

气候变化背景下紫楠在中国的适宜分布区模拟

陈爱莉¹, 赵志华², 龚伟², 孔芬², 张克亮^{3*}

(1. 苏州旅游与财经高等职业技术学校, 江苏 苏州 215104; 2. 苏州工业园区园林绿化工程有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了解气候对紫楠(*Phoebe sheareri*)分布的影响, 应用 Maxent 和 GARP 模型模拟了紫楠在当前气候下的中国适宜分布区, 分析了影响其分布的主要环境因子, 并预测了未来气候情境下其分布区的变化。结果表明, 紫楠适宜分布在长江中下游及以南的各省区。影响紫楠分布的主要环境因子有年降雨量、最干季均温、降雨的季节性、相对湿度和 6–8 月的日照时数, 这 5 个因子的累积贡献率达 84.3%。在未来气候情境下, 广东、云南、广西和海南等地区的适生区面积会显著锐减, 而陕西中部、河南南部、安徽东部和江苏北部适生区面积会大幅度增加。因此, 在未来气候变化背景下, 紫楠的适宜分布区有向北扩张的趋势。

关键词: 紫楠; Maxent 模型; GARP 模型; 潜在适生区; 气候

doi: 10.11926/jtsb.4201

Predicting Suitable Distribution Areas of *Phoebe sheareri* in China under Climate Change

CHEN Ai-li¹, ZHAO Zhi-hua², GONG Wei², KONG Fen², ZHANG Ke-liang^{3*}

(1. Suzhou Tourism and Finance Institute, Suzhou 215104, Jiangsu, China; 2. Suzhou Industrial Park Gardens, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 3. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract: Predicting the potential geographic distribution of a species and its response to climate change is of great significance for the conservation of biodiversity and the sustainable development of ecosystems. *Phoebe sheareri* is widely used in building furniture because of its heavy weight, hardness, and uniform structure. However, because it has a weak natural ability to regenerate and because unprecedented damage has occurred in its natural habitat, wild germplasm resources are getting exhausted. In order to understand the effect of climate on distribution of *P. sheareri*, its suitable distribution region was simulated by using Maxent and Genetic Algorithm for Rule-set Prediction (GARP), the main environmental factors were analyzed, and the changes in distribution area under four climate change scenarios were predicted. The results showed that *P. sheareri* was suitable for distribution in the middle and lower reaches of the Yangtze River and south provinces. Annual precipitation, mean temperature of the driest quarter, precipitation seasonality, relative humidity and sunshine duration from June to August were the main factors affecting the distribution of *P. sheareri*, and these factors contributed 84.3% of the variation. Under climate change scenarios, by both Maxent and GARP models, the suitable area in Guangdong, Yunnan, Guangxi, and Hainan would decrease significantly for this species, while that in central Shaanxi, southern Henan, eastern Anhui, and northern Jiangsu would increase. Therefore, under climate change scenarios,

收稿日期: 2020-02-10 接受日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800340); 江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2019]448)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31800340), and the Project for Modern Agricultural Industrial Technology System in Jiangsu (Grant No. JATS[2019]448).

作者简介: 陈爱莉(1972~), 女, 硕士, 副教授, 主要从事园林植物应用。E-mail: 1210154784@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhangkeliang@yzu.edu.cn

the suitable habitat would expand geographically to the north. These should provide a useful reference for the conservation and cultivation of *Phoebe sheareri*.

Key words: *Phoebe sheareri*; Maxent; GARP; Potential suitable distribution; Climate

气候是影响物种种群数量和生理代谢的主要因素,同时也是影响物种分布的决定性因素^[1-2]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,随着温室气体排放量的增加,地球表面平均温度持续上升^[2]。气候变化通过改变生活史、物种分布、群落组成、植被格局以及生态系统的结构与功能对生物多样性产生了严重的威胁^[2-4]。因此,在气候变化的背景下,预测物种的潜在分布区及其对气候变化的响应对生态系统的可持续发展及生物多样性的保护具有重要的意义^[3,5]。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)是基于物种已知的分布数据和相关环境因子,对物种分布及其生态需求进行模拟的一种方法^[6]。常见的 SDMs 有规则集遗传算法模型(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP)、最大熵模型(Maxent)、生态因子分析模型(ecological niche factor analysis, ENFA)、广义加法模型(generalized additive model, GAM)和人工神经网络模型(artificial neural network, ANN)等^[3,6-11]。其中,Maxent 和 GARP 具有较好的预测能力,且受样本偏差小和所需样本少。目前已被广泛应用于保护生物学、入侵生物学、全球变化生物学及进化生物学等领域^[10-13]。

紫楠(*Phoebe sheareri*)又称金丝楠,是樟科(Lauraceae)楠属常绿乔木,主要分布于长江流域以南,多生于海拔 1 000 m 以下的常绿阔叶林中^[14]。紫楠由于木材坚硬、纹理直、结构细,是实木家具的理想用材;同时,其树形美观,四季常绿,是优良的园林绿化树种^[15]。由于用途广、自然更新能力弱,加上旅游干扰、人为砍伐等原因,野生的紫楠资源日近枯竭^[16]。然而,目前对紫楠的研究主要集中于园林应用^[17]、种子休眠与萌发^[18]、幼苗光合生理及根茎生物活性成分^[19]等方面,对紫楠的适宜分布区及其影响因素研究较少。未来不同气候变化情景下,其空间分布格局会发生哪些变化,目前并不清楚。本研究结合大量标本信息和环境因子,利用 Maxent 和 GARP 模型预测紫楠的适宜分布区,确定影响紫楠分布的重要环境因子,并预测其对未来气候变化的响应,以期对紫楠野生资源的保护和在适宜分布区进行人工栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 紫楠分布数据

通过全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、Tropicos (<http://www.tropicos.org/>)和文献获得紫楠现有分布样点 304 个。为提高预测的准确性,去除重复和地理位置不详的信息,最终整理得到 135 个样点信息用于模型分析(图 1)。

1.2 环境变量数据

选取了 28 个可能影响紫楠分布的环境变量,包括 19 个从 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)下载的分率为 30"的生物气候因子;坡度、坡向和海拔 3 个地形因子通过中国科学院科学数据库(<http://www.gscloud.cn/>)下载的分率为 30 m 的数字高程图计算提取;土壤酸碱度、土壤有机碳含量和土壤类型 3 个土壤数据下载自世界土壤数据库(http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/HWSD_Data.html?sb=4),归一化差异植被指数、相对湿度、6-8 月的日照时数从中国科学院国际科学数据服务平台(<http://data.mirror.csdb.cn/>)获取。未来气候采用 BCC-CSM 1.1 模型中的 RCP 2.6 和 RCP 8.5 两种情景下的 2 个时期(2050s 和 2070s)^[20]。所有图层均转换为 GCS-WGS-1984 坐标系。为避免环境变量的高度相关而导致的过度拟合问题^[21],采用 Pearson 相关性分析和主成分分析,相关系数大于 0.9 的变量采用 1 个变量代替,最终筛选得到了 16 个环境因子(表 1)。

1.3 模型模拟

采用 Desktop GARP 1.1.3^[11]和 Maxent 3.3.3^[22]进行模型运算。GARP 是一种遗传算法,通过不断迭代进行规则集的选择、评估、验证、包含或拒绝^[23]。首先,在不同规则集中归纳出一种方法,应用于训练数据集,总结出一个法则,然后根据验证数据集判断这个法则能否提高预测的精确性,如果精确性提高,则被保留,否则被拒绝。在分布数据中随机选取 25%用于模型质量检验,剩余 75%作为训练数

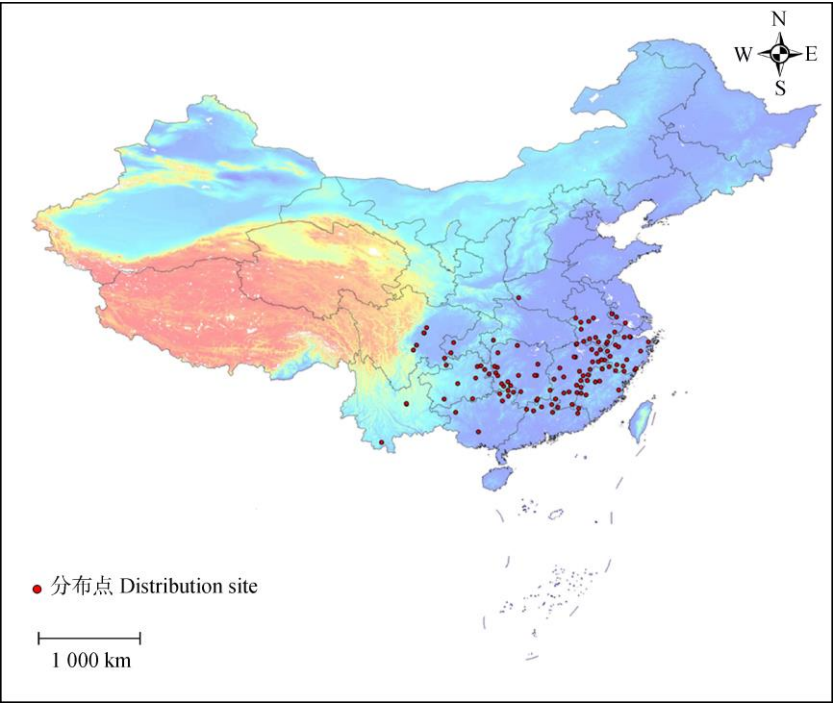


图 1 用于模型构建的紫楠分布样点。中国省级行政区划底图来源于国家基础地理信息网站(<http://ngcc.Sbsm.gov.cn/>)。

Fig. 1 Distribution records of *Phoebe sheareri* used for modeling. Base map of China's provincial administrative divisions were obtained from the National Fundamental Geographic Information System website (<http://ngcc.Sbsm.gov.cn/>).

表 1 紫楠潜在分布区预测使用的环境因子

序号 No.	代码 Code	环境因子 Environment factor	单位 Unit
1	Bio2	昼夜温差月均值 Mean monthly temperature difference between day and night	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	Bio3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	$\times 100$
3	Bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	Bio9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
5	Bio12	年降雨量 Annual precipitation	mm
6	Bio15	降雨的季节性 Precipitation seasonality	%
7	Bio18	最热季降雨量 Precipitation of the warmest quarter	mm
8	Aspect	坡向 Aspect	°
9	Ele	海拔 Elevation	m
10	RH	相对湿度 Relative humidity	%
11	NDVI	归一化差异植被指数 Normalized difference vegetation index	
12	Slope	坡度 Slope degree	°
13	Soilcla	土壤类型 Soil type	
14	Soilorc	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	g/kg
15	Soilph	土壤酸碱度 Soil pH	$\times 10$
16	SD	6-8 月日照时数 Sunshine duration from June to August	h

数据集用于构建模型。启用最优规则集合参数选项。模型运行 20 次, 最大迭代次数为 1 000 次, 收敛值为 0.01。其他参数使用默认值。

Maxent 基于最大熵理论, 认为已知分布数据对未知分布的最优具有最大熵^[24]。由于 Maxent 容易

产生过度拟合现象, 使用默认参数可能会导致预测结果不可靠^[23]。而通过调整不同参数, 发现默认参数具有最小的 AICc 值。选用与 GARP 一致的训练数据集和测试数据集比例。最大迭代次数为 1 000, 最大背景点数量为 10 000, 收敛值为 1×10^{-6} 。其他

参数使用默认值。采用刀切法(jackknife test)测定不同环境变量的重要性。根据紫楠地理分布的贡献率,筛选影响其分布的主要气候因子。通过对主要气候因子的单因子建模,绘制分布概率与环境变量之间的响应曲线(response curve)。

利用 ArcGIS 10.2 中的 Jenks' natural breaks 对适宜分布区进行分类。其中, $0 < P \leq 0.07$ 为“非适生区”, $0.07 < P \leq 0.025$ 为“低适生区”, $0.025 < P \leq 0.53$ 为“中适生区”, $0.53 < P \leq 1$ 为“高适生区”。采用真实技能统计(true skill statistic, TSS), Kappa 检验和受试者工作特征曲线下面积(AUC)对模型进行精确度评估。通过 t 检验,对两种模型的 AUC、TSS 和 Kappa 值进行比较。AUC 是评估物种分布模型表现最常用的方法。通常认为,当 AUC 值为 0.5~0.6 时,模型表现“失败”;当 AUC 值为 0.6~0.7 时,模型表

现“较差”;当 AUC 值为 0.7~0.8 时,模型表现“一般”;当 AUC 值为 0.8~0.9 时,模型表现“好”;当 AUC 值为 0.9~1 时,模型表现“最佳”。Kappa 检验和 TSS 综合考虑遗漏偏差和错判误差,两者的预测范围都为-1 到+1,检测值越接近+1,表示模型表现越好,而检测值低于 0 表示模型精确度较差。

2 结果和分析

2.1 模型的评价与比较

从表 2 可见, Maxent 和 GARP 的 AUC、TSS 和 Kappa 值均大于 0.9,表明 2 个模型的预测效果都比较好。而 2 个模型比较, Maxent 的 3 个指标均显著高于 GARP,表明 Maxent 比 GARP 具有更高的可信度。

表 2 基于 Maxent 和 GARP 模型的 AUC、Kappa 和 TSS 值比较

Table 2 Comparison of AUC, TSS and Kappa of GARP and Maxent models

模型 Model	AUC	Kappa	TSS
GARP	0.902 ± 0.018b	0.939 ± 0.007b	0.941 ± 0.069b
Maxent	0.986 ± 0.021a	0.972 ± 0.036a	0.986 ± 0.023a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level.

2.2 重要的环境变量

采用贡献率和刀切法(图 2)评估环境因子对紫楠地理分布的影响。结果表明,影响紫楠地理分布的主要环境因子有年降雨量(Bio12, 38.5%)、最干季均温(Bio9, 22.1%)、降雨的季节性(Bio15, 16.5%)、相对湿度(RH, 4.2%)和 6-8 月日照时数(SD, 3.0%),这 5 个环境因子的累积贡献率高达 84.3%。为了进一步确定紫楠的适宜分布区气候特征,将 5 个环境因子进行单因子建模。由图 3 可以看出,当年降水量小于 500 mm 时,紫楠的分布概率几乎为零,随着年均降水量的增加,紫楠分布概率呈直线上升,并在年均降水量为 1 760 mm 时达到峰值,随后又下降(图 3: A)。最干季均温也呈现相似的趋势,当最干季均温小于 0℃时,紫楠分布概率接近于 0,并随着温度的升高而迅速增加,在 10℃时达到顶峰,随后下降(图 3: B)。降水季节性为典型的“S”型曲线,在 50%时达到峰值(图 3: C)。当相对湿度为小于 70%时,分布概率几乎为零,并随着湿度的增加迅速增加,在 77%时达到最大(图 3: D)。当 6-8 月日照时

数小于 200 h 时,紫楠分布概率接近于 0.5,当日照时数大于 200 h 时,紫楠的分布概率为 0 (图 3: E)。

2.3 紫楠潜在适生区

在当前气候背景下,紫楠在我国的适宜分布范围较广, Maxent 和 GARP 均预测长江中下游及以南的各省区都适宜紫楠的生长(图 4: A, B)。然而, GARP 预测的潜在适生区较连续,覆盖面积大; Maxent 预测的潜在适生区分布较分散,且面积较小。同时, GARP 预测的潜在适生区大部分为“高适生区”,而 Maxent 预测的潜在适生区大部分为“低适生区”和“中适生区”。

2.4 气候变化对紫楠潜在适生区的影响

在气候变化背景下, Maxent 和 GARP 对紫楠适宜分布区的预测结果存在差异,但是 2 个模型均预测紫楠的适宜分布区有向北扩张的趋势。在 RCP 2.6 情景下, Maxent 预测紫楠的适宜分布区面积增加,在 2050 年和 2070 年分别增加 53.8%和 42.9%,

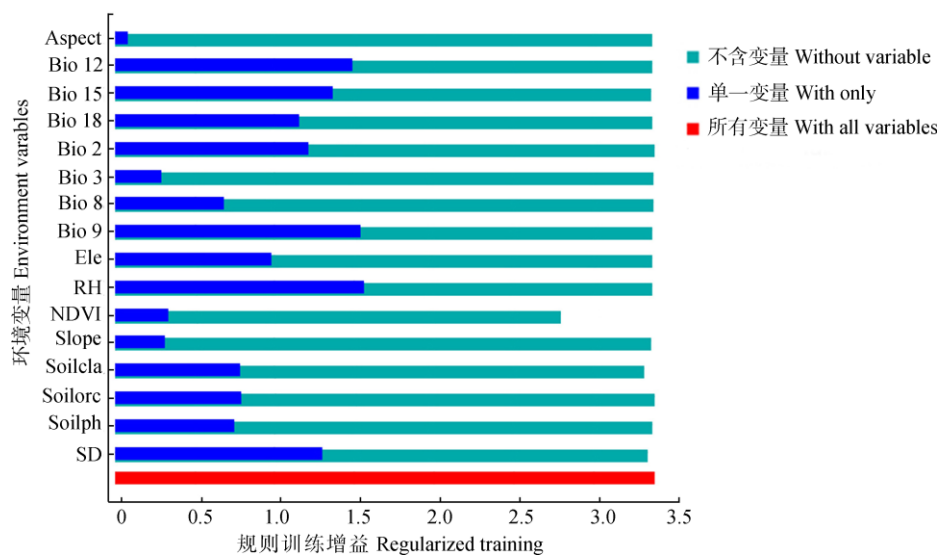


图 2 刀切法检测环境因子对紫楠分布的相对重要性

Fig. 2 Relative importance of environmental variables for *Phoebe sheareri* distribution in China by Jackknife test

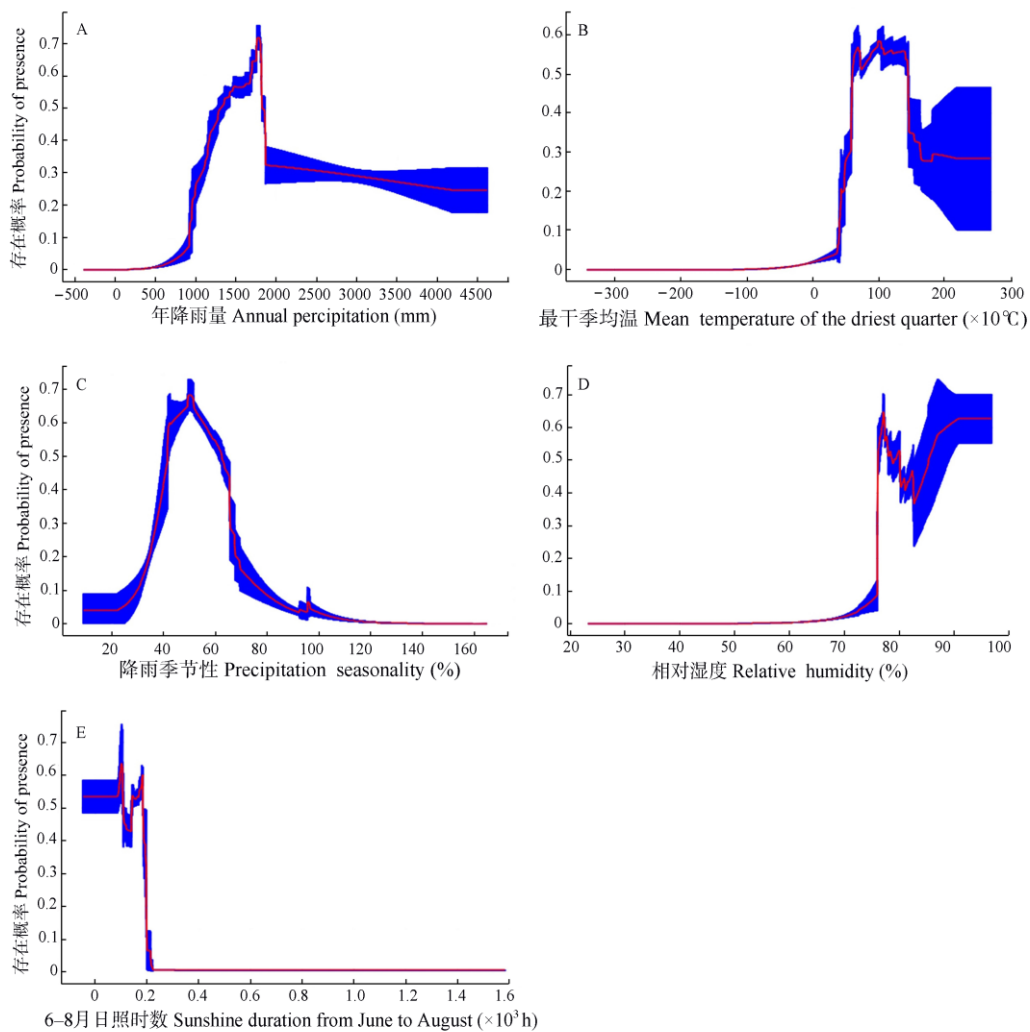


图 3 紫楠物种分布模型中重要环境因子的响应曲线

Fig. 3 Response curves of important environmental factors in *Phoebe sheareri* distribution model

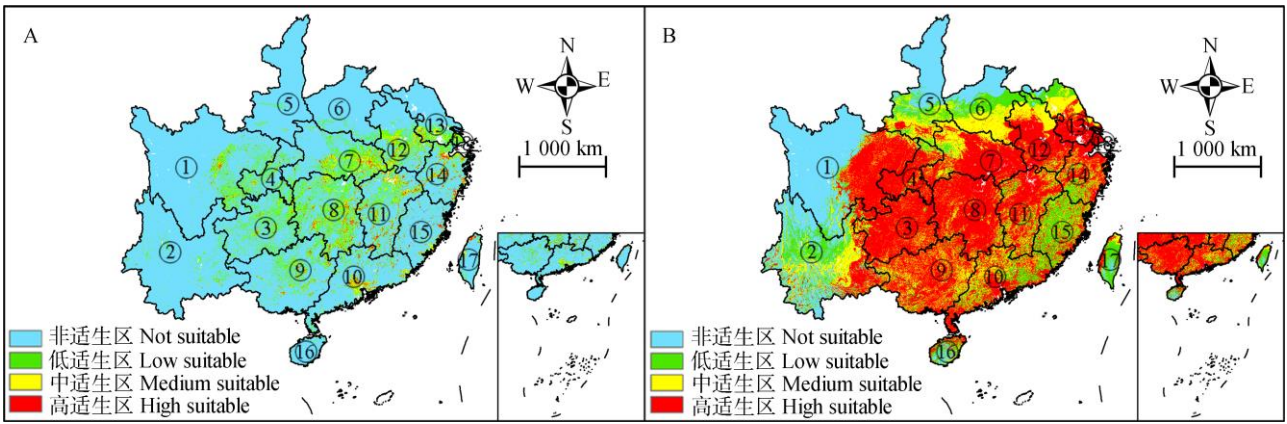


图 4 Maxent (A)和 GARP (B)预测的紫楠潜在分布区。1: 四川; 2: 云南; 3: 贵州; 4: 重庆; 5: 陕西; 6: 河南; 7: 湖北; 8: 湖南; 9: 广西; 10: 广东; 11: 江西; 12: 安徽; 13: 江苏; 14: 浙江; 15: 福建; 16: 海南; 17: 台湾; 18: 上海。

Fig. 4 Potential suitable distribution of *Phoebe sheareri* predicted by Maxent (A) and GARP (B). 1: Sichuan; 2: Yunnan; 3: Guizhou; 4: Chongqing; 5: Shanxi; 6: Henan; 7: Hubei; 8: Hunan; 9: Guangxi; 10: Guangdong; 11: Jiangxi; 12: Anhui; 13: Jiangsu; 14: Zhejiang; 15: Fujian; 16: Hainan; 17: Taiwan; 18: Shanghai.

而仅减少 8.5%和 8.8%，增加的分布区主要集中在重庆、贵州、四川东部、湖南以及安徽与河南交界处；减小的分布区主要在广东(广州及其沿海区域)和广西中部(南宁、来宾和贵港)(图 5: A, C, 表 3)。在 RCP 8.5 情景下，Maxent 预测紫楠的适宜分布区面积也呈增加趋势，但与 RCP 2.6 情景相比，增加的面积少，减少的面积多(表 3)。GARP 预测紫楠的适宜分布区整体呈缩减趋势(表 3)，在 RCP 2.6 情景下，2050 年紫楠分布区面积增加和减少大致相同，而在 2070 年，减小的分布区面积逐渐增大，主要集中在广西和广东(广州、中山、深圳和东莞)，而增加的面积主要集中在陕西中部(咸阳和宝鸡)、河南中部(漯河和周口)、安徽北部(宿州和蚌埠)和江苏北部(连云港、徐州和宿迁)。在 RCP 8.5 情景下，2050 年紫楠的分布区面积增加，而在 2070 年，分布区面积缩小(图 5: F, H, 表 3)。

3 结论和讨论

目前，国际上使用的物种分布模型数量超过 40

种^[24]。不同的模型由于算法不同，导致模拟结果存在巨大的差异^[25–27]。因此，在预测物种适生区时，采用不同的模型进行比较，筛选出最佳模型可以提高预测结果的可靠性^[25]。本研究采用 Maxent 和 GARP 两个物种分布模型对紫楠的潜在分布区进行预测，结果表明，Maxent 和 GARP 的模型表现均较好，与 GARP 相比，Maxent 的 AUC、TSS 和 Kappa 值更高($P<0.05$)，说明 Maxent 的结果具有更高的可信度。

从地理分布来看，GARP 的预测结果较为连续且分布面积更大，在一些没有紫楠记录的地区(如江苏和安徽北部，海南)也被预测为适生区，而 Maxent 预测的适生区面积较小但在细节层次上更加分明。在 GARP 和 Maxent 模型的比较研究中，也得到了类似的结果^[25–26]。GARP 和 Maxent 预测结果的差异可能是由于预测的机理不同所导致^[25]。GARP 是一种遗传算法，通过搜索与研究物种相关的环境变量，选取最优规则集来预测物种的分布区。最优模型的选取标准是具有最小的遗漏偏差，研究结果偏向于基础生态位^[28]，即在没有干扰的理想状态下，物种可能占据的最大分布范围^[25]。Maxent 基于最大

表 3 Maxent 和 GARP 预测的紫楠潜在分布面积(%)的动态变化

Table 3 Dynamic changes in distribution area (%) of *Phoebe sheareri* using Maxent and GARP

	Maxent		GARP	
	增加 Increase	减少 Decrease	增加 Increase	减少 Decrease
RCP 2.6-2050	53.8	8.5	9.5	9.4
RCP 2.6-2070	42.9	8.8	9.0	14.0
RCP 8.5-2050	34.1	20.3	18.9	11.8
RCP 8.5-2070	22.8	21.8	9.9	10.2

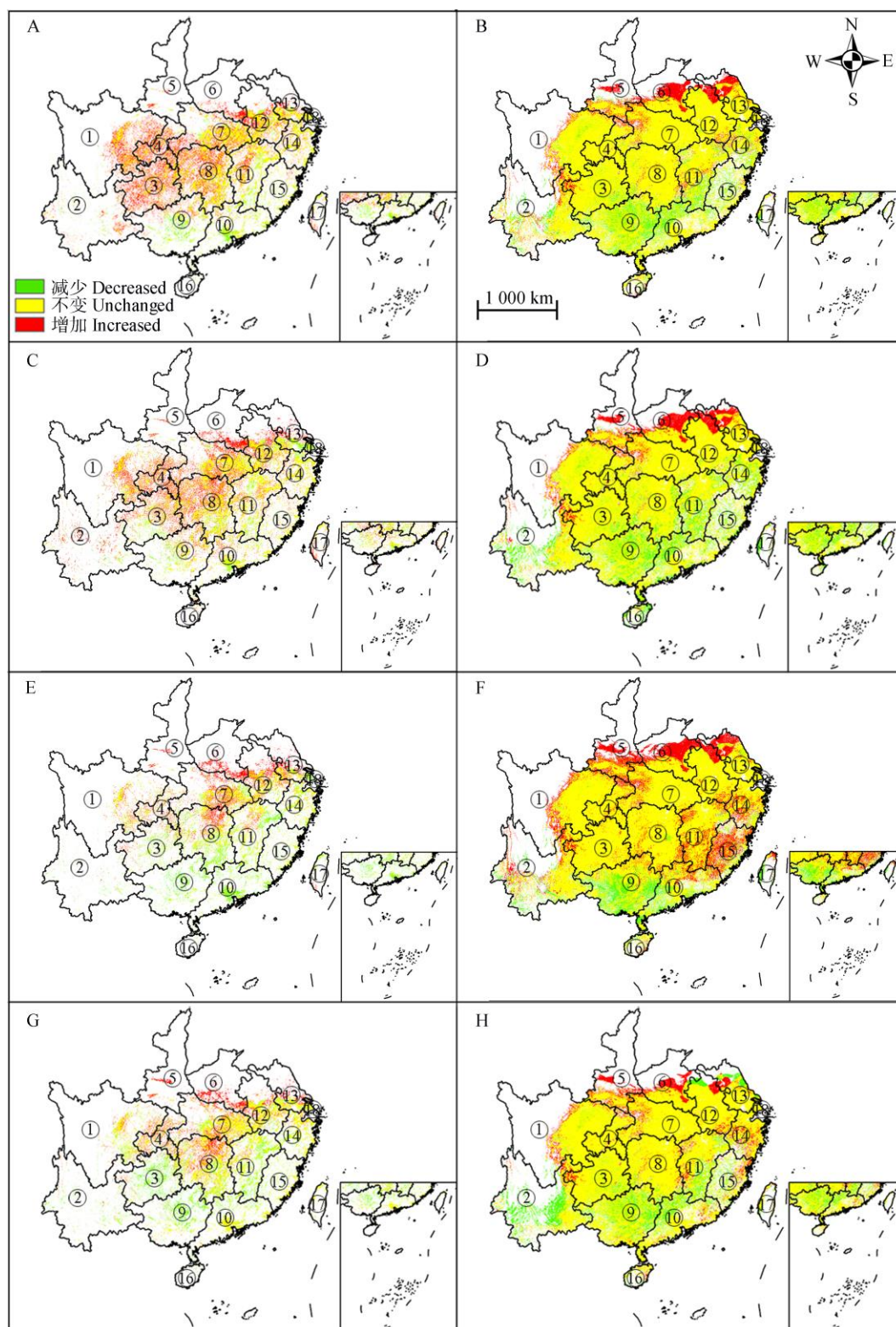


图5 Maxent (A、C、E、G)和GARP (B、D、F、H)预测的紫楠未来(2050 和 2070 年)面积变化图。A, B: RCP 2.6-2050; C, D: RCP 2.6-2070; E, F: RCP 8.5-2050; G, H: RCP 8.5-2070。1: 四川; 2: 云南; 3: 贵州; 4: 重庆; 5: 陕西; 6: 河南; 7: 湖北; 8: 湖南; 9: 广西; 10: 广东; 11: 江西; 12: 安徽; 13: 江苏; 14: 浙江; 15: 福建; 16: 海南; 17: 台湾; 18: 上海。

Fig. 5 Predicted area change map of *Phoebe sheareri* using Maxent (A, C, E, G) and GARP (B, D, F, H) in 2050 and 2070. A, B: RCP 2.6-2050; C, D: RCP 2.6-2070; E, F: RCP 8.5-2050; G, H: RCP 8.5-2070. 1: Sichuan; 2: Yunnan; 3: Guizhou; 4: Chongqing; 5: Shanxi; 6: Henan; 7: Hubei; 8: Hunan; 9: Guangxi; 10: Guangdong; 11: Jiangxi; 12: Anhui; 13: Jiangsu; 14: Zhejiang; 15: Fujian; 16: Hainan; 17: Taiwan; 18: Shanghai.

熵理论, 运算时, 随着与分布点数据关联的环境变量的录入, 熵值逐渐增加。与 GARP 相比, Maxent 侧重于排除模拟中存在的误差, 研究结果偏向于现实生态位^[27], 即在现实条件下, 物种的分布范围。

在当前气候条件下, 紫楠的潜在分布区主要分布在长江中下游及以南的各省区, 如贵州、广西、湖南、湖北、四川东部、浙江、福建和广东等地, 预测区域与植物志记载基本吻合。气候是影响植物地理分布的最重要的因子^[29-30]。从刀切法分析和环境因子贡献率来看, 年降雨量和降雨的季节性这两个环境因子的累积相对贡献率达 55.0%, 说明降雨是影响紫楠潜在分布的主要环境因子。紫楠的适生区主要受亚热带季风气候影响, 整体较湿润^[31]。水分供应亏缺可能会导致植物导管发生栓塞化, 进而影响到植物的生长发育动态^[30]。当紫楠受到干旱胁迫后, 其光合速率、气孔导度和叶片蒸腾速率分别下降 66%、76%和 75%^[32], 推测降雨量可能通过影响紫楠的光合、呼吸以及蒸腾速率等代谢过程来影响其适应性。

除降雨外, 最干季均温的贡献率达 22.1%, 也是影响紫楠分布的重要环境因子。通过响应曲线, 最干季均温低于 4℃的生境中基本不会有紫楠的分布, 这与前人^[33]的研究结果一致。紫楠喜温暖的环境, 其种子适宜的萌发温度为 25℃, 在分布区北缘幼苗容易受到不同程度的冻害, 严重时会导致冻梢现象的发生^[18,33]。低温对紫楠的种子萌发、幼苗体内的酶活性、渗透调节物质以及叶绿素含量都具有显著影响^[18,34]。另外, Pearson 相关性分析表明, 最干季均温与最冷季最低温呈极显著的正相关, 考虑到气候变量间的共线性关系, 最冷季最低温并未用于后续建模; 但是紫楠对最干季均温的敏感性可能也暗示了最冷季最低温也会影响紫楠的生长。因此, 低温可能是影响紫楠分布的限制因子, 若对紫楠进行引种栽培, 需要注意温度和水分是否能够满足紫楠的生长需求^[33-35]。相对湿度和 6-8 月日照时数也具有较高的贡献率, 也是影响紫楠分布的重要因素。虽然紫楠喜阴湿的环境, 然而这两个因子对紫楠生长发育的影响有待进一步的研究。

气候变化影响物种的分布格局^[30]。一些物种由于适应性较强, 通过表型可塑性可以适应气候变化, 甚至其适宜分布区面积会增加, 而另一些物种由于不能适应, 会出现分布区缩减或向高纬度和高海拔地区迁移^[2-3,36]。本研究采用 2 种气候变化情景

RCP 2.6 和 RCP 8.5 对紫楠的潜在分布区进行模拟, 结果表明未来不同气候情境下的适宜分布区的面积变化和分布格局存在差异, 这说明气候变化对紫楠的适宜分布区影响存在不确定性。然而, 2 个模型均预测紫楠的适宜分布区在未来气候变化情境下会向北迁移。新增的适生区主要在秦岭淮河线地区。根据紫楠当前的实际分布情况可知, 紫楠喜生长在温暖湿润的环境中, 其耐寒能力有限。秦岭淮河线属北亚热带和暖温带分界区域, 降水丰沛, 随着气候变暖, 附近区域温度上升, 可能会适宜紫楠的生长。除秦岭-淮河线地区以外, 在四川盆地边缘也出现了新的适生区。四川盆地边缘的山地海拔较高。在气候变化的影响下, 具有较高海拔的山地气温上升, 因而很可能成为紫楠引种栽培的优良基地。另外, 在气候变化下, 华南地区温度上升, 降水减少, 极端高温事件发生频率明显升高^[30], 这些变化可能会影响到紫楠的光合、呼吸与蒸腾等生理指标。因此, 广东、云南、广西和海南等地区的适生区面积会显著减少, 适生区的北移可以减缓高温所带来的危害。

本研究结果对紫楠的保护和生物地理学研究都具有重要的意义。对于丧失的潜在分布区, 如广东和云南, 可以采取迁地保护措施, 将紫楠移植到适宜分布的区域。对于秦岭-淮河线新增的分布区, 如安徽和河南, 应该制定合理的土地利用计划, 进行人工引种栽培; 而对于未发生变化的分布区, 可以作为紫楠应对气候变化的避难所, 应该加强对这些地方紫楠的管理。同时, 可以根据筛选出的影响紫楠分布的重要环境因子, 创造适宜紫楠生长的人工环境, 甚至可以发展人工造林, 充分发挥紫楠的经济价值。然而, 本研究也存在一定的局限性。首先, 由于气候变化的不确定性, 采用的 2 个气候情景未必与将来的气候变化相符, 但是至今没有更好的解决办法; 第二, 除选择的 28 个环境因子外, 还有其他一些因素影响物种分布, 如种子传播能力、种间关系、土地利用和人为干扰等, 由于缺少数据, 本文对此未做考虑。

参考文献

- [1] LAWLER J J, SHAFER S L, WHITE D, et al. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere [J]. *Ecology*, 2009, 90(3): 588-597. doi: 10.1890/08-0823.1.
- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. *Climate change 2013:*

- The physical science basis [M]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [3] ZHANG K L, YAO L J, MENG J S, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 634: 1326–1334. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.112.
- [4] THUILLER W, LAVOREL S, ARAÚJO M B. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2005, 14(4): 347–357. doi: 10.1111/j.1466-822X.2005.00162.x.
- [5] FITZPATRICK M C, GOVE A D, SANDERS N J, et al. Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: The *Banksia* (Proteaceae) of western Australia [J]. *Glob Change Biol*, 2008, 14(6): 1337–1352. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01559.x.
- [6] HEIKKINEN R K, LUOTO M, ARAÚJO M B, et al. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change [J]. *Prog Phys Geog*, 2006, 30(6): 751–777. doi: 10.1177/0309133306071957.
- [7] CAO X F, QIAN G L, HU B S, et al. Prediction of potential suitable distribution area of *Flaveria bidentis* in China based on niche models [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(12): 3063–3069.
- 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3063–3069.
- [8] FRANKLIN J. Species distribution models in conservation biogeography: Developments and challenges [J]. *Divers Distrib*, 2013, 19(10): 1217–1223. doi: 10.1111/ddi.12125.
- [9] ELITH J, LEATHWICK J R. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2009, 40(1): 677–697. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
- [10] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Modell*, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [11] STOCKWELL D. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction [J]. *Int J Geogr Inf Sci*, 1999, 13(2): 143–158. doi: 10.1080/136588199241391.
- [12] PADALIA H, SRIVASTAVA V, KUSHWAHA S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of Maxent and GARP [J]. *Ecol Inf*, 2014, 22: 36–43. doi: 10.1016/j.ecoinf.2014.04.002.
- [13] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. *Ecography*, 2006, 29(5): 773–785. doi: 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x.
- [14] Delectis Florae Republicae Popularis Sinicae Agenda Academiae Sinicae Edita. Florae Republicae Popularis Sinicae, Tomus 31 [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第31卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [15] LI L, LI J, LI X W. Taxonomic revision of five species of the Genus *phoebe* (Lauraceae) from China [J]. *Plant Divers Resour*, 2011, 33(2): 157–160. doi: 10.3724/SP.J.1143.2011.10148.
- 李朗, 李捷, 李锡文. 国产樟科楠属五种植物之分类修订 [J]. *植物分类与资源学报*, 2011, 33(2): 157–160. doi: 10.3724/SP.J.1143.2011.10148.
- [16] LI J, LU Y F, YANG A N, et al. Species diversity of natural *Phoebe sheareri* communities with different disturbance intensities [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2019, 36(2): 279–288. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.009.
- 李军, 陆云峰, 杨安娜, 等. 紫楠天然群落物种多样性对不同干扰强度的响应 [J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2): 279–288. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.009.
- [17] DENG S Q, YAN J F, GUAN Q W. Spatial structure of scenic forest of *Phoebe sheareri* in Baohuashan, Jiangsu Province [J]. *J NE For Univ*, 2010, 38(4): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2010.04.010.
- 邓送求, 闫家锋, 关庆伟. 宝华山紫楠风景林分空间结构分析 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(4): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2010.04.010.
- [18] LI Z, WANG S J, LIU C L, et al. Study on seed germination characteristics of *Phoebe sheareri* and *Phoebe chekiangensis* [J]. *N Hort*, 2012(7): 58–60.
- 李珍, 王素娟, 刘纯玲, 等. 紫楠及浙江楠种子萌发特性研究 [J]. *北方园艺*, 2012(7): 58–60.
- [19] JIANG H H. Study on isolation and identification of *Phoebe sheareri* and its bioactivities [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 23–59.
- 姜浩瀚. 紫楠有效成分分离纯化鉴定及其生物活性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 23–59.
- [20] WU T W, SONG L C, LI W P, et al. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies [J]. *J Meteorol Res*, 2014, 28(1): 34–56. doi: 10.1007/s13351-014-3041-7.
- [21] HU J H, LIU Y. Unveiling the conservation biogeography of a data-deficient endangered bird species under climate change [J]. *PLoS One*,

- 2014, 9(1): e84529. doi: 10.1371/journal.pone.0084529.
- [22] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A. A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter [J]. *Ecography*, 2013, 36(10): 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.
- [23] PETERSON A T, PAPEŠ M, EATON M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: A comparison of GARP and Maxent [J]. *Ecography*, 2007, 30(4): 550–560. doi: 10.1111/j.0906-7590.2007.05102.x.
- [24] LIU X T, YUAN Q, NI J. Research advances in modelling plant species distribution in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, 43(4): 273–283. doi: 10.17521/cjpe.2018.0237.
- 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. doi: 10.17521/cjpe.2018.0237.
- [25] ELITH J H, GRAHAM C P, ANDERSON R, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129–151. doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
- [26] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. *Ecography*, 2006, 29(5): 773–785. doi: 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x.
- [27] KONG W Y, LI X H, ZOU H F. Optimizing Maxent model in the prediction of species distribution [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30(6): 2116–2128.
- 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2116–2128.
- [28] ZHANG C, CHEN L, TIAN C M, et al. Predicting the distribution of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) with GARP and Maxent models [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, 13(5): 23–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20150516.
- 张超, 陈磊, 田呈明, 等. 基于 GARP 和 Maxent 的云杉矮榧寄生分布区的预测 [J]. *北京林业大学学报*, 2016, 13(5): 23–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20150516.
- [29] TAN Y F, ZUO X Q. Studies on potential suitable growth areas and protection of *Camellia nitidissima* based on GIS and Maxent model [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, 26(1): 24–32. doi: 10.11926/jtsb.3796.
- 谭钰凡, 左小清. 基于 GIS 与 Maxent 模型的金花茶潜在适生区与保护研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(1): 24–32. doi: 10.11926/jtsb.3796.
- [30] GUAN X Y, SHI W, CAO K F. Effect of climate change in future on geographical distribution of widespread *Quercus acutissima* and analysis of dominant climatic factors [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, 26(6): 661–668. doi: 10.11926/jtsb.3898.
- 关心怡, 石慰, 曹坤芳. 未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(6): 661–668. doi: 10.11926/jtsb.3898.
- [31] NI B Y. Selection and evaluation of precious timber species in Fujian province and afforestation districts [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016: 11–45.
- 倪必勇. 福建省珍贵用材树种选评与造林区划 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016: 11–45.
- [32] XIE T F, XUE L. Effects of drought stress on photosynthetic parameters of four greening seedlings [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2017, 44(12): 53–58. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2017.12.009.
- 谢腾芳, 薛立. 干旱胁迫对 4 种园林绿化树种幼苗光合参数的影响 [J]. *广东农业科学*, 2017, 44(12): 53–58. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2017.12.009.
- [33] CHENG X. Preliminary report on introduction and cultivation of *Phoebe sheareri* [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 1994, 21(4): 17–19, 34.
- 程翔. 紫楠引种栽培初报 [J]. *江苏林业科技*, 1994, 21(4): 17–19, 34.
- [34] WANG Z M, ZHOU T T, XUE L, et al. Effect of low temperature stress on physiological characteristics of seedlings of four landscape species [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2016, 43(2): 209–214. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20160311.023.
- 王卓敏, 周彤彤, 薛立, 等. 低温胁迫对 4 种绿化幼苗生理的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(2): 209–214. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20160311.023.
- [35] DUAN F Z. Cultivation techniques of *Phoebe sheareri* [J]. *Anhui For Sci Technol*, 2004(1): 31–32.
- 段凤芝. 紫楠培育技术 [J]. *安徽林业科技*, 2004(1): 31–32.
- [36] DEB J C, PHINN S, BUTT N, et al. The impact of climate change on the distribution of two threatened *Dipterocarp* trees [J]. *Ecol Evol*, 2017, 7(7): 2238–2248. doi: 10.1002/ece3.2846.