

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.12.009

王鹏, 田姗姗, 宋盈盈, 等. 基于 MaxEnt 预测 3 种柃属植物在中国的潜在适生区 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 84-99.

基于 MaxEnt 预测 3 种柃属植物在 中国的潜在适生区

王鹏, 田姗姗, 宋盈盈, 金正,
张青玉, 陶建平, 罗唯学

西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 柃属植物是亚热带森林中的常见灌木, 其枝叶可供药用, 具有清热、消肿的功效, 同时也是重要的冬季蜜源植物. 受全球气候变化加剧的影响, 环境压力可能会驱使柃属植物的生态特征和地理分布格局发生变化, 进而改变其栖息地分布范围. 基于多个植物标本数据库, 使用 MaxEnt 模型预测岗柃 (*Eurya groffii*)、柃木 (*Eurya japonica*) 和细枝柃 (*Eurya loquaiana*) 在当前及未来 2080—2100 年 3 种气候情景下 (SSP245, SSP370, SSP585) 在中国的潜在适生区分布, 并在 ArcGIS 中绘制当前和未来气候情景下 3 种柃属植物潜在适生区高分辨率地图. 同时对环境因子进行重要性排序, 通过敏感性分析绘制响应曲线. 结果表明: 降水和温度是影响 3 种柃属植物分布的主导环境因子. 岗柃和细枝柃的分布受到最干月降水量的限制, 而柃木的分布则主要受平均气温日较差的影响. 在当前气候条件下, 岗柃主要分布在华南地区, 尤其是西南部, 而柃木和细枝柃主要分布在华中和东南沿海地区. 在 2080—2100 年未来气候情景下, 3 种柃属植物均一定程度上向北转移, 柃木和细枝柃适生区会显著缩减, 而岗柃表现出最佳的适应能力和抗逆性, 适生区保留率高, 可能成为 3 种柃属植物中最大的受益者.

关键词: 气候变化; 柃属植物; MaxEnt 模型; 物种分布模型;

潜在适生区

中图分类号: Q141

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)12-0084-16

Predicting the Potential Habitat of Three *Eurya* Species in China Based on MaxEnt

WANG Peng, TIAN Shanshan, SONG Yingying, JIN Zheng,
ZHANG Qingyu, TAO Jianping, LUO Weixue

收稿日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32201312); 重庆市研究生科研创新项目(CYS22200); 中央高校基本科研业务费专项(SWU-KQ22009).

作者简介: 王鹏, 硕士, 主要从事森林生态学与土壤微生物学研究.

通信作者: 罗唯学, 博士, 讲师.

School of Life Sciences, Southwest University / Key laboratory of Eco-Environments in
Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China

Abstract: *Eurya* species are commonly found in subtropical forests. The branches and leaves of this kind of plants can be used for medicine with the effect of clearing heat and detumescence. They are also important winter nectar plants. However, under the impact of global climate change, environmental stress may drive changes in the ecological characteristics and geographical distribution patterns of *Eurya* plants, thereby changing the distribution of their potential habitat. However, there is currently no research in China to systematically reveal the current and future potential distribution ranges of *Eurya* plants. The key driving factors affecting their potential distribution are still unclear. The MaxEnt model was used to predict the distribution of *E. groffii*, *E. japonica* and *E. loquaiiana* under current and future climate scenarios (SSP245, SSP370, SSP585) to 2080–2100. Meanwhile, the key factors influencing their geographical distribution patterns were explored. Based on multiple databases, species record point data was collected and filtered. The Maxent model optimized by ENMeval package was used for prediction. The high-resolution maps of potential habitat areas of three *Eurya* species under current and future climate scenarios were generated in ArcGIS. The environmental factors were ranked according to degree of importance and response curves were drawn with sensitivity analysis. Precipitation and temperature were the dominant environmental factors shaping the distribution of the three *Eurya* species. *E. groffii* and *E. loquaiiana* are regulated by the precipitation of the driest month, while the mean diurnal range is the key driver of *E. japonica*. Under the current climatic conditions, *E. groffii* is mainly distributed in southern China, especially in southwestern China, while *E. japonica* and *E. loquaiiana* are mainly distributed in central and southeastern coastal areas. For the three climate scenarios in the future 2080–2100, all three *Eurya* show a trend of migrating northward. The suitable habitats for *E. japonica* and *E. loquaiiana* are projected to undergo substantial contraction. *E. groffii* has the highest stability in the long term and may be the largest beneficiary of three *Eurya* species.

Key words: climate change; *Eurya* plant; MaxEnt model; species distribution model; potential habitat

植物生长受到环境因素的限制, 其中气候是决定全球植被分布的重要因素之一^[1]. 近年来, 气候变化日益加剧. 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出, 自第四次工业革命后, 全球气候变暖的趋势更加明显, 预计到 2030 年左右, 全球地表温度相较于工业革命前将上升超过 1.5 °C^[2]. 气候变暖影响全球水热循环, 导致降水的时空分布不均, 极端气候事件频繁发生^[3]. 作为森林生态系统的基础, 植物物种维持着森林生态系统的功能和稳定性^[4-5]. 光照、温度、水分、土壤等环境因素的区域性变化将重塑植物群落^[6-7]. 环境胁迫促使植物调整其生态特征和地理分布格局, 逐渐扩散或迁移到更适宜的生境, 以缓解不利环境条件的影响^[8-10]. 因此, 了解植物物种在大尺度范围内的分布模式及其在气候变化情景下的变化趋势, 已成为生物地理学和全球变化研究的热点领域, 对于生物多样性保护和森林经营管理具有重要的理论和实践意义.

物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)可确定单个物种或群落的环境生态位和潜在分布, 目前被广泛用于预测气候变化下物种的地理分布模式^[11-12]. SDMs 的本质是通过数学统计方法建立物种发生数据与相应空间特征信息之间的关系, 以分析物种对环境的耐受差异^[13]. 基于不同理论和算法, 常见的模型有 Bioclim(生物气候分析系统)^[14]、ENFA(生态位因子分析模型)^[15]、GARP(遗传算法模型)^[16]、GLMs(广义线性模型)^[17]等物种分布模型. 然而, 环境因子之间的多重共线性以及物种间的相互作用会降低部分模型的性能, 导致预测精度降低或过度拟合的问题^[18]. MaxEnt 模型基于最大熵原理, 以目标发生

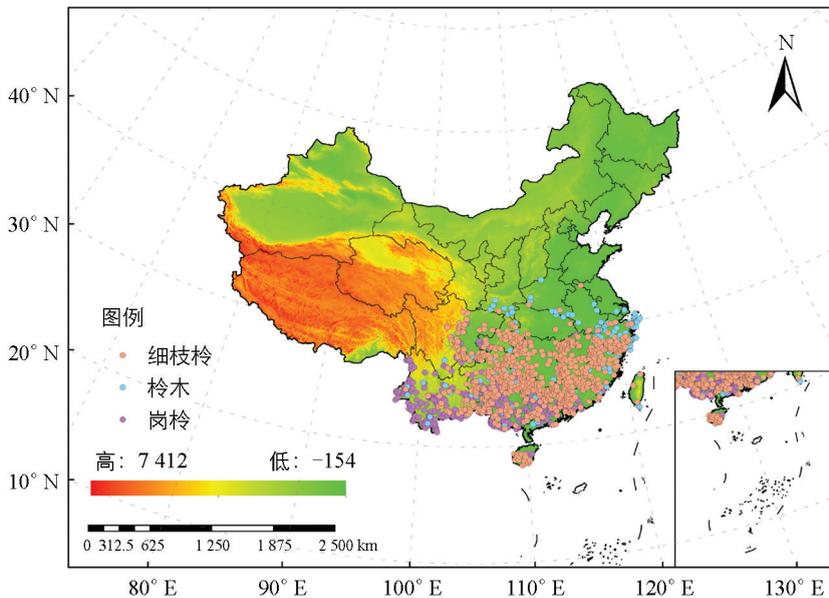
记录和环境特征值作为约束条件,通过最大熵概率分布判断目标概率分布^[19]. MaxEnt 模型对缺失的物种发生记录不敏感,具有高预测精度和较小的失真度,在样本量较小的情况下即可获得良好的预测结果^[20-21]. 近年来,MaxEnt 模型广泛应用于植物适生区变化的预测,如红松(*Pinus koraiensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等物种.

桫欏属(*Eurya*)植物隶属于山茶科,为小乔木或常绿灌木^[22],以树形优美而著称,适合作为观花和观果园林植物,可栽培于园林花坛. 桫欏属植物种类繁多,分布面积广,全球范围内有 130 种,我国境内就有 80 多个物种,是长江以南亚热带森林中的常绿灌木^[23]. 桫欏属植物的枝叶可药用,具有清热、消肿的功效,同时也是重要的冬季蜜源. 桫欏属植物花粉充足,产蜜量丰富,对于蜂群安全越冬和春季的快速繁殖具有重要作用^[24]. 目前,对于桫欏属植物的研究集中在种质资源调查^[25-26]、营养繁殖栽培^[27-28]等方面. 然而,在未来全球气候变暖背景下,环境压力可能会驱使桫欏属植物逐渐迁移,从而改变其地理分布格局. 岗桫欏(*Eurya groffii*)、桫欏木(*Eurya japonica*)和细枝桫欏(*Eurya loquaiana*)是中国常见的 3 种桫欏属植物,本研究以这 3 种植物为研究对象,利用 MaxEnt 模型预测其在当前及未来不同气候情景下的潜在分布区域的动态变化,并绘制桫欏属植物在中国境内分布的高分辨率地图,探究影响其分布格局的关键驱动因素,以为桫欏属植物的资源保护和管理开发提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 物种地理分布数据来源

本研究以桫欏属 3 个物种(岗桫欏、桫欏木和细枝桫欏)为研究对象,并获取这些物种的地理分布点数据,数据来源包括中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)、教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)、全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org>). 对于具有地名但缺乏坐标信息的样点,通过百度地图获取经纬度坐标,并排除错误和重复的样点. 为避免样点间的空间自相关导致模型过度拟合,使用 ArcGIS 中的 SDMTtoolbox v2.5 工具包对样点数据进行稀疏化处理^[29]. 具体而言,在每个地图栅格(5 km×5 km)内最多保留 1 个样点,最终确定了岗桫欏的 535 个分布点、桫欏木 235 个分布点和细枝桫欏 741 个分布点(图 1).



审图号: GS(2020)4619 号.

图 1 岗桫欏、桫欏木和细枝桫欏的分布点

1.2 环境变量的收集与筛选处理

环境数据共选取 28 个环境变量作为预测变量,包括 19 个气候因子、6 个土壤因子以及 3 个地形因子

(表 1). 当前气候因子(1970—2000 年)的数据来源于世界气候数据库(<https://www.worldclim.org/>), 分辨率为 2.5 min. 基于第六次耦合模式比较计划(CMIP6), 未来气候因子(2080—2100 年)使用了北京气候中心开发的 BCC-CSM2-MR 气候系统模式中 3 种共享社会经济路径(SSPs)数据, 分别为 SSP245(低等胁迫情景)、SSP370(中等胁迫情景)和 SSP585(高等胁迫情景). 这 3 种情景分别假定 2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m^2 , 7.0 W/m^2 , 8.5 W/m^2 [30-31]. 研究表明, BCC-CSM2-MR 模式在对东亚夏季风和降水的模拟方面表现良好, 并且对中国地区的气候预测具有较高的精度 [32-33]. 地形因子数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>). 土壤因子数据来源于世界土壤信息数据库(<https://soilgrids.org/>), 缺失的土壤理化性质数据通过计算邻近栅格的平均值进行补全 [34]. 最后, 使用 ArcGIS v10.8 对所有环境变量的栅格底图进行重采样, 以确保具有相同的空间分辨率($5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$).

表 1 MaxEnt 模型中 28 个环境变量名称及其含义

数据类型	变量	描述	单位
气候因子	<i>bio1</i>	年平均温度	°C
	<i>bio2</i>	平均气温日较差	°C
	<i>bio3</i>	等温性	%
	<i>bio4</i>	气温季节性变化系数	—
	<i>bio5</i>	最暖月最高温度	°C
	<i>bio6</i>	最冷月最低温度	°C
	<i>bio7</i>	气温年较差	°C
	<i>bio8</i>	最湿季度平均温度	°C
	<i>bio9</i>	最干季度平均温度	°C
	<i>bio10</i>	最暖季度平均温度	°C
	<i>bio11</i>	最冷季度平均温度	°C
	<i>bio12</i>	年平均降水量	mm
	<i>bio13</i>	最湿月降水量	mm
	<i>bio14</i>	最干月降水量	mm
	<i>bio15</i>	降水季节性	%
	<i>bio16</i>	最湿季度降水量	mm
	<i>bio17</i>	最干季度降水量	mm
	<i>bio18</i>	最暖季度降水量	mm
	<i>bio19</i>	最冷季度降水量	mm
土壤因子	<i>bhod</i>	土壤容重	$\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$
	<i>ocd</i>	土壤有机碳密度	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	pH 值	土壤酸碱度	—
	<i>sand</i>	砂土含量	%
	<i>soc</i>	土壤有机碳含量	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-2}$
	TN	土壤全氮	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-2}$
地形因子	<i>aspect</i>	坡向	—
	<i>elev</i>	海拔	m
	<i>slope</i>	坡度	°

由于环境变量之间存在强相关和多重共线性等问题,为避免过度拟合并提高预测精度,对环境因子进行筛选和剔除,以减少冗余信息对模拟结果的影响.首先,在 R4.2.1 中,使用 car 数据包中的“vif”函数检验环境因子之间的多重共线性,设置方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)阈值 $VIF < 10$. 使用“cor”函数进行了 Pearson 相关性分析,对于相关系数 $r > 0.8$ 的变量,结合植物的生存环境需求和生理特性,优先保留贡献率更大的变量.岗枰和枰木各保留 8 个环境变量,细枝枰保留 9 个环境变量(表 2).

表 2 3 种枰属植物筛选后用于模型构建的环境变量

树种	保留的环境变量
岗枰	bio14, bio4, bio8, bio3, bio15, slope, pH 值, bhod
枰木	bio2, bio13, bio7, bio1, pH 值, bhod, ocd, aspect
细枝枰	bio14, bio6, bio2, pH 值, slope, bhod, elev, ocd, bio15

1.3 模型的构建优化及评估

为了使岗枰、枰木及细枝枰的出现概率接近正态分布,选择 75% 的记录点数据作为训练集,而剩下的 25% 记录点作为测试集^[35]. 利用 R4.2.1 中的 ENMeval 数据包对 MaxEnt 模型进行优化. 在模型优化过程中,修改和调试模型的特征和调控倍率 2 种参数^[36]. MaxEnt 模型提供了 5 种特征,包括线性(Linear, L)、二次(Quadratic, Q)、片段化(Hinge, H)、乘积型(Product, P)和阈值(Threshold, T). 本研究共测试了 5 种特征组合(Feature Combination, FC),分别为 LP, LQ, LH, LQP 和 LQPH. 调控倍频设置为 0.5~3, 间隔为 0.5, 总共测试 6 种调控倍频^[37]. 将上述参数进行组合测试,采用受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线分析法对预测结果进行精度评估,以 ROC 的曲线下面积(Area Under the Curve, AUC)作为模型精度的评价指标.

参数优化完成后,选择具有最高 AUC 得分的参数组会用于最终的 MaxEnt 模型构建. AUC 的取值范围为 0~1, 得分越高表示模型的可行性越高,预测效果越好. 根据 AUC 的划分,当 $AUC < 0.6$ 时,表示预测失败;当 $0.6 \leq AUC < 0.8$ 时,表示预测良好;当 $0.8 \leq AUC < 0.9$ 时,表示预测结果优秀;而当 $AUC > 0.9$ 时,表示预测非常准确^[38].

1.4 物种潜在适生区等级划分

本研究使用 MaxEnt 模型模拟产生的结果,通过 ArcGIS v10.8 转换为栅格数据并进行可视化处理. 利用重分类(Reclassify)工具,采用自然间断分级法(Jenks' Natural Breaks)将潜在适生区划分为 4 个等级:非适生区(< 0.2)、低适生区($0.2 \sim 0.4$)、中适生区($0.4 \sim 0.6$)和高适生区($0.6 \sim 1.0$). 同时,确定不同适生区占比,并计算了 3 种枰属植物在不同适生区的面积^[39].

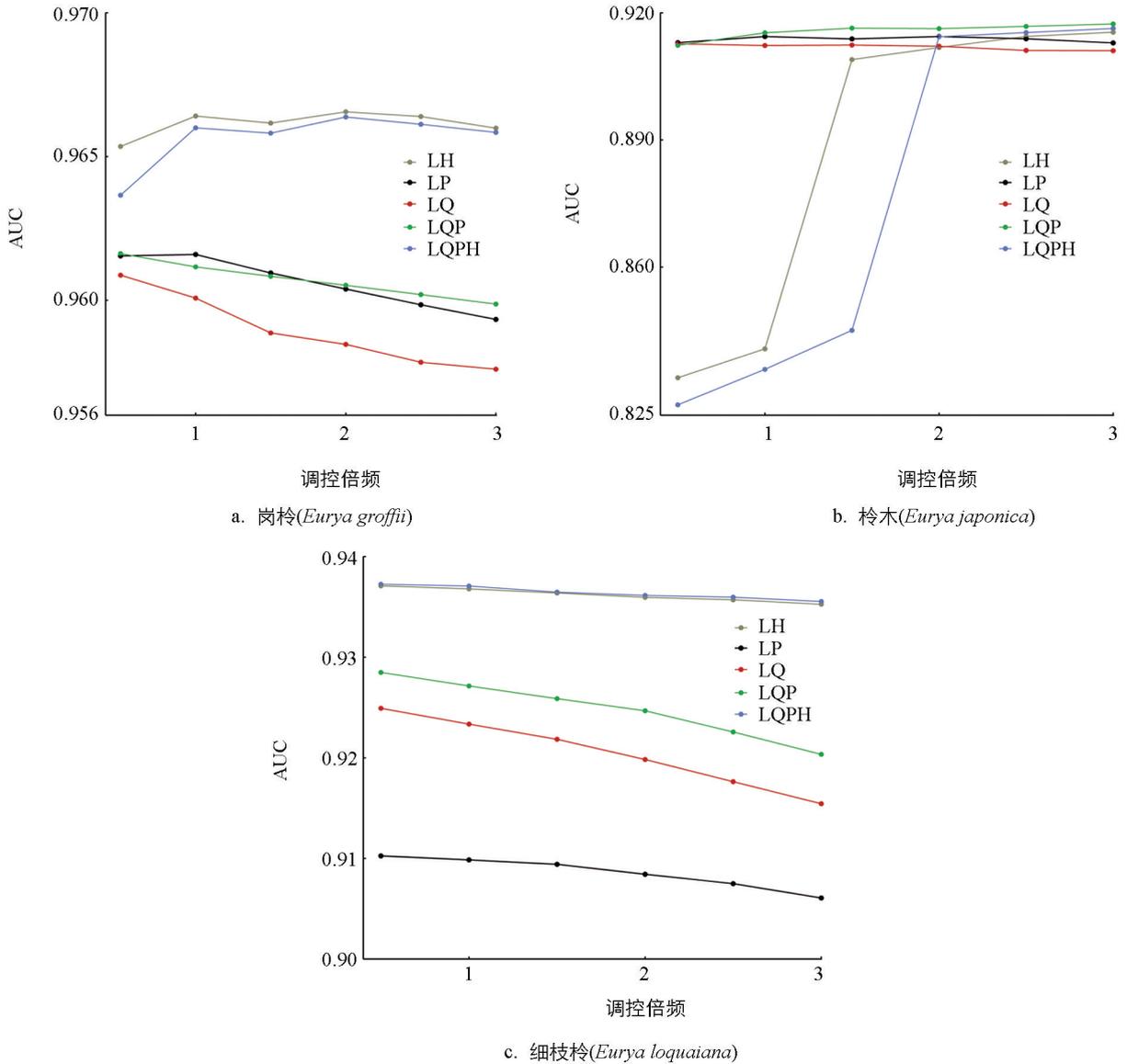
1.5 物种适生区空间格局变化

为分析物种适生区的空间格局变化,本研究将逻辑值 $L \geq 0.2$ 的部分定义为潜在适生区,并赋值为“1”;将 $L < 0.2$ 的部分定义为非适生区,并赋值为“0”. 然后,在 ArcGIS v10.8 中将图层转换为二进制图层. 本研究将物种适生区的变化分为 4 种类型:非适生区、收缩区、保留区和扩张区. 3 种枰属植物未来的分布面积变化均基于当前气候情景下该物种的潜在适生区面积来进行比较计算. 将未来适生区的二进制图层数值乘以 2,并与当前适生区的二进制图层相减. 其中, $0 \rightarrow 0$ 代表非适生区, $1 \rightarrow 0$ 代表收缩区, $1 \rightarrow 1$ 代表保留区, $0 \rightarrow 1$ 代表扩张区. 通过这一可视化方法,能够实现 3 个枰属物种潜在适生区空间格局变化的可视化^[40].

2 结果与分析

2.1 3 种枰属植物的 MaxEnt 模型精度评估

3 种枰属植物的最优模型参数各不相同(图 2). 当 FC 为 LH, 调控倍频为 2 时,岗枰的 AUC 值达到最大,为 0.967;当 FC 为 LQP, 调控倍频为 2 时,枰木的 AUC 值为 0.917;细枝枰在 FC 为 LQPH, 调控倍频为 0.5 时, AUC 值为 0.937. 模型精度评估结果显示,3 种枰属植物的 AUC 值均大于 0.9, 说明预测结果具有很高的准确性. 由此可见,模型具有较高的可靠性,能够很好地模拟气候变化条件下中国 3 种枰属植物的潜在适生区.



L: 线性; Q: 二次; H: 片段化; P: 乘积型. LH, LP, LQ, LQP 和 LQPH 为不同类型的特征组合.

图 2 3 种柃属植物的 MaxEnt 模型精度评估

2.2 3 种柃属植物潜在适生区的重要环境因子贡献率及敏感性分析

3 种柃属植物的潜在分布由环境因子驱动, 不同物种对主导环境因子的响应存在差异. 岗柃最主要的 4 个环境因子的贡献率累计达 95% (图 3a). 其中, 最干月降水量 (*bio14*) 的贡献最大, 占比 49.4%; 气温季节性变化系数 (*bio4*) 占比 27.2%; 最湿季度平均温度 (*bio8*) 占比 13.7%; 等温性 (*bio3*) 占比 5%. 响应曲线结果表明, 岗柃的适生概率对最干月降水量和气温季节性变化系数呈单峰模式. 最干月降水量的适宜区间为 0~150 mm, 最适值约为 30 mm; 气温季节性变化系数的适宜区间为 0~500, 最适值约为 400. 此外, 岗柃的适生概率随着最湿季度平均温度与等温性的增加而逐渐增大 (图 4a).

影响柃木潜在分布的关键驱动因子的贡献率累计达 86.2% (图 3b). 其中, 平均气温日较差 (*bio2*) 贡献最大, 占比 47.3%; 最湿月降水量 (*bio13*) 占比 16.9%, 适宜区间为 100~500 mm, 最适值约为 350 mm; 气温年较差 (*bio7*) 占比 11.9%, 适宜区间为 200~400 °C, 最适值约为 300 °C. 年平均气温 (*bio1*) 的贡献占比 10.1%, 适宜区间为 10~25 °C, 最适值约为 20 °C. 其中, 柃木的适生概率随着平均气温日较差的增加呈单调递减, 最适值约为 5 °C (图 4b).

影响细枝柃潜在分布的关键驱动因子的贡献率累计达 86.7% (图 3c). 其中, 最干月降水量 (*bio14*) 对细枝柃的分布影响最大, 贡献率为 64.0%; 最冷月最低温度 (*bio6*) 为 11.9%; 平均气温日

较差(*bio2*)为 5.5%；土壤酸碱度(pH 值)为 5.4%。细枝桫的适生概率随着最干月降水量的增加而升高,并在约 75 mm 时达到最大值；最冷月最低温度的适宜区间为 0~20 °C,平均气温日较差的适宜区间为 5~10 °C,土壤 pH 值的适宜区间为 5~7,并在 pH 值约为 5.2 时适生概率达到最大值(图 4c)。综上所述,气候因素对中国 3 种桫属植物的潜在分布比土壤和地形因素具有更大的决定作用。

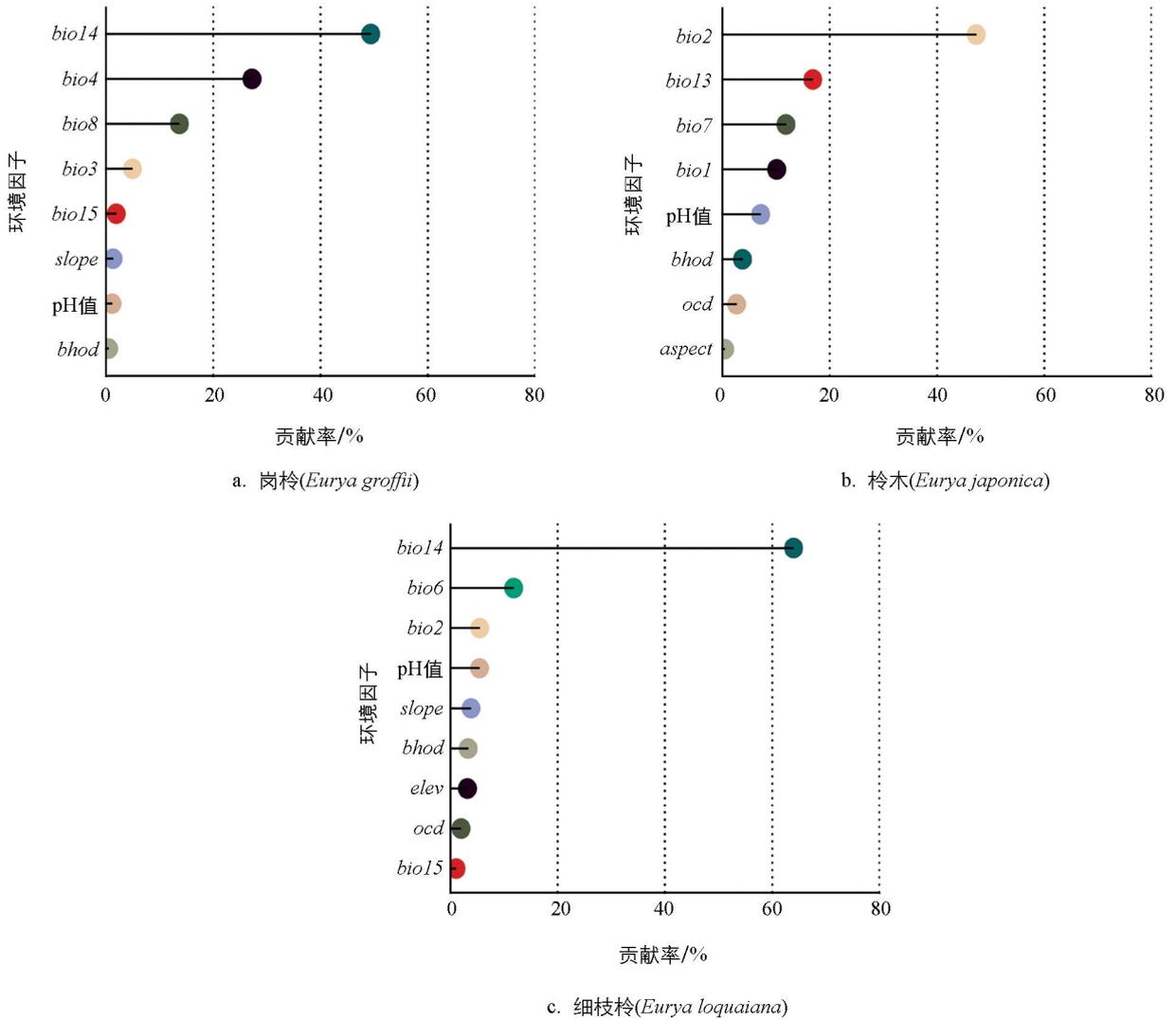
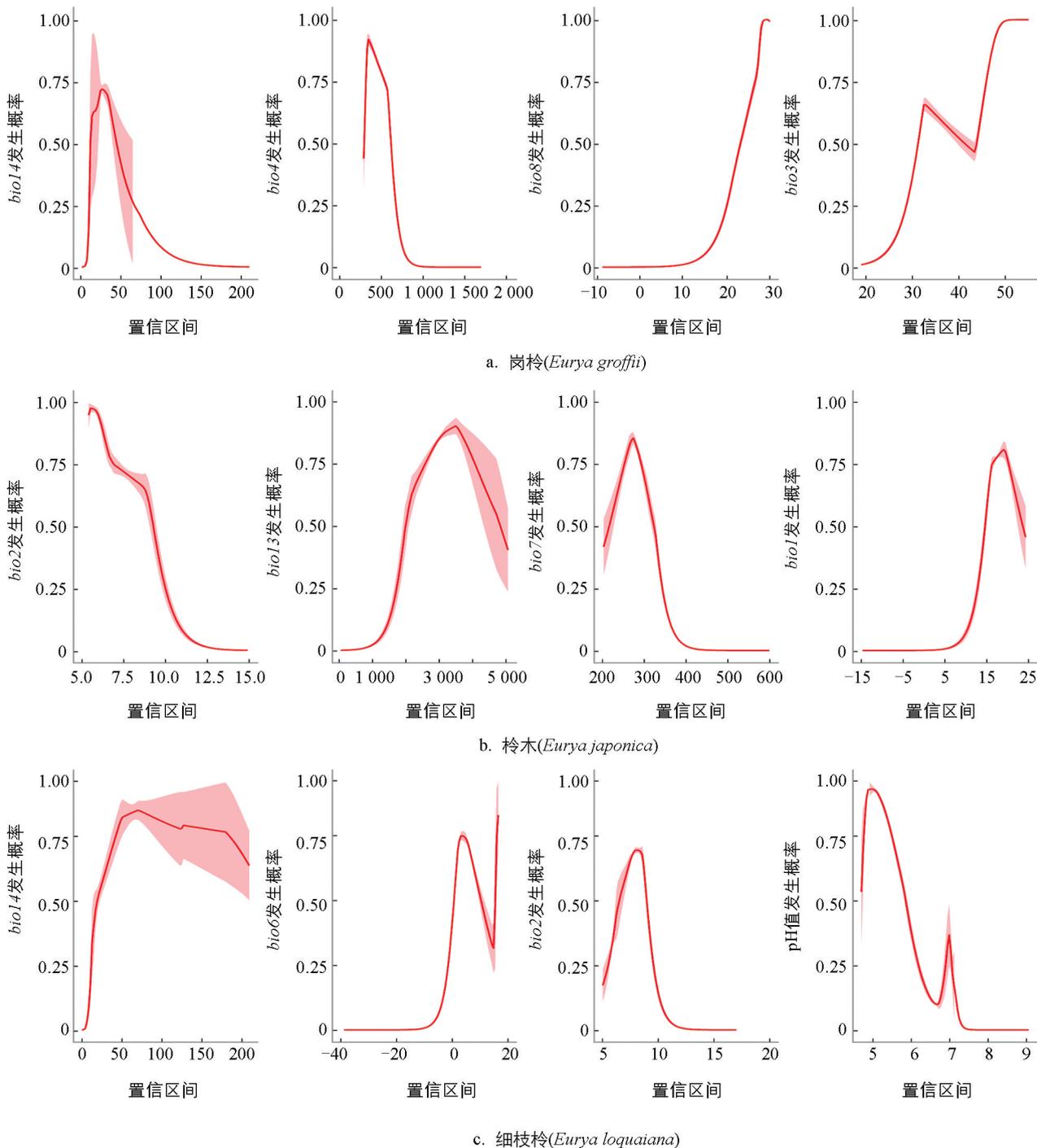


图 3 3 种桫属植物潜在适生区的重要环境因子贡献率

2.3 当前和未来气候情景下潜在适生区预测结果

通过 MaxEnt 模型模拟,分别绘制了岗桫、桫木和细枝桫在当前气候条件及 2080—2100 年 SSP245, SSP370, SSP585 情景下的高分辨率潜在适生区分布地图。在当前气候情景下,岗桫的适生区分布在中国的南部地区,主要集中在云南、广西、广东、福建、海南、中国台湾等地,总面积为 $9.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ (表 3),其中高适生区占比 48.4%,中适生区占比 23.6%,低适生区占比 27.9%。在未来 3 种气候情景下,岗桫的适生区面积均呈扩大趋势,高适生区面积则呈现单峰模式,即先增加后减少。在 SSP245 的气候情景下,岗桫的高适生区面积达到峰值,为 $1.47 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。在 2080—2100 年的潜在分布区,岗桫主要集中于中国的华东、华南、华中地区,少量分布于甘肃、西藏、新疆等地(图 5)。

在当前气候条件下,桫木的潜在适生区主要分布于华东、华中和华南地区,西南地区也有分布(图 5),总面积为 $2.00 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中高适生区占比 30.4%,中适生区占比 28.7%,低适生区占比 40.8%(表 3)。在未来气候情景下,桫木的适生区总面积和高适生区均呈先增加后减少趋势。在 2080—2100 年 SSP245 情景下,适生区面积增加,而在 SSP370 和 SSP585 情景下,总面积减少。在 2080—2100 年



阴影部分为 95% 置信区间.

图 4 3 种柃属植物潜在适生区重要环境因子响应曲线

SSP245 情景下, 高适生区面积最大, 为 $1.01 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要集中于湖北、湖南和东部沿海地区. 此外, 西北部地区包括甘肃、新疆、西藏等地也见分布, 但较为零散.

此外, 当前细枝柃的适生区分布格局与柃木相似, 主要集中于华东、华中、华南等地区. 细枝柃的适生区总面积约为 $1.79 \times 10^6 \text{ km}^2$, 其中高适生区占 32.3%, 中适生区占 33.6%, 低适生区占 34.1%(表 3). 在未来气候情景下, 细枝柃的潜在适生区总面积呈增大趋势, 分布呈现南北分化, 集中于西南、西北和东北地区, 主要包括西藏、四川、云南、黑龙江、内蒙古等地. 高适生区在 2080—2100 年 SSP585 情景下达到最大, 为 $1.25 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 5).

表 3 3 种桉属植物在当前及未来气候情景下的潜在适生区面积

km²

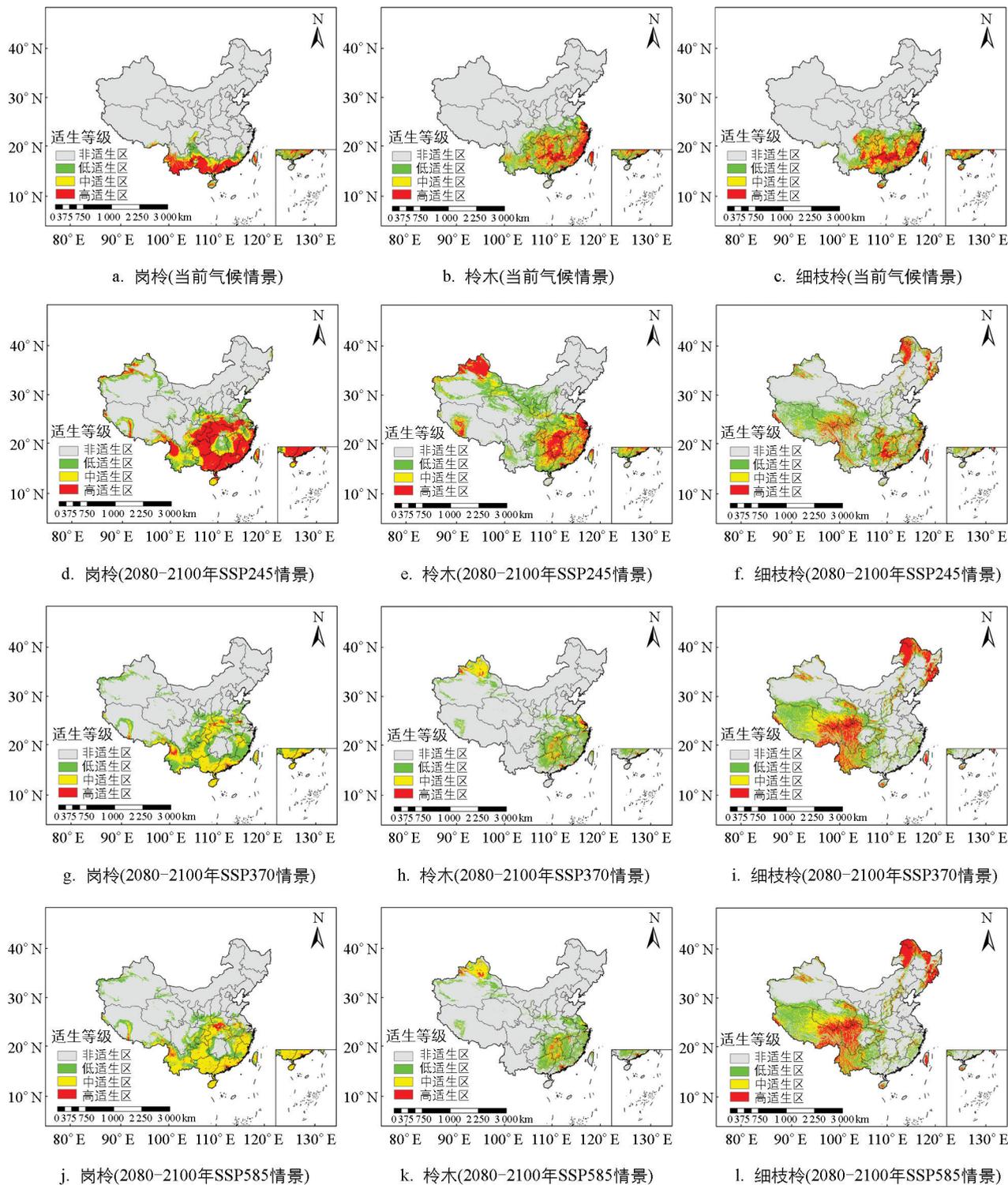
树种	适生等级	当前气候情景	2080—2100 年气候情景		
			SSP245	SSP370	SSP585
岗桉	非适生区	8.46×10^6	6.17×10^6	7.07×10^6	6.95×10^6
	低适生区	2.66×10^5	1.09×10^6	1.39×10^6	1.15×10^6
	中适生区	2.25×10^5	8.82×10^5	1.04×10^6	1.36×10^6
	高适生区	4.62×10^5	1.47×10^6	1.03×10^5	1.42×10^5
	适生区面积	9.54×10^5	3.43×10^6	2.53×10^6	2.65×10^6
桉木	非适生区	7.60×10^6	5.67×10^6	7.90×10^6	7.90×10^6
	低适生区	8.15×10^5	1.86×10^6	1.13×10^6	1.15×10^6
	中适生区	5.74×10^5	1.06×10^6	4.53×10^5	4.25×10^5
	高适生区	6.08×10^5	1.01×10^6	1.17×10^5	1.19×10^5
	适生区面积	2.00×10^6	3.93×10^6	1.70×10^6	1.70×10^6
细枝桉	非适生区	7.81×10^6	5.87×10^6	5.34×10^6	5.28×10^6
	低适生区	6.09×10^5	2.04×10^6	1.83×10^6	1.84×10^6
	中适生区	6.00×10^5	9.00×10^5	1.21×10^6	1.23×10^6
	高适生区	5.77×10^5	7.97×10^5	1.22×10^6	1.25×10^6
	适生区面积	1.79×10^6	3.73×10^6	4.26×10^6	4.32×10^6

2.4 物种的潜在适生区在未来气候情景下的空间格局变化

对比分析了 2080—2100 年 SSP245, SSP370, SSP585 气候情景下 3 种桉属植物的潜在适生区空间格局与当前适生区(图 6), 结果显示, 未来这 3 种气候情景下, 岗桉的潜在适生区总面积大幅扩增, 收缩面积极少(表 4). 其中, 在 2080—2100 年 SSP245 情景下, 扩张面积最大, 扩张率达 72.2%, 主要向北转移, 但转移距离较短. 当前气候适宜分布区保留率为 27.6%, 收缩率仅为 0.1%(图 6、表 4). 在 2080—2100 年 SSP245 情景下, 桉木的适生区扩张率达 52.4%, 主要向西北部地区转移, 扩张距离较远(图 6), 其适生区保留率为 41.1%, 高于岗桉. 在 2080—2100 年的 SSP370 和 SSP585 气候情景下, 桉木的扩张幅度明显减小, 收缩面积增加, 尤其是西南地区的分布面积逐渐减少. 气候变化对细枝桉影响显著, 其潜在适生区在 3 种未来气候情景下均明显扩张, 主要向西部和东北部转移, 其中在 2080—2100 年 SSP585 情景下, 扩张率达到 65.9%. 细枝桉的当前适生区保留率较低, 收缩率较高, 主要发生在华东和华南地区(图 6、表 4).

表 4 3 种桉属植物未来气候情景下潜在适生区变化面积

树种	2080—2100 年	面积/km ²			变化率/%		
		扩张区	保留区	收缩区	扩张区	保留区	收缩区
岗桉	SSP245	2.5×10^6	9.5×10^5	4.0×10^3	72.2	27.6	0.1
	SSP370	1.6×10^6	9.5×10^5	8.6×10^3	62.4	37.2	0.3
	SSP585	1.7×10^6	9.4×10^5	1.5×10^4	64.2	35.3	0.6
桉木	SSP245	2.2×10^6	1.7×10^6	2.7×10^5	52.4	41.1	6.4
	SSP370	6.4×10^5	1.1×10^6	9.4×10^5	24.2	40.2	35.6
	SSP585	6.7×10^5	1.0×10^6	9.7×10^5	25.0	38.8	36.3
细枝桉	SSP245	2.5×10^6	1.3×10^6	5.2×10^5	58.0	29.8	12.2
	SSP370	3.5×10^6	7.5×10^5	2.0×10^6	55.8	11.9	32.4
	SSP585	3.5×10^6	7.8×10^5	1.0×10^6	65.9	14.8	19.3



审图号: GS(2020)4619 号.

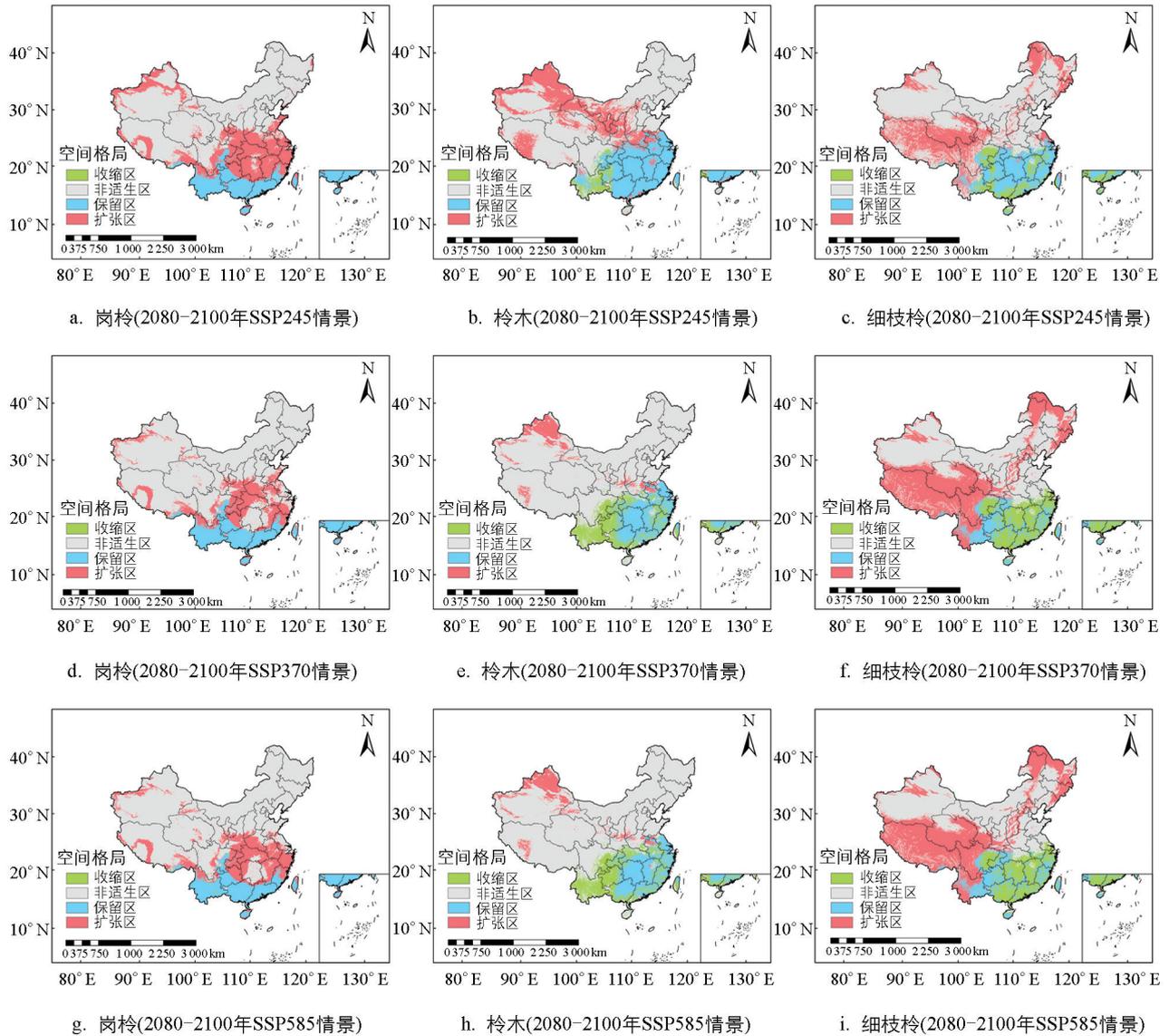
图 5 3 种枞属植物在当前及未来气候情景下的潜在适生区分布

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 主导 3 种枞属植物分布的关键环境因子

物种的潜在分布区由多种环境因子共同作用, 也反映了植物对气候变化的响应^[34]. 本研究结果表



审图号: GS(2020)4619号.

图 6 3种桧属植物在当前及未来气候情景下的潜在适生区变化格局

明, 3种桧属植物的主导环境因子是气候变量, 其中温度和降水贡献率最高. 具体而言, 岗桧和细枝桧的分布格局受最干月降水量的影响, 这与前人对濒危植物闽楠分布的研究结果一致^[36]. 当最干月降水量在 50~150 mm 时, 岗桧与细枝桧的适生概率较大, 且细枝桧的水分需求比岗桧更高, 当前气候条件下的栖息地分布图证实了这一结果. 细枝桧主要分布于华中和东南地区, 即使在最干月也有充足的降水, 而岗桧则主要分布在西南地区, 抗旱性较强, 可能与东南季风沿海登陆后水汽在向内陆输送过程中逐渐损耗有关^[41]. 此外, 岗桧和细枝桧为喜光植物, 耐阴性较差, 常见于日照充足的山坡谷地或林下开阔处^[42-43]. 根据响应曲线结果, 即使在最冷月, 岗桧和细枝桧的适宜生长温度也在 25 °C 以上. 因此, 温度对桧木分布的影响更大, 平均气温日较差越小, 桧木的适生概率越高. 树木的径向生长主要发生在夜间, 较高的夜间温度使树木保持较高的代谢率, 能积累足够的能量和资源来促进树木生长. 较低的昼夜温差还能增加叶片的呼吸作用, 提升光合作用速率^[44-45]. 此外, 桧木的水分需求高于岗桧和细枝桧, 因此最湿季降雨量是影响其分布的重要环境因子之一. 高大海等^[46]的研究发现, 桧木抗旱能力较差, 水分

充足的地区更适宜其生长。

研究表明, 海拔、坡度、坡向等地形因素以及土壤理化性质对植物的生存与分布有显著影响^[7, 47-48]。本研究发现, 尽管地形因子和土壤因子未在岗柃和柃木的分布中起主导作用, 但土壤 pH 值对细枝柃的分布有一定调控作用。具体而言, 细枝柃在土壤 pH 值为 5~7 时生长良好。一般在碱性条件下, 土壤中的 NH_4^+ 会转化为 NH_3 并挥发, 进而降低有机质和氮的有效性。因此, 常绿和落叶灌木更适宜生长在酸性土壤中^[49], 而在弱酸性条件下, 植物根系对土壤养分的利用率最高^[50-52]。由此可见, 土壤和地形环境因子通过直接或间接方式对植物的生长产生重要影响。

3.1.2 3 种柃属植物潜在适生区在未来气候情景下的变化格局

在 2080—2100 年不同气候胁迫情景下, 3 种柃属植物的分布格局发生变化, 并呈现向北迁移的趋势。在 2080—2100 年 SSP245 情景下, 岗柃与柃木的适生区面积最大, 而细枝柃在 SSP585 情景下适生区面积最大。陆生植物的分布前沿主要受低温制约^[53]。从 2080—2100 年 SSP245 (低胁迫情景, 2.97 °C) 到 SSP585 (高胁迫情景, 5.62 °C), 随着未来中国地区温度持续上升^[54], 温度限制的解除将促进柃属植物向高纬度地区扩展。其中, 岗柃在 3 种未来气候情景下的保留率和扩张率最高, 适生区收缩率不到 1%。此外, 高大海等^[46]和李世友等^[55]的研究发现, 岗柃具有较强的抗旱和阻燃能力, 抗逆性强, 能够有效抵御不利环境变化, 可能成为高度胁迫条件下的受益者。此外, 柃木受气候变化影响显著, 未来可能向中国西北地区迁移, 而现有的西南地区栖息地将大面积收缩。You 等^[54]在对 CMIP6 模型年平均温度变化的分析中表明, 中国西北部和青藏高原未来温度上升更快, 符合柃木生长发育的温度要求。然而, 西北地区属于干旱或半干旱区, 2080—2100 年在 SSP370 和 SSP585 气候情景下, 温度大幅上升将加剧环境退化和荒漠化, 不利于柃木生存^[56]。此外, 我国西南地区多山地高原, 在温度升高和雪线上移的影响下^[34], 低海拔地区常形成干热河谷^[57], 即高海拔地区气候寒冷, 而海拔较低的山谷地区气候干热。研究表明, 柃木的抗旱能力相对较差^[46], 因此在西南地区生存困难, 适生区面积减少。IPCC 报告指出, 气候变化将加剧水循环, 引发更大的降水变化, 并导致海平面进一步抬升, 我国沿海地区将面临更多的强降雨和洪水^[2-3]。然而, 细枝柃的水分需求较低, 最干月降水量仅需 50 mm 便能达到最佳生长状态。过量水分可能影响植株地下根系的生长, 阻碍地下矿质元素的吸收和地上部分的营养供应^[58]。因此, 本研究的预测模型显示, 细枝柃的潜在适生区在未来将向西部和东北部两极化扩张, 而东部沿海地区的栖息地急剧收缩。尽管在低浓度排放情景下 (2080—2100 年 SSP245 气候情景), 3 种柃属植物可能适应一定范围的温度和降水, 其潜在适生区面积也将扩大。然而, 在高浓度排放情景下 (2080—2100 年 SSP585 气候情景), 持续上升的温度可能超过柃属植物的生态耐受极限^[59], 对其生存造成不利影响, 压缩生存空间。

3.1.3 MaxEnt 模型拟合结果的可靠性及展望

物种分布模型 (SDM_S) 的可靠性取决于以下几个方面^[36]。首先, 取决于模型的选择及参数优化。本研究采用了 MaxEnt 模型来预测 3 种柃属植物的潜在适生区。MaxEnt 模型源于统计力学, 通过找到最大熵的概率分布来估计物种的概率分布。Phillips 等^[19]认为, MaxEnt 能够处理连续变量和分类变量, 并考虑不同变量之间的相互作用, 从而解释环境变量与物种适宜性之间的关系; 此外, MaxEnt 模型的概率分布依赖于目标物种的现有分布点, 这在很大程度上避免了抽样偏差。其次, AUC 作为模型精度评价指标, 其值

通过调试模型参数获得, 同样影响模型的可靠性. 本研究建立了适用于 3 种桉属植物的最优预测模型, 其 AUC 值均大于 0.9, 表明模型预测精度较高. 最后, 环境因子的数量、种类及精度也对模型的准确性至关重要. 本研究选取了 19 个生物气候因子、3 个地形因子和 6 个土壤因子, 共计 28 个环境因子, 预测变量范围广泛, 分辨率为 $5 \times 5 \text{ km}^2$, 精度较高. 因此, 本研究对 3 种桉属植物潜在适生区的预测具有较高的可靠性和可信度. 然而, 即使模型已考虑物种的全部生态位需求, 预测的潜在适生区通常仍会超过其实际分布^[19]. 实际的物种地理分布受到多种因素的制约, 如扩散地理限制, 生物间相互作用(如捕食、竞争等)和人类活动^[60-61]. 其中, 人类活动对物种的生存和生长影响日益深远. 例如, 曹倩等^[62]对青藏高原特有植物祁连山牙菜进行物种分布建模时, 量化了人类活动的影响, 包括土地利用、人口密度、建筑设施、道路和夜间灯光等因素. 此外, 森林砍伐、放牧和焚烧等人为干扰因素也会导致植物的实际地理分布偏离预测. 因此, 未来研究若将更为全面的生物和非生物因素纳入模型中, 可能会提高预测的准确性. 尽管如此, 本研究准确预测了未来气候变化条件下岗桉、桉木和细枝桉在中国潜在适生区的空间格局变化, 为森林资源管理及蜜源植物培育等提供了理论依据.

3.2 结论

气候是影响 3 种桉属植物潜在适生区的主要因素. 岗桉和细枝桉的分布主要受最干月降水量驱动, 而桉木则主要受平均气温日较差的影响. 在当前的气候条件下, 岗桉主要分布在华南地区, 尤其是西南部; 桉木和细枝桉主要分布在华中和东南沿海地区. 在 2080—2100 年 3 种气候情景下, 3 种桉属植物均呈现向北迁移的趋势, 其中, SSP245 情景下, 岗桉和桉木的潜在适生区扩张最大, 而在 SSP585 情景下, 细枝桉的适生区扩张最大. 岗桉在未来长期内具有最高的稳定性, 可能成为 3 种桉属植物中受益最大者.

参考文献:

- [1] 高文强, 王小菲, 江泽平, 等. 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.
- [2] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PÖRTNER H O, et al. Global Warming of 1.5 C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5 C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [3] ZHANG W X, FURTADO K, WU P L, et al. Increasing Precipitation Variability on Daily-to-Multiyear Time Scales in a Warmer World [J]. Science Advances, 2021, 7(31): eabf8021.
- [4] TILMAN D, LEHMAN C L, THOMSON K T. Plant Diversity and Ecosystem Productivity: Theoretical Considerations [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(5): 1857-1861.
- [5] HECTOR A, HAUTIER Y, SANER P, et al. General Stabilizing Effects of Plant Diversity on Grassland Productivity through Population Asynchrony and Overyielding [J]. Ecology, 2010, 91(8): 2213-2220.
- [6] VEČERA M, DIVÍŠEK J, LENOIR J, et al. Alpha Diversity of Vascular Plants in European Forests [J]. Journal of Biogeography, 2019, 46(9): 1919-1935.
- [7] LUO W X, ZHANG C Y, ZHAO X H, et al. Understanding Patterns and Potential Drivers of Forest Diversity in Northeastern China Using Machine-Learning Algorithms [J]. Journal of Vegetation Science, 2021, 32(2): e13022.
- [8] LIU J M, XU Y Y, SUN C W, et al. Distinct Ecological Habits and Habitat Responses to Future Climate Change in Three East and Southeast Asian Sapindus Species [J]. Forest Ecology and Management, 2022, 507: 119982.

- [9] CORLETT R T, WESTCOTT D A. Will Plant Movements Keep up with Climate Change? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(8): 482-488.
- [10] 唐兴港, 袁颖丹, 张金池. 气候变化对杉木适生区和生态位的影响 [J]. *植物研究*, 2022, 42(1): 151-160.
- [11] MARTIN Y, VAN DYCK H, DENDONCKER N, et al. Testing Instead of Assuming the Importance of Land Use Change Scenarios to Model Species Distributions under Climate Change [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(11): 1204-1216.
- [12] ELITH J, LEATHWICK J R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction across Space and Time [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [13] LEE-YAW J A, KHAROUBA H M, BONTRAGER M, et al. A Synthesis of Transplant Experiments and Ecological Niche Models Suggests that Range Limits are often Niche Limits [J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(6): 710-722.
- [14] ALVARADO-SERRANO D F, KNOWLES L L. Ecological Niche Models in Phylogeographic Studies: Applications, Advances and Precautions [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2014, 14(2): 233-248.
- [15] HASSANVAND A. Potential Distribution of Persian Gazelle (*Gazella subgutturosa subgutturosa*) in Bamoo National Park, Shiraz, Iran: a presence-Only Model Approach [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(1): 305-319.
- [16] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(11): 915-927.
- [17] FLESSNER B, HENRY M C, GREEN J. Species Distribution Modeling of American Beech (*Fagus grandifolia*) Distribution in Southwest Ohio [J]. *International Journal of Applied Geospatial Research*, 2017, 8(3): 16-36.
- [18] MANEL S, WILLIAMS H C, ORMEROD S J. Evaluating Presence - Absence Models in Ecology: The Need to Account for Prevalence [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(5): 921-931.
- [19] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [20] WAN J Z, WANG C J, YU F H. Effects of Occurrence Record Number, Environmental Variable Number, and Spatial Scales on MaxEnt Distribution Modelling for Invasive Plants [J]. *Biologia*, 2019, 74(7): 757-766.
- [21] 王艳君, 高泰, 石娟. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(9): 59-69.
- [22] 王焱, 包志毅. 我国柃属植物种质资源及其园林应用前景 [J]. *林业科学*, 2007, 43(8): 118-122.
- [23] 马进, 王小德. 柃木属 6 种树种植物光能利用特性及耐荫性研究 [J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(4): 13-15.
- [24] 王茜, 杨思琴, 秦菲, 等. 柃木属一新变型——粉花细齿叶柃 [J]. *西北植物学报*, 2019, 39(11): 2091-2092.
- [25] 申国柱, 王跃华. 我国柃属植物的分布与开发利用 [J]. *北方园艺*, 2007(8): 135-136.
- [26] 高大海, 陈斌, 贺位忠, 等. 舟山海岛柃木的分布和生境群落学初步研究 [J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(6): 32-36.
- [27] 陈斌. 柃木的生态高效栽培技术 [J]. *浙江林业*, 2021(12): 30.
- [28] 徐孝方, 梁训义, 许叶君, 等. 柃木的组织培养与快速繁殖技术 [J]. *浙江农业学报*, 2010, 22(2): 202-206.
- [29] BROWN J L. SDMtoolbox: A Python-Based GIS Toolkit for Landscape Genetic, Biogeographic and Species Distribution Model Analyses [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [30] GUO Q, LIU X W, TANG H Y, et al. Prediction and Correction of in Situ Summer Precipitation in Southwest China Based on a Downscaling Method with the BCC_CSM [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(3):

1145-1159.

- [31] 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.
- [32] SANG Y H, REN H L, SHI X L, et al. Improvement of Soil Moisture Simulation in Eurasia by the Beijing Climate Center Climate System Model from CMIP5 to CMIP6 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(2): 237-252.
- [33] ZHAO Y X, XIAO D P, BAI H Z, et al. Future Projection for Climate Suitability of Summer Maize in the North China Plain [J]. Agriculture, 2022, 12(3): 348.
- [34] SANCZUK P, DE LOMBAERDE E, HAESSEN S, et al. Species Distribution Models and a 60-Year-Old Transplant Experiment Reveal Inhibited Forest Plant Range Shifts under Climate Change [J]. Journal of Biogeography, 2022, 49(3): 537-550.
- [35] 周炳江, 王玉洁, 马长乐, 等. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4485-4493.
- [36] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测 [J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [37] 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, 5(11): 1198-1205.
- [38] XIAO J, EZIZ A, ZHANG H, et al. Responses of Four Dominant Dryland Plant Species to Climate Change in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(23): 13596-13607.
- [39] 张春华, 雷晨雨, 王储, 等. 珍贵用材树种红椿 4 个变种栽培的潜在气候适生区预测 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 294-301.
- [40] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 496-502.
- [41] LI M, LI C, JIANG Z H, et al. Deciphering China's Complex Pattern of Summer Precipitation Trends [J]. Earth's Future, 2022, 10(9): e2022EF002797.
- [42] 曾冠文, 付晓萍, 牛志刚, 等. 6 种岭南乡土灌木耐阴性比较研究 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(34): 12142-12143, 12194.
- [43] 裘宝林, 钟国荣. 浙江柃木属 *Eurya thunb.* 植物的研究 [J]. 浙江林学院学报, 1987, 4(1): 17-23.
- [44] WHITEHEAD D, GRIFFIN K L, TURNBULL M H, et al. Response of Total Night-Time Respiration to Differences in Total Daily Photosynthesis for Leaves in a *Quercus rubra* L. Canopy: Implications for Modelling Canopy CO₂ Exchange [J]. Global Change Biology, 2004, 10(6): 925-938.
- [45] ZHANG X L, MANZANEDO R D, LV P C, et al. Reduced Diurnal Temperature Range Mitigates Drought Impacts on Larch Tree Growth in North China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 848: 157808.
- [46] 高大海, 陈斌, 贺位忠. 柃木等 5 种地被植物的抗旱性研究 [J]. 浙江林业科技, 2013, 33(1): 49-51.
- [47] TANG F H, QUAN W X, LI C C, et al. Effects of Small Gaps on the Relationship among Soil Properties, Topography, and Plant Species in Subtropical Rhododendron Secondary Forest, Southwest China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(11): 1919.
- [48] XIE T, CUI B S, LI S Z, et al. Topography Regulates Edaphic Suitability for Seedling Establishment Associated with

- Tidal Elevation in Coastal Salt Marshes [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1258-1266.
- [49] NORDIN A, SCHMIDT I K, SHAVER G R. Nitrogen Uptake by Arctic Soil Microbes and Plants in Relation to Soil Nitrogen Supply [J]. *Ecology*, 2004, 85(4): 955-962.
- [50] JAMES J J, TILLER R L, RICHARDS J H. Multiple Resources Limit Plant Growth and Function in a Saline-Alkaline Desert Community [J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(1): 113-126.
- [51] CHENG J S, LAI Y Q, TIAN Y S, et al. Impact of Multiple Soil Nutrients on Distribution Patterns of Shrubs in an Arid Valley, in Southwest China [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2014, 46(5): 1621-1629.
- [52] DINGAAN M N V, TSUBO M, WALKER S, et al. Soil Chemical Properties and Plant Species Diversity along a Rain-fall Gradient in Semi-Arid Grassland of South Africa [J]. *Plant Ecology and Evolution*, 2017, 150(1): 35-44.
- [53] SAKAI A, MALLA S B. Winter Hardiness of Tree Species at High Altitudes in the East Himalaya, Nepal [J]. *Ecology*, 1981, 62(5): 1288-1298.
- [54] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature Dataset of CMIP6 Models over China: Evaluation, Trend and Uncertainty [J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57(1): 17-35.
- [55] 李世友, 马爱丽, 王少名, 等. 14 种常绿木本植物活枝叶在防火期的易燃性比较 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 601-606.
- [56] WANG Y J, ZHOU B T, QIN D H, et al. Changes in Mean and Extreme Temperature and Precipitation over the Arid Region of NorthWestern China: Observation and Projection [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 289-305.
- [57] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 等. 云南干热河谷植被与环境研究进展 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4): 462-474.
- [58] 李成林, MIENANDI N J M, ANANE G O, 等. 棉花耐涝害的生理生化特征与分子机制研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(4): 16-19.
- [59] GARCÍA-ROBLEDO C, BAER C S. Positive Genetic Covariance and Limited Thermal Tolerance Constrain Tropical Insect Responses to Global Warming [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2021, 34(9): 1432-1446.
- [60] SOBERON J, PETERSON A T. Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas [J]. *Biodiversity Informatics*, 2005, 2: 1-10.
- [61] BARVE N, BARVE V, JIMÉNEZ-VALVERDE A, et al. The Crucial Role of the Accessible Area in Ecological Niche Modeling and Species Distribution Modeling [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(11): 1810-1819.
- [62] 曹倩, 高庆波, 郭万军, 等. 基于 MaxEnt 模拟人类活动与环境因子对青藏高原特有植物祁连獐牙菜潜在分布的影响 [J]. *植物科学学报*, 2021, 39(1): 22-31.