

# 气候变化背景下青冈分布变化及其对中国亚热带北界的指示意义

张立娟,李艳红,任 涵,王丽园,朱文博,朱连奇

(河南大学环境与规划学院,开封 475004)

**摘要:** 气候是影响植被类型和分布的关键因素,植被类型和分布格局也能反映气候的地域差异。随着气候变暖,全球气温和降水格局都将发生变化,植被类型和分布格局也将随之改变。而植物对气候变化的响应存在一定的滞后性,因此仅用气候指标研究亚热带北界及其移动具有一定的局限性。以青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted)为研究对象,应用最大熵模型(Maxent),研究了其对气候变化的响应并探讨了气候变化情景下青冈分布格局变化对中国亚热带北界移动的指示意义。结果表明:影响青冈分布的主导环境因子为年降水量、最冷季降水量、气温年变化范围和最冷月最低气温;随着气候变暖,青冈分布北界将向北移动,其分布质心亦向西北移动,预示着在气候变暖的背景下,到21世纪中叶中国亚热带北界将向北移动约1个纬度。

**关键词:** 青冈;气候变化;Maxent;适生区

DOI: 10.11821/dlyj020190306

## 1 引言

气候是决定植被类型和物种分布的主要因素,同时植被类型格局和物种地理分布也反映气候的地域差异<sup>[1]</sup>。气温和降水及其组合状况是影响植物生长和植被类型分布的主要气候因子。随着大气中温室气体含量的升高,全球气温和降水格局也将发生相应的变化。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,与1986—2005年相比,到21世纪末全球平均气温可能上升0.3~4.8℃,中低纬度地区极端降水可能增多、增强,季风区降水也将增多<sup>[2]</sup>。当气候变化接近或超过适宜植被生长的阈值时,就会导致植被现实分布与潜在分布格局的变化,反过来植被类型格局的变化也会通过影响区域气候,形成植被-气候互馈的作用机制<sup>[3]</sup>。植被类型格局的变化不仅表现在群落组成以及物种多样性的变化,还表现在物种个体数量、生长期的变化以及物种分布向高纬度或高海拔地区的移动<sup>[4]</sup>。研究表明,气候变化导致的降水分布格局变化改变了分布在美国加州旧金山湾的一种斑蝶(*Euphydryas editha bayensis*)的生境质量,加速了斑蝶在该区的消失<sup>[5]</sup>;气候变化导致全球物种分布范围以16.9 km/10 a的速度向高纬度地区移动,同时以11 m/10 a的速度向高海拔地区上升<sup>[4]</sup>。

秦岭-淮河是中国亚热带向暖温带过渡的重要地段,也是中国最主要的自然地理过渡

收稿日期:2019-04-24;修订日期:2020-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41671090);国家科技基础资源调查专项(2017FY100902)

作者简介:张立娟(1985-),女,山东肥城人,博士研究生,主要研究方向为山地地理环境与资源开发利用研究。

E-mail: zhanglijuan728@163.com

通讯作者:朱连奇(1963-),男,河南郸城人,教授,博士生导师,主要研究方向为山地地理环境与资源开发利用研究。E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

地段之一<sup>[6,7]</sup>。前人从地植物学的角度出发, 根据常绿阔叶木本植物的分布判定亚热带北界大致在 $33^{\circ}25'N\sim 33^{\circ}45'N$ <sup>[8]</sup>; 在兼具垂直地带性和水平地带性的伏牛山区, 根据植被垂直带谱将伏牛山主脉南坡海拔800 m左右的等高线作为亚热带北界<sup>[9]</sup>。后有学者以气候-植被参数为依据, 通过比较分析秦岭植物区系和植被垂直带谱, 提出了秦岭山地生态分界线大致在南坡海拔1000 m附近<sup>[10]</sup>。近年来, 随着大气温室气体含量的升高, 对气候变化背景下中国南北分界线移动的研究日益增多。利用气候台站数据和 $\geq 10^{\circ}C$ 日数、积温等气候指标对近几十年来中国主要气候分界线变化的研究发现中国亚热带北界东段整体北移了1个纬度以上<sup>[6]</sup>, 在豫西山地东段北移曾达2.3个纬度<sup>[11]</sup>; 同时基于HadCM3气象模拟数据的预测认为, 到2059年中国亚热带北界将越过秦岭-淮河进入黄河流域<sup>[12]</sup>。总之, 对中国亚热带北界划分依据和具体位置的研究仍存在争议<sup>[13]</sup>。虽然本质上中国南北过渡带是一个气候过渡带, 利用气候指标划分亚热带北界似乎是最为准确的, 但是气候特征必然会对植被、土壤等自然地理要素产生影响, 进而导致形成相应的自然带, 因此自然带是各种自然地理要素共同作用的结果, 而植被是气候和自然带的标志。一个区域主要的植被类型表现着该区域植物界对气候的响应<sup>[14]</sup>, 并且植物在一定程度上可以改变其生理特征适应气候变化, 所以植物对气候变化的响应存在一定的滞后性, 其在气候变化过程中更加稳定, 因此仅用气候指标反映自然带的变化值得商榷。本文尝试利用物种分布模型, 构建物种的潜在分布区并通过物种分布及其对气候变化的响应探究气候变暖背景下中国亚热带北界的移动。

近年来, 国内外学者利用物种分布的地理属性信息, 建立物种分布与地理环境变量的关系, 从而估算出物种的生态位, 构建物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 预测物种的空间分布及其变化<sup>[15]</sup>。最大熵模型 (Maxent) 是2004年Phillips等基于最大熵理论建立、应用较为广泛的物种分布模型之一。按照该模型, 物种及其生存环境可以视为一个系统, 系统内部不断进行的物质和能量交换使得整个系统的熵不断增加, 直至熵达到最大值即物种与环境之间达到平衡状态。因此, 通过计算系统最大熵时的状态参数, 可推算物种与环境因子间的对应关系, 并据此估算物种的分布<sup>[16]</sup>。它在模拟物种空间分布时仅需要物种分布的点位信息和环境变量, 且在样本量较小的情况下仍能保持较好的预测精度<sup>[17]</sup>。Phillips等应用Maxent模型准确模拟出了两种热带哺乳动物 (*Bradyus variegatus* 和 *Microrhizomys minutus*) 的空间分布<sup>[18]</sup>。目前Maxent模型已被应用于模拟和预测全球气候变化下物种的潜在空间分布范围变化<sup>[19]</sup>、濒危物种的恢复和保护<sup>[20]</sup>、外来物种分布与入侵风险<sup>[21]</sup>和保护区规划<sup>[22]</sup>等方面, 在生物地理学研究中发挥着积极作用。

物种是自然地理环境属性的重要指标, 其分布变化是研究全球变化背景下自然地带演化的重要手段, 本文以典型的亚热带常绿阔叶树种青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 为研究对象, 探讨全球气候变化背景下青冈分布格局的变化及其对亚热带北界移动的指示意义。青冈归属壳斗科, 是亚热带典型常绿树种, 喜温喜湿且耐寒、耐阴、耐贫瘠, 适应性较强。青冈分布范围北达日本本州岛, 南到中国云南中部和东南部、广西靖西和德保、广东北部、福建南部以及台湾玉山主峰<sup>[23]</sup>, 其在中国的分布北界基本与常绿阔叶树种分布的北界吻合, 常成为常绿、落叶阔叶混交林的优势树种或建群种<sup>[24]</sup>, 因此气候变化背景下, 青冈分布北界的移动可以反映中国常绿阔叶树种分布及亚热带北界的变化。目前的研究主要集中在气候变化情景下青冈分布范围的变化<sup>[25]</sup>, 而利用物种分布模型探讨中国亚热带北界移动的相关研究较少<sup>[26]</sup>。本文利用Maxent模型预测气候变化背景下青冈空间分布格局的变化, 并用分布区质心移动分析适生区变化的方向和幅度, 探讨青冈分布格局的变化对中国亚热带北界移动的指示意义。

## 2 数据来源与研究方法

Maxent模型包括两个模块,物种分布(samples)模块和环境变量(environmental layers)模块。首先将物种分布点位信息输入物种分布模块,然后选择与该物种分布密切相关的环境图层输入环境变量模块,随后设置是否绘制响应曲线(create response curves)评价模型精度、是否使用刀切法评价变量重要性(do jackknife to measure variable importance)、随机验证的数据比例(random test percentage)以及阈值选择规则(apply threshold rule),即可得到物种存在概率栅格图。在Maxent模拟中,物种分布点位信息使用经纬度表示,模型运行的关键是环境变量的选择。

### 2.1 环境变量的选择

环境变量通过影响物种生长的生物和地理过程控制其地理分布,应用比较广泛的环境变量包括气候(气温和降水)、土壤、海拔等。

气温和降水是影响植物分布的两大决定性因素,然而年平均气温和年降水量两个指标却不足以揭示植被与气候的关系。Kikuzawa研究了植物叶片寿命与季节性的关系,发现植物可以通过调节叶片寿命来确保其碳获取净收益达到最大,当生长季较长或没有明显的非生长季时,植物维持老叶所需要的碳消耗小于植物来年新叶形成的碳消耗,因此植物表现为常绿,反之生长季较短或非生长季太长,则表现为落叶<sup>[27]</sup>。青冈作为典型的亚热带常绿阔叶树种,气温和降水的季节分配必然是影响青冈地理分布的重要因素,因此也成为物种分布模型中重要的环境变量。还有研究表明青冈种子的大小和重量也与土壤pH存在一定的相关性<sup>[28]</sup>,说明土壤pH也是影响青冈分布的重要环境变量;同时,倪健研究发现影响青冈分布上限与分布北界的气温指标略有不同,说明海拔高度对青冈分布界限也存在一定影响<sup>[25]</sup>。根据以上研究结果,本文确定了21个可能影响青冈地理分布的环境变量,包括19个生物气候变量、土壤pH和海拔(表1)。

### 2.2 数据来源

青冈地理分布信息主要通过查询世界生物多样性信息机构(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)网站(www.gbif.org)以及挖掘整理相关文献资料获得<sup>[24,25,29,30]</sup>。首先利用Excel删除重复和不完整数据,然后在ArcGIS 10.2中利用SDM-Toolbox对点位进行重采样<sup>[31]</sup>,最终共获得238条青冈分布的有效记录(图1)。

表1 环境变量及其贡献率

Tab. 1 Contribution rates of the bioclimatic variables included in Maxent for *Cyclobalanopsis glauca*

变量	描述	贡献率(%)
Bio1	年均温	-
Bio2	昼夜温差月均值	0.9
Bio3	等温性	1
Bio4	温度季节变化方差	-
Bio5	最热月的最高气温	-
Bio6	最冷月的最低气温	9.6
Bio7	气温年变化范围	10.4
Bio8	最湿季平均气温	-
Bio9	最干季平均气温	-
Bio10	最暖季平均气温	1
Bio11	最冷季平均气温	-
Bio12	年降水量	45
Bio13	最湿月降水量	-
Bio14	最干月降水量	-
Bio15	降水季节性变异系数	1
Bio16	最湿季降水量	-
Bio17	最干季降水量	-
Bio18	最暖季降水量	-
Bio19	最冷季降水量	29.2
pH	土壤pH	1.4
ASL	海拔	0.6

土壤pH和海拔均从联合国粮农组织 (FAO) 与维也纳国际应用系统研究所 (IIASA)、中国科学院南京土壤研究所和欧洲委员会联合研究中心合作开发的世界土壤属性数据库 (Harmonized World Soil Database v1.2) 中提取<sup>[32]</sup>。

19个生物气候变量来自世界气候数据库 WorldClim (www.worldclim.org)<sup>[33]</sup>。为了比较气候变化背景下青冈分布区的变化, 本文利用了 WorldClim 数据库的两期气候数据, 分别是当前气候数据 (1960—1990年) 及未来气候情景下 2050s 的气候数据。当前气候数据是基于全球气象站点记录的

1960—1990年的月温度及降水数据提取出来的, 代表了气候因子的年变化趋势、季节性、温差特点、水热组合状况以及极端或限制性环境因素。未来 (2050s) 气候数据采用中国气象局开发的 BCC-CSM1-1 大气环流模型模拟的未来气候变化数据。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告利用全球气候耦合模式, 模拟发布了四种未来具有典型代表性的温室气体排放情景模式: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 和 RCP8.5<sup>[2]</sup>; 其中 RCP 是指典型浓度路径 (representative concentration pathway, RCP)。本文选取的 RCP2.6 和 RCP8.5 两种典型浓度路径, 分别代表了温室气体排放浓度最低和最高情景<sup>[2]</sup>。在 RCP2.6 情景下, 到本世纪中叶 (2046—2065年), 全球平均地表温度将上升 0.4~1.6 °C, 海平面平均升高 0.17~0.32 m; 在 RCP8.5 情景下, 到 21 世纪中叶全球平均地表温度将上升 1.4~2.6 °C, 海平面平均升高 0.22~0.38 m<sup>[2]</sup>。

以上 21 个环境变量的空间分辨率均为 30" ( $\approx 1$  km)。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 Maxent 模型构建与检验

在建立物种分布模型时, 环境变量间多重共线性会导致模型的过度拟合<sup>[19]</sup>, 因此本文利用 ArcGIS 10.2 中的 SDM-Toolbox v2.4 工具对 19 个生物气候变量进行相关性分析, 删除了相关系数 > 0.9 的生物气候变量<sup>[31]</sup>。最终确定了土壤 pH、海拔和 8 个生物气候变量作为预测青冈分布区的环境数据 (表 1)。

将已处理过的青冈分布数据与筛选得到的 10 个环境变量导入 Maxent 3.4.1。随机选取 75% 的分布点作为模型训练集用于建立模型, 剩余 25% 的分布点作为测试集用于验证模型; 并设定最大训练敏感性加特殊性 (Maximum training sensitivity plus specificity) 作为本模型的阈值<sup>[34]</sup>。

Maxent 模型提供刀切法 (Jackknife) 检验环境变量对模型构建的贡献率, 并利用接受者操作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 下方的面积 (area under curve, AUC) 判断模型的优劣, AUC 的值介于 0~1 之间, AUC 值越大表明模型预测结果越好, 评判标准为: 0.50~0.60 失败; 0.60~0.70 较差; 0.70~0.80 一般; 0.80~0.90

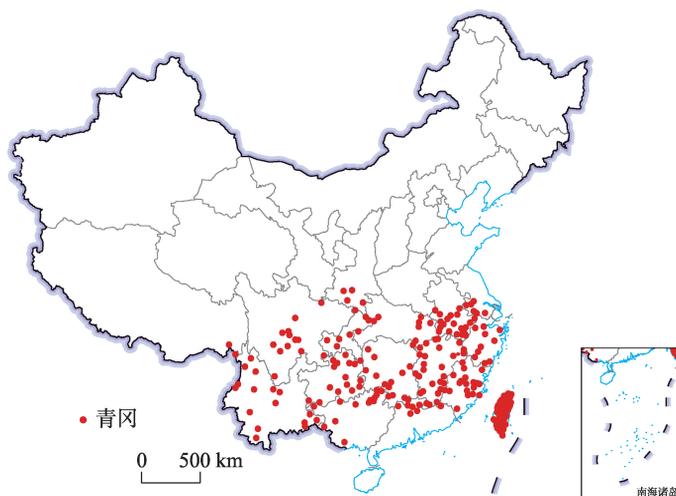


图 1 研究区青冈的分布点位

Fig. 1 Distribution records of *Cyclobalanopsis glauca* in China  
注: 基于国家测绘地理信息局标准地图服务系统的标准底图 (审图号: GS(2019)1823 号) 制作, 底图无修改。

好；>0.90非常好<sup>[35]</sup>。

**2.3.2 适生区等级划分** 采用 ArcGIS 10.2 软件对模拟结果进行数据转换，得到青冈的存在概率栅格图。存在概率值在 0~1 内，概率值越高代表物种存在的可能性越大。本文选取高于最大训练敏感性加特殊性阈值（即 > 0.255）作为青冈的总适生区范围，并对青冈进行适生区等级划分：< 0.255 为非适生区，0.255~0.4 为低适生区，0.4~0.6 为中适生区，> 0.6 为高适生区，并绘制出当前和未来气候情景下青冈的适生区分布图。通过对比当前和未来气候情景下适生区的分布范围，得到未来气候变化背景下青冈适生区分布范围的变化，并将这种变化分为两类：增加的适生区和消失的适生区，以预测气候变化对青冈适生区面积的影响；为了更好地表征青冈适生区的变化，本文应用 SDM-Toolbox v2.4 对比当前和未来青冈分布的二进制图，将现实和未来青冈分布都简化到一个质点，描述了未来气候情景下青冈适生区的移动方向和幅度<sup>[31]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 Maxent 模型的预测评价

训练集和测试集的 AUC 值分别为 0.932 和 0.922，表明 Maxent 模型对青冈潜在适生区的模拟结果非常好<sup>[35]</sup>，具有很高的可信度。刀切法的分析结果显示，年降水量（bio12）对模型构建的贡献率最高（45%）是最重要的变量；最冷季降水量（bio19）（29.2%）、气温年变化范围（bio7）（10.4%）和最冷月的最低气温（bio6）（9.6%）对模型构建的贡献率也较大；上述 4 个环境变量的总贡献率达到了 94.2%（表 1），说明这些变量既是模型构建时重要的环境因子，也是影响青冈分布的主要环境因子。

#### 3.2 当前气候条件下青冈的潜在适生区

当前气候条件下，青冈的总适生区南起海南省，北到陕西和河南的南部、安徽和江苏的中南部，西起西藏东南部和四川的中东部，向东至江苏、浙江、福建和广东沿海一带以及台湾省，主要分布范围为 18°N~33°N、91°E~121°E，总面积约 174.4 万 km<sup>2</sup>（表 2）；其北界与中国南北过渡带北界即秦岭-淮河一线大致吻合（图 2a）。其中，中适生区和低适生区

主要分布在总适生区的西部和北部地区，两者面积相当，分别占总适生区的 38% 和 37%；而高适生区主要分布在长江以南地区和台湾省，仅占总适生区的 25%。

#### 3.3 未来气候情景下青冈的潜在适生区及其空间格局的变化

根据 IPCC AR5，RCP2.6 情景是相对于 1975 年，2100 年的总辐射强迫为 2.6 Wm<sup>-2</sup>，这是一种极低辐射强迫水平的温室气体排放减缓情景。在 RCP2.6 情景下，相对于 1850—1900 年，到 21 世纪中叶（2046—2065 年）全球表面温度可能升高约 1℃，全球平均海平面上升约 0.24 m<sup>[2]</sup>。根据 Maxent 模拟，在此情景下，青冈的总适生区南起海南省南部，北至甘肃省东南部、陕西和河南省南部以及安徽和江苏省中北部，西起西藏东南部、云南西部和四川中东部，东到江苏、浙江、福建和广东沿海地区以及台湾省（图 2b）。总适生区面积增加，达到 205.0 万 km<sup>2</sup>（表 2），主要分布范围为 18°N~33.5°N、91°E~121°

表 2 不同气候情景下青冈的适生区面积

Tab. 2 Distribution areas of *Cyclobalanopsis glauca* under different climate scenarios

	当前	RCP2.6	RCP8.5
低适生区	63.8	61.0	68.2
中适生区	66.4	79.1	81.0
高适生区	44.2	64.9	51.4
总适生区	174.4	205.0	200.6

(万 km<sup>2</sup>)

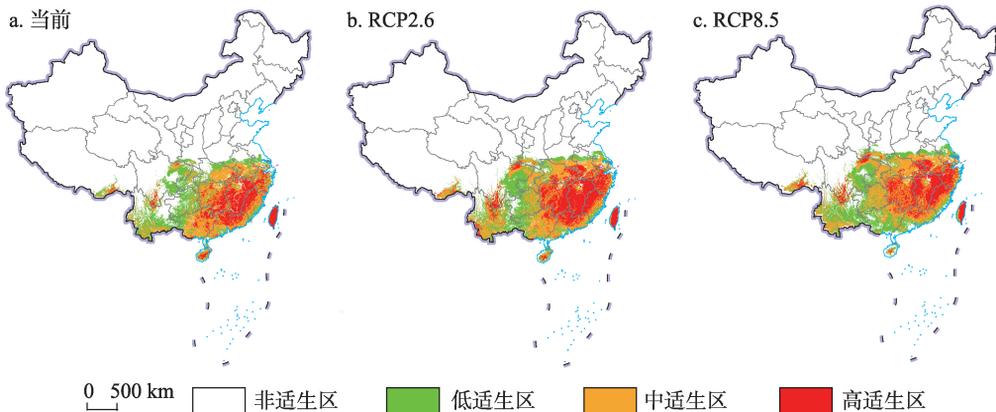


图2 当前和未来气候情景下青冈的适生区分布图

Fig. 2 Species distribution models of *Cyclobalanopsis glauca* under current climate and climate change scenarios

注: 基于国家测绘地理信息局标准地图服务系统的标准底图(审图号: GS(2019)1697号)制作, 底图无修改。

E, 其分布北界西段仍在秦岭地区, 但其东段已进入淮河以北地区。其中中适生区向北越过淮河, 在淮河以北成片状分布, 仍占总适生区面积的38%; 高适生区向北越过长江, 开始进入淮河流域, 同时高适生区亦向西推进进入贵州和重庆, 面积占比由25%上升至32%; 而原有的低适生区一部分被中、高适生区取代, 面积占比下降至30%。

根据IPCC AR5, RCP8.5情景是相对于1975年, 2100年的总辐射强迫为 $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ , 这是温室气体排放浓度非常高的情景。在RCP8.5情景下, 相对于1850—1900年, 21世纪中叶(2046—2065年)全球表面温度可能升高约 $2^{\circ}\text{C}$ , 全球平均海平面上升约 $0.30 \text{ m}^{[2]}$ 。根据Maxent模拟, 在此情景下, 青冈的总适生区南起海南省南部, 北至甘肃省东南部、陕西和河南省南部以及安徽和江苏省中北部, 西起西藏东南部、云南西部和四川中东部, 东到江苏、浙江、福建和广东沿海地区以及台湾省(图2c), 总面积约 $200.6 \text{ 万 km}^2$ (表2); 大致分布在 $18^{\circ}\text{N}\sim 33.5^{\circ}\text{N}$ ,  $91^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$ , 其分布北界东段也已越过淮河, 进入淮河以北地区。其中中适生区向北越过淮河, 在淮河以北成片状分布; 中适生区面积增加明显, 面积占比达40%; 低适生区东段北界越过淮河, 进入淮河以北, 其占总适生区面积的34%; 高适生区北部越过长江, 开始进入淮河流域, 西部开始进入贵州和重庆, 而南界则出现北缩; 高适生区面积出现增加的同时, 面积占比仅为26%, 而且高适生区的生境破碎化程度更加明显。

在RCP2.6和RCP8.5情景下, 增加的适生区面积均约为 $32 \text{ 万 km}^2$ , 其北部呈带状分布于 $32.5^{\circ}\text{N}\sim 33.5^{\circ}\text{N}$ 之间(图3), 表明在两种气候情景下, 青冈均出现向北扩展的趋势, 北移幅度约为1个纬度。而增加的适生区西部则主要分布于四川、云南和贵州三省内部, 以斑块状分布向片状分布转化为主, 并未出现显著的西移趋势。在未来气候情景下, 消失的适生区均位于中国南部沿海地区如广东、广西、福建和海南的沿海地区, 并且在西藏南部、重庆西部也有部分地区青冈适生区消失; RCP8.5情景下, 消失的适生区面积显著大于RCP2.6情景, 表明未来气候变化越剧烈, 中国南部沿海地区青冈的生境面积减小越明显。

### 3.4 青冈分布区质心的变化

根据不同气候情景下青冈分布质心的移动发现, 在未来气候变化情景下, 青冈分布质心出现向西北移动的趋势。当前气候条件下, 青冈的分布质心位于湖南省株洲市炎陵

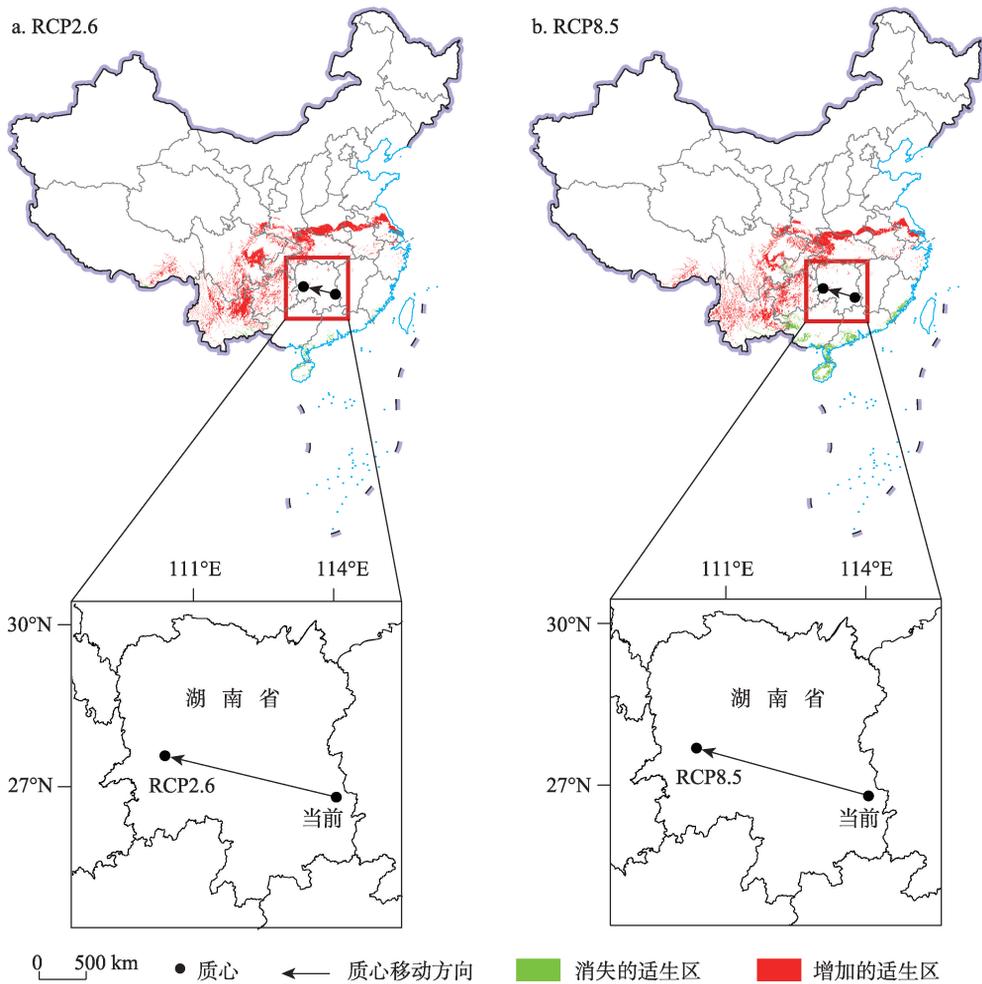


图3 气候变化下青冈分布格局及分布质心的变化

Fig. 3 Dynamic changes of distribution patterns and the core distributional shifts under different climate scenarios for *Cyclobalanopsis glauca*

注：基于国家测绘地理信息局标准地图服务系统的标准底图（审图号：GS(2019)1697号）制作，底图无修改。

县西北部 (26°31'12"N、113°41'24"E)。在RCP2.6情景下，到2050s青冈分布质心将向西北方向移动至湖南省怀化市东南部 (27°30'36"N、110°12'36"E) (图3a)；在RCP8.5情景下，到2050s青冈分布质心将向西北方向移动至湖南省怀化市东北部 (27°37'48"N、110°12'36"E) (图3b)。综上所述，在以上两种气候变化背景下，青冈分布质心的移动方向和幅度相近，均向北移动1个纬度，向西移动3个经度，即其经向移动幅度远大于纬向移动幅度。

### 4 讨论

#### 4.1 气候因子对青冈分布格局的影响

本文利用Maxent模型对在当前和未来气候条件下青冈分布适生区进行研究，并结合两种气候变化情景预测2050s青冈的适生区，对适生区空间变化进行分析，模拟效果非

常好<sup>[35]</sup>。根据刀切法对环境因子的评价发现, 年降水量 (bio12) 的贡献率为45%, 是最重要的环境变量, 对青冈的分布至关重要, 是影响青冈分布的决定因素; 最冷季降水量 (bio19) 贡献率为29.2%, 对青冈的分布也起着重要作用。倪健等研究发现青冈的水分指数平均值为51.5, 说明青冈适宜生长在较为湿润的生境<sup>[25]</sup>。不同地点影响植物生长的气候因子不尽相同, 研究认为中国东部沿海地区, 常绿阔叶林的分布受制于降水的多少, 其分布北界常常偏南<sup>[36]</sup>, 说明水分的盈亏是植物生长的重要影响因素<sup>[37]</sup>, 合理的水热配比才能够满足植物生长的需要。因此, 年降水量和最冷季降水量可能是影响青冈向北分布的限制性因素。

#### 4.2 青冈分布格局变化的地理指示

青冈地理分布的北界基本与常绿阔叶树种分布的北界即亚热带北界相吻合<sup>[1,24]</sup>, 在当前气候条件下, 青冈总适生区分布北界大致在33°N附近 (图2a), 与秦岭-淮河一线大致吻合, 说明青冈分布格局能够反映气候分布格局。因此全球气候变化背景下, 青冈地理分布北界的移动可以反演中国常绿阔叶树种分布北界即亚热带北界的移动, 对于中国重要地理界线具有明显的指示意义。

随着气候变暖, 一些物种会通过改变其生理特征来适应气候变化, 有些物种则会向高纬度或高海拔地区迁移<sup>[4]</sup>。Feeley等研究了239种热带植物对全球气候变暖的响应, 发现其中一半以上的植被出现向高纬度或高海拔地区移动的现象<sup>[38]</sup>。Chen等估计在全球变暖下物种分布将以16.9 km/10 a的速度向高纬度地区移动<sup>[4]</sup>。根据Maxent模拟, 年降水量和最冷季降水量是影响青冈分布的决定因素。根据BCC-CSM1-1大气环流模型, 在RCP2.6和RCP8.5情景下, 到2050s青冈新增适生区北部的年降水量和最冷月降水量以增加趋势为主。在RCP2.6情景下, 年降水量增加39~107 mm, 最冷月降水量增加3~18 mm; 在RCP8.5情景下, 年降水量变化范围为-9~86 mm; 最冷月降水量增加5~21 mm。方精云等认为受降水的限制, 常绿阔叶林在中国的分布位置比日本偏南 (偏暖)<sup>[36]</sup>。因此在未来年降水量和最冷月降水量均增加的背景下, 中国常绿阔叶树种青冈分布区将显著北移且总面积将显著增加, 这进一步印证了年降水量和最冷月降水量可能是青冈向北分布的限制性因素, 同时也说明青冈也可以通过向高纬度和高海拔迁移的方式来适应气候变化。然而, 在气温升高达2°C的RCP8.5情景下, 青冈适生区增大的同时, 其高适生区却出现显著的破碎化, 说明随着地球表面气温不断升高, 青冈的适应机制是不可持续的。

青冈分布区北界的北移表明, 到21世纪中叶中国亚热带北界将向北移动并越过秦岭-淮河一线, 整体移动幅度约为1个纬度。这与曹铭昌等应用广义线性模型、广义加法模型与分类回归树三个物种地理分布模型预测的未来气候变化情景下青冈分布区将向西、向北扩展的趋势一致<sup>[26]</sup>。在气候变化情景下, 青冈分布质心将向西移动3个经度, 远大于其纬向移动幅度; 此外, 在四川、云南和贵州等地出现较大面积的新增适生区的情况下, 青冈适生区的西界却较为稳定并未出现显著西移。这主要是由于适生区内部格局的变化造成的, 随着气候变暖, 中高适生区出现了显著的向北和向西移动, 说明未来不仅亚热带北界将出现北移, 亚热带内部物种分布格局也将发生显著变化。此外, 青冈中高适生区西移过程中亦可能存在向高海拔移动的趋势。总之青冈分布北界移动所指示的中国亚热带北界的向北推移是植被分布格局对全球气候变暖的一种响应, 这意味着利用物种分布模型判断亚热带北界的移动是可行的。

此外, 虽然本研究综合考虑了生物气候变量、土壤和地形因子对青冈分布的影响, 比较准确的获取了青冈的适生区范围, 但本文研究的空间尺度较大, 在小尺度上变化剧

烈的环境因子如坡度、坡向、道路分布、土地利用方式和居民点的分布等对物种分布也会产生影响,因此在未来的研究中,还应权衡研究尺度与环境因子选择之间的平衡,以提高模拟精度和准确性。

## 5 结论

本文基于最大熵模型(Maxent)利用青冈地理分布信息,结合土壤pH、海拔和8个生物气候变量模拟了当前和未来(2050s)青冈的地理分布格局并探讨了气候变暖情景下青冈分布格局的变化对中国亚热带北界移动的指示意义,获得以下主要结论:

(1) 模型训练集和测试集的AUC值均 $>0.90$ ,表明Maxent模型对青冈潜在适生区的模拟结果具有很高的可信度。刀切法显示年降水量、最冷季降水量、温度年变化范围和最冷月最低气温是影响青冈分布的主导环境变量;而且年降水量和最冷季降水量可能是影响青冈向北分布的限制性因素。

(2) 当前青冈适生区面积约为174.4万 $\text{km}^2$ ;随着气候变暖,青冈可通过向高纬度迁移来适应气候变化;在RCP2.6和RCP8.5情景下,新增的适生区面积均为32.0万 $\text{km}^2$ 。

(3) 未来青冈适生区北界将越过秦岭-淮河一线,向北移动约1个纬度,预示着在气候变暖的背景下,到2050s中国亚热带北界也将向高纬移动约1个纬度。然而在气温升高达 $2^{\circ}\text{C}$ 的RCP8.5情景下,青冈适生区增大的同时,其高适生区却出现显著的破碎化,说明随着地球表面气温不断升高,青冈的适应机制是不可持续的。

**致谢:**评审专家对本研究的逻辑框架和结果分析提出了宝贵建议,使论文表达更加符合逻辑、语言清晰明了、内容更加详实,特致以诚挚感谢!

## 参考文献(References)

- [1] 倪健,宋永昌.中国常绿阔叶林壳斗科主要种的分布与气候.华东师范大学学报:自然科学版,1997,(2):100-107. [Ni Jian, Song Yongchang. Climate and geographical distribution of dominants and companions of fagaceae for broad-leaved forest in China. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1997, (2): 100-107.]
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. In: IPCC. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-26.
- [3] Wilfried T, Sandra L, Araújo M B, et al. Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(23): 8245-8250.
- [4] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [5] Mclaughlin J F, Hellmann J J, Boggs C L, et al. Climate change hastens population extinctions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(9): 6070-6074.
- [6] 卞娟娟,郝志新,郑景云,等.1951—2010年中国主要气候区划界线的移动.地理研究,2013,32(7):1179-1187. [Bian Juanjuan, Hao Zhixin, Zheng Jingyun, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010. Geographical Research, 2013, 32(7): 1179-1187.]
- [7] 张养才,谭凯炎.中国亚热带北界及其过渡带.地理研究,1991,10(2):85-91. [Zhang Yangcai, Tan Kaiyan. The studies of the northern boundary of subtropical zone and its transitional zone in China. Geographical Research, 1991, 10(2): 85-91.]
- [8] 张学忠,张志英.从秦岭南北坡常绿阔叶木本植物的分布谈划分亚热带的北界线问题.地理学报,1979,46(4):342-352. [Zhang Xuezhong, Zhang Zhiying. A preliminary discussion on the northern boundary of subtropical zone in China: Based on the distribution of broadleaf woody evergreens on the Qinling Mountain. Acta Geographica Sinica, 1979, 46(4): 342-352.]
- [9] 张金泉.从地植物学角度试论河南省境内亚热带与暖温带的分界线问题.地理学报,1981,48(2):216-222. [Zhang

- Jinquan. Division between subtropical zone and temperate zone in Henan province according to geo-botany. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 48(2): 216-222.]
- [10] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784. [Kang Muyi, Zhu Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774-2784.]
- [11] 张静静, 王岩松, 朱连奇, 等. 近50年来豫西山地亚热带北界变化分析. *河南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(1): 40-49. [Zhang Jingjing, Wang Yansong, Zhu Lianqi, et al. Study on change of northern subtropical border in mountainous regions in western Henan province. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2016, 46(1): 40-49.]
- [12] 杨强, 郑西楠, 何立恒. 基于HadCM3模式的我国主要气候区划界线时空预测研究. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 17-25. [Yang Qiang, Zheng Xinan, He Liheng. Spatial-temporal shift for major boundary of climate regionalization based on meteorological data stimulated by HadCM3 during from 1950-2059 in China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 17-25.]
- [13] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311. [Zhang Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone. *Progress in Geography*, 2019, 38(3): 305-311.]
- [14] 周广胜, 张新时. 中国气候-植被关系初探. *植物生态学报*, 1996, 20(2): 113-119. [Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on Chinese climate-vegetation relationship. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1996, 20(2): 113-119.]
- [15] Austin M. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, 2017, 200(1): 1-19.
- [16] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567. [Xu Zhonglin, Peng Huanhua, Peng Shouzhang. The development and evaluation of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 557-567.]
- [17] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 样本量对Maxent模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*, 2012, 48(1): 53-59. [Chen Xinmei, Lei Yuancai, Zhang Xiongqing, et al. Effects of sample sizes on accuracy and stability of maximum entropy model in predicting species distribution. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(1): 53-59.]
- [18] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.
- [19] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- [20] Qin A L, Liu B, Guo Q S, et al. 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.
- [21] West A M, Kumar S, Brown C S, et al. Field validation of an invasive species Maxent model. *Ecological Informatics*, 2016, 36: 126-134.
- [22] Nicolás U C, Oscar F V. Ecological niche modeling and prioritization of conservation-area networks for Mexican herpetofauna. *Conservation Biology*, 2010, 24(4): 1031-1041.
- [23] 罗艳, 周浙昆. 青冈亚属植物的地理分布. *云南植物研究*, 2001, 23(1): 1-16. [Luo Yan, Zhou Zhekun. Phytogeography of *Quercus* subg. *Cyclobalanopsis*. *Acta Botanica Yunnanica*, 2001, 23(1): 1-16.]
- [24] 蔡永立, 王希华. 中国东部亚热带青冈种群叶片的生态解剖. *生态学报*, 1999, 19(6): 844-849. [Cai Yongli, Wang Xihua. Anecotomical study on leaves of *Cyclobalanopsis glauca* populations in the eastern subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 844-849.]
- [25] 倪健, 宋永昌. 中国青冈的地理分布与气候的关系. *植物学报*, 1997, 39(5): 451-460. [Ni Jian, Song Yongchang. Relationships between geographical distribution of *Cyclobalanopsis glauca* and climate in China. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(5): 451-460.]
- [26] 曹铭昌, 周广胜, 翁恩生. 广义模型及分类回归树在物种分布模拟中的应用与比较. *生态学报*, 2005, 25(8): 2031-2040. [Cao Mingchang, Zhou Guangsheng, Weng Ensheng. Application and comparison of generalized models and classification and regression tree in simulating tree species distribution. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2031-2040.]
- [27] Kikuzawa K. A cost-benefit analysis of leaf habit and leaf longevity of trees and their geographical pattern. *American Naturalist*, 1991, 138(5): 1250-1263.
- [28] Singh B, Saklani K P, Bhatt B P. Provenance variation in seed and seedlings attributes of *Quercus glauca* Thunb in Garhwal Himalaya, India. *Dendrobiology*, 2010, 63(1): 59-63.
- [29] 陈小勇, 宋永昌. 华东地区青冈种群等位酶变异与环境变量的关系. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1997, 36(5): 774-

780. [Chen Xiaoyong, Song Yongchang. Relationships between environmental factors and allozymic variation of *Cyclobalanopsis glauca* populations in east China. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1997, 36(5): 774-780.]
- [30] 黄石嘉, 李铁华, 文仕知, 等. 青冈栎的生长规律及生物量分布格局研究. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 57-62. [Huang Shijia, Li Tiehua, Wen Shizhi, et al. Study on growth rule and biomass distribution pattern of *Cyclobalanopsis glauca*. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(3): 57-62.]
- [31] Brown J L, Bennett J R, French C M. SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic, and species distribution model analyses. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 694-700.
- [32] FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, JRC. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012.
- [33] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2010, 25(15): 1965-1978.
- [34] Alberto J V, Jorge M L. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. Acta Oecologica, 2007, 31(3): 361-369.
- [35] Araujo M, Pearson R, Thuiller W M. Validation of species-climate impact models under climate change. Global Change Biology, 2010, 11(9): 1504-1513.
- [36] 方精云. 东亚地区植被气候类型在温度、降水量坐标中的表达. 生态学报, 1994, 14(3): 290-294. [Fang Jingyun. Arrangement of east-Asian vegetation-climate types on coordinates of temperature and precipitation. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(3): 290-294.]
- [37] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254-261. [Li Xiaobing, Chen Yunhao, Zhang Yunxia, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 254-261.]
- [38] Feeley K J. Distributional migrations, expansions, and contractions of tropical plant species as revealed in dated herbarium records. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1335-1341.

## Prediction of the suitable distribution of *Cyclobalanopsis glauca* and its implications for the northern boundary of subtropical zone of China

ZHANG Lijuan, LI Yanhong, REN Han, WANG Liyuan, ZHU Wenbo, ZHU Lianqi  
(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Climate plays a major role in biodiversity and vegetation types, and vegetation types and distribution reflect the regional climate. A rise in global mean temperature will lead to changes of global precipitation pattern, vegetation types and their distribution. However vegetation can react to climate change by genetic adaption and ecological buffering; hence, there is a temporal hysteresis in the response of vegetation to climate change. It has some limitations to study the northern boundary of subtropical zone and its movement only by climate indicators. Therefore, we introduced a species distribution model to conduct species potential distribution and reflect the movement of northern boundary of subtropical zone. In this study, we chose *Cyclobalanopsis glauca*, a typical subtropical evergreen broadleaved tree, to investigate the distribution pattern of *Cyclobalanopsis glauca* under climate warming and its implication for the northern boundary movement of subtropical zone. Based on 10 high resolution environmental data under current and future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5), we modeled the present and future suitable habitats for *Cyclobalanopsis glauca* by the maximum entropy model (Maxent) and identified the distribution shifts by centroid movement under two climate change scenarios. The results showed that the area under the receiver operating characteristic curve value was 0.932, indicating that the prediction of the potential distribution for *Cyclobalanopsis glauca* was reliable. Results from the Jackknife test showed that the main environmental variables affecting the distribution of *Cyclobalanopsis glauca* were annual precipitation, precipitation of coldest quarter, temperature annual range and minimum temperature of coldest month, with the cumulative contribution of 94.2%. Currently, the potential suitable habitats areas for *Cyclobalanopsis glauca* encompassed  $17.44 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, mainly located between 18°N-33°N and 91°E-121°E, the high potential habitats account for 25%, and the centroid of the current habitats was located in Yanling in Hunan province (26°31'12"N, 113°41'24"E). Under the two future climate change scenarios, the total suitable area of *Cyclobalanopsis glauca* would increase in the 2050s, the area of new habitats under RCP2.6 and RCP8.5 is  $3.2 \times 10^5$  km<sup>2</sup>; the high potential habitats account for 32% under RCP2.6, however it only accounts for 26% under RCP8.5. Furthermore, the northern boundary of the total suitable area would shift to higher latitudes, and the centroid of the total suitable area would shift to the northwest in the future, indicating that the northern boundary of subtropical zone of China would move poleward of 1° under climate change in the 2050s.

**Keywords:** *Cyclobalanopsis glauca*; climate change; Maxent; suitable distribution; northern boundary of subtropical zone