

◆ 濒危植物生态群落多样性 ◆

基于 MaxEnt 模型预测气候变化下厚叶木莲在中国的潜在地理分布^{*}梁键明¹, 蒋庆莲¹, 姜 垒¹, 张 铭¹, 吴玉芬¹, 杨锦昌², 杨沅志³, 蓝扬辉⁴, 唐光大^{1**}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 3. 广东省林业调查规划院, 广东广州 510520; 4. 广东新丰云髻山省级自然保护区管理处, 广东韶关 511100)

摘要:厚叶木莲(*Manglietia pachyphylla*)是中国特有的极小种群野生植物,目前仅在广东和广西有少量居群,被列入国家Ⅱ级重点保护野生植物,研究其潜在地理分布有重要意义。本研究基于标本记录和野外调查数据,结合 56 个环境因子,应用 MaxEnt 模型模拟现代(1970–2000 年)和 3 种未来(2021–2060 年)气候情景下厚叶木莲在中国的潜在地理分布。结果表明:(1)MaxEnt 模型模拟精度极高,受试者工作特征曲线下面积(Area Under ROC Curve, AUC)值为 0.978;厚叶木莲现代潜在适生区集中分布于广东、海南、台湾、广西、福建及江西的大部分地区,在云南南部、湖南东部和西藏东南部等地也有分布。(2)对厚叶木莲的分布贡献率较大的主要生态因子有 6 个,分别是旱季平均温度(23.6%)、年平均降水量(22.7%)、下层土壤盐基饱和度(16.9%)、下层土壤碎石体积百分比(12.1%)、下层土壤质地分类(9.1%)和最冷月最低温度(7.3%)。其中,旱季平均温度 20–25 °C、年平均降水量 3 500–4 500 mm 和酸性砾质土是最适宜厚叶木莲生长的生态位参数。(3)现代厚叶木莲适生区面积合计 67.07 万平方千米,约占中国陆地面积的 7%,低、中、高适生区分别占适生区总面积的 69.3%、26.4%和 4.3%;2021–2060 年,在不同气候情景下,厚叶木莲适生区面积存在分化。在 SSP126 和 SSP585 气候情景下,厚叶木莲适生区面积均收缩;在 SSP245 气候情景下,其适生区面积则有较大幅度扩张。(4)2041–2060 年,在 SSP585 气候情景下,当前气候条件下分布于广东中部和西部、广西西南部及海南中部的厚叶木莲高适生区全部消失。因此,建议广东江门古兜山省级自然保护区、北峰山国家森林公园等机构加大对厚叶木莲的保护力度,并开展其种苗培育和引种驯化相关工作。

关键词:厚叶木莲;潜在地理分布;MaxEnt 模型;气候情景

中图分类号:Q948 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)06-1133-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240125.012

收稿日期:2023-04-18

修回日期:2023-04-27

* 中央财政林业草原转移支付省级项目“厚叶木莲迁地保护与扩繁”(粤林财[2022]10 号)资助。

【第一作者简介】

梁键明(2000–),男,在读硕士研究生,主要从事林业资源和森林生态学研究。

【** 通信作者简介】

唐光大(1982–),男,副教授,硕士生导师,主要从事退化生态系统的恢复与重建研究,E-mail:gdtang@scau.edu.cn。

【引用本文】

梁键明,蒋庆莲,姜垒,等.基于 MaxEnt 模型预测气候变化下厚叶木莲在中国的潜在地理分布[J].广西科学,2023,30(6):1133-1143.

LIANG J M,JIANG Q L,JIANG L,et al. Predicting the Potential Geographical Distribution of *Manglietia pachyphylla* in China under Climate Change based on MaxEnt Model [J]. Guangxi Sciences,2023,30(6):1133-1143.

物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 立足于生态位原理^[1], 通常利用存在的分布点数据和假定影响其分布的环境变量来预测物种潜在分布的地理范围^[2,3], 近年来已成为生态学、生物地理学、保护生物学和气候变化等研究的热门话题之一。MaxEnt 模型是以最大熵理论为依据构建的一种物种分布模型^[4], 该模型将物种已知的实际分布情况与对应环境变量结合, 根据同一物种所需生长气候相似的原理, 推算物种在一定的生态位约束条件下分布规律最理想的状态, 从而对物种的潜在分布区进行预测, 具有准确率高、应用效果好的优点^[5-7]。相较于众多其他的分布模型, MaxEnt 模型对样本量少、地理范围小、环境耐受能力有限的物种分布预测具有较高的准确性^[8], 因而被广泛应用于珍稀濒危物种的潜在分布区预测研究中^[9-11]。

厚叶木莲 (*Manglietia pachyphylla*) 是木兰科 (Magnoliaceae) 木莲属 (*Manglietia*) 常绿乔木, 自然分布于广东、广西等地, 生长在海拔 500–1 500 m 的山体上, 分布范围狭窄, 资源稀缺, 被列入国家 II 级重点保护野生植物。近年来关于厚叶木莲的研究主要集中于群落生态学^[12,13]、光合生理生态^[14]、传粉生物学^[15]、系统发育^[16]、形态特征^[17] 和资源调查^[18] 等方面, 而利用物种分布模型模拟预测其潜在地理分布的相关研究尚未见报道。因此, 本研究通过收集整理厚叶木莲标本采集记录, 结合野外调查数据, 以及现代及未来情景下的相关环境数据, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对厚叶木莲分布范围进行模拟及预测研究, 并对其适生区进行划分及分析, 了解制约其生长的主导环境因子, 推测其在气候变化情景下的分布变动趋势, 为厚叶木莲的种质资源保护和可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 分布数据收集和整理

通过检索中国数字植物标本馆 (CVH, <https://www.cvh.ac.cn/>)、全球生物多样性信息平台 (<http://www.gbif.org>), 以及中国科学院华南植物园标本馆 (IBSC) 等数据库, 参考缪绅裕等^[18] 的研究结果, 同时结合野外调查, 获取带有具体地理坐标的厚叶木莲分布数据共 11 条。其中, 来自中国数字植物标本馆的数据由于缺少具体地理坐标, 故将其地理坐标定位到标本标记最低一级的行政单位中心; 位于贵州丹寨的腊叶标本疑为乳源木莲 (*M. yuyuanen-*

sis)^[18], 因此未采用。此外, 为防止采样偏差导致局部分布点过于密集使模型过拟合, 在 ArcGIS 10.8 软件中采用设置缓冲区和相交分析手段排除距离过近分布点, 在距离 < 5 km 的分布点中只取一个分布点, 最终得到有效的厚叶木莲分布样点 9 个, 将其保存为 .csv 格式 (图 1)。

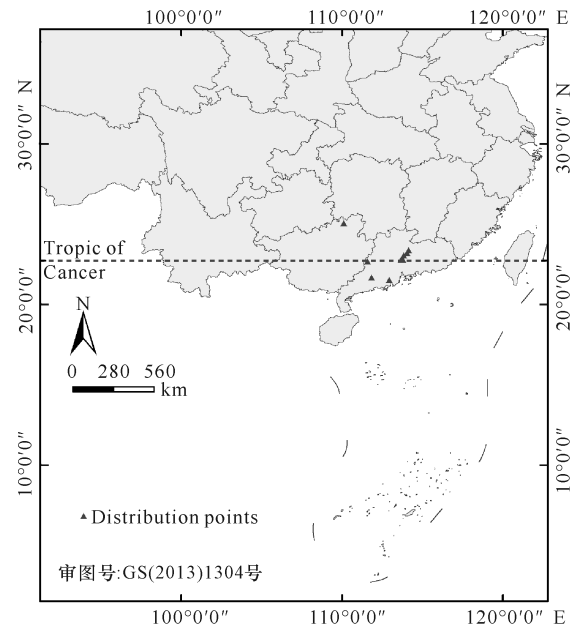


图 1 厚叶木莲分布样点 (中国)

Fig. 1 Distribution sample sites of *M. pachyphylla* (China)

1.2 环境数据及处理方法

使用现代 (1970–2000 年) 及未来两个时期 (2021–2040 年、2041–2060 年) 的气候数据, 下载自 WordClim 全球气候和天气数据库 (<http://www.worldclim.org>), 坐标系为 WGS1984, 空间分辨率为 2.5 arc-minutes, 包含 19 个生物气候变量数据 (bio1–bio19) 和利用 ArcGIS 10.8 提取处理得到的 3 个地形数据 (坡度、坡向和海拔)。未来时期的气候数据选择第 6 次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 发布的 3 种共享社会经济路径气候情景 (SSP126、SSP245 和 SSP585), SSP126 代表低强迫、温室气体低排放时的情景, SSP245 为中强迫、温室气体中等排放时的情景, SSP585 为高强迫、温室气体大量排放时的情景^[19]。采用的大气环流模式为第二代国家气候中心中等分辨率气候系统模式 (BCC-CSM2-M2), 该模式对中国的气温及降水模拟较为准确^[20]。土壤数据来自世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 v1.1 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>), 本研究选择其中的土壤变量数据共 34 个。因此, 进入研究考量范围的环境因子共计 56 个 (表 1)。

表 1 环境数据描述

Table 1 Description of environmental data

代码 Code	环境变量描述 Environment variable description	代码 Code	环境变量描述 Environment variable description
Bio1	Annual average temperature	T_bulk_density	Topsoil soil bulk density
Bio2	Monthly mean temperature	T_oc	Topsoil organic carbon content
Bio3	Isothermality	T_ph_h2o	Topsoil pH
Bio4	Seasonal variation of temperature	T_cec_clay	Cation exchange capacity of upper cohesive layer soils
Bio5	Maximum temperature in warmest month	T_cec_soil	Cation exchange capacity of the topsoil
Bio6	Minimum temperature in coldest month	T_bs	Upper soil base saturation
Bio7	Annual temperature range	T_teb	Exchangeable base of the upper soil
Bio8	Average wettest season temperature	T_CaCO3	Topsoil carbonate or lime content
Bio9	Driest quarterly mean temperature	T_CaSO4	Upper soil sulfate content
Bio10	Average temperature of the warmest quarter	T_esp	Topsoil exchangeable sodium salt
Bio11	Average temperature of coldest quarter	T_ece	Topsoil conductivity
Bio12	Annual average precipitation	S_gravel	Subsoil gravel volume percentage
Bio13	Wettest monthly precipitation	S_sand	Sediment content in the subsoil
Bio14	Driest monthly precipitation	S_silt	Subsoil silt content
Bio15	Seasonal variation of precipitation	S_clay	Clay content in the subsoil
Bio16	Wettest quarterly precipitation	S_usda_tex	Subsoil texture classification
Bio17	Driest quarterly precipitation	S_bulk_density	Subsoil bulk density
Bio18	Precipitation in the warmest quarter	S_oc	Subsoil organic carbon content
Bio19	Coldest seasonal precipitation	S_ph_h2o	Subsoil pH
Aspect	Aspect	S_cec_clay	Cation exchange capacity of the lower cohesive layer soil
Slope	Slope	S_cec_soil	Cation exchange capacity of the subsoil
Elevation	Elevation	S_bs	Subsoil base saturation
T_gravel	Percentage of aggregate volume in upper soil	S_teb	Exchangeable base of subsoil
T_sand	Upper soil sand content	S_CaCO3	Carbonate or lime content of subsoil
T_silt	Upper soil silt content	S_CaSO4	Sulfate content in the subsoil
T_clay	Clay content in the upper soil	S_esp	Subsoil can exchange sodium salts
T_usda_tex	Classification of topsoil texture	S_ece	Conductivity of the subsoil

Note: prefixes T and S denote the physicochemical properties of the upper soil (0–30 cm) and the lower soil (30–100 cm), respectively in soil data.

为减少 56 个环境因子间的自相关性干扰, 首先将所有环境气候因子纳入 MaxEnt 模型进行初次模拟; 其次根据 MaxEnt 得出的贡献率列表去除运行结果中贡献率为 0 的因子; 再次将环境因子导入 SPSS 25.0 软件中, 通过 Pearson 相关系数(r)检验各变量之间的多重共线性, 每组高度相关的变量($|r| > 0.8$)只保留贡献率最大的变量并将其纳入到模型运行中; 最后选取 12 个环境气候变量, 通过 MaxEnt 模型进行厚叶木莲潜在适生区地理分布的模拟及分析。

1.3 MaxEnt 模型预测分析

使用最大熵模型 MaxEnt 3.4.4 模拟预测厚叶木莲的分布区。将筛选出的 9 个厚叶木莲分布数据与 12 个环境气候变量导入到 MaxEnt 软件, 将 25% 的分布样点数据作为测试数据, 75% 为训练数据, Bootstrap 重复运行 10 次, 使用受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic curve, ROC 曲线) 评估模型预测结果的精度, 使用刀切法 Jackknife 确定环境气候变量的贡献程度, 其他则保持默认设置。MaxEnt 模型采用 ROC 曲线作为模型模拟精度

的衡量方法, ROC 曲线与横坐标轴围成的面积称为受试者工作特征曲线下面积 (Area Under ROC Curve, AUC) 值, 该值是最优模型精度检测指标^[21]。AUC 值取值为 0-1, 通常情况下, AUC 值越接近 1 表示预测的结果越精确^[22,23]。具体而言, AUC 值为 0.5-0.6 表示预测失败, 0.6-0.7 为较差, 0.7-0.8 为一般, 0.8-0.9 为好, 0.9-1.0 为非常好^[24,25]。

1.4 适生区质心转移分析

质心是描述物种空间分布的重要指标之一, 也可以用来表征物种的空间分布变化^[26]。将未来两个时期 (2021-2040 年、2041-2060 年) 不同气候情景 (SSP126、SSP245 和 SSP585) 下的厚叶木莲适生区域作为一个整体, 结合当前研究推断的厚叶木莲现代分布中心^[18,27], 利用质心位置的转移反映厚叶木莲分布中心的空间变化。首先将厚叶木莲在不同时期、不同气候情景下的适生区分布栅格图进行矢量化, 然后利用 ArcGIS 软件中的 SDM 工具箱插件分别计算出其质心位置和向量文件, 比较得出不同时期质心位置的变化和转移方向^[28-31], 绘制出厚叶木莲在不同气候情景下的分布中心迁移路线图。

2 结果与分析

2.1 预测精度

本研究模拟结果表明, MaxEnt 模型在重复运行 10 次后训练数据的 AUC 平均值为 0.978 (标准差 ± 0.005), 表明本次模型有良好的预测效果 (图 2)。

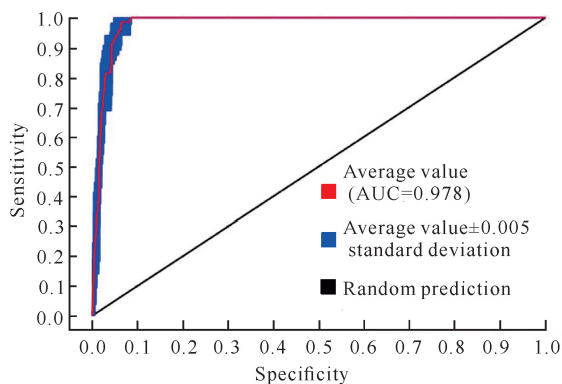


图 2 基于 MaxEnt 模型预测的厚叶木莲分布 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curve of *M. pachyphylla* predicted by MaxEnt model

2.2 当前气候环境下厚叶木莲在中国的分布

参照胡淑萍等^[32]的研究并结合团队多次野外调查情况, 使用 ArcGIS 软件的重分类 (Reclassify) 工具中的人工分级法 (Manual) 将适生区根据生境适宜性指数 (P) 从低到高划分为以下 4 个等级: 非适生区

($P < 0.2$)、低适生区 ($0.2 \leq P < 0.4$)、中适生区 ($0.4 \leq P \leq 0.7$) 和高适生区 ($P > 0.7$)。

如图 3 所示, 厚叶木莲适生区主要集中在广东、海南及台湾全域, 广西、福建及江西大部分地区, 云南南部、湖南东部、西藏墨脱县及错那县等地, 四川、湖北、浙江及安徽等地有零星分布。利用 ArcGIS 空间分析模块提取出各个时期厚叶木莲在中国范围内的高、中、低适生区面积, 结果显示, 当前气候环境下, 中国适宜厚叶木莲生长的面积为 67.07 万平方千米, 约占中国陆地面积的 7%; 高适生区面积为 2.90 万平方千米, 呈多点分布, 广东南部及中西部分布面积最大, 台湾中央山脉附近、海南中部、广西西南部也有分布; 中适生区面积为 17.74 万平方千米, 广东、广西、海南、台湾地区分布较广, 云南西南部、西藏东南部、福建南部均有分布; 低适生区面积为 46.43 万平方千米, 分布范围最广, 除高、中适生区分布的省区外, 四川、湖北、湖南、浙江、江西等地也有分布。总体而言, 当前厚叶木莲适生区在我国华南地区分布范围较广, 尤其适宜生长在北回归线以南一带。将当前气候条件下厚叶木莲在中国的潜在分布情况与现有的厚叶木莲实际分布情况叠加分析, 结果显示, 2 个分布样点处于高适生区, 6 个分布样点处于中适生区, 1 个分布样点处于低适生区, 表明二者契合度相对较高 (图 3)。

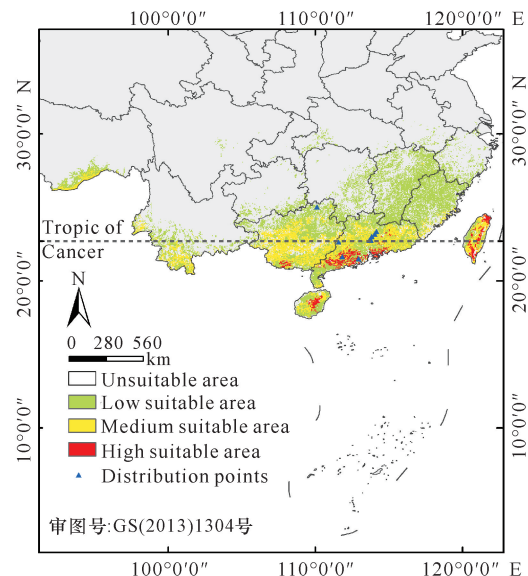


图 3 厚叶木莲在当前 (1970-2000) 气候环境下的潜在地理分布

Fig. 3 Potential geographical distribution of *M. pachyphylla* in the current (1970-2000) climate superimposes the existing distribution points

2.3 影响厚叶木莲分布的主要环境气候变量

在本研究中,早季平均温度(Bio9)对模型预测结果的贡献率最高,为 23.6%;其次是年平均降水量(Bio12),贡献率为 22.7%;下层土壤盐基饱和度(S_bs)、下层土壤碎石体积百分比(S_gravel)、下层土壤

质地分类(S_usda_tex)、最冷月最低温度(Bio6)及月平均温度(Bio2)的贡献率分别为 16.9%、12.1%、9.1%、7.3%和 5.0%。其余环境因子的贡献率均未达到 2%(表 2)。

Table 2 Contribution rate and permutation importance of environmental factors

代码 Code	环境变量描述 Environment variable description	贡献率/% Rate of contribution/%	排序重要性/% Permutation importance/%
Bio9	Driest quarterly mean temperature	23.6	32.2
Bio12	Annual average precipitation	22.7	9.7
S_bs	Subsoil base saturation	16.9	0.9
S_gravel	Subsoil gravel volume percentage	12.1	7.2
S_usda_tex	Subsoil texture classification	9.1	26.8
Bio6	Minimum temperature in coldest month	7.3	0.1
Bio2	Monthly mean temperature	5.0	2.6
T_oc	Topsoil organic carbon content	1.7	4.3
Aspect	Aspect	0.6	0.4
T_bulk_density	Topsoil soil bulk density	0.4	1.8
T_gravel	Percentage of aggregate volume in upper soil	0.3	0.0
S_esp	Subsoil can exchange sodium salts	0.3	14.0

选取早季平均温度、年平均降水量、下层土壤盐基饱和度、下层土壤碎石体积百分比、下层土壤质地分类及最冷月最低温度进行环境变量响应曲线分析,探讨各个环境变量对厚叶木莲分布的生态学联系(图 4)。如图 4(a)所示,厚叶木莲的分布与早季平均温度呈正相关关系,当早季平均温度为 $-5 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度的变化对厚叶木莲分布有较为显著的影响;随着温度的升高,厚叶木莲的呈逐渐上升趋势;当早季平均温度为 $20 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,厚叶木莲的生境适宜性指数处于较高且平稳的状态。厚叶木莲的分布与年平均降水量呈正相关关系,当年平均降水量处于 $3\ 500 - 4\ 500\ \text{mm}$ 时,厚叶木莲的生境适宜性指数较大且保持平稳的状态[图 4(b)]。相反地,厚叶木莲的分布与下层土壤盐基饱和度呈负相关关系,当下层土壤盐基饱和度 $\leq 10\%$ 时,最适宜厚叶木莲生长[图 4(c)]。厚叶木莲的生境适宜性指数与下层土壤碎石体积百分比成正比[图 4(d)],而与土壤质地分类成反比[图 4(e)],表明厚叶木莲更适于酸性的砾质土。此外,当最冷月最低温度处于 $16 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,厚叶木莲的生境适宜性指数较大且保持平稳的状态[图 4(f)]。值得注意的是,早季平均温度与最冷月最低温度的环境

气候响应曲线近乎一致,这与厚叶木莲适生区所在的南亚热带冷旱季同期有关。

2.4 未来气候情景下厚叶木莲的分布特点

2.4.1 未来不同气候情景下厚叶木莲适生区变化趋势

从表 3 可知,在 SSP126 气候情景下,2021 - 2040 年厚叶木莲适生区面积较现代气候条件下总体增长,其中高适生区面积收缩;2041 - 2060 年相较于 2021 - 2040 年,厚叶木莲适生区总体减少 31.91 万平方千米,中、低适生区是其减少的主要区域;而高适生区增加 2.5 万平方千米。在 SSP245 气候情景下,2021 - 2040 年厚叶木莲适生区面积较现代气候条件下缩减 6%;而在 2041 - 2060 年则增加 29.7%,总面积达到 87.00 万平方千米,增加面积以低适生区为主。在 SSP585 气候情景下,2021 - 2060 年厚叶木莲适生区面积总体收缩,总适生区面积从现代的 67.07 万平方千米减少至 49.29 万平方千米,呈现出低、中、高适生区同时萎缩的趋势。通过线性预测分析可知,总体而言,2021 - 2060 年除 SSP245 气候情景外,其余气候情景下厚叶木莲在中国范围内适生区均呈萎缩趋势(图 5)。

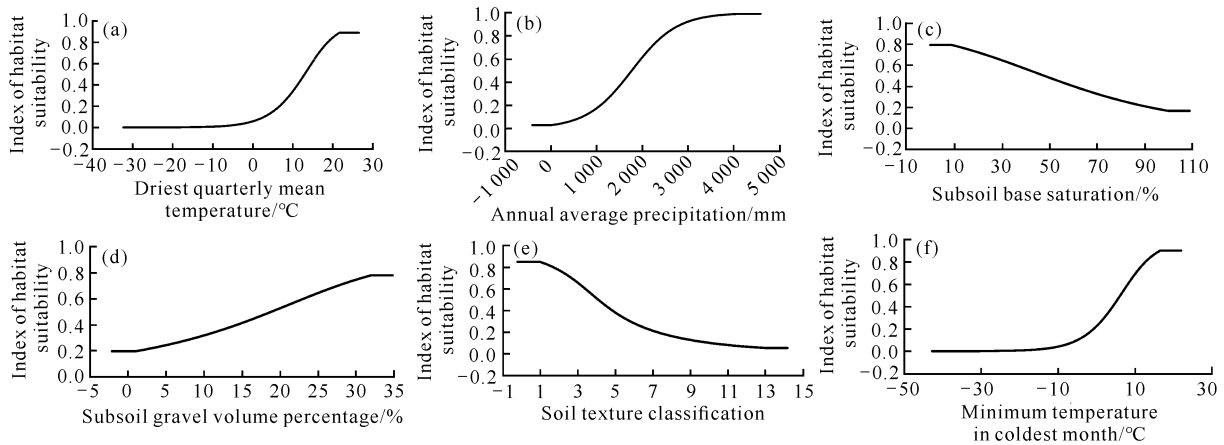


图4 主要环境因子的响应曲线

Fig. 4 Response curves of major environmental factors

表3 各时期厚叶木莲在中国的适生区面积统计

Table 3 Statistics of suitable areas area in each periods in China of *M. pachyphylla*

年代 Chronology	气候情景 Climate scenarios	适生区面积($\times 10^4 \text{ km}^2$) Area of suitable areas ($\times 10^4 \text{ km}^2$)				占中国陆地面积 的比例/% Proportion of land area in China/%
		低适生区 Low suitable areas	中适生区 Medium suitable areas	高适生区 High suitable areas	合计 Total	
1970 - 2000		46.43	17.74	2.90	67.07	6.99
2021 - 2040	SSP126	58.86	30.68	1.20	90.74	9.45
	SSP245	41.14	20.16	1.74	63.04	6.57
	SSP585	41.20	14.33	1.04	56.57	5.89
2041 - 2060	SSP126	41.05	14.08	3.70	58.83	6.13
	SSP245	61.05	23.66	2.29	87.00	9.06
	SSP585	40.36	8.76	0.17	49.29	5.13

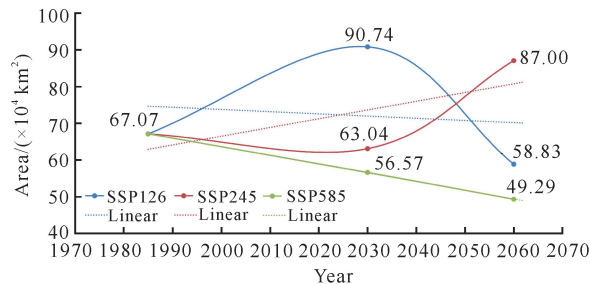


图5 3种未来(2021-2060)气候情景下厚叶木莲的分布面积变化趋势

Fig. 5 Distribution trends of *M. pachyphylla* under 3 future (2021-2060) climate scenarios

空间表现上,在 SSP126 气候情景下,2021-2040 年厚叶木莲低、中适生区向内陆扩散,集中表现在福建、江西、湖南及广西等地形成连片的适生区,福建西北部和江西东北部形成较大的中适生区(图 6)。2041-2060 年,在 2021-2040 年期间所新增的中、低适生区总体上消失,而高适生区有所增加,表现为在台湾东北部缩减消退,广东中部连片增加[图 6:(a)、(b)]。在 SSP245 气候情景下,2021-2040 年厚

叶木莲适生区分布较现代气候条件下变化不大;而在 2041-2060 年则较现代气候条件下有较大幅度增加,新增面积以低适生区为主,在一定程度上填补了现代气候条件下适生区连片分布的部分空缺,如湖南、广西、江西、福建等地[图 6:(c)、(d)]。在 SSP585 气候情景下,2021-2060 年相较于现代气候条件下,厚叶木莲分布范围不断收缩;2041-2060 年高适生区在中国大陆境内彻底消失,仅剩台湾东北部的分布区域保持稳定[图 6:(e)、(f)]。

2.4.2 未来不同气候情景下中国范围内厚叶木莲分布中心的变化

未来 SSP126、SSP245 及 SSP585 3 种不同气候情景下,厚叶木莲在中国范围内的分布中心都将发生变化。研究表明,广东新丰云髻山省级自然保护区(以下简称“新丰云髻山”, $114^{\circ}9'E, 24^{\circ}6'N$)很可能是厚叶木莲的现代分布中心^[18,27],因此,本研究采取该点的地理坐标数据为现代分布中心点。

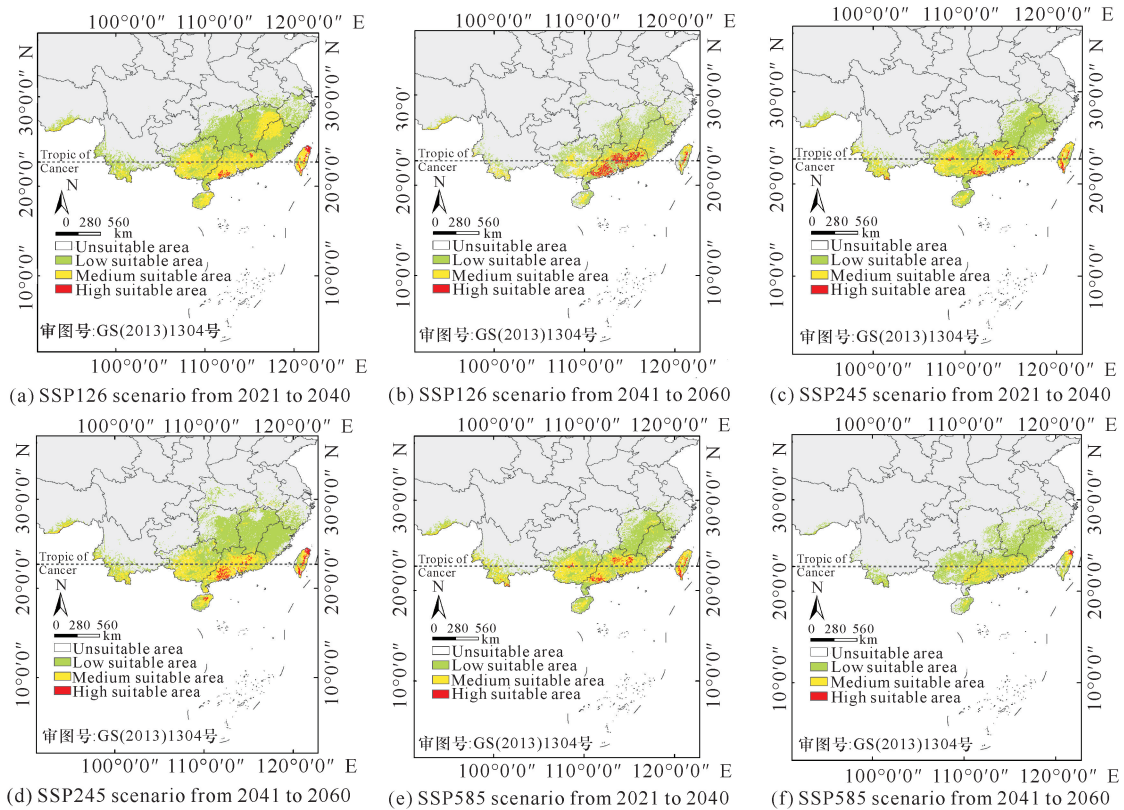


图6 未来(2021-2060)气候情景下的厚叶木莲分布预测

Fig. 6 Prediction distribution of *M. pachyphylla* under future (2021-2060) climate scenarios

在 SSP126 气候情景下,厚叶木莲分布中心首先由新丰云髻山向西北移动,穿过韶关市翁源县、曲江县(113°42'E, 24°49'N)及乳源瑶族自治县(112°59'E, 24°33'N)到达乐昌市中北部(113°10'E, 25°20'N),接着向东南方向转移,最终到达韶关市曲江县。在 SSP245 气候情景下,厚叶木莲分布中心首先由新丰云髻山向西偏北方向移动至英德市西部(112°54'E, 24°15'N),然后向北偏东转移,最终迁移至韶关市乐昌市西北部(113°3'E, 25°20'N)。在 SSP585 气候情景下,2021-2040 年,厚叶木莲分布中心先由新丰云髻山向西北移动至韶关市乳源瑶族自治县,再往东偏南折向到英德市东北部(113°38'E, 24°26'N)。总体来看,未来气候情景下,厚叶木莲分布中心均有向西迁的趋势;2021-2040 年,在 3 种未来气候情景下,厚叶木莲分布中心明显向北迁移,SSP126 气候情景下迁移幅度最大,接近湘粤交界;2041-2060 年,SSP126 及 SSP585 气候情景下,厚叶木莲分布中心先向南迁移,再转向东南迁移;而在 SSP245 气候情景下则继续大幅北迁(图 7)。

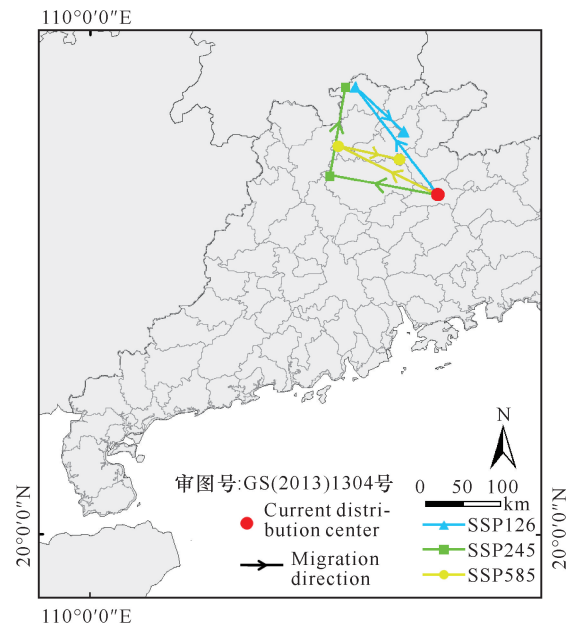


图7 未来(2021-2060)不同气候情景下中国范围内厚叶木莲适生分布中心变化

Fig. 7 Changes in the distribution centers of suitable growth of *M. pachyphylla* in China under different climate scenarios in the future (2021-2060)

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型的预测准确性及存在问题

MaxEnt 模型将物种的分布点位与其对应的环境变量相结合, 找到物种分布规律的最大熵, 从而对物种的潜在分布进行预测, 具有准确率高、应用效果好的优点^[5-7]。MaxEnt 模型的特点决定了其对物种现存分布点的较高依赖性, 一般而言, 分布点数据越多, 预测的精确性与可靠性越高^[33]。本研究的模拟预测结果经过 ROC 曲线精度检验, MaxEnt 模型在重复运行 10 次后训练数据的 AUC 平均值为 0.978 (标准差 ± 0.005), 说明本次模型对厚叶木莲分布区的预测效果较好, 可信度高。预测结果显示, 在当前气候环境条件下, 厚叶木莲的高适生区主要集中在广东省中西部及中南部、海南中部、广西西南部与台湾中央山脉沿线, 这与目前所掌握的厚叶木莲自然分布点普遍重合。然而, 厚叶木莲生境狭窄、自然分布点少, 目前经考察及资料收集的自然分布点仅有 11 个。为防止局部分布点过密使模型过拟合, 本研究排除距离过近的分布点, 最终得到有效的厚叶木莲分布样点仅 9 个, 可能对模型预测的准确性有一定的影响。此外, 研究表明, 当预测物种的样本量小于环境变量时, 选择模型的环境变量时可侧重考虑环境因子的生态学意义, 而非相关性^[34]。因此, 在后续的研究中, 一方面可结合现代适生区模拟结果对厚叶木莲进行更大范围的野外调查, 获取更多自然分布点的信息; 另一方面可以采用采样偏差处理、调整环境因子筛选机制、优化 MaxEnt 模型等方法来提高模型模拟的准确性。

3.2 当前时期厚叶木莲分布特征与环境因子响应

在生物环境因子中, 气候因子(气温及降水)是决定物种潜在地理分布的重要因子^[35]。本研究结果表明, 现代气候背景下, 我国厚叶木莲适生区主要分布于南部地区, 中、高适生区集中于广东南部、海南中部、广西西南部、台湾中央山脉一带。影响厚叶木莲分布的环境因子按贡献率前 7 位分别是早季平均温度、年平均降水量、下层土壤盐基饱和度、下层土壤碎石体积百分比、下层土壤质地分类、最冷月最低温度和月平均温度。模型模拟的结果显示, 厚叶木莲对早季平均温度的响应最为敏感, 当早季平均温度 $> -5^{\circ}\text{C}$ 时, 生境适宜性指数迅速爬升; 当数值达到 20 - 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 厚叶木莲适生程度达到最高 [> 0.8 , 图 4(a)], 表明极端低温很可能是制约厚叶木莲适生区北迁的

主因。在模型预测中年平均降水量表现出第二高的贡献率, 当年平均降水量 $> 1\ 000\ \text{mm}$ 时, 厚叶木莲适生程度明显提升; 而当年平均降水量为 3 500 - 4 500 mm 时, 厚叶木莲的生境适宜性指数无限趋近于 1, 表明厚叶木莲对降水具有高度敏感性, 这与曾庆文等^[13]对广州市从化区厚叶木莲群落研究中的生境描述几乎一致。在所有环境因子中, 土壤因子对厚叶木莲的分布也有较大影响。当下层土壤盐基饱和度为 10% - 100% 时, 厚叶木莲的适生程度持续下滑; 下层土壤碎石体积百分比为 0% - 30% 时, 厚叶木莲适生程度逐渐上升, 表明厚叶木莲可能偏好酸性的砾质土, 这与缪绅裕等^[18]和蓝扬辉等^[27]研究的生境描述相似。

3.3 气候变化背景下厚叶木莲分布区的变迁及其资源保护

全球气候变暖会导致大量物种适生区域收缩, 生境破碎化^[36]。本研究表明, 在 3 种未来气候情景下, 2021 - 2060 年厚叶木莲适生区面积变化趋势存在分化现象: 在温室气体低排放 (SSP126) 和高排放 (SSP585) 的情景下, 中国范围内的厚叶木莲适生区总面积均呈收缩趋势, 相较于现代分别减少 12.3% 和 26.5%; 而在中排放 (SSP245) 情景下, 厚叶木莲的适生区总面积有大幅扩张, 相较于现代增加 29.7%。结合厚叶木莲对环境主导因子的响应曲线分析, 推断这一现象的成因可能与旱季平均温度是厚叶木莲适生区分布影响最高的环境因子有关, 旱季平均温度越高, 厚叶木莲生境适宜性越高; 中排放情景下, 全球气候变暖幅度与厚叶木莲对旱季平均温度的高响应阈值相契合。此外, 高适生区的分化现象同样应引起关注。厚叶木莲高适生区面积在低排放情景下有较大幅度扩张, 而在高排放情景下则大范围萎缩, 推断温室气体大量排放、气候极端恶化的情况可能会对厚叶木莲生存发展造成极大威胁。

厚叶木莲的自然分布地主要集中在广东省内, 有 4 处主要分布点, 分别为龙门南昆山、新丰云髻山、新丰小沙罗和从化三角山, 其中新丰云髻山被推测是厚叶木莲现代分布中心之一^[18]。当前, 厚叶木莲存在自然分布点少且零散^[18]、整体研究偏少且不够深入、原生群落遭到破坏^[37]和种群持续衰退^[13, 27, 38]等问题。自然授粉结实率较低、人类活动破坏和动物取食种子等是导致厚叶木莲濒危的原因^[22, 39], 人工授粉可以显著提高厚叶木莲结果率和结实率^[40]。目前已开展了部分就地保护和迁地保护工作^[13, 18]。利用

MaxEnt 模型模拟厚叶木莲现代潜在地理分布,并分析未来气候情景下厚叶木莲适生区及分布中心的变化趋势,对精准采取就地保护和迁地保护相关措施有较强的指导性,可更好地实现对厚叶木莲种群保护和发展的预期目标。

3.4 基于物种分布模型的极小种群相关研究

极小种群野生植物(Wild Plant with Extremely Small Populations, WPESP),特指分布区域狭窄、长期受到外界干扰胁迫而呈现出种群退化和个体数量持续减少,随时面临灭绝风险的野生植物^[41]。物种分布模型在极小种群植物就地保护的区域选择方面指导性较强。例如,王卫等^[42]基于 Maxent 模型结合低空无人机遥感技术对丹霞梧桐(*Firmiana danxiaensis*)进行识别、种群调查、监测与评价工作,准确预测丹霞梧桐的潜在适生区,指出了丹霞梧桐就地保护的野生生境范围。谭显胜等^[43]选择 3 种物种分布模型(GBM、MaxEnt 和 RF)的平均值评估气候变暖对扣树(*Ilex kaushue*)生境适宜性的影响,认为制定极小种群植物的保护对策时应充分考虑气候变化的潜在影响。陈杰^[44]基于 MaxEnt 模型结合模糊数学构建单因子评价函数对东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)潜在适生区进行预测,并评价东北红豆杉生境质量。综合遥感技术和数学模型等方式开展深入研究,能更精准地把握极小种群野生植物面临的生态风险,选择合适的保护区,制定相应的保育策略。

4 结论

本研究基于 MaxEnt 模型模拟厚叶木莲在中国潜在地理分布的结果发现,旱季平均温度 20 - 25 °C、年平均降水量 3 500 - 4 500 mm 和强酸性的砾质土是最适宜厚叶木莲生长的生态位系数。在当前气候条件下,中国范围内厚叶木莲适生区主要分布在华南地区,高适生区主要分布于北回归线以南地区。2021 - 2060 年,相较于当前气候条件,不同未来气候情景下的厚叶木莲适生区分布范围存在分化现象,在 SSP126 和 SPP585 气候情景下向南收缩,在 SSP245 气候情景下则向北扩张,表明气候变暖幅度与厚叶木莲适生性指数变化存在密切关联。

参考文献

- [1] GUI SAN A, THUILLER W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models [J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- [2] QIN A L, LIU B, GUO Q S, et al. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China [J]. Global Ecology and Conservation, 2017, 10: 139-146.
- [3] WILSON C D, ROBERTS D, REID N. Applying species distribution modelling to identify areas of high conservation value for endangered species: a case study using *Margaritifera margaritifera* (L.) [J]. Biological Conservation, 2011, 144(2): 821-829.
- [4] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [5] DRAKE J M, RANDIN C, GUI SAN A. Modelling ecological niches with support vector machines [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(3): 424-432.
- [6] TARROSO P, CARVALHO S B, BRITO J C. Simapse-simulation maps for ecological niche modelling [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2012, 3(5): 787-791.
- [7] TSOAR A, ALLOUCHE O, STEINITZ O, et al. A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution [J]. Diversity & Distributions, 2010, 13(4): 397-405.
- [8] 甘桂春, 邹亚, 刘郁林, 等. 利用最大熵模型预测贵州省南方红豆杉潜在适宜区[J]. 内蒙古林业调查设计, 2021, 44(5): 67-71.
- [9] 吴艳, 王洪峰, 穆立蕃. 物种分布模型的研究进展与展望[J]. 高师理科学刊, 2022, 42(5): 66-70.
- [10] 王露露, 伊力哈木·亚尔买买提. 未来气候情景下 2 种新疆特有树种潜在适生区预测[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 10-22.
- [11] 王文波, 胡理乐, 布艾佳尔, 等. 应用 Maxent 模型对我国珍稀植物刺楸分布预测及其保护空缺分析[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(8): 69-73, 97.
- [12] 杨晓丽, 邢福武, 陈树钢, 等. 广东省南昆山自然保护区厚叶木莲的群落特征研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(4): 356-364.
- [13] 曾庆文, 周仁章, 刘银至, 等. 濒危植物厚叶木莲的群落学特征及其保护[J]. 热带亚热带植物学报, 1999(2): 109-119.
- [14] 孙谷畴, 赵平, 曾小平, 等. 不同光强下生长的厚叶木莲 (*Magnolia pachyphylla*) 光合作用光响应的变化[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(3): 213-218.
- [15] 徐凤霞, 胡晓颖, 徐信兰. 木莲属(木兰科)5 种植物的花粉形态[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(4): 313-317.
- [16] ZHENG L, IVES A R, GARLAND T, et al. New multi-

- ivariate tests for phylogenetic signal and trait correlations applied to ecophysiological phenotypes of nine *Manglietia* species [J]. *Functional Ecology*, 2009, 23(6):1059-1069.
- [17] 张宏达. 华南植物志资料Ⅲ[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1961(1):53-56.
- [18] 缪绅裕, 罗宇谦, 蓝扬辉, 等. 国家保护植物厚叶木莲资源调查研究[J]. 亚热带植物科学, 2020, 49(3):243-246.
- [19] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5):519-525.
- [20] WU T W, LU Y X, FANG Y J, et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4):1573-1600.
- [21] FIELDING A H, BELL J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models [J]. *Environmental Conservation*, 1997, 24(1):38-49.
- [22] 张劳模, 庞丽峰, 许等平, 等. 基于最大熵模型预测东北地区红松潜在分布[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(1):74-83.
- [23] 朱梦婕, 缪佳, 赵雪利. 基于最大熵模型的狸尾豆属植物在中国的潜在分布区模拟[J]. 植物科学学报, 2020, 38(4):476-482.
- [24] 付贵全, 徐先英, 马剑平, 等. 基于 MaxEnt 下梭梭潜在地理分布对水热条件的响应[J]. 草业科学, 2016, 33(11):2173-2179.
- [25] 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.
- [26] 雷璇, 杨波, 蒋卫国, 等. 东洞庭湿地植被格局变化及其影响因素[J]. 地理研究, 2012, 31(3):461-470.
- [27] 蓝扬辉, 罗宇谦, 唐海明, 等. 广东新丰云髻山厚叶木莲群落生态学特征[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(2):40-47.
- [28] 张晨, 马伟, 陈晨, 等. 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化[J]. 生物多样性, 2022, 30(1):63-75.
- [29] 秦媛媛, 鲁客, 杜忠毓, 等. 气候变化情景下孑遗植物绵刺在中国的潜在地理分布[J]. 生态学报, 2022, 42(11):4473-4484.
- [30] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 等. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9):3127-3135.
- [31] 李文庆, 徐洲锋, 史鸣明, 等. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测[J]. 生态学报, 2019, 39(9):3224-3234.
- [32] 胡淑萍, 何礼文. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 对白水江国家级自然保护区缺苞箭竹适生区分析[J]. 生态学报, 2020, 39(6):2115-2122.
- [33] 郭飞龙, 徐刚标, 卢孟柱, 等. 基于 MaxEnt 模型分析胡杨潜在适宜分布区[J]. 林业科学, 2020, 56(5):184-192.
- [34] 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.
- [35] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局及其气候解释[J]. 生物多样性, 2008, 16(5):470-476.
- [36] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change [J]. *Nature*, 2004, 427:145-148.
- [37] 任海. 广东珍稀濒危植物的保护与研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [38] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录: 第一卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [39] 曾庆文, 刘银至, 韦强, 等. 广东特有植物厚叶木莲的现状及其保护[C]//中国科学院生物多样性委员会, 中华人民共和国生态环境部自然生态保护司, 中华人民共和国国家林业和草原局野生动植物保护司. 面向 21 世纪的中国生物多样性保护: 第三届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 广州: 中国科学院华南植物研究所华南植物园, 1998.
- [40] 杨晓丽. 濒危植物厚叶木莲的保护生物学研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [41] 臧润国, 董鸣, 李俊清, 等. 典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7130-7135.
- [42] 王卫, 杨俊杰, 罗晓莹, 等. 基于 Maxent 模型的丹霞山国家级自然保护区极小种群植物丹霞梧桐的潜在生境评价[J]. 林业科学, 2019, 55(8):19-27.
- [43] 谭显胜, 段仁燕, 邹乐, 等. 全球气候变暖对极小种群植物扣树生境适宜性的影响[J]. 生命科学研究, 2023, 27(1):56-62.
- [44] 陈杰. 东北红豆杉适生分布区研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.

Predicting the Potential Geographical Distribution of *Manglietia pachyphylla* in China under Climate Change based on Max-Ent Model

LIANG Jianming¹, JIANG Qinglian¹, JIANG Lei¹, ZHANG Ming¹, WU Yufen¹,
YANG Jinchang², YANG Yuanzhi³, LAN Yanghui⁴, TANG Guangda^{1**}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, 510642, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong, 510520, China; 3. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong, 510520, China; 4. Administration Office of Guangdong Xinfeng Yunjishan Provincial Nature Reserve, Shaoguan, Guangdong, 511100, China)

Abstract: *Manglietia pachyphylla* is a very small population of wild plants endemic to China, with a small number of populations only in Guangdong and Guangxi, and it is listed as a key wild plant under national protection of Class II, which makes it more meaningful to study its potential geographic distribution. The Max-Ent model was used to simulate the potential geographical distribution of *M. pachyphylla* in China under modern (1970–2000) and three future (2021–2060) climate scenarios, based on existing distribution samples and field survey data and 56 environmental factors. The results showed that: (1) the simulation accuracy of MaxEnt model is very high, and the Area Under ROC Curve (AUC) value is 0.978; Modern potential suitable areas for *M. pachyphylla* are mainly distributed in Guangdong, Hainan, Taiwan, Guangxi, Fujian and most parts of Jiangxi, as well as southern Yunnan, eastern Hunan and southeastern Tibet. (2) There are six major ecological factors contributing significantly to the distribution of *M. pachyphylla*. The average temperature in the driest quarter (23.6%), the average annual precipitation (22.7%), the base saturation of the underlying soil (16.9%), the volume percentage of the underlying soil gravel (12.1%), the subsoil texture classification (9.1%) and the minimum temperature in the coldest month (7.3%). The most suitable niche parameters for *M. pachyphylla* were the average temperature of 20–25 °C, the average annual precipitation of 3 500–4 500 mm and the acidic gravel soil. (3) The suitable area of *M. pachyphylla* was 670 700 km², accounting for about 7% of China's land area. The suitable area of low, medium and high *M. pachyphylla* was 69.3%, 26.4% and 4.3% of the total suitable area, respectively. From 2021 to 2060, the suitable area *M. pachyphylla* was differentiated under different climate scenarios. The suitable area of *M. pachyphylla* contracted under SSP126 and SSP585 climate scenario, while the suitable area expanded significantly under SSP245 climate scenario. (4) From 2041 to 2060, under the SSP585 climate scenario, comparing with under the current condition, the high suitable areas of *M. pachyphyllum* distributed in central and western Guangdong, southwest Guangxi and central Hainan have all disappeared. It is suggested that Gudou Mountain Nature Reserve of Jiangmen and Beifeng Mountain National Forest Park in Guangdong should strengthen their protection, and carry out seedling cultivation, introduction and domestication.

Key words: *Manglietia pachyphylla*; potential geographical distribution; MaxEnt model; climate scenario