

黄檀属珍稀树种未来适宜区变化预测

陈禹衡¹, 陆双飞², 毛岭峰¹

(1. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 【目的】黄檀属 *Dalbergia* 树种具有很高的经济价值, 但物种野外种群受到了严重的破坏。随着气候变化的加剧, 该属物种分布存在着较高的不确定性, 迫切需要深入认识这些物种未来分布的趋势, 以便更好地进行保护。【方法】利用最大熵 (MaxEnt) 模型, 基于当前气候环境, 对列入中国生物多样性红色名录的 7 种黄檀属珍稀乔木树种在中国的适宜分布区进行了预测, 并对未来不同气候情景下其分布区的变化进行了分析。【结果】年平均温度、等温性、气温季节变动系数、最热季降水量、最干月降水量、最干季降水量、土壤碳酸盐含量与坡度是影响 7 种黄檀属珍稀乔木适宜区分布模拟的关键环境因子。黄檀属珍稀乔木除黄檀 *D. hupeana* 外均将在未来获得更大的适宜分布区。黄檀的适宜分布区面积与最适分布区面积则均有所减小, 其中适宜分布区面积将减小 30.8%, 最适分布区则将缩小 49.3%。【结论】由于分布区存在差异, 同属不同物种的未来分布对气候变化的响应不同, 未来的保护工作应当集中在黄檀等适宜分布区缩小的物种上。表 3 参 39

关键词: 植物学; MaxEnt 模型; 黄檀属; 气候变化; 珍稀物种; 适宜分布区

中图分类号: S948.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2021)04-0837-09

Prediction of future changes in suitable distribution area for rare tree species of *Dalbergia*

CHEN Yuheng¹, LU Shuangfei², MAO Lingfeng¹

(1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. School of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] *Dalbergia* has high economic value and its wild population has been seriously damaged. With the aggravation of climate change, the population distribution of *Dalbergia* is highly uncertain. Therefore, it is urgent to understand the future development trend of the species for better protection. [Method] Based on the current climate and environment factors, the suitable distribution areas of 7 rare tree species of *Dalbergia* listed in the China biodiversity red list were predicted by using the MaxEnt model, and the changes of distribution areas under different climate scenarios in the future were analyzed. [Result] The annual mean temperature, isothermal property, seasonal variation coefficient of air temperature, precipitation in the hottest season, precipitation in the driest month, precipitation in the driest season, soil calcium carbonate content and slope were the key environmental factors affecting the distribution simulation of 7 species of *Dalbergia* rare trees. Except *D. hupeana*, the rare trees of *Dalbergia* would obtain more suitable distribution area in the future. The suitable distribution area and optimum distribution area of *D. hupeana* decreased by 30.8% and 49.3% respectively. [Conclusion] The future distribution of different species of the same genus has different

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2021-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31870506)

作者简介: 陈禹衡 (ORCID: 0000-0003-0677-7470), 从事森林生态学研究。E-mail: edenchen1226@outlook.com。通信作者: 毛岭峰 (ORCID: 0000-0002-2884-135X), 教授, 博士生导师, 从事森林生态学研究。E-mail: maolingfeng2008@163.com

responses to climate change due to the differences in distribution areas, so the future conservation efforts should focus on species such as *D. hupeana*, which are suitable for reduced distribution area. [Ch, 3 tab. 39 ref.]

Key words: botany; MaxEnt model; *Dalbergia*; climate change; rare species; suitable habitat

黄檀属 *Dalbergia* 为豆科 Leguminosae 蝶形花亚科 Papilionoideae 下重要的一个属。中国黄檀属有 28 种 1 变种, 产自中国西南部、南部至中部。该属包括了众多优良的材用树种, 如降香黄檀 *D. odorifera* 和有着较高经济价值的紫胶虫 *Laccifer lacca* 寄主树种钝叶黄檀 *D. obtusifolia*^[1]。黄檀属乔木树种在经济上的巨大价值, 导致其长期遭受盗伐与过度采伐^[2]。同时由于分布区内土地的大规模开发与紫胶生产等的过度利用, 黄檀属乔木在中国的自然分布区正在不断缩小, 一些树种甚至濒临灭绝, 许多自然分布的地理种源也即将消失。《中国生物多样性红色名录 (高等植物卷)》对黄檀属植物进行了全面的评估, 结果表明: 黄檀属乔木树种有 7 种受到了不同程度的威胁, 1 种极危、2 种濒危、2 种易危、2 种近危, 其中钝叶黄檀濒危, 而降香黄檀则极危^[3]。因此, 保护现有黄檀属乔木的栖息地, 同时为其寻找潜在分布区进行引种和抚育有着重要生态学意义与经济价值。物种的分布受到土壤、地形等多种环境因素的制约^[4-5], 但气候因素可能是决定区域尺度上植物地理分布的主要环境因素^[6]。全球气候变化已成为全球生物多样性面临的主要威胁之一^[7]。气候变化将对全球物种的分布带来深远的影响, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的第 6 次耦合模型比对项目 (CMIP6) 指出, 在除最低排放情景外的所有排放情景中, 全球平均温度都将至少上升 1 ℃, 且厄尔尼诺等异常天气现象将比以前大大增多^[8]。据估计, 受此影响, 全球有 20%~30% 的物种可能会由于全球变暖而灭绝^[9]。黄檀属乔木树种主要分布于中国的南方地区, 气候变化带来的水热条件的改变则会导致黄檀属乔木适宜分布区的变更, 它们较为狭窄的分布范围可能预示着对栖息地环境因子更为严格的要求^[10], 进而在未来气候变化的背景下可能有着更高的灭绝风险。本研究通过地理信息系统 (GIS) 技术和最大熵 (MaxEnt) 物种分布模型研究黄檀属珍稀乔木树种的分布适宜区, 并通过 CMIP6 未来气候数据得出未来气候背景下的适宜分布区, 找出影响黄檀属珍稀乔木树种的主要环境因子, 得出黄檀属珍稀乔木树种分布适宜区的变化趋势, 以期应对未来气候变化下的珍稀树种保护区调整和生态安全建设提供依据。

1 数据及研究方法

1.1 物种分布数据与影响因子

从《中国生物多样性红色名录 (高等植物卷)》筛选出了全部 7 种受威胁的黄檀属乔木树种作为珍稀乔木树种进行研究。根据中国数字植物标本馆 (CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、全球生物多样性信息服务网络平台 (GBIF, <https://www.gbif.org/>)、中国期刊全文数据库 (<https://www.cnki.net/>) 及国家标本资源共享平台 (<http://www.nsii.org.cn/>) 搜集了相关树种的当前分布坐标数据。

为了全面评估物种分布受到的环境因素影响, 本研究选取了 19 个气候数据、15 个土壤数据与 3 个地形数据作为环境因子参与模型运算。气候数据来源于世界气候网 (<http://www.worldclim.org/>), 数据空间分辨率为 1 km, 共有 19 个气候因子 (表 1)。使用 1970–2000 年 19 个气候因子的平均值作为当前气候建模数据 (表 2), 未来气候数据为 CMIP6 发布的 2061–2080 年的平均气候数据, 该数据可以更准确地展示在未来气候长期影响下的响应^[11]。本研究选取中国国家气象中心开发的 BCC-CSM2-MR 模式作为未来气候的数据源, 其对中国降水与气温的模拟较为可靠^[12]。气候情景则选取与当前经济社会发展相符合的中等温室气体排放情景 (SSPs 245, Shared Socioeconomic Pathways 245), 该模式情景与目前排放趋势相对应, 具有较高的准确性^[13]。

土壤数据来源于中国科学院寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>), 是南京土壤研究所基于第 2 次全国土地调查所提供的 1:100 万土壤数据制作, 栅格大小约为 1 km, 共有 15 个指标 (表 1)。坡度、海拔与坡向数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的数字高程模型 (DEM), 空间分辨率为 90 m, 利用 ArcGIS (版本 10.2, www.esri.com) 的表面分析工具提取得到地形数据 (表 1)。这些环境因子数据坐标统一为 WGS1984, 分辨率重采样为 30"。气候数据与土壤地形数据按照研究区裁剪。同时, 模型运算时使用中国科学院资源环境数据中心

表 1 环境因子及其编号

Table 1 Environment factors and their codes			
编号	环境因子	编号	环境因子
bio1	年平均温度	GRA	碎石体积百分比
bio2	平均日温差	Sand	含沙量
bio3	等温性	Silt	淤泥含量
bio4	温度季节变化系数	Clay	黏土含量
bio5	最热月最高温度	USDA_Tex	土壤质地
bio6	最冷月最低温度	OC	有机碳含量
bio7	气温年较差	pH_H2O	酸碱度
bio8	最湿季平均温度	CEC_Clay	黏性层土壤阳离子交换能力
bio9	最干季平均温度	CEC_Soil	阳离子交换能力
bio10	最热季平均温度	BS	基本饱和度
bio11	最冷季平均温度	CaCO3	碳酸盐含量
bio12	年平均降水量	ESP	表层土壤可交换钠离子
bio13	最湿月降水量	ECE	表层土壤电导率
bio14	最干月降水量	TEB	可交换性盐基
bio15	降水量季节变化	BD	土壤容重
bio16	最湿季降水量	ALT	海拔
bio17	最干季降水量	SLO	坡度
bio18	最热季降水量	ASP	坡向
bio19	最冷季降水量		

(<http://www.resdc.cn>) 中国地理数据对气候图层进行掩膜裁剪后作为底图进行处理。

1.2 物种分布模型

物种地理分布的预测模型在生态学和自然保护等领域得到了广泛应用，可用于分析物种潜在分布区并预测其未来分布^[14-15]。其中最大熵模型是 PHILLIPS 等^[16-17] 开发用于模拟给定环境条件下物种出现概率的物种分布模型。其原理是根据物种所有已知分布点的环境变量建立多种分布函数，从中选取熵值最大者，进而计算其在整个预测范围内的潜在分布情况^[18]。模型采用受试者工作特征曲线 (ROC 曲线) 下的面积 (AUC, the area under the ROC curve) 检验模型模拟效果^[19-20]。与其他物种分布模型对比，如 GARP、ENFA 和 BIOCLIM 等，MaxEnt 模型的 AUC 值更高，即预测结果更优，因此本研究使用该模型进行物种分布模拟^[21-23]。

依据 PHILLIPS 等^[17] 对模型预测精度判断标准的研究，当受试者工作特征曲线中 AUC 值大于 0.9 时说明预测效果极好，预测结果精度高。本研究设置 75% 数据用于构建模型，25% 的数据用于模型检验。根据样本训练集的 AUC 值及测试集的 AUC 值来评价模型拟合效果。通过模型提供的刀切法 (jackknife) 得出因子百分贡献率，以考察各环境因子对于模型的贡献率及重要性，得出各因子贡献率排序以筛选关键环境因子，并依据关键因子对物种的适宜分布区进行再次预测。MaxEnt 模型以栅格形式输出物种的生境适宜度 (*P*)，模型采用最大训练敏感性和特异性 (maximum training sensitivity plus specificity, MaxSS) 方法确定 *P* 的阈值，每个物种在运用最大熵模型训练完成后系统会给出相应的 MaxSS 值。基于 IPCC 制定的划分标准^[24-26]，研究区黄檀属珍稀乔木的适生等级可划分为 3 类：*P* < MaxSS 阈值的区域为非适宜分布区；MaxSS 阈值 ≤ *P* < 0.66 的区域为较适宜分布区；*P* ≥ 0.66 的区域为高适宜分布区。

2 结果和分析

2.1 模型适用性分析

基于黄檀属珍稀乔木树种实际分布数据和包括气候、土壤与地形在内的 37 个影响因子，使用 MaxEnt 模型进行建模，模拟当前适宜分布区并预测未来适宜分布区。结果显示：经过模型运行 10 次迭

代后最大熵模型的模拟效果极好,采用受试者工作特征曲线分析模型的预测衡量指标,其训练集与测试集 AUC 值均高于 0.95,表明 MaxEnt 模型预测可信度较高,可用于黄檀属珍稀乔木树种适宜分布区变化的研究。

2.2 影响黄檀属珍稀乔木分布的主导环境因子

本研究通过 MaxEnt 模型的刀切法获得了各环境因子对 7 种黄檀属珍稀乔木适宜区分布模拟的贡献率及全模型总贡献率,并筛选了影响黄檀属珍稀乔木分布的关键环境因子(表 2,加粗值为关键因子)。37 个环境因子中,年平均温度、等温性、温度季节变化系数、最热季降水量、最干月降水量、最干季降水量、土壤碳酸盐与坡度在 7 种植物中均有超过 10% 的贡献占比,且它们的总贡献率占到了全模型贡献率的 77.72%,因此它们是影响 7 种黄檀属珍稀乔木适宜区分布模拟的关键环境因子。

研究结果表明:秧青的分布主要受温度季节变化系数与最干季降水量的影响,贡献率分别为 25.2% 和 32.6%。毛叶黄檀主要受等温性、土壤碳酸盐与坡度的影响,贡献率分别为 41.2%、12.2% 和 15.1%。多体蕊黄檀则主要受温度季节变化系数的影响,贡献率为 49.9%。钝叶黄檀的主要影响因子为年平均温度、等温性和温度季节变化系数,贡献率分别为 23.4%、22.7% 和 35.6%。主导降香黄檀分布的环境因子为年平均温度,其贡献值为 83.6%。黄檀的分布主要受最干月降水量的影响,贡献率为 53.4%。海南黄檀主要受最冷季平均温度的影响,贡献率为 85.6%。

2.3 黄檀属珍稀乔木的适宜分布区

2.3.1 当前气候下适宜分布区分析 根据物种分布适宜区的划分标准,得到黄檀属珍稀乔木在当前气候下分布适宜区的分布面积的变化数据(表 3)。秧青在云南南部、海南、广东、福建和广西有较大的适宜分布区,最适分布区为云南南部与海南南部,适宜分布区域面积为 $43.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $6.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海南黄檀仅分布在海南南部沿海区域,适宜分布区面积为 $0.20 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黄檀为华南广布树种,其适宜分布区面积高达 $114.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $10.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。钝叶黄檀以海南和云南南部为主要分布地,在中国台湾西部也有适宜分布区,其适宜分布面积为 $29.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $4.60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。降香黄檀为极度濒危的物种,主要分布在海南与广东,在海南与云南西双版纳有小范围最适分布区,该种适宜分布区面积为 $25.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积仅为 $1.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。多体蕊黄檀仅分布在云南及其接壤的周边区域和西藏南部地区,其适宜分布区面积为 $31.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $3.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。毛叶黄檀主要分布在西藏南部地区及云南和四川的高原山地之中,其适宜分布面积为 $17.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $4.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.3.2 未来气候下适宜分布区预测 本研究选取未来气候情景(2061–2080 年)SSPs 245 稳定气候情景模式下黄檀属珍稀乔木的分布范围和面积,并进行了分析。结果显示:除黄檀适宜分布区与最适分布区均有所减少外,其余 6 种黄檀属珍稀乔木在 SSPs 245 未来气候情景下适生区面积均呈增加趋势,其适宜分布区质心也均有向北扩展的趋势。秧青未来适宜分布区面积增加了 49.8%,在福建西部有了更大面积的适宜生境;海南黄檀未来适宜区面积增加至 $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,分布范围也由海南扩张至中国台湾南部,其最适分布区则由 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加至 $0.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,且在台湾南部出现了最适分布区。钝叶黄檀在 SSPs 245 气候情景下适宜生境面积增加了 49.5%,达到 $44.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,其适宜分布区与最适分布区在云南均大大增加,适宜分布区拓展至四川攀枝花一线,同时适宜分布区质心与最适分布区质心均向北延伸。多体蕊黄檀未来适宜区面积增长为 $51.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积增长为 $14.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,分布边界不断向云南东部延伸,在贵州、广西、云南的交界处黔西南、百色、文山等地区出现了适宜生境。黄檀的适宜分布区与最适分布区则有所减少,适宜分布区面积减少了 30.8%,缩小至 $79.03 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区面积减小了 49.3%,缩小至 $5.09 \times 10^4 \text{ km}^2$,在山东南部沿海出现了一定的适宜分布区,但贵州、广西、广东和福建的当前适宜分布区均在未来大幅度收缩。

在 2061–2080 年未来气候变化情景下,降香黄檀、毛叶黄檀在 SSPs 245 情景下适生区面积将会有较大提升。其中,降香黄檀的适宜分布区面积由原先的 $25.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增长为 $77.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区则由 $1.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加至 $15.99 \times 10^4 \text{ km}^2$,适宜分布区由原先的海南岛与雷州半岛迅速向北延伸至广东、广西、江西和福建等地,同时在广东与广西也出现了大范围的最适分布区。毛叶黄檀的适宜区面积由原

表 2 黄檀属珍稀乔木环境因子贡献率

Table 2 Distribution of rare tree species of *Dalbergia* in modeling

环境因子	各因子在模型计算中的贡献占比/%							总贡献率/%
	秧青	毛叶黄檀	多体蕊黄檀	降香黄檀	钝叶黄檀	黄檀	海南黄檀	
bio1	5.1	0	0.2	83.6	23.4	1.4	0.8	16.47
bio2	0.7	3.8	0.5	0	0	3.5	0.4	1.28
bio3	6.1	41.2	0.1	0.7	22.7	1.2	3.3	10.83
bio4	25.2	0.9	49.9	0	35.6	1.8	2.7	16.70
bio5	2.6	0	0.1	0	0	0.6	0	0.47
bio6	0	0	0	3.4	4	1.7	3.4	1.80
bio7	0	0	5.2	0	0	3.4	0	1.24
bio8	2.9	0	1.3	0	0	0.8	0	0.72
bio9	0.2	0.1	0	2.9	2.6	0.1	3.3	1.32
bio10	0	0	0	0.3	0	1.5	0	0.26
bio11	0.1	0	0	0	0.8	0.3	85.6	12.49
bio12	0	0	1.6	0	0.2	5.4	0	1.04
bio13	0	0	0	0.7	0	0.1	0	0.12
bio14	2.4	1.9	0.2	0	0	53.4	0	8.33
bio15	0	0.1	5.7	0.2	0.1	1.9	0	1.15
bio16	8.5	0	0	0.1	0	0	0	1.24
bio17	32.6	0	9.2	0	0	2.0	0	6.30
bio18	0.6	9.7	5.8	3.7	0	0.3	0	2.89
bio19	0	0	1.0	0	0.7	2.2	0	0.56
USDA_Tex	0.2	5.4	0	0	0	0.2	0	0.83
CaCO ₃	2.5	12.2	0	0	0.7	1.3	0	2.40
Silt	1.0	3.5	0	0.8	0	0.9	0	0.89
TEB	0.8	0	0	0	0	3.0	0	0.55
Sand	0	0.3	0	0.8	0	0	0	0.16
Clay	0.1	0.4	0.2	0.1	0	0.8	0	0.23
CEC_Soil	0.1	0	0	0.9	1.8	0.1	0	0.42
CEC_Clay	0	0	6.5	0.5	1.5	1.0	0	1.37
BS	0	0	3.8	0	0	0.2	0	0.58
BD	0	1.7	0	0	0	0	0	0.24
ECE	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESP	0	3.8	0.5	0	0	0.2	0	0.65
GRA	0	0	2.2	0	0.6	0.5	0.4	0.53
OC	0	0	0	0	0	0	0	0.00
pH_H ₂ O	0	0	0	0	0	0.3	0	0.04
ALT	0	0	3.6	1.2	0.1	2.1	0	1.01
SLO	3.3	15.1	1.9	0	4.7	4.2	0	4.20
ASP	0.3	0	0.8	0.1	0.4	3.3	0	0.70

说明：加粗值为关键因子。秧青*D. assamica*，毛叶黄檀*D. sericea*，多体蕊黄檀*D. polyadelpha*，海南黄檀*D. hainanensis*

先的 $17.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增长为 $51.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，最适分布区由 $4.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加至 $29.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，在 SSPs 245 气候情景下，适宜分布范围将大大北移，覆盖云南全境、四川西部及西藏南部。

3 结论和讨论

根据 MaxEnt 模型运行的结果，黄檀的适宜分布区与最适分布区均有所缩小，秧青、海南黄檀、钝

表3 7种黄檀属珍稀乔木树种样点数及不同时期适宜分布区面积

Table 3 Suitable distribution area of 7 rare tree species of *Dalbergia* and their records numbers

种名	濒危等级	生境适宜度阈值	样点数	不同时期适宜分布区面积/万km ²		不同时期最适分布区面积/万km ²	
				当前	未来	当前	未来
秧青	濒危	0.287	55	43.35	64.95	6.04	12.06
海南黄檀	易危	0.335	10	0.20	1.15	0.03	0.08
黄檀	近危	0.273	201	114.18	79.03	10.12	5.09
钝叶黄檀	濒危	0.175	19	29.54	44.17	4.60	8.58
降香黄檀	极危	0.134	15	25.64	77.64	1.06	15.99
多体蕊黄檀	易危	0.253	25	31.20	51.15	3.75	14.26
毛叶黄檀	近危	0.386	10	17.54	51.45	4.91	29.10

叶黄檀、降香黄檀、多体蕊黄檀、毛叶黄檀等6种黄檀属珍稀乔木适宜分布区与最适分布区在中等温室气体排放情景下有所扩大,其中降香黄檀与毛叶黄檀的适宜区将会由原先的单一省份及周边的小范围分布转为覆盖多个省份的较大范围分布。物种分布模型得出的关键因子均值可以较好地反映物种对环境的适宜范围^[27]。研究发现:7种黄檀属珍稀乔木均有相应的关键环境因子及其均值,其中秧青适生区温度季节变化系数的均值为852,最干季降水量的均值为390 mm;毛叶黄檀适生区等温性均值为43.1,土壤碳酸盐含量的均值为8.7%,坡度均值为21.3°;多体蕊黄檀适生区气温季节变化系数均值为632;降香黄檀适生区年平均气温的均值为21.4℃;钝叶黄檀适生区年平均气温均值为13.6℃,等温性的均值为38.8,温度季节变化系数的均值为494;黄檀适生区年最干月降水量均值为39 mm;海南黄檀适生区最冷季平均气温均值为20.8℃。该结果对黄檀属珍稀乔木资源的保护、造林区规划以及可持续经营等具有一定指导意义。

3.1 黄檀属珍稀乔木分布变化的原因

本研究中,7种黄檀属珍稀乔木中仅有黄檀一种为南方大范围分布的树种,同时也仅有黄檀一种的适宜分布区与最适分布区有所缩小。原因与其对最干月降水量的敏感程度有关,黄檀的分布主要受最干月降水量的影响,贡献率为53.4%,其适宜的最干月降水量为2~76 mm,因此最干季节过高的降水量会对黄檀的分布造成不利影响。在中等温室气体排放情景中,由于全球气候变化,南方地区在未来各个气候情景中都会更加潮湿,未来最干月降水量普遍增加,导致黄檀在贵州、广西、广东和福建的适宜分布区均大幅度收缩。这意味着当地对黄檀的抚育及引种工作应当有所调整,而江西等纬度更高的省份则应当在黄檀的保护中处于更加优先的地位。

作为亚热带常绿树种,黄檀属珍稀乔木在未来普遍获得了更大的适宜分布区。植物地理分布是多种因素综合作用的结果,每一物种均有决定其物种分布范围的关键因子,物种的分布面积随关键因子的变化而变化^[28],其中气候被认为是影响植物分布大尺度格局的主要因素^[29]。全球气候的变化可能带来温度年较差的扩大与干湿两季降水量的不平衡,进而对植物生长造成影响^[30]。秧青、钝叶黄檀与多体蕊黄檀则均对季节温差变化有着较高要求,而温度季节变化系数在中等温室气体排放情景下并无显著变化,这些可能是上述4种黄檀属珍稀乔木分布区并没有大幅扩张至其他省份的主要因素。毛叶黄檀对温度季节变化的要求较为宽松,对土壤碳酸钙的要求适中,且受坡度的限制较小;降香黄檀的适宜区分布则主要由年平均温度决定。随着全球气候变化,南方区域气温与降水量均有所增加,这些限制因素逐渐减少,因此它们的适宜分布区面积获得了更大的扩张与显著的北移^[31]。

3.2 黄檀属珍稀乔木分布变化的影响

黄檀属乔木树种作为中国重要的材用树种与紫胶虫寄主树种,有着十分重要的经济价值。随着近自然森林经营等先进营林措施的不断推广,目前在纯林中混合种植黄檀属珍稀材用树种的营林措施正在受到重视,因此研究黄檀属珍稀乔木的适宜分布区及其对气候变化的响应显得尤其重要^[32]。对于传统紫胶虫寄主树种钝叶黄檀,其种植范围当前仅局限于云南南部普洱等地,因此紫胶虫产业也受到寄主树种规模的限制而难以进一步扩大。本研究发现:钝叶黄檀当前在海南有着较好的适宜分布区,未来其适宜区

将会拓展至普洱北部的临沧一带，因此在海南与云南中部乃至更北的区域引种钝叶黄檀，改良当地林分结构，增加经营收入有着重要的理论支撑。同时，秧青作为濒危物种，其实际分布区域碎片化严重，但其适宜分布区则从广西南部延伸至云南南部，其种群恢复潜力较大，应当在引种与造林规划中给予优先考虑^[33]。海南黄檀是中国珍稀的材用树种，当前已被列入易危物种；随着全球气候的变化海南黄檀适宜分布区有所增加，但是依然局限于海南南部沿海地区，因此应当在未来的物种保护工作中将海南黄檀优先级适当提高^[34]。随着全球气候变化，降香黄檀的适宜分布区将会向北延伸至广西与广东境内，应当在“两广”地区推广引种^[35]。

3.3 对后续研究的展望

研究所用物种的地理分布数据受到地形和交通等条件的限制，标本记录的采样点多集中于道路附近和自然保护区等特殊区域^[36]。这些采样点通常不代表环境梯度的随机样本，因而许多物种的实际分布信息不完整，可能影响模拟结果^[37]。同时，物种的分布及其灭绝风险还受到物种本身的性状、当地地质条件和人为活动等多方面的综合影响，因此后续的研究可综合多种非生物与生物因子进行，以期获得更加准确的预测结果^[38]。MaxEnt 模型尽管精度较高，解释性良好，但目前遗传模型与随机森林模型等在物种分布预测上的应用越来越广泛，因此采用多模型对物种进行评估也有着重要的现实意义^[39]。后续研究可以立足于有着重大价值的珍稀濒危物种，结合多模型、多因素进行模拟，以期得出珍稀濒危物种在气候变化背景下中国适宜区的变迁趋势，并结合提出更全面的保护手段。

4 参考文献

- [1] 孙永玉, 李昆, 杨文云, 等. 钝叶黄檀地理种源变异研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 296 – 299.
SUN Youngyu, LI Kun, YANG Wenyun, *et al.* Study on geographical provenance variations of *Dalbergia obtusifolia* Prain [J]. *For Res*, 2005, 18(3): 296 – 299.
- [2] 刘昌霖, 周国英, 肖柏, 等. 降香黄檀心材和边材内生真菌多样性[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 109 – 120.
LIU Changlin, ZHOU Guoying, XIAO Bo, *et al.* Diversity of endophytic fungi in heartwood and sapwood of *Dalbergia odorifera* [J]. *Sci Silv Sin*, 2020, 56(4): 109 – 120.
- [3] 覃海宁, 赵莉娜. 中国高等植物濒危状况评估[J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 689 – 695.
QIN Haining, ZHAO Lina. Evaluating the threat status of higher plants in China [J]. *Biodiversity Sci*, 2017, 25(7): 689 – 695.
- [4] 范叶青, 周国模, 施拥军, 等. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(3): 321 – 327.
FAN Yeqing, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Relationship of slope aspect and position on biomass and carbon storage in a *Phyllostachys edulis* stand [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, 29(3): 321 – 327.
- [5] 陆双飞, 陈禹衡, 周斯怡, 等. 西南地区松属乔木对气候变化的响应[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 466 – 477.
LU Shuangfei, CHEN Yuheng, ZHOU Siyi, *et al.* Responses of *Pinus* species to climate change in southwestern China [J]. *J For Environ*, 2020, 40(5): 466 – 477.
- [6] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究[J]. 植物学报, 1996, 38(1): 8 – 17.
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. Study on climate-vegetation classification for global change in China [J]. *Acta Bot Sin*, 1996, 38(1): 8 – 17.
- [7] WILLIS C G, RUHFEL B, PRIMACK R B, *et al.* Phylogenetic patterns of species loss in Thoreau's woods are driven by climate change [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2008, 105(44): 17029 – 17033.
- [8] KERR R A. A stronger IPCC report [J]. *Science*, 2013, 342(6154): 23.
- [9] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, *et al.* Extinction risk from climate change [J]. *Nature*, 2004, 427(6970): 145 – 148.
- [10] 马艳萍, 徐呈祥, 崔铁成, 等. 基于 CNKI 的我国黄檀属树木生物学文献分析[J]. 热带林业, 2015, 43(4): 49 – 52.
MA Yanping, XU Chengxiang, CUI Tiecheng, *et al.* Bibliometric analysis and studies on biologic research papers of tree species of *Dalbergia* L. in China [J]. *Trop For*, 2015, 43(4): 49 – 52.
- [11] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. *Int J Climatol*, 2017, 37(12): 4302 – 4315.

- [12] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第6次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(5): 445–456.
ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. *Adv Clim Change Res*, 2019, **15**(5): 445–456.
- [13] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(5): 533–539.
XIN Xiaoge, WU Tongwen, ZHANG Jie, *et al.* Introduction of BCC models and its participation in CMIP6 [J]. *Adv Clim Change Res*, 2019, **15**(5): 533–539.
- [14] 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.
LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguo, *et al.* Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(16): 4827–4835.
- [15] 申家朋, 陈东升, 洪奕丰, 等. 基于MaxEnt模型对日本落叶松在中国潜在分布区的预测[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, **28**(3): 19–25.
SHEN Jiapeng, CHEN Dongsheng, HONG Yifeng, *et al.* Prediction on potential distribution areas of *Larix kaempferi* in China based on MaxEnt model [J]. *J Plant Res Environ*, 2019, **28**(3): 19–25.
- [16] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, **31**(2): 161–175.
- [17] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Modelling*, 2006, **190**(3): 231–259.
- [18] 王雷宏, 杨俊仙, 徐小牛. 基于MaxEnt分析金钱松适生的生物气候特征[J]. *林业科学*, 2015, **51**(1): 127–131.
WANG Leihong, YANG Junxian, XU Xiaoni. Analysis of suitable bioclimatic characteristics of *Pseudolarix amabilis* by using MaxEnt model [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(1): 127–131.
- [19] 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 Yunsheng, XIE Bingyan, WAN Fanghao, *et al.* Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. *Biodiversity Sci*, 2007, **15**(4): 365–372.
- [20] 陈禹衡, 吕一维, 殷晓洁. 气候变化下西南地区12种常见针叶树种适宜分布区预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, **43**(6): 113–120.
CHEN Yuheng, LÜ Yiwei, YIN Xiaojie. Predicting habitat suitability of 12 coniferous forest tree species in southwest China based on climate change [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2019, **43**(6): 113–120.
- [21] 陈思斯, 刘想, 童鑫玥, 等. 基于多模型集合预测尖萼红山茶物种分布[J]. *生态科学*, 2020, **39**(2): 58–66.
CHEN Sisi, LIU Xiang, TONG Xinyue, *et al.* Prediction of *Camellia edithae* species distribution based on multi-model combination [J]. *Ecol Sci*, 2020, **39**(2): 58–66.
- [22] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状[J]. *植物生态学报*, 2019, **43**(4): 273–283.
LIU Xiaotong, YUAN Quan, NI Jian. Research advances in modelling plant species distribution in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, **43**(4): 273–283.
- [23] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 等. 基于MaxEnt模型预测鹅掌楸在中国的潜在分布区[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(1): 1–8.
QIU Haojie, SUN Jiejie, XU Da, *et al.* MaxEnt model-based prediction of potential distribution of *Liriodendron chinense* in China [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(1): 1–8.
- [24] LIU Canran, WHITE M, NEWELL G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data [J]. *J Biogeogr*, 2013, **40**(4): 778–789.
- [25] 孙颖, 秦大河, 刘洪滨. IPCC第5次评估报告不确定性处理方法的介绍[J]. *气候变化研究进展*, 2012, **8**(2): 150–153.
SUN Ying, QIN Dahe, LIU Hongbin. Introduction to treatment of uncertainties for IPCC Fifth Assessment Report [J]. *Adv Clim Change Res*, 2012, **8**(2): 150–153.
- [26] 叶永昌, 周广胜, 殷晓洁. 1961–2010年内蒙古草原植被分布和生产力变化: 基于MaxEnt模型和综合模型的模拟分析[J]. *生态学报*, 2016, **36**(15): 4718–4728.
YE Yongchang, ZHOU Guangsheng, YIN Xiaojie. Changes in distribution and productivity of steppe vegetation in Inner Mongolia during 1961 to 2010: analysis based on MaxEnt model and synthetic model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(15):

- 4718 – 4728.
- [27] 郑维艳, 曹坤芳. 中国柯属 5 种资源植物潜在地理分布及其对气候变化的响应[J]. 植物科学学报, 2019, **37**(4): 474 – 484.
- ZHENG Weiyan, CAO Kunfang. Potential geographical distribution of five *Lithocarpus* species in China and their response to climate change [J]. *Plant Sci J*, 2019, **37**(4): 474 – 484.
- [28] 杨志香, 周广胜, 殷晓洁, 等. 中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(6): 1429 – 1436.
- YANG Zhixiang, ZHOU Guangsheng, YIN Xiaojie, *et al.* Geographic distribution of *Larix gmelinii* natural forest in China and its climatic suitability [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(6): 1429 – 1436.
- [29] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, **421**(6918): 37 – 42.
- [30] LITTON C M, GIARDINA C P, FREEMAN K R, *et al.* Impact of mean annual temperature on nutrient availability in a tropical montane wet forest [J]. *Front Plant Sci*, 2020, **11**(11): 784.
- [31] GE Jieli, BERG B, XIE Zhongqiang. Climatic seasonality is linked to the occurrence of the mixed evergreen and deciduous broad-leaved forests in China[J]. *Ecosphere*, 2019, **10**(9): e02862. doi: 10.1002/ecs2.2862.
- [32] 向涛, 崔龙箫. 海南降香黄檀人工林重要害虫及天敌种类调查[J]. 热带农业科学, 2018, **38**(11): 59 – 62.
- XIANG Tao, CUI Longxiao. A survey of major pest insects and their natural enemies of *Dalbergia odorifera* plantations in Hainan [J]. *Chin J Trop Agric*, 2018, **38**(11): 59 – 62.
- [33] 卢靖, 蔡文良. 在云南热区培育红木类树种的建议与对策[J]. 林业科技通讯, 2017(5): 70 – 73.
- LU Jing, CAI Wenliang. Suggestions and development strategies for redwood tree species cultivation in tropical area of Yunnan [J]. *Pract For Technol*, 2017(5): 70 – 73.
- [34] 王军, 丁旭坡, 杨锦玲, 等. 降香黄檀和海南黄檀的鉴别[J]. 分子植物育种, 2018, **16**(23): 7871 – 7879.
- WANG Jun, DING Xupo, YANG Jinling, *et al.* The identification of *Dalbergia odorifera* and *D. hainanensis* [J]. *Mol Plant Breed*, 2018, **16**(23): 7871 – 7879.
- [35] 方发之, 杨众养, 陈彧, 等. 海南珍贵乡土树种套种农作物试验初报[J]. 热带林业, 2015, **43**(1): 4 – 6.
- FANG Fazhi, YANG Zhongyang, CHEN Yu, *et al.* Preliminary study on interplanting crops in the plantations of precious local tree species in Hainan [J]. *Trop For*, 2015, **43**(1): 4 – 6.
- [36] BECK J, BÖLLER M, ERHARDT A, *et al.* Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species' geographic distributions [J]. *Ecol Inf*, 2014, **19**: 10 – 15.
- [37] ZHANG Minggang, SLIK J W F, MA Keping. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): e22400. doi: 10.1038/srep22400.
- [38] 陆双飞, 殷晓洁, 韦晴雯, 等. 气候变化下西南地区植物功能型地理分布响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(1): 310 – 324.
- LU Shuangfei, YIN Xiaojie, WEI Qingwen, *et al.* The geographical distribution response of plant functional types to climate change in southwestern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(1): 310 – 324.
- [39] 张劳模, 罗鹏, 庞丽峰, 等. 运用最大熵模型和随机森林模型对东北红松分布的模拟[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(3): 60 – 66.
- ZHANG Laomo, LUO Peng, PANG Lifeng, *et al.* Predicting potential distribution of *Pinus koraiensis* in northeast China by MaxEnt model and random forest mode [J]. *J Northeast For Univ*, 2020, **48**(3): 60 – 66.