

野桂花和管花木犀的适宜分布区及主要气候变量分析

李涌福^{a,b,c}, 张成^{a,b,c}, 朱弘^{a,c}, 李璇^{a,c}, 段一凡^{a,b,c,①}, 王贤荣^{a,b,c,①}

(南京林业大学: a. 生物与环境学院, b. 木犀属品种国际登录中心, c. 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 基于野桂花 [*Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green] 和管花木犀 (*O. delavayi* Franch.) 的分布记录和气候变量, 利用 MaxEnt 模型预测其现代适宜分布区和未来 (2070 年) 潜在适宜分布区, 利用贡献率、置换重要值和 Jackknife 检验评价影响其分布的主要气候变量, 并利用限制因子映射工具模拟各分布区主要气候变量的分布模型。结果表明: 当正则化参数为 0.5、参数组合为线性+二次型 (L+Q) 时, 野桂花和管花木犀 MaxEnt 模型的 AIC 值最小, 分别为 1 170.4 和 817.9, AUC 值最大, 分别为 0.976 和 0.948, 表明优化参数后的 MaxEnt 模型预测精度非常高。利用该模型预测的野桂花和管花木犀的现代适宜分布区相似, 主要包括四川、云南、广西西部、西藏东南部和贵州西部, 其适生区面积分别占中国总面积的 3.52% 和 4.21%, 高度适生区面积分别占中国总面积的 1.02% 和 1.14%。在 RCP8.5 气候情景下, 野桂花的未来潜在适宜分布区向东部和北部扩张, 适生区和高度适生区的面积分别为 8.21% 和 0.30%; 而管花木犀的未来潜在适宜分布区向西部和北部扩张, 适生区和高度适生区的面积分别为 4.41% 和 1.10%。依据贡献率、置换重要值和 Jackknife 检验, 影响野桂花和管花木犀分布的主要气候变量均为气温季节性变化、年平均气温和年降水量; 并且, 在存活概率为 0.5 时, 野桂花适宜分布区 3 个气候变量的方差范围大于管花木犀, 说明野桂花的生态适应范围更广。另外, 年平均气温限制了野桂花分布区的东界, 年降水量制约其向北移动; 年降水量限制了管花木犀分布区的南界。研究结果显示: 优化参数后的 MaxEnt 模型预测结果非常准确, 预测的野桂花和管花木犀的现代适宜分布区均为四川、云南、广西西部、西藏东南部和贵州西部, 而其未来潜在适宜分布区却存在差异; 温度和降水是影响其分布的主要气候变量, 但不同分布区的主要气候变量却存在差异。

关键词: 野桂花; 管花木犀; MaxEnt 模型; 适宜分布区; 主要气候变量

中图分类号: Q948.1; S685 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)01-0071-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.01.09

Analyses on suitable distribution areas and main climatic variables of *Osmanthus yunnanensis* and *O. delavayi* LI Yongfu^{a,b,c}, ZHANG Cheng^{a,b,c}, ZHU Hong^{a,c}, LI Xuan^{a,c}, DUAN Yifan^{a,b,c,①}, WANG Xianrong^{a,b,c,①} (Nanjing Forestry University: a. College of Biology and the Environment, b. International Cultural Registration Center for Osmanthus, c. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(1): 71-78

Abstract: Based on distribution records and climatic variables of *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green and *O. delavayi* Franch., their present suitable distribution areas and potential suitable distribution areas in the future (in 2070) were predicted by using MaxEnt model, and the main climatic variables affecting their distributions were evaluated by using contribution rate, permutation importance, and Jackknife test, meanwhile, the distribution models of main climatic variables in each distribution area were simulated by using limiting factor mapping tools. The results show that when regularization parameter of 0.5 and parameter combination of linearity+quadratic type (L+Q), AIC values of MaxEnt models of *O. yunnanensis* and *O. delavayi* are the smallest with values of 1 170.4 and 817.9, respectively, and AUC values are the largest with values of 0.976 and 0.948, respectively, indicating that the prediction

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2016M590462); 江苏省自然科学基金项目 (BK20160932); 江苏省高校自然科学研究面上项目 (15KJB180007)

作者简介: 李涌福 (1994—), 男, 青海海东人, 博士研究生, 主要从事植物系统发育研究。

①通信作者 E-mail: yifan419@hotmail.com; wangxianrong66@njfu.edu.cn

accuracy of MaxEnt model after parameter optimization is very high. The present suitable distribution areas of *O. yunnanensis* and *O. delavayi* predicted by this model are similar, which mainly include Sichuan, Yunnan, West Guangxi, Southeast Tibet, and West Guizhou, and their areas of suitable distribution area account for 3.52% and 4.21% of total area of China, respectively, while their areas of highly suitable distribution area account for 1.02% and 1.14% of total area of China, respectively. Under the climatic scenario of RCP8.5, potential suitable distribution area in the future of *O. yunnanensis* expands to the east and north, and areas of suitable distribution and highly suitable distribution areas are 8.21% and 0.30%, respectively; while potential suitable distribution area in the future of *O. delavayi* expands to the west and north, and areas of suitable distribution and highly suitable distribution areas are 4.41% and 1.10%, respectively. According to contribution rate, permutation importance, and Jackknife test, main climatic variables affecting distributions of *O. yunnanensis* and *O. delavayi* are variation of temperature seasonality, annual mean temperature, and annual precipitation; in addition, variance ranges of three climatic variables of *O. yunnanensis* in suitable distribution area are greater than those of *O. delavayi* when survival rate of 0.5, indicating that the ecological adaptive range of *O. yunnanensis* is wider. Moreover, annual mean temperature constrains the east border of distribution area of *O. yunnanensis*, while annual precipitation constrains its movement toward north; annual precipitation does the south border of distribution area of *O. delavayi*. It is suggested that the prediction result of MaxEnt model after parameter optimization is very accurate, and the predicted present suitable distribution areas of *O. yunnanensis* and *O. delavayi* are Sichuan, Yunnan, West Guangxi, Southeast Tibet, and West Guizhou, but there is difference in their potential suitable distribution areas in the future; temperature and precipitation are the main climatic factors affecting their distributions, but there are differences in main climatic factors among different distribution areas.

Key words: *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green; *O. delavayi* Franch.; MaxEnt model; suitable distribution area; main climatic variable

气候对植物地理分布影响巨大,研究气候与植被的关系已经成为植物保护和生物多样性等领域的研究热点^[1]。随着全球气候变暖,中国的气温将升高,年降水量将增大^[2-4],这些变化必然影响植物的生理生态特征及地理分布格局^[5-7]。位于青藏高原东南部的横断山脉既是研究生物多样性的热点地区,也是研究气候变化与物种相互作用的理想场所^[8]。位于横断山脉西南部的贡嘎山和高黎贡山等山脉拥有从亚热带到高山寒带的自然垂直带谱,成为野生植物的冰期避难所^[9]。然而,随着气温升高,横断山脉林线在过去几十年中向高海拔地区迁移^[10]。雅鲁藏布江东部经过横断山脉,其流域内植被分布格局随着降水量变化发生了年际迁移^[11]。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)通过建立环境变量与生境适宜性的平衡关系来模拟物种未来潜在适宜分布区^[12]。MaxEnt模型是依据最大熵模型(maximum entropy model)建立的物种分布模型,主要用于研究物种的不同时期潜在地理分布、冰期避难所位置、入侵、谱系生物地理学及传染病空间传播等^[13-14]。MaxEnt模型仅依据物种的分布点数据(包括植物标本馆、实地勘察和自然历史

博物馆的数据)进行运算,即使在已知分布点相对较少的情况下也能获得较为准确的预测结果,因此,在面对不同规模的数据以及变化多样的地质事件和气候变量等条件时该模型的预测结果均较好^[15-18]。并且,在使用原产地数据预测物种在另一地区的适生情况时,MaxEnt模型具有较高的可转移性,从而确保该模型对数据的适合度和普适性,使该模型不会因过度拟合而降低其预测精度^[19]。通常情况下,研究者需要合理调整模型的运行参数以确保其对数据的适合度,从而获得良好的预测结果;复杂模型能够很好地拟合训练数据,但过度复杂的参数设置会导致过拟合,致使模型预测精度下降^[20],尤其是在将物种分布投射到过去或未来的气候变化情景时,选择复杂度适当的模型进行物种分布格局预测至关重要^[15]。赤池信息量准则(akaike information criterion, AIC)建立在信息理论基础之上,是数据统计模型相对质量的估计值^[21],通常从一组候选模型中找到模型对应的AIC值,但在使用候选模型表示“真实模型”(即生成数据)的过程中总是会丢失信息,因此,从候选模型中选择最小化信息丢失的模型作为最理想模型能够合理解决模型的拟合优度与简单性的关系。

野桂花 [*Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green] 和管花木犀 (*O. delavayi* Franch.) 均为中国特有植物^[22],且均为木犀属 (*Osmanthus* Lour.) 中少有的早春开花的种类,二者的花色和花型较木犀 [*O. fragrans* (Thunb.) Lour.] 更加突出,分布海拔高于木犀,抗寒能力也强于木犀。野桂花和管花木犀主要分布在四川、云南、广西、西藏和贵州,前者主要分布在海拔 1 350~2 800 m 的区域^{[23]101},后者主要分布在海拔 2 100~3 400 m 的区域^{[23]109}。迄今为止,尚未见关于野桂花和管花木犀的生物地理学和引种驯化方面的研究报道,不利于其种质资源保护和开发利用。

鉴于此,作者利用 MaxEnt 模型对野桂花和管花木犀的现代适宜分布区和未来潜在适宜分布区进行分析和预测;根据气候变量的贡献率 (contribution rate)、置换重要值 (permutation importance) 及 Jackknife 检验评价影响 MaxEnt 模型模拟的野桂花和管花木犀分布的主要气候变量;利用限制因子映射工具 (limiting factor mapping tools) 模拟野桂花和管花木犀不同分布区主要气候变量的分布模型,以期探讨野桂花和管花木犀现代和未来地理分布格局的差异,分析限制其地理分布的主要气候变量,为野桂花和管花木犀种质资源保护及引种驯化研究提供参考。

1 研究方法

1.1 地理分布信息获取

于 2016 年和 2017 年对分布在四川和云南的野桂花和管花木犀居群分别进行调查,并搜集全球生物多样性信息网络 (<http://www.gbif.org/>)、国家标本资源共享平台 (<http://www.nsii.org.cn/>) 及中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn/>) 中野桂花和管花木犀的分布资料;以国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>) 的中国省级行政区划矢量地图 (比例尺 1:4 000 000) 为底图,利用 DIVA-GIS 软件对所有分布记录的纬度和经度进行去重筛选,形成精度为 2.5'×2.5' 的栅格文件,最终得到 34 条野桂花分布记录和 39 条管花木犀分布记录。

1.2 气候变量数据获取

参照文献[24-25]的方法对世界气候网 (<http://www.worldclim.org/>) 19 个精度为 2.5' 的气候变量进行相关性分析,只保留最有代表性的气候变量用于 MaxEnt 模型预测。

1.3 MaxEnt 模型构建和评价

采用 MaxEnt 软件,通过 ENMeval 包检验野桂花和管花木犀 MaxEnt 模型在不同参数条件下的预测精度^[26],其中,正则化参数选取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0,参数组合选取 L、H、L+Q、L+H+Q、L+H+Q+P 和 L+H+Q+P+T (L 为线性,H 为铰链型,Q 为二次型,P 为乘积型,T 为阈值型)。通过分析各参数组合下 MaxEnt 模型的复杂度,选取最低复杂度模型参数,以 AUC (曲线下面积,area under the curve) 值最大、AIC 值最小为最优设置^[27]。

采用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve) 评价 MaxEnt 模型预测精度^[28]。其中,0.50<AUC≤0.60,表示预测失败;0.60<AUC≤0.70,表示预测精度较低;0.70<AUC≤0.80,表示预测精度一般;0.80<AUC≤0.90,表示预测精度较高;0.90<AUC≤1.0,表示预测精度非常高。

1.4 适宜分布区分析

采用优化参数后的 MaxEnt 模型分析野桂花和管花木犀的现代适宜分布区和未来 (2070 年) 潜在适宜分布区,其中,未来潜在适宜分布区预测在 RCP8.5 气候情景下完成。根据适宜度 (fitness, F) 将适生区分成 5 个等级,分别为高度适生区 (80<F≤100)、中度适生区 (60<F≤80)、一般适生区 (40<F≤60)、低度适生区 (20<F≤40) 和不适生区 (0<F≤20)。

1.5 主要气候变量分析

综合使用贡献率、置换重要值和 Jackknife 检验评价影响野桂花和管花木犀分布的主要气候变量,其中,影响野桂花分布的主要气候变量有年平均气温 (bio1)、平均日温差 (bio2)、气温季节性变化 (bio4)、年降水量 (bio12)、最干月降水量 (bio14) 和降水量季节性变化 (bio15),影响管花木犀的主要气候变量有年平均气温、平均日温差、等温性 (bio3)、气温季节性变化、年降水量、最湿月降水量 (bio13) 和最干月降水量。利用关键气候因子映射工具模拟野桂花和管花木犀不同分布区主要气候变量的分布模型。

2 结果和分析

2.1 MaxEnt 模型预测精度分析

经计算,不同参数组合下野桂花和管花木犀 MaxEnt 模型的 AIC 值见表 1。由表 1 可见:根据模型最优设置,当正则化参数为 0.5、参数组合为线性+二

表 1 不同参数组合下野桂花和管花木犀 MaxEnt 模型的赤池信息量准则 (AIC)

Table 1 Akaike information criterion (AIC) of MaxEnt models of *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green and *O. delavayi* Franch. under different parameter combinations

参数组合 ¹⁾ Parameter combination ¹⁾	不同正则化参数下野桂花 MaxEnt 模型的 AIC 值 AIC value of MaxEnt model of <i>O. yunnanensis</i> under different regularization parameters							
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
L	1 376.7	1 376.1	1 378.4	1 377.9	1 378.7	1 382.1	1 385.5	1 384.8
H	6 132.6	1 484.8	1 353.9	1 371.2	1 827.8	1 319.1	1 365.8	1 276.0
L+Q	1 170.4	1 184.4	1 192.4	1 197.3	1 211.0	1 204.6	1 215.6	1 219.0
L+H+Q	1 395.0	1 191.1	1 246.6	1 219.9	1 230.2	1 227.5	1 217.4	1 229.9
L+H+Q+P	1 309.7	1 185.8	1 197.3	1 222.1	1 236.0	1 230.7	1 238.3	1 260.8
L+H+Q+P+T	1 734.8	1 254.6	1 198.6	1 250.3	1 217.8	1 229.7	1 232.0	1 245.2

参数组合 ¹⁾ Parameter combination ¹⁾	不同正则化参数下管花木犀 MaxEnt 模型的 AIC 值 AIC value of MaxEnt model of <i>O. delavayi</i> under different regularization parameters							
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
L	1 024.8	1 021.3	1 027.8	1 020.8	1 023.3	1 022.1	1 026.7	1 017.7
H	901.5	941.4	885.3	882.4	932.3	893.4	921.7	916.0
L+Q	817.9	840.4	837.1	847.5	846.1	857.6	860.1	862.7
L+H+Q	877.5	872.3	881.4	852.2	872.7	865.8	849.1	869.3
L+H+Q+P	1 660.7	881.2	897.3	849.8	844.7	870.0	877.6	871.5
L+H+Q+P+T	941.5	833.5	851.1	862.6	870.8	855.6	869.7	895.9

¹⁾ L: 线性 Linearity; H: 铰链型 Hinge type; Q: 二次型 Quadratic type; P: 乘积型 Product type; T: 阈值型 Threshold type.

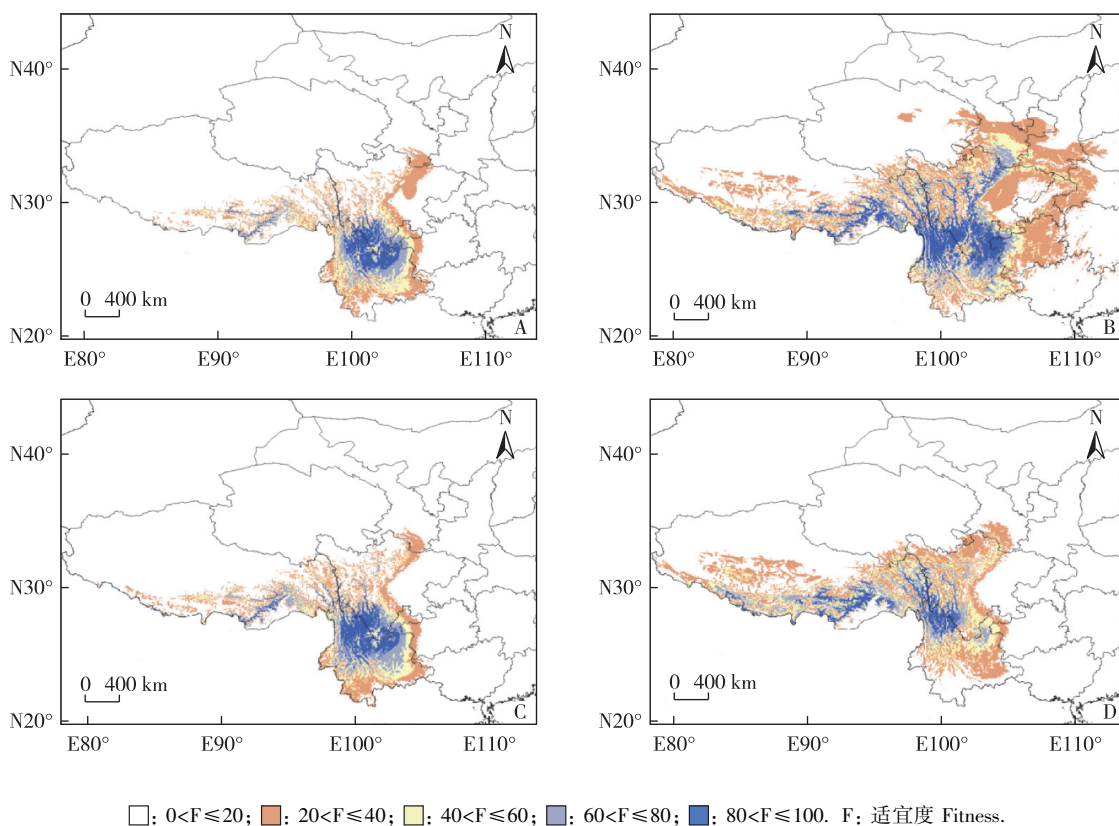
次型(L+Q)时,野桂花 MaxEnt 模型的 AIC 值最低(1 170.4),此时该模型的 AUC 值最大(0.976),表明优化参数后的 MaxEnt 模型对野桂花分布的预测精度非常高;当正则化参数为 0.5、参数组合为线性+二次型(L+Q)时,管花木犀 MaxEnt 模型的 AIC 值最低(817.9),此时该模型的 AUC 值最大(0.948),表明优化参数后的 MaxEnt 模型对管花木犀分布的预测精度非常高。

2.2 野桂花和管花木犀的适宜分布区分析

2.2.1 现代适宜分布区分析 基于 MaxEnt 模型获得的野桂花现代适宜分布区包括四川、云南、广西西部、西藏东南部和贵州西部,其适生区面积占中国总面积(包括大陆架及海域等,下同)的 3.52%(图 1-A),最东端达贵州毕节地区,最西端达西藏东南部(包括昌都地区、林芝地区、山南地区、日喀则地区),最南端达云南西双版纳傣族自治州,最北端达甘肃陇南地区;其高度适生区面积占中国总面积的 1.02%,包括雅鲁藏布江分散在西藏山南、拉萨、林芝地区,四川凉山彝族自治州及云南丽江、大理、楚雄、昆明和曲靖地区。管花木犀的现代适宜分布区范围与野桂花的现代适宜分布区相似(图 1-B),其适生区面积占中国总面积的 4.21%;其高度适生区面积占中国总南部)面积缩减至 1.10%,缩减的高度适生区变为一

面积的 1.14%。

2.2.2 未来潜在适宜分布区分析 在 RCP8.5 气候情景下,利用 MaxEnt 模型预测的野桂花未来(2070 年)潜在适宜分布区面积占中国总面积的 8.21%(图 1-C),呈明显的扩张趋势,较现代适宜分布区面积增加 4.69%。野桂花未来潜在适宜分布区主要向东部和北部扩张,向东从贵州全境延伸至重庆、陕西南部、山东,向西达西藏阿里南部,向南达西藏山南地区,向北达青海海西蒙古族藏族自治州以及甘肃兰州和白银;另外,福建和台湾均为野桂花的低度适生区;其高度适生区面积亦有扩大,占中国总面积的 0.30%,在西藏地区主要向西南延伸,向北则往四川北部及甘肃南部扩展,向东可达河南西部。管花木犀未来潜在适宜分布区面积占中国总面积的 4.41%(图 1-D),呈相对保守的分布趋势,仅较现代适宜分布区面积增加 0.20%。管花木犀未来潜在适宜分布区主要向西部和北部扩张,向东达贵州西部,向西达西藏阿里南部,向南达云南蒙自,向北达甘肃陇南,并且,位于西藏西部和中部及四川北部的未来潜在适宜分布区面积较现代适宜分布区面积增大,现代适宜分布区中的部分不适生区在未来潜在适宜分布区中变为低度适生区;但是,管花木犀的高度适生区(包括云南北部和四川般适生区和低度适生区。



A: 野桂花的现代适宜分布区 Present suitable distribution area of *O. yunnanensis*; B: 管花木犀的现代适宜分布区 Present suitable distribution area of *O. delavayi*; C: 野桂花的未来(2070年)潜在适宜分布区 Potential suitable distribution area of *O. yunnanensis* in the future (in 2070); D: 管花木犀的未来(2070年)潜在适宜分布区 Potential suitable distribution area of *O. delavayi* in the future (in 2070).

图 1 基于 MaxEnt 模型的野桂花和管花木犀的适宜分布区

Fig. 1 Suitable distribution areas of *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green and *O. delavayi* Franch. based on MaxEnt model

2.3 野桂花和管花木犀分布的主要气候变量分析

2.3.1 主要气候变量的重要性分析 根据各气候因子的贡献率和置换重要值筛选影响野桂花和管花木犀分布的主要气候变量,结果见表 2。结果表明:对于野桂花分布而言,气温季节性变化(bio4)的贡献率和置换重要值均最高,分别为 53.1%和 45.6%;年平均气温(bio1)的贡献率和置换重要值次之,分别为 37.3%和 43.8%;年降水量(bio12)的贡献率和置换重要值排名第 3,分别为 6.3%和 5.4%;3 个气候变量的贡献率和置换重要值的累计值分别为 97.1%和 94.8%。Jackknife 检验结果表明:当用 AUC 值、测试增益值及训练增益值衡量气候变量时,排在前 3 位的仍然是气温季节性变化、年平均气温、年降水量。

对于管花木犀分布而言,气温季节性变化、年平均气温和年降水量的贡献率和置换重要值也均位于前 3 位,其贡献率分别为 54.1%、36.9%和 6.0%,置换重要值分别为 53.7%、37.4%和 6.7%;3 个气候变

量的贡献率和置换重要值的累计值分别为 97.0%和 97.8%。Jackknife 检验结果表明:当用 AUC 值、测试增益值及训练增益值衡量气候变量时,排在前 3 位的仍然是气温季节性变化、年平均气温、年降水量。

另外,在存活概率为 0.5 时,野桂花适宜分布区的气温季节性变化、年平均气温和年降水量的方差分别为 3 044.1 ~ 66 654.2、95.1 ~ 201.2 和 729.6 ~ 1 657.6,而管花木犀适宜分布区的气温季节性变化、年平均气温和年降水量的方差分别为 3 878.3 ~ 5 471.7、44.0 ~ 52.7 和 756.4 ~ 1 246.0。

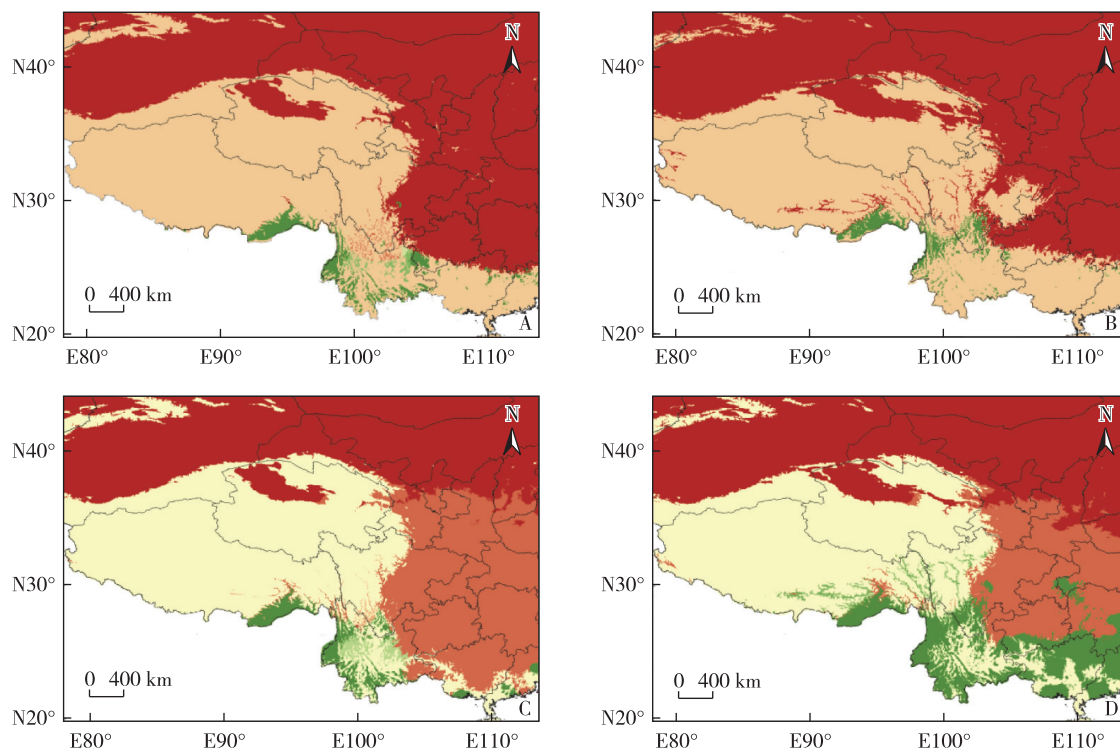
2.3.2 各分布区主要气候变量分布模型分析 利用关键气候因子映射工具模拟的野桂花和管花木犀适宜分布区主要气候变量的分布模型见图 2。

根据野桂花现代适宜分布区主要气候变量的分布模型(图 2-A),野桂花在西藏东南部和云南主要受年降水量和平均日温差的影响,在四川主要受气温季节性变化和年平均气温的影响,在贵州受气温季节性

表 2 基于 MaxEnt 模型的影响野桂花和管花木犀分布的主要气候变量分析

Table 2 Analysis on main climatic variables of affecting distributions of *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green and *O. delavayi* Franch. based on MaxEnt model

编号 No.	气候变量 Climatic variable	贡献率/% Contribution rate	置换重要值/% Permutation importance
野桂花 <i>O. yunnanensis</i>			
bio4	气温季节性变化 Variation of temperature seasonality	53.1	45.6
bio1	年平均气温 Annual mean temperature	37.7	43.8
bio12	年降水量 Annual precipitation	6.3	5.4
bio15	降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality	1.4	3.2
bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	1.2	1.7
bio2	平均日温差 Mean diurnal range of temperature	0.3	0.4
管花木犀 <i>O. delavayi</i>			
bio4	气温季节性变化 Variation of temperature seasonality	54.1	53.7
bio1	年平均气温 Annual mean temperature	36.9	37.4
bio12	年降水量 Annual precipitation	6.0	6.7
bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	1.6	1.5
bio2	平均日温差 Mean diurnal range of temperature	1.0	0.3
bio3	等温性 Isothermality	0.4	0.2
bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	0.1	0.0



■: 气温季节性变化 Variation of temperature seasonality; ■: 等温性 Isothermality; ■: 平均日温差 Mean diurnal range of temperature; ■: 年平均气温 Annual mean temperature; ■: 最干月降水量 Precipitation of the driest month; ■: 最湿月降水量 Precipitation of the wettest month; ■: 年降水量 Annual precipitation.

A: 野桂花的现代适宜分布区 Present suitable distribution area of *O. yunnanensis*; B: 野桂花的未来(2070年)潜在适宜分布区 Potential suitable distribution area of *O. yunnanensis* in the future (in 2070); C: 管花木犀的现代适宜分布区 Present suitable distribution area of *O. delavayi*; D: 管花木犀的未来(2070年)潜在适宜分布区 Potential suitable distribution area of *O. delavayi* in the future (in 2070).

图 2 基于 MaxEnt 模型的野桂花和管花木犀适宜分布区主要气候变量的分布模型
Fig. 2 Distribution models of main climatic variables in suitable distribution areas of *Osmanthus yunnanensis* (Franch.) P. S. Green and *O. delavayi* Franch. based on MaxEnt model

变化的影响;在沿海的福建和台湾也受到年降水量和年平均气温的影响。根据野桂花未来(2070年)潜在适宜分布区主要气候变量的分布模型(图2-B),野桂花在西藏东南部受气温季节性变化影响的分布面积小幅增大,同时受年降水量的影响减弱而受年平均气温的影响增强;在云南和四川一带受最干月降水量的影响趋于消失,受年降水量影响的分布面积减小并北移;在福建和台湾受年降水量影响的分布面积减小;在其余省份受气温季节性变化的影响最大。

根据管花木犀现代适宜分布区主要气候变量的分布模型(图2-C),管花木犀在西藏东南部、云南北部及四川南部等少部分地区受年降水量影响的分布面积最大,其次为受年平均气温影响的分布面积。根据管花木犀未来潜在适宜分布区主要气候变量的分布模型(图2-D),管花木犀在四川、云南、重庆、贵州和西藏受年降水量影响的分布面积大幅增大,并且,在四川和西藏受最干月降水量的影响增强。

3 讨论和结论

本研究结果表明:野桂花和管花木犀的现代适宜分布区相似,主要包括四川、云南、广西西部、西藏东南部和贵州西部,即青藏高原东南部的东喜马拉雅地区及与之毗邻的横断山脉地区。自第三纪后,由于第四纪冰期、古地中海退却等一系列复杂过程,该区域成为北温带地区植物的避难所^[29];而在现代,该区域在冬季受到来自西伯利亚的干燥寒冷气流的影响,而在夏季受到东南太平洋和西南印度洋形成的暖湿气流的影响,为南北走向的横断山脉带来充沛的降水及适宜的温度^[28]。研究表明:横断山脉一带复杂的地形环境及季风气候使该区域环境呈现冬季干冷、夏季湿热的特征,利于植物生长^[30];孢粉化石证据也显示:木犀属植物自晚第三纪就分布在滇中地区,且该时期的植物区系与现代的植物区系相似^[29,31]。

基于全球气候变暖背景下的植物学证据和生态学证据,随着全球气温升高、CO₂浓度倍增、降水格局改变等,亚热带常绿阔叶林林线向北移动2°~3°,向东移动4°~6°^[4,32-33]。在RCP8.5气候情景下,野桂花的潜在适宜分布区向北扩张2°,向东扩张5°,适宜分布区面积增加4.69%,这可能是因为野桂花为喜温暖湿树种,更适应未来气温和降水量增加的环境。在RCP8.5气候情景下,管花木犀的潜在适宜分布区向

西迁移2°,向北迁移1°,但位于川滇交界处的高度适生区面积却缩小了0.02%,这可能是因为管花木犀更适应干冷的生长环境,未来(2070年)气候情境下温室气体浓度升高,使其适宜生境被破坏,导致其分布区面积缩小并向西部地区迁移。

本研究结果表明:影响野桂花和管花木犀分布的主要气候变量均为气温季节性变化、年平均气温和年降水量,且影响强度依次递减。笔者在群落实地调查时发现管花木犀分布海拔较野桂花高600~750m,花期较野桂花晚1个月。野桂花的生境湿润,群落内蕨类植物和地下芽植物的比例很高;管花木犀常在山体上部与高山栎(*Quercus semecarpifolia* Smith)混生,生境坡度大,土壤含水量较低,群落结构单一,可见,野桂花和管花木犀具有不同的生态适应性。在研究中国高山植物区系与环境的关系时发现能量(温度)差异对植物分布的影响大于水分(降水)差异^[34]。从各气候变量的贡献率和置换重要值来看,温度(包括气温季节性变化和年平均气温)是调控野桂花和管花木犀分布的首要气候变量,其次是降水(年降水量)。在存活概率为0.5时,野桂花适宜分布区的气温季节性变化、年平均气温和年降水量的方差(分别为3044.1~66654.2、95.1~201.2和729.6~1657.6)均大于管花木犀适宜分布区气温季节性变化、年平均气温和年降水量的方差(分别为3878.3~5471.7、44.0~52.7和756.4~1246.0),说明野桂花的生态适应范围较管花木犀更广。另外,年平均气温限制了野桂花分布区的东界,年降水量制约其分布区向北移动;而年降水量迫使管花木犀分布区向西北方向移动,限制了其分布区的南界。

总体来看,优化参数后的MaxEnt模型对野桂花和管花木犀分布的预测结果非常准确,且该模型偏向于更小的正则化参数和更简单的参数组合;野桂花和管花木犀的现代适宜分布区均为四川、云南、广西西部、西藏东南部和贵州西部,而其未来潜在适宜分布区存在差异;温度和降水共同影响野桂花和管花木犀的分布,但不同分布区的主要气候变量存在差异。

参考文献:

- [1] 方精云,朱江玲,石岳.生态系统对全球变暖的响应[J].科学通报,2018,63(2):136-140.
- [2] 王陆军,赵天田,马庆华,等.中国特有种川榛的地理分布格局与气候环境因子的关系分析[J].植物资源与环境学报,2017,26(1):77-83.

- [3] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 等. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 464-473.
- [4] 朱弘, 尤禄祥, 李涌福, 等. 浙闽樱桃地理分布模拟及气候限制因子分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(4): 315-322.
- [5] 彭丹晓, 鲁丽敏, 陈之端. 区域生命之树及其在植物区系研究中的应用[J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 156-162.
- [6] 葛颂. 什么决定了物种的多样性? [J]. 科学通报, 2017, 62(19): 2033-2041.
- [7] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365-377.
- [8] 刘杰, 罗亚皇, 李德铎, 等. 青藏高原及毗邻区植物多样性演化与维持机制: 进展及展望[J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 163-174.
- [9] 霍常富, 鲁旭阳, 程根伟. 中国西南山地森林演替模型的参数估计与模拟检验[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 78-83.
- [10] 张大才, 孙航. 横断山区树线以上区域种子植物的标本分布与物种丰富度[J]. 生物多样性, 2008, 16(4): 381-388.
- [11] 郭兵, 姜琳, 戈大专, 等. 全球气候变暖胁迫下的雅鲁藏布江流域植被覆盖度变化驱动机制探讨[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(3): 209-217.
- [12] ELITH J, KEARNEY M, PHILLIPS S. The art of modeling range-shifting species [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(4): 330-342.
- [13] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3): 231-259.
- [14] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2010, 31(2): 161-175.
- [15] 朱耿平, 刘强, 高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 223-230.
- [16] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. Diversity and Distributions, 2015, 17(1): 43-57.
- [17] 武晓宇, 董世魁, 刘世梁, 等. 基于 MaxEnt 模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别[J]. 生物多样性, 2018, 26(2): 138-148.
- [18] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区[J]. 林业科学, 2018, 54(8): 153-164.
- [19] 朱耿平, 原雪姣, 范靖宇, 等. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响: 以茶翅蛾为例[J]. 生物安全学报, 2018, 27(2): 118-123.
- [20] WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria [J]. Ecological Applications, 2011, 21(2): 335-342.
- [21] SRIVASTAVA M S, KUBOKAWA T. Akaike information criterion for selecting of the mean vector in high dimensional data with fewer observations [J]. Journal of the Japan Statistical Society, 2008, 38(2): 259-283.
- [22] 向其柏, 刘玉莲. 中国桂花品种图志 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2008: 9.
- [23] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第六十一卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [24] EMMANUEL R, ROTH M, ICHINOSE T, et al. Role of predictors in downscaling surface temperature to river basin in India for IPCC SRES scenarios using support vector machine [J]. International Journal of Climatology, 2010, 31(2): 159-161.
- [25] 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(4): 94-98.
- [26] 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, 2015, 5(11): 1198-1205.
- [27] MORENO-AMAT E, MATEO R G, NIETO-LUGILDE D, et al. Impact of model complexity on cross-temporal transferability in Maxent species distribution models: an assessment using paleobotanical data [J]. Ecological Modelling, 2015, 312: 308-317.
- [28] 褚建民, 李毅夫, 张雷, 等. 濒危物种长柄扁桃的潜在分布与保护策略[J]. 生物多样性, 2017, 25(8): 799-806.
- [29] 刘常周, 徐波, 李志敏. 横断山区种子植物特有属的植物地理学研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(1): 72-78.
- [30] LI G, DU S, GUO K. Evaluation of limiting climatic factors and simulation of a climatically suitable habitat for Chinese sea buckthorn [J]. PLoS One, 2015, 10(7): e131659.
- [31] 孙航. 北极—第三纪成分在喜马拉雅—横断山的发展及演化[J]. 云南植物研究, 2002, 24(6): 671-688.
- [32] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近40年中国植物物候对气候变化的响应研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 28-32.
- [33] 宋文静, 吴绍洪, 陶泽兴, 等. 近30年中国中东部地区植物分布变化[J]. 地理研究, 2016, 35(8): 1420-1432.
- [34] 沈泽昊, 杨明正, 冯建孟, 等. 中国高山植物区系地理格局与环境和空间因素的关系 [J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 182-194.

(责任编辑: 佟金凤)