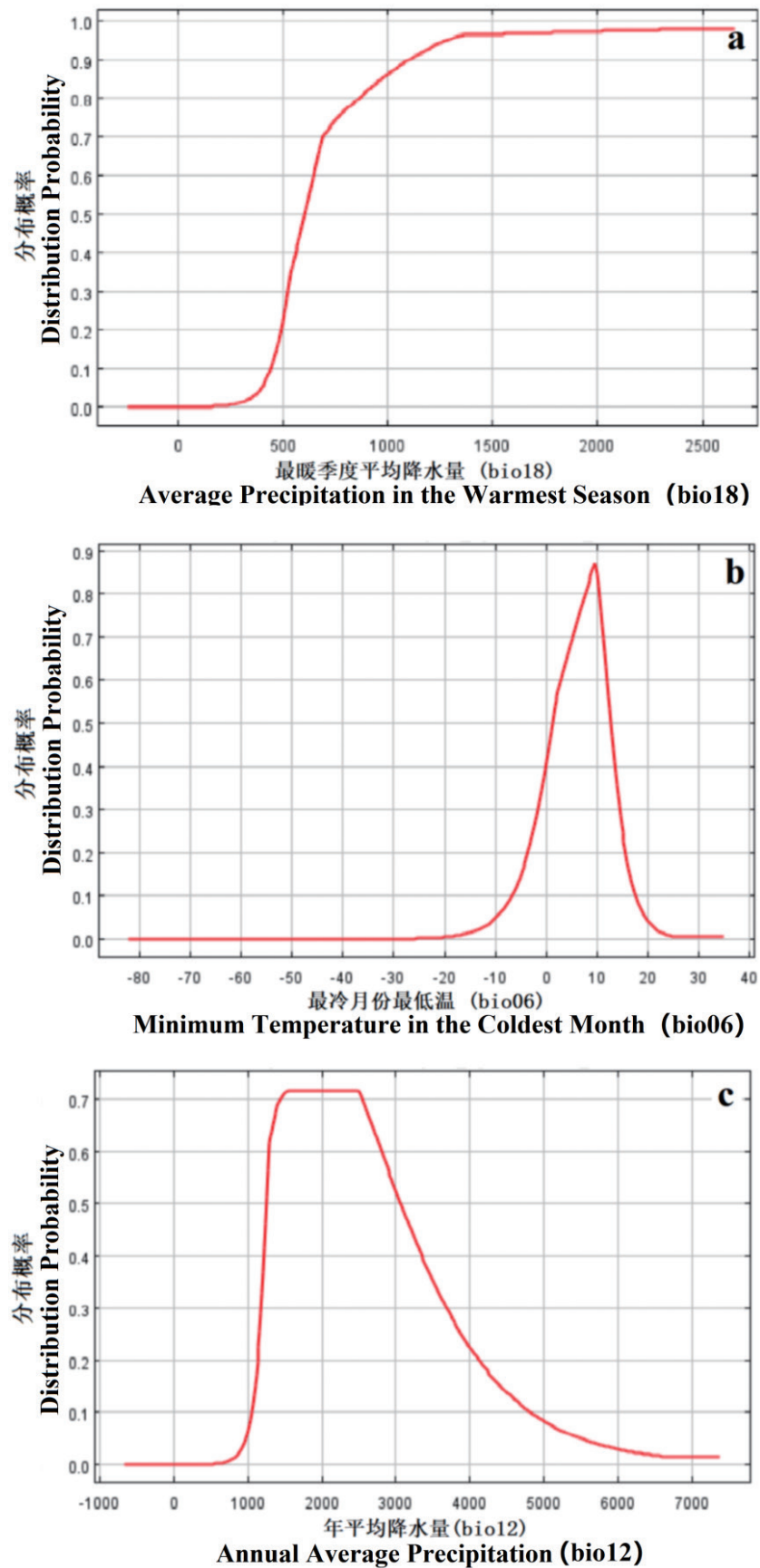


图 3 红锥适生分布与主导环境因子的关系

Figure 3 Relationships between each dominant enviroment factors and the distribution probability of *C. hystrix*

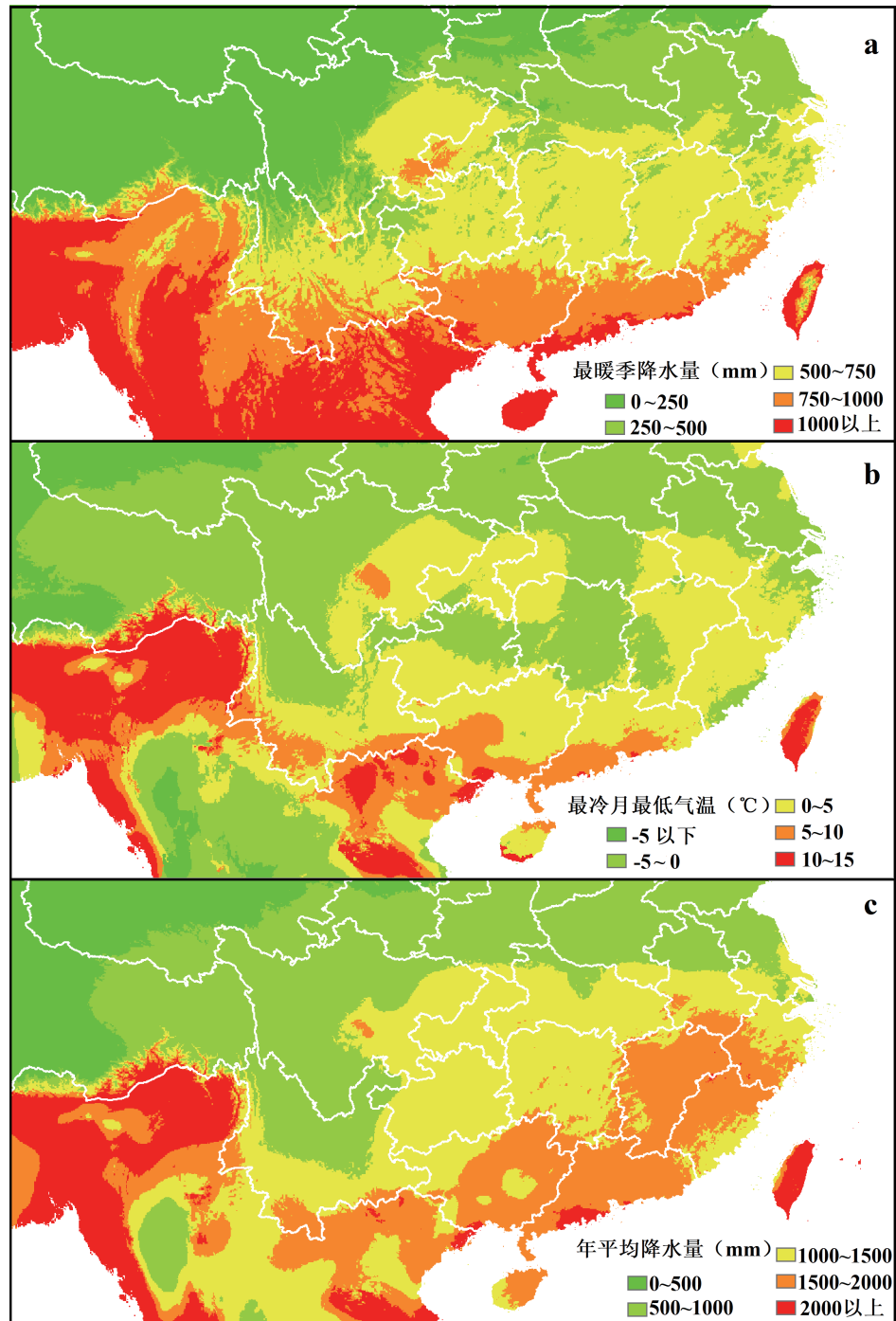


图 4 主导环境因子空间分布

Figure 4 Spatial distribution of dominant environment factor

基本一致。

本研究的结果表明最暖季度平均降水量、最冷月份最低温和年平均降水量 3 个环境变量是影响红锥分布的主要环境变量，总计贡献率达到 88.3%，最干月降水量（贡献率 4.4%）、最干月降水量（贡献率 3.4%）也在一定程度上影响了红锥分布。其中最暖季度平均降水量对红锥分布的影

响最大，其原因推测与红锥的生理特性有关，红锥属高大乔木，树冠宽大、枝叶茂盛，分布区夏季平均气温在 28℃ 以上，最高气温可达 38℃ 以上，最暖季节需要蒸腾大量的水分保证植株维持正常的生理状态，因此需要大量降水对植株进行补充，该结果与同为热带树种的柠檬桉 *Eucalyptus citriodora* 一致^[31]。图 4a 显示，高适生区的边缘

与最暖季降水量 750 mm 线基本重合, 不适生区与低适生区的分界线与最暖季降水量 500 mm 线基本重合。最冷月最低温也是影响红锥分布的一个重要环境变量, 本研究该变量的响应曲线在 0 ℃ 以上时分布概率出现了显著的提升, 即认为红锥可以忍受短时间 0 ℃ 左右的低温, 赤桉 *Eucalyptus camaldulensis*^[32]、黄顶菊 *Flaveria bidentis*^[33] 和薇甘菊 *Mikania micrantha*^[34] 等主要分布于热带或亚热带的物种, 均受到最冷月最低温度较大的影响, 图 4b 可知, 最冷月平均气温 0 ℃ 线和低适生区一边缘适生区分界线基本重合, 最冷月气温在 5 ℃ 以上的区域几乎全部位于红锥的高适生区。而年平均降水量数据显示, 红锥的不适生区的降水量大多在 1 000 mm 以下, 即全年降水量高于 1 000 mm 的才能满足红锥的基本生存需求, 全年降水量高于 1 500 mm 可以较好的促进红锥的生长 (图 4c)。综合各环境因素来看, 红锥适生条件需要满足雨热同期、冬季最低温在冰点以上和降水充沛等基本条件, 我国四川盆地、和华南大部分地区均可以满足红锥生长的基本条件, 适宜进行红锥的推广, 该特性也是植物对环境不停的适应的结果。欧阳林男等^[35]对粗皮桉适生区的研究结果, 也显示其最重要三个环境因素均为温度和降水条件, 而我国重要牧草老芒麦 *Elymus sibiricus* 的适生区预测结果也显示, 温度和降水是影响其分布的最重要环境因子, 对其分布影响的贡献率达到 85% 以上^[35], 而影响入侵杂草豚草 *Ambrosia artemisiifolia*^[36]、濒危植物独叶草 *Kingdonia uniflora*^[37]、经济作物南酸枣 *Choerospondias axillaris*^[38] 等物种的分布的主要环境因子, 也都集中在温度和降水两个关键因素上。

在当前气候变化的大环境下, 大量研究表明我国年平均气温会逐渐升高, 且全国范围内年均降水量也会增加, 且北部地区降水增加趋势更为明显^[39-43], 在此条件下, 未来数十年内红锥的适生范围可能会进一步北移, 因此可以在当前红锥的边缘适生区和低适生区, 选择目前自然分布区偏北部的种源地繁育的种苗进行引种试验, 选出具有一定耐寒能力的种源或家系, 用以扩展红锥的种植区域。

在后续研究中, 为了更好的开展红锥的引种和推广, 可以在深入调查的基础上, 分析土壤、坡向、坡度等因子对红锥分布的影响, 以实

现“适地适树”的推广, 避免人力物力的浪费。土壤、坡位条件也是影响林木生长的重要环境因子^[44-45], 笔者在调查中发现, 红锥对土壤和坡位的适应性较强, 不同环境下生长差异较其他树种更小, 本研究中由于无法在数据库中有效提取全部样点的土壤和坡位数据, 仅选择了数据较为全面的部分环境因子进行分析, 后续本研究团队会继续完善相关数据的采集和分析以提升研究的准确性。另外, 本研究的结果显示, 在全球范围内, 亚马逊雨林、西非、美国佛罗里达州、马达加斯加、越南、印度东部、缅甸西北部等雨热同期的地区, 也有红锥高适生区的分布, 且适生区和高适生区面积达到 86 万 km² 以上, 也适宜开展红锥进行引种和推广, 辅以高效栽培措施, 可以实现该物种及其延伸产业的全球推广。

参考文献

- [1] 裴姗姗, 胡进波, 刘元, 等. 人工林红锥木材干燥特性初探[J]. 木材工业, 2005(6): 22-23; 27.
- [2] 彭玉华, 曹艳云, 郝海坤, 等. 红锥、大叶桉和顶果木幼林土壤物理性质分析[J]. 林业工程学报, 2013, 27(2): 26-29.
- [3] 黄全能, 陈东华, 代全林, 等. 红锥天然林土壤理化性质及水源涵养功能的研究[J]. 福建林业科技, 2001(2): 17-19; 28.
- [4] 洪伟柳, 江吴, 承祯. 红锥种群结构和空间分布格局的研究[J]. 林业科学, 2001(S1): 6-10.
- [5] 杨育旺, 庄雪影, 吴永彬, 等. 惠州市生态公益林乡土树种筛选试验[J]. 福建林业科技, 2010, 37(4): 73-78.
- [6] 梁仕威, 张建国, 黄木清, 等. 龙脑香科树种与红锥、桉楠混交栽培技术研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(3): 109-114.
- [7] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 亚热带不同林龄红锥人工林碳储量与碳固定特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.
- [8] AUSTIN M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling[J]. Ecological modelling, 2002, 157(2-3): 101-118.
- [9] 张强, 李佳慧, 黄章平, 等. 半蒴苣苔复合群的多样性、地理分布和物种界限[J]. 广西植物, 2020, 40(10): 1477-1490.
- [10] 余爽, 李美君, 袁桃花, 等. 贵州省野生凤仙花属植物物种多样性与地理分布[J]. 西北植物学报, 2021, 41(5): 863-871.

- [11] 肖子豪,王文倩,秦道正.蜡蝉科(半翅目:头喙亚目)昆虫起源及分布格局研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):15-25.
- [12] 申文辉,朱积余,刘秀,等.红锥种源区域试验与优良种源选择[J].中南林业科技大学学报,2014,34(3):11-17.
- [13] 吴乔娜,李蕊萍,郭梦晴,等.红锥组培高效无菌系建立及丛芽诱导研究[J].林业与环境科学,2019,35(1):11-17.
- [14] 徐斌,张方秋,潘文,等.红锥基因组RAPD反应体系的建立和优化[J].热带亚热带植物学报,2008(1):89-94.
- [15] 温远光,张祖峰,周晓果,等.珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响[J].广西科学,2020,27(2):111-119.
- [16] 陆宏芳,林永标,周丽霞.粤港澳大湾区不同恢复模式植物群落结构与生态系统健康的动态变化[J].生态学报,2021,41(9):3669-3688.
- [17] 李国庆,刘长成,刘玉国,等.物种分布模型理论研究进展[J].生态学报,2013,33(16):4827-4835.
- [18] 许仲林,彭焕华,彭守璋.物种分布模型的发展及评价方法[J].生态学报,2015,35(2):557-567.
- [19] 张琳娜,樊隽轩,MELCHIN M J,等.物种分布模型在古生物学研究中的应用[J].古生物学报,2013,52(2):146-160.
- [20] BUSBY J R. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system[J]. Plant Protection Quarterly, 1991,6(1):8-9.
- [21] ADJEMIAN J, GIRVETZ E H, LAUREL B, et al. Analysis of Genetic Algorithm for Rule-Set Production (GARP) modeling approach for predicting distributions of fleas implicated as vectors of plague, *Yersinia pestis*, in California[J]. Journal of Medical Entomology, 2006(1):93-103.
- [22] POUTSMA J, LOOMANS A, AUKEMA B, et al. Predicting the potential geographical distribution of the harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*, using the CLIMEX model[J]. Biocontrol, 2008,53(1):103-125.
- [23] CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals[J]. Biodiversity & Conservation, 1993,2(6):667-680.
- [24] SCHAPIRE S J P A. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [25] 王中生,王国峥,耿其芳,等.基于4种生态位模型的金钱松潜在适生区预测[J].生态学报,2020,40(17):6096-6104.
- [26] 许斌,朱文泉,李培先.不同气候条件下桫欏在中国的潜在适生区分布[J].生态学报,2020,40(17):6105-6117.
- [27] 王书越,潘少安,王明睿,等.基于MaxEnt模型评估刺五加在东北地区的空间分布[J].生态学报,2019,39(9):3277-3286.
- [28] 张殷波,高晨虹,秦浩.山西翅果油树的适生区预测及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2018,29(4):1156-1162.
- [29] 王琦,樊保国,赵光华.气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测[J].生态学杂志,2020,39(11):3774-3784.
- [30] 霍宏亮,马庆华,李京璟,等.中国榛属植物种质资源分布格局及其适生区气候评价[J].植物遗传资源学报,2016,17(5):801-808.
- [31] 欧阳林男,陈少雄,张维耀,等.柠檬桉在中国的适生地理分布及其影响因子[J].生态学杂志,2019,38(2):361-367.
- [32] 欧阳林男,陈少雄,刘学锋,等.赤桉在中国的适生地理区域及其对气候变化的响应[J].林业科学,2019,55(12):1-11.
- [33] 安李,李良涛,高萌萌,等.基于MaxEnt模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测[J].农学报,2020,10(1):60-67;76.
- [34] 郭琼霞,黄振,于文涛,等.检疫性杂草薇甘菊在中国的适生性与分布[J].热带作物学报,2013,34(1):176-180.
- [35] 欧阳林男,陈少雄,刘学锋,等.粗皮桉在我国的潜在适生区与主导生态因子研究[J].桉树科技,2018,35(2):14-20.
- [36] 韩梦丽,白史旦,孙盛楠,等.基于MaxEnt模型青藏高原老芒麦适生区模拟预测[J].草地学报,2021,29(2):374-382.
- [37] 柳晓燕,李俊生,赵彩云,等.基于MAXENT模型和ArcGIS预测豚草在中国的潜在适生区[J].植物保护学报,2016,43(6):1041-1048.
- [38] 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.
- [39] 叶学敏,陈伏生,孙荣喜,等.基于MaxEnt模型的南酸枣潜在适生区预测[J].江西农业大学学报,2019,41(3):440-446.
- [40] 王国庆,张建云,李岩,等.海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J].资源科学,2014,36(5):1043-1050.
- [41] 高永刚,赵慧颖,高峰,等.大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J].冰川冻土,2016,38(1):47-56.
- [42] 冯蜀青,王海娥,柳艳香,等.西北地区未来10a气候变化趋势模拟预测研究[J].干旱气象,2019,37(4):557-564.
- [43] 徐放,杨晓慧,廖焕琴,等.红锥天然分布区气候区划[J].林业与环境科学,2017,33(2):21-28.
- [44] 徐畅,王德彩,刘倩,等.利用数字土壤制图技术评价森林立地质量[J].土壤通报,2022,53(1):45-55.
- [45] 胡继文,杨桂娟,刘振华,等.不同坡位香椿人工林生长和林分结构差异[J].西北林学院学报,2021,36(05):82-87.