

气候变化下花榈木在我国的潜在分布区预测

宋 翩^{1,2},张港隆²,贾全全¹,温 强¹,莫晓勇²,刘丽婷^{1*}

(1. 江西省林业科学院,江西 南昌 330032;2. 华南农业大学 林学与风景园林学院,广东 广州 510642)

摘要:针对花榈木的种质资源保护利用问题,基于花榈木在中国的188条地理分布记录和9个气候变量,于SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 3种气候情景模式下,利用ENMeval数据包优化后的MaxEnt模型和ArcGIS对其当前和未来(2050s和2070s)的生态位进行模拟,研究影响花榈木地理分布的主导环境因子,分析其在不同气候情景模式下的空间分布格局和迁移趋势。结果表明,当模型的特征组合(FC)为线性、二次型、片段化、乘积型和阈值性,正则化乘数(RM)为2时,模型复杂度和过拟合程度较低,此时训练集的平均AUC和平均标准偏差分别为0.954和0.004,表明模型预测精度很高。花榈木在当前气候下的潜在分布区主要在我国东南部,核心分布区位于江西、湖南、福建、浙江等省份及其周边区域。刀切法(Jackknife)表明最干季度降水量、最湿季度降水量、最冷季度平均温度是影响其分布的主导气候因子。未来3种气候情景下花榈木总体适生区分布相对稳定,核心适生区主要表现为东西向稳定,于南北向中部迁移,尤以广东中部及江西中部收缩显著,这些迁移的核心适生区是花榈木应对气候变化的敏感区域,需引起重视。

关键词:气候变化;潜在分布区;花榈木;MaxEnt模型;模型参数优化

中图分类号:S790.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)06-0108-08

Prediction of Potential Distribution of *Ormosia henryi* in China Under Climate Change

SONG Ying^{1,2}, ZHANG Gang-long², JIA Quan-quan¹, WEN Qiang¹, MO Xiao-yong², LIU Li-ting^{1*}

(1. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, Jiangxi, China;

2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: In view of the protection and utilization of germplasm resources of *Ormosia henryi*, based on 188 geographical distribution data in China, nine variable factors were selected after correlation analysis, the maximum entropy model (MaxEnt) optimized by ENMeval data package and ArcGIS were used to simulate the current and future (2050s and 2070s) potential distribution under three climate scenarios of SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. It was found that when the feature combination (FC) of the model was linear, quadratic, hinge, product and threshold, and the regularization multiplier (RM) was 2, the complexity and over fitting degree of the model were low, and the average AUC and average standard deviation of the training set were 0.954 and 0.004, respectively, which indicated that MaxEnt model had high prediction accuracy. The potential distribution area of *O. henryi* in the current climate was mainly in the southeast of China, the main core suitable areas were concentrated in Jiangxi, Hunan, Fujian, Zhejiang and their adjacent areas. The application of Jackknife method indicated that the dominant factors influencing the distribution were precipitation in the driest month, precipitation of wettest quarter and mean temperature of the coldest quarter. Under the three climate scenarios in the future, distribution of the overall suitable area of *O. henryi* would be relatively stable with no significant change, the core suitable area would be stable in the east-

收稿日期:2020-12-28 修回日期:2021-05-20

基金项目:江西省重点研发项目(2016BBH80065);广东省林业科技创新项目(2018KJCX028)。

作者简介:宋 翩。研究方向:森林培育。E-mail:15162266519@163.com

*通信作者:刘丽婷,博士,副研究员。研究方向:森林经理。E-mail:39191393@qq.com

west direction, and migrate from the south-north direction to the middle, especially in middle of Guangdong and Jiangxi. Attention should be paid to these areas that were sensitive to climate change.

Key words: climate change; potential distribution; *Ormosia henryi*; MaxEnt model; model parameter optimization

气候变化是当前和未来影响生物多样性变化的主要因素之一^[1]。21世纪以来,气候变化带来的全球气候变暖和极端天气频发,加之水文土壤及人类活动等多种因素的共同影响,物种生存环境遭受破坏,生物多样性丧失速率加快,大量珍稀濒危物种的生存与发展受到威胁。而在未来全球气温及降水的持续变化背景下,生态系统和生物类群在区域尺度的地理分布也必将受到影响。现有研究表明,自末次盛冰期以来,剧烈的气候变化曾导致诸多物种地理分布动态变化,生境破碎化加剧,野生种群遗传多样性丧失^[2-3],显然,气候对物种的生存状态和潜在分布具有深远的影响,是大尺度上决定物种分布格局的关键因素^[4]。现如今人们也越来越认识到,由于社会、经济、环境等多种驱动因素之间的相互作用,气候变化、生物多样性丧失和环境污染等诸多挑战并存^[5]。在此背景下,一种新的社会经济发展情景——共享社会经济路径(shared socio-economic pathways, SSPs)被逐渐用于气候变化研究和评估。SSPs于2010年开发,以代表浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)为基础,充分考虑相关的社会经济因素,可用于预测2100年不同气候政策下温室气体的排放情景;其包含了4种经济发展路径:SSP1——可持续发展路径、SSP2——中间发展路径、SSP3——区域竞争发展路径、SSP4——不均衡发展路径^[6]、SSP5——以化石燃料为主发展路径。SSPs在全球和区域尺度已广泛应用于模拟气候变化对人口与经济发展、气象灾害、农业生产、生态系统等诸多领域的可能影响^[7-8]。

花榈木(*Ormosia henryi*)为豆科红豆属多年生常绿乔木,在我国多分布于热带、亚热带地区的低海拔常绿阔叶林中。花榈木树姿挺拔,四季常青,可作为优良的城市绿化和庭院美化树种。其木材致密坚硬,质地美观,是制作高档家具和工艺品的原料。在药用价值方面,其根、茎、叶和树皮均可入药,具有多种药用功效^[7]。有研究显示,含黄酮C-糖苷的花榈木叶乙醇提取物具有抗抑郁作用^[8],其精油也被证明可以减轻抑郁行为^[9],未来,花榈木还将有望成为缓解慢性应激所致记忆障碍的潜在药物片。作为我国珍贵树种,花榈木具有巨大的经济和生态潜力。然而,随着社会经济发展的需要,由于人类对其自然资源的不合理开发利用,花榈木的种群生存与发展

已受到严重威胁,其适生分布区域亦呈逐渐缩小且破碎化的趋势,另外,因其种子种皮致密坚硬,不易萌芽,自然繁殖能力较弱,植株的生长发育对生态环境要求较高,目前花榈木的野外种群数量已经锐减^[7],现已被列为国家Ⅱ级重点保护野生植物。迄今,国内外学者已经在种苗繁育技术、药用价值开发、群落资源分布等领域对花榈木展开了深入细致的研究,但还未见基于生态位模型对其进行潜在地理分布预测的相关报导。在此背景下,本研究基于生态位模型研究气候变化对花榈木适生范围的影响,对有效开展该物种多样性保护和资源培育利用具有重要的现实意义。

目前,在预测、解析物种分布范围及其变化情况等领域被运用较多的生态位模型有:生物气候分析和预测系统模型(BIOCLIM)、生态位因子分析模型(ecological niche factor analysis, ENFA)、CLIMEX地点比较模型、基于规则集的遗传算法模型(genetic algorithm for rule-set production, GARP)和最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)等。其中,最大熵模型在已知物种分布样本点和相关环境变量的基础上,建立约束条件,通过找出物种分布规律的最大熵而对其潜在分布作出模拟,相比于其他模型,MaxEnt具有建模直观、预测精度高、运算速度快等优点^[10-11]。目前MaxEnt模型已被广泛用于入侵生物潜在分布模拟、物种的适生环境预测、全球气候变化对物种分布的影响评估等方面,在生态学、保护生物学、生物地理学等多个领域得到开拓和应用^[12-14]。

本研究尝试在可持续发展(SSP1)、中度发展(SSP2)和常规发展(SSP5)3种气候模式情景下,应用MaxEnt模型和ArcGIS软件,对花榈木在我国的潜在分布区与格局变化进行预测,以期对花榈木的种质资源保护与适地栽培利用提供可靠参考。

1 材料与方法

1.1 MaxEnt模型及地图数据获取

本研究使用MaxEnt3.4.1(https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)进行模型的构建与验证,采用地理信息系统软件ArcGIS10.2进行数据的处理与结果的可视化,地图资源获取自国家基础地理信息系统(<http://nfgis.ns>

di.gov.cn/)。

1.2 花榈木分布信息数据获取及处理

通过查阅地方植物志、野外实地采集样点,以及在线查阅全球生物多样性信息机构(GBIF, <https://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/main.aspx>)、中国自然保护区标本资源共享平台(<http://www.papc.cn/>)等信息平台,初步得到花榈木在国内的599条样点信息。基于百度拾取坐标系统(<http://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/>)拾取补充缺少的坐标信息^[15],去除重复地域、重复坐标及不确定的样本信息,筛选后最终得到样点188个(图1)。

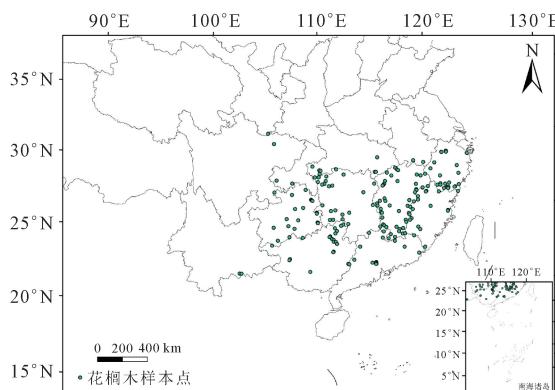


图1 花榈木样点分布

Fig. 1 Sample distribution of *Ormosia henryi*

1.3 环境数据获取及处理

本研究所采用的初始环境变量共20个,其中,当前(2000s—2020s)的19个生物气候数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料月值数据集(1951s—2020s),由ANUSPLIN 4.36软件中的薄板光滑样条函数(Thin Plate Smoothing Spline Method)(样条数为4、高程数据dem为协变量)插值而成^[16]。未来(2050s, 2070s)19个生物气候数据以及1个高程数据均来源于世界气候数据库(<https://worldclim.org/>),坐标系为WGS84,空间分辨率为5 km;未来气候情景采用共享社会经济路径(SSPs),根据气候情景与社会经济情景的对应情况,SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5等3种气候情景模式分别对应RCP2.6(低排放)、RCP4.5(中等排放)和RCP8.5(高排放)情景。

1.4 气候变量的选择

由于环境变量间存在一定的相关性,为避免其多重共线性导致模型过度拟合,需排除环境变量间的空间自相关性后方可用于模型计算^[17]。首先对20个环境变量使用MaxEnt进行预建模,得到所有环境变量的贡献率;其次,使用ArcGIS对20个环

境变量进行空间自相关性分析,得到相关系数矩阵。当相关系数 <0.85 时,对应的气候变量得以保留;若相关系数 ≥ 0.85 ,则根据MaxEnt预建模得到的贡献率,保留贡献率较大且具有明确生物学意义的环境变量,最终筛选得到9个环境变量用于MaxEnt模型运行,包括等温性(bio03)、温度季节性变化系数(bio04)、最湿季度平均温度(bio08)、最暖季度平均温度(bio10)、最冷季度平均温度(bio11)、降水季节变化系数(bio15)、最湿季度降水量(bio16)、最干季度降水量(bio17)和高程(elev)。

1.5 MaxEnt 模型构建与优化

有研究表明,MaxEnt模型的预测结果与特征组合(feature combination, FC)、正则化乘数(regularization multiplier, RM)密切相关,使用默认参数构建MaxEnt模型时,易出现模型过度拟合及转移能力不一的情况^[18]。因此本研究通过在R 4.0.3软件中调用ENMeval数据包来调整RM和FC的参数值,进而优化MaxEnt模型,得到最优模型^[19]。

在MaxEnt软件中,共有线性(Linear, L)、二次型(Quadratic, Q)、片段化(Hinge, H)、乘积型(Product, P)和阈值型(Threshold, T)5种特征可供选择,默认参数为RM=1, FC=LQHP。为优化模型,本研究将RM设置为0.5~4,每次增加0.5来进行测试,共8个梯度^[20];采用6个特征组合:L、LQ、H、LQH、LQHP、LQHPT;运用ENMeval数据包分析上述48种参数组合对模型构建的影响,最终根据Akaike信息量准则(Akaike information criterion correaction, AICc)、训练AUC和测试AUC值之差(the difference between training and testing AUC, AUC_{DIFF})和10%训练遗漏率(10% training omission rate, OR₁₀)三者来评估模型性能^[21]。其中,AICc是衡量统计模型拟合优良性的一种标准,可以权衡模型的复杂度和拟合数据的优良性,其优先考虑AICc值最小(即delta AICc=0)的模型;AUC_{DIFF}和OR₁₀均用来衡量模型的过度拟合程度,前者与模型的过拟合程度呈正相关,后者如果大于期望值0.1,则表明模型存在过度拟合^[21]。

1.6 MaxEnt 模型评价

模型优化后,将花榈木的分布点数据以及筛选得到的9个环境变量导入MaxEnt软件,选择刀切法(Do jackknife to measure variable importance)功能以检验各环境因子对建模的贡献率^[22],选取创建响应曲线(Create response curve)功能以获得分布概率与气候因子之间的关系。随机选择25%的样本分布点作为模型测试数据,75%作为模型训练数据,选择bootstrap运算方法^[23]重复运行模型15

次, RM 与 FC 取优化后的参数, 其他参数为模型默认设置。以受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)下的面积值(AUC 值)大小评价模型的准确性。AUC 值的取值范围为 0~1,<0.6 表明预测结果失败, 0.7~0.9 表示模型预测精度中等, 0.9 以上表示模型具有较高的精确度^[24]。

1.7 花榈木生境适宜性等级划分

将 MaxEnt 输出的分布预测数据导入 ArcGIS, 转换为栅格(Raster)格式后进行重分类, 采用自然间断点分级法(Natural Breaks Classification Method)将花榈木适生区划分为 5 个等级, 分别为非适生区(0~0.06)、边缘适生区(0.06~0.21)、低适生区

(0.21~0.38)、中适生区(0.38~0.53)、高适生区(0.53~0.71), 并计算、评估未来生态适宜区面积变化。

2 结果与分析

2.1 模型优化及预测准确性检验

基于 188 条花榈木分布记录和 9 个环境变量, 利用 MaxEnt 模型模拟预测花榈木当前潜在分布区。当优化参数 RM=2, FC=LQHPT 时, delta AICc=0; AUC_{DIFF} 比默认参数时降低了 37.5%, 表明该优化参数下模型性能较好, 过拟合程度较低, 可用于模型的转移。因此本研究采用优化参数 RM=2, FC=LQHPT 为模型构建参数。

表 1 MaxEnt 模型优化评价指标

Table 1 Model optimization evaluation indicators in MaxEnt model

参数设置	RM	FC	Delta AICc	AUC _{train}	AUC _{DIFF}	OR ₁₀
默认参数	1	LQHP	98.26	0.948	0.032	0.1
优化参数	2	LQHPT	0	0.951	0.02	0.1

在优化参数下进行模型预测, 采用受试者工作特征曲线分析法进行模型精度检验。如图 2 所示, 训练集的平均 AUC 值和平均标准偏差分别为 0.954 和 0.004, 表示由此模型预测得出的花榈木生态适生区具有较高的可信度。

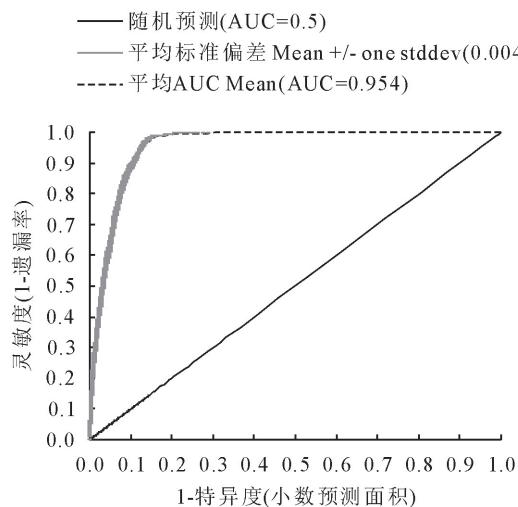


图 2 MaxEnt 模型中 ROC 预测结果

Fig. 2 Prediction validation with ROC in MaxEnt

2.2 影响花榈木地理分布的主导气候因子

用模型检测生物气候变量对于花榈木分布增益的贡献率(表 2), 采用刀切法评估各生态因子对花榈木地理分布的重要性(图 3), 发现 bio17 最干季度降水量、bio16 最湿季度降水量、bio11 最冷季度平均温度这 3 个变量对花榈木的影响最大。可见, 降水量和温度是影响花榈木地理分布的主导气候因子。

表 2 MaxEnt 模型中各个环境变量的重要性

Table 2 Importance of each environmental variable in MaxEnt model

变量代码	变量描述	贡献率 /%	置换重要性 /%
bio17	最干季度降水量	53.7	22.1
bio04	温度季节性变化系数	15.9	25.1
bio11	最冷季度平均温度	14.5	6.0
bio16	最湿季度降水量	8.0	9.8
elev	高程	2.5	6.6
bio15	降水季节性变化系数	2.5	4.1
bio03	等温性	2.0	4.1
bio10	最暖季度平均温度	0.9	21.0
bio08	最湿季度平均温度	0.1	1.2

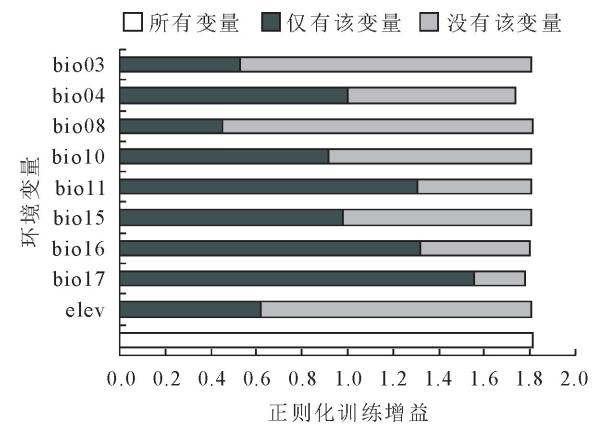


图 3 环境因子对花榈木分布作用的刀切法评价

Fig. 3 Jackknife evaluation of environment variables on *O. henryi*

为进一步探究花榈木在当前潜在适生区的气候特征, 将上述 3 个主导因子分别导入 MaxEnt 模型

进行单因子建模,绘制单因子响应曲线,当花榈木分布概率 $P \geq 0.53$,适宜性等级为高适宜分布时,得到各个主导气候因子的适宜范围。结果显示, bio17 最干季度降水量、bio16 最湿季度降水量、bio11 最冷季度平均温度的阈值分别为 $155 \sim 252 \text{ mm}$ 、 $636 \sim 1723 \text{ mm}$ 、 $7.6 \sim 13.9^\circ\text{C}$ 。

2.3 花榈木在当前气候下的潜在适生分布区

将花榈木分布点和环境变量数据导入 MaxEnt 模型进行模拟,得到花榈木在当前气候下的潜在分布区(图 4),主要分布区范围 $18^\circ25'11'' \sim 32^\circ26'37'' \text{ N}, 96^\circ36'32'' \sim 122^\circ52'39'' \text{ E}$,总适生面积约 195.67 万 km^2 ,已覆盖现存分布区域,表明模拟得到的花榈木潜在分布区与实际分布范围较为一致。利用 Reclassify 重分类工具进行等级划分,得到的高适生区、中适生区、低适生区及边缘适生区分别占总适生区总面积的 20.55%、26.46%、17.44% 和 35.55%。由图 4 可知,花榈木的适生范围主要集中在我国东南地区,其中,高适生区主要位于江西、湖南、福建、广西、浙江等地,面积约为 39.38 万 km^2 。

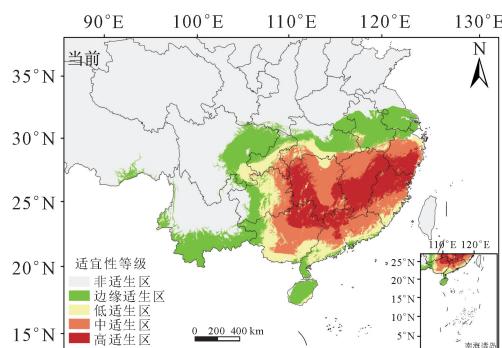


图 4 当前气候条件下花榈木在我国的潜在分布区

Fig. 4 Potential distribution of *O. henryi* in China under current climatic conditions

2.4 花榈木在未来气候下的潜在分布区变迁

由模型预测结果可知(表 3),与当前气候相比,未来不同气候情景下,花榈木当前的适生区绝大部分仍然保留,但相较于当前分布面积总体上缩减。SSP1-2.6 气候情景下,2050s 花榈木的潜在分布区面积较当前减少 4.10 万 km^2 ;在 2070s,中适生区和边缘适生区面积均缩减,此时总分布区面积为 188 万 km^2 ,较当前面积变化其缩减比例为 3.9%。SSP2-4.5 气候情景下,2050s 的分布面积相较于当前有所缩减,其中,高、低适生区分别扩张,而中、边缘适生区面积稍有下降。SSP5-8.5 气候情景下,2050s 高、中及边缘适生区均缩减,低适生区扩张;2070s 相较于当前适生区面积变化较小,但高适生区和低适生区面积均有所增加。

将不同气候情景下花榈木适生区的空间格局进

行对比分析(图 5),结果显示,相较于当前,除 SSP5-8.5(2050s)外,未来各气候情景下花榈木的高适生区均呈现扩张状态,主要集中在安徽西北部、福建西南部、湖南中南部、湖北东南部、贵州东部等地区,台湾北部也有零星的增加,广东自沿海地区逐渐向内陆缩减。在未来,花榈木的核心适生区于东西向稳定,于南北向中部缩减,尤以广东中部及江西中部收缩显著,这些迁移的核心适生区为花榈木应对气候变化的敏感区,需引起重视。

表 3 未来不同气候情景下花榈木的潜在适生分布区面积
($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 3 Potential suitable area of *O. henryi* under different climate change scenarios ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

气候情景	时期	高适生区	中适生区	低适生区	边缘适生区	总面积
当前		40.20	51.78	34.13	69.56	195.67
SSP1-2.6	2050s	40.38	60.89	28.89	61.42	191.57
	2070s	41.99	50.07	36.52	59.42	188.00
SSP2-4.5	2050s	47.90	50.39	34.73	58.90	191.91
	2070s	42.38	49.41	36.85	67.07	195.71
SSP5-8.5	2050s	38.60	51.66	40.58	68.74	199.57
	2070s	45.74	40.28	40.28	66.73	193.03

结合适生区空间变化趋势图(图 6),统计不同气候变化情景下花榈木的适生空间格局变化,得知花榈木未来总体分布范围相对稳定,潜在适生区面积波动较小。新增区域主要位于湖北北部、贵州西部、云南西北部以及台湾等地,此外,江苏中东部及等地亦有零星拓展区域,于 SSP5-8.5(2050s)气候情景下扩张最为明显;收缩部分主要为边缘适生区,于云南南部、安徽西北部与江苏中部等地,呈狭长带状。

3 结论与讨论

本研究采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的共享社会经济路径(SSPs),研究在未来社会经济发展和政策干预下,温室气体排放的情景变化对物种的地理分布的影响。相较于以往的模式比较计划,引入 SSPs 的 CMIP6 能够在人口、经济和技术等社会发展指标的变化的情境下,实现对各种减排措施的成本效益评估,同时提供了比 RCPs 更多元化的空气污染物排放情景,这些改进很大程度上弥补了 CMIP5 中 RCPs 情景对社会经济活动不确定性^[25],从而能够提高气候研究对政策制定的支持力。

本研究中,MaxEnt 模型检验 AUC 值达到了 0.954,表明该模型预测结果具有极高的精度和可信度。花榈木潜在适生境集中分布于我国东南部地区,其中,核心分布区主要位于江西、湖南、福建等省

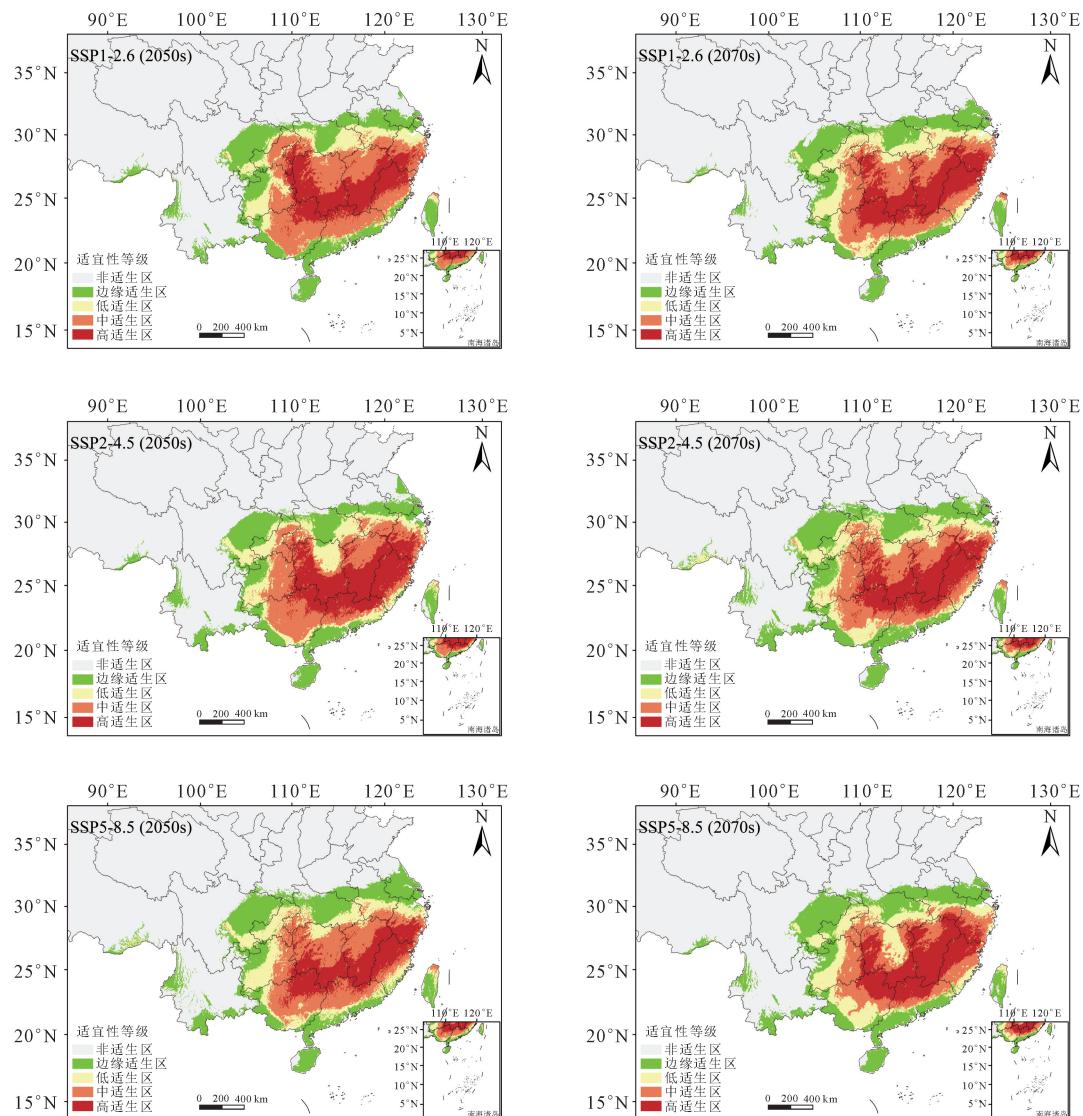


图5 不同气候情景下花榈木潜在适生区分布

Fig. 5 Distribution of potential suitable areas of *O. henryi* under different climate scenarios

区,预测结果与当前实际分布相一致。花榈木实际分布区地处大陆性中亚热带季风湿润气候,气温的季节变化显著,夏季高温多雨,持续时间长,冬季寒冷期短,最冷月平均气温在0℃以上。在野外调查中发现,花榈木常分布于100~1 300 m的山坡、溪谷及杂木林中,多喜于在光热充足、湿度适宜的亚热带常绿阔叶林生境下生存,说明模型预测结果与花榈木的实际生长特性相吻合。

有研究表明,1960—2013年中国各地年际气温呈上升趋势,年际降水除西南部趋于减少,其余大部分地区均增加,且未来还将持续这一趋势^[26],另外,我国降水类型正不断趋向于极端降水^[68],而气温、光照和水分是植物物候期变化最主要的影响因子^[27]。因此,考虑到近20 a来气候变化的显著性,本研究采用2000—2020年中国气象数据网的数据插值到研究区域并进行物种潜在分布的模拟预测。

目前,MaxEnt模型在物种分布预测的研究中应用较多,有研究表明,MaxEnt模型的预测结果主要与正则化乘数(RM)、特征组合(FC)、最大背景点数(BG)密切相关;而最大背景点数,即在模型构建区域选取的不存在分布点,MaxEnt模型会将其关联的环境变量用于和物种存在分布点所关联的环境变量进行对比,分析物种生态需求,进而预测物种分布^[28]。本研究主要探索了RM与FC对模型的影响,虽有研究表明BG的选择对物种的潜在分布和生态位的影响较小^[29],但下一步可考虑BG的影响,以求进一步优化模型。另外,本研究着重探讨气候因子对物种分布的影响,未考虑到其他诸如土壤、人类干扰强度、种间相互竞争、物种扩散能力等因素,未来可充分评估各变量的综合作用,以进一步提升模型预测效果。

气候环境是决定物种分布的关键因素,物种的

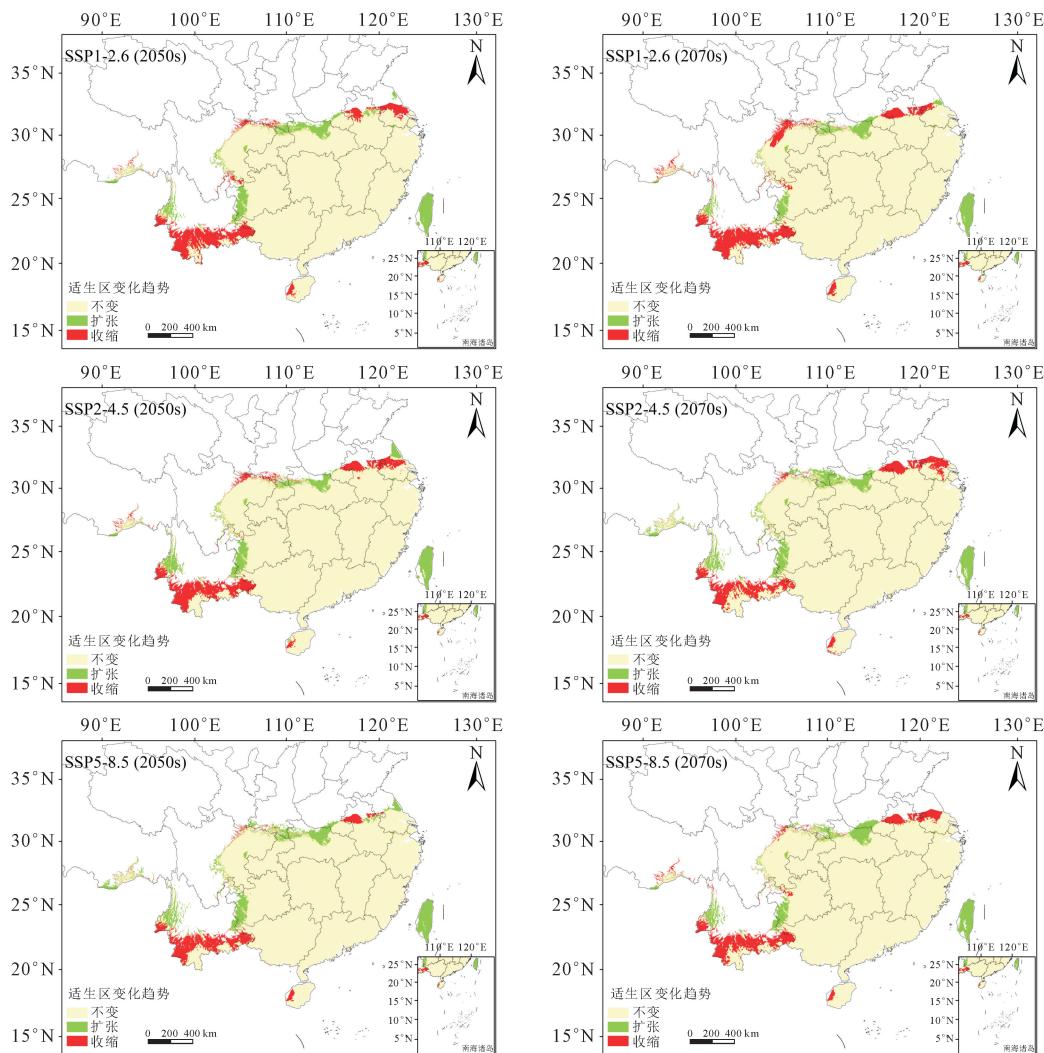


图 6 不同气候情景下花榈木适生区的空间格局变化

Fig. 6 Spatial pattern change of suitable area for *O. henryi* under different climate scenarios

分布变化也是响应气候变化最明显的直接反应^[30]。本研究中,运用 MaxEnt 模型与 ArcGIS 对花榈木不同气候情景下各适生等级分布区面积进行了预测,并对总体分布范围的新增、缩减及稳定区域实现可视化表达,从而能够更直观了解到未来花榈木适生区的扩张、衰退结果。值得注意的是,通过对不同气候变化情景下适生区的空间格局进行对比分析,得知花榈木在未来的总体空间分布与当前无太大差异,说明其对未来的气候变化有一定的适应能力。然而,虽然目前花榈木的适生区范围尚属广泛,但通过对花榈木野生种群资源调查发现,由于资源被过度开发,又因其自然更新繁衍能力较弱等内外因素影响,花榈木野生种群规模已经锐减,对其制定相关保护措施仍十分重要。

在对花榈木种质资源保护工作中,可在中适生区适当增加花榈木的迁入及扩散,选择性地营造花榈木人工群落,使之有利于花榈木种群繁衍、扩散。对于高适生区,应就地保护与人工栽培并行,鉴于花

榈木的珍稀濒危性,及其重要的经济和生态价值,需加强公众对珍稀濒危植物的了解,禁止滥采乱伐等行为。可视种群密度大小建立自然生态保护区,加强对敏感区域的重点观测,必要时采取补救措施,以维持其种群丰富度及遗传多样性。此外,在迁地保护及引种栽培过程中,除了要遵循适地适树的原则外,还应综合考虑病虫害、土壤质地、种间竞争等因素,以提高花榈木栽培成活率。

参考文献:

- [1] 吴军,徐海根,陈炼.气候变化对物种影响研究综述[J].生态与农村环境学报,2011,27(4):1-6.
WU J, XU H G, CHEN L. A review of impacts of climate change on species[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] 沈涛,张霁,申仕康,等.西南地区红花龙胆分布格局模拟与气候变化影响评价[J].应用生态学报,2017,28(8):2499-2508.
SHEN T, ZHANG J, SHEN S K, et al. Distribution simulation of *Gentiana rhodantha* in Southwest China and assessment of

- climate change impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2499-2508. (in Chinese)
- [3] DESCOMBES P, WISZ M S, LEPRIEUR F, et al. Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21(7): 2479-2487.
- [4] HUNTLEY B, COLLINGHAM Y C, SINGARAYER J S, et al. Explaining patterns of avian diversity and endemism: climate and biomes of Southern Africa over the last 140 000 years [J]. Journal of Biogeography, 2016, 43(5): 874-886.
- [5] ELLISON E, BAKER L, WILSON A. IPCC special report meeting: climate change around the globe[J]. Weather, 2020, 75(9): 293-294.
- [6] KRIEGLER E, NEILL B C O, HALLEGATTE S, et al. The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways[J]. Global Environmental Change, 2012, 22(4): 807-822.
- [7] 刘鹏,何万存,黄小春,等.花榈木研究现状及保护对策[J].南方林业科学,2017,45(3):45-48.
- LIU P, HE W C, HUANG X C, et al. Research status and conservation strategy of *Ormosia henryi*[J]. South China Forestry Science, 2017, 45(3): 45-48. (in Chinese)
- [8] 刘冬,刘顶鼎,马丽,等.花榈木提取物对慢性不可预知应激小鼠认知损害的影响(英文)[J].生物化学与生物物理进展,2020,47(8):768-779.
- LIU D, LIU D D, MA L, et al. *Ormosia henryi* Prain leaf extract alleviates cognitive impairment in chronic unpredictable mild stress mice[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2020, 47(8): 768-779. (in Chinese)
- [9] 陈军,徐金勇,徐蓉,等.花梨木精油通过嗅觉通路改善小鼠抑郁样行为及其神经递质[J].江苏医药,2012,38(6):657-659.
- CHEN J, XU J Y, XU R, et al. Rosewood essential oil relieving depression-like behaviors and neurotransmitters via olfactory pathway[J]. Jiangsu Medical Journal, 2012, 38(6): 657-659. (in Chinese)
- [10] MEROW C, SILANDER J A. A comparison of Maxlike and Maxent for modelling species distributions[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014(3): 215-225.
- [11] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3): 231-259.
- [12] 塞依丁·海米提,努尔巴依·阿布都沙力克,许仲林,等.基于MaxEnt模型对新疆地区的蒙古沙拐枣潜在分布预测及适生性分析[J].西北林学院学报,2018,33(4):71-77.
- Sayit Hamit, Nurbay Abdushalih, XU Z L, et al. Analysis of potential distribution and suitable area of *Calligonum mongolicum* in Xinjiang based on MaxEnt model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 71-77. (in Chinese)
- [13] 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.
- XING D L, HAO Z Q. The principle of maximum entropy and its applications in ecology[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(3): 295-302. (in Chinese)
- [14] 帕尔曼·帕哈尔丁,楚光明,常亚玲,等.基于最大熵(Max-Ent)模型对西北地区2种红砂属植物潜在适宜区预测分析[J].西北林学院学报,2020,35(4):18-25.
- Perlman Pahardin, CHU G M, CHANG Y L, et al. Prediction and analysis of two potential suitable areas of *Reaumuria* plants in Northwest China based on the maximum entropy (MaxEnt) model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 18-25. (in Chinese)
- [15] 刘清亮,李垚,方升佐.基于MaxEnt模型的青钱柳潜在适宜栽培区预测[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017, 41(4): 25-29.
- LIU Q L, L Y, FANG S Z. MaxEnt model-based identification of potential *Cyclocarya paliurus* cultivation regions[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(4): 25-29. (in Chinese)
- [16] 刘志红,MCVICAR TIM R., Van Niel,等.专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100.
- LIU Z H, MCVICAR T R, NIEL V, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92-100. (in Chinese)
- [17] GRAHAM M H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression[J]. Ecology, 2003, 84(11).
- [18] NARKIS S, MORALES, et al. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? a systematic review[J]. Peerj, 2017.
- [19] MUSCARELLA R, GALANTE P J, SOLEY-GUARDIA M, et al. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MaxEnt ecological niche models[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014(11): 1198-1205.
- [20] 王琦,樊保国,赵光华.气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测[J].生态学杂志,2020,39(11):3774-3784.
- WANG Q, FAN B G, ZHAO G H. Prediction of potential distribution area of *Corylus mandshurica* in China under climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3774-3784. (in Chinese)
- [21] AKAIKE H, PETROV B N, CZAKI F. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle[M]. New York: Springer, 1973.
- [22] 张童,黄治昊,彭杨婧,等.基于Maxent模型的软枣猕猴桃在中国潜在适生区预测[J].生态学报,2020,40(14):4921-4928.
- ZHANG T, HUANG Z H, PENG Y J, et al. Prediction of potential suitable areas of *Actinidia arguta* in China based on Maxent model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4921-4928. (in Chinese)
- [23] 崔相艳,王文娟,杨小强,等.基于生态位模型预测野生油茶的潜在分布[J].生物多样性,2016,24(10):1117-1128.
- CUI X Y, WANG W J, YANG X Q, et al. Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1117-1128. (in Chinese)

(下转第273页)

- ural Science, 2008(4):40-48. (in Chinese)
- [24] DENG H, JIM C Y. Spontaneous plant colonization and bird visits of tropical extensive green roof[J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(2):1-16.
- [25] 陈春啼.被遗忘的城市“生境”:重庆市墙体自生植物调查分析[J].*生态学报*,2020,40(2):473-483.
- CHEN C D. Forgotten urban habitats: analysis of spontaneous vegetation on the urban walls of Chongqing city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2):473-483. (in Chinese)
- [26] 张斯斯,肖宜安.中国外来入侵植物生活型与性系统多样性[J].*植物研究*,2013,33(3):351-359.
- ZHANG S S, XIAO Y A. Life-form and diversity of sexual system of invasive alien plants in China[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2013, 33(3):351-359. (in Chinese)
- [27] 蔡好,董丽.北京市绿道入侵植物扩散的外界影响因子研究[J].*城市建筑*,2017(36):25-29.
- CAI Y, DONG L. External impact factors on the invasion of invasive plants in Beijing greenway [J]. *Urbanism and Architecture*, 2017(36):25-29. (in Chinese)
- [28] 蔡北溟,陈晓双,达良俊,等.上海市环城绿带建成初期林下自然草本植物多样性格局及其成因[J].*华东师范大学学报:自然科学版*,2012(6):13-20.
- CAI B M, CHEN X S, DA L J, et al. Study on the diversity pattern of natural herb under the forest of Shanghai green belt during its early building-up period [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2012(6):13-20. (in Chinese)
- [29] 任颖,何萍,徐杰,等.滦河流域河岸带入侵植物分布特征及其与环境的关系[J].*应用生态学报*,2017,28(6):1843-1850.
- REN Y, HE P, XU J, et al. Distribution pattern of riparian invasive plants in Luanhe basin, North China and its relationship with environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6):1843-1850. (in Chinese)
- [30] FRAISSÉ T, MULLER E, DÉCamps O. Evaluation of spontaneous species for the revegetation of reservoir margins [J]. *Ambio*, 1997, 26(6):375-381.
- [31] LI X P, FAN S X, GUAN J H, et al. Diversity and influencing factors on spontaneous plant distribution in Beijing Olympic Forest Park [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181:157-168.
- [32] 张庆费,夏楷.上海城区主要交通绿带木本植物多样性分析[J].*中国园林*,2002,18(1):72-74.
- ZHANG Q F, XIA L. Analysis of the woody plants diversity of some vital urban roads greenbelt in Shanghai [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2002, 18(1):72-74. (in Chinese)
- [33] CATALANO C, MARCENÒ C, LAUDICINA V A, et al. Thirty years unmanaged green roofs: ecological research and design implications[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149(1):11-19.

(上接第 115 页)

- [24] 黄红兰,钟沃谷,衣德萍,等.未来气候变化对我国毛红椿适生区分布格局的影响预测[J].*南京林业大学学报:自然科学版*,2020,44(3):163-170.
- HUANG H L, ZHONG W G, YI D P, et al. Predicting the impact of future climate change on the distribution patterns of *Toona ciliata* var. *pubescens* in China[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44 (3): 163-170. (in Chinese)
- [25] GIDDEN M J, RIAHI K, SMITH S J, et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4):1443-1475.
- [26] 赵嘉阳.中国1960—2013年气候变化时空特征、突变及未来趋势分析[D].福州:福建农林大学,2017.
- [27] 徐雨晴,陆佩玲,于强.气候变化对植物物候影响的研究进展[J].*资源科学*,2004,26(1):129-136.
- XU Y Q, LU P L, YU Q. Review and prospect in the researches of influence of climate change on plant phenology[J]. *Resources Science*, 2004, 26(1):129-136. (in Chinese)
- [28] CORY MEROW M J S J. 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.
- [29] 朱耿平,原雪姣,范靖宇,等. MaxEnt 模型参数设置对所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蝽为例[J].*生物安全学报*,2018,27(2):118-123.
- ZHU G P, YUAN X J, FAN J Y, et al. Effects of model parameters in MaxEnt modeling of ecological niche and geographic distribution: case study of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*[J]. *Journal of Biosafety*, 2018, 27(2):118-123. (in Chinese)
- [30] 段义忠,王驰,王海涛,等.基于生态位模型预测不同气候下沙冬青属植物在我国的潜在地理适生区[J].*生态学报*,2020,40(21):1-13.
- DUAN Y Z, WANG C, WANG H T, et al. Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21):1-13. (in Chinese)