

张政, 陈姝含, 朱鹏, 李晗, 谭波, 徐振锋, 游成铭. 气候变化情境下短柄枹栎在中国的潜在适生区分布预测[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31 (6): 847-858
Zhang Z, Chen SH, Zhu P, Li H, Tan B, Xu ZF, You CM. Prediction of potential suitable distribution of *Quercus serrata* Thunb. var. *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai in China under climate change scenarios [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2025, 31 (6): 847-858

气候变化情境下短柄枹栎在中国的潜在适生区分布预测

张政¹, 陈姝含¹, 朱鹏¹, 李晗^{1, 2, 3}, 谭波^{1, 2, 3}, 徐振锋^{1, 2, 3}, 游成铭^{1, 2, 3}✉

¹四川农业大学林学院, 成都 611130;

²长江上游森林生态与保育四川省重点实验室, 成都 611130;

³四川峨眉山森林生态系统国家定位观测研究站, 乐山 614200

摘要 短柄枹栎[*Quercus serrata* Thunb. var. *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai]是我国亚热带、暖温带地区生态恢复的常见树种。探讨限制短柄枹栎分布的主导气候因子, 预测其潜在适宜分布区, 可为该树种在未来林业实践中的有效推广和保护提供理论依据。利用146个有效分布点和20个环境变量, 通过MaxEnt模型和ArcGIS 10.6软件, 预测当前及未来(2050s: 2041-2060; 2070s: 2061-2080) 3种气候情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-5.8)下我国短柄枹栎的潜在分布区及其影响因素。结果显示: (1) 各组受试者工作特征曲线下面积(area under curve, AUC)值均高于0.9, 预测结果具有较高的可信度。(2) 年降水量和最冷月份的最低温度是影响短柄枹栎分布的主导环境因子, 贡献率分别为45.3%和39.3%。(3) 短柄枹栎当前潜在适生区总面积为3 409 227 km², 占全国总面积的35.51%, 广泛覆盖我国亚热带和暖温带西部地区。其中高、中、低适生区分别占适生区总面积的5.29%、43.01%、51.70%。(4) 在2050s和2070s的3种气候情景下, 短柄枹栎的适生区总面积变化不明显, 主要在广东、浙江、川西、福建等地略有缩小, 而在辽宁、西藏、陕西等地有所扩张。相较于当前, 2050s和2070s高、中、低适生区面积增减变化预计分别平均为-6.97%、+9.77%、-8.17%, -1.91%、+4.22%、-5.88%。上述研究结果表明, 短柄枹栎的分布主要受降水和低温主导, 未来气候变化下, 其适生区将向高纬度和高海拔地区迁移, 但总面积变化不大, 中适生区比例有所上升。因此, 未来应加强对现有高适生区的保护, 并预先开展短柄枹栎优良种源的引种实验, 以引入高适应性的种源来弥补本地种的消失, 或在扩张区进行迁地保护。(图2 表5 参44)

关键词 短柄枹栎; MaxEnt模型; 气候变化; 潜在适生区

Prediction of potential suitable distribution of *Quercus serrata* Thunb. var. *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai in China under climate change scenarios

ZHANG Zheng¹, CHEN Shuhan¹, ZHU Peng¹, LI Han^{1, 2, 3}, TAN Bo^{1, 2, 3}, XU Zhenfeng^{1, 2, 3} & YOU Chengming^{1, 2, 3}✉

¹College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

²Sichuan Provincial Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation in the Upper Reaches of the Yangtze River, Chengdu 611130, China;

³Sichuan Mt. Emei Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Leshan 614200, China

Abstract *Quercus serrata* Thunb. var. *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai is a common tree species for ecological restoration in hilly and mountainous areas of subtropical and warm temperate regions in China. It plays a crucial role in maintaining regional ecological balance. This study aimed to identify the dominant climatic factors limiting the distribution of *Q. serrata* var. *brevipetiolata*, predict its potentially suitable habitats and provide a theoretical foundation for its effective promotion and conservation in forestry practices. A total of 146 valid distribution points and 20 environmental variables were used to predict the potential distribution and key influencing factors for *Q. serrata* var. *brevipetiolata* in China under three climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-5.8) for the present, 2050s (2041–2060) and 2070s (2061–2080). The predictions were conducted using MaxEnt and ArcGIS 10.6 software. The main findings were as follows: (1) The predicted results had high reliability, with area under receiver operating characteristic curve (AUC) values above 0.9 for all groups. (2) Annual precipitation and the lowest temperature in the coldest month were the dominant environmental factors affecting the distribution of *Q. serrata* var. *brevipetiolata*, with contribution rates of 45.3% and 39.3%, respectively. (3) Total potential habitat

收稿日期 Received: 2024-10-14 接受日期 Accepted: 2025-02-28

四川省科技计划项目(2024YFNH0028)、国家自然科学基金项目(32071745, 31870602, U23A2051, 31901295)和中国博士后科学基金项目(2022M722297)资助 Supported by the Sichuan Science and Technology Program (2024YFNH0028), National Natural Science Foundation of China (32071745, 31870602, U23A2051, 31901295), and China Postdoctoral Science Foundation (2022M722297)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: ycmsichuan2009@163.com)

area of *Q. serrata* var. *brevipetiolata* has 3 409 227 km², accounting for 35.51% of the total national area and almost covers the subtropical and warm temperate western regions of China. High, medium, and low suitability areas accounted for 5.29%, 43.01%, and 51.70% of the total suitable area, respectively. (4) Under all three future climate scenarios for the 2050s and the 2070s, the total suitable area for *Q. serrata* var. *brevipetiolata* did not show significant changes. The suitable area mainly in Guangdong, Zhejiang, western Sichuan, Fujian, and other places slightly reduced, but in Liaoning, Xizang, Shaanxi, and other places expanded; however, in the 2050s and the 2070s, the average changes in areas of high, medium, and low suitable habitats were -6.97%, +9.77%, -8.17%, -1.91%, +4.22%, and -5.88%, respectively. These results indicate that the distribution of *Q. serrata* var. *brevipetiolata* is mainly determined by precipitation and minimum temperature. Under climate change, its range is predicted to shift toward higher latitudes and elevations, maintaining stable total suitable area but expanding moderately suitable habitats. In the future, we should strengthen the protection of existing high-suitability areas and carry out an introduction experiment on good seed sources of *Q. serrata* var. *brevipetiolata* with a highly adaptable seed source to compensate for the disappearance of local species or to conduct *ex situ* protection in the expansion area.

Keywords *Quercus serrata* Thunb. var. *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai; MaxEnt model; climate change; potential habitable zone

气候变化深刻地影响着植物的生长、发育和生理活动,不仅改变了植物的生长环境,还可能导致其分布区域的迁移,从而重塑物种的分布格局,并可能增加物种灭绝的风险^[1-4]。据预测,全球气候变暖将导致近地表温度持续上升,到2040年,全球平均气温上升幅度可能超过1.5℃,同时伴随着极端降水事件的频发^[5]。这种气候变化的趋势一方面可能导致某些物种的适宜生存空间显著缩减,另一方面也可能会加速外来物种的入侵、定植、建群和扩散过程,进而影响现有物种的生存状况^[6]。研究表明,气候变化已导致众多物种的原生境遭受破坏,迫使它们的分布格局发生改变。以我国为例,香樟(*Cinnamomum camphora* var. *glaucescens*)、胡桃(*Juglans regia*)和黄连木(*Pistacia chinensis*)等物种可能无法适应未来的气候变化,其潜在地理分布区正在不断缩小^[7-9]。因此,研究物种对气候变化的响应,并预测它们在未来气候条件下的分布变化趋势,对于制定有效的物种保护措施和栽培管理至关重要。

物种分布模型(SDMs)作为一种预测物种分布的有效工具,目前已在生态学和生物地理学领域得到广泛应用^[10]。常见的模型包括生物气候分析系统(BIOCLIM)、最大熵模型(MaxEnt)、生态位因子分析模型(ENFA)和遗传算法模型(GARP)等^[11-12]。其中MaxEnt模型通过融合其他模型的优点并克服多种局限性,在预测物种潜在分布方面得到了广泛的认可^[3, 10-11]。因此,运用MaxEnt模型预测物种的潜在地理分布,有助于评估气候变化对物种未来分布特征的潜在影响,并为管理者和决策者制定应对策略提供科学依据。目前,MaxEnt模型在预测物种的潜在分布区的稳定性、扩展性和预测精度等方面均优于其他模型^[13-14],使其成为近十几年物种分布预测相关研究

常用的模型^[2, 4, 10]。此外,不同物种之间自身特性的差异,通常会导致它们的分布格局对气候变化有不同的响应^[3-4]。例如,高文强等研究发现,栓皮栎(*Quercus variabilis*)在我国的分布主要集中于陕西、山西、甘肃、四川、西藏等地,其潜在适生区受最冷月的最低气温和年降雨变化的影响,预计未来将逐渐向西部秦岭山脉等区域迁移^[10]。Chen等的研究表明,尖叶栎(*Quercus oxyphylla*)在我国的分布主要集中于四川、广东、河南、浙江等地区,其潜在适生区受年降水量、等温性和温度年差的影响,预计未来将逐渐向西南地区迁移^[3]。由此可见,即使是在遗传和生境上较为相近的同一属种,其分布区特征对未来气候变化的响应也是各不相同的。虽然目前对栎属植物的研究已有很多,但关于短柄枹栎在当前以及未来气候变化情境下的适生区分布及其影响因素的研究却鲜见报道^[2, 4, 10]。

短柄枹栎是亚热带及暖温带丘陵山地地区常见的落叶乔木树种,尤其在长江中下游地区广泛分布,其分布范围北起山东、河南,南至贵州、四川、广东,东起安徽、江西、浙江,西至陕西、甘肃等地,通常生长在海拔600-2 000 m的区域^[15-16]。短柄枹栎对区域水土保持、土壤养分调节和生态平衡维持以及生物多样性保护等有着重要作用^[15-16]。然而,现有研究主要关注短柄枹栎的生理生态特征,对其潜在分布区及其影响因素的生态学理解则尚不充分^[17],进一步研究尤为重要。鉴于此,本研究通过搜集并整理短柄枹栎的地理分布信息,结合相关环境因子,利用MaxEnt模型和ArcGIS软件,预测不同气候情境下短柄枹栎的分布趋势,探讨以下问题:(1)确定当前短柄枹栎的潜在适生区,并识别限制其分布的关键环境因子;(2)预测未来不同气候条件下短柄枹栎潜在分布区的变化。本研究旨在为

气候变化背景下短柄枹栎的引种、抚育和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 短柄枹栎分布数据筛选

通过全球生物多样性信息网络 (GBIF, <https://www.gbif.org/>)、中国国家标本资源平台 (NSII, <http://www.nsii.org.cn/>) 以及中国数字植物标本馆 (CVH, <http://www.cvh.ac.cn>) 收集了短柄枹栎在中国范围内的1 178条发生记录。为了提升数据的质量, 首先基于经纬度信息删除了重复的样本。随后, 为了确保数据的准确性, 进一步排除了地理信息或时间不明确的记录。经过筛选, 最终获得了146条有效的短柄枹栎地理分布信息 (表1), 每条信息包括拉丁名、经度、纬度3个属性。这些数据被整理成表格, 并保存为CSV格式, 以供后续建模分析使用。

1.2 短柄枹栎环境变量筛选

在环境变量的选择上, 通过参考相关文献和结合短柄枹栎现有分布点区域的生境特点, 最终确定气候和海拔两类环境因子作为预测短柄枹栎分布的环境变量^[1-2, 8-9]。对于当前时期环境数据, 选取1970-2000年间的19个气候因子和1个海拔因子 (表2)。而未来环境数据中的19个气候因子则是来源于耦合模式对比项目第六阶段 (CMIP6) 中北京气候中心气候系统模式第二版 (BCC-CSM2-MR)。该气候模式在东亚地区的预测性能良好, 能够较为准确地反映该区域的实际气候条件^[18-19]。在未来气候情景的选择上, 为了确保预测结果具有实际参考价值, 选择SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-5.8共3种气候情景, 分别代表CO₂低、中、高排放情景^[19]。在未来时期的选择上, 为了研究短柄枹栎适生区在未来较长一段时期内的连续变化情况, 选择2050s (2041-2060) 和2070s (2061-2080) 两个时间段。所有气候和海拔数据均从WorldClim环境数据库 (<http://www.world-clim.org>) 下载, 分辨率为2.5

弧分。表2中列出了本研究使用的生态因子编号及其描述。除此之外, 为了降低环境变量间的多重共线性和自相关问题, 利用R语言的“corrplot”包进行Pearson相关性分析。对于相关性 ≥ 0.9 ($|r| \geq 0.9$) 的变量, 仅保留贡献率最高的环境因子。环境因子的百分比贡献率是通过最大熵模型在求取最优解时使用的特定算法计算得出。在模型训练过程中, 会记录不同环境变量对模型适应性的贡献。然后, 通过调整每个特征值对应的系数来提升模型的增益值。增加的增益值随后被分配到各个特征值所依赖的环境变量上, 最终以百分比形式输出每个环境变量的贡献量^[3-4], 在排除贡献率 < 1 的环境变量后, 最终确定了8个环境变量用于建模^[19], 包括年均降水量 (bio_12)、最冷月最低温 (bio_6)、温度季节性变化 (bio_4)、等温性 (bio_3)、平均温度日较差 (bio_2)、降水量变异系数 (bio_15)、最冷季度降水量 (bio_19)、海拔 (Elev)。

1.3 模型优化和评价

为降低模型过拟合的风险, 使用R语言“ENMeval”包对MaxEnt模型的性能进行了测试。测试涵盖了5种特征类[线性 (linear-L)、二次型 (quadratic-Q)、片段化 (hinge-H)、乘积型 (product-P)、阈值性 (threshold-T)]和6种正则化乘数 (RM) 值 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5和3.0) 的不同组合。选取赤池信息准则校正值 (Akaike information criterion correction, AICc) 最小的参数组合作为MaxEnt模型的最佳参数组合。此外, 通过10%的训练遗漏率 (OR10) 和训练与受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 下面积 (area under curve, AUC) 之差 (AUC. DIFF) 来评估模型的过拟合程度, 以确保所选参数组合能够建出一个既准确又稳健的模型^[20]。

在模型参数设置方面, 将数据集划分为70%的训练集和30%测试集, 以减少抽样可变性可能引起的偏差。为了验证模型的稳健性, 采用5重交叉验证并进行了10次重复。通过刀切法 (Jackknife-cut) 方法评估

表1 目前已搜集的短柄枹栎全国地理分布情况
Table 1 Geographical distribution of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* collected so far in China

地区 Region	分布数量 Distribution quantity	地区 Region	数量 Distribution quantity
山西 Shanxi	1	湖北 Hebei	18
辽宁 Liaoning	2	湖南 Hunan	9
吉林 Jilin	1	广西 Guangxi	6
江苏 Jiangsu	7	重庆 Chongqing	15
浙江 Zhejiang	15	四川 Sichuan	23
安徽 Anhui	12	贵州 Guizhou	4
江西 Jiangxi	9	云南 Yunnan	3
山东 Shandong	4	陕西 Shaanxi	7
河南 Henan	7	甘肃 Gansu	3

表2 环境因子解释表

Table 2 Environmental factor interpretation table

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
bio_1	年均温 Annual mean temperature	℃
bio_2	平均温度日较差 Mean diurnal range	℃
bio_3	等温性 Isothermality	%
bio_4	温度季节性变化 Temperature seasonality	℃
bio_5	最热月最高温 Max temperature of the warmest month	℃
bio_6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	℃
bio_7	年温度变化范围 Temperature annual range	℃
bio_8	最湿季度均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃
bio_9	最干季度均温 Mean temperature of the driest quarter	℃
bio_10	最暖季度均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃
bio_11	最冷季度均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
bio_12	年均降水量 Annual precipitation	mm
bio_13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
bio_14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
bio_15	降水量变异系数 Precipitation seasonality	%
bio_16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
bio_17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
bio_18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
bio_19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
Elev	海拔 Elevation	m

最优Maxent模型中每个环境变量的重要性,并通过构建关键预测变量的响应曲线来揭示环境预测因子与物种发生概率之间的关系.最终,输出结果设置为logistic,并根据参数优化结果,将正则化乘数(RM)设为2.5,特征组合(FC)设置为LQHP,其他参数保持默认设置^[19-21].

在评价模型预测结果的准确度方面,采用AUC值作为评价指标^[17-19].AUC值范围在0-1之间,数值越接近1,表明模型模拟精度越高,预测结果越可靠^[22].参照Kumar D等的研究成果^[23]设定AUC的阈值:AUC值在0.5-0.6区间表示模型预测无效;0.6-0.7模型表示模型预测精度较低;0.7-0.8区间表示模型预测精度一般;0.8-0.9区间表示模型预测精度较高;而AUC值达到0.9-1之间表示模型预测精度优秀.

1.4 当前和未来潜在生境评价

首先利用ArcGIS 10.6软件中的栅格转换工具对模型输出结果进行格式转换.随后,根据IPCC对物种存在概率(P)的解释,结合短柄枹栎的生物学特征,并参考同属植物的适生等级划分方法,使用重分类工具将适生区划分为4个等级:非适生区($P \leq 0.05$)、低适生区($0.05 \leq P < 0.33$)、中适生区($0.33 \leq P < 0.66$)和高适生区($P \geq 0.66$)^[10, 19].此外,利用ArcGIS 10.6的计算几何工具,依据不同阈值区间的栅格数量和栅格边长,计算适生区的总面积及各等级适生区的面积,制作重要分布区面积情况表格,并分析

各地区适生区的面积分布.

2 结果

2.1 模型结果评价

首先,本研究通过优化模型确定了最优的正则化乘数和特征组合,分别为2.5和LQHP.在此参数设置下,模型的AICc值达到最小($AICc = 0$),DIFF值较默认参数($RM = 1, FC = LQHP$)提高了1.04%,而OR10比默认参数降低了22.73%.这些结果表明,模型在最优参数下具有最低的过渡拟合程度和最佳的预测效果.其次,模型预测的平均AUC值为0.912(图1),表明模型具有极高的预测精度,也说明该模型在预测短柄枹栎潜在适生区分布方面具有很高的可靠性.

2.2 影响短柄枹栎分布的主要生态因子

根据刀切法的分析结果(表3),影响短柄枹栎潜在分布的两个主要环境因子为年均降水量(bio_12,贡献率为45.3%)和最冷月最低温度(bio_6,贡献率为39.3%).这两个环境因子的累计贡献率达到84.6%,表明它们是决定短柄枹栎分布格局的主导因素.年均降水量、最冷月最低温度与短柄枹栎存在概率的关系如图2所示.年均降水量约在370-3 600 mm范围内时,短柄枹栎的存在概率大于0,并且其存在概率随着年均降水量的增加而增大,在大约1 300 mm降水量时达到峰值,之后随着降水量的进一步增加而逐渐减小.

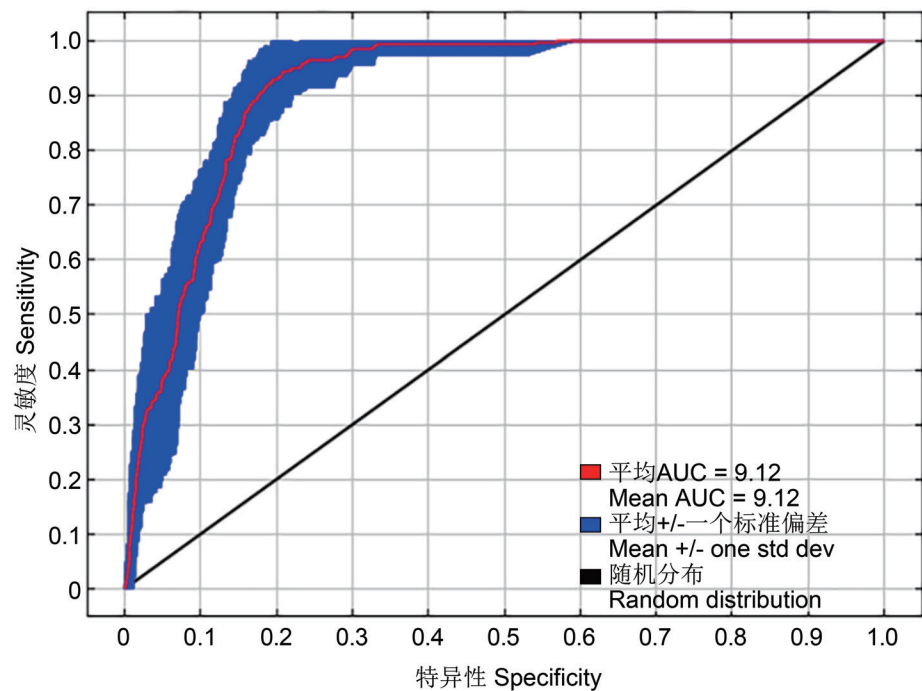


图1 短柄枹栎分布预测结果的平均ROC验证曲线。
Fig. 1 Average ROC validation curve of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* distribution prediction results.

表3 各环境变量的贡献率与置换重要性

Table 3 Contribution rate and permutation importance of various environmental variables

变量 Variable	贡献率 Contribution rate	置换重要性 Permutation importance
bio_12: 年均降水量 Annual precipitation	45.3%	20.1%
bio_6: 最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	39.3%	56.2%
bio_4: 温度季节性变化 Temperature seasonality	5.3%	2.5%
bio_3: 等温性 Isothermality	2.8%	4.2%
bio_2: 平均温度日较差 Mean diurnal temperature range	2.6%	1.3%
bio_15: 降水量变异系数 Precipitation seasonality	2.2%	7.2%
bio_19: 最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	1.4%	5.4%
Elev: 海拔 Elevation	1.1%	3.2%

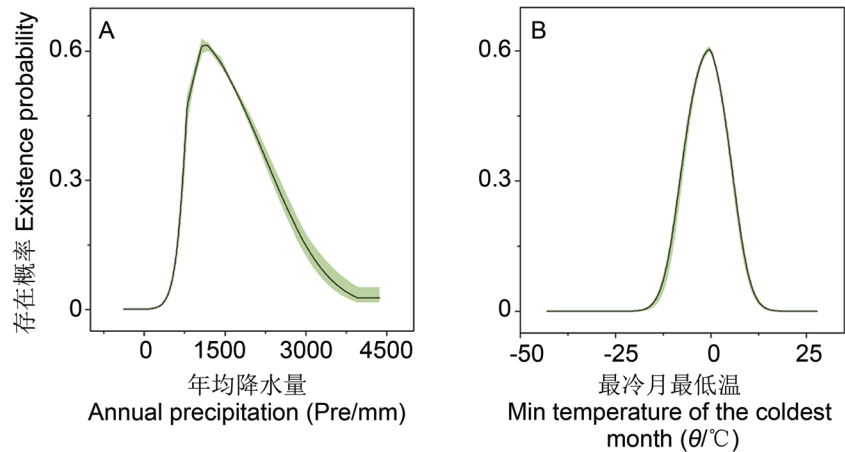


图2 各环境变量和短柄枹栎存在概率的关系。A: bio_12 (年均降水量) 的响应曲线; B: bio_6 (最冷月最低温) 的响应曲线。
Fig. 2 Relationships between various environmental variables and probability of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* existence. A: Response curve of bio_12 (annual average precipitation); B: Response curve of bio_6 (minimum temperature of the coldest month).

最冷月最低温度约在-15℃至15℃之间时,短柄枹栎的存在概率同样大于0,且其存在概率随着温度的升高而增加,在温度约为0℃时达到最大值,随后随着温度的继续升高而降低。

2.3 当前短柄枹栎的潜在分布区预测

在当前气候条件下,短柄枹栎主要分布于我国的千山、秦岭(包括其北端余脉)、横断山以及喜马拉雅山东南部的山脉段,同时也分布于这些山脉环绕的东南地区。短柄枹栎的潜在适生区总面积为3 409 227 km²,占全国总面积的35.51%。其中,高适生区面积为180 344 km²,占潜在适生区总面积的5.29%,主要分布在重庆北部、湖南西北部、湖北西南部和东部、安徽南部等地。中适生区面积为1 466 164 km²,占潜在适生区总面积的43.01%,主要分布于湖北中部、江苏、安徽、河南、陕西南部、四川东部以及贵州、湖南、江西、西藏东南部等地。低适生区面积为1 762 719 km²,占潜在适生区总面积的51.70%,主要分布于千山、秦岭以北、横断山脉等地区,北部包括辽宁、山西、甘肃南部等地,南部包括广西、广东、福建等地,西部包括四川中部、西藏西南少部分地区以及云南等地(表4、表5)。

2.4 未来气候变化下短柄枹栎的分布预测

在2050s和2070s的未来情景中,短柄枹栎潜在适生区的总面积变化不大。主要的变化在我国西藏西南部、中部,以及山西、陕西和东北部的辽宁等地区略有增加,而在川西和广东等地则略有减少。但其高、中、低适生面积变化明显,在2050s时期,3种气候情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5),短柄枹栎适生区的总面积分别为3 387 290、3 418 956、3 409 158 km²,相较于当前适生区总面积的增减变化分别为-0.64%、+0.29%、基本保持不变。适生区

的扩张主要发生在辽宁、陕西以及西藏西南部与中部小部分区域等地,而收缩区则包括宁夏、广东等地。3种气候情景下低适生区的面积分别为1 680 684、1 603 087、1 635 780 km²,相较于当前增减变化分别为-4.65%、-9.06%、-7.20%,主要扩张区位于辽宁等,而收缩区位于宁夏、广东等地。3种气候情景下中适生区面积分别为1 540 878、1 668 273、1 619 076 km²,相较于当前增减变化分别为+5.10%、+13.78%、+10.43%,扩张区主要在陕西、广西等地,而收缩区主要在西藏等地。高适生区的面积分别为165 728、147 596、154 302 km²,相较于当前增减变化分别为-8.10%、-18.16%、-14.44%,扩张区主要在河南、江西等,而收缩区主要在重庆、浙江等(表4、表5)。

在2070s时期,3种气候情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5),短柄枹栎的潜在适生区总面积分别为3 389 333、3 443 550、3 447 375 km²,相较于当前适生区总面积增减变化分别为-0.58%、+1.01%、+1.12%。该适生区的扩张区主要发生在辽宁、山西等地,而收缩区则集中在四川、云南等地。从不同等级适生区的变化来看,低适生区的面积分别为1 745 727、1 743 988、1 697 295 km²,相较于当前增减变化分别为-0.96%、-1.06%、-3.71%。低适生区的扩张区域位于辽宁等地,而收缩区域位于四川、云南等地。中适生区的面积分别为1 462 024、1 537 586、1 584 425 km²,相较于当前增减变化分别为-0.28%、+4.87%、+8.07%,扩张区域主要在陕西、广西等地,而收缩区主要在西藏等地。高适生区的面积分别为181 582、161 976、165 655 km²,相较于当前增减变化分别为+0.69%、-10.18%、-8.14%,扩张区位于湖南等地,而收缩区位于浙江、四川等地(表4、表5)。

表4 当前及未来不同气候情景下全国短柄枹栎总适生区面积变化情况

Table 4 Changes in the total suitable habitat area of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* in China under current and future climate scenarios

时间 Time	情景 Scenario	预测面积 Area (A/km ²)				变化率(与当前相比) Rate of change compared to the current			
		总适生区 Total suitable area	低适生区 Total poorly suitable habitat	中适生区 Total moderately suitable habitat	高适生区 Total highly suitable Habitat	总适生区 Total suitable area	低适生区 Total poorly suitable habitat	中适生区 Total moderately suitable habitat	高适生区 Total highly suitable Habitat
当前 Current	-	3409227	1762719	1466164	180344	-	-	-	-
2050s	SSP1-2.6	3387290	1680684	1540878	165728	-0.64%	-4.65%	+5.10%	-8.10%
	SSP2-4.5	3418956	1603087	1668273	147596	+0.29%	-9.06%	+13.78%	-18.16%
	SSP5-8.5	3409158	1635780	1619076	154302	0%	-7.20%	+10.43%	-14.44%
2070s	SSP1-2.6	3389333	1745727	1462024	181582	-0.58%	-0.96%	-0.28%	+0.69%
	SSP2-4.5	3443550	1743988	1537586	161976	+1.01%	-1.06%	+4.87%	-10.18%
	SSP5-8.5	3447375	1697295	1584425	165655	+1.12%	-3.71%	+8.07%	-8.14%

表5 当前及未来不同气候情景下短柄枹栎的分布和不同等级适生区平均面积变化情况

Table 5 Distribution of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* under different climate scenarios and changes in the average area of suitable habitat in the current and future climate scenarios

地区 Region	适生区等级 Grade of suitable habitat	当前 Current	2050s平均增减量 Average increase or decrease in 2050s ($\Delta A/\text{km}^2$)	2070s平均增减量 Average increase or decrease in 2070s ($\Delta A/\text{km}^2$)
重庆 Chongqing	低 Low	1290	-496.67	260.00
	中 Medium	60748	6948.67	2117.33
	高 High	20355	-6361.33	-2322.00
	总 Total	82393	90.67	55.33
浙江 Zhejiang	低 Low	173	122.33	774.33
	中 Medium	89671	6579.00	6363.67
	高 High	13135	-6722.00	-7181.33
	总 Total	102979	-20.67	-43.33
云南 Yunnan	低 Low	349962	-9840.67	-4061.00
	中 Medium	21075	5745.00	3256.67
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	371037	-4095.67	-804.33
西藏 Xizang	低 Low	87369	14648.33	24183.00
	中 Medium	37579	-12820.33	-18858.67
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	124948	1828.00	5324.33
四川 Sichuan	低 Low	128209	-9556.67	-8967.00
	中 Medium	179195	17182.67	13071.67
	高 High	11459	-6345.00	-9030.67
	总 Total	318863	1281.00	-4926.00
宁夏 Ningxia	低 Low	11917	-452.00	115.00
	中 Medium	0	0.00	0.00
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	11917	-452.00	115.00
辽宁 Liaoning	低 Low	55557	4499.67	14497.33
	中 Medium	23	332.33	67.67
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	55580	4832.00	14565.00
江西 Jiangxi	低 Low	22644	-3625.67	-3061.33
	中 Medium	136470	268.00	4336.33
	高 High	7747	3398.67	-1244.00
	总 Total	166861	41.00	31.00
江苏 Jiangsu	低 low	30781	-13770.00	-7125.67
	中 Medium	71339	13815.00	7030.00
	高 High	55	-24.67	133.00
	总 Total	102175	20.33	37.33
湖南 Hunan	低 low	9393	-4.67	1218.00
	中 Medium	181034	4741.33	-24533.67
	高 High	21523	-4649.67	23361.67
	总 Total	211950	87.00	46.00
湖北 Hubei	低 low	0	0.00	0.00
	中 Medium	132377	4802.67	5207.33
	高 High	53211	-4748.00	-5195.33
	总 Total	185588	54.67	12.00
河南 Henan	低 low	60400	-21995.00	-16916.00
	中 Medium	104854	19824.00	16910.00
	高 High	248	2142.33	-36.00
	总 Total	165502	-28.67	-42.00

续表5 Table 5 (continued)

地区 Region	适生区等级 Grade of suitable habitat	当前 Current	2050s平均增减量 Average increase or decrease in 2050s ($\Delta A/\text{km}^2$)	2070s平均增减量 Average increase or decrease in 2070s ($\Delta A/\text{km}^2$)
贵州 Guizhou	低 low	8810	-1746.67	-490.67
	中 Medium	167121	1766.00	495.00
	高 High	0	0.00	31.33
	总 Total	175931	19.33	35.67
广西 Guangxi	低 low	205608	-17355.00	-8250.67
	中 Medium	30686	16657.00	7922.33
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	236294	-698.00	-328.33
广东 Guangdong	低 low	168144	-4987.00	-4217.33
	中 Medium	1409	2054.33	674.33
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	169553	-2932.67	-3543.00
甘肃 Gansu	低 low	92463	-6788.67	-396.67
	中 Medium	25530	2053.33	1838.33
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	117993	-4735.33	1441.67
福建 Fujian	低 low	109201	-14693.67	-1411.67
	中 Medium	10947	13963.33	639.00
	高 High	0	0.00	0.00
	总 Total	120148	-730.33	-772.67
安徽 Anhui	低 low	21056	-8325.00	-3321.67
	中 Medium	67180	9070.67	12139.00
	高 High	51920	-719.00	-8766.67
	总 Total	140156	26.67	50.67
陕西 Shanxi	低 low	60522	-2633.67	-3475.33
	中 Medium	100298	4389.33	5175.00
	高 High	630	-612.00	-302.33
	总 Total	161450	1143.67	1397.33

3 讨论

3.1 模型预测结果可靠性评价

本研究对MaxEnt模型进行了优化，纳入了复杂的特征组合和正则化参数，旨在提高预测短柄枹栎潜在适生区的准确性。其次，为确保研究结果的可靠性，研究剔除了短柄枹栎样本点的重复分布数据。采用R语言的“corrplot”程序包对环境数据进行了Pearson相关性分析，移除了相关系数过高且对模型贡献率过低的环境因子，以避免变量间的多重共线性和模型过拟合^[23-24]。模型性能评估采用广泛认可的AUC值作为评价指标^[25]。经过优化的MaxEnt模型在预测短柄枹栎的潜在适生区时，所有情景下的AUC值均高于0.9，这与前人研究结果^[13-14]相似，表明MaxEnt模型在预测短柄枹栎在中国的潜在适生区方面具有较高的准确性和可靠性。

3.2 影响短柄枹栎适生区分布的关键气候因子

植物的潜在分布区特征是在气候和地形共同作

用下产生的结果^[3-4]，但从宏观尺度上看，气候仍然是决定植物地理分布的决定性因素。本研究也发现，气候相较海拔更能显著影响短柄枹栎的潜在地理分布特征，Chen等与王晓帆等对尖叶栎、高山栎组植物的研究结果也显示出这一特点^[3-4]。年均降水量是决定短柄枹栎潜在适生区分布最重要的主导气候因子，这与高文强等对栓皮栎的研究结果^[10]相似。本研究表明，年均降水量与短柄枹栎分布的存在概率呈现单峰关系，进一步说明降水过多或过少都会对短柄枹栎的分布产生不利影响。例如，过量降水可能导致植物幼苗遭受水分胁迫，影响根系活力，从而限制其生长范围^[26-28]。相反，降水过少引起的干旱则会限制植物的光合作用，从而影响其生长与分布^[13-14]。同时，最冷月的最低温也是影响短柄枹栎分布的一个重要因素，其与存在概率的单峰关系与张晓玮等和Liu等对沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、桤木（*Alnus cremastogyne*）的研究结果^[14, 19]一致。极端的冬季低

温可能会破坏植物的水分平衡,阻碍细胞分裂,降低光合作用效率等^[28-31],最终导致植物死亡和影响其分布。而在干旱的冬季环境中,高温则可能导致植物过度蒸腾失水,抑制其正常的生长发育^[32]。

3.3 当前和未来气候变化情景下短柄枹栎在中国的潜在适生区分布格局

目前,已有众多学者基于MaxEnt模型对不同物种的潜在适生区进行了预测,其结果均得到了业内高度认可。例如,Akyol等、Liu等和Chen等利用MaxEnt模型对月桂(*Laurus nobilis*)、赤皮青冈(*Cyclobalanopsis gilva*)、尖叶栎等物种的潜在适生区进行了准确的预测^[1-3],为本研究提供了重要参考。在当前气候条件下,短柄枹栎主要分布于我国千山、秦岭(包括其北端余脉)、横断山和喜马拉雅山东南部山脉段,以及这些山脉环绕的我国东南地区,这与前人对短柄枹栎分布的描述^[15-16]基本一致。短柄枹栎的这一分布特征可能归因于其对温暖湿润环境的适应性。除此之外,研究显示短柄枹栎适宜的最冷季最低温和年均降水分布大约在 $-10-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $500-3\ 000\text{ mm}$ 之间(图2),这与我国亚热带和暖温带地区的气候条件相吻合,能够满足短柄枹栎的生存需求,从而导致短柄枹栎集中分布在这些区域^[33]。而内蒙古、新疆、西藏西部以及东北等地少有短柄枹栎适生区的分布,这可能是由于这些地区过于干冷的气候条件限制了短柄枹栎的生存^[9, 34-36]。总体而言,在此情境下模拟所得的短柄枹栎分布区域与其实际分布区域高度一致。

气候条件在物种分布格局中起着决定性作用,气候变化通常会引起物种分布范围的重塑^[29-30]。在2050s和2070s的3种气候情景下,短柄枹栎的适生区总面积变化并不明显,这一发现与高文强等关于栓皮栎潜在适生区的预测结果^[10]相似。适生区总面积的稳定性可能是由于不同适生等级区域间的面积转换所抵消^[37]。但从当前经2050s最终到2070s的3种气候情景下短柄枹栎的高适生区和低适生区面积增减变化预计分别平均为 -9.72% 和 -4.44% ,而中适生区面积变化则预计为 $+7\%$ 。这一变化趋势可能是由于气候变暖导致的温度上升所导致^[38]。一方面气候变暖在未来可能将增加我国部分相对干旱、高海拔地区的降水^[36, 39]、温度^[40],进一步缓解水分和低温对短柄枹栎生存的限制,从而使这些低适生区转变为中适生区。另一方面,气候变暖在高适生区造成的升温可能超过了短柄枹栎最佳的适生温度范围,导致适生等级下降^[37-38]。在2050s和2070s的未来情景中,短柄枹栎潜在适生区的总面积变化不大。主要的变化在我国西藏西南部、中部部分地区以及陕西和辽宁等地区略有增加,而在川西和广东等地则略有减少。这一现象与植物在持

续气候变暖环境下向高海拔、高纬度地区迁移的普遍现象^[9-10]相一致。这可能是由于全球气候变暖将改善这些地区的热量条件,从而缓解温度对短柄枹栎生存的限制^[39]。有研究表明,我国青藏高原部分地区未来增温预计达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而东北地区在21世纪后期可能增温超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[34-35, 40]。短柄枹栎适生区的减少主要集中在川西地区和广东等地,这可能与未来川西地区干旱状况的加重以及广东等南部沿海地区的持续升温有关^[41-42]。值得注意的是,尽管川西地区与西藏西南部地区都位于青藏高原,但两地短柄枹栎的未来分布趋势却几乎相反。这种差异可能是由于两地的短柄枹栎种源不同,从而导致它们对气候变化的响应有所区别^[43]。在相同的气候情景之下,2070s短柄枹栎不同等级适生区面积变化程度明显低于2050s,这与Chen等的研究结果^[3]相似。这可能是由于随着时间的推移,短柄枹栎逐渐对气候变化产生了适应性^[44]。除此之外,在相同时期内,随着气候变化强度的增加,短柄枹栎不同等级适生区面积变化更加剧烈,这与高文强等的研究^[10]相似。这可能是由于更强烈的气候变化引起水热状况变化加剧,最终造成了短柄枹栎不同等级适生区面积变化越明显^[3-4]。

3.4 保护建议

在未来气候情景下,短柄枹栎的潜在分布范围整体将保持稳定,主要位于我国亚热带和温带季风气候区。基于此,我们对短柄枹栎的未来保护管理工作提出以下建议:(1)考虑到短柄枹栎适生区的潜在减少,应对四川西部、甘肃和广东南部等关键区域加强保护,以维护其生存环境。(2)应将短柄枹栎的自然栖息地按照适生区的不同等级进行分类,并针对各等级适生区开展更为详尽的环境调查和长期监测,包括对短柄枹栎生长和繁殖有益的昆虫和土壤特性及养分需求等。这将有助于全面掌握短柄枹栎的分布和生长状况,为制定更有效的经营管理策略提供科学依据。

4 结论

本研究利用MaxEnt模型预测了我国短柄枹栎在当前及其未来不同气候变化情景下的适生区,研究结果表明,目前短柄枹栎的潜在分布区主要位于我国东南部的亚热带季风和温带季风地区,被千山、秦岭(包括其北端余脉)、横断山和喜马拉雅山东南部山脉段连线所包围,分布范围较广,显示出短柄枹栎在我国具有广泛的适应性。最冷月最低温度和年降水量是影响其潜在地理分布的主要环境因素。未来短柄枹栎的总适生区分布特征基本保持稳定,表明气候变化对其现有总体分布特征的影响较小,主要在四川西部、福建和广东等地略有减少,在西藏和辽宁等地略有增加。但随着排放强度的增加和时间年限的延长,高、低适生

区面积将大幅减少,中适生区则明显增加。因此,未来气候变化将更有利于中适生区的扩张,而不利于高、低适生区的稳定。在气候变化背景下,我国东南地区仍将是短柄枹栎的主要生存区域。但在四川西部、福建、甘肃和广东等收缩区域,应加强短柄枹栎的保护工作。可以开展长期定点监测,并在适生区收缩区域预先进行短柄枹栎优良种源的引种实验,以筛选出适应性更

强的种源。同时,在辽宁和西藏西南部等扩张区域,可考虑扩大短柄枹栎的引种范围。此外,本研究在预测过程中对环境因子的考虑还不够全面,物种分布受多种因素影响,包括但不限于气候、人类活动以及土壤因子。因此,未来研究可以考虑引入更丰富、细化的环境因素进行模拟预测,以产生更精确的预测结果,为生产实践提供更科学的指导。

参考文献 [References]

- 1 Akyol A, Örüçü ÖK, Arslan ES, Sarikaya AG. Predicting of the current and future geographical distribution of *Laurus nobilis* L. under the effects of climate change [J]. *Environ Monit Assess*, 2023, **195** (4): 459
- 2 Liu B, Li YL, Zhao JT, Weng HY, Ye XZ, Liu SQ, Zhao ZX, Ahmad S, Zhan CY. The potential habitat response of *Cyclobalanopsis gilva* to climate change [J]. *Plants*, 2024, **13** (16): 2336
- 3 Chen SH, You CM, Zhang Z, Xu ZF. Predicting the potential distribution of *Quercus oxyphylla* in China under climate change scenarios [J]. *Forests*, 2024, **15** (6): 1033
- 4 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 王崇云, 彭明春, 李云, 王旭红, 马云飞. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. *生态学报*, 2023, **43** (16): 6590-6604 [Wang XF, Duan YX, Jin LL, Wang CY, Peng MC, Li Y, Wang XH, Ma YF. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, **43** (16): 6590-6604]
- 5 朱连华, 祝颖琦, 姚壹壹, 石晨, 徐凡然, 赵曜昊, 江志红. 全球增暖1.5/2 °C下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子[J]. *大气科学学报*, 2023, **46** (1): 97-109 [Zhu LH, Zhu YQ, Yao YY, Shi C, Xu FR, Zhao WH, Jiang ZH. Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1.5 and 2 °C global warming levels [J]. *Trans Atmos Sci*, 2023, **46** (1): 97-109]
- 6 Choudhury MR, Deb P, Singha H, Chakdar B, Medhi M. Predicting the probable distribution and threat of invasive *Mimosa diplotricha* Suavalle and *Mikania micrantha* Kunth in a protected tropical grassland [J]. *Ecol Eng*, 2016, **97**: 23-31
- 7 Meng JS, Li M, Guo JH, Zhao DQ, Tao J. Predicting suitable environments and potential occurrences for *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl [J]. *Forests*, 2021, **12** (8): 1126
- 8 Xu X, Zhang HY, Yue JJ, Xie T, Xu Y, Tian YL. Predicting shifts in the suitable climatic distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in China: maximum entropy model paves the way to forest management [J]. *Forests*, 2018, **9** (3): 103
- 9 Xu CH, Zhang L, Zhang KL, Tao J. MaxEnt modeling and the impact of climate change on *Pistacia chinensis* Bunge habitat suitability variations in China [J]. *Forests*, 2023, **14** (8): 1579
- 10 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子[J]. *生态学报*, 2016, **36** (14): 4475-4484 [Gao WQ, Wang XF, Jiang ZP, Liu JF. Impact of climate change on the potential geographical distribution pattern and dominant climatic factors of *Quercus variabilis* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (14): 4475-4484]
- 11 Wei LJ, Wang GH, Xie CP, Gao ZQ, Huang QY, Jim CY. Predicting suitable habitat for the endangered tree *Ormosia microphylla* in China [J]. *Sci Rep*, 2024, **14** (1): 10330
- 12 Wu XT, Wang MQ, Li XY, Yan YD, Dai MJ, Xie WY, Zhou XF, Zhang GL, Wen YF. Response of distribution patterns of two closely related species in *Taxus* genus to climate change since last inter-glacial [J]. *Ecol Evol*, 2022, **12** (9): e9302
- 13 谢孟, 张学星, 罗燕, 马永鹏, 李伟, 杨琳祥, 柳文, 赵培仙, 李正红, 马宏. 基于MaxEnt模型的云南干热河谷适生树种选择[J]. *生态学报*, 2024, **44** (9): 3689-3707 [Xie M, Zhang XX, Luo Y, Ma YP, Li W, Yang LX, Liu W, Zhao PX, Li ZH, Ma H. Application of MaxEnt model for selection of suitable tree species in dry-hot valley of Yunnan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, **44** (9): 3689-3707]
- 14 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. *生态学报*, 2022, **42** (4): 9 [Zhang XW, Jiang YM, Bi Y, Liu XL, Li X, Sun T, Chen HY, Li J. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, **42** (4): 9]
- 15 王雁红, 俞琦, 杨佳, 赵鹏, 李忠虎, 赵桂仿. 基于核微卫星的短柄枹栎居群遗传多样性和遗传结构[J]. *林业科学*, 2015, **51** (12): 121-131 [Wang YH, Yu Q, Yang J, Zhao P, Li ZH, Zhao GF. Genetic diversity and population structure of *Quercus serrata* var. *brevipetiolata* revealed by nSSR markers [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51** (12): 121-131]
- 16 黄雅昆, 王得祥, 张洪武, 郭廷栋, 胡有宁. 秦岭佛坪自

- 然保护区短柄枹栎种群的数量特征[J]. 西北植物学报, 2015, **35** (3): 594-600 [Huang YK, Wang DX, Zhang HW, Guo TD, Hu YN. Quantitative characteristics of *quercus glandulifera* var. *brevipetiolata* population in Foping National Reserve of Qinling Mountains [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2015, **35** (3): 594-600]
- 17 Li S, Zhou YB, Liu M, Zhang Y, Cao SN. Nutrient composition and starch characteristics of *Quercus glandulifera* Bl. seeds from China [J]. *Food Chem*, 2015, **185**: 371-376
- 18 Xiao Y, Guo QQ, Xie N, Yuan GY, Liao MY, Gui Q, Ding GJ. Predicting the global potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* using an ecological niche model: expansion trend and the main driving factors [J]. *BMC Ecol Evol*, 2024, **24** (1): 48
- 19 Liu L, Wang RL, Zhang YY, Mou QY, Gou YS, Liu K, Huang N, Ouyang CL, Hu JY, Du BG. Simulation of potential suitable distribution of *Alnus cremastogyne* Burk. in China under climate change scenarios [J]. *Ecol Indic*, 2021, **133** (10): 108396
- 20 Shi JY, Xia MX, He GQ, Gonzalez NCT, Zhou S, Lan K, Ouyang L, Shen XB, Jiang XL, Cao FL, Li H. Predicting *Quercus gilva* distribution dynamics and its response to climate change induced by GHGs emission through MaxEnt modeling [J]. *J Environ Manag*, 2024, **357**: 120841
- 21 Qin A, Liu B, Guo QS, Bussmann RW, Ma FQ, Jian ZJ, Xu GX, Pei SX. MaxEnt modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch. an extremely endangered conifer from southwestern China [J]. *Glob Ecol Conserv*, 2017, **10** (C): 139-146
- 22 Fielding AH, Bell JF. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models [J]. *Environ Conser*, 1997, **24** (1): 38-49
- 23 Kumar D, Rawat S. Modeling the effect of climate change on the distribution of threatened medicinal orchid *Satyrium nepalense* D. Don in India [J]. *Environ Sci Pollut*, 2022, **29** (48): 72431-72444
- 24 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对MaxEnt模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学, 2012, **48** (1): 53-59 [Chen XM, Lei YC, Zhang QX, Jia HY. Effects of sample sizes on accuracy and stability of maximum entropy model in predicting species distribution [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48** (1): 53-59]
- 25 刘超, 霍宏亮, 田路明, 齐丹, 张莹, 徐家玉, 曹玉芬. 基于MaxEnt模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (11): 3696-3704 [Liu C, Huo HL, Tian LM, Qi D, Zhang JY, Cao Y. Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (11): 3696-3704]
- 26 张亚, 陈超, 于明含, 何莹莹, 张富崇, 张建玲. 模拟降水年际和年内变化对黑沙蒿群落物种多样性和生产力的影响[J]. 生态学报, 2024, **44** (15): 6865-6873 [Zhang Y, Chen C, Yu MH, He YY, Zhang FC, Zhang JL. Modeling the effects of inter- and intra-annual variability in precipitation on the species diversity and productivity of *Artemisia ordosica* community [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, **44** (15): 6865-6873]
- 27 王坤悦, 李旭红, 余新晓, 贾国栋, 张益, 党毅. 北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应[J]. 生态学报, 2024, **44** (6): 2561-2571 [Wang KY, Li XH, Xu XX, Jia GD, Zhang Y, Dang Y. Response of soil moisture of typical vegetation to individual rainfall in Beijing mountain area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, **44** (6): 2561-2571]
- 28 Meng J, Li M, Guo J, Zhao D, Tao J. Predicting suitable environments and potential occurrences for *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl [J]. *Forests*, 2021, **12** (8): 1126
- 29 Cavender-bares J, Holbrook NM. Hydraulic properties and freezing-induced cavitation in sympatric evergreen and deciduous oaks with contrasting habitats [J]. *Plant Cell Environ*, 2001, **24** (12): 1243-1256
- 30 张亮, 魏彦强, 王金牛, 周强, 刘峰贵, 陈琼, 刘飞. 气候变化情景下黑果枸杞的潜在地理分布[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26** (4): 10 [Zhang L, Wei YQ, Wang JN, Zhou Q, Liu FG, Chen Q, Liu F. The potential geographical distribution of *Lycium ruthenicum* Murr. under different climate change scenarios [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, **26** (4): 10]
- 31 Zhu J, Zhang KX, Wang WS, Gong W, Liu WC, Chen HG, Xu HH, Lu YT. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12 [J]. *Plant Cell Physiol*, 2015, **56** (4): 727-736
- 32 韩顺鑫, 余婷, 金正, 邓锐, 阳蕊灿, 陶建平, 罗唯学. 预测不同气候情景下三种槐树在中国的潜在分布区[J]. 生态学报, 2025, **45** (4): 1-13 [Han SX, Xu T, Jing Z, Deng R, Yang RC, Tao JP, Luo WX. Predicting potential distributions of three locust trees in China under different climate scenarios [J]. *Acta Ecol Sin*, 2025, **45** (4): 1-13]
- 33 张军, 黄佳莉, 万春燕, 张峰, 余俊瑞, 王宏瑞, 朱师丹. 热带亚热带森林乔木的径向生长速率与功能性状的相关性[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, **32** (4): 1-10 [Zhang J, Huang JL, Wan CY, Zhang F, Yu JR, Wang HX, Zhu SD. Relationships between diametral growth rate and functional traits of tree species in tropical and subtropical forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2024, **32** (4): 1-10]
- 34 申源, 廖梓延, 林可欣, 伍小刚, 张凤英, 张林, 潘开文. 基于多算法集合模型预测青藏高原3种常见恶性杂草未来入侵风险[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 909-919 [Shen Y, Liao ZY, Lin KX, Wu XG, Zhang FY, Zhang L, Pan KW. Predicting future invasion risk of three widespread malignant weeds on Qinghai-Tibet

- Plateau, using multi-algorithm ensemble models [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 909-919]
- 35 赵宗慈, 罗勇. 21世纪中国东北地区气候变化预估[J]. 气象与环境学报, 2007, **23** (3): 1-4 [Zhao ZC, Luo Y. Projections of climate change over northeastern China for the 21st century [J]. *J Meteor Environ*, 2007, **23** (3): 1-4]
 - 36 李学武, 张京, 赵天保, 李福原, 赵廷宁. 我国西北地区干湿变化特征及其未来预估[J]. 气候与环境研究, 2024, **29** (1): 59-74 [Li XW, Zhang JP, Zhao TB, Li FY, Zhao TN. Characteristics of dry and wet variations in the Northwest China and their future predictions [J]. *Clim Res*, 2024, **29** (1): 59-74]
 - 37 陈馨, 肖欣怡, 伍小刚, 虞超, 张桥英, 廖梓延, 潘开文, 张琳, 冯毅. 基于Biomod2组合模型的气候变化下川渝地区6种槭属树种适生区预测[J]. 应用与环境生物学报, 2025, **31** (6): 859-874 [Chen X, Xiao XY, Wu XG, Yu C, Zhang QY, Liao ZY, Pan KW, Zhang L, Feng Y. Suitable regions of six acer species in the Sichuan-Chongqing areas under climate change based on the Biomod2 ensemble model [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2025, **31** (6): 859-874]
 - 38 吴健, 夏军, 曾思栋, 刘欣, 樊迪. CMIP6全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估[J]. 长江流域资源与环境, 2023, **32** (1): 137-150 [Wu J, Xia J, Zeng SD, Liu X, Fan D. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze river basin [J]. *Resour Environ Yangtze Val*, 2023, **32** (1): 137-150]
 - 39 Chen C, Wang B, Li J, Xiao Y, Chen K, Liu N, Zhou G. Predicting potential and quality distribution of *Anisodus tanguticus* (Maxim.) Pascher under different climatic conditions in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Front Plant Sci*, 2024 **15** (3): 1369641
 - 40 周攀宇, 江志红, 李童. 结合模式性能和独立性加权的全球增暖1.5/2℃下中国区域气候的未来预估[J]. 大气科学学报, 2024, **47** (3): 376-391 [Zhou PY, Jiang ZH, Li T. Climate projection over China under global warming of 1.5 and 2℃ considering model performance and independence [J]. *Trans Atmos Sci*, 2024, **47** (3): 376-391]
 - 41 薛雨婷, 李谢辉, 贾何佳. 基于CMIP6模式的西南地区旱灾风险未来预估[J]. 水土保持研究, 2023, **30** (2): 247-255 [Xue YT, Li XH, Jia HJ. Future projection of drought risk in southwestern China based on cmip6 model [J]. *Int Soil Water Conserv Res*, 2023, **30** (2): 247-255]
 - 42 陈晓晨, 徐影, 姚遥. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估[J]. 大气科学, 2015, **39** (6): 1123-1135 [Chen XC, Xu Y, Yao Y. Changes in climate extremes over China in a 2 °C, 3 °C, and 4 °C warmer world [J]. *Chin J Atmos Sci*, 2015, **39** (6): 1123-1135]
 - 43 孙永玉, 李昆, 雷晨雨, 田瑞杰, 张春华, 冯德枫, 刘方炎, 唐国勇. 干热河谷小桐子不同种源的光合生理及生长性状[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27** (2): 351-356 [Sun YY, Li K, Lei CY, Tian RJ, Zhang CH, Feng DF, Liu FY, Tang GY. Photosynthetic physiology and growth characteristics of different *Jatropha curcas* provenances in a dry-hot valley [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, **27** (2): 351-356]
 - 44 武威, 吴昊晟, 杨东海, 孙素芹, 李士成, 林玲, 杨玲. 不同种源西伯利亚红松生长性状分析与评价[J]. 西北林学院学报, 2024, **39** (5): 126-134 [Wu W, Wu HS, Yang DH, Sun SQ, Li SC, Lin L, Yang L. Analysis and evaluation of the grow traits of *Pinus sibirica* from different provenances [J]. *J NW For Univ*, 2024, **39** (5): 126-134]