

DOI: 10.20103/j.stxb.202212023476

翁慧莹, 刘益鹏, 杨黔越, 叶兴状, 毕远洋, 张国防, 陈世品, 刘宝. 福建柏地理分布及随气候变化的分布格局模拟. 生态学报, 2025, 45(1): 137-146.
Weng H Y, Liu Y P, Yang Q Y, Ye X Z, Bi Y Y, Zhang G F, Chen S P, Liu B. The simulation of geographical distribution and distribution pattern along with climate change of *Chamaecyparis hodginsii*. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 137-146.

福建柏地理分布及随气候变化的分布格局模拟

翁慧莹¹, 刘益鹏^{1,2}, 杨黔越¹, 叶兴状¹, 毕远洋³, 张国防¹, 陈世品¹, 刘 宝^{1,*}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 湖南小溪国家级自然保护区管理局, 湘西土家族苗族自治州 416000

3 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002

摘要:气候变化对物种的地理分布格局有重要驱动作用, 全球气候变化和人类活动的干扰已经严重威胁到福建柏 (*Chamaecyparis hodginsii*) 的生存环境, 野生资源日渐稀少, 预测了末次间冰期以来福建柏地理分布格局变迁历史, 探讨环境因子对其潜在分布的影响机制, 为福建柏的资源保护和可持续经营提供科学依据。基于福建柏的 160 个现代分布点信息和 10 个环境因子, 利用 MaxEnt 模型并结合 ArcGIS 软件, 预测福建柏在过去、现代和未来不同气候情景下的潜在适生区, 并利用贡献率和置换重要值分析环境因子对其地理分布的影响机制。结果显示: (1) 福建柏当代高度适生分布区主要位于浙江南部、福建、湘赣交界处、湘粤接壤处以及湘桂交界处等; (2) 未来 4 种气候变化情景下, 福建柏总适宜分布区较当代分布范围呈收缩趋势, 但其高度适生区分布面积除 2090s-SSP126 外, 较当前时期均表现出扩增趋势; (3) 平均昼夜温差 (bio2)、最干月降水量 (bio14)、最暖季度降水量 (bio18)、海拔 (elev)、最冷月最低气温 (bio6) 是制约福建柏地理分布变迁的关键因子。

关键词:福建柏; SSPs 情景; MaxEnt 模型; 潜在适生区; 气候变化

The simulation of geographical distribution and distribution pattern along with climate change of *Chamaecyparis hodginsii*

WENG Huiying¹, LIU Yipeng^{1,2}, YANG Qianye¹, YE Xingzhuang¹, BI Yuanyang³, ZHANG Guofang¹, CHEN Shipin¹, LIU Bao^{1,*}

1 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Administration of Xiaoxi National Reserve of Hunan, Tujia-Miao Autonomous Prefecture of Xiangxi 416000, China

3 College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Climate change has an important driving effect on the geographical distribution pattern of species. Global climate change and human activities have seriously threatened the living environment of *Chamaecyparis hodginsii*, and its wild resources are increasingly scarce. This study predicted the history of the geographical distribution pattern of *Chamaecyparis hodginsii* since the last interglacial period, and explored the influence mechanism of environmental factors on its potential distribution, so as to provide scientific basis for the resource protection and sustainable management of *Chamaecyparis hodginsii*. Based on 160 modern distribution sites of *Chamaecyparis hodginsii* and 10 environmental factors, MaxEnt model and ArcGIS software were used to predict the potential habitat of *Chamaecyparis hodginsii* under different climatic scenarios in the past, modern and future, and the influence mechanism of environmental factors on its geographical distribution were analyzed using contribution rate and permutation importance. The results showed that: (1) The current highly suitable distribution areas of *Chamaecyparis hodginsii* were mainly located in southern Zhejiang, Fujian, the junction of Hunan and

基金项目: 国家林业局科技项目 (KJZXSA2018008); 第二次全国重点保护野生植物资源调查与研究 (KH140126A)

收稿日期: 2022-12-03; 网络出版日期: 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fafulb@163.com

Jiangxi, the junction of Hunan and Guangdong, and the junction of Hunan and Guangxi. (2) Under the four future climate change scenarios, the total suitable distribution area of *Chamaecyparis hodginsii* showed a shrinking trend compared with the contemporary distribution range, but its highly suitable distribution area showed an increasing trend compared with the current period except for 2090s-SSP126. (3) The mean diurnal range (bio2), the precipitation of driest month (bio14), the precipitation of warmest quarter (bio18), elevation (elev), and the min temperature of coldest month (bio6) were the key factors that restricted the geographical distribution of *Chamaecyparis hodginsii*.

Key Words: *Chamaecyparis hodginsii*; SSPs scenarios; MaxEnt model; potential suitable area; climate change

揭示物种地理分布的动态迁移格局及气候变化制约物种分布的驱动机制,了解物种对环境的适应性,对物种积极应对气候变化带来的挑战具有重要生态意义。全球气候的持续性变化,将不断影响生态系统自我调节能力^[1],导致濒危物种分布破碎化及加剧适生区收缩^[2],引发极端天气^[3]等。末次冰川期产生的剧烈气候变化触发植物栖息地的自然选择,引起植物地理分布区域的变化^[4]。有研究表明末次间冰期至今的植物分布格局由于气候变化等原因呈现不同程度的收缩或扩散趋势^[5]。因此,追溯末次间冰期以来物种的分布格局与历史迁移动态,对保护生物多样性和实施可持续性发展战略具有重要意义。

物种分布模型是基于物种已知的分布数据及所关联的环境因子构建的模型,被广泛应用于模拟气候变化对物种分布影响的研究^[6]。其中,Maxent 模型在众多模型评估中具有出色表现,并且不受样本数据大小的制约,在最大程度上能保证较高的精确度^[7]。因此,近年来,相关学者利用 Maxent 模型模拟濒危植物各时期潜在分布区的更迭过程,如云南榿树^[8] (*Torreya yunnanensis*)、刺楸^[9] (*Kalopanax septemlobus*)、格木^[10] (*Erythrophloeum fordii*)等。然而,近年来有研究表明 Maxent 模型中的默认设置预测效果较差,而调用 ENMeval 数据包可有效提高 MaxEnt 模型预测的科学性^[11]。

福建柏(*Chamaecyparis hodginsii*)为柏科扁柏属(*Chamaecyparis*)常绿乔木,喜光喜湿,分布区狭窄,种群规模小,在中国南方山区呈零星分布^[12]。福建柏由于其材质优良,具有较高的经济价值,受人为破坏严重,导致福建柏野生资源几近枯竭,且还发现福建柏再生能力较弱^[13],目前已被列为国家二级保护野生植物。因此,减少人为对福建柏的干扰,加大保护这一珍稀物种的力度刻不容缓。关于气候变化影响福建柏的地理分布的研究,李单琦等认为温度和降水对福建柏分布影响较大,并推断降雨限制其更新与自然分布^[14]。刘阳等研究得出末次盛冰期至现在福建柏的分布区总面积经历了明显的缩减进程,以及未来气候变化条件下,福建柏分布主要向东西部扩张,南北方收缩^[15]。然而未来气候变化背景下,不同程度的温度变化与社会经济发展情景如何导致福建柏分布格局的演变?末次间冰期以来福建柏潜在适宜生境的空间格局是如何变化的?这些问题仍需进一步探讨。

鉴于此,本研究采用优化参数构建 MaxEnt 模型与地理信息软件(ArcGIS),研究福建柏过去、现代和未来不同时期的地理分布,探讨其适生区空间分布的动态变化,剖析制约福建柏地理分布的主要气候因子,进一步探寻合理的物种保护策略,也为柏科植物物种形成演化研究奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 福建柏地理分布数据的收集与处理

通过中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)和国家标本资源平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn>)以及野外调查获得福建柏地理分布点数据,同时查阅相关文献资料。为保证所获样本点数据的准确性,对全部分布点进行筛选。剔除重复、记录不明及人工栽培的分布记录,通过谷歌地图确定无经纬度但有具体位置的经纬度坐标。同时为尽量避免因地理聚集带来的空间自相关,每 10km×10km 的网格中只保留 1 个分布点,最终整理得到不重复、非人工栽培的 160 个福建柏现代分布点(图 1)。

1.1.2 环境变量的筛选

从世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org>, WorldClim) 中下载海拔因子与末次间冰期 (Last Interglacial, LIG, 约 12—14 万年前)、末次盛冰期 (Last Glacial Maximum, LGM, 约 2.2 万年前)、全新世中期 (Mid-Holocene, MH, 约 6000 年前)、当代和未来 (2050s, 2090s) 的气候数据, 其中末次间冰期分辨率为 30arc-second, 其余时期均为 2.5arc-minutes。选择共享社会经济路径 (SSP) 情景, SSP126 情景代表了低辐射强迫情况, SSP585 则代表了高辐射强迫情况^[16]。

考虑到各环境因子之间存在一定的共线性, 需对环境变量进行相关性分析^[17]。将福建柏分布点与环境变量导入 ArcGIS 软件中提取点插值, 删除值为 -9999 的分布信息^[18]。将整理所得数据通过 SPSS 软件进行皮尔逊 (pearson) 相关性分析, 在一组相关性很高 ($|r| > 0.7$) 的变量中, 保留一个与物种地理分布相关的变量^[19]。并结合福建柏生理生态特性, 获得以下 10 个环境因子参与建模: 年均温 (bio1)、平均昼夜温差 (bio2)、等温性 (bio3)、最热月最高气温 (bio5)、最冷月最低气温 (bio6)、最湿月降水量 (bio13)、最干月降水量 (bio14)、降水量季节性变化 (bio15)、最暖季度降水量 (bio18)、海拔 (elev)。

1.2 模型的参数设置与构建

为了提高预测模型的准确性, 本研究调用与物种分布模型相关的 R 语言中的 ENMeval 数据包里的特征组合 (feature combination, FC) 和调控倍频 (regularization multiplier, RM) 进行检验。设置调控倍频为 0.5—6, 间隔 0.5, 同时采用 L、LQ、H、LQH、LQHP、LQHPT、HPT 和 QPT 这 8 种特征组合, 并对以上 96 种参数组合进行测试。AICc 值综合反映了模型的拟合优度和复杂性, 是衡量模型性能的优良的一种指标, 模型拟合效果与值的大小呈负相关关系, 因此选取具有最小 AICc 值 ($\Delta AICc = 0$) 的最佳参数组合和调控倍频用于建模^[20]。将筛选的 10 个环境变量数据与 160 个福建柏分布点数据导入 MaxEnt 模型, 随机选取 75% 的分布数据用于建模, 25% 的数据用于模型验证, 模型重复运行 10 次, 选择 bootstrap, 取平均值作为最终预测结果。选择受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 中的 AUC (area under curve) 值来衡量模型的准确程度。AUC 值的取值范围在 0—1 之间, 该值与模型模拟效果呈正相关关系, 值越大, 表示模型判断能力越强, 其中, 当 AUC 值 ≥ 0.9 时, 模拟效果极准确^[21]。

1.3 福建柏适生区等级划分

将 MaxEnt 模型的模拟输出结果导入 ArcGIS 中, 转换为栅格格式, 结合地图数据, 进行重分类。通过人工 (Manual) 分级方法将适生等级划分为 4 类^[22], 分别为非适生区 (0—0.2)、低适生区 (0.2—0.5)、中适生区 (0.5—0.7) 和高适生区 (0.7—1)。同时, 利用 ArcGIS 中的面积制表, 计算各等级适生区面积。

1.4 福建柏适生区分布格局变迁

将福建柏适宜生境的迁移格局变化类型定义为增加区, 丧失区, 保留区。将物种存在概率值 ≥ 0.5 作为适宜区, 反之定义为非适宜区, 建立各时期福建柏分布的非适生/适生 (0, 1) 矩阵, 计算福建柏各时期适生区的总体变迁过程, 其中矩阵值 0 $\rightarrow$ 1 视为增加区, 1 $\rightarrow$ 0 视为丧失区, 1 $\rightarrow$ 1 视为保留区^[23]。最后将所得结果载入 ArcGIS 中, 得出福建柏分布区的总体变迁趋势。

2 结果与分析

2.1 模型预测的准确性

本研究运用 ENMeval 数据包优化 MaxEnt 模型, 对福建柏潜在适生区进行模拟。由表 1 可知, $\Delta AICc =$

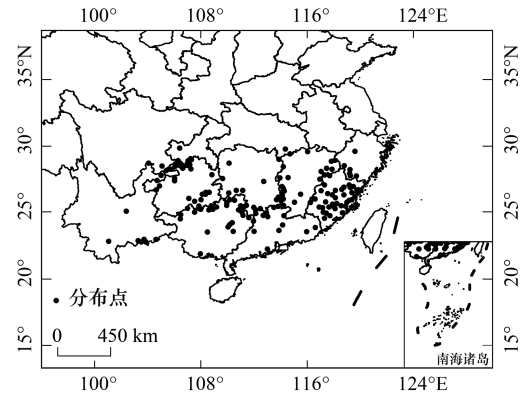


图 1 研究区域及福建柏分布点

Fig.1 Study areal and distribution points of *Chamaecyparis hodginsii*

0 时,FC=QPT,RM=1.5,表明该参数下模拟结果最优。在该参数下,预测福建柏不同时期的适生区分布格局,其中当代训练 AUC 平均值为 0.976(图 2),末次间冰期、末次盛冰期、全新世中期以及未来 4 个气候情景的训练 AUC 平均值分别为 0.978、0.975、0.976、0.975、0.977、0.975、0.975,均大于 0.9,表明结果预测非常准确。

表 1 Maxent 模型 ENMeval 优化评价指标

Table 1 Evaluation metrics of Maxent model generated by ENMeval					
类型 Type	特征组合(FC) Feature combination	调控倍频(RM) Regularization multiplier	最小信息 准则 AICc Delta.AICc	训练集 AUC 与 测试集 AUC 平均差值 Avg.diff.AUC	10%测试遗漏 率平均值 Avg.test.or10pct
默认 Default	LQHPT	1	107.1393	0.0085	0.1469
优化 Optimized	QPT	1.5	0	0.0057	0.1219

AICc: Akaike 信息量准则 The akaike information criterion corrected; AUC: 受试者工作特征曲线下面积 The area under the subject curve; test.or10pct: 10%测试遗漏率 10% test omission rate; LQHPT: 线性特征+二次型特征+片段化特征+乘积型特征+阈值性特征; QPT: 二次型特征+乘积型特征+阈值性特征; Delta.AICc: AICc The minimum information criterion AICc value; Avg.diff.AUC: Average difference between the training and testing AUC; Avg.test.or10pct: The average 10% test omission rate

2.2 福建柏不同时期适生区预测结果

现代福建柏的潜在适生区预测结果如表 2、图 3 所示,适宜生境总面积为 $70.66\times10^4\text{ km}^2$,其中高度适宜生境所占面积为 $3.12\times10^4\text{ km}^2$,占总适宜生境面积的 4.42%,多分布于浙江南部局部、福建、湘赣交界处、湘粤接壤处以及湘桂交界处等;中、低适宜生境面积较大,中适生区的面积为 $13.06\times10^4\text{ km}^2$,低适生区 $54.48\times10^4\text{ km}^2$,分别占总适宜生境面积的 18.48%、77.10%。中度适宜生境主要位于浙江南部、福建、两广地区、贵州、重庆中部、湖南南部、江西南部、台湾等。低适生区分布范围最广,主要集中分布在我国南方地区,浙江、福建、广东、广西、贵州、重庆、湖南、江西、皖南山地、湖北西南部、台湾、海南南部等地均有覆盖。

由表 2、图 3 可知过去三个时期,福建柏高度适生区分布面积在末次盛冰期最大,为 $3.41\times10^4\text{ km}^2$,全新世中期次之,末次间冰期最小,分别为 $2.48\times10^4\text{ km}^2$ 、 $2.29\times10^4\text{ km}^2$,呈先增加后减少的趋势。其中末次间冰期潜在高适宜分布区主要位于福建大部、湘桂接壤处、湘粤接壤处、罗霄山脉等地;至末次盛冰期,高度适宜生境较末次间冰期增加约 $1.12\times10^4\text{ km}^2$,福建、南岭山脉等地均有分布,台湾东部也存在高度适生区;至全新世中期,高度适生区面积较末次盛冰期减少约 $0.93\times10^4\text{ km}^2$,其分布范围仍相对集中于福建、广东北部、广西北部 and 湖南南部等地。

未来不同气候变化情景下,对比福建柏当代潜在分布格局发现(表 2、图 3):总适生区面积收缩明显,分别较当代缩小约 $4.89\times10^4\text{ km}^2$ 、 $2.82\times10^4\text{ km}^2$ 、 $5.8\times10^4\text{ km}^2$ 、 $0.65\times10^4\text{ km}^2$,但高度适生区面积除 2090s-SSP126 外,较当前时期均有所增加。其中在 SSP585 气候情景下,温室气体排放较高,2050s-SSP585 福建柏高度适生区面积与当前相比增加约 $0.36\times10^4\text{ km}^2$,2090s-SSP585 较 2050s-SSP585 缩减了约 $0.14\times10^4\text{ km}^2$ 。在 SSP126 气候情景下,从当前至 2050s 再到 2090s 福建柏高度适生区面积呈先增加后减少的趋势,其中 2050s-SSP126 较当前增加约 $0.13\times10^4\text{ km}^2$,2090s-SSP126 比 2050s-SSP126 减少约 $0.34\times10^4\text{ km}^2$ 。

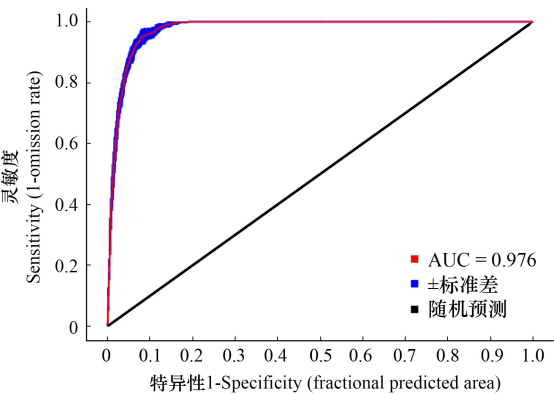


图 2 福建柏的受试者工作特征曲线
Fig.2 Receiver operating characteristic curve of *Chamaecyparis hodginsii*

表 2 福建柏不同时期的适宜生境面积/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 2 The area of the suitable habitat of *Chamaecyparis hodginsii* in different periods

时期 Period	面积 Area($\times 10 \text{ km}^2$)			
	低适宜生境 Less suitable habitats	中适宜生境 Middle suitable habitats	高适宜生境 Highly suitable habitats	总适宜生境 Total suitable habitats
末次间冰期 Last interglacial	40.62	11.42	2.29	54.32
末次盛冰期 Last glacial maximum	57.24	15.85	3.41	76.51
全新世中期 Middle-Holocene	43.43	12.94	2.48	58.86
当代 Current	54.48	13.06	3.12	70.66
2050s-SSP126	47.43	15.08	3.25	65.77
2050s-SSP585	51.51	12.84	3.48	67.84
2090s-SSP126	50.27	11.67	2.91	64.86
2090s-SSP585	52.69	13.99	3.34	70.01

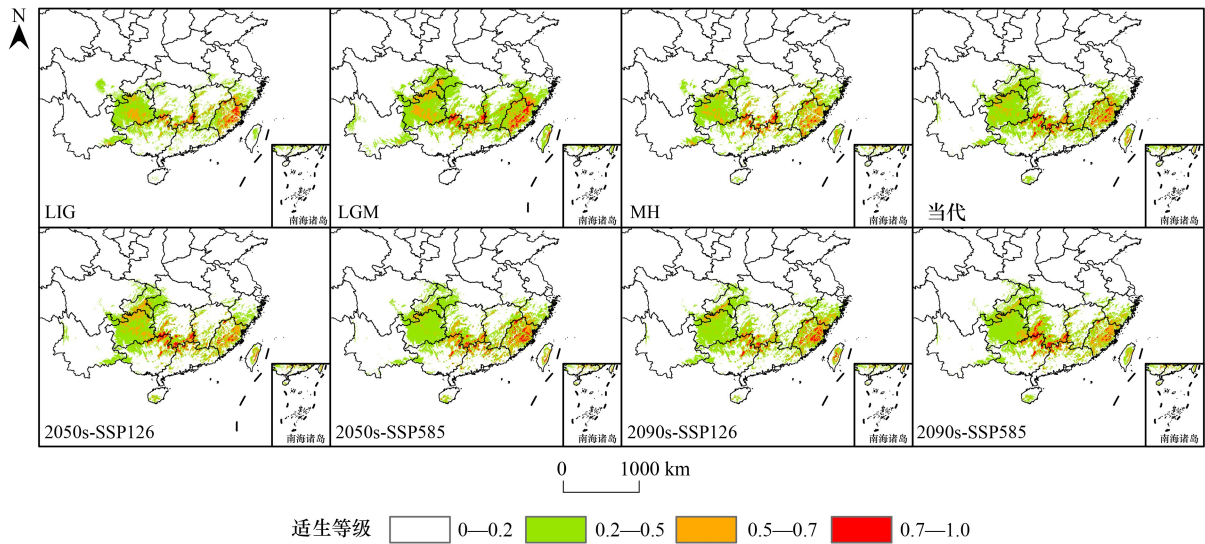


图 3 MaxEnt 模型预测的不同时期福建柏潜在适生区

Fig.3 MaxEnt model predicted potential suitable areas of *Chamaecyparis hodginsii* in different perids

LIG: 末次间冰期; LGM: 末次盛冰期; MH: 全新世中期

2.3 不同时期福建柏潜在适生区迁移格局变化

由表 3 和图 4 所示,福建柏在历史三个时期适宜生境空间分布格局变化差异较大,其中末次盛冰期保留区域与新增区域面积均最大,分别为 $11.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $6.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其增加区在浙江南部局部、福建、贵州、重庆东南部、湖北西南部局部、湘赣交界处等地均有发生。末次间冰期丧失区域面积最大,为 $6.36 \times 10^4 \text{ km}^2$,到末次盛冰期,丧失面积减少约 $2.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。末次间冰期丧失区主要发生在福建西部、南岭山脉、贵州、重庆东南部、湖北西南部、海南南部及台湾中部与东部等地;全新世中期新增区域面积最小,新增面积为 $3.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要发生在福建东南部、贵州中南部、湖南与江西接壤处等。

不同气候情景下福建柏适宜生境空间的变化也存在差异(表 3、图 4)。对比不同时期,2050s-SSP126 福建柏适宜生境新增面积最大,为 $5.82 \times 10^4 \text{ km}^2$,同时丧失面积最小,为 $3.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其增加区域主要发生在福建东南部、广东东部、贵州东部、重庆东南部、湖南中部局部、湘赣交界处等,海南南部、台湾北部局部等也存在新增区。2090s-SSP126 增加面积最小且丧失区域面积最大,分别为 $3.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $4.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,新增面积小于丧失面积。其丧失区域主要分布于福建西部、广东北部、广西北部、贵州、重庆东南部局部、湖北西南部局部、江西南部等地,海南南部局部及台湾东部局部等也有零星分散。在 SSP585 气候情景下,2050s 与 2090s 的

潜在新增面积均大于丧失面积,其中 2050s-SSP585 新增面积为 $4.12\times 10^4\text{ km}^2$,新增区域于福建、广东、川黔接壤处、重庆南部局部等地分散;2090s-SSP585 新增面积则为 $5.08\times 10^4\text{ km}^2$,浙江东南部、福建东南部、广东东部、贵州东南部、湖北西南部、雪峰山脉等地存在新增区域。

表 3 福建柏不同时期的适宜生境的空间变化/($\times 10^4\text{ km}^2$)

Table 3 Spatial variation of suitable habitat of *Chamaecyparis hodginsii* in different periods

时期 Period	面积 Area/($\times 10\text{ km}^2$)				变化率 Change/%		
	保留 Reserved	丧失 Lost	增加 Increase	变化 Change	保留 Reserved	丧失 Lost	增加 Increase
末次间冰期 Last interglacial	9.18	6.36	4.38	-1.98	56.71	39.30	27.09
末次盛冰期 Last glacial maximum	11.97	3.55	6.92	3.38	74.00	21.91	42.79
全新世中期 Middle-Holocene	11.38	4.20	3.68	-0.51	70.31	25.94	22.76
2050s-SSP126	12.17	3.38	5.82	2.45	75.25	20.87	36.00
2050s-SSP585	11.68	3.91	4.12	0.21	72.19	24.14	25.47
2090s-SSP126	11.05	4.54	3.09	-1.45	68.28	28.06	19.10
2090s-SSP585	11.73	3.80	5.08	1.28	72.53	23.50	31.39

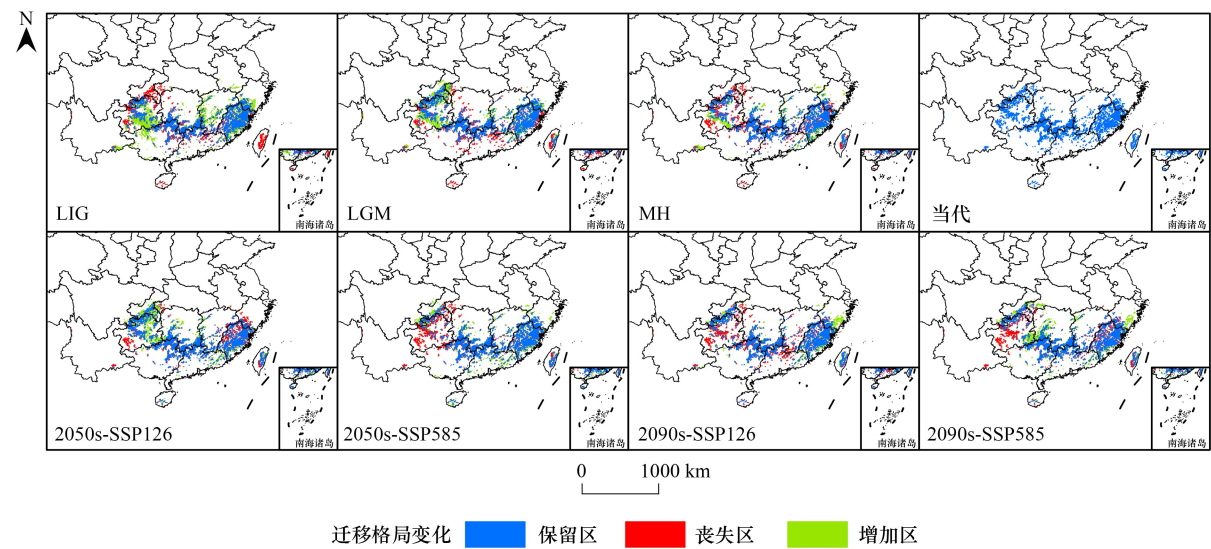


图 4 福建柏不同时期的潜在适生区迁移格局

Fig.4 Migration patterns of potential suitable areas of *Chamaecyparis hodginsii* in different periods

2.4 影响福建柏分布的主要环境变量

通过贡献率、置换重要值综合分析筛选出的 10 个环境因子对福建柏当代潜在地理分布格局的影响(表 4)。贡献率结果表明:平均昼夜温差(bio2,30.1%)、最干月降水量(bio14,21.5%)、最暖季度降水量(bio18,17.1%)这 3 个变量对预测福建柏分布的影响排名靠前,总贡献率为 68.7%。置换重要值排名靠前的环境因子主要是海拔(elev,27.5%)、最冷月最低气温(bio6,23.1%)、平均昼夜温差(bio2,20.7%)。综上所述,影响福建柏现代地理分布格局的主要环境因子有平均昼夜温差、最干月降水量、最暖季度降水量、海拔、最冷月最低气温。

3 讨论

3.1 影响福建柏地理分布格局的主要气候因子

由于气候变化的影响,树木更新受到制约,森林稳定性具有潜在风险^[24]。本研究模拟结果得出平均昼夜

温差、最干月降水量、最暖季度降水量、海拔、最冷月最低气温是影响福建柏地理分布格局的关键环境因素。MaxEnt 模拟结果表明温度因子对福建柏的生境适宜性具有重要作用,贡献率最大的是平均昼夜温差,并且最冷月最低气温置换在重要值中排名第二。研究表明植物生长发育过程具备最适温度范围^[25]。适宜范围内的日均温度与昼夜温差可以促进植物的生长发育^[26]。然而极端温度的发生会导致植物在分子和生理水平上产生不利影响^[27]。前人研究发现,低温条件下,福建柏苗木的叶片叶绿素含量、脯氨酸等生理指标均产生变化,其中在-8℃和-15℃等长时间持续低温环境下,易受冻害^[28]。表明福建柏在长期低温环境中具有生存风险。

表 4 环境变量的各类参数

Table 4 Various parameters of the environmental variables

代码 Code	环境变量 Environmental variable	贡献率 Contribution rate/%	置换重要值 Permutation importance/%
bio2	平均昼夜温差 Mean diurnal range	30.1	20.7
bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	21.5	2.4
bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	17.1	4.5
elev	海拔 Elevation	12.7	27.5
bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	5.2	9.3
bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality	5.1	7.8
bio6	最冷月最低气温 Min temperature of coldest month	4	23.1
bio5	最热月最高气温 Max temperature of warmest month	2.7	2.4
bio1	年均温 Annual mean temperature	1.2	0.8
bio3	等温性 Isothermality	0.4	1.6

除温度影响外,降水因子对福建柏地理分布的变化也具有不容忽视的作用。本研究结果还表明最干月降水量贡献率值排名第二。这可能与干旱季节的水分有效性影响福建柏树木的生长与死亡有关,干旱期间福建柏的碳同化能力与径向生长受到强烈干扰,使物种的生存不容乐观^[29]。且福建柏具有喜荫湿环境的特性,在干旱环境下,具有较强的敏感性,不利于其生长^[30]。此外,也有学者证明植物若超出其对水分的耐受极限,则死亡的风险更高^[31]。最暖季度降水量是仅次于最干月降水量影响福建柏地理分布的水分因子。该气候变量也是影响我国其他柏科植物地理分布的关键因素,如朝鲜崖柏(*Thuja koraiensis*)^[32]、崖柏(*Thuja sutchuenensis*)^[33]等。前人研究发现福建柏胸径与树高的生长与3—7月份降水量密切相关^[34]。

此外,本研究置换重要值最高的环境因子是海拔。武元帅同样发现海拔是影响福建柏林群落分布的主要地形因子^[35]。另外,如叉子圆柏(*Juniperus sabina*)^[36]、大果圆柏(*Juniperus tibetica*)^[37]等柏科植物的地理分布范围均与海拔、温度与降水等因素息息相关。值得一提的是,福建柏球果成熟期、种子散落期等也与海拔等地形因素密切相关^[38]。可见海拔也是制约福建柏地理分布格局的主要地形因子。

研究表明水热条件协同调控植物栖息地分布格局^[39]。沿海与内陆存在降水量差异,主要表现为东南沿海地区降水较为丰富,而西北内陆地区降水量较小^[40]。我国气温由南向北递减,且气候变化异常幅度由低纬度地区向高纬度递增^[41]。鉴于此,笔者推测最干月降水量与最暖季度降水量限制福建柏越过横断山脉向西扩张;平均昼夜温差与最冷月最低气温则限制福建柏越过秦岭淮河一线往北扩散。

3.2 福建柏的潜在适宜生境的变化

本研究预测了福建柏在末次间冰期、末次盛冰期、全新世中期、当前以及未来不同气候变化情景下的适宜生境变化,结果显示末次间冰期的适宜生境主要位于福建省大部分地区、浙江南部、两广地区、贵州、湖南南部以及江西南部等地。孢粉与木化石的出现推断了古群落的存在状况,有植物化石数据显示在浙江东部宁海一天台地区早在晚中新世时期就有福建柏属枝叶和球果化石的存在^[42],这表明上述地区在末次间冰期有可能成为福建柏的高度适生区。

末次盛冰期福建柏的适宜生境面积最大,大多集中在秦岭-淮河以南地区,范围包括浙闽地区、南岭山脉、

贵州、重庆、湖北西南部、湖南、江西、云南局部、台湾等。根据嵯县组和佛县组孢粉植物群中的栎属(*Quercus*)花粉属内划分结果,反映出中新世浙闽地区有植被覆盖在不同海拔梯度的山地中^[43]。罗霄山脉有丰富的孑遗属种,源自早第三纪时期的北极第三纪成分,及第三纪北热带成分,福建柏植物群落分布其中^[44]。中国南方广西桂平市东部桂平盆地发现了福建柏属叶化石,化石数据揭示中新世以来,福建柏属扩散至中国南方地区^[45]。研究表明,翠柏属(*Calocedrus*)与崖柏属(*Thuja*)和福建柏为姐妹类群,在云南临沧邦卖村已经发现属晚中新世时代的翠柏属化石^[46]。以上发现均支持在末次盛冰期秦岭-淮河以南地区有可能成为福建柏的适生区。

全新世中期,福建柏于浙江南部局部、福建、两广地区、贵州、台湾等均有中高度适宜生境分布。有研究发现,晚渐新世时期,台湾地区在十四股层或木山层中的孢粉组合主要的特征是以桧木粉(*Alnipollenites*)和松粉(*Pinuspollenites*)为主,古植物群落则属典型的图尔盖植物群,包含柏属等乔木种^[47]。且根据全新世温重建结果揭示北半球夏、冬季温度均经历早-中-晚全新世气候快速升温至缓慢降温的过程,这为喜暖湿环境的植物提供了生理适应的条件^[48]。多项研究均表明福建柏在全新世时期具备生长条件。

对比未来不同气候变化情景,福建柏总适宜分布区较现代分布范围主要呈现收缩趋势,但高度适生区除 2090s-SSP126 外,较当前时期均表现出扩增趋势,仍相对集中在福建、南岭山脉等地。在 SSP126 气候情景下,2050s 增加率最高,丧失率最低,但至 2090s 出现丧失面积大于新增面积的情况。在 SSP585 气候情景下,2050s 与 2090s 的潜在新增面积均高于丧失面积,且 2050s 至 2090s 适宜生境总面积面积呈上涨趋势。这一结果可能是受降水因子制约,有研究预测在 21 世纪后半叶,RCP8.5 情景下的年平均降水量增加幅度大于 RCP2.6 情景下的,且至 21 世纪末期在 RCP8.5 情景下长江中下游地区冬季降水量显著增加^[49]。在未来气候情景下,福建柏高度适生区较当代呈现出一定程度的扩增,只是反映出其具有扩增的气候潜能,因此在今后的研究中可结合本研究结果,从而更加深入探索对福建柏物种的保护策略。

3.3 福建柏发展与保护建议

对于新增潜在适生区,如台湾、海南等地,存在海峡隔离可能导致无法自然扩散,因此可考虑引种栽培,另外新增区主要沿保留区的边缘地带向外扩散,在这些区域应减少人为对生态环境的干扰,并制定合理的空间规划,为福建柏的迁入提供条件。

对于生境丧失区,可采取迁地保护措施,并建设种质资源库和育苗基地。本研究中得出温度和降水对福建柏地理分布格局具有主导作用,在引种时,应该考虑该区域的温度和降水情况,做到适地适树。

对于保留适生区,从本研究对福建柏未来适生区预测结果看,最适分布区主要分布在南方地区,尤其是福建、湘赣交界处、湘粤交界以及湘桂交界等地带,因此应加强对此区域的保护力度,制定规范的管理体制和严格的保护政策,建立自然保护区进行就地保护。由于福建柏种子具有一定重量,在短距离内传播,往往在母株周围进行天然更新^[50]。目前各地福建柏种群呈现间断分布格局,不利于种群的交流和扩散,在各分布区之间可建立生态廊道,连接破碎的森林斑块可以减少栖息地片段化带来的负面效应,加强物种迁移能力。

4 结论

本研究基于 Maxent 的优化模型模拟福建柏历史、当前和未来不同气候情景下的适生区分布格局和变迁格局,结果显示,现代气候条件下,福建柏适生分布区主要位于浙江、福建、广东、广西、贵州、重庆、湖南、江西、台湾、海南南部等地,皖南山地、湖北西南部、云南东南局部、四川东南局部等也有少量分布。未来气候变暖情景下,福建柏总适宜分布区较现代分布范围主要呈现收缩趋势,但除 2090s-SSP126 外,高度适生区分布面积较当前时期均表现出扩增趋势。平均昼夜温差、最干月降水量、最暖季度降水量、海拔、最冷月最低气温是影响福建柏地理分布格局的关键因子。本研究仅考虑了气候因子及地形因子对福建柏地理分布格局的影响,对诸如土壤条件、人为干扰等其他因素尚未进行讨论,今后还需更加深入研究,促使福建柏更好的应对未来气候变暖带来的威胁与挑战。除此之外,本研究中我们还提出建立生态廊道等保护建议,通过 MaxEnt 模型分析福

建柏在破碎生境中的迁移通道将有待于进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] Kumari P, Wani I A, Khan S, Verma S, Mushtaq S, Gulnaz A, Paray B A. Modeling of *Valeriana wallichii* habitat suitability and niche dynamics in the Himalayan region under anticipated climate change. *Biology*, 2022, 11(4): 498.
- [2] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [3] Wang J, Chen Y, Nie J, Yan Z W, Zhai P M, Feng J M. On the role of anthropogenic warming and wetting in the July 2021 Henan record-shattering rainfall. *Science Bulletin*, 2022, 67(20): 2055-2059.
- [4] Tsumura Y, Kimura M, Nakao K, Uchiyama K, Ujino-Ihara T, Wen Y F, Tong Z K, Han W J. Effects of the last glacial period on genetic diversity and genetic differentiation in *Cryptomeria japonica* in East Asia. *Tree Genetics & Genomes*, 2020, 16(1): 19.
- [5] 张丹, 马松梅, 魏博, 王春成, 张林, 闫涵. 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制. *生物多样性*, 2022, 30(1): 42-51.
- [6] 王东升, 赵伟, 程蓓蓓, 张吉军. 基于 MaxEnt 模型的中国山楂潜在适生区. *林业科学*, 2022, 58(7): 43-50.
- [7] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [8] 周炳江, 王玉洁, 马长乐, 樊智丰, 郑进炬. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榧树潜在生境分析. *生态学报*, 2022, 42(11): 4485-4493.
- [9] 王文波, 胡理乐, 布艾佳尔, 闫伯前. 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. *东北林业大学学报*, 2022, 50(8): 69-73, 97.
- [10] 张明珠, 叶兴状, 刘益鹏, 李佳慧, 陈世品, 张国防, 刘宝. 基于 SSPs 预测格木在中国的潜在地理分布. *北京林业大学学报*, 2022, 44(4): 54-65.
- [11] Bao R, Li X L, Zheng J H. Feature tuning improves MAXENT predictions of the potential distribution of *Pedicularis longiflora* Rudolph and its variant. *PeerJ*, 2022, 10: e13337.
- [12] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第七卷. 北京: 科学出版社, 1978.
- [13] Dao T H H, Hölscher D. Fujian cypress and two other threatened tree species in three conservation zones of a nature reserve in north-western Vietnam. *Forest Ecosystems*, 2017, 4: 29.
- [14] 李单琦, 胡菀, 韩彩霞, 陈陆丹, 张志勇, 钟爱文, 魏宗贤, 彭焱松. 基于 MaxEnt 模型的濒危观赏植物福建柏潜在适生区预测. *植物科学学报*, 2020, 38(6): 743-750.
- [15] 刘阳, 范邓妹, 胡菀, 张志勇, 李单琦. 第四纪末次盛冰期以来福建柏的潜在地理分布变迁. *西北林学院学报*, 2022, 37(4): 92-99, 142.
- [16] 贾何佳, 李谢辉, 文军, 陈亚玲. 黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估. *资源科学*, 2022, 44(6): 1292-1304.
- [17] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [18] 吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 文国卫, 蒋天雨, 赖文峰, 施晨阳, 黄秋良, 张国防. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响. *生态学报*, 2024, 44(3): 1164-1176.
- [19] Tadesse Z, Nemomissa S, Lemessa D. Predicting the distributions of *Pouteria adolfi-friederici* and *Prunus africana* tree species under current and future climate change scenarios in Ethiopia. *African Journal of Ecology*, 2023, 61(1): 204-216.
- [20] 王璐, 许晓岗, 李垚. 末次盛冰期以来陀螺果潜在地理分布格局变迁预测. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 278-286.
- [21] 李晓辰, 贡璐, 魏博, 丁肇龙, 朱海强, 李岳峰, 张涵, 马勇刚. 气候变化对新疆雪岭云杉潜在适宜分布及生态位分化的影响. *生态学报*, 2022, 42(10): 4091-4100.
- [22] Xu Y F, Ye X Z, Yang Q Y, Weng H Y, Liu Y P, Ahmad S, Zhang G F, Huang Q L, Zhang T Y, Liu B. Ecological niche shifts affect the potential invasive risk of *Phytolacca americana* (Phytolaccaceae) in China. *Ecological Processes*, 2023, 12(1): 1.
- [23] 魏鹏, 秦誉嘉, 王振营, 赵守歧, 李志红. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下玉米根萤叶甲在中国的潜在地理分布. *植物保护学报*, 2022, 49(5): 1400-1410.
- [24] Reich P B, Bermudez R, Montgomery R A, Rich R L, Rice K E, Hobbie S E, Stefanski A. Even modest climate change may lead to major transitions in boreal forests. *Nature*, 2022, 608: 540-545.
- [25] Virk G, Snider J L, Peng C E, Jespersen D, Pilon C, Rains G, Roberts P, Kaur N, Ermanis A, Tishchenko V. Extreme temperatures affect seedling growth and photosynthetic performance of advanced cotton genotypes. *Industrial Crops and Products*, 2021, 172: 114025.
- [26] Ren X X, Liu Y, Jeong H K, Soundararajan P, Jeong B R. Temperature affects morphology, physiology, and biochemistry of plug seedlings of *Astragalus membranaceus*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2019, 41(1): 9.
- [27] Raza A, Charagh S, García-Caparrós P, Rahman M A, Ogwugwa V H, Saeed F, Jin W M. Melatonin-mediated temperature stress tolerance in

- plants. *GM Crops & Food*, 2022, 13(1): 196-217.
- [28] 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 杨宗武, 阎宏震. 福建柏低温胁迫下一些生理指标的变化. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(4): 19-22.
- [29] Zheng W J, Gou X H, Su J J, Fan H W, Yu A L, Liu W H, Deng Y, Manzanedo R D, Fonti P. Physiological and growth responses to increasing drought of an endangered tree species in southwest China. *Forests*, 2019, 10(6): 514.
- [30] 余孟杨. 干旱胁迫对福建柏不同无性系的生理特性影响. *福建林业*, 2019(3): 24-28, 33.
- [31] Arend M, Link R M, Patthey R, Hoch G, Schuldt B, Kahmen A. Rapid hydraulic collapse as cause of drought-induced mortality in conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(16): e2025251118.
- [32] 兰雪涵, 付聪, 李黎明, 袁梦琦, 檀婷婷, 王梅芳, 王永涛, 杜凤国. 基于 MaxEnt 模型的濒危植物朝鲜崖柏中国潜在适生区预测. *北华大学学报: 自然科学版*, 2021, 22(3): 292-298.
- [33] Qin A L, Liu B, Guo Q S, Bussmann R W, Ma F Q, Jian Z J, Xu G X, Pei S X. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 10: 139-146.
- [34] 刘华东. 影响福建柏生长的环境因子分析. *安徽农学通报*, 2013, 19(16): 112-114.
- [35] 武元帅. 湖南省福建柏林群落分类与地理分布研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [36] 王爱君, 路东晔, 张国盛, 黄海广, 王颖, 呼斯楞, 敖民. 基于 MaxEnt 模拟欧亚大陆气候变化下叉子圆柏的潜在分布. *林业科学*, 2021, 57(8): 43-55.
- [37] Zhang H Y, Zhao B J, Huang T S, Chen H, Yue J J, Tian Y L. Responses of the distribution pattern of the suitable habitat of *Juniperus tibetica* komarov to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau. *Forests*, 2023, 14(2): 434.
- [38] 侯伯鑫, 林峰, 余格非, 程政红, 张新华, 陶申绵. 福建柏地理种源开花与结实变异规律的研究. *植物遗传资源学报*, 2005, 6(2): 163-167.
- [39] 缪菁, 王勇, 王璐, 许晓岗. 基于 MaxEnt 模型的苦槠潜在地理分布格局变迁预测. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(3): 193-198.
- [40] Jin H Y, Chen X H, Wu P, Song C, Xia W J. Evaluation of spatial-temporal distribution of precipitation in mainland China by statistic and clustering methods. *Atmospheric Research*, 2021, 262: 105772.
- [41] 马锋敏, 陈丽娟, 李想, 李维京, 许彬. 中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析. *大气科学*, 2022, 46(3): 573-589.
- [42] 何文龙. 浙江宁海—天台地区中新世植物化石及气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [43] 杨毅. 浙闽地区中新世孢粉植物群及其古植被和古环境研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [44] 赵万义. 罗霄山脉种子植物区系地理学研究[D]. 广州: 中山大学, 2017.
- [45] Wu X K, Zhang H, Kodrul T M, Maslova N P, Jiang S Y, Yin Q Y, Quan C, Jin J H. First fossil *Fokienia* (Cupressaceae) in South China and its palaeogeographic and palaeoecological implications. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 555.
- [46] 刘珂男. 云南临沧邦卖组晚中新世松柏科植物化石研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [47] 雷作淇, 黄奇瑜. 台湾地区上下第三系界线划分的孢粉学证据. *古生物学报*, 1997, 36(3): 271-294.
- [48] Zhang W C, Wu H B, Cheng J, Geng J Y, Li Q, Sun Y, Yu Y Y, Lu H Y, Guo Z T. Holocene seasonal temperature evolution and spatial variability over the Northern Hemisphere landmass. *Nature Communications*, 2022, 13: 5334.
- [49] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs 情景下中国 21 世纪气候变化预估及不确定性分析. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 183-192.
- [50] 骆强, 游泳, 陈坤浩. 大方福建柏保护区福建柏种群结构研究. *安徽农业科学*, 2008, 36(17): 7227-7228.