

未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析

关心怡, 石慰, 曹坤芳*

(广西森林生态与保育重点实验室培育基地, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 为了解麻栎(*Quercus acutissima*)的潜在分布特征及其对未来气候的响应, 运用最大熵模型(Maxent)模拟在当前气候条件下麻栎的潜在分布格局, 预测未来不同温室气体排放情景下的格局变化, 并分析影响其分布的主导因子。结果表明, Maxent模型有较好的预测能力, AUC值大于0.95。当前气候条件下, 麻栎广泛分布于我国南方大部分地区和陕西、河南、山西、甘肃、北京、辽宁等北方省市。此外, 在日本、朝鲜半岛、老挝、越南、缅甸、尼泊尔、不丹、印度、巴基斯坦等国家和地区亦存在不同程度和范围的麻栎适生区域, 麻栎总适生区域面积达 $11.57 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。在RCP2.6和RCP8.5情景下, 麻栎适宜分布区域向北和西南方向扩展, 新增适生区面积为 $(2.49 \sim 3.02) \times 10^5 \text{ km}^2$; 适生区域丧失主要集中在广西南部、广东南部和缅甸东部等地。影响其分布的主导气候因子为最暖季降水量、等温性、最干季均温、最冷月最低温, 因子贡献率分别为54.2%、13.7%、8.8%和7.8%。这为麻栎的栽培和保育研究提供了参考依据。

关键词: Maxent模型; 麻栎; 气候因子; 地理分布; 适生区

doi: 10.11926/jtsb.3898

Effect of Climate Change in Future on Geographical Distribution of Widespread *Quercus acutissima* and Analysis of Dominant Climatic Factors

GUAN Xin-yi, SHI Wei, CAO Kun-fang*

(Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources; College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To understand the potential distribution characteristics of *Quercus acutissima* and its response to future climatic change, the Maxent model was used to simulate potential distribution under present climatic condition, and predict changes in its distribution under different greenhouse gas emission scenarios in future, and major factors affecting its distribution were analyzed. The results showed that Maxent had relatively good predicting ability for the distribution of *Q. acutissima* with AUC value more than 0.95. Under the current climatic condition, *Q. acutissima* could be widely distributed in southern China and some provinces of northern China, such as Shannxi, Henan, Shanxi, Gansu, Beijing and Liaoning, as well as Japan, Korea peninsula, Laos, Vietnam, Myanmar, Nepal, Bhutan, India, Pakistan, with a total suitable area about $11.57 \times 10^5 \text{ km}^2$. Under future climate scenarios of RCP2.6 and RCP8.5, the suitable area of *Q. acutissima* predicted by Maxent model will expand northward and southwestward, increasing ca. $(2.49 \sim 3.02) \times 10^5 \text{ km}^2$; the loss of suitable area mainly occurred in southern Guangdong and Guangxi Provinces and eastern Myanmar. The dominant factors influencing the

收稿日期: 2018-02-28

接受日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470469); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2017041)资助

The work was supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 31470469), and the Innovation Project for Graduate Education in Guangxi (Grant No. YCSW2017041).

作者简介: 关心怡(1993~), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail: guanxinyi1993@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: kunfangcao@gxu.edu.cn

distribution of *Q. acutissima* were precipitation of the warmest quarter, isothermality, minimum temperature of the coldest month, mean temperature of the driest quarter, with contribution rates of 54.2%, 13.7%, 8.8%, 7.8%, respectively. These would provide a reference for studying the cultivation and conservation of *Q. acutissima*.

Key words: Maxent; *Quercus acutissima*; Climatic factor; Geographical distribution; Suitable distribution area

在全球或区域大尺度上,气候因子是决定物种分布范围的最主要因素,气候变暖对物种的分布格局和生理生态特征会产生显著影响^[1]。随着现阶段工业化进程加快,温室气体排放量增多,极端气候出现频率增加,气候变化对生态系统的影响日益加剧。政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出,未来全球气候变暖仍将继续,依据不同的温室气体排放情景,到 21 世纪末全球平均气温将上升 0.3℃~4.8℃^[2]。随着全球气候变化,生物的分布格局也将发生改变^[3]。因此,预测气候变化对物种潜在分布格局的影响是当前生态学和生物地理学研究的热点之一^[4]。

利用物种分布模型对目标物种进行模拟和预测,并分析其在气候变化条件下分布格局的变化趋势和主要影响因子,是现阶段为林地经营管理、生物防治和保育提出对策的极为有效的方法之一^[5-7]。其核心就是运用物种分布数据和气候变量对物种的生态位要求和潜在分布进行探索,现已广泛应用于生态学、生物地理等研究中^[7]。目前已经有许多研究运用不同的物种分布模型,在大尺度上预测未来气候变化下物种的分布格局的变化^[5-11],包括 GARP 模型^[12]、BIOCLIM 模型^[13]和 Maxent 模型^[14]等。其中由 Phillips 等开发的熵模型(maximum entropy model, Maxent)具有模型准确度高、稳定性好、操作界面友好等特点,是迄今为止应用最广泛的物种分布模型之一^[15-16]。模型仅依赖物种的已知分布点和气候数据,通过运用多种函数类型组合对两者之间的关系进行拟合,找出物种概率分布的最大熵,从而预测物种分布范围^[17]。

麻栎(*Quercus acutissima*)又名栎树、橡栎树,是壳斗科(Fagaceae)栎属落叶乔木,具有木质坚硬,耐腐蚀,种子淀粉含量高特性,树皮和壳斗可提取栲胶,麻栎人工林投资利润高且风险较小,是我国暖温带和亚热带地区重要的经济用材及造林树种之一^[18-19]。因此,麻栎具有重要生态功能和经济价值,目前已对其生理生态特性、人工林养分利用、林分空间结构和生物多样性等方面进行了研究^[20-22]。麻

栎在我国的分布范围极为广泛,涵盖中国第一至第三阶梯,集中分布于第二阶梯的云贵高原、秦岭巴山区,散生于第三阶梯的山地丘陵区域^[23]。对于麻栎的地理分布与气候的关系,李迎超^[24]等通过外业调查等方式,搜集并分析麻栎的分布区信息和规律,认为麻栎分布区涵盖暖温带、北亚热带和热带 3 个气候带,主要分布于暖温带南部和北亚热带地区,地形地貌主要以中低山、丘陵为主;张兴旺等^[23]基于 Bioclim 模型对麻栎的潜在分布格局和主导气候因子进行分析,模型模拟效果较好。然而,在未来气候变化的大背景下,麻栎的地理分布格局将如何变化仍未见报道,这些变化将直接或间接地影响到麻栎的成林范围和速率、经济价值,而关于这些影响的相关研究和相应的生态对策亦不多见。

因此,本研究通过广泛收集麻栎的实际分布数据,运用 Maxent 模型和 Arcgis 软件,试图模拟麻栎在当前气候条件下的潜在分布范围,分析影响其潜在分布的气候因子和阈值;选取不同气候变化情景,分析未来气候变化对麻栎的分布范围和空间格局的影响,为气候变化大背景下麻栎林的种植与经营提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 数据收集和处理

麻栎分布数据主要通过全球生物多样性信息网络(Global Information Biodiversity Facility, GBIF, <http://www.gbif.org/>)和中国数字标本馆(Chinese Virtual Herbarium, CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)数据库获取。在 GBIF 中下载麻栎分布数据,去除无准确经纬度记录的无效点;在 CVH 数据库中搜索麻栎的标本数据,去除分布无县级以上地点记录、标本采样重复记录以及栽培种分布点。若标本记录缺少准确地理坐标,使用 Google Earth 确定该标本分布点的经纬度信息。去除重复数据后,为减少集群效应可能造成的模型过度拟合,在 Arcgis 10.2 中生成 30"×30"的网格,对同一网格内的多条分布记录,仅取距网格中心最近的 1 个点^[25]。

本研究所需的气候数据分为当前时段的气候数据及未来气候情景下的气候数据, 均下载自世界气候数据库(Worldclim, <http://www.worldclim.org>), 共含 19 个综合性气候指标(表 1), 记为 bio1~bio19。数据分辨率均为 30" (1 km²), 是通过插值法将 1950–2000 年全球各地气象站记录的逐月气象信息而生成的全球气候栅格数据。未来气候数据采用新一代温室气体排放情景, 即典型浓度目标(representative concentration pathways, RCP)

情景^[26], 对未来可能的气候变化进行描述。RCP 情景包括 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 共 4 种, 分别代表强迫辐射值上升 2.6、4.5、6.0 和 8.5 W m⁻², 且 CO₂ 当量浓度上升至相应浓度时全球气候的变化。本研究仅选择 RCP2.6 和 RCP8.5 情景(以此代表低和高 CO₂ 浓度排放情景), 由中国国家气候中心开发的 BCC-CSM1-1 模型生成的 2050 年代和 2070 年代时全球气候变化可能结果的栅格图层。

表 1 用于模拟麻栎适生区域的气候因子及各图层对模型贡献率

Table 1 Climatic factors used for simulating suitable area of *Quercus acutissima* and percent contribution of each layer

代码 Code	气候因子 Climatic factor	贡献率 Contribution rate /%
Bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter	54.20
Bio3	等温性 Isothermality	13.70
Bio9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	8.80
Bio6	最冷月最低温 Minimum temperature of the coldest month	7.80
Bio4	温度季节性变化 Temperature seasonality	4.90
Bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	2.80
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	2.20
Bio1	年均温 Annual mean temperature	1.40
Bio5	最暖月最高温 Maximum temperature of the warmest month	0.90
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	0.80
Bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter	0.60
Bio10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter	0.40
Bio15	降水量季节性变异系数 Variation coefficient of precipitation seasonality	0.40
Bio7	温度年变化 Temperature annual range	0.30
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal range	0.20
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	0.20
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	0.20
Bio12	年降水量 Annual precipitation	0.10
Bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter	0

1.2 Maxent 模型

Maxent 模型是由 Philips 等以最大熵理论为基础开发的模型, 2004 年该模型被应用到物种分布的模拟中^[14]。模型的主要原理是根据已知的物种分布点信息(物种分布的经纬度坐标)和气候图层(通常为研究区域的温度、降水等气象指标), 探索物种已知分布区的气候特征与研究区域的非随机关系, 找到熵最大的概率分布作为最优分布, 建立预测模型, 进而模拟物种的地理分布^[17]。相较其他物种分布模型, Maxent 模型只需要物种的当前存在数据(present-only data)而不需要不存在数据进行建模, 输出结果为物种存在概率, 并可以根据概率值高低可以判断在某个区域存在的可能性大小。

1.3 模型拟合和精度验证

选取 75% 的麻栎分布数据作为训练集, 25% 作

为测试集, 将其与当前时段气候数据一起输入 Maxent 模型建立物种气候关联函数, 并输出当前麻栎潜在分布区域的模拟结果。采用 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)下面积(area under the curve, AUC)作为模型拟合精度的评价指标, 由 Maxent 模型自动生成。ROC 曲线以 1-特异度为横坐标, 灵敏度为纵坐标, 曲线下面积为 AUC 值, 其变化范围为 0~1, 当 AUC>0.9 表明模型表现出色^[27]。采用刀切法(Jackknife)模块来评价各气候因子对模型的贡献, 筛选影响麻栎地理分布格局的主导气候因子。最后基于建立的物种气候关联函数, 导入未来气候数据, 从而预测未来气候条件下麻栎潜在分布格局。

将模型模拟所得的结果导入 Arcgis, 选用自然间断点分级法(Jenks)对适生区域进行重分类(reclass), 将物种出现概率小于 0.3 的地区设定为该

物种的不适宜分布区, 出现概率在 0.3~0.5 的为低适宜分布区, 出现概率大于 0.5 的为适宜分布区, 并计算各区域的面积。为了进一步分析在不同气候条件下物种分布范围的变化, 运用基于 python 的 GIS 工具包 SDMtoolbox^[28] 计算当前和未来气候条件下物种分布范围的改变情况。

2 结果和分析

2.1 模拟结果的可靠性

本研究基于麻栎实际分布数据和 19 个综合性气候指标, 运用最大熵模型进行建模。结果表明, 最大熵模型的模拟结果很好, 训练集和验证集的 AUC 值均大于 0.95, 说明模型预测效果极为准确, 可用于麻栎在亚洲地区分布情况与气候关系的研究。

2.2 影响麻栎分布的主要气候因子

Maxent 模型通过刀切法得出各气候因子对模拟麻栎分布的贡献率, 从而找出主要的气候因子。结果表明(表 1), 按贡献率从高到低排列, 影响麻栎地理分布的前 4 位气候因子依次为: 最暖季降水量(bio18)、等温性(bio3)、最干季均温(bio9)、最冷月最低温(bio6), 因子贡献率分别为 54.2%、13.7%、8.8% 和 7.8%, 累计贡献率高达 84.5%。进一步分析气象因子对预测结果的响应曲线, 各主导气候因子

的阈值(分布概率 > 0.3), 可知麻栎适宜分布在最暖季降水量为 380~940 mm, 等温性为 21.6~50.5, 年均温为 9.23°C~20.5°C 的区域。

2.3 当前及未来气候情景下麻栎的地理分布格局

当前气候条件下, 麻栎广泛分布于中国南部和北部部分地区, 包括海南、台湾、云南、贵州、广西、广东、江西、浙江、湖南、湖北、四川、陕西、河南、山西、甘肃、北京, 辽宁等省市, 亚洲其他国家如日本、韩国、朝鲜、老挝、越南、缅甸、尼泊尔、不丹、印度、巴基斯坦等也存在适宜分布区域(图 1)。以上区域覆盖了 95% 以上的麻栎实际地理分布点, 表明模拟的麻栎潜在地理分布与实际分布非常吻合。分析麻栎在东亚、东南亚和南亚地区的分布格局表明, 麻栎的低适生区域面积为 $3.85 \times 10^5 \text{ km}^2$, 适生区域面积为 $7.72 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

在未来气候变化情景下, 麻栎适生区域面积总体呈增加趋势, 其适宜分布界线向北和西南方向扩展, 新增的适生区域面积为 $(2.49 \sim 3.02) \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占总适生区域面积的 18%~22%; 适生区域丧失面积较少, 主要集中在广西南部、广东南部以及缅甸东部等地; 不同 RCP 情景和预测时段下模型的模拟结果差异较小, 说明不同气候情景和预测时段下, 麻栎适生区域变化较小(图 2, 表 2)。

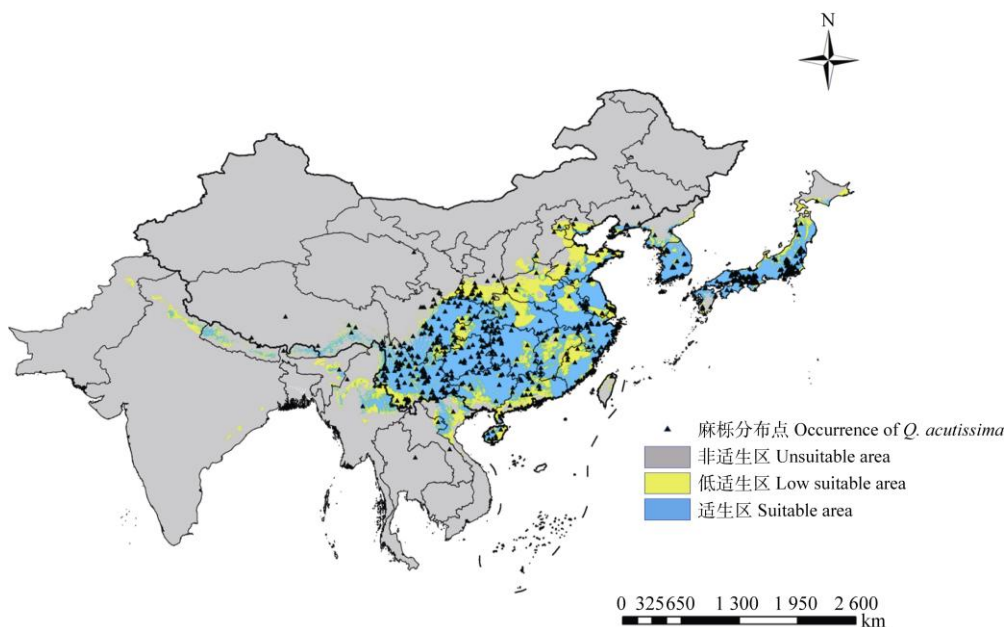


图 1 最大熵模型预测当前气候条件下麻栎的潜在分布区域

Fig. 1 Potential distribution area of *Quercus acutissima* under current climate condition predicted by Maxent

表 2 不同气候变化情景和时间下麻栎适生区域的变化

Table 2 Changes in suitable area of *Quercus acutissima* under different climate scenarios and years

情景 Scenario	时段 Period	面积 Area ($\times 10^5 \text{ km}^2$)				%			
		增加 Increment	减少 Loss	不变 Stable	变化 Change	增加 Increment	减少 Loss	不变 Stable	变化 Change
RCP2.6	2050	2.93	0.51	11.06	2.42	21.71	3.78	82.07	17.93
	2070	3.02	0.45	11.12	2.57	22.07	3.29	81.23	18.78
RCP8.5	2050	2.49	0.35	11.22	2.14	18.63	2.62	83.98	16.01
	2070	2.72	0.43	11.15	2.29	20.26	3.16	82.91	17.10

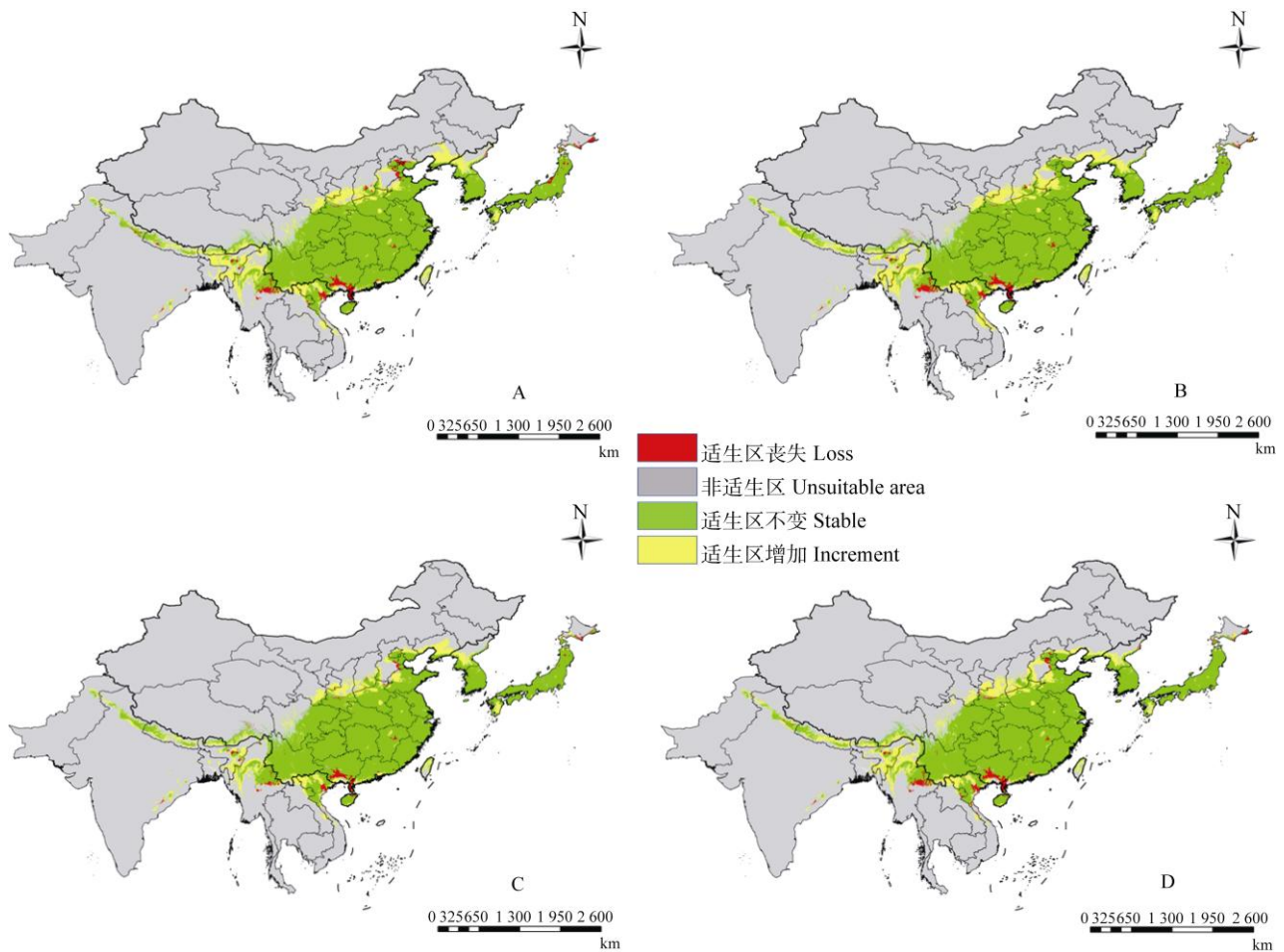


图 2 不同气候变化情景下麻栎分布格局的变化。A: RCP2.6-2050; B: RCP2.6-2070; C: RCP8.5-2050; D: RCP8.5-2070。

Fig. 2 Changes in distribution pattern of *Quercus acutissima* under different climatic scenarios. A: RCP2.6 in 2050s; B: RCP2.6 in 2070s; C: RCP8.5 in 2050s; D: RCP8.5 in 2070s.

3 结论和讨论

Maxent 模型由于操作简单、拟合准确率高、对样本数量要求低等特点, 在预测物种处于未来不同气候情景下的潜在分布变化中应用广泛, 并有大量模拟栎属植物分布的研究^[5-6,9,25]。本文利用 Maxent 模型对广布种麻栎在当前气候和未来不同气候情景下的潜在分布区域的变化进行研究, 详细描述了

不同气候情景下该物种的潜在分布情况和变化趋势, 并定量地描述适生区面积的变化程度, 模型拟合准确性 AUC 值均大于 0.95, 模型拟合能力出色^[27], 与张兴旺等基于 Bioclim 模型对麻栎的分布模拟结果比较, Maxent 模型的拟合准确度更高。

当前气候条件下, 麻栎在亚洲地区分布广泛, 在中国南部和部分北部地区以及日本、韩国、朝鲜、老挝、越南、缅甸、尼泊尔、不丹、印度、巴基斯

坦等国家和地区均存在适生区域,这与张兴旺等^[23]基于 Bioclim 模型所预测的麻栎潜在分布区域以及李迎超^[24]等基于野外实地调查所得麻栎实际分布基本一致。我们在对模型预测贡献排名前列的因子进行分析时发现,贡献最大的因子是最暖季降水量(bio18),其阈值为 380~940 mm,这与麻栎耐干旱和贫瘠、不耐涝的特性一致^[22]。贡献较大的主要因子可被大致分为夏季降水量(bio18, bio16)和冬季温度(bio3, bio4, bio6, bio9)两大部分,两者对模型拟合的贡献率分别为 56.4%和 35.2%,这表明夏季降水量和冬季温度是限制麻栎分布的重要因素。麻栎分布区域主要受太平洋季风气候控制,具有夏热冬寒,四季分明,雨热同期等特点。夏季温度高,光照强烈,植物蒸腾作用和光合作用强度加剧,因此对于水分的需求较冬季大量增加,以便维持植物体内水分的供需平衡^[29]。而降水直接影响植物的水分供应,在夏季高蒸腾需求下,水分供应亏缺会导致植物导管发生栓塞化,影响植物的生长、发育等过程,甚至导致植物死亡。冬季低温容易引发植物维管系统运输的水分发生冻融交替,木质部发生空穴化及水分运输障碍,亦可能导致植物死亡^[30],这很可能是限制麻栎分布北界的原因。

本研究中,我们选取 RCP2.6 和 RCP8.5 两个气候变化情景以及 2050 年代和 2070 年代两个未来时段,分别代表 CO₂ 浓度上升对未来气候影响的最低和最高情况。RCP2.6 情景是把全球平均气温上升幅度限制在 2℃ 内,温室气体排放和辐射强迫值均为最低值;RCP8.5 情景是最高温室气体排放情景,此情景下能源需求高、温室气体排放量大,且缺少应对气候变化的政策^[31]。模型模拟结果表明,在未来气候条件下,麻栎适生区域面积总体呈增加趋势,其适宜分布界线向北和西南方向扩展,适生区域丧失面积较少,主要集中在广西南部、广东南部以及缅甸东部等地。根据麻栎的实际分布情况可知,麻栎喜生长在较温暖的环境,过于寒冷和炎热的环境都不适宜其生长,虽为落叶植物,但是耐寒能力有限。在未来 CO₂ 浓度和温度上升的气候条件下,我国陕西、山西、甘肃等省的南部地区以及喜马拉雅山脉附近区域气温上升,达到了适宜麻栎分布的温度,因此,麻栎适宜分布区域的界线向北和西南方向拓展。同时,未来气候变化下,我国华南地区温度上升,降水减少,极端高温事件发生频率明显升高^[32],这些变化导致未来气候条件下华南地区麻栎

的适生区域有较明显的丧失。对不同 RCP 情景和预测时段模拟结果进行比较,麻栎适生区域变化程度较小。麻栎在我国南方地区、韩国、日本等地广泛分布。相比狭域分布种,广布种对气候变化有更强的抵抗和适应能力,其分布区域的变化比例相对较小^[7]。已有对栎属其他种植物的研究发现,分布范围越大的物种,其基因多样性通常显著高于特有物种,可能存在多种表型变化以应对不同生长环境,未来可从分子生物学、亲缘地理学等角度对麻栎的广泛分布做进一步研究^[33]。

本研究从区域大尺度上,依据气候因子对麻栎分布进行模拟和预测,研究结果有助于增进麻栎与气候关系的理解,对于麻栎保育及制定应对气候变化的生态对策具有重要意义。除气候因子外,土壤因子也对物种的分布有重要的影响^[34-35],基于多种环境因子建模,可得到麻栎更准确的分布情况。但是由于不同气候条件特别是 CO₂ 浓度上升的情况下,酸雨、植物固定 CO₂ 等过程可能造成土壤 pH 值、有机质含量的变化。这些变化的过程较为复杂,就当前研究现状而言,尚不能考虑到不同气候情景下土壤因子的变化。

参考文献

- [1] HU X G, JIN Y, WANG X R, et al. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis* [J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0132326. doi: 10.1371/journal.pone.0132326.
 - [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [C]// STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013.
 - [3] BERTIN R I. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change [J]. J Torrey Bot Soc, 2008, 135(1): 126-146. doi: 10.3159/07-RP-035R.1.
 - [4] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. Ecol Lett, 2012, 15(4): 365-377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.
 - [5] GAO W Q, WANG X F, JIANG Z P, et al. 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. doi: 10.5846/stxb201412012387.
- 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. doi:

- 10.5846/stxb201412012387.
- [6] LI Y, ZHANG X W, FANG Y M. Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the last glacial maximum [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(11): 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.
李焱, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.
- [7] YING L X, LIU Y, CHEN S T, et al. Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model [J]. *Biodiv Sci*, 2016, 24(4): 453–461. doi: 10.17520/biods.2015246.
应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4): 453–461. doi: 10.17520/biods.2015246.
- [8] CAO X F, QIAN G L, HU B S, et al. Prediction of potential suitable distribution area of *Flaveria bidentis* in China based on niche models [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(12): 3063–3069. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0431.
曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3063–3069. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0431.
- [9] MA S M, ZHANG M L, ZHANG H X, et al. Predicting potential geographical distributions and patterns of the relic plant *Gymnocarpus przewalskii* using maximum entropy and genetic algorithm for rule-set prediction [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34(11): 1927–1935. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.11.010.
马松梅, 张明理, 张宏祥, 等. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸木的潜在地理分布及格局 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1927–1935. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.11.010.
- [10] SHI W, TONG H. Prediction of potential distribution of Chinese fir in Guizhou next 70 years and ecological countermeasures [J]. *J CS Univ For Technol*, 2013, 33(9): 87–92. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2013.09.019.
石慰, 童红. 未来七十年贵州杉木林潜在适生区的变化及其生态对策 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(9): 87–92. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2013.09.019.
- [11] YIN X J, ZHOU G S, SUI X H, et al. Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(1): 103–109. doi: 10.5846/stxb201110 111495.
殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值 [J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 103–109. doi: 10.5846/stxb2011 10111495.
- [12] STOCKWELL D R B, NOBLE I R. Induction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of data analysis [J]. *Mathem Comput Simul*, 1992, 33(5/6): 385–390. doi: 10.1016/0378-4754(92)90126-2.
- [13] FISCHER J, LINDENMAYER D B, NIX H A, et al. Climate and animal distribution: A climatic analysis of the Australian marsupial *Trichosurus caninus* [J]. *J Biogeogr*, 2001, 28(3): 293–304. doi: 10.1046/j.1365-2699.2001.00554.x.
- [14] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [15] DELLICOUR S, KASTALLY C, VARELA S, et al. Ecological niche modelling and coalescent simulations to explore the recent geographical range history of five widespread bumblebee species in Europe [J]. *J Biogeogr*, 2017, 44(1): 39–50. doi: 10.1111/jbi.12748.
- [16] WAN J Z, WANG C J, TAN J F, et al. Climatic niche divergence and habitat suitability of eight alien invasive weeds in China under climate change [J]. *Ecol Evol*, 2017, 7(5): 1541–1552. doi: 10.1002/ece3.2684.
- [17] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161–175. doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- [18] *Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Agendae Academiae Sinicae Edita. Flora of Republicae Popularis Sinicae, Tomus 22* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 219–220.
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 22 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 219–220.
- [19] LU Y, QIN D W, WEI Z M, et al. Evaluation of economic benefits of *Quercus acutissima* plantation [J]. *J S Agric*, 2014, 24(4): 1242–1247. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.7.1242.
卢庸, 覃德文, 韦中绵, 等. 麻栎人工林经济效益分析 [J]. *南方农业学报*, 2014, 45(7): 1242–1247. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.7.1242.
- [20] HUANG Q F, CHEN L Y, HAO Y P, et al. Analysis of the stand spatial structure and species diversity of *Quercus acutissima* mixed forest [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2010, 19(9): 1010–1014.
黄庆丰, 陈龙勇, 郝焰平, 等. 麻栎混交林空间结构与物种多样性研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(9): 1010–1014.
- [21] TANG L Z, LIU Z L, YU M K, et al. Nutrient accumulation and allocation of aboveground parts in *Quercus acutissima* plantations under two site conditions in Anhui, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34(6): 661–670. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.06.005.
唐罗忠, 刘志龙, 虞木奎, 等. 两种立地条件下麻栎人工林地上部分养分的积累和分配 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 661–670. doi:

- 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.06.005.
- [22] XU F, GUO W H, XU W H, et al. Effects of short-term drought and rewatering on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Quercus acutissima* seedlings [J]. Shandong For Sci Technol, 2008, 38(4): 1-4, 40. doi: 10.3969/j.issn.1002-2724.2008.04.001.
徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 短期干旱和复水对麻栎幼苗光合及叶绿素荧光的影响 [J]. 山东林业科技, 2008, 38(4): 1-4, 40. doi: 10.3969/j.issn.1002-2724.2008.04.001.
- [23] ZHANG X W, LI Y, FANG Y M. Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissima* in China [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2014, 34(8): 1685-1694. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1685.
张兴旺, 李垚, 方炎明. 麻栎在中国的地理分布及潜在分布区预测 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(8): 1685-1692. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1685.
- [24] LI Y C, LI Y Q, WANG L B, et al. Resource investigation and distribution pattern of *Quercus variabilis* Blume and *Quercus acutissima* Carr. as woody energy plant in China [J]. For Res Manag, 2013(2): 94-101. doi: 10.3969/j.issn.1002-6622.2013.02.018.
李迎超, 厉月桥, 王利兵, 等. 木本淀粉能源植物栓皮栎与麻栎的资源调查以及分布规律 [J]. 林业资源管理, 2013(2): 94-101. doi: 10.3969/j.issn.1002-6622.2013.02.018.
- [25] LI Y, ZHANG X W, FANG Y M. Predicting the impact of global warming on the geographical distribution pattern of *Quercus variabilis* in China [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(12): 3381-3389.
李垚, 张兴旺, 方炎明. 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3381-3389.
- [26] SHEN Y P, WANG G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. J Glaciol Geocryol, 2013, 35(5): 1068-1076. doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120.
沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076. doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120.
- [27] WANG Y S, XIE B Y, WAN F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. Biodiv Sci, 2007, 15(4): 365-372. doi: 10.3321/j.issn.1005-0094.2007.04.005.
王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372. doi: 10.3321/j.issn.1005-0094.2007.04.005.
- [28] BROWN J L, ANDERSON B. SDMtoolbox: Apython-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses [J]. Meth Ecol Evol, 2014, 5(7): 694-700. doi: 10.1111/2041-210X.12200.
- [29] ZHAO P, SUN G C, NI G Y, et al. Seasonal differences in the leaf hydraulic conductance of mature *Acacia mangium* in response to its leaf water use and photosynthesis [J]. Chin J Appl Ecol, 2013, 24(1): 49-56.
赵平, 孙谷畴, 倪广艳, 等. 成熟马占相思水力导度对水分利用和光合响应的季节性差异 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 49-56.
- [30] CAVENDER-BARES J, HOLBROOK N M. Hydraulic properties and freezing-induced cavitation in sympatric evergreen and deciduous oaks with contrasting habitats [J]. Plant Cell Environ, 2001, 24(12): 1243-1256. doi: 10.1046/j.1365-3040.2001.00797.x.
- [31] RIAHI K, RAO S, KREY V, et al. RCP 8.5: A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions [J]. Clim Change, 2011, 109: 33. doi: 10.1007/s10584-011-0149-y.
- [32] HUANG X Y, WEN Z P, DU Y D. Scenario analyses on the changes of future surface air temperature and precipitation in south China [J]. J Trop Meteorol, 2008, 24(3): 254-258. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2008.03.007.
黄晓莹, 温之平, 杜尧东, 等. 华南地区未来地面温度和降水变化的情景分析 [J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 254-258. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2008.03.007.
- [33] CAVENDER-BARES J, GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ A, EATON D A R, et al. Phylogeny and biogeography of the American live oaks (*Quercus* subsection *Virentes*): A genomic and population genetics approach [J]. Mol Ecol, 2015, 24(14): 3668-3687. doi: 10.1111/mec.13269.
- [34] JIN J X, JIANG H, PENG W, et al. Evaluating the impact of soil factors on the potential distribution of *Phyllostachys edulis* (bamboo) in China based on the species distribution model [J]. Chin J Plant Ecol, 2013, 37(7): 631-640. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00065.
金佳鑫, 江洪, 彭威, 等. 基于物种分布模型评价土壤因子对我国毛竹潜在分布的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 631-640. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00065.
- [35] WEN J, SONG J Y, XIE C X, et al. Identification of potential distribution areas for energy plant *Jatropha curcas* L. using the Maxent entropy model [J]. Plant Sci J, 2016, 34(6): 849-856. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.60849.
文检, 宋经元, 谢彩香, 等. 基于最大信息熵模型的能源物种麻疯树潜在适宜区 [J]. 植物科学学报, 2016, 34(6): 849-856. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.60849.