

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202209052

杨善云, 安明态, 刘锋, 等. 2023. 基于 MaxEnt 模型的贵州省楠木潜在适生区预测 [J]. 广西植物, 43(5): 846–857.
YANG SY, AN MT, LIU F, et al., 2023. Prediction of potential suitable area of *Phoebe zhennan* in Guizhou Province based on MaxEnt model [J]. *Guihaia*, 43(5): 846–857.



基于 MaxEnt 模型的贵州省楠木潜在适生区预测

杨善云^{1,2}, 安明态^{2*}, 刘 锋², 张 央³, 田 力², 陈翠玉¹

(1. 广西生态工程职业技术学院 园林与城乡规划学院, 广西 柳州 545005; 2. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 3. 贵阳市野生动植物保护站, 贵阳 550002)

摘 要: 为揭示楠木 (*Phoebe zhennan*) 在贵州省潜在分布特征及其对环境因子的响应模式, 该研究基于楠木在贵州省的地理分布点, 运用最大熵模型 (MaxEnt) 与地理信息系统 (ArcGIS) 方法, 结合气候、土壤及地形等 30 个环境因子, 预测楠木在贵州省的潜在适生区, 并分析了影响楠木生长的主要环境因子。结果表明: (1) MaxEnt 模型 AUC 平均值为 0.843, 对贵州省楠木地理分布预测结果良好; 楠木潜在适生区呈现以贵州省东北为重点区, 从北到南、由东向西适生等级依次降低的趋势, 高适生区主要在黔东南铜仁市、黔北遵义市中东部。(2) 楠木在贵州省的潜在分布面积为 80 013.47 km², 占全省总面积的 45.4%, 其中高适生区面积占全省总面积的 17.4%。(3) 等温性 (Bio3)、最暖季度降水量 (Bio18)、最湿月降水量 (Bio13)、最干月降水量 (Bio14)、最冷月最低温 (Bio6) 和温度季节性变动系数 (Bio4) 等是影响楠木在贵州省潜在分布的重要环境因子。该研究结果为贵州省楠木资源保护区划、种苗扩繁、造林推广与开发利用提供了科学依据。

关键词: 楠木, MaxEnt 模型, 环境因子, 潜在分布, 贵州

中图分类号: Q948.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2023)05-0846-12

Prediction of potential suitable area of *Phoebe zhennan* in Guizhou Province based on MaxEnt model

YANG Shanyun^{1,2}, AN Mingtai^{2*}, LIU Feng², ZHANG Yang³, TIAN Li², CHEN Cuiyu¹

(1. School of Landscape Gardening & Urban Planning, Guangxi Ecological Engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, Guangxi, China; 2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guiyang Wildlife and Plant Protection Station, Guiyang 550002, China)

Abstract: To reveal the potential distribution characteristics of *Phoebe zhennan* in Guizhou Province and its response mode to environmental factors. Based on the geographical distribution points of *P. zhennan* in Guizhou Province, this

收稿日期: 2023-02-19

基金项目: 2021 年广西教育系统优秀教师出国留学深造项目 (桂教师培 [2021]3 号); 2022 年度广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目 (2022KY1239); 贵州省第二次全国重点保护野生植物资源调查项目; 贵州省新增国家重点保护野生植物资源调查评估项目 (MCHC-ZC20222009)。

第一作者: 杨善云 (1977-), 硕士, 副教授, 主要从事植物分类和植物多样性研究, (E-mail) 362608786@qq.com。

* 通信作者: 安明态, 博士, 正高级实验师, 主要从事植物分类和生物多样性研究, (E-mail) gdanmingtai@126.com。

study used MaxEnt and ArcGIS methods combining with 30 environmental factors such as climate, soil and topography to predict the potential habitat of *P. zhennan* in Guizhou Province and analyze the main environmental factors affecting the growth of *P. zhennan*. The results were as follows: (1) The AUC of MaxEnt model had an average value of 0.843, which indicated that it could well predict the geographical distribution of *P. zhennan* in Guizhou Province. The northeast of Guizhou Province was the key area of its potential habitat, with a decreasing trend from north to south and from east to west. The high suitable areas were mainly located in Tongren City, northeastern Guizhou Province and mid-eastern Zunyi City, northern Guizhou Province. The middle suitable and low suitable areas were concentrated in northern Tongren City, north-central Miao and Dong autonomous prefecture in southeastern Guizhou Province, Guiyang, northeastern Bijie City and northeastern Buyi and Miao autonomous prefecture in southern Guizhou Province. Other areas were not suitable for *P. zhennan* to grow. (2) The potential distribution area of *P. zhennan* in Guizhou Province was 80 013.47 km², which accounted for 45.4% of the whole province's land area. The high suitable area covered 30 565.66 km², and the share of high suitable area was 17.4%. (3) Environmental factors including isothermality (Bio3), precipitation of the warmest quarter (Bio18), precipitation of the wettest month (Bio13), precipitation of the driest month (Bio14), minimum temperature of the coldest month (Bio6) and temperature seasonality (Bio4) were the main environmental factors affecting the potential distribution of *P. zhennan* in Guizhou Province. In conclusion, the results elucidate that the geographical distribution of *P. zhennan* in Guizhou Province and the main environmental factors affecting its distribution are of great significance. The results of this study will provide a scientific basis for seedling expansion, afforestation promotion, development and utilization of *P. zhennan* in Guizhou Province.

Key words: *Phoebe zhennan*, MaxEnt model, environmental factor, potential distribution, Guizhou Province

楠木 (*Phoebe zhennan*) 为樟科 (Lauraceae) 楠属 (*Phoebe*) 常绿大乔木, 是中国特有种、国家二级保护植物、《中国物种红色名录》易危 (VU) 种。楠木树干通直、材质坚实、纹理美观、结构致密、黄褐色带金黄色光泽、木味香馥, 是名贵木材“金丝楠木”的主要树种, 曾是明清时期帝王的“皇木”(郑万钧, 1983), 具有极高的经济、生态、观赏价值, 倍受人们的关注。该树种主要分布于中国的四川、重庆、贵州、湖南和湖北等地, 贵州是其野生资源集中分布最多的地区之一。贵州省楠木主要生长于海拔 600~1 000 m 的山坡中下部常绿阔叶林中, 是地带性常绿阔叶林及常绿落叶阔叶混交林的常见树种(贵州省林业厅, 2000)。多年来, 由于气候环境的变化及人为过度采伐的影响, 楠木受到破坏严重、成林少, 加之生境的破碎化和退化导致其资源日益匮乏, 因此对其资源的保护显得越来越迫切。国务院关于支持贵州在新时代西部大开发上闯新路的意见(国发[2022]2号)中已明确把楠木列入珍稀濒危野生动植物拯救保护工程。因此, 摸清楠木在贵州省的分布格局, 并研究其生态适宜性意义重大。

物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 是基于已知物种分布点与所对应研究区的

环境变量, 运用不同的模型算法投影到特定景观中, 其结果可预测物种潜在分布区、物种丰富度及物种生境选择与景观格局变化的关系等 (Franklin, 2010)。目前, 物种分布模型较多, 常用的有最大熵 (MaxEnt) 模型、基于规则集的遗传算法模型 (GARP)、生态位因子分析模型 (ENFA) 及生物气候分析系统 (Bioclim) 等 (郭彦龙等, 2020; 周炳江等, 2022)。在众多模型中, MaxEnt 模型使用最为广泛 (刘晓彤等, 2019), 其优点: 预测结果精度较高, 模型可以仅依靠物种存在点数据建模, 在统一建模框架下可以处理连续环境变量与分类环境变量 (郭彦龙等, 2020)。MaxEnt 模型广泛用于物种分布区预测、濒危物种保护、病虫害的预测与防治、入侵植物防控等 (崔麟和魏洪义, 2016; 李佳慧等, 2021; 叶兴状等, 2021; Devendra & Sandeep, 2022); 此模型从全球的大尺度范围到物种廊道的小尺度范围都取得了较好的预测结果 (张涛等, 2022)。因此, 本研究选择 MaxEnt 模型进行贵州省楠木潜在适生区预测。

目前, 对于楠木的研究主要集中在繁育技术、生理生态、居群表型性状变异及群落结构等 (曾凡勇和冯邦贤, 2014; 陈玉凤等, 2018; 刘瑜霞等, 2020; 欧汉彪等, 2020), 也有学者开展楠木的野生

资源调查与中国潜在适宜栽培区预测(丁鑫等, 2015; 辜云杰等, 2021) 提出楠木常见的混淆种及区分方法, 并开展其在中国潜在适宜栽培区预测。然而, 由于尺度较大, 尚没有针对贵州省具体适生区的详细研究, 因此难以达到科学保护和培育区划的目的。基于此, 本研究采用 MaxEnt 模型与 ArcGIS 软件, 收集贵州省楠木的地理分布点数据、生长环境的相关因子(气候、土壤和地形等)数据, 通过模型模拟预测贵州省楠木潜在适生区及适宜生境, 拟探讨:(1) 贵州省楠木潜在适生区的地理分布格局;(2) 影响贵州省楠木地理分布的重要环境因子, 以及楠木潜在适生区与环境因子之间的关系;(3) 贵州省楠木保护和开发利用的措施。因此, 本研究结合楠木在贵州省的生长环境, 从生态位模型角度出发预测贵州省楠木潜在适生区的地理分布, 推断影响其分布的主要环境因子, 以期为贵州省楠木的资源保护区划、种苗扩繁、造林推广及开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省地处长江和珠江上游地区、云贵高原东部, 位于 $103^{\circ}36' - 109^{\circ}35' E$, $24^{\circ}37' - 29^{\circ}13' N$ 之间, 地处中国西南内陆地区腹地, 地势呈西高东低, 自中部向北、东、南三面倾斜。境内平均海拔约 1 100 m, 总面积 17.62 万 km^2 。全境属于亚热带湿润性季风气候, 温暖湿润, 降水充沛, 年均气温为 $8 \sim 20^{\circ}C$, 年降水量 1 100~1 400 mm, 相对湿度 80%, 日照时数为 1 200~1 500 h。截至 2021 年底, 全省的森林覆盖率 62.12%, 森林植被亚热带性质明显、类型复杂、种类繁多、地域性分明。

1.2 楠木分布数据与整理

贵州省楠木地理分布点数据主要源自贵州省第二次全国重点保护野生植物资源调查(2013—2018年)资料共 2 359 个, 结合中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn>)、中国植物图像库(<http://ppbc.iplant/>)、国家标本平台(<http://www.nsii.org.cn>)、全球物种多样性信息库(<http://www.gbif.org>)和国内外发表的相关文献资料等网络资源获取 226 个。其中, 贵州省第二次全国重点保护野生植物资源调查资料楠木地理分布点占 88.9%, 网络资源获取楠木地理分布点 11.1%。对

有详细地理位置但无经纬度信息的地理分布点, 使用 91 卫图助手软件定位获取其经纬度, 剔除重复、无效和模糊的分布点。物种分布点相距太近会造成模型过度拟合(王茹琳等, 2017; 许幼霞等, 2017), 通过 ArcGIS 10.2 软件中缓冲区法对获取的楠木分布点数据进行排除空间关联性较大的分布点。具体做法: 设置半径为 1.0 km 的缓冲区, 当两个分布点间距小于 2.0 km 时, 只保留其中一点, 最终获得有效地理分布点 1 191 个; 分布点数据的经纬度采用十进制格式输入 Excel 软件中, 并保存为 .csv 格式备用, 接着采用核密度分析法对楠木分布点数据进行热点分析。

1.3 环境因子数据筛选

环境因子采用生物气候变量、土壤变量及地形变量等 30 个环境因子(表 1)。生物气候因子数据来自世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>), 包含 19 个因子; 地形变量采用地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>), 经 ArcGIS 软件处理获得海拔、坡度和坡向共 3 个因子; 土壤变量来自世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version), 包含 8 个因子, 贵州省地图下载于国家基础地理信息系统网站(<http://nfgis.ns-di.gov.cn>)。数据采用 ArcGIS 10.2 处理, 统一坐标系为 WGS1984, 空间分辨率位 30", 保存的文件格式为 .asc, 用于 MaxEnt 模型预测。

为减少环境因子间强相关性导致的模型预测结果过度拟合, 通过 MaxEnt 模型和 SPSS 分析获得影响贵州省楠木分布的主要环境因子(陈禹光等, 2022)。使用 MaxEnt 模型对所有环境因子建模, 运行 10 次, 获得所有环境因子的贡献值(表 2), 取其贡献值 $\geq 1\%$ (周炳江等, 2022) 的环境因子进一步进行 Pearson 相关系数法分析(图 1)。若相关系数 $|r| \geq 0.8$, 两个因子间则存在共线性关系, 选择贡献率高的环境因子进行最后的模型预测, 最终选择 6 个重要环境因子(表 3)。

1.4 MaxEnt 模型预测

将有效地理分布点和模型预测环境因子的数据导入 MaxEnt 软件, 预测贵州省楠木潜在适生区。模型运行前, 勾选创建响应曲线(create response curves)和刀切法衡量变量的重要性(do jackknife to measure variable importance)命令, 设置测试验证数据集为贵州省楠木地理分布点的 25%, 训练数据集为贵州省楠木地理分布点的 75%,

表 1 用于楠木潜在地理分布建模的环境因子
Table 1 Modeling environment factors for potential geographic distribution of *Phoebe zhennan*

因子代号 Code of factor	因子含义 Description for factor	单位 Unit
Bio1	年平均温度 Annual mean temperature	℃
Bio2	平均气温日较差 Monthly mean temperature range	℃
Bio3	等温性 Isothermality	—
Bio4	温度季节性变动系数 Temperature seasonality (standard deviation ×100)	—
Bio5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month	℃
Bio6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	℃
Bio7	气温年较差 Temperature annual range	℃
Bio8	最湿季度平均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃
Bio9	最干季度平均温 Mean temperature of the driest quarter	℃
Bio10	最暖季度平均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃
Bio11	最冷季度平均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
Bio12	年均降水量 Annual precipitation	mm
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
Bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality	—
Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
Bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
Altitude	地表高程 Altitude	m
Slope	坡度 Slope	°
Aspect	坡向 Aspect	°
T_TEXTURE	顶层土壤质地 Top soil texture	—
SU_SYM90	土壤名称 Soil name	—
AWC_CLASS	土壤有效水含量 Soil effective water content	%
T_PH_H2O	酸碱度 Soil reaction of topsoil	—
T_CACO3	碳酸盐或石灰含量 Calcium carbonate (lime) content in the topsoil	%
T_CLAY	黏土含量 T_CLAY Percentage of clay in the topsoil	%
T_OC	有机碳含量 T_OC Percentage of organic carbon in the topsoil	%
T_SAND	沙含量 T_SAND Percentage of sand in the topsoil	%

为确保模型结果的稳定,进行 10 次自举法重复,同时勾选 Random seed 和 Write plot data 命令,其他参数为默认值,选择逻辑斯蒂格式(Logistic)输出结果。

采用受试者工作特征曲线 ROC (receiver operating characteristic curve) 下的面积,即 AUC (area under the curve) 值评估模型预测的准确性。AUC 值范围为 0~1.0,其值越大,预测精度就越高。0.5<AUC≤0.6 时,预测精度极低;0.6<AUC≤0.7 时,结果较差;0.7<AUC≤0.8 时,结果一般;0.8<AUC≤0.9 时,预测精度良好;0.9<AUC≤1 时,预测精度非常好(张涛等,2022)。

1.5 贵州省楠木适宜生境的划分

采用 ArcGIS 软件对 MaxEnt 模型预测结果进行楠木适生区的划分及可视化绘制。将贵州省矢量地图和预测结果的平均值.asc 文件导入 ArcGIS 软件,结合空间分析工具(spatial analyst tools)中的重分类命令(reclassify)对预测结果进行重分类。预测结果是楠木潜在适生区分布概率值为 $0 \leq P \leq 1$,利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)以结果中最小存在阈值(minimum training presence)0.01,对适生区按从低到高划分为 4 个等级(宁瑶等,2018),即 $P \leq 0.01$ 为非适生区, $0.01 < P \leq 0.27$ 为低适生区, $0.27 < P \leq 0.47$ 为中适生区, $0.47 < P \leq 0.86$ 为高适生区,除去非适生区,其他区域均为潜在适生区。使用 ArcGIS 软件对潜在适生区进行可视化处理,计算各区域对应的面积。

2 结果与分析

2.1 贵州省楠木分布及热点情况

根据统计分析,楠木在贵州省分布的高热点区域(图 2)主要集中在遵义市的道真县、桐梓县、绥阳县、务川县、凤冈县、湄潭县、余庆县和习水县,铜仁市的江口县、石阡县、思南县、印江县、德江县、沿河县和松桃苗族自治县。此外,少量楠木分布在黔东南苗族侗族自治州剑河县、雷山县和丹寨县,遵义市的赤水市、仁怀市和正安县,铜仁市的玉屏县,黔南布依族苗族自治州的都匀市、瓮安县、三都县,贵阳市的开阳县、息烽县、修文县,毕节市的金沙县,其他区域尚未见楠木分布。总体趋势是以东北部为主,由北向南,自东向西的区

表 2 所有预测因子的贡献值
Table 2 Contribution rates of all predictors

序号 No.	变量 Variable	贡献百分比 Percent of contribution (%)	序号 No.	变量 Variable	贡献百分比 Percent of contribution (%)
1	Bio4	48.1	16	Bio5	0.6
2	Bio3	19.8	17	Bio8	0.3
3	Bio13	6.5	18	Bio11	0.3
4	Bio7	5.1	19	SU_SYM90	0.1
5	Bio17	3.3	20	T_OC	0.1
6	Bio6	2.9	21	pH	0.1
7	Bio2	2.7	22	Bio1	0.1
8	Bio18	1.8	23	T_CLAY	0.1
9	Bio15	1.7	24	Altitude	0
10	Bio14	1.6	25	T_TEXTURE	0
11	Bio16	1.1	26	T_SAND	0
12	Aspect	0.9	27	Bio10	0
13	Bio12	0.9	28	Bio9	0
14	AWC_CLASS	0.8	29	T_CACO3	0
15	Slope	0.7	30	Bio19	0

表 3 用 MaxEnt 模型预测环境因子的贡献率
Table 3 Contribution rates of environmental
factors predicted by MaxEnt

序号 No.	变量 Variable	贡献百分比 Percent of contribution (%)
1	Bio4	51.9
2	Bio3	26.9
3	Bio13	8.5
4	Bio14	7.5
5	Bio6	3.1
6	Bio18	2.0

域逐渐减少,其分布热点区具有气温高、温差大、无严寒,雨量较充足、海拔低等特点。

2.2 模型精度分析

以 ROC 曲线作为 MaxEnt 模型预测的判断依据,所有环境因子与模型预测环境因子运行 10 次的 AUC 平均值分别为 0.849 和 0.843(图 3), $0.8 < AUC \leq 0.9$,预测精度良好。

2.3 贵州省楠木的预测分布及面积分析

利用 ArcGIS 软件中自然间断点分级法处理

MaxEnt 模型预测结果的平均值,得出贵州省楠木潜在适生区分布图(图 4)。根据预测,其潜在适生区主要位于贵州省北部及东部区域,具体为铜仁市、遵义市、黔东南苗族侗族自治州中北部、贵阳市东北部、毕节市东北部和黔南布依族苗族自治州东北部,潜在的分布面积为 80 013.47 km²,占贵州省的 45.4%(表 4)。其中,高适生区主要集中在铜仁市和遵义市中东部,面积为 30 565.66 km²,占贵州省的 17.4%;中、低适生区主要位于铜仁市西部、黔东南苗族侗族自治州中北部、贵阳市和毕节市东北部以及黔南布依族苗族自治州东北部;非适生区主要集中在毕节市中西部、六盘水市、安顺市、黔西南布依族苗族自治州、贵阳市和黔南布依族苗族自治州西南部等区域,面积为 96 153.53 km²,占贵州省的 54.6%。总体上,楠木在贵州省的潜在适生区分布呈现以东北为重点区,从北到南、由东向西适生等级依次降低的趋势。

2.4 用于模型预测的环境因子分析

基于刀切法检验模型运算结果(图 5)显示,单独用某一环境因子建模时,各因子对正规化训练增益效果排名为 Bio3 > Bio4 > Bio18 > Bio13 > Bio14 > Bio6,其中 Bio3 的增益值最高,说明等温性具有最

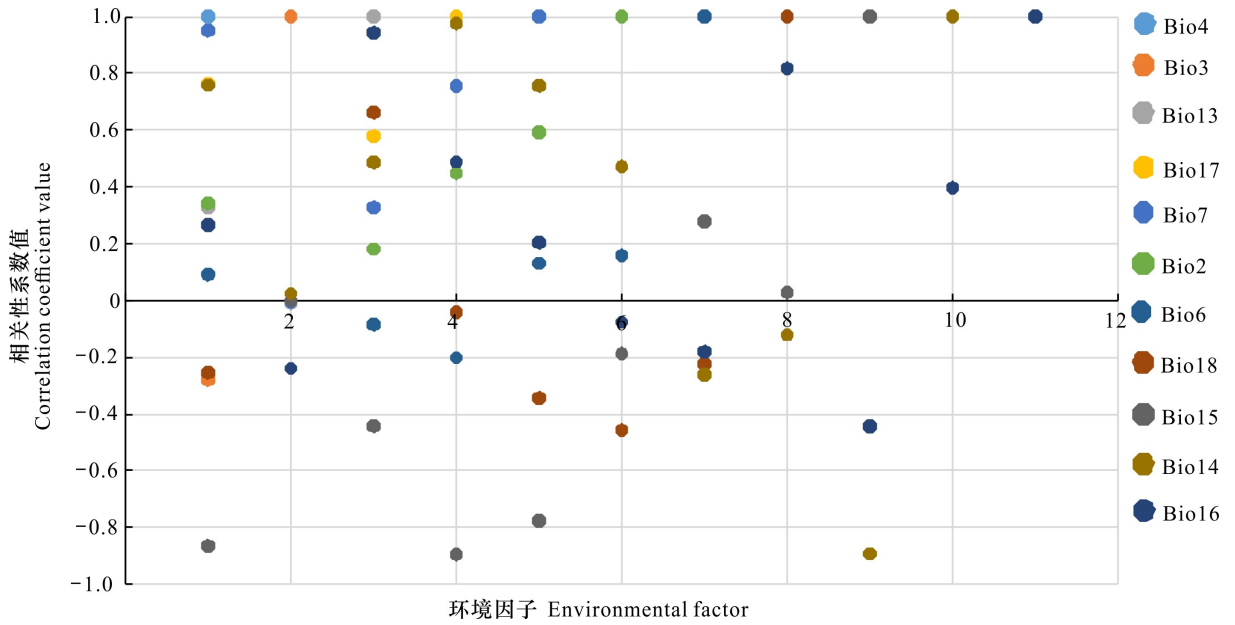


图 1 环境因子的 Pearson 相关系数法分析

Fig. 1 Pearson correlation coefficient method analysis of environmental factors

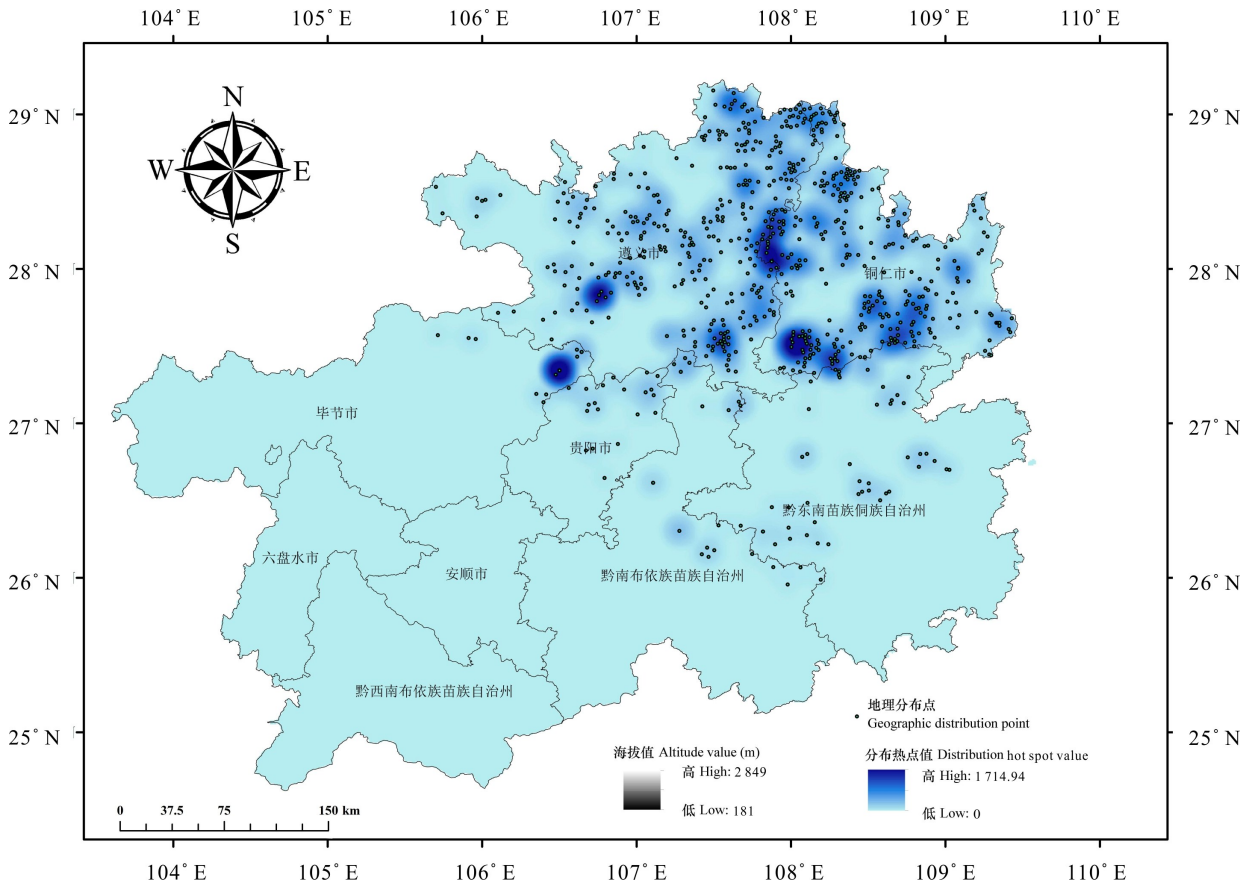
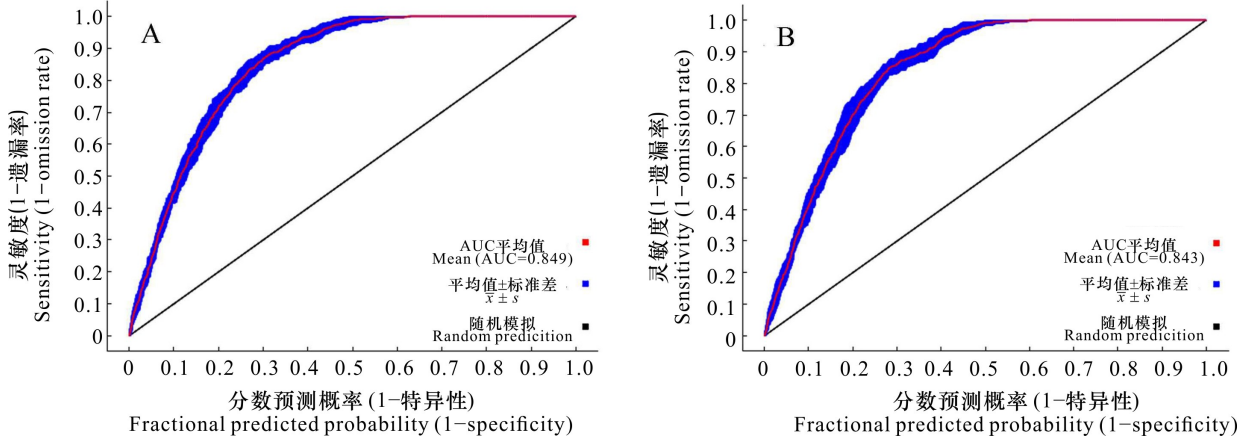


图 2 贵州省楠木分布点及热点叠加示意图

Fig. 2 Overlay schematic diagram of distribution points and hot spots of *Phoebe zhennan* in Guizhou



A. 所有环境因子; B. 模型预测的环境因子。
 A. All environmental factors; B. Environmental factors predicted by the model.

图 3 不同环境因子影响下的 ROC 曲线和 AUC 值

Fig. 3 ROC curves and AUC values under the influence of different environmental factors

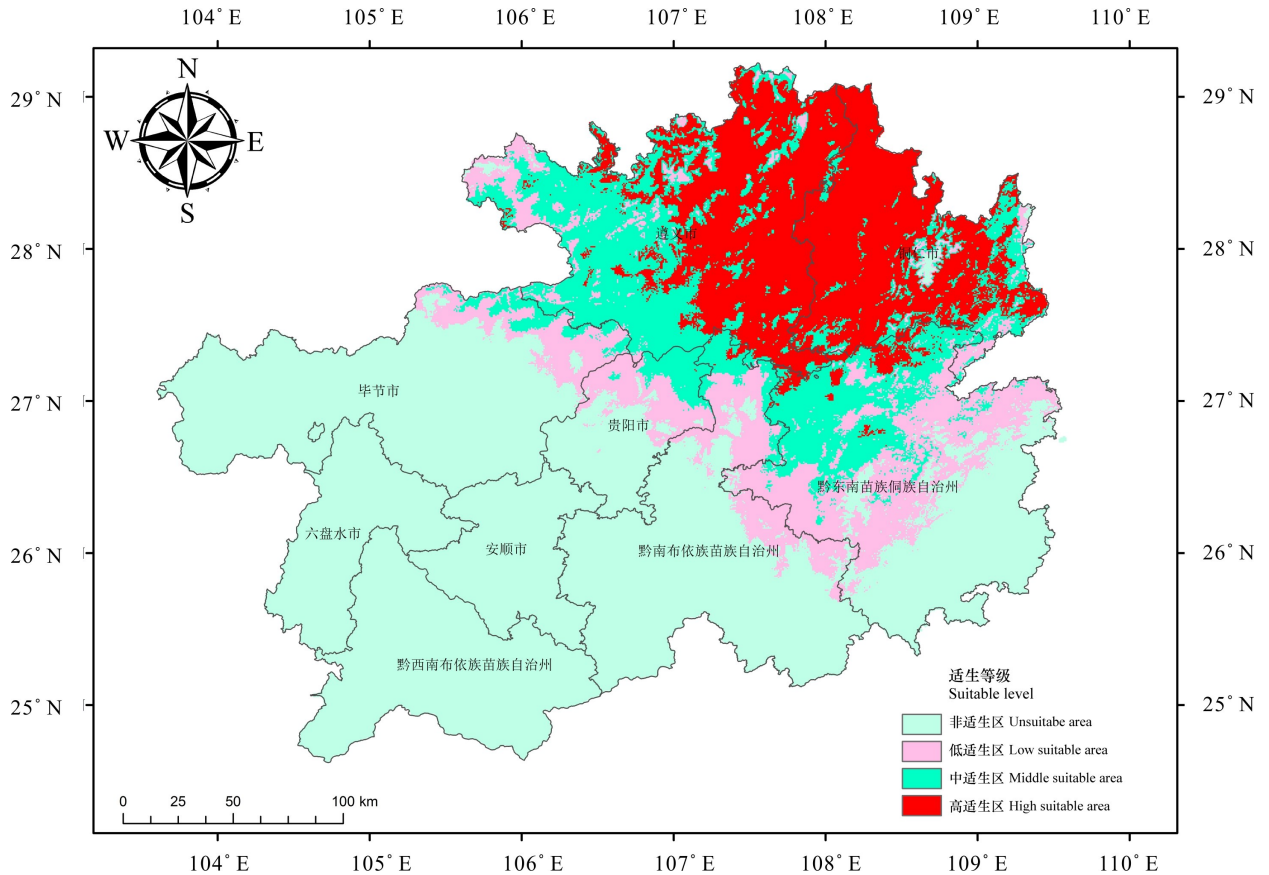


图 4 楠木在贵州省潜在适生区预测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the prediction of *Phoebe zennan* in the potential suitable area of Guizhou Province

多影响楠木潜在分布而其他环境因子不具备的信息。

用于模型预测的 6 个环境因子中贡献率结果 (表 3) 显示, Bio4 和 Bio3 的贡献率明显高于其他

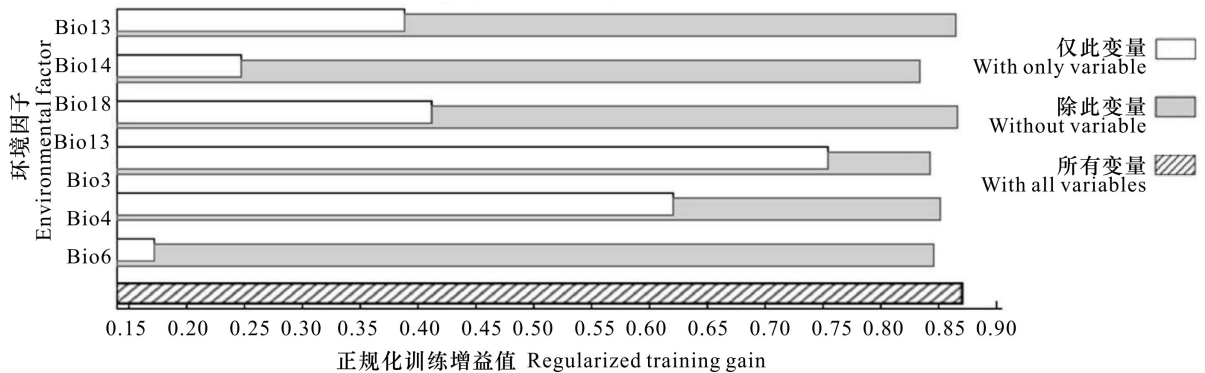


图 5 利用刀切法检测环境变量对楠木分布增益的百分比

Fig. 5 Percentage of environmental variables on gain of distribution using Jackknife test in *Phoebe zhennan*

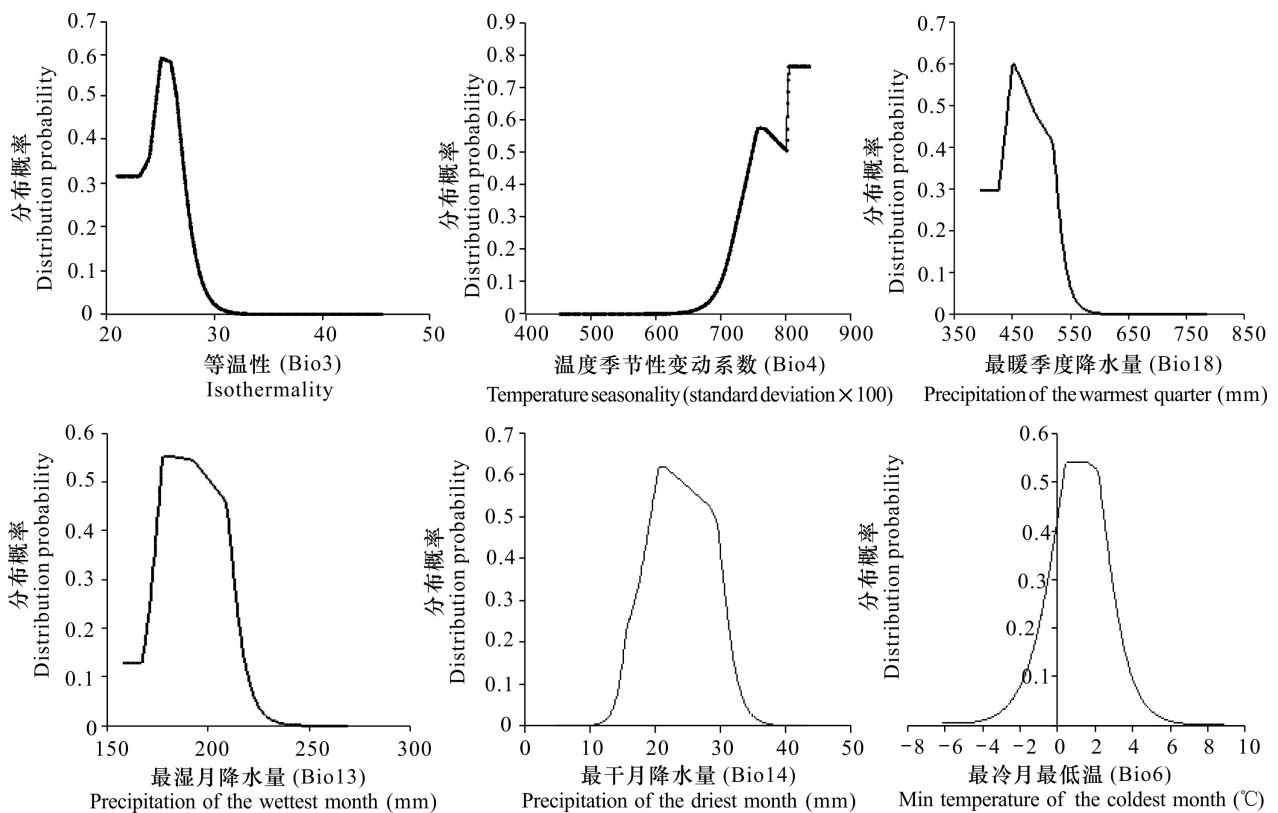


图 6 主要环境因子的响应曲线

Fig. 6 Response curves of major environmental factors

因子,分别是 51.9%和 26.9%;其次为 Bio13、Bio14 与 Bio6,最低的为 Bio18(2%),温度因子的综合贡献率达 81.9%,所有降水量因子为 18.1%。

综合所有环境因子的贡献率(表 2)、刀切法结果(图 5)与模型预测的环境因子贡献率结果(表 3)发现,在气候因子、地形因子及土壤因子 3 个变量

中,气候变量是影响贵州省楠木潜在分布的最主要变量,气候变量中的温度因子影响率明显大于降水量因子。因此,影响楠木在贵州省潜在分布的主要环境因子为 Bio3、Bio4、Bio18、Bio13、Bio14 和 Bio6。适宜和极限的温度及水分的变化都会影响楠木的生理生化过程及其生活力,进而影响其地理分布。

表 4 楠木在贵州潜在分布区的面积

Table 4 Potential distribution areas of *Phoebe zhennan* in Guizhou

分布区 Distribution	栅格数 Number of grids	面积 Area (km ²)
非适生区 Unsuitable area	125 571	96 153.532 74
低适生区 Low suitable area	29 994	22 967.317 78
中适生区 Middle suitable area	34 582	26 480.488 88
高适生区 High suitable area	39 917	30 565.660 59

2.5 主要环境因子对楠木潜在分布区的影响

为深入解析主要环境因子对楠木潜在适生区分布的影响,本研究绘制了主要环境因子响应曲线(图6)。把从MaxEnt模型导出的.dat文件的扩展名修改为.csv格式,根据.csv文件的具体值绘制主要环境因子的响应曲线。图6结果显示,贵州省楠木的潜在适生区分布概率与Bio3、Bio18、Bio13、Bio14和Bio6呈先上升后下降的趋势,与Bio4大体呈上升趋势,最后达到峰值。参照1.4的分级方法,本文以0.27为阈值来划分楠木在贵州省潜在适生区分布的适宜环境变量范围(王茹琳等,2017)。等温性的适宜值为21~27.5,最适值为25.1,在21~25.1时,随等温性上升潜在适生区分布概率增大,在25.1~27.5时,随等温性升高潜在适生区分布概率降低。温度季节性变动系数(Bio4)适宜值最小为722.67时,其值上升,楠木潜在适生区分布概率呈先升后降,接着再上升的趋势,当Bio4≥836.60时,楠木潜在适生区分布概率达最大值0.77,并保持稳定。Bio18在452.90 mm左右时,对楠木潜在适生区分布概率影响最为显著,其适应范围为39.30~529.86 mm。Bio13适宜值为171.54~213.83 mm,最适值为178.46 mm,楠木潜在适生区分布概率达0.55。Bio14的适应范围为16.20~31.03 mm,其最适降水量为21.47 mm。Bio6适宜温度为-0.65~3.06℃,最适值为0.57℃,在-0.65~0.57℃时,随温度上升分布概率增大,在0.57~3.06℃时,分布概率降低。

3 讨论与结论

3.1 环境因子对楠木在贵州省潜在适生区分布的影响

气候是相对较大尺度上决定物种分布的主要

因素。本研究模型预测结果表明:等温性、温度季节性变动系数、最暖季度降水量、最湿月降水量、最干月降水量和最冷月最低温等是影响贵州省楠木地理分布的重要环境因子。在一定范围内,等温性有利于楠木对生境适应性范围的扩大,到达一定峰值后,生境范围逐渐缩小,甚至消失。温差是植物生长、发育和开花最重要因素之一,大多植物在这些重要生长发育时期都需经历暖-冷-暖的阶段(Khodorova & Boitel-Conti, 2013),温差对楠木分布的影响极其重要(辜云杰等, 2021)。温度季节性变动系数体现了一年四季温度变化对楠木地理分布格局的影响。楠木花期4—5月,果期9—10月,一定范围的温度变化,可以提高楠木种子的发芽率,有助于其个体的生长发育,进而增强其适应能力(肖建华等, 2021),温度季节变化进而影响楠木在贵州的地理分布格局。楠木、浙江楠(*Phoebe chekiangensis*)和闽楠(*P. bournei*)等楠属植物对低温都较敏感,低温冻害是制约其引种到较高纬度以及向西北、西、西南引种到较高海拔地区的重要限制因子。楠木种子含水量较高,是顽拗性种子,因含水量高而迅速萌发(Tweddle et al., 2003),但发芽率低。低温对幼苗影响较大,低温胁迫后明显影响其生理生化变化,破坏其电导率等,其临界温度一般为-4~0.1℃(李高志, 2016),楠木适宜越冬的极端最低气温为-1~4℃(辜云杰等, 2021)。本研究显示最冷月最低温适宜温度为-0.65~3.06℃,这为贵州楠木越冬的极端温度范围提供了有力依据。

吴显坤等(2016)提出降水量影响我国其他亚热带地区樟科植物的地理分布。一定范围的降水有利于楠木的自然生长,楠木喜温暖湿润的气候,贵州省受季风影响,降雨大部分集中在夏季5—8月(周素萍, 2011),充沛的阳光与降水为楠木生长发育提供了良好的自然环境。然而,贵州省冬季相对降水量少,而冬季降水量却控制着亚热带乔木树种的休眠,从而影响树种的开花期(许格希等, 2014)。楠木种子对脱水和低温(一般低于10℃)敏感,其保存的最佳含水率为34.74%(李佳琦等, 2021),最干月降水量的范围直接影响楠木种子的自然越冬或发芽,进而影响其开花与结果,左右其地理分布范围。通过自然的选择,长期的干旱最终会导致楠木分布区域的缩小或迁移。一系列极端气候的变化,将导致楠木分布区的缩小和

原有分布区域的变迁。

综上所述,在贵州省内,一定范围的温差与夏季适宜的雨量有利于楠木适生区范围扩大,而冬季一定程度的极端低温与干旱却限制楠木种子及楠木幼苗的自然越冬,从而影响其地理分布,这些综合因素为贵州省楠木的科学保护、准确引种与产业发展提供了参考。楠木在贵州省的存在概率对环境因子的响应曲线反映的是单一环境变量的作用,可以看出大尺度上主要受气候影响,小尺度上其自身对气候因子、地形地貌、坡位、土壤等有严格的要求,同时受传播方式、人类活动等环境因子影响。因此,楠木的生命活动受各种环境因子的综合影响,在后续的研究中,仍需要进行更多环境因子及更深层次的研究。

3.2 楠木在贵州省潜在适生区的分布

本研究基于 1 191 个地理分布点、30 个环境因子,采用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件预测贵州省楠木潜在适生区,基于全部环境变量和主要环境变量的模拟训练集 AUC 值均大于 0.84,说明预测的楠木地理分布与实际分布拟合度较高,预测结果良好。楠木潜在适生区主要位于贵州省北部及东部区域,具体为铜仁市、遵义市、黔东南苗族侗族自治州中北部、贵阳市东北部、毕节市东北部和黔南布依族苗族自治州东北部,其范围与谢娜(2022)提到的楠木具体有效分布区在黔北、黔东,以及黔东南等地基本一致,与丁鑫等(2015)楠木野外调查及估测贵州潜在分布范围的北部地区相比黔东南区域范围稍大些,说明预测结果有效反映了楠木在贵州省潜在适生区的分布情况。楠木是较难识别的树种,生态变异也较大,野外调查发现该种与楠属其它楠木的混淆十分普遍(丁鑫等,2015),加之当地群众大多习惯把楠木属相关楠木,如闽楠(*Phoebe bournei*)、细叶楠(*P. hui*)、光枝楠(*P. neuranthoides*)、白楠(*P. neurantha*)、紫楠(*P. shearereri*)等统称楠木,笔者调查发现还有把润楠属(*Machilus*)部分种甚至山胡椒属(*Lindera*)的黑壳楠(*L. megaphylla*)误当成楠木的。这容易引起楠木分布与引种信息等的混乱,也可能误导部分地区对楠木的科学保护、准确引种与产业发展。

铜仁市和遵义市东部雨量充沛、冬无严寒、雨热丰富,气候条件适合楠木的生长,是楠木的高适生区,该区域楠木往往呈明显的集群或片状分布。楠木属于深根性树种,其自然地理分布以常态地

貌为主,对生存环境有偏好,喜土壤肥沃、土层深厚、排水良好、阳光充足的环境。楠木种群的这种集群性、片状式空间分布格局,相对大尺度受到气候影响,而在小区域主要受地形地貌、坡位、土壤、传播方式、人类活动等影响。铜仁市和遵义市常态地貌和喀斯特地貌交错分布,地形复杂,地势起伏,河流纵横切割,环境的异质性和楠木对环境要求的严格性,为楠木的集群式分布提供了客观条件,加之遵义市东部是大娄山的南部山麓,高耸的山体以及喀斯特独特和复杂的环境,在一定程度上影响了楠木的分布和扩散。因此,在大尺度上其主要分布区形成了并不均匀的多个密集型热点区。楠木的扩散和繁殖主要靠种子的自然掉落和鸟类传播,其小苗和幼树常聚集在母树周围,小尺度上往往呈现局域性突出的聚集分布(雷颖等,2022),这为楠木的科学保护和扩繁利用的环境区划提出了更严格的要求。楠木在贵州省的高热点分布区域,很多集中在村落周围的风水林,而未集中出现于自然保护区内,这与当地民族文化中的风水文化、树崇拜文化、禁忌文化等密不可分,这些文化在保护楠木、维护区域生物多样性方面发挥了重要作用(田丽娟,2018)。该地区土著居民偏爱楠木,常常主动保护和种植楠木,村前屋后常常残存着楠木古树群和以楠木为特色的片块式风水林,在实际分布区形成了天然林与人工林相结合的大小不一、类型多样的楠木优良单株和优良林分,这为相应地区楠木科学保护与合理利用提供了丰富的模式和样板。

需要注意的是,由于受贵州省自然地理环境和气候条件的高度异质性、多样性和复杂性,以及适生区预测抽样点复杂性和代表性等因素的影响,加之预测出来的适生区同样受到该区域地形、地貌、海拔、小气候、土壤异质性和复杂性等的影响,因此只能是一定尺度上的空间范围,难以细化到山头地块或具体流域,其预测结果仅宜作为宏观参考,不宜全区照搬推广。由于楠木自身对小气候尤其低温环境的敏感性、土壤条件等要求的严格性,以及适生区民族文化多样性与独特性、当地居民对楠木偏好性等诸多因素的影响,因此在适生区实际应用中需结合当地条件进一步综合和细化。例如,在贵州适生区楠木的具体保护规划与造林绿化、园林观赏等栽培区划中,除了水平分布区以外,还应重点考虑垂直分布范围和主要地

貌、土壤因素,最好限制在海拔 1 000 m 以下(尤其 800 m 以下)土层较为深厚的常态地貌区。

3.3 建议

基于上述研究结果,结合贵州省下一步大力发展楠木珍贵乡土用材树种的总体需求,提出以下建议:(1)根据贵州省楠木潜在分布区等级,进一步分层次、有针对性地扩大楠木资源实地调查,全面系统地摸清楠木在全省的实际资源现状及其关键生境和扩散限制因子;(2)开展全省楠木资源就地保护、迁地保护、野外回归等重要功能区的区划,明确全省楠木优先保护区、保护小区和保护点,针对楠木的适宜区开展造林立地类型区划,开展造林推广试验示范,科学构建楠木重点造林示范区;(3)在楠木已知分布的热点区、关键区小尺度范围内,针对典型种群和关键生境,深入研究影响楠木种群分布和扩散的更详细的环境因子、动态、遗传及人为干扰等因素,揭示楠木生存力及其最基本和最适宜的生境需求,为贵州甚至全国楠木的保护与造林推广提供依据;(4)继续加强环境教育和宣传总结,传承和保护当地民族文化中的树崇拜文化、风水文化及村规民约等,对楠木的高质量保护和推广示范具有重要意义。

参考文献:

- CHEN YF, TAN F, HU HL, et al., 2018. Effects of flooding stress on growth and photosynthetic physiological traits of *Phoebe zhennan* saplings [J]. *J Ecol Rural Environ*, 34(3): 224-231. [陈玉凤, 谭飞, 胡红玲, 等, 2018. 水淹胁迫对桢楠幼树生长及光合生理特性的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 34(3): 224-231.]
- CHEN YG, LE XG, CHEN YH, et al., 2022. Identification of the potential distribution area of *Cunninghamia lanceolata* in China under climate change based on the MaxEnt model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 33(5): 1207-1214. [陈禹光, 乐新贵, 陈宇涵, 等, 2022. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布 [J]. *应用生态学报*, 33(5): 1207-1214.]
- CUI L, WEI HY, 2016. Predicting the geographical distribution of *Urochela distincta* Distant with MaxEnt and DIVA-GIS [J]. *J Plant Prot*, 43(3): 362-368. [崔麟, 魏洪义, 2016. 基于 MaxEnt 和 DIVA-GIS 的亮壮异蝾潜在地理分布预测 [J]. *植物保护学报*, 43(3): 362-368.]
- DEVENDRA K, SANDEEP R, 2022. Modeling the effect of climate change on the distribution of threatened medicinal orchid *Satyrium nepalense* D. Don in India [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 29: 72431-72444.
- DING X, XIAO JH, HUANG JF, et al., 2015. Investigation on wild resource of valuable timber tree *Phoebe zhennan* (Lauraceae) [J]. *Plant Divers Resour*, 37(5): 626-639. [丁鑫, 肖建华, 黄建峰, 等, 2015. 珍贵木材树种楠木的野生资源调查 [J]. *植物分类与资源学报*, 37(5): 626-639.]
- Forestry Department of Guizhou Province, 2000. Guizhou wild precious plant resources [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 1-2. [贵州省林业厅, 2000. 贵州野生珍贵植物资源 [M]. 北京: 中国林业出版社: 1-2.]
- FRANKLIN J, 2010. Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography [J]. *Divers Distrib*, 16(3): 321-330.
- GU YJ, LI XQ, YANG HB, 2021. MaxEnt model-based prediction of suitable cultivation area of *PHoebe zhennan* in China [J]. *J NW For Univ*, 36(2): 136-141. [辜云杰, 李晓清, 杨汉波, 2021. 基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的潜在适宜栽培区 [J]. *西北林学院学报*, 36(2): 136-141.]
- GUO YL, ZHAO ZF, QIAO HJ, et al., 2020. Challenges and development trend of species distribution model [J]. *Adv Earth Sci*, 35(12): 1292-1305. [郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等, 2020. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 35(12): 1292-1305.]
- KHODOROVA NV, BOITEL-CONTI M, 2013. The role of temperature in the growth and flowering of geophytes [J]. *Plants*, 2(4): 699-711.
- LEI Y, HE XN, WANG JM, et al., 2022. Population structure and dynamic characteristics of *Phoebe zhennan* S. Lee in karst areas of Chongqing [J]. *Acta Ecol Sin*, 42(12): 4903-4911. [雷颖, 何雪娜, 王佳敏, 等, 2022. 重庆喀斯特生境中桢楠种群结构与动态特征 [J]. *生态学报*, 42(12): 4903-4911.]
- LI JH, YE XZ, ZHANG MZ, et al., 2021. Prediction of potential habitat of invasive plant *Ambrosia trifida* in China [J]. *J Biosaf*, 30(4): 263-274. [李佳慧, 叶兴状, 张明珠, 等, 2021. 入侵植物三裂叶豚草在中国的潜在适生区预测 [J]. *生物安全学报*, 30(4): 263-274.]
- LI JQ, XUE XM, GAO HD, 2021. Physiological responses of *Phoebe zhennan* seeds during dehydration [J]. *J Nanjing For Univ* ((Nat Sci Ed)), 45(3): 130-136. [李佳琦, 薛晓明, 高捍东, 2021. 桢楠种子脱水过程中的生理响应 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 45(3): 130-136.]
- LI GZ, 2016. Study on cold resistance of three *Phoebes* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University: 29-31. [李高志, 2016. 三种楠属植物的抗寒性研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学: 29-31.]

- LIU XT, YUAN Q, NI J, 2019. Research advances in modelling plant species distribution in China [J]. Chin J Plant Ecol, 43(4): 273–283. [刘晓彤, 袁泉, 倪健, 2019. 中国植物分布模拟研究现状 [J]. 植物生态学报, 43(4): 273–283.]
- LIU YX, SHI KM, LIN J, et al., 2020. Response of endogenous hormone to temperatures changes during the seed germination of *Phoebe zhenan* [J]. J Cent S Univ For Technol, 40(6): 89–95. [刘瑜霞, 石开明, 林健, 等, 2020. 桢楠种子萌发过程中内源激素对温度变化的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 40(6): 89–95.]
- NING Y, LEI JR, SONG XQ, et al., 2018. Modeling the potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis* a limestone-endemic plant [J]. Chin J Plant Ecol, 42(9): 946–954. [宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 等, 2018. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟 [J]. 植物生态学报, 42(9): 946–954.]
- OU HB, LIN JY, LI J, et al., 2020. Analysis of variation of leaf phenotypic traits in different provenances of *Phoebe bournei* [J]. SW Chin J Agric Sci, 33(3): 637–644. [欧汉彪, 林建勇, 李娟, 等, 2020. 不同种源楠木叶片表型性状变异分析 [J]. 西南农业学报, 33(3): 637–644.]
- TWEDDLE JC, DICKIE JB, BASKIN CC, et al., 2003. Ecological aspects of seed desiccation sensitivity [J]. J Ecol, 91(2): 294–304.
- TIAN LJ, 2018. The composition and characteristics of heritage trees in ethnic minority areas in Southwest China [D]. Chongqing: Chongqing University: 56–60. [田丽娟, 2018. 西南地区少数民族聚居地古树资源特征及成因 [D]. 重庆: 重庆大学: 56–60.]
- WANG RL, LI Q, FENG CH, et al., 2017. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling [J]. Acta Ecol Sin, 37(24): 8556–8566. [王茹琳, 李庆, 封传红, 等, 2017. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. 生态学报, 37(24): 8556–8566.]
- WU XK, NAN CH, TANG GG, et al., 2016. Impact of climate change on potential distribution range and spatial pattern of *Phoebe chekiangensis* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 40(6): 85–91. [吴显坤, 南程慧, 汤庚国, 等, 2016. 气候变化对浙江楠潜在分布范围及空间格局的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 40(6): 85–91.]
- XIAO JH, DING X, CAI CN, et al., 2021. Simulation of the potential distribution of *Phoebe bournei* with climate changes using the maximum-entropy (MaxEnt) model [J]. Acta Ecol Sin, 41(14): 5703–5712. [肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 等, 2021. 闽楠(*Phoebe bournei*, Lauraceae)地理分布及随气候变化的分布格局模拟 [J]. 生态学报, 41(14): 5703–5712.]
- XIE N, 2022. Study on seedling screening and tissue culture technology of *Phoebe zhenan* in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University: 2. [谢娜, 2022. 贵州楠木优株苗期筛选及组培技术研究 [D]. 贵阳: 贵州大学: 2.]
- XU GX, LUO SX, GUO QS, et al., 2014. Responses of leaf unfolding and flowering to climate change in 12 tropical evergreen broadleaf tree species in Jianfengling, Hainan Island [J]. Chin J Plant Ecol, 38(6): 585–598. [许格希, 罗水兴, 郭泉水, 等, 2014. 海南岛尖峰岭 12 种热带常绿阔叶乔木展叶期与开花期对气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 38(6): 585–598.]
- XU YX, ZHOU X, ZHAO CW, et al., 2017. Analysis of vegetation eco-environment quality change features in Guizhou Province from 1990 to 2015 [J]. Earth Environ, 45(4): 434–440. [许幼霞, 周旭, 赵翠薇, 等, 2017. 1990—2015 年间贵州省植被生态环境质量变化特征 [J]. 地球与环境, 45(4): 434–440.]
- YE XZ, ZHANG MZ, LAI WF, et al., 2021. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model [J]. Acta Ecol Sin, 41(20): 8135–8144. [叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等, 2021. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测 [J]. 生态学报, 41(20): 8135–8144.]
- ZENG FY, FENG BX, 2014. Study on community structure and species diversity of *Phoebe zhenan* in Shaxi of Dejiang County [J]. Guizhou Sci, 32(6): 16–19. [曾凡勇, 冯邦贤, 2014. 德江沙溪楠木群落结构及物种多样性研究 [J]. 贵州科学, 32(6): 16–19.]
- ZHANG T, HU W, JIA TJ, et al., 2022. Prediction of potential distribution of *Sophora flavescens* in China under climate change [J]. Guihaia, 42(3): 349–362. [张涛, 胡苑, 贾天娇, 等, 2022. 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析 [J]. 广西植物, 42(3): 349–362.]
- ZHENG WJ, 1983. *Sylva Sinica* (Trees of China): Vol. 1 [M]. Beijing: China Forestry Science Press. [郑万钧, 1983. 中国树木志: 第 1 卷 [M]. 北京: 中国林业出版社.]
- ZHOU BJ, WANG YJ, MA CL, et al., 2022. Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on MaxEnt and ArcGIS [J]. Acta Ecol Sin, (11): 1–9. [周炳江, 王玉洁, 马长乐, 等, 2022. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析 [J]. 生态学报, (11): 1–9.]
- ZHOU SP, 2011. Study of characteristics and erosivity of rainfall in Guizhou Province [D]. Nanjing: Nanjing University: 26. [周素萍, 2011. 贵州省降雨特征及降雨侵蚀力研究 [D]. 南京: 南京大学: 26.]