

气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响

张兴旺^{1a,1b,①}, 李 堃², 谢艳萍^{1a}, 包先明^{1a}, 方炎明²

(1. 淮北师范大学: a. 生命科学学院 资源植物生物学安徽省重点实验室, b. 信息学院, 安徽 淮北 235000;

2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 基于黄山花楸(*Sorbus amabilis* Cheng ex Yü) 24 条现代有效分布记录和 9 个生物气候变量, 利用 MaxEnt 模型和 GIS 技术探讨了黄山花楸的现代地理分布特征和潜在分布区, 评估了制约黄山花楸潜在地理分布的主要气候因子, 并对 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下 2050 年和 2070 年的黄山花楸适宜分布范围及其变化进行了预测。结果表明: 黄山花楸水平分布在北纬 24°57'~31°19'、东经 109°01'~120°17', 其现代地理分布呈现狭域和间断的特点。与整个研究区面积相比, 现代气候条件下黄山花楸总适生区面积所占比例为 12.00%, 主要分布在安徽南部、浙江东南部、福建东南部、湖北西南部、重庆东南部和北部以及台湾东北部; 影响其现代潜在地理分布的主导生物气候变量为温度(平均日温差、最暖季均温和年均温)和降水(年降水量和最暖季降水量), 且温度较降水的影响更大。未来 4 种气候情景下, 黄山花楸不同等级适生区的面积均较现代适生区的面积有不同程度的减小, 且整体上看适生区有向高海拔区域迁移的趋势; 与未来其他 3 种气候情景相比, 2050 年 RCP4.5 气候情景下的异常程度最高; 年降水量、最暖季降水量和平均日温差可能是导致黄山花楸适生区发生变化的重要气候因子。上述研究结果可为黄山花楸种质资源管理和保护提供有价值的参考。

关键词: 黄山花楸; 气候变化; MaxEnt 模型; 潜在地理分布

中图分类号: Q141; Q948.13 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)04-0031-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.04.04

Effect of climate change on potential geographical distribution of *Sorbus amabilis* ZHANG Xingwang^{1a,1b,①}, LI Yao², XIE Yanping^{1a}, BAO Xianming^{1a}, FANG Yangming² (1. HuaiBei Normal University; a. Anhui Key Laboratory of Plant Resource and Biology, College of Life Sciences, b. College of Information, HuaiBei 235000, China; 2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(4): 31-41

Abstract: Based on 24 current valid distribution records and 9 bioclimatic variables of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü, its current geographical distribution characteristics and potential distribution area were explored by using MaxEnt model and GIS technology, and main climate factors restricting its potential geographical distribution were evaluated. Meanwhile, suitable distribution range of *S. amabilis* and its variation in 2050 and 2070 were predicted under climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5. The results show that *S. amabilis* is horizontally distributed in north latitude of 24°57'–31°19' and east longitude of 109°01'–120°17', and its current geographical distribution shows narrow and discontinuous characteristics. Compared with the area of whole research area, percentage of area of total suitable area of *S. amabilis* is 12.00% under current climatic condition, and *S. amabilis* mainly distributes in southern Anhui, southeastern Zhejiang, southeastern Fujian, southwestern Hubei, southeastern and northern Chongqing, and northeastern Taiwan; main bioclimate variables affecting its current potential geographical distribution are temperature (mean diurnal range of temperature, mean temperature of the

收稿日期: 2018-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370666); 安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2017A373); 安徽高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2018163); 资源植物生物学安徽省重点实验室科研基金项目(ZYZWSW2014016); 采煤塌陷区生态修复与利用安徽高校科研平台创新团队项目(KJ2015TD001)

作者简介: 张兴旺(1979—),男,安徽寿县人,博士,副教授,主要从事植物生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: zhangxingwang79@126.com

warmest quarter, and annual mean temperature) and precipitation (annual precipitation and precipitation of the warmest quarter), and the effect of temperature is greater than that of precipitation. Under four future climate scenarios, areas of suitable areas of *S. amabilis* at different classes decrease with different degrees compared with those of current suitable area, and the suitable area shows a tendency to transfer to higher altitude area in general; compared with other three future climate scenarios, the anomaly degree in 2050 under the climate scenario of RCP4.5 will be the highest; annual precipitation, precipitation of the warmest quarter, and mean diurnal range of temperature may be the important climate factors leading to change in suitable area of *S. amabilis*. The research results above mentioned can provide valuable information for management and conservation of germplasm resource of *S. amabilis*.

Key words: *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü; climate change; MaxEnt model; potential geographical distribution

植被与气候之间相互关系的研究一直是植物学、生态学和生物地理学等领域探讨的热点问题。在全球或区域尺度上,气候是决定物种地理分布最重要的因子^[1]。近百年来,受人类活动和自然条件的影响,全球气候正经历着以变暖为主要特征的显著变化。IPCC 第五次评估报告^[2]显示:1880 年至 2012 年,全球平均地表温度升高了 0.85 °C; 预计至 21 世纪末(2081 年至 2100 年),与基准期(1986 年至 2005 年)相比,全球平均地表温度将升高 0.3 °C ~ 4.8 °C。为了应对这一变化,物种的适宜分布范围可能会发生较大改变。已有研究结果^[3-4]表明:气候变暖将驱动物种向高海拔或高纬度区域迁移。此外,气候变化导致一些物种灭绝也获得了许多证据的支持^[5]。研究物种分布格局对未来气候变化的响应对制定有效的生物多样性保护策略具有重要的理论和实践价值。

物种分布模型(species distribution model, SDM)为预测不同气候情景下物种分布格局可能产生的变化的有效方法之一。该模型将环境变量和物种发生数据进行当前关联,通过统计或机器学习程序推导出物种生态位模型,然后将物种生态位模型与未来气候情景下物种的空间分布预测结果相结合,从而得出物种的适宜分布区^[6]。在过去的 20 多年里,物种分布模型发展迅速,研究人员基于不同的算法原理构建了多种物种分布模型,例如 BIOCLIM、DOMAIN、GARP、ENFA、CLIMEX 和 MaxEnt 等^[7-8]。在现有的物种分布模型中,MaxEnt 模型的预测效果最好,即使在样本量很少(小于 20)的情况下,也能取得良好的预测效果^[9]。MaxEnt 模型已被广泛应用于保护生物学、生态学、进化生物学以及入侵物种管理等领域^[6]。

黄山花楸(*Sorbus amabilis* Cheng ex Yü)隶属于蔷薇科(Rosaceae)花楸属(*Sorbus* Linn.),为中国特有

树种,仅分布于安徽、浙江、湖北、湖南、江西和福建等地区海拔 900~2 100 m 的局部高山地带^[10]。黄山花楸的现存数量十分有限,被《中国植物红皮书》列为渐危种^[10]。黄山花楸树姿优美,枝叶婆娑,春季白花满树,秋季叶、果鲜红,是一种优良的高山观赏树种^[11]。此外,黄山花楸还具有一定的经济价值,其材质坚硬、细腻,可作为建筑和家具等用材;树皮可提取栲胶或造纸;茎、叶和果均可入药^[11]。

目前,对黄山花楸的研究主要集中在种群遗传多样性、繁育技术、幼苗光合生理和种子休眠影响因子等方面^[12-14],而气候变化对其地理分布的影响尚未见报道。鉴于此,本文基于文献和标本采集记录,利用 MaxEnt 模型并结合 ArcGIS 10.0 软件,预测黄山花楸在现代(1950 年至 2000 年)和未来(2050 年和 2070 年)气候条件下的潜在分布区,并且,对黄山花楸现代地理分布特征及其与环境因子的关系、未来气候变化背景下黄山花楸适宜分布区和空间格局的变化以及气候变化过程中环境异质区域和引起潜在地理分布改变的关键环境因子进行了探讨,以期对黄山花楸种质资源的管理和保护提供科学依据,并为华东地区高海拔森林植被对气候变化的响应研究奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 分布记录的搜集和筛选及研究区域的确定

通过以下途径获得黄山花楸的地理分布记录: 1) 检索全球生物多样性信息网(GBIF, <http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、教学标本资源共享平台(SRSPE, <http://mnh.scu.edu.cn/>)和中国植物图像库(PPBC,

www.plantphoto.cn/),分别获得黄山花楸分布记录9、98、200和102条,合计409条;2)查阅已出版的文献资料,获得黄山花楸分布记录28条;3)于2016年7月至9月对安徽、浙江、江西和湖北的黄山花楸天然居群进行实地调查,获得黄山花楸分布记录11条。

参考张兴旺等^[8]的方法对上述448条分布记录进行校对,并确定每条分布记录的地理坐标,然后按照以下原则进行筛选:1)去除重复记录和模糊记录;2)去除栽培记录;3)考虑到使用的环境数据精度为2.5',为了避免预测过程中群集效应导致的空间自相关^[15],将分布记录导入ArcGIS 10.0软件,利用Data Management Tools生成2.5'×2.5'的网格,每个网格选取1条分布记录。最终共获得黄山花楸24条有效分布记录(表1),将其保存为cvs格式,待用。

根据黄山花楸上述24条有效分布记录的地理坐标范围,参考马松梅等^[16]的方法,利用ArcGIS 10.0软件中的Extract工具在其四周分别扩展一定的距离

作为研究区域,其地理坐标为北纬17°~57°、东经70°~140°。

1.2 生物气候变量筛选和数据处理

不同时期的气候数据均来源于世界气候数据库(Version 1.4, <http://www.worldclim.org/>),空间分辨率为2.5'。该数据库以现代(1950年至2000年)全球气象站点记录的每月气象资料(降水量、平均降水量以及最高温和最低温)为基础,采用插值法生成全球陆地气候数据(南极洲除外)^[17]。未来(2050年和2070年)的气候数据采用在中国范围内具有较强模拟能力的CCSM4模式。该模式包括4种典型浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)气候情景^[18],分别为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5,本文选择中等(RCP4.5)和最高(RCP8.5)2种气候情景用于黄山花楸潜在分布区的预测。

现代、2050年和2070年的原始数据均包含年均温(bio1)、平均日温差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变化的标准差(bio4)、最暖月最高温(bio5)、最冷

表1 用于MaxEnt模型预测的黄山花楸24条有效分布记录的基本信息

Table 1 Basic information of 24 valid distribution records of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü for MaxEnt model prediction

序号 No.	位置 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	来源 ¹⁾ Source ¹⁾
1	浙江省龙泉市凤阳山 Fengyang Mountain, Longquan City, Zhejiang Province	N27°53'	E119°11'	1 685	SRSPE,2151C0001K00013954
2	浙江省缙云县大洋山 Dayang Mountain, Jinyun County, Zhejiang Province	N28°28'	E120°17'	1 450	SRSPE,2151C0001S60005864
3	浙江省临安市西天目山 West Tianmu Mountain, Lin'an City, Zhejiang Province	N30°22'	E119°25'	1 620	实地调查 Field survey
4	浙江省临安市清凉峰自然保护区 Qingliangfeng Nature Reserve, Lin'an City, Zhejiang Province	N30°07'	E118°53'	1 700	实地调查 Field survey
5	安徽省歙县清凉峰自然保护区 Qingliangfeng Nature Reserve, Shexian County, Anhui Province	N30°06'	E118°52'	1 460	实地调查 Field survey
6	安徽省歙县三阳镇 Sanyang Town, Shexian County, Anhui Province	N30°04'	E118°50'	1 350	CVH,NAS00370549
7	安徽省黄山市黄山玉屏峰 Yupingfeng, Huangshan Mountain, Huangshan City, Anhui Province	N30°07'	E118°10'	1 716	实地调查 Field survey
8	安徽省黄山市黄山始信峰 Shixinfeng, Huangshan Mountain, Huangshan City, Anhui Province	N30°08'	E118°11'	1 680	实地调查 Field survey
9	安徽省黄山市黄山排云亭 Paiyunting, Huangshan Mountain, Huangshan City, Anhui Province	N30°09'	E118°10'	1 612	实地调查 Field survey
10	安徽省黄山市黄山剪刀峰 Jiandaofeng, Huangshan Mountain, Huangshan City, Anhui Province	N30°06'	E118°08'	1 200	实地调查 Field survey
11	安徽省黄山市黄山狮子林 Shizilin, Huangshan Mountain, Huangshan City, Anhui Province	N30°10'	E118°11'	1 217	实地调查 Field survey
12	安徽省金寨县马鬃岭自然保护区 Mazongling Nature Reserve, Jinzhai County, Anhui Province	N31°19'	E115°42'	1 400	文献 Literature
13	安徽省金寨县天堂寨自然保护区 Tiantangzhai Nature Reserve, Jinzhai County, Anhui Province	N31°07'	E115°47'	1 580	实地调查 Field survey
14	安徽省霍山县马家河林场 Majiahe Forest Farm, Huoshan County, Anhui Province	N31°06'	E116°12'	1 200	CVH,NAS00370573
15	湖北省罗田县天堂寨自然保护区 Tiantangzhai Nature Reserve, Luotian County, Hubei Province	N31°05'	E115°46'	1 610	实地调查 Field survey

续表1 Table 1 (Continued)

序号 No.	位置 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	来源 ¹⁾ Source ¹⁾
16	湖北省英山县天堂寨自然保护区 Tiantangzhai Nature Reserve, Yingshan County, Hubei Province	N31°06'	E115°47'	1 252	CVH, CSH0092883
17	江西省广丰县铜钹山自然保护区 Tongbo Mountain Nature Reserve, Guangfeng County, Jiangxi Province	N28°07'	E118°13'	991	文献 Literature
18	江西省铅山县武夷山自然保护区黄岗山 Huanggang Mountain, Wuyi Mountain Nature Reserve, Yanshan County, Jiangxi Province	N27°52'	E117°48'	1 765	实地调查 Field survey
19	福建省建阳县武夷山自然保护区猪母岗 Zhumugang, Wuyi Mountain Nature Reserve, Jianyang County, Fujian Province	N27°46'	E117°44'	1 800	文献 Literature
20	江西省泸溪县武功山白鹤峰 Baihefeng, Wugong Mountain, Luxi County, Jiangxi Province	N27°27'	E114°10'	1 239	CVH, LBG21308
21	江西省玉山县三清山 Sanqing Mountain, Yushan County, Jiangxi Province	N28°54'	E118°04'	1 050	PPBC, 1365054
22	湖北省利川市星斗山自然保护区 Xingdou Mountain Nature Reserve, Lichuan City, Hubei Province	N30°09'	E109°01'	1 400	CVH, HIB34689
23	湖南省宜章县莽山相思坑 Xiangsikeng, Mangshan Mountain, Yizhang County, Hu'nan Province	N24°57'	E112°59'	1 680	CVH, WUK424482
24	湖南省宜章县莽山牛背脊 Niubeiji, Mangshan Mountain, Yizhang County, Hu'nan Province	N24°58'	E113°00'	1 839	SRSPE, 2151C0001J00014660

¹⁾SRSPE 为教学标本资源共享平台,其后编号为标本的平台资源号 SRSPE represents Specimen Resources Sharing Platform for Education, and the subsequent code represents resource number of specimen; CVH 为中国数字植物标本馆,其后编号为标本的馆藏条形码 CVH represents Chinese Virtual Herbarium, and the subsequent code represents bar code of specimen; PPBC 为中国植物图像库,其后编号为图片编号 PPBC represents Plant Photo Bank of China, and the subsequent code represents ID of photo.

月最低温 (bio6)、年均温变化范围 (bio7)、最湿季均温 (bio8)、最干季均温 (bio9)、最暖季均温 (bio10)、最冷季均温 (bio11)、年降水量 (bio12)、最湿月降水量 (bio13)、最干月降水量 (bio14)、降水量的季节性变异系数 (bio15)、最湿季降水量 (bio16)、最干季降水量 (bio17)、最暖季降水量 (bio18) 和最冷季降水量 (bio19) 19 个生物气候变量。为了避免最大熵模拟过程中出现过拟合 (overfitting) 现象,运用 DIVA-GIS 7.5 软件提取 24 条有效分布记录的 19 个生物气候变量,对这些数据进行 Pearson 相关性分析^[19]。在一组高度相关 ($r > 0.8$) 的生物气候变量中,只选取 1 个生物气候变量用于本研究,最后筛选出 bio1、bio2、bio3、bio4、bio8、bio10、bio12、bio15 和 bio18 共 9 个生物气候变量。根据本研究区域,运用 ArcGIS 10.0 软件对上述 3 个时期共 27 个气候图层数据进行裁剪,然后转换成 ASCII 格式用于后续分析。

1.3 基于 MaxEnt 模型的模拟分析

将 24 条有效分布记录以及现代和未来生物气候变量分别导入 MaxEnt 3.3.3k 软件,预测黄山花楸不同时期的潜在分布区。

1.3.1 模型参数设置 采用交叉验证 (cross-validation) 的方法并执行 10 次重复进行模拟预测^[20]。将全部分布记录随机分为 10 个子集,每次使用其中 1 个子集作为验证集,而其他子集作为训练

集。软件其他参数保持缺省设置。

1.3.2 模型预测精度评估 采用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线下的面积 (area under the curve, AUC) 评估模型的预测精度。AUC 值越接近 1 表示模型预测效果越好。参考文献 [21] 将模型预测精度的评估标准划分为较差 ($AUC \leq 0.80$)、一般 ($0.80 < AUC \leq 0.90$)、好 ($0.90 < AUC \leq 0.95$) 和很好 ($0.95 < AUC \leq 1.00$) 4 个等级。

1.3.3 潜在分布区适生等级划分 在输出文件中,选择 10 次重复的平均值作为本研究的预测结果。该结果是基于物种的存在概率逻辑值 (P) 生成 ASCII 栅格图层, P 值范围为 0~1, P 值越大表示物种存在的可能性越大。利用 ArcGIS 10.0 软件将预测结果转换成 raster 格式,对适生区进行等级划分和可视化处理。基于 P 值,采用等间距法^[20] 将其适生区划分为 5 个等级,分别为高度适生区 ($0.8 \leq P \leq 1.0$)、中度适生区 ($0.6 \leq P < 0.8$)、一般适生区 ($0.4 \leq P < 0.6$)、低度适生区 ($0.2 \leq P < 0.4$) 和不适生区 ($0.0 \leq P < 0.2$)。统计每个等级的栅格数,计算不同时间段各等级适生区面积所占比例。

1.3.4 生物气候变量的重要性分析 为了确定生物气候变量在限制黄山花楸现代地理分布格局中的重要性,使用贡献率 (contribution rate)、置换重要值 (permutation importance) 和 Jackknife 检验对其进行

综合评估。MaxEnt 模型在训练时可以追踪到对模型贡献率高的生物气候变量,每次运算均通过修正单一要素的系数来提高模型增益,然后将增加的增益值分配给该要素依赖的生物气候变量,最后以百分比的形式列出。置换重要值仅取决于最终构建的 MaxEnt 模型,每个变量的贡献率用百分比表示,置换重要值取决于该变量在训练点(包括存在点和背景点)中的随机置换值以及由此导致的 AUC 值的下降幅度,降幅越大表明模型对该变量的依赖性越大。Jackknife 检验通过依次使用某一生物气候变量、依次排除某一生物气候变量和使用所有生物气候变量创建模型,并提供了正规化训练增益、测试增益和 AUC 值 3 种检测结果来衡量生物气候变量的重要性。

1.3.5 多元环境相似度面和最不相似变量分析 采用多元环境相似度面(multivariate environmental similarity surface, MESS)和最不相似变量(the most dissimilar variable, MoD)分析未来气候背景下黄山花楸潜在分布区的环境变化程度及其关键驱动因子。MESS 分析首先确定生物气候变量参考图层,然后计算不同气候条件下的生物气候变量与参考图层生物气候变量点集之间的相似度(similarity, S)。当 S 值为正值时, S 值越小表示该点的气候差异越大, S 值为 100.00 时,表示没有差异;当 S 值为负值时,表示该点至少有 1 个生物气候变量的 S 值超出了参考范围,该点的环境变化极大^[22]。预测图层上某个点 S 值最小的生物气候变量即为该点的最不相似变量^[22]。本研究选择能够涵盖黄山花楸 24 条有效分布记录地理坐标范围(北纬 $21^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 、东经 $102^{\circ} \sim 123^{\circ}$)的生物气候变量为参考图层,利用 maxent.jar 文件中的 density.tools.Novel 工具完成预测,并用 ArcGIS 10.0 软件进行可视化处理。

2 结果和分析

2.1 黄山花楸的现代地理分布区

黄山花楸水平分布在北纬 $24^{\circ}57' \sim 31^{\circ}19'$ 、东经 $109^{\circ}01' \sim 120^{\circ}17'$,北可分布至安徽大别山一带,南可分布至湖南宜章,西可分布至湖北利川,东可分布至浙江缙云,集中分布区为安徽的黄山和大别山、浙皖交界的清凉峰和西天目山、浙江东南山区以及闽赣交界的武夷山。整体来看,黄山花楸地理分布呈狭域和间断的特点。

2.2 现代气候条件下黄山花楸的潜在分布区

MaxEnt 模型预测的输出结果中,训练 AUC 值和测试 AUC 值分别为 $0.998\ 6 \pm 0.000\ 6$ 和 $0.997\ 9 \pm 0.001\ 9$,说明 MaxEnt 模型对黄山花楸潜在地理分布的预测效果很好,稳定性较高。

MaxEnt 模型预测的现代气候条件下黄山花楸的潜在分布区见图 1。由图 1 可见:黄山花楸适生区主要位于安徽南部、浙江东南部、福建东南部、湖北西南部、重庆的东南部和北部以及台湾东北部,零星分布于广东、广西、贵州、湖南和江西的部分地区。其高度适生区主要位于浙闽交界东南部、湖北西南部和重庆东南部。此外,在安徽的黄山和大别山、浙皖交界清凉峰、浙江西天目山、闽赣交界武夷山、湖南罗霄山以及广东和广西的南岭山地局部区域也存在高度适生区。24 条有效分布记录的存在概率逻辑值中,最高值为安徽黄山剪刀峰(0.87),最低值为湖南宜章莽山牛背脊(0.18),平均值为 0.70。从预测结果来看,黄山花楸的现代地理分布区与其潜在分布区具有较高的一致性。

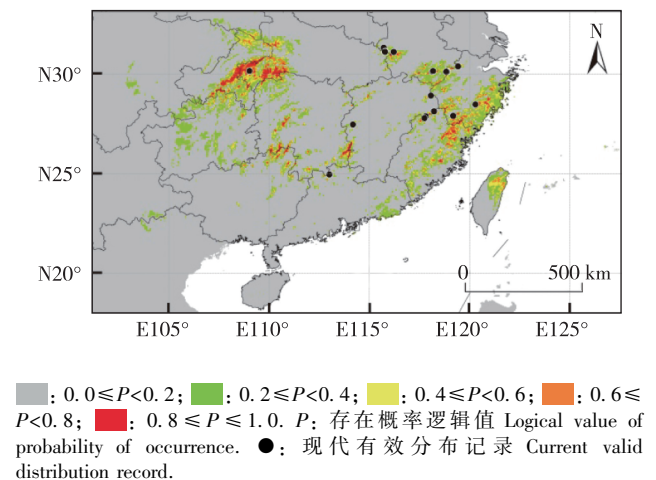
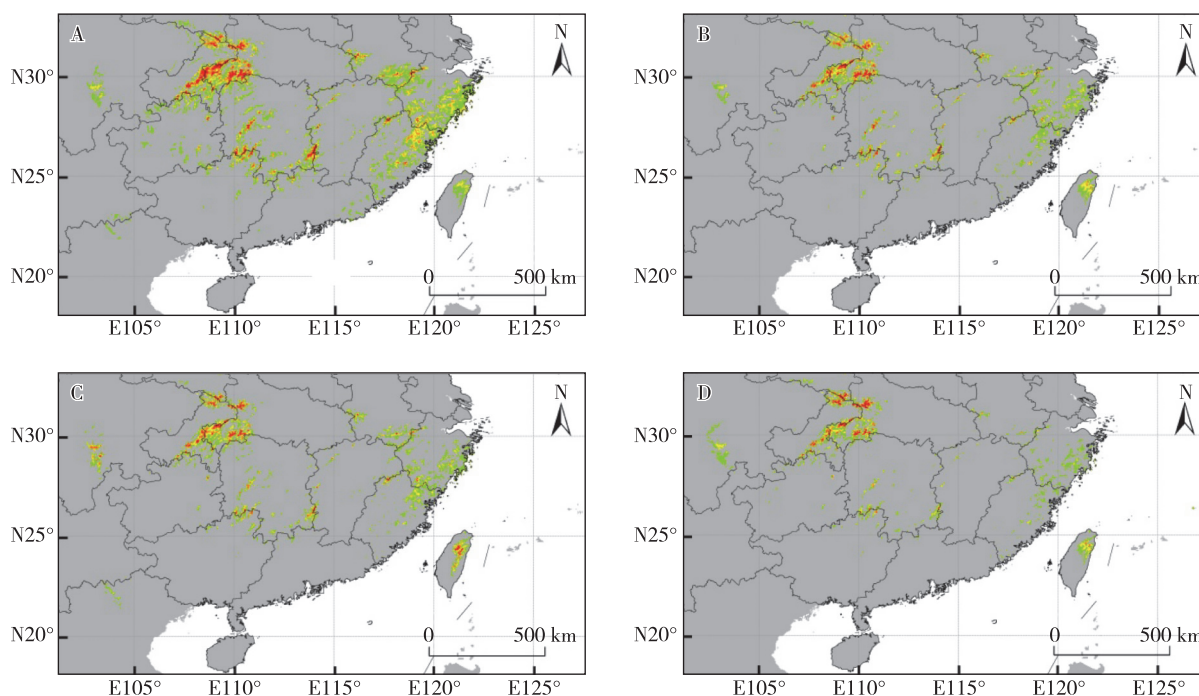


图 1 MaxEnt 模型预测的现代气候条件下黄山花楸的潜在分布区
Fig. 1 Potential distribution area of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü under current climate condition predicted by MaxEnt model

2.3 未来气候情景下黄山花楸的潜在分布区

相对于现代气候条件下的潜在分布区,2050 年 RCP4.5 气候情景下(图 2-A),黄山花楸的适生区发生了一些变化:浙闽交界东南部、浙皖交界清凉峰以及安徽的黄山和大别山的高度适生区基本消失,湘赣交界罗霄山和湘桂交界南岭山地的高度适生区略有减少,而湖北、重庆和陕西交界的大巴山地区的高度



■: $0.0 \leq P < 0.2$; ■: $0.2 \leq P < 0.4$; ■: $0.4 \leq P < 0.6$; ■: $0.6 \leq P < 0.8$; ■: $0.8 \leq P \leq 1.0$. P : 存在概率逻辑值 Logical value of probability of occurrence.

A: RCP4.5 (2050年) RCP4.5 (in 2050); B: RCP8.5 (2050年) RCP8.5 (in 2050); C: RCP4.5 (2070年) RCP4.5 (in 2070); D: RCP8.5 (2070年) RCP8.5 (in 2070).

图 2 MaxEnt 模型预测的未来气候情景下的黄山花楸潜在分布区

Fig. 2 Potential distribution area of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü under future climate scenario predicted by MaxEnt model

适生区增加;台湾的中度适生区完全消失;与现代气候条件下的潜在分布区相比较,黄山花楸整个适生区的破碎化程度提高且其面积有一定收缩。2050年 RCP8.5 和 2070年 RCP4.5 气候情景下(图 2-B,C),适生区面积均有不同程度的减少;但台湾的适生区面积降幅不大,且中度和高度适生区面积有所增加并向中部迁移。在 2070年 RCP8.5 气候情景下(图 2-D),黄山花楸高度适生区主要位于重庆和湖北交界的武陵山以及湖北、重庆和陕西交界的大巴山部分区域,除浙江东南部、福建东北部和台湾存在少量适生区外,其他区域的适生区呈零星分布或完全消失。

提取不同等级适生区的栅格数据并计算其面积变化,结果(表 2)显示:与现代(1950年至 2000年)气候条件相比,未来(2050年和 2070年) RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下黄山花楸不同等级适生区的面积均不同程度减小。其中,2070年 RCP8.5 气候情景下的降幅最大,总适生区面积所占比例为 3.36%,其低度适生区、一般适生区、中度适生区和高度适生区

面积所占比例分别为 2.30%、0.61%、0.26% 和 0.19%。提取 24 条现代有效分布记录在未来气候情景下的存在概率逻辑值,结果表明:现代气候条件下的平均适生度最高(0.70),2050年 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下的平均适生度较低,分别为 0.57 和 0.38,2070年 RCP8.5 气候情景下的平均适生度最低(0.15)。方差分析结果表明:5 种气候条件下黄山花楸现代有效分布记录的平均适生度之间差异显著。

2.4 未来气候情景下黄山花楸潜在分布区的多元环境相似度面和最不相似变量分析

未来气候情景下,整个潜在分布区内气候异常区域(粉色区域)的面积不断扩大,其中,2050年和 2070年 RCP8.5 气候情景下气候异常区域面积的增幅大于 RCP4.5 气候情景(图 3)。对比未来同一时期同一气候情景下的潜在分布区(图 2),气候异常区域内均没有预测到黄山花楸的适生区。在 2050年 RCP4.5、2050年 RCP8.5、2070年 RCP4.5 和 2070年

表 2 不同气候条件下黄山花楸不同等级适生区面积的变化

Table 2 Changes in area of suitable areas of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü at different classes under different climate conditions

时期 Period	气候情景 Climate scenario	不同等级适生区面积所占比例/% Percentage of area of suitable areas at different classes					现代有效分布记录的 平均适生度 ¹⁾ Average suitability of current valid distribution record ¹⁾
		低度适生区 Low suitable area	一般适生区 General suitable area	中度适生区 Medium suitable area	高度适生区 High suitable area	总适生区 Total suitable area	
现代 Current							
1950—2000		7.69	2.22	1.26	0.83	12.00	0.70aA
未来 Future							
2050	RCP4.5	6.07	2.03	0.88	0.52	9.50	0.57bAB
	RCP8.5	2.99	0.95	0.45	0.23	4.62	0.38cC
2070	RCP4.5	3.11	1.01	0.49	0.21	4.82	0.47bcBC
	RCP8.5	2.30	0.61	0.26	0.19	3.36	0.15dD

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 差异, 分别表示 (P < 0.05) 和极显著 (P < 0.01) 差异, 分别表示。

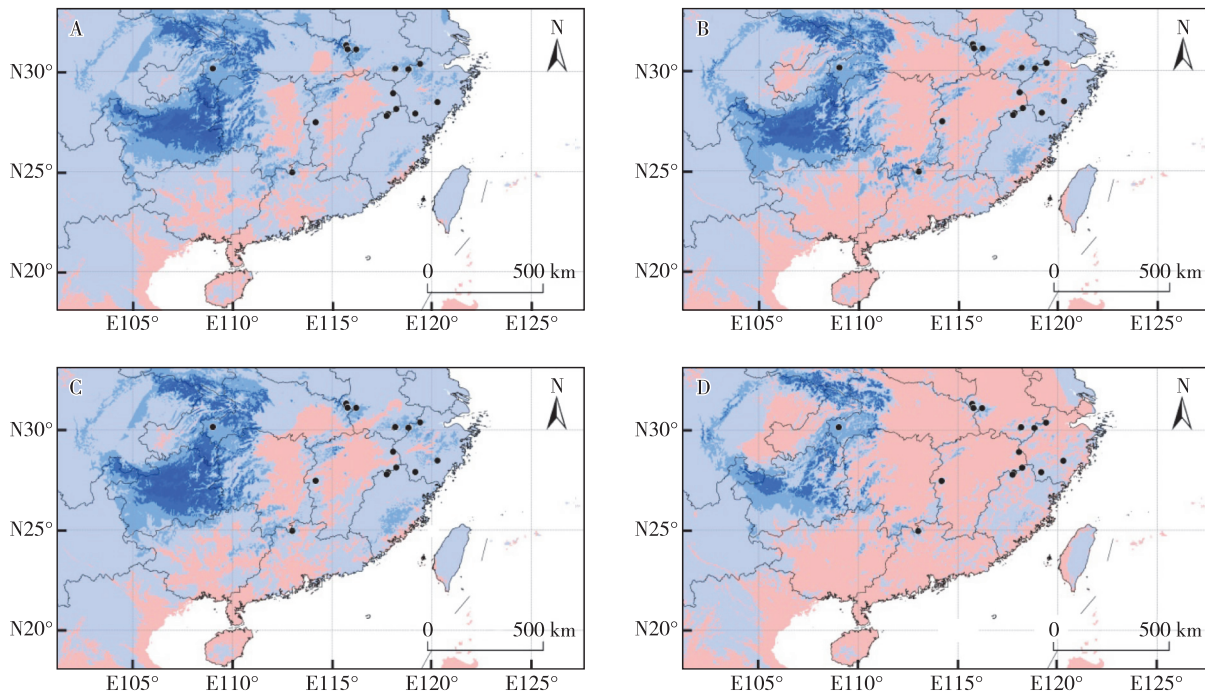


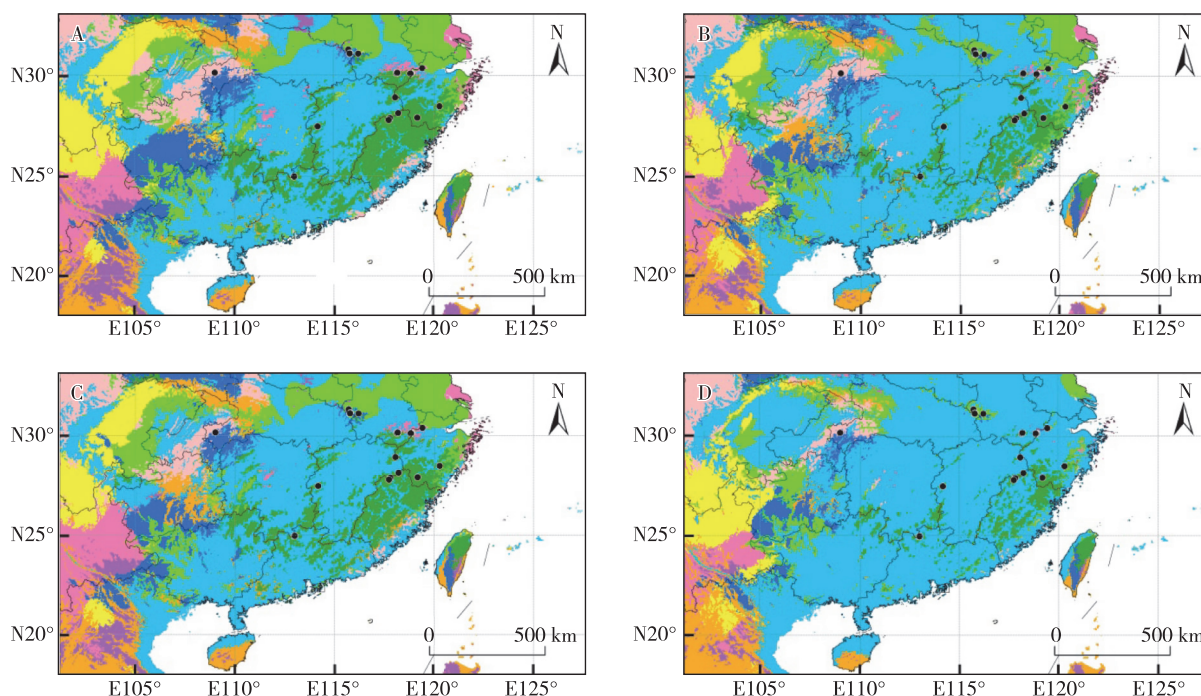
图 3 未来气候情景下黄山花楸潜在分布区的多元环境相似度面 (MESS) 分析
Current valid distribution record.

A: RCP4.5(2050年) RCP4.5 (in 2050); B: RCP8.5(2050年) RCP8.5 (in 2050); C: RCP4.5(2070年) RCP4.5 (in 2070); D: RCP8.5(2070年) RCP8.5 (in 2070).

图 3 未来气候情景下黄山花楸潜在分布区的多元环境相似度面 (MESS) 分析
Fig. 3 Analysis on multivariate environmental similarity surface (MESS) of potential distribution area of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü under future climate scenario

RCP8.5 气候情景下, 黄山花楸 24 条现代有效分布记录的相似度的平均值分别为 8.41、10.65、10.12 和 10.00, 说明 2050 年 RCP4.5 气候情景下异常程度较高, 其他 3 种气候情景下异常程度较低。

最不相似变量分析结果(图 4)显示: 在未来 4 种气候情景下, 影响黄山花楸现代分布区的最不相似变量主要有年降水量、最暖季降水量和平均日温差。位于东南地区的分布点 (主要分布在安徽的黄山和歙



■: 年均温 Annual mean temperature; ■: 平均日温差 Mean diurnal range of temperature; ■: 等温性 Isothermality; ■: 温度季节性变化的标准差 Standard deviation of variation of temperature seasonality; ■: 最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter; ■: 最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter; ■: 年降水量 Annual precipitation; ■: 降水量的季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality; ■: 最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter. ●: 现代有效分布记录 Current valid distribution record.

A: RCP4.5 (2050年) RCP4.5 (in 2050); B: RCP8.5 (2050年) RCP8.5 (in 2050); C: RCP4.5 (2070年) RCP4.5 (in 2070); D: RCP8.5 (2070年) RCP8.5 (in 2070).

图 4 未来气候情景下黄山花楸现代分布区的最不相似变量 (MoD) 分析
Fig. 4 Analysis on the most dissimilar variable (MoD) of current distribution area of *Sorbus amabilis* Cheng ex Yü under future climate scenario

县,浙江的龙泉和缙云,福建建阳,以及江西的广丰、铅山、泸溪和玉山)在不同气候情景下最不相似变量均为年降水量;而其余分布点(主要分布在浙江临安,安徽的金寨和霍山,湖北的罗田和英山,湖南宜章以及湖北利川)的最不相似变量存在一定的差异,其中安徽金寨的天堂寨自然保护区和马家河林场以及浙江临安西天目山的最不相似变量为年降水量和最暖季降水量,湖南宜章莽山的相思坑和牛背脊以及浙江临安清凉峰自然保护区的最不相似变量为年降水量,湖北利川星斗山自然保护区和安徽金寨马鬃岭自然保护区的最不相似变量分别为平均日温差和最暖季降水量。

2.5 影响黄山花楸现代潜在地理分布的主导生物气候变量

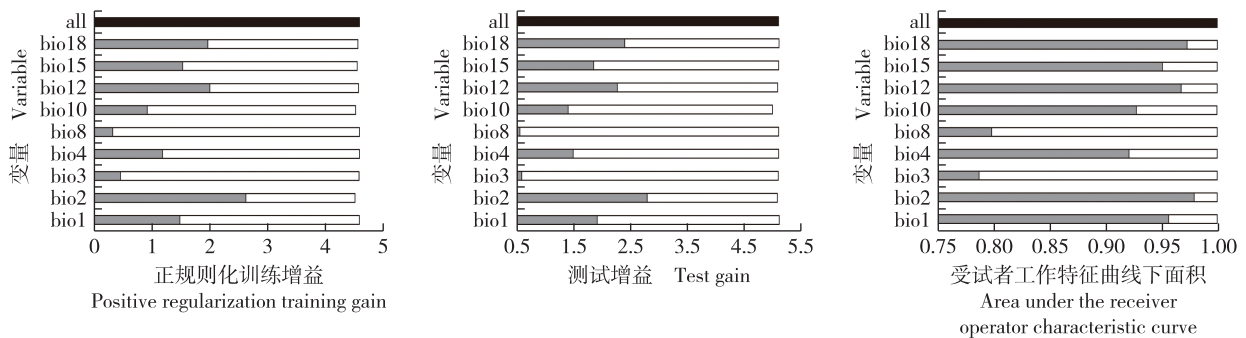
用于模型预测的 9 个生物气候变量(表 3)中,贡献率位居前 3 位的生物气候变量依次为年降水量

(bio12,46.585%)、平均日温差(bio2,22.393%)和年均温(bio1,21.324%),其累计值可达 90.302%;置换重要值位居前 3 位的生物气候变量分别为平均日温差(bio2,57.925%)、最暖季均温(bio10,29.707%)和年降水量(bio12,4.182%),其累计值可达 91.814%。

Jackknife 检验结果(图 5)表明:仅使用某一生物气候变量时,对正规化训练增益影响最大的 3 个生物气候变量分别为平均日温差(bio2)、年降水量(bio12)和最暖季降水量(bio18),对测试增益和 AUC 值影响最大的 3 个生物气候变量分别为平均日温差(bio2)、最暖季降水量(bio18)和年降水量(bio12);依次排除某一生物气候变量时,正规化训练增益减少最多的 3 个生物气候变量分别为平均日温差(bio2)、最暖季均温(bio10)和年降水量(bio12),测试增益和 AUC 值减少最多的 3 个生物气候变量分别为最暖季均温(bio10)、平均日温差(bio2)和年降水量

表 3 用于 MaxEnt 模型预测的 9 个生物气候变量的贡献率和置换重要值
Table 3 Contribution rate and permutation importance of nine bioclimatic variables used for MaxEnt model prediction

编号 Code	生物气候变量 Bioclimatic variable	单位 Unit	贡献率/% Contribution rate	置换重要值/% Permutation importance
bio1	年均温 Annual mean temperature	℃	21.324	0.092
bio2	平均日温差 Mean diurnal range of temperature	℃	22.393	57.925
bio3	等温性 Isothermality	%	1.678	0.893
bio4	温度季节性变化的标准差 Standard deviation of variation of temperature seasonality	℃	0.185	0.000
bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃	0.002	0.002
bio10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃	4.864	29.707
bio12	年降水量 Annual precipitation	mm	46.585	4.182
bio15	降水量的季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	%	2.052	3.499
bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm	0.916	3.699



灰色、白色和黑色条形图分别表示使用某一生物气候变量、排除某一生物气候变量和使用所有生物气候变量的 MaxEnt 模型预测结果 Grey, white, and black bars represent prediction results of running MaxEnt model with only bioclimatic variable, without bioclimatic variable, and with all bioclimatic variables, respectively. bio1: 年均温 Annual mean temperature; bio2: 平均日温差 Mean diurnal range of temperature; bio3: 等温性 Isothermality; bio4: 温度季节性变化的标准差 Standard deviation of variation of temperature seasonality; bio8: 最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter; bio10: 最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter; bio12: 年降水量 Annual precipitation; bio15: 降水量的季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality; bio18: 最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter; all: 所有生物气候变量 All bioclimatic variables.

图 5 用于 MaxEnt 模型预测的 9 个生物气候变量的 Jackknife 检验结果
Fig. 5 Jackknife test result of nine bioclimatic variables used for MaxEnt model prediction

(bio12), 说明这些生物气候变量拥有更多的信息。综合来看, 影响黄山花楸现代潜在地理分布的主导生物气候变量为温度(平均日温差、最暖季均温和年均温)和降水(年降水量和最暖季降水量)。

3 讨 论

3.1 黄山花楸的现代地理分布特征及其成因

本研究结果表明: 黄山花楸的地理分布呈现狭域和间断的特点。一般认为, 对现代物种地理分布影响较大的地质事件是发生在距今约 26 500~19 000 a 的第四纪末次盛冰期^[23]。在第四纪末次盛冰期, 亚洲大陆温度较现在大约低 5 ℃~11 ℃, 末次盛冰期过后, 气候变暖, 间歇性出现几个小冰期^[24]。黄山花楸是第三纪或更早时期的孑遗植物, 其原始类型为北温

带分布型, 在地质历史时期, 黄山花楸沿着山脉向南扩散至热带山区, 甚至可达南半球的温带地区^[25]。由于受第四纪冰期-间冰期交替循环所致气候波动的影响, 黄山花楸不同地理种群不断经历灭绝、隔离以及适应新环境的过程, 加之青藏高原的隆升使内陆大气环流发生改变, 中国西部高原和北部地区的气候日趋干冷, 不适宜黄山花楸生存。在长期的环境变迁过程中, 最终促成了黄山花楸现代地理分布格局的形成。

此外, 人类活动干扰也可能对黄山花楸的地理分布产生一定影响。随着人类活动干扰的增加, 中国的森林覆盖率由原始社会(公元前 2000 年)的 64% 下降到清代初期(1644 年)的 21% 左右, 而到 1949 年全国森林覆盖率已降至 8.6%。森林资源的大面积减少不仅会导致天然林的片段化, 也会造成

一些物种分布区的消失^[26]。黄山花楸闽北-赣西北、浙南、浙西北-皖东南、皖西-鄂东北和鄂西南间断分布的地理格局也可能与人类活动干扰有着密切的关系。

3.2 未来气候情景下黄山花楸潜在分布区的变化

气候变化对物种的地理分布会产生复杂的影响,国内外学者对此开展了大量研究。McKenney 等^[27]预测了北美 130 种树木对未来气候变化的响应发现,在 2 种不同的假设条件下,所有树木的平均分布范围分别减少了 12% 和 58%,并向北迁移了 700 和 330 km。Lenoir 等^[28]比较了西欧 171 种森林树种在过去 3 个时间段内海拔分布的数据,发现气候变暖将导致物种分布的平均海拔每 10 年上升 29 m。Engler 等^[29]研究了气候变化对分布于欧洲主要山脉 2 632 种植物的影响,结果显示:至 21 世纪中后期(2070 年至 2100 年),36%~55% 的高山植物、31%~51% 的亚高山植物和 19%~46% 的山地植物的适宜生境都减少 80% 以上。吴建国^[30]研究气候变化对中国 7 种乔木树种分布范围影响时发现,所有树种的现代适宜分布范围均减小,未来不同时段其分布区主要向高海拔区域扩张。上述研究结果表明:在气候变化的背景下,物种现代适生区范围将会缩减,其适生区有向高纬度和高海拔区域迁移的趋势。本研究结果与上述结论基本一致。MaxEnt 模型预测显示:与现代气候条件下黄山花楸的潜在分布区相比,未来(2050 年和 2070 年)不同气候情景下黄山花楸整个适生区呈面积减少、生境破碎化的特点,位于中、低海拔的适生区基本消失或适宜度明显降低。黄山花楸分布北界的适宜度有所升高,但未向高纬度区域明显扩张。MESS 分析结果表明:未来气候情景下,黄山花楸潜在分布区的北部或低海拔区域的气候异常程度较高。结合 MoD 分析结果可知:限制黄山花楸向高纬度地区迁移的主要气候因子为最暖季均温。黄山花楸对温度的要求较为严格,在未来气候变化的情景下,预估中国气候整体呈现变暖、变湿现象,且高原和北方区域温度和空气相对湿度的增幅要高于南方^[31]。由于不能耐受中国北方或低海拔较高的温度条件,黄山花楸的适生区并没有向高纬度区域扩张,而在陕西、湖南、湖北、重庆和台湾等地分布有高大山脉(如武陵山、大巴山、秦岭和雪山等),这些山脉的平均海拔较高,能为黄山花楸生长提供温凉的气候条件,因此,在未来气候变化的情景下,黄山花楸的适生区向高海

拔迁移。

3.3 影响黄山花楸潜在地理分布的气候因子

MaxEnt 分析结果显示:在现代气候条件下,温度和降水可能是制约黄山花楸潜在地理分布格局的共同因子。本研究中,采用 8 个指标来评估影响黄山花楸现代地理分布的主导生物气候变量,结果表明:与温度有关的生物气候变量(平均日温差和最暖季均温)7 次位列第 1,5 次位列第 2;而与降水有关的生物气候变量(年降水量和最暖季降水量)1 次位列第 1,3 次位列第 2。综合来看,温度的影响较降水更大。许多研究者对同域分布其他植物的研究也得出了类似结论。李焱等^[20]采用相同的方法对小叶栎(*Quercus chenii* Nakai)8 个气候变量进行了分析,结果显示:热量指标是限制小叶栎地理分布的首要因子,水分指标次之;李晓笑等^[32]对亚热带地区 4 种极危冷杉属(*Abies* Mill.)植物的水热指标进行了因子分析,结果表明:对这 4 种冷杉属植物地理分布影响较大的 3 个气候变量依次为低温因子、极端低温因子和湿度因子。黄山花楸喜凉爽、湿润的气候条件,中国亚热带中山和高山地带能够满足黄山花楸对生境的要求,因此,黄山花楸的现代潜在适生区主要位于这些区域。

MoD 分析结果表明:在未来气候情景下,位于江西、浙江西部和南部以及安徽南部地区的黄山花楸现代潜在地理分布主要受年降水影响,而位于安徽西部、浙江西北部、湖北和湖南的分布点主要受年降水量、最暖季降水量和平均日温差影响。黄山花楸不耐水湿,在排水良好的酸性黄棕壤中生长良好。未来中国长江中下游及其以北地区的降水将普遍增加,且随着温度的升高蒸散量也会变大,因此,低海拔区域的适宜生境将大幅减少。

在大的空间尺度上,气候因子是决定物种潜在地理分布的重要因子^[33],但其他因子的影响也不容忽视,例如土壤条件、物种间的相关作用、物种的迁移能力以及物种或种群对新环境的适应能力等^[34]。由于目前认知水平和技术条件的限制,本研究中未将其列入研究内容。但本研究基于现有水平,对当前和未来气候情景下黄山花楸的潜在适生区进行了预测,并探讨了制约其潜在地理分布的主要气候因子,为黄山花楸的引种栽培和制定合理保护措施提供了有价值的参考。

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] Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 161-162.
- [3] WILSON R J, GUTIÉRREZ D, GUTIÉRREZ J, et al. An elevational shift in butterfly species richness and composition accompanying recent climate change[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 1873-1887.
- [4] ROBERTS D R, HAMANN A. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: a palaeoecological perspective[J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21: 121-133.
- [5] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [6] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190: 231-259.
- [7] 王娟,倪健. 植物种分布的模拟研究进展[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 1040-1053.
- [8] 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.
- [9] KUMAR S, STOHLGREN T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia[J]. Journal of Ecology and Natural Environment, 2009, 1: 94-98.
- [10] 傅立国. 中国植物红皮书——稀有濒危植物(第一册)[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 560.
- [11] 胡嘉琪,梁诗文. 黄山植物[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 218.
- [12] 刘登义,沈浩,杨月红,等. 黄山花楸种群遗传多样性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2141-2144.
- [13] 陈昕,曹珊珊,张红星. 黄山花楸种子休眠解除技术及其解剖学观察[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 23-26.
- [14] 陈昕,张红星,张振英. 黄山花楸幼苗对遮荫的形态、解剖和光合生理响应[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 24-27, 33.
- [15] WALTARI E, HIJMANS R J, PETERSON A T, et al. Locating pleistocene refugia: comparing phylogeographic and ecological niche model predictions[J]. PLoS One, 2007, 2: e563.
- [16] 马松梅,聂迎彬,耿庆龙,等. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 262-269.
- [17] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965-1978.
- [18] 王绍武,罗勇,赵宗慈,等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 305-307.
- [19] ZHANG M G, ZHOU Z K, CHEN W Y, et al. Major declines of woody plant species ranges under climate change in Yunnan, China[J]. Diversity and Distributions, 2014, 20: 405-415.
- [20] 李垚,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.
- [21] ADHIKARI D, BARIK S K, UPADHAYA K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India[J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 37-43.
- [22] ELITH J, KEARNEY M, PHILIPS S. The art of modelling range-shifting species[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1: 330-342.
- [23] HEWITT G. The genetic legacy of the Quaternary ice ages[J]. Nature, 2000, 405: 907-913.
- [24] 施雅风. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006: 65-67.
- [25] 沈浩. 黄山花楸的致濒机制及保护的研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学生命科学院, 2002: 60-61.
- [26] 张连伟. 中国古代森林变迁史研究综述[J]. 农业考古, 2012(3): 208-218.
- [27] MCKENNEY D W, PEDLAR J H, LAWRENCE K, et al. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees[J]. BioScience, 2007, 57: 939-948.
- [28] LENOIR J, GÉGOUT J C, MARQUET P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. Science, 2008, 320: 1768-1771.
- [29] ENGLER R, RANDIN C F, THUILLER W, et al. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe[J]. Global Change Biology, 2011, 17: 2330-2341.
- [30] 吴建国. 气候变化对7种乔木植物分布的潜在影响[J]. 植物分类与资源学报, 2011, 33(3): 335-349.
- [31] 江志红,张霞,王冀. IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化的情景预估[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 787-799.
- [32] 李晓笑,陶翠,王清春,等. 中国亚热带地区4种极危冷杉属植物的地理分布特征及其与气候的关系[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1154-1164.
- [33] 闻志彬,张杰,张明理. 中国特有种天山猪毛菜的地理分布及潜在分布区预测[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(1): 81-87.
- [34] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.

(责任编辑:张明霞)