

## 不同碳排放模式下云南榿树适生区分布研究

于达勇<sup>1</sup>, 樊智丰<sup>1</sup>, 马长乐<sup>1,2\*</sup>

(1. 西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650224;

2. 西南林业大学 国家林业和草原局西南风景园林工程技术研究中心, 云南 昆明 650224)

**摘要:**研究气候变化背景下云南榿树适生区分布,有助于理解该物种分布区的变迁历史和未来保护策略的制定。基于45个有效地理分布点以及19个环境气候变量,利用Maxent模型与ArcGIS对不同时期云南榿树的适生区进行模拟,其ROC特征曲线下的面积接近于1,MaxEnt模型的预测准确度高,可用于预测云南榿树适生区。结果表明,刀切法Jackknife和气候累计贡献率显示,影响云南榿树分布的主导环境变量为最暖季度降水量(bio18)和最冷月份最低温(bio6)。自末次盛冰期至全新世中期再到当前,云南榿树种群质心迁移路线为高黎贡山—丽江—维西,面积变化呈先增加再减少的趋势,当前我国云南榿树主要分布于云南、四川和西藏等地区,预测2070年在4种不同碳排放模式下,云南榿树适生区均发生不同程度的北移,且碳排放越高北移程度越明显。随着历史时间的推移,云南榿树适生区呈向北迁移的趋势,在未来全球气候变暖的情景下,云南榿树的分布面积不会减少,四川极可能成为云南榿树新的分布区。

**关键词:**云南榿树;适生区;气候变化;Maxent模型

**中图分类号:**S791.53

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)03-0040-07

### Distribution of Suitable Areas of *Torreya yunnanensis* Under Different Carbon Emission Modes

YU Da-yong<sup>1</sup>, FAN Zhi-feng<sup>1</sup>, MA Chang-le<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Landscape Architecture and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Southwest Landscape Architecture Engineering Technology Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** *Torreya yunnanensis* is a national key protected plant. Studying the distribution of suitable habitat of *T. yunnanensis* under the background of climate change will help us to understand the historical changes of the species distribution area and the formulation of future conservation strategies. Based on 45 occurrence records and 19 climatic variables, the potential suitable areas of *T. yunnanensis* in different periods were simulated by MaxEnt model and ArcGIS. The area under the receiver operating characteristic curve was close to 1, indicating that the MaxEnt model had high prediction accuracy and could be used to predict the suitable distribution area of *T. yunnanensis*. The results of Jackknife method and the contribution rate of climate showed that the dominant environmental variables affecting the distribution were the precipitation of the warmest quarter (bio18) and the min temperature of the coldest month (bio6). From the last glacial maximum to the middle Holocene, and then to the present, the centroid migration route was Gaoligong Mountain-Lijiang-Weixi, with an area change trend of first increasing and then decreasing. At

收稿日期:2022-04-10 修回日期:2022-05-19

基金项目:云南省农业联合项目(202101BD070001-100),国家自然科学基金(31360037),云南省教育厅基金(2021Y260)。

第一作者:于达勇。研究方向:植物群落生态。E-mail:1933917523@qq.com

\*通信作者:马长乐,博士生导师,教授。研究方向:风景园林。E-mail:machangle@sina.com

present, *T. yunnanensis* is mainly distributed in Yunnan, Sichuan and Tibet, it is predicted that the suitable growth area would migrate northward in varying degrees under four different carbon emission modes in 2070, and the higher the carbon emission, the more obvious the northward shift. With the passage of historical time, the suitable area showed a trend of migrating northward. The distribution area would not decrease under future global warming, and Sichuan Province would be likely to become a new distribution area.

**Key words:** *Torreya yunnanensis*; suitable area; climate change; Maxent model

植物地理分布与气候之间的关系是植物生态学和生物地理学研究的热点问题<sup>[1]</sup>。气候变化是影响植物地理分布的主要因素之一,可直接或间接改变植物物种的适宜分布范围(如:扩大、缩小和迁移)<sup>[2-3]</sup>。自末次盛冰期以来,气候变化已对地球上大部分植物的地理分布产生了影响,在末次盛冰期结束后幸存下来的陆生植物便从避难所向其他地区扩散迁移<sup>[4-5]</sup>,近年来人类活动加剧了气候变暖,据IPCC第5次报告显示,预计21世纪末与基准期(1986—2005年)相比,全球地表平均温度将升高0.3~4.8℃<sup>[6]</sup>。未来气候变化可能是生物多样性丧失的主要推动力<sup>[7]</sup>,一些物种可能会因此面临灭绝<sup>[8]</sup>。分析不同气候时期物种的地理空间分布,不仅有助于了解植物物种分化起源,也有助于解决在未来物种分布地变化所引起的相关问题<sup>[9]</sup>。目前预测物种分布的模型有Maxent、ENFA、BIOCLIM、GLM等,其中Maxent模型的预测效果较好,具有较高的可信度,已广泛运用于野生植物保护和入侵物种防护等方面<sup>[10-11]</sup>。

红豆杉科(Taxaceae)榧树属(*Torreya*)植物共有7种,现分布于中国、日本、美国等地区。根据化石资料记载,榧属植物在中侏罗纪至第三纪上新纪分布于北美、欧洲及亚洲,欧洲虽有不少榧属化石报道,但至今已无榧属植物的踪迹<sup>[12]</sup>。云南榧树(*T. yunnanensis*)是国家重点保护野生植物<sup>[13]</sup>,是我国特有种。该树木质坚硬、耐水耐腐,为优质木材原料,其果实既可药用,也可食用,具有一定医学和经济价值。主要分布区位于云南省境内,因人为影响和自身因素使得野生云南榧树种群数量日益减少。

目前已有一些榧属植物分布和起源的研究报道<sup>[14-15]</sup>,但对云南榧树分布情况的研究较少<sup>[16-17]</sup>,更多是集中于对其营养成分、化学成分和遗传多样性等方面<sup>[18-19]</sup>。本研究采用Maxent模型来预测不同气候时期云南榧树适宜生长区的动态变化,探讨过去(末次盛冰期、全新世中期)、当前、未来(2070年)情况下云南榧树适生区之间的差异,模拟云南榧树种群的迁移方向,为今后研究榧树属植物起源和分化奠定基础,同时也为云南榧树的保护和开发提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 地理坐标的获取

云南榧树地理分布坐标主要来自于中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、已发表的相关文献和野外实地调查所得坐标数据<sup>[16-17]</sup>,共收集地理坐标54个。考虑到气候数据精度,在地图上2.5'×2.5'的网格中保留1个分布点,将距离较近的重复点剔除后获得有效居群经纬度坐标点共45个。

### 1.2 环境变量获取与筛选

年均温、年降水量、等温性等19个环境气候变量数据来源于世界气候数据库WorldClim(<https://www.worldclim.org/>),下载过去气候数据(末次盛冰期、全新世中期)、当前(1960—1990年)气候数据以及未来(2070年)4种温室气体排放情景下<sup>[20-21]</sup>(低碳排放量RCP2.6、中碳排放量RCP4.5、高碳排放量RCP6.0、高碳排放量RCP8.5,分别代表强迫辐射值上升2.6、4.5、6.0 W·m<sup>-2</sup>和8.5 W·m<sup>-2</sup>)的1.4气候数据,所有气候图层分辨率均为2.5'。由于气候环境变量间存在相关性,为了避免出现气象数据过拟合现象,采用相关性分析与Maxent模型输出的累计贡献率结合的方式对环境变量进行筛选(表1、表2)。

当环境变量间的相关性较高(pearson系数>0.90)时,剔除累计贡献率较低的环境变量,保留1个最有生态意义的环境变量作为气候变量,从而减小误差获得更为准确的预测结果。如:最暖季度的降水量和年均降水量之间、最暖季度的降水量和最湿月份的降水量之间、最暖季度的降水量和最湿季度的降水量之间的Pearson指数均大于0.9,而最暖季度的降水量对结果的累计贡献率为33.4%,远大于年均降水量、最湿月份的降水量和最湿季度的降水量,因此剔除这3个环境变量保留最暖季度的降水量。通过该方式在19个环境气候变量之间进行筛选,经筛选最终获得等温性、温度季节性变化的标准差、降水量变异系数等8个环境变量用于云南榧树适生区的预测。

1.3 Maxent 的建立和适生等级的划分

将筛选的 8 个环境变量和云南榧树的分布坐标转化为 asc 格式导入 Maxent,选择 25%的坐标点为测试集,其余的 75%为训练集,最大迭代次数为 500,采用刀切法验证权重,其他属性默认重复 10 次进行云南榧树适生区的预测,绘制云南榧树在过去、当代和未来不同环境下的适生区分布情况。

1.4 云南榧树不同时期适生区变化及质心迁移

基于不同时期的适生区栅格数据,统计各时期

适生区面积的分布结果。计算不同时期适生区分布面积比  $NA = \text{当前分布区域} / \text{过去分布区域}$ 、 $NA = \text{未来分布区域} / \text{当前分布区域}$ ,以及扩张或收缩程度  $NE = 1 - (\text{其他时期和当前重叠区域面积} / \text{当前分布区面积})$ 、 $NE = 1 - (\text{其他时期和当前重叠区域面积} / \text{其他时期})$ ,比较不同时期的云南榧树适生区面积变化<sup>[22]</sup>。采用 ArcGIS 中的物种分布模型(SDMs)工具包<sup>[23]</sup>计算不同时期云南榧树适生区质心迁移状况。

表 1 19 个生物气候变量间 pearson 相关性  
Table 1 Pearson correlation among 19 bioclimatic variables

代码	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9	bio10	bio11	bio12	bio13	bio14	bio15	bio16	bio17	bio18
bio2	0.03																	
bio3	-0.10	0.39																
bio4	0.11	0.00	-0.88															
bio5	0.98	0.08	-0.26	0.30														
bio6	1.00	-0.02	-0.08	0.06	0.96													
bio7	0.15	0.36	-0.69	0.92	0.35	0.09												
bio8	0.99	0.03	-0.20	0.22	0.99	0.99	0.25											
bio9	0.99	-0.03	-0.16	0.15	0.97	0.99	0.16	0.99										
bio10	0.99	0.03	-0.20	0.22	0.99	0.99	0.25	1.00	0.99									
bio11	0.99	0.03	-0.01	0.00	0.95	1.00	0.05	0.98	0.98	0.98								
bio12	0.65	-0.56	-0.37	0.12	0.61	0.66	-0.03	0.65	0.65	0.65	0.64							
bio13	0.48	-0.56	-0.46	0.24	0.48	0.49	0.08	0.50	0.49	0.50	0.46	0.94						
bio14	0.52	-0.56	-0.13	-0.16	0.41	0.53	-0.30	0.48	0.51	0.48	0.53	0.81	0.59					
bio15	-0.62	0.47	0.39	-0.19	-0.59	-0.62	-0.03	-0.63	-0.66	-0.63	-0.60	-0.65	-0.40	-0.82				
bio16	0.59	-0.53	-0.36	0.13	0.56	0.59	-0.01	0.59	0.58	0.59	0.57	0.98	0.98	0.70	-0.49			
bio17	0.44	-0.57	0.06	-0.37	0.30	0.46	-0.52	0.39	0.44	0.39	0.48	0.66	0.41	0.94	-0.78	0.53		
bio18	0.59	-0.53	-0.36	0.13	0.56	0.59	-0.01	0.59	0.58	0.59	0.57	0.98	0.98	0.70	-0.49	1.00	0.53	
bio19	0.63	-0.58	-0.28	0.00	0.56	0.64	-0.17	0.61	0.64	0.61	0.63	0.89	0.70	0.97	-0.88	0.79	0.89	0.79

表 2 19 个环境因子筛选  
Table 2 Screening of 19 environmental factors

代码	气候因子	累计 贡献率(%)	状态	代码	气候因子	累计 贡献率(%)	状态	代码	气候因子	累计 贡献率(%)	状态
bio1	年平均气温	0.2	剔除	bio8	最湿季度的平均气温	0.9	剔除	bio14	最干月份的降雨量	1.3	剔除
bio2	昼夜温差月均值	1.1	保留	bio9	最干季度的平均气温	5.1	剔除	bio15	降雨量的方差	3.9	保留
bio3	等温性	2.5	保留	bio10	最暖季度的平均温度	0	剔除	bio16	最湿季度的降雨量	2	剔除
bio4	季节性温度变化方差	9.9	保留	bio11	最冷季度的平均温度	15.6	剔除	bio17	最干季度的降雨量	5	保留
bio5	最热月的最高温度	0	剔除	bio12	年均降雨量	0	剔除	bio18	最暖季度的降雨量	33.4	保留
bio6	最冷月的最低气温	16.7	保留	bio13	最湿月份的降雨量	0.2	剔除	bio19	最冷季度降雨量	1.1	保留
bio7	年温的变化范围	1.2	剔除								

2 结果与分析

2.1 Maxent 精度检测

通过受试者工作特性 ROC 曲线验证 Maxent 模型的预测精度,对筛选出的 8 个主导环境变量进行 10 次重复模拟后所得的 AUC 值高达 0.998,远大于 0.9,说明用 Maxent 模型预测云南榧树适生区的结果具有较好的可信度,可采用这 8 个主导环境变量作为预测因子。

2.2 云南榧树适生区预测

通过 Maxent 模型预测得云南榧树当前时期适生区分布范围(图 1),并根据适生等级进行统计划分。结果显示,在我国云南榧树可生长的地区有:云南省北部、四川省南部、贵州省东部以及西藏喜马拉雅山脉地区等地区。最适宜云南榧树生长的地区则位于凉山州、错那县和维西县。云南省内云南榧树适生区模拟结果与现有的云南榧树分布相同,位于滇西北维西县附近<sup>[16]</sup>。而预测结果中云南榧树适生区跨

入了四川省境内,并与巴山榧树(*Torreya fargesii*)适生区存在部分重合<sup>[14]</sup>,两者关系有待考证。

### 2.3 影响云南榧树分布的主导环境变量

使用刀切法 Jackknife 分析环境变量对预测结果的影响(图2),以确定环境变量重要性。仅使用单独因子时,训练集增益结果表明,对云南榧树分布影响较大的环境变量主要为最暖季度降水量(bio18)、温度季节性变化的标准差(bio4)和最冷月

份最低温(bio6),测试增益结果均大于2.5,对云南榧树的分布影响较大。再次对 Maxent 模型的各因子贡献率进行分析,发现最暖季度降水量(bio18)的累计贡献率最大,达36.2%,其次为最冷月份最低温(bio6)、等温性(bio3)和最冷季度降水量(bio19),累计贡献率分别为28.3%、13.5%、6.8%。因此可推断出影响云南榧树分布的主导环境变量为最暖季度降水量和最冷月份最低温。

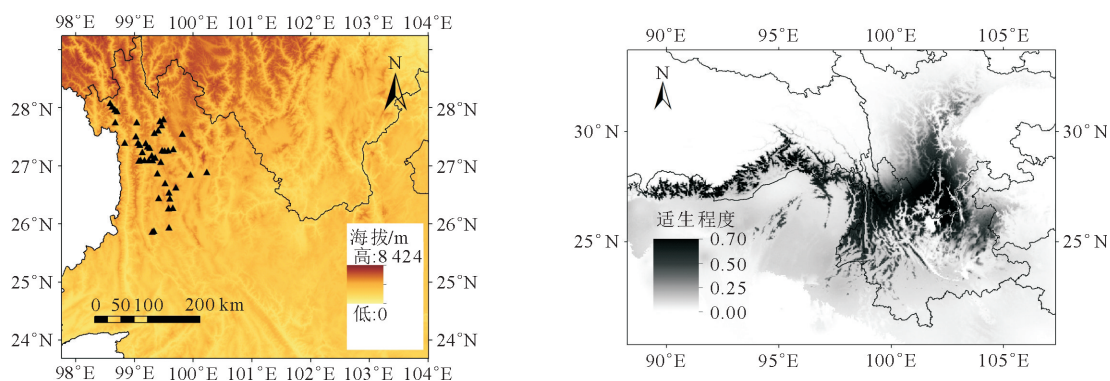


图1 云南榧树当前时期适生区与现有分布对比

Fig. 1 Comparison between the suitable area of *Torreya yunnanensis* in the present and the existing distribution

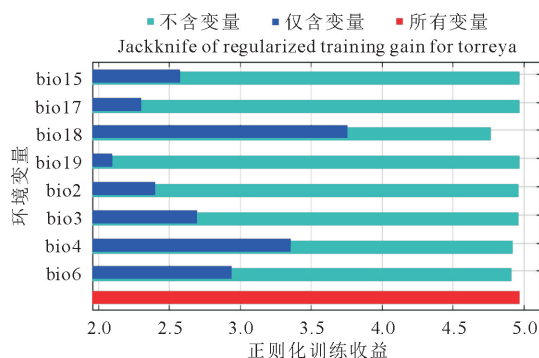


图2 云南榧树环境变量重要性刀切法检验

Fig. 2 Jackknife test of the importance of environmental variables of *T. yunnanensis*

### 2.4 不同气候时期云南榧树适生区动态变化

以0.5作为云南榧树是否适生的阈值<sup>[24]</sup>,对比当前时期与其他气候时期分布区面积(图3、表3)。结果显示,在末次盛冰期云南榧树适宜生长地区主要分布于云南省西部与北部以及四川南部和西藏的部分地区,适生面积共112 125.84 km<sup>2</sup>。该时期与当前时期适生面积比NA为1.01,2个时期适生面积相当。NE扩张和收缩相当(0.4左右),说明末次盛冰期与当前相比,大部分的适生地区存在重叠。

在气候更加适宜的全新世中期,云南榧树的适生面积达到最大值,适生面积共186 067.12 km<sup>2</sup>。此时临沧一带虽不再适合云南榧树生长,但维西、丽江以及昆明等地区开始进入适生区范围,甚至在四川南部出现了大面积云南榧树适生区。直到当前时

期,云南榧树适生面积出现了大范围的缩减,在全新世中期基础上收缩了40%左右适生面积共113 552.0 km<sup>2</sup>。其中缩减的部分主要为云南东部、中部以及四川部分地区。在未来(2070年)4种不同碳排放模式下(低碳排放量RCP2.6、中碳排放量RCP4.5、高碳排放量RCP6.0、高碳排放量RCP8.5)云南榧树的适生区面积与当前适生区面积的比值NA分别为1.07、1.09、0.98、0.97,均趋近于1,并且扩张与收缩程度大致相等,说明从当前至2070年云南榧树适生区面积不存在较大的变化,而是向北发生不同程度的迁移。北移程度与碳排放模式相关,碳排放量越大,适生区北移程度越明显。在低碳排放模式下,适生区变化较小,仅1/5的地区发生北移,在中碳排放模式下,近1/3的地区发生了迁移;在高碳排放量模式下,适生区北移明显,在云南仅有滇西北适宜云南榧树生长,而其他部分均迁移到四川南部。西藏自治区的适生区范围从过去到未来无明显变化,均分布于西藏东南部喜马拉雅山脉附近。

### 2.5 气候变化下云南榧树适生区质心迁移情况

对不同时期云南榧树适生区质心进行分析预测(图4),随着时间的推移,适生区质心会逐渐由低海拔、低纬度地区向高海拔、高纬度地区迁移。在古气候时期,末次盛冰期的适生区质心位于云南省泸水市与缅甸密支那交界处(98.76°E,26.56°N)。到了气候适宜的全新世中期,适生区质心由东偏北3°迁移到云南省丽江市附近(100.09°E,26.63°N),此次

表 3 不同时期云南榿树适生区面积与当前的关系

Table 3 Relationship between the suitable area of *T. yunnanensis* in different periods and the current

时期	适生区 面积/km <sup>2</sup>	扩张 面积/km <sup>2</sup>	NE 扩张	收缩 面积/km <sup>2</sup>	NE 收缩	NA
末次盛冰期	112 125.84	46 053.9	0.42	1 069 447.8	0.41	1.01
全新世中期	186 067.12	75 315.2	0.02	1 024 767.9	0.40	0.61
当前	113 551.98	0.0	0.00	0.0	0.00	1.00
RCP2.6 低碳排放量 2070 年	122 038.60	29 704.8	0.24	21 218.2	0.19	1.07
RCP4.5 中碳排放量 2070 年	123 204.02	46 627.3	0.38	36 975.3	0.33	1.09
RCP6.0 高碳排放量 2070 年	111 358.48	52 678.1	0.47	54 871.6	0.48	0.98
RCP8.5 高碳排放量 2070 年	110 471.37	51 112.7	0.46	54 193.3	0.48	0.97

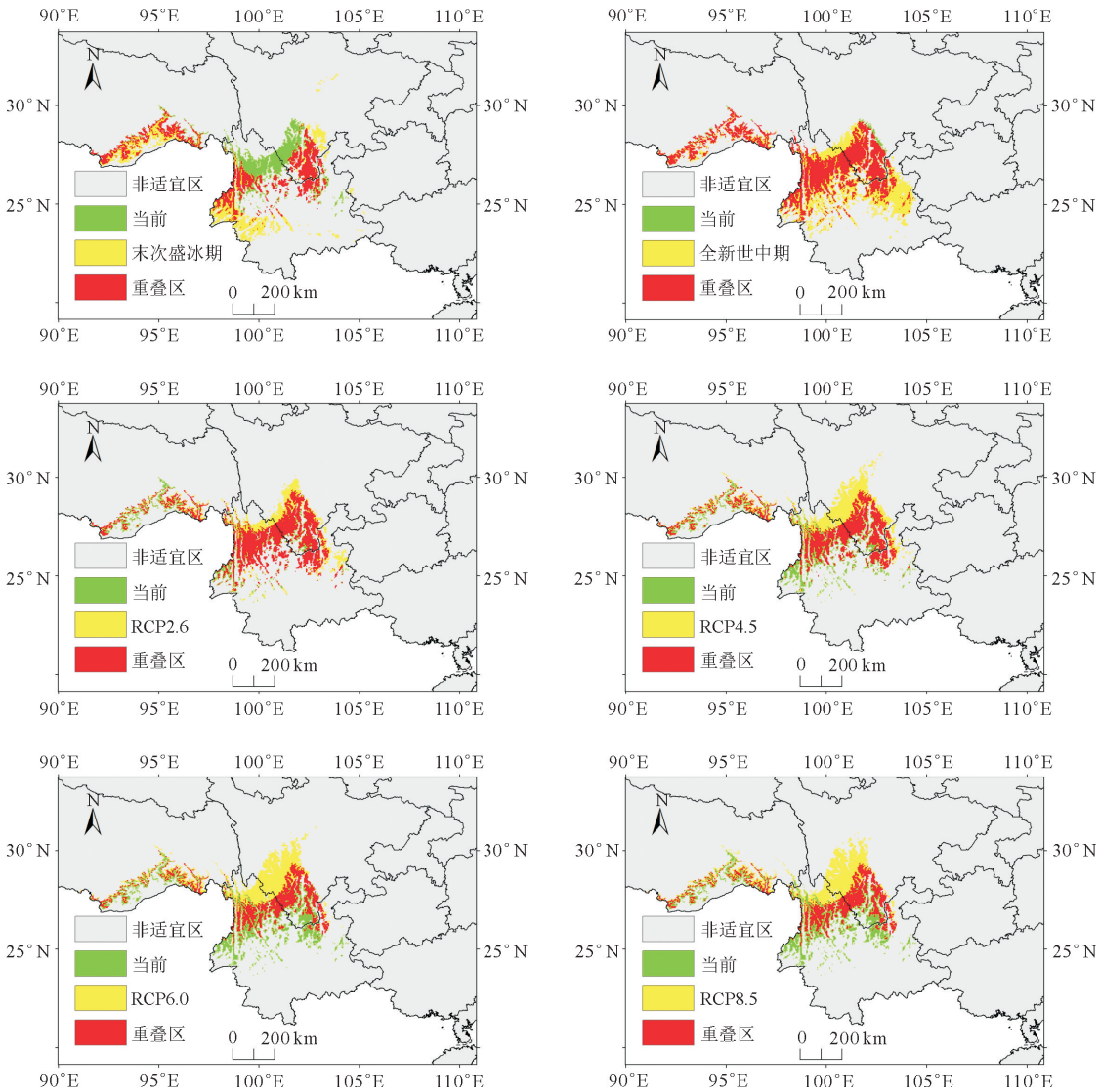


图 3 不同时期云南榿树适生区重叠图

Fig. 3 Overlapping map of suitable areas in different periods

迁移距离最远(达 132.5 km)。到当前时期,云南榿树适生区质心由西偏北 41°迁移 71.3 km 至云南省维西县(99.57°E,27.07°N)。在 2070 年,随着气候变暖云南榿树适生区质心逐渐向着云南北部迁移以避免高温对生存的影响,其迁移程度与碳排放模式有关,碳排放量越大,气候变暖越强,迁移程度越明显。低浓度温室气体排放情景下(RCP2.6),适生区

质心将向东偏北 8°的云南省宁蒗县(100.37°E,27.18°N)迁移。中浓度温室气体排放情景下(RCP4.5),则向东北方的香格里拉市南部(100.11°E,27.62°N)迁移。若是处于高浓度温室气体排放情景下(RCP6.0、RCP8.5),将分别向东偏北 69°、75°方向迁移至更高纬度、更高海拔的香格里拉市北部(99.97°E,28.04°N、99.83°E,28.03°N)并与四川

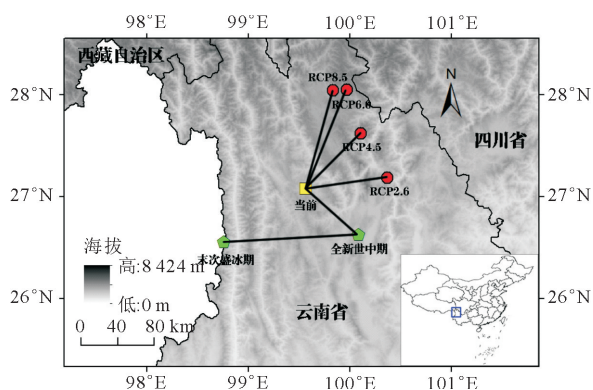


图4 云南榧树不同时期质心迁移

Fig. 4 Centroid transfer in different periods

省西南部相接,有向四川凉山州发展的趋势。

### 3 结论与讨论

在预测物种分布时,样本量越大预测的结果越准确,而对于分布点较少的物种而言,MaxEnt 模型是较好的选择<sup>[25]</sup>。云南榧树在我国分布较少,因此本研究采用 MaxEnt 模型预测其在古时期、现代以及未来不同模式下的适生区分布状况。结果显示,云南榧树适生区主要分布在云南、四川和西藏,适生区面积仅占全国面积的一小部分,说明云南榧树的分布范围较为狭窄,满足其生长环境的地区较少。适生区面积主要位于云南省北部和四川省南部,并且云南榧树适生区分布范围与巴山榧树适生区范围重叠部分较多<sup>[14]</sup>,二者的起源和物种分化关系还需进一步研究。在所有环境变量中,限制云南榧树分布的主导环境变量依次为最暖季度降水量、最冷月份最低温、等温性、最冷季度降水量等。与周炳江等<sup>[17]</sup>认为对云南榧树分布影响最大的是最冷季度降水量观点有差异,可能是有效坐标点选取不同引起的。研究还发现,降水和温度都是影响云南榧树分布的重要气候变量,两者共同作用限制着云南榧树的分布,而非单方面因素的影响。

在末次盛冰期时,云南榧树的分布质心正好位于中缅交界处的横断山脉高黎贡山北段西坡附近。该地区位于印度洋西南季风的迎风坡,处河谷低海拔地带,受降水与热量的相互叠加作用,是一个相对封闭的生态系统,适宜的局部气候使其成为古老的冰期避难所<sup>[26-27]</sup>。云南榧树极有可能在末次盛冰期在该地区进行避难,度过环境恶劣时期以获得种群的延续。气候暖和的全新世中期<sup>[28]</sup>更适宜喜温喜湿的云南榧树生长,推测该时期云南榧树逐渐越过高黎贡山迁移到云南省更多地区,此时云南榧树适生面积相比末次盛冰期扩张了 39.4%,是其分布较为广泛的时期。

目前云南榧树的质心位于云南省维西县内,这与野外实地考察结果相符合<sup>[16]</sup>。当前其适生区主要分布于云南、四川和西藏地区,并且相比全新世中期已开始向北收缩。在未来(2070年)全球气候变化背景下,一些分布较广的物种适宜能力和抵抗能力较强,可通过表型可塑性以适宜环境的变化,其适生区变化范围较小<sup>[29]</sup>。而另一些物种则不能适应气候的改变,为寻求更适宜环境的生长,有向气温较低的高海拔和高纬度地区迁移的趋势<sup>[30-32]</sup>,本研究结果亦是如此,并且云南榧树适生区的迁移程度与碳排放模型相关,碳排放越大气候变暖越强,迁移程度越明显。低碳排放下北移程度较小,中碳排放下则迁移到香格里拉市南部,而在高碳排放模式下,将迁移到香格里拉市北部并与四川凉山州接壤。值得一提的是,在未来4种碳排放模式下,云南榧树适生区扩张面积和收缩面积大致相等,说明在未来其并不会因为气候变暖而减少,而是将适生区的一部分迁移到高纬度的四川省内,因此推测四川省具有成为云南榧树新分布区的潜力。

### 参考文献:

- [1] 王娟,倪健. 植物种分布的模拟研究进展[J]. 植物生态学报, 2006(6):1040-1053.  
WANG J, NI J. Review of modelling the distribution of plant species[J]. Journal of Plant Ecology, 2006(6):1040-1053. (in Chinese)
- [2] FITZPATRICK M C, GOVE A D, SANDERS N J, et al. Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: the *Banksia* (Proteaceae) of western Australia[J]. Global Change Biology, 2008, 14(6):1337-1352.
- [3] 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.
- [4] 邱浩杰,孙杰杰,徐达,等. 末次盛冰期以来红豆树在不同气候变化情景下的分布动态[J]. 生态学报, 2020, 40(9):3016-3026.  
QIU H J, SUN J J, XU D, et al. The distribution dynamics of *ormosia hosiei* under different climate change scenarios since the last glacial maximum[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9):3016-3026. (in Chinese)
- [5] JACKSON S T, OVERPECK J T. Responses of plant populations and communities to environmental changes of the late quaternary (article)[J]. Paleobiology, 2000, 26:194-220.
- [6] CHURCH J A, CLARK P U, CAZENAVE A, et al. Chapter 13 in: climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [7] URBAN, MARK C. Accelerating extinction risk from climate change. [J]. Science, 2015, 348(6234):571-573.
- [8] WIENS J J. Climate-related local extinctions are already wide-

- spread among plant and animal species[J]. PLoS Biology, 2016, 14(12):2001104.
- [9] FEN K, LING T, HUAN H, *et al.* Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using maxent[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(26):34655-34663.
- [10] 宋颖, 张港隆, 贾全全, 等. 气候变化下花桐木在我国的潜在分布区预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6):108-115, 273.  
SONG Y, ZHANG G L, JIA Q Q, *et al.* Prediction of potential distribution of *Ormosia henryi* in China under climate change[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6):108-115, 273. (in Chinese)
- [11] 施晨阳, 赖文峰, 文国卫, 等. 基于 Maxent 模型预测水曲柳的潜在适生区[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2):149-156.  
SHI C Y, LAI W F, WEN G W, *et al.* Prediction of the potentially suitable area of *Fraxinus mandshurica* based on Maxent model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2):149-156. (in Chinese)
- [12] 康宁, 汤仲坝. 榿属分类学研究[J]. 植物研究, 1995(3):349-362.
- [13] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. 国家林业和草原局农业农村部公告 2021 年第 15 号. 2021. 09. 07. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content\\_5636409.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm)
- [14] 周先容, 余岩, 周颂东, 等. 巴山榿树地理分布格局及潜在分布区[J]. 林业科学, 2012, 48(2):1-8.  
ZHOU X R, YU Y, ZHOU S D, *et al.* Geographic distribution and potential distribution of *Torreya fargesii*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2):1-8. (in Chinese)
- [15] 陈小秉, 王震明, 柳钢峰. 基于 MaxEnt 模型的绍兴市香榿潜在适生区研究[J]. 南方农业, 2019, 13(12):184-186.
- [16] 侯昭强, 文光玉, 周丹, 等. 云南榿树群落及其植物区系特征研究[J]. 西部林业科学, 2015, 44(3):37-44.  
HOU Z Q, WEN G Y, ZHOU D, *et al.* Floristic characteristics and flora of *Torreya yunnanensis* community[J]. Journal of West China Forestry Science, 2015, 44(3):37-44. (in Chinese)
- [17] 周炳江, 王玉洁, 马长乐, 等. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析[J]. 生态学报, 2022, 42(11):1-9.  
ZHOU B J, WANG Y J, MA C L, *et al.* Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on maxent and arcgis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11):1-9. (in Chinese)
- [18] 马长乐, 胥辉, 白琼, 等. ICP-OES 法测定云南榿树不同部位矿质元素[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(7):30-1, 6.  
MA C L, XU H, BAI Q, *et al.* Determination of mineral elements in different parts of *Torreya yunnanensis* by ICP-OES[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(7):30-1, 6. (in Chinese)
- [19] 李洪雷, 李飞飞, 马少杰. 云南榿树中木脂内酯类化合物 Torreyunlignans 与 PDE9A 同源蛋白 3JSW 的分子对接研究[J]. 药学研究, 2016, 35(9):511-513.  
LI H L, LI F F, MA S J. Study on the molecular docking of PDE9A homologous 3JSW and Torreyunlignans derivatives[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 35(9):511-513. (in Chinese)
- [20] MEINSHAUSEN M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300[J]. Climatic Change, 2011, 109:213-241.
- [21] 张晓华, 高云, 祁悦, 等. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1):14-19.
- [22] XIAO L J, MIN D, YING L. Evolutionary history of subtropical evergreen broad-leaved forest in Yunnan Plateau and adjacent areas: an insight from *Quercus schottkyana* (Fagaceae)[J]. Tree Genetics & Genomes, 2016, 12(6):104.
- [23] BROWN, JASON L, BENNET T, *et al.* SDMtoolbox 2. 0: the next generation python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. [J]. Peerj, 2017, 5(12):4095
- [24] JIMÉNEZ V A, JORGE M. L. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence[J]. Acta Oecologica, 2007, 31(3):361-369.
- [25] 杨腾, 王世彤, 魏新增, 等. 中国特有属秤锤树属植物的潜在分布区预测[J]. 植物科学学报, 2020, 38(5):627-635.  
YANG T, WANG S T, WEI X Z, *et al.* Modeling potential distribution of an endangered genus (*Sinojackia*) endemic to China[J]. Plant Biotechnology Journal, 2020, 38(5):627-635. (in Chinese)
- [26] 李嵘, 纪运恒, 刀志灵, 等. 高黎贡山北段东西坡种子植物区系的比较研究[J]. 云南植物研究, 2008(2):129-138.
- [27] 陈冬梅, 康宏樟, 刘春江. 中国大陆第四纪冰期潜在植物避难所研究进展[J]. 植物研究, 2011, 31(5):623-632.  
CHEN D M, KANG H Z, LIU C J. An overview on the potential quaternary glacial refugia of plants in China mainland[J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(5):623-632. (in Chinese)
- [28] 田芝平, 姜大膀. 全新世中期和末次冰盛期中国季风区面积和季风降水变化[J]. 科学通报, 2015, 60(4):400-410.
- [29] 关心怡, 石慰, 曹坤芳. 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[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(6):661-668.
- [30] 李望军, 冯图, 崔涛, 等. 全球气候变化下贵州省青冈林的潜在生境动态[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(2):145-152.  
LI W J, FENG T, CUI T, *et al.* Dynamics of potential distribution of *Cyclobalanopsis* forest in Guizhou Province of china under global climate change[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(2):145-152. (in Chinese)
- [31] YUAN M W, XUE L S, LING T, *et al.* Impact of past and future climate change on the potential distribution of an endangered montane shrub *Lonicera oblata* and its conservation implications[J]. Forests, 2021, 12(125):125.
- [32] 黄睿智, 于涛, 赵辉, 等. 气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5):33-43.  
HUANG R Z, YU T, ZHAO H, *et al.* Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5):33-43. (in Chinese)