

油杉属植物的地理分布及潜在分布区预测

麻璨璨¹,李媛媛¹,王海珍²,范蓉蓉²,李 蒙¹,严继萍¹,朱 跃¹,段一凡^{1*}

(1. 南京林业大学 生物与环境学院,南方现代林业协同创新中心,江苏 南京 210037;

2. 镇江市野生动植物和湿地保护管理站,江苏 镇江 212002)

摘 要:油杉属植物隶属松科,具有极高的经济价值和科研价值。然而近年受气候变化和人为因素等影响,油杉属植物野生种群数量急剧减少。在全球气候变化背景下,预测油杉属各时期适宜分布区对其保育措施的制定及合理引种栽培具有重要意义。研究拟借助 MaxEnt 模型,综合 19 个环境变量和 272 个标本分布记录,对油杉属植物柔毛油杉、铁坚油杉、油杉和云南油杉的过去、现在和未来的分布进行预测、模拟其地理分布,并推测其主导环境变量。结果表明:1) 云南、贵州和广西是我国油杉属植物的主要分布区。2) 除柔毛油杉外,在未来气候变化情景下,铁坚油杉、油杉和云南油杉分布区均有继续扩散的可能。3) 温度和降水是油杉属植物的现代最适宜分布区的主要影响因素。其中,贡献较大的环境限制因子为年均温度 Bio1、年最冷月最低温 Bio6、年温度变化范围 Bio7、年最干季均温 Bio9、年最冷季均温 Bio11、年均降水量 Bio12 和年最暖季降水量 Bio18。研究可为油杉属种质资源的开发、利用和保护提供一定的理论参考。

关键词:MaxEnt 模型;油杉属;地理分布;潜在分布区

中图分类号:Q948

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0158-08

Geographical Distribution and the Prediction of the Potential Distribution of *Keteleeria*

MA Can-can¹, LI Yuan-yuan¹, WANG Hai-zhen², FAN Rong-rong², LI Meng¹, YAN Ji-ping¹,
ZHU Yue¹, DUAN Yi-fan^{1*}

(1. College of Biology and the Environment, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Zhenjiang Wildlife and Wetland Protection and Management Station, Zhenjiang 212002, Jiangsu, China)

Abstract: *Keteleeria* belongs to family Pinaceae and has high economic and scientific values. However, due to the climate changes and human disturbances, the wild population of *Keteleeria* has decreased sharply in recent years. Under the background of global climate change, it is of importance to predict the suitable distribution area of *Keteleeria* in different periods for the formulation of conservation measures and rational introduction and cultivation of *Keteleeria*. Based on the MaxEnt model, this study synthesized 19 environmental variables and 272 distribution records to predict the past, present and future distributions of several *Keteleeria* species, including *K. pubescens*, *K. davidiana*, *K. fortunei* and *K. evelyniana*. The results showed that 1) provinces of Yunnan, Guizhou and Guangxi were the main distribution areas. 2) Except for *K. pubescens*, the distribution areas of *K. davidiana*, *K. fortunei*, and *K. evelyniana* would be likely to continue spreading under the future climate. 3) Temperature and precipitation were the main factors affecting the optimum distribution area of *Keteleeria*. Among them, the environmental limiting factors that contribute significantly were the annual mean temperature (Bio1), the minimum temperature of coldest month (Bio6), the temperature annual range (Bio7), the mean temperature of driest quarter (Bio9), the mean

收稿日期:2021-06-30 修回日期:2021-12-06

基金项目:南山生物多样性调查(028108458)。

第一作者:麻璨璨。研究方向:树木学。E-mail:804388387@qq.com

* 通信作者:段一凡,博士,副教授,硕士生导师。研究方向:植物学。E-mail:yifan419@hotmail.com

temperature of coldest quarter (Bio11), the annual precipitation (Bio12) and the precipitation of warmest quarter (Bio18). This study can provide a theoretical guidance for the development, utilization and conservation of *Keteleeria*.

Key words: MaxEnt model; *Keteleeria*; geographical distribution; potential distribution

油杉属(*Keteleeria*)是东南亚特有属,中国是油杉属的特有中心和分布中心^[1],除2种产于越南、老挝外,其他均为我国特有种。然而,由于人为砍伐、自身生物学特性及环境等综合因素的影响,油杉属野生群体数量急剧减少甚至呈现出明显的消失趋势^[2]。根据中国高等植物受威胁物种名录,油杉属的全部物种均受到威胁,其中矩鳞油杉(*K. fortunei* var. *oblonga*)和台湾油杉(*K. davidiana* var. *formosana*)均表现为极危^[3]。因此,油杉属资源的保护对其可持续利用具有非常重要的现实意义。

油杉属植物为常绿乔木,可用于纤维工业原料等用材,具有极高的经济价值和研究价值^[4]。然而,目前对油杉属的研究主要集中在细胞学研究^[5]、保护生物学研究^[6]及繁殖生物学研究^[7]等方面,对其分布区域和影响地理分布的重要生态因子知之甚少,物种潜在分布区预测还尚未报道。

预测物种的潜在分布区及其影响因子的常见方法有随机森林模型^[8](random forest, RF)、广义可加模型^[9](generalized additive models, GAM)和最大熵模型^[10](maximum entropy, MaxEnt)。其中,最大熵模型(MaxEnt)预测物种的潜在分布区是利用其地理位置的环境变量来寻找该物种最大熵的潜在分布区^[9]。MaxEnt模型可以根据出现点的数据,即使样本很小、不规则取样或样本有少量位点偏差,也能合理地逼近物种的适生区,更适用于分析目标物种分布区域的适宜性^[11]。现在MaxEnt模型已成功地应用于生态学、进化生物学和保护生物学等方面的研究^[12-14]。

本研究采用MaxEnt 3.4.1软件模拟油杉属植物在不同历史时期的地理分布动态,探讨末次盛冰期(last glacial maximum, LGM)、全新世中期(mid-holocene)、现代及未来不同环境下的潜在分布范围,及影响其分布的主要环境因子,为油杉属植物保护措施的制定及其种植资源的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

1.1.1 地理分布数据 所用植物地理分布数据来自中国数字植物标本馆^[15](CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台^[16](NSII, <http://www.nsii.org.cn/>)和全球生物多样性信息平台^[17](GBIF,

<https://www.gbif.org/>)。另外,为收集到尽可能多的可靠数据,通过在线查阅中国科学院昆明植物研究所植物链(<http://www.kun.ac.cn/links/>)中其他标本馆,查找其相应的地理位置坐标,仅有地名的通过在线经纬度查询(<https://jingweidu.51240.com/>)将地名转化为经纬度信息。将检索到的物种信息导入DIVA-GIS 7.0^[18],结合基础地理数据通过筛选,去除重复、错误和存疑记录,形成精度为 $2.5' \times 2.5'$ 的栅格文件,最后检索获得统计收集272个油杉属样本的分布点数据(图1),海南油杉(*K. hainanensis*)样点数为2个,数据量太小,故不参与预测,变种样点数较小,故归并于原变种中。由于不同物种生物学特性差异,故在此一一讨论。中国省级行政区划矢量地图(1:4 000 000)下载于国家基础地理信息系统网站(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

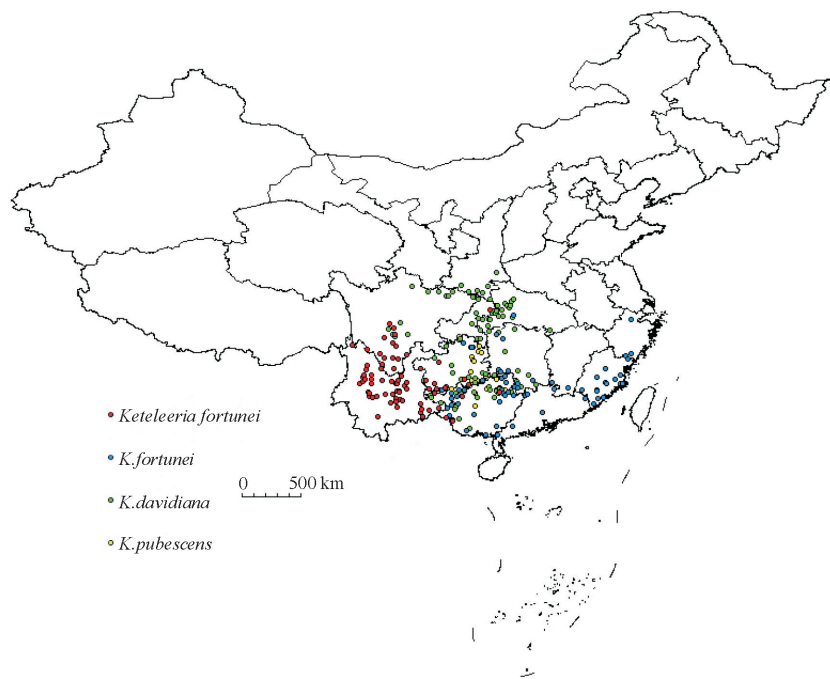
1.1.2 气候与环境数据 于世界气象数据库^[19](WorldClim, <http://www.worldclim.org/>)获取,下载空间分辨率为 $2.5'$ 的末次盛冰期(LGM,约22 000年前)、全新世中期(Mid-Holocene,约6 000年前)、当代 Current(1950—2000年)、未来 Future(2060—2080年)的气候数据。其中未来气候数据参考文献[20],选择典型浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)8.5。各时期的生物环境数据均19个(表1)。

1.2 MaxEnt模型构建与精度分析

物种分布数据导入MaxEnt模型,重复运算10次进行建模,抽取测试样本的方法选择交叉验证(crossvalidate),其他参数设置成默认值。以刀切法(Jackknife)来评价各环境因子对4种油杉属植物的生长的影响力,Logistic格式输出结果,即分布概率。预测结果用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下的面积值(AUC)进行精度检验。以假阳性率为横坐标、真阳性率为纵坐标构建曲线。一般认为,AUC评估标准为:AUC<0.60,模拟无效;0.60≤AUC<0.70,模拟较差;0.70≤AUC<0.80,模拟一般;0.80≤AUC<0.90,模拟良好;AUC>0.90,模拟极佳^[21]。

1.3 气候适生性等级划分

利用ArcGIS10.2^[22]的再分类功能对4种油杉属植物空间分布区进行气候适生等级划分。其中,未来潜在适宜分布区预测在RCP8.5气候情景下完成。



注:该图基于国家测绘地图信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS2019(1822)号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 油杉属分布点示意图

Fig. 1 Distribution of *Keteleeria*

表 1 研究所采用的气候因子

Table 1 Climate factors used in the research

环境变量	代表意思
Bio1	年均温度
Bio2	日均温
Bio3	等温性
Bio4	温度季节性
Bio5	最温暖月份最高温
Bio6	年最冷月最低温
Bio7	年温度变化范围
Bio8	年最潮湿季度均温
Bio9	年最干季均温
Bio10	年最温暖地区均温
Bio11	年最冷季均温
Bio12	年平均降水量
Bio13	年最多降雨量月份
Bio14	年最干燥月降水量
Bio15	降水季节性
Bio16	降水最多季度降水量
Bio17	降水最少季度降水
Bio18	年最暖季降水量
Bio19	最冷季降水

由于目前尚无一致的生态适应性等级划分标准,因而按灵敏度(Sensitivity,S)将油杉属植物的适生区分成 4 个等级,分别为非适生区($0<S\leq 25\%$)、低度适生区($25\%<S\leq 50\%$)、中度适生区($50\%<S\leq 75\%$)和高度适生区($75\%<S\leq 100\%$)。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测精度分析

基于 AUC 面积的 ROC 曲线检验,不同时期下

油杉属 MaxEnt 模型的 AUC 值均 ≥ 0.97 (表 2),说明 ROC 曲线对油杉属植物分布预测的评估结果极佳,MaxEnt 模型对不同气候情境下油杉属植物的适生分布区预测结果准确性高。

表 2 不同时期下油杉属 MaxEnt 模型的 AUC 值

Table 2 AUC values of the MaxEnt model of *Keteleeria*

种名	in different periods			
	LGM	Mid-Holocene	Current	Future
油杉(<i>K. fortunei</i>)	0.978	0.977	0.978	0.979
铁坚油杉(<i>K. davidiana</i>)	0.972	0.970	0.973	0.970
柔毛油杉(<i>K. pubescens</i>)	0.983	0.989	0.988	0.987
云南油杉(<i>K. evlyniana</i>)	0.979	0.979	0.980	0.980

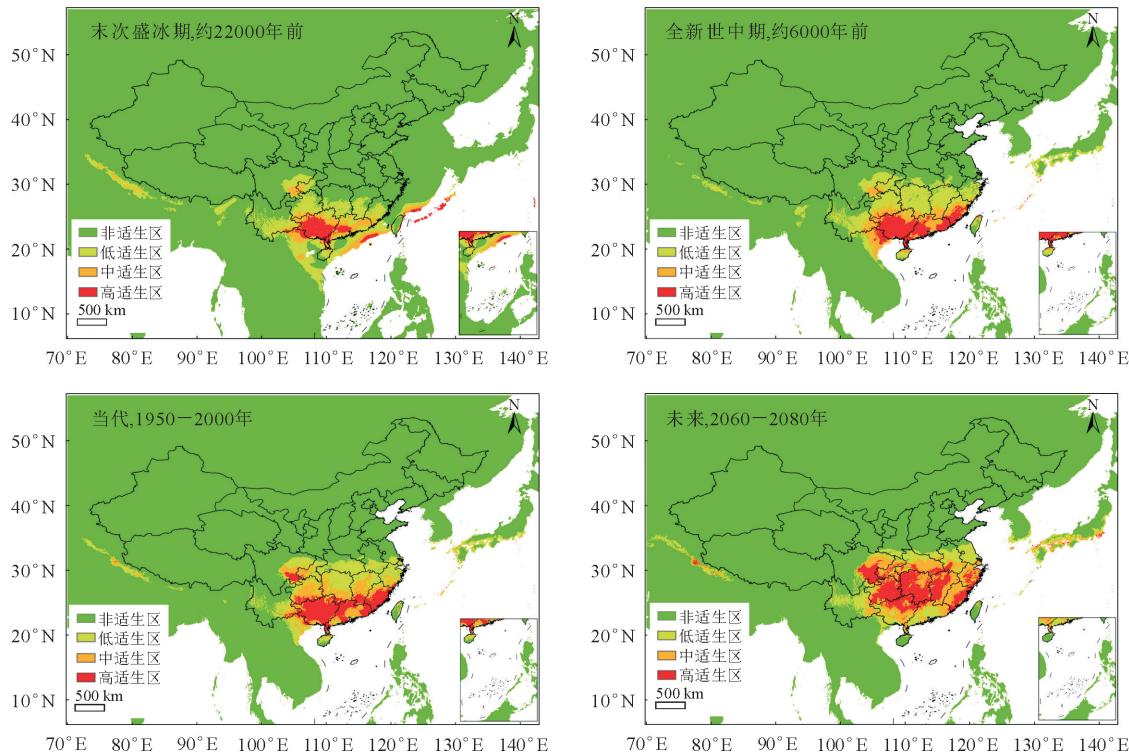
2.2 4 种油杉属植物的潜在分布区预测

2.2.1 油杉潜在分布区预测 油杉适生区在 0℃等温线和 800 mm 等降水线(即淮河-秦岭-青藏高原东南边缘线)以南,主要集中在广西、广东、福建,包括南岭山脉和山地、丘陵地区,四川东南部地区有少量分布(图 2)。南至雷州半岛,北达四川内江,西靠元江,东抵福建浙江交界带。国外如尼泊尔、越南、老挝及日本本州岛南部、四国岛西侧区域也有分布。综合来看油杉的适生区面积有所增加,其中我国增幅最大,日本次之。

2.2.2 铁坚油杉潜在分布区预测 铁坚油杉适生区在 0℃等温线和 800 mm 等降水线以南,主要集中在广西北部、贵州、四川东南部、重庆、湖北西南

部、湖南西北部,广东湖南交界地带,包括大巴山—巫山山脉,秦岭山脉和峨眉山等(图 3)。韩国南部及日本本州岛南部、四国岛西侧也有少量分布。总

体上看柔毛油杉的适生区面积在我国小幅度增加,但韩国呈现出逐渐减少的趋势。值得注意的是,我国四川中东部将被铁坚油杉高度适生区填充。



注:该图为国家测绘地图信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS2019(1822)号的标准地图,无修改。下同。

图 2 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的油杉 4 个时期潜在分布区

Fig. 2 Four potential distribution areas of *K. fortunei* based on MaxEnt and ArcGIS

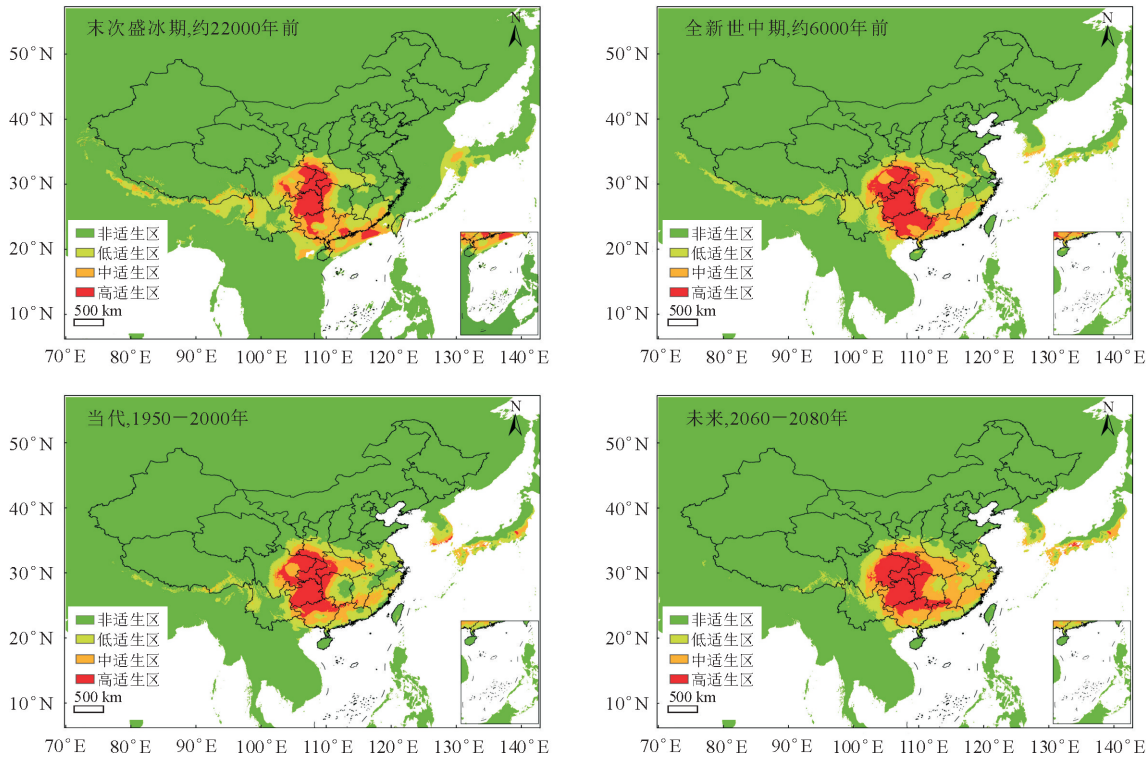


图 3 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的铁坚油杉 4 个时期潜在分布区

Fig. 3 Four potential distribution areas of *K. davidiana* based on MaxEnt and ArcGIS

2.2.3 柔毛油杉潜在分布区预测 柔毛油杉适生区在 0°C 等温线和 800 mm 等降水线以南,包括广西中北部、贵州、湖南西北部、四川东南部、重庆、湖北西南部,呈梯形状,西起金沙江,东至汉江,南达广西柳江,北抵巫山,安徽、福建浙江沿海一带也有少量分布(图 4)。中适生区主要分布于高适生区周边邻域地带,并主要向东北方向延伸。结合未来的潜在分布区预测可以看出柔毛油杉的适生区面积在日

本小幅度增加,但我国呈现出逐渐减少的趋势。

2.2.4 云南油杉潜在分布区预测 云南油杉适生区在 0°C 等温线和 800 mm 等降水线以南,云南是云南油杉的主要适生区,横断山脉、云南和邻省交界带也有少量分布(图 5)。我国与尼泊尔、印度交界带及其以南的一些区域(老挝、孟加拉国等)也有一定分布。总体上看云南油杉的适生区面积将呈现出逐渐增加的趋势。

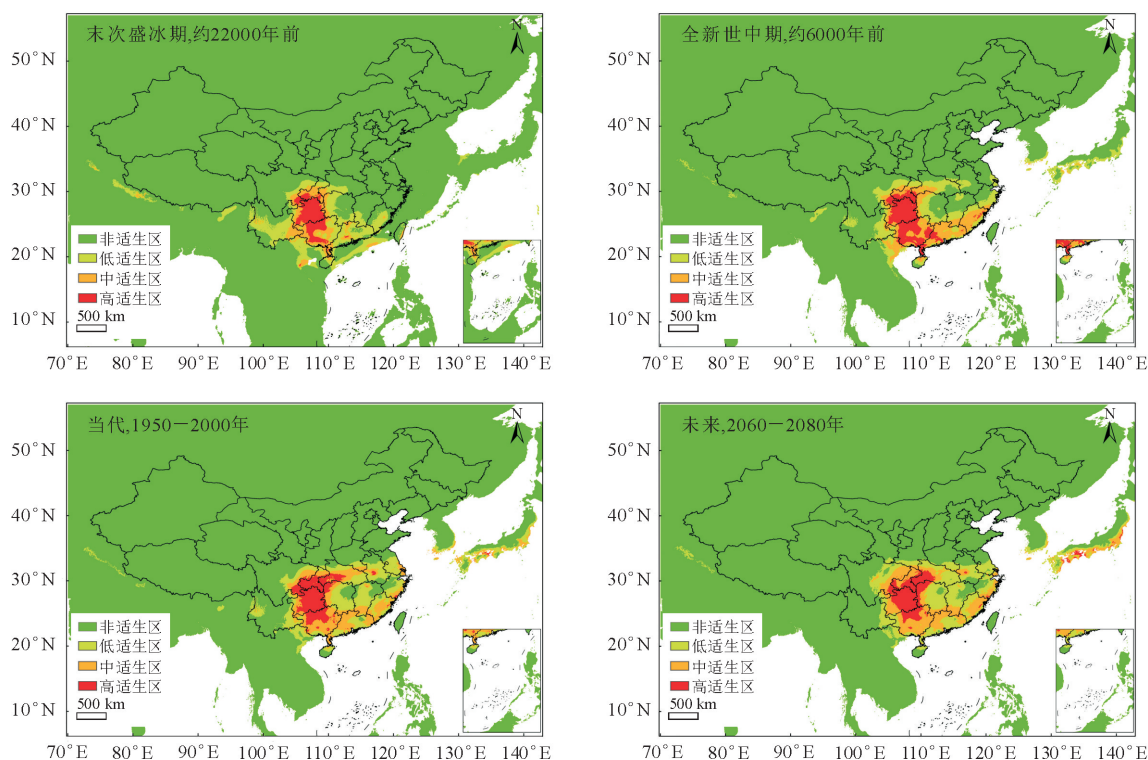


图 4 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的柔毛油杉 4 个时期潜在分布区

Fig. 4 Four potential distribution areas of *K. pubescens* based on MaxEnt and ArcGIS

2.3 主要气候变量分析

根据 MaxEnt 模型得到当前气候条件下 19 个生物气候变量对油杉属适生分布区预测结果的贡献率和置换重要值(表 3)。

从 MaxEnt 模型刀切法分析结果可以看出,用于模型预测的 19 个生物气候变量对油杉属不同物种的贡献率不同。在油杉中贡献率居前 5 的分别为 Bio14、Bio12、Bio6、Bio4、Bio17,累计贡献率达 83%;铁坚油杉中贡献率居前 5 的为 Bio18、Bio7、Bio4、Bio12、Bio2,累计贡献率达 70.8%;柔毛油杉中贡献率居前 5 的为 Bio14、Bio12、Bio7、Bio4、Bio18,累计贡献率达 84.1%;云南油杉中贡献率居前 5 的为 Bio18、Bio3、Bio1、Bio7、Bio13,累计贡献率达 88.7%。

Jackknife 检验结果显示,对正规化训练增益影响最大的 3 个生物气候变量在柔毛油杉中分别为

Bio6、Bio11、Bio9,在铁坚油杉中分别为 Bio11、Bio9、Bio6,在油杉中分别为 Bio11、Bio1、Bio9,在云南油杉中分别为 Bio11、Bio18、Bio9;对测试增益值影响最大的 3 个生物气候变量在柔毛油杉中为 Bio11、Bio9、Bio6,在铁坚油杉中分别为 Bio11、Bio9、Bio7,在油杉中分别为 Bio11、Bio1、Bio9,在云南油杉中分别为 Bio11、Bio18、Bio9;对 AUC 值影响最大的 3 个生物气候变量在柔毛油杉中分别为 Bio12、Bio7、Bio11,在铁坚油杉中分别为 Bio11、Bio6、Bio9,在油杉中分别为 Bio11、Bio1、Bio9,在云南油杉中分别为 Bio11、Bio18、Bio9。

综合看来,油杉属现代潜在地理分布的主导生物气候变量为温度(年最冷月最低温 Bio6、年最冷季均温 Bio11、年最干季均温 Bio9、年温度变化范围 Bio7 和年均温度 Bio1)和降水(年平均降水量 Bio12 和年最暖季降水量 Bio18)。

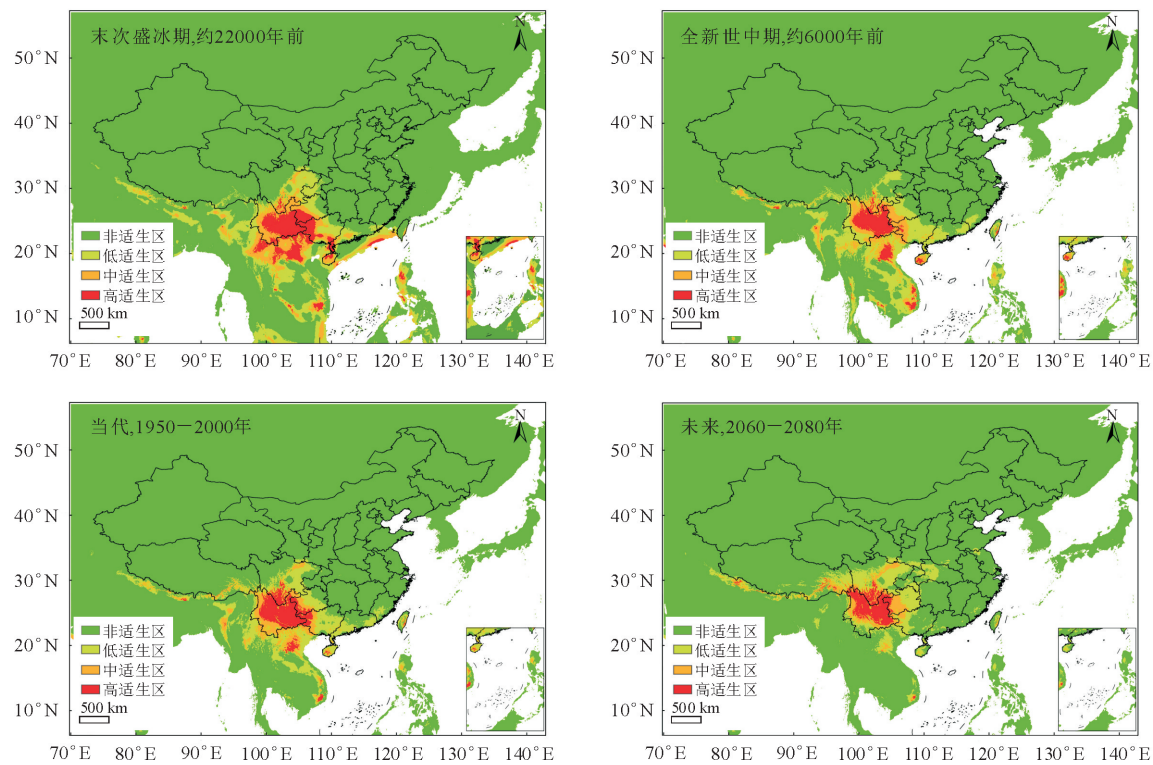


图 5 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的云南油杉 4 个时期潜在分布区

Fig. 5 Four potential distribution areas of *K. evelyniana* based on MaxEnt and ArcGIS

表 3 主导气候变量统计

Table 3 Leading climate variable statistics

种名	气候变量	贡献率 (%)	置换重要值 (%)
油杉 (<i>K. fortunei</i>)	Bio14 年最干燥月降水量	26.4	0.5
	Bio12 年平均降水量	23.1	5.5
	Bio6 年最冷月最低温	16.4	38.8
	Bio4 温度季节性	12.4	3.7
	Bio17 降水最少季度降水量	4.7	0.8
铁坚油杉 (<i>K. davidiana</i>)	Bio18 年最暖季降水量	22.2	0.1
	Bio7 年温度变化范围	15	17.2
	Bio4 温度季节性	14.4	19.2
	Bio12 年平均降水量	12.5	17.7
	Bio2 日均温	6.7	0.6
柔毛油杉 (<i>K. pubescens</i>)	Bio14 年最干燥月降水量	35.4	0.3
	Bio12 年平均降水量	17	1.3
	Bio7 年温度变化范围	12.8	62.7
	Bio4 温度季节性	12.6	7.8
	Bio18 年最暖季降水量	6.3	0
云南油杉 (<i>K. evelyniana</i>)	Bio18 年最暖季降水量	42.7	17.2
	Bio3 等温性	20.5	18.9
	Bio1 年平均温度	15.9	6.6
	Bio7 年温度变化范围	5.7	20.2
	Bio13 年最多降雨量月份	3.9	2.9

3 结论与讨论

根据 MaxEnt 分析结果显示,油杉属地理分布呈现狭域和间断的特点。云南、贵州和广西地区是油杉属植物种系发育的良好地区。在现代气候条件下,制约油杉属潜在地理分布格局的共同环境因子可能是温度和降水。在未来气候变化情景下,油杉属下 4 个种潜在适生区总面积除柔毛油杉外,其余未来潜在分布区面积均大于现有分布地面积,在未来全球气候变暖的影响下,展现出不同的扩张方向,说明油杉属植物具有引种潜质。

本研究中,与降水和温度有关的变量,在 4 种植物中均位居前列。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。张兴旺等^[23]采用类似的办法对 19 个气候变量的主成分分析表明,限制麻栎(*Quercus acutissima*)地理分布的主导因子依次为湿度因子、耐旱能力和温度因子;贾翔等^[24]认为主导红松(*Pinus koraiensis*)地理分布的因子为年降雨量、降雨量季节性变异系数、海拔和年平均温度。

研究证明物种的分布格局与持续变化的气候有密切关系,随着全球温度升高,物种将向高纬度和高海拔处迁移,分布面积也会随之变化^[25]。油杉属植物是典型的第三纪孑遗植物,化石和孢粉证据表明,在地史时期,油杉属植物曾广泛分布于北半球的欧

洲、北美和东亚^[26-28]。此外,油杉属植物的地理分布也受人类活动的干扰,中国的森林覆盖率在人类的干扰活动下由史前(公元前 2000 年)的 64%降至清中叶 30%,再到建国初期全国森林覆盖率已降至 12.5%^[29]。油杉属广西中北部和四川东南部出现的间断分布格局可能与人为活动有关。

在物种分布区的预测中,气候因子是决定物种潜在地理分布的重要因子,但其他因子的影响也不容忽视,例如地形因子、土壤条件等^[30]。同时,在环境变量的筛选时,可以采用 MaxEnt 模型将生态环境因子数据多次计算,舍去贡献率为 0 的生态因子来减小对植物生境适宜性预测的影响^[31]。在后续的研究中,将进行筛选和多方面的建模,以获得更高、更显著的成功率。

参考文献:

- [1] 王崇云,马绍宾,吕军,等. 中国油杉属植物的生态地理分布与系统演化[J]. 广西植物, 2012, 32(5): 612-616.
WANG C Y, MA S B, LÜ J, *et al.* Ecogeographic distribution and phylogenetic evolution of the genus *Keteleeria* in China [J]. Guihaia, 2012, 32(5): 612-616. (in Chinese)
- [2] 刘信朝. 濒危植物油杉种群生命表与生存分析[J]. 四川林业科技, 2019, 40(1): 1-4.
LIU X C. Life table and survival analysis of an endangered *Keteleeria fortunei* population[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2019, 40(1): 1-4. (in Chinese)
- [3] 覃海宁,杨永,董仕勇,等. 中国高等植物受威胁物种名录[J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 696-744.
QIN H N, YANG Y, DONG S Y, *et al.* Threatened species list of China's higher plants[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(7): 696-744. (in Chinese)
- [4] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第七卷[M]. 北京:科学出版社, 1978.
- [5] 李国平,杨鹭生,贾小丽,等. 油杉花粉萌发与花粉管细胞骨架系统的研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(3): 511-516.
LI G P, YANG L S, JIA X L, *et al.* Pollen germination and cytoskeletal organization in pollen tube of *Keteleeria fortunei* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(3): 511-516. (in Chinese)
- [6] 何劲飞,胡大敏,刘兴虎,等. 漳河源自然保护区铁坚油杉种群分布格局研究[J]. 绿色科技, 2018(13): 13-15.
HE J F, HU D M, LIU X H, *et al.* Studies on distribution pattern of *Keteleeria davidiana* in Zhangheyan nature reserve [J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(13): 13-15. (in Chinese)
- [7] 李国平,黄群策. 油杉花粉个体发育与传粉过程[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 42-47.
LI G P, HUANG Q C. Ontogeny of pollen and pollination in *Keteleeria fortunei* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5): 42-47. (in Chinese)
- [8] 杨硕,李德营,严亮轩,等. 基于随机森林模型的乌江高陡岸坡滑坡地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 131-138.
- [9] YANG S, LI D Y, YAN L X, *et al.* Landslide susceptibility assessment in high and steep bank slopes along Wujiang river based on random forest model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(4): 131-138. (in Chinese)
- [9] 李莉莉,张璇,杜梅慧. 基于广义可加模型的 PM_{2.5} 预测研究[J]. 数理统计与管理, 2020, 39(5): 811-823.
LI L L, ZHANG X, DU M H. Research on PM_{2.5} prediction based on generalized additive model[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2020, 39(5): 811-823. (in Chinese)
- [10] 唐燕,赵儒楠,任钢,等. 基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23-32.
TANG Y, ZHAO R N, REN G, *et al.* Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 23-32. (in Chinese)
- [11] FOURCADE Y, ENGLER J O, RODDER D, *et al.* Mapping species distributions with maxent using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias[J]. PLoS One, 2014, 9: 5.
- [12] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modeling, 2006, 190: 231-259.
- [13] 陈文德,朱坤,姚文文,等. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 空间技术对大熊猫在岷山地区的时空变化分析及预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 182-190.
CHEN W D, ZHU K, YAO W W, *et al.* Analysis and prediction of temporal and spatial changes of giant pandas in the area of Minshan mountains based on Maxent model and GIS spatial technology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 182-190. (in Chinese)
- [14] 辜云杰,李晓清,杨汉波. 基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的潜在适宜栽培区[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 136-141.
GU Y J, LI X Q, YANG H B. MaxEnt model-based prediction of suitable cultivation area of *Phoebe zhennan* in China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 136-141. (in Chinese)
- [15] 洪宇辰,杨星萍,贺倩,等. 基于 GIS 和 MaxEnt 模型的川内泽兰属植物生境适宜性评价[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2018, 49(5): 759-762.
HONG Y C, YANG X P, HE Q, *et al.* Evaluation of habitat suitability of *Eupatorium spp.* in Sichuan Province based on GIS and MaxEnt model [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2018, 49(5): 759-762. (in Chinese)
- [16] 王雨生,王召海,邢汉发,等. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1230-1237. (in Chinese)
- [17] WANG Y S, WANG Z H, XING H F, *et al.* Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucreata* Baill in China based on MaxEnt [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 1230-1237. (in Chinese)
- [17] 王璐,许晓岗,李奎. 末次盛冰期以来陀螺果潜在地理分布格

- 局变迁预测[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 278-286.
- WANG L, XU X G, LI Y. Prediction of potential geographical distribution pattern change for *Meliiodendron xylocarpum* Handel-Mazzetti since the last glacial maximum[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 278-286. (in Chinese)
- [18] 周奕景, 吕飞, 杨凤英, 等. 基于 DIVA-GIS 和 MaxEnt 的美雕齿小蠹适生区预测对比研究[J]. 植物检疫, 2019, 33(4): 63-68.
- ZHOU Y J, LV F, YANG F Y, *et al.* Comparative study of potential geographical distribution for *Ips calligraphus* based on DIVA-GIS and MaxEnt[J]. Plant Quarantine, 2019, 33(4): 63-68. (in Chinese)
- [19] 孟艺宏, 徐瑛, 姜小龙, 等. 双花木属植物潜在分布区模拟与分析[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2816-2825.
- MENG Y H, XU X, JIANG X L, *et al.* Potential distribution modeling and analysis of *Disanthus Maxim*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 39(8): 2816-2825. (in Chinese)
- [20] 李涌福, 张成, 朱弘, 等. 野桂花和管花木犀的适宜分布区及主要气候变量分析[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(1): 71-78.
- LI Y F, ZHANG C, ZHU H, *et al.* Analyses on suitable distribution areas and main climatic variables of *Osmanthus yunnanensis* and *O. delavayi*[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2019, 28(1): 71-78. (in Chinese)
- [21] BRUCE H, TIFFNEY, PERSPECTIVES ON THE ORIGIN OF THE floristic similarity between Eastern Asia and Eastern North America[J]. Journal of the Arnold Arboretum, 1985, 66(1).
- [22] 王岩, 吴大鹏, 周文良. 基于 ArcGIS 的地类统计分析工具研发与应用[J]. 城市勘测, 2021(3): 45-48.
- WANG Y, WU D P, ZHOU W L. Development and application of land type statistical analysis tool based on ArcGIS[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(3): 45-48. (in Chinese)
- [23] 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.
- ZHANG X W, LI Y, FANG Y M. Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissima* in China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(8): 1685-1692. (in Chinese)
- [24] 贾翔, 王超, 金慧, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型评价红松适宜分布区[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2570-2576.
- JIA X, WANG C, JIN H, *et al.* Assessing the suitable distribution area of *Pinus koraiensis* based on an optimized Max-Ent model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2570-2576. (in Chinese)
- [25] MCCARTY J. Ecological consequences of recent climate change [J]. Conservation Biology, 2001, 15: 320-331.
- [26] WOLFE J A. Tertiary climatic fluctuations and methods of analysis of tertiary floras[J]. Elsevier, 1971, 9(1).
- [27] BRUCE H, TIFFNEY, STEVEN R, *et al.* The use of geological and paleontological evidence in evaluating plant phylogeographic hypotheses in the northern hemisphere tertiary[J]. International Journal of Plant Sciences, 2001, 162(S6).
- [28] 左家哺. 中国油杉属分布型与植物区系分区关系的模糊分析[J]. 中南林学院学报, 1989, 9(2): 199-205.
- [29] 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.
- [30] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 许仲林, 等. 基于 MaxEnt 模型对新疆地区的蒙古沙拐枣潜在分布预测及适生性分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 71-77.
- Sayit Hamit, Nurbay Abdushalih, XU Z L, *et al.* Analysis of potential distribution and suitable area of *Calligonum mongolicum* in Xinjiang based on MaxEnt model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 71-77. (in Chinese)
- [31] 帕尔曼·帕哈尔丁, 楚光明, 常亚玲, 等. 基于最大熵(Max-Ent)模型对西北地区 2 种红砂属植物潜在适宜区预测分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 18-25.
- Perlman Pahardin, CHU G M, CHANG Y L, *et al.* Prediction and analysis of two potential suitable areas of *Reaumria* plants northwest China based on the maximum entropy (MaxEnt) model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 18-25. (in Chinese)