

西南地区寒温性针叶林乔木对气候变化的响应

滕 皎,李 慧,陆双飞,殷晓洁*,李 干,陈 智,王 妍

(西南林业大学,云南 昆明 650224)

摘 要:为研究中国西南地区寒温性针叶林地理分布对气候变化的响应,以西南地区 20 种寒温性针叶林主要乔木树种地理分布数据为依据,通过最大熵(MaxEnt)模型和地理信息系统,结合气候、地形、土壤等环境因子,预测各乔木树种在未来(2070 年)气候变化下的潜在适生区动态并分析潜在分布区的环境特征,旨在为气候变化下寒温性针叶林资源保护及可持续经营提供理论参考。结果表明,1)20 个树种的地理分布模型的 AUC 值均 >0.85 ,表明模型预测精度较高。2)2070 年 BCC-CSM2-MR 模式 SSPs126 和 SSPs245 情景下,20 种寒温性针叶林适生区整体呈现向高纬度、高海拔迁移的趋势;其中,苍山冷杉、冷杉、长苞冷杉、急尖长苞冷杉、鳞皮冷杉、大果红杉、云杉、丽江云杉、川西云杉、西藏云杉和青杆的潜在适生分布区均呈现扩张趋势,锡金冷杉、巴山冷杉、岷江冷杉、祁连圆柏、大果圆柏、麦吊云杉、青海云杉和紫果云杉的潜在适生区呈现缩小趋势,而川滇冷杉潜在适生区变化最小。3)寒温性针叶林地理分布的 6 个主导环境影响因子及范围依次为:海拔(1 283~4 800 m) $>$ 降水量(389~1 623 mm) $>$ 气温的季节性(446~1 073) $>$ 坡度($2^{\circ}\sim 34^{\circ}$) $>$ 等温性(30~52) $>$ 最冷月最低气温($-20\sim 3^{\circ}\text{C}$)。

关键词:寒温性针叶林;地理分布;气候变化;最大熵模型;西南地区

中图分类号:S718.45

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0033-12

Responses of Cold-Temperate Coniferous Forest to Climate Change in Southwestern China

TENG Jiao, LI Hui, LU Shuang-fei, YIN Xiao-jie*, LI Gan, CHEN Zhi, WANG Yan

(Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract:Based on the geographical distribution data of 20 main cold-temperate coniferous forest species and environmental factors such as climate, topography and soil, the potential habitat under the future climate change (2070) was predicted by the maximum entropy model (MaxEnt) to study the responses of geographical distribution of cold-temperate coniferous forest to climate change in Southwestern China. And environmental characteristics of potential distribution areas of the trees in the region were analyzed to provide theoretical references for the conservation and sustainable management of cold-temperate coniferous forest resources under climate change. The results showed that 1) the AUC values of the geographical distribution models of 20 tree species were more than 0.85, indicating high model prediction accuracy. 2) Under the SSPs126 and SSPs245 climate scenarios of the 2070 BCC-CSM2-MR model, the suitable distribution areas of 20 cold-temperate coniferous forests would show a trend of moving to higher latitudes and altitudes. The potential suitable distribution areas of *Abies delavayi*, *A. fabri*, *A. georgei*, *A. georgei* var. *smithii*, *A. squamata*, *Larix potaninii* var. *australis*, *Picea asperata*, *P. likiangensis*, *P. likiangensis* var. *rubescens*, *P. spinulosa* and *P. wilsonii* showed an expansion trend. The potential suitable distribution areas of *A. densa*, *A. fargesii*, *A. fargesii* var. *faxoniana*, *Juniperus przewalskii*, *J. tibetica*, *P. brachyty-*

收稿日期:2022-05-15 修回日期:2022-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(31700467);西南林业大学博士科研启动基金项目(112003)。

第一作者:滕 皎。研究方向:3S 技术在林业中的应用。E-mail:tengj2020@163.com

* 通信作者:殷晓洁,副教授,硕士生导师。研究方向:全球变化下植被的适应性、脆弱性和地理分布响应。E-mail:xjyinnan@163.com

la, *P. crassifolia* and *P. purpurea* would decrease. The potential suitable distribution areas of *A. forrestii* would show the smallest change. 3) The 6 dominant environmental impact factors of the cold-temperate coniferous forest geographical distribution were as follows: altitude (1 283–4 800 m) > precipitation (389–1 623 mm) > temperature seasonality (446–1 073) > slope (2°–34°) > isothermality (30–52) > minimum temperature of the coldest month (–20–3 °C).

Key words: cold-temperate coniferous forest; geographical distribution; climate change; maximum entropy model; southwestern China

物种的分布规律、格局与气候的响应关系一直是生态学、植物学、地理学等学科研究的热点问题之一^[1]。IPCC 第六次评估报告指出,在未来 20 a 内全球平均气温将达到或超过 1.5 °C^[2]。在全球气候变暖的趋势下,全球有 15%~37% 的物种可能会即将灭绝^[3],但也有许多物种正通过改变其地理分布规律及格局来适应气候变化,尽管这种变化可能是不定向的、不均匀的,但常常是随着温度的升高而向高纬度或高海拔区域迁移,以找到更适合自身生存的区域^[4-6]。因此进行物种地理分布对气候变化响应的研究具有重要价值。

寒温性针叶林主要是以冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)、刺柏属(*Juniperus*)落叶松属(*Larix*)等的一些乔木树种为主,在西南地区主要分布于我国总地形的一、二级阶地向青藏高原的过渡地带,海拔在 2 200~4 200 m,是横断山区典型的垂直带植被类型^[7]。西南地区寒温性针叶林是国家实施“天然林保护工程”的主体,是我国重要的用材林和水源涵养林,同时也是西南及长江上游地区重要的生态屏障^[8-9]。在我国亚热带亚高山地区分布范围有限,其自然更新对气候变化非常敏感,是研究全球气候变化对陆生生态系统影响的代表性植被类型^[10-11]。此外,由于青藏高原的隆起,西南地区形成了海拔高差大、地形地貌和物种复杂多样,该地区已成为未来气候变化最为敏感的地区之一^[12]。因此,对西南地区寒温性针叶林气候变化响应的研究意义重大。

本研究利用西南地区的寒温性针叶林主要乔木与生物环境因子之间的响应关系,运用 MaxEnt 模型(maximum entropy model)和 ArcGIS 平台对西南地区寒温性针叶林 20 种主要乔木树种当前和未来气候情景下的潜在地理分布进行模拟,分析影响寒温性针叶林的主要环境因子和潜在分布地理变化趋势,为应对气候变化下我国森林安全的决策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 寒温性针叶林主要乔木树种分布数据

本研究所涉及的西南地区寒温性针叶主要乔木

树种,是指研究区内主要森林类型的建群种、优势种和常见种,共涉及 2 科、4 属、20 个乔木树种,各树种详细信息及生理生态特性见表 1 和表 2。物种的地理分布信息主要通过 4 个途径获取: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/>)、全球生物多样性信息网络平台(<http://www.gbif.org>)、中国期刊全文数据库(<https://www.cnki.net/>)。查询各乔木树种的分布位置,精确到县级以下,删除重复及错误信息,最终整理了 20 个树种的 952 条有效样本点数据,通过百度坐标拾取系统(<http://www.gpspg.com/maps.htm>)获取采样地的经纬度信息。

1.2 环境数据

为了充分考虑物种分布受到环境因素的影响,本研究选取了 19 个气候因子、15 个土壤因子、3 个地形因子参与模型运算(表 3)。气候数据来源于全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>),分辨率为 1 km,使用 1970–2000 年 19 个气候因子的平均值作为当前气候建模数据,未来气候数据为 CMIP6 发布的 2061–2080 年平均气候数据。土壤数据来源于中国科学院寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),栅格大小约为 1 km²。地形数据包括海拔、坡度和坡向,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 90 m,利用 ArcGIS 的表面分析工具提取得到坡度、坡向数据。使用的中国矢量地图来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)的公益性地图。

3 类环境因子数据通过 ArcGIS 的掩膜提取工具按照中国矢量边界进行裁剪,坐标系统统一转换为 WGS_1984,分辨率统一重采样为 30" (约 1 km²)。未来气候数据选取了中国国家气象中心开发的 BCC-CSM2-MR 模式作为数据源,该模式对温度和降水等各变量的预测有较高精度,已得到广泛应用,在中国区域内都有一定的模拟能力^[2,13]。未来气候情景选取了 2 个典型浓度路径:低排放情景(SSPs126, Shared Socioeconomic Pathways 126)、

表 1 物种信息及生理生态特性

Table 1 Species information and physiological and ecological characteristics

树种名称	产地	生理生态特征
苍山冷杉 <i>Abies delavayi</i>	云南和西藏部分地区	分布于海拔 3 300~4 000 m,是我国冷杉属分布最南的树种;生长区域年均温约 5.1 ℃,喜阴湿的气候和酸性土壤
锡金冷杉 <i>Abies densa</i>	四川、西藏部分地区	分布于海拔在 2 760~3 700 m 的阴冷湿润气候环境中
冷杉 <i>Abies fabri</i>	四川部分地区	分布于海拔 2 000~4 000 m,耐寒、耐荫,生长缓慢;分布区土壤多呈酸性,年降水量可达 1 500~2 000 mm;是用材林和水源涵养林的重要树种;在排水良好的平湿地及阴湿平缓山坡生长良好
巴山冷杉 <i>Abies fargesii</i>	四川东北部、甘肃南部、湖北西部及西北部等地区	分布于海拔 1 500~3 700 m 地带;耐阴、深根性,抗风力强,在湿润、深厚的微酸性土壤上生长良好
岷江冷杉 <i>Abies fargesii</i> var. <i>faxoniana</i>	甘肃南部、四川岷江流域上游及康定折多山林区	产于海拔 2 700~3 900 m 高山地带,耐阴、喜冷湿,是川西亚高山地区森林的优势树种之一和岷江上游地区阴坡林线的主要建群树种
川滇冷杉 <i>Abies forrestii</i>	云南西北部、四川西南部及西藏东部	分布于海拔 2 500~3 400 m,常与苍山冷杉、长苞冷杉及急尖长苞冷杉等针叶树种混生成林,或组成纯林
长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	云南西北部、四川西南部和西藏东南部	生长于海拔 3 000~4 500 m 亚高山至高山地带,气候冷湿,有明显的干湿季节;为耐阴、耐寒喜湿润的树种;集中分布地带年均温<5 ℃,年降水量 1 000 mm 以上,相对湿度较大
急尖长苞冷杉 <i>Abies georgei</i> var. <i>smithii</i>	云南西北部、四川西南部及西藏东南部等地	分布在 3 600~4 300 m 的海拔,其中在海拔 3 900 m 自然长势最好,属于耐荫性植物,生长过程不需要较强的光照,温凉和寒冷的气候区域比较适宜生长,是冷杉属分布最广的树种
鳞皮冷杉 <i>Abies squamata</i>	四川西部、青海南部与西藏东南部等地	分布于海拔 3 500~4 000 m,耐阴性强,能适应干旱寒冷的气候条件;分布区域年降水量约 700 mm,湿度约 80%;在土层深厚、肥沃、含沙质的酸性土壤中生长良好
云杉 <i>Picea asperata</i>	陕西西南部、甘肃东部、四川岷江流域等地	分布于海拔 2 400~3 600 m,喜湿、耐阴、耐寒,生长缓慢,属浅根性树种,常与紫果云杉、岷江冷杉、紫果冷杉混生,或成纯林;在气候湿润,土层深厚,排水良好的微酸性土壤地带生长良好
麦吊云杉 <i>Picea brachytyla</i>	湖北西部、陕西东南部、四川东北部及北部、甘肃南部等地区	常分布于海拔 1 500~2 900 m,在气候温凉湿润、土层厚、排水良好的地带生长良好;分布区域年均温 8~14 ℃,年降水 1 300~5 500 mm,相对湿度 85%;属浅根性、阳性树种
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	青海、甘肃、宁夏、内蒙古等地	常生于海拔 1 600~3 800 m 的山地阴坡和半阴坡及潮湿谷地,生长缓慢,适应性强,可耐-30 ℃低温;喜寒冷潮湿和中性土壤,耐旱、耐瘠薄、忌水涝,抗风力差,属于浅根性树种
丽江云杉 <i>Picea likiangensis</i>	云南西北部、四川西南部	常分布于海拔 2 500~3 800 m,喜光、适应性较强;分布区域年均温 4~6 ℃,年降水量 600~1 500 mm;在气候温暖湿润酸性土壤高山地带生长良好,并组成纯林或与其他针叶树组成混交林
川西云杉 <i>Picea likiangensis</i> var. <i>rubescens</i>	四川西部和西南部、青海南部、西藏东部地区	分布海拔为 3 000~4 100 m,喜阴湿、耐寒、耐旱;在分布区多组成大片纯林,或与其他针叶树组成混交林,在年降水量 500~740 mm 的山地棕色森林土壤中生长良好
紫果云杉 <i>Picea purpurea</i>	四川北部、甘肃、青海等地	分布于海拔 2 600~3 800 m,喜温湿,可耐寒、耐旱、耐阴、涵养水源、保持水土;分布区域土壤为酸性而湿润、年降水量约 600~800 mm
西藏云杉 <i>Picea spinulosa</i>	西藏南部	多分布于海拔 2 900~3 600 m 的高寒山地
青杆 <i>Picea wilsonii</i>	四川东北部及北部、甘肃中部及南部、青海东部等地区	分布于海拔 1 400~2 800 m,适应性较强,在气候温凉、排水良好湿润微酸性的土壤中生长良好,为云杉属中分布较广的树种之一
祁连圆柏 <i>Juniperus przewalskii</i>	四川、青海、甘肃的部分地区	分布于海拔 2 600~4 000 m 地带的阳坡,耐旱性强,可作干旱地区的造林树种,在疏松肥沃的酸性土壤中生长较良好
大果圆柏 <i>Juniperus tibetica</i>	四川、甘肃、西藏和青海部分地区	分布于海拔 2 800~4 600 m,喜光、抗旱、耐严寒,对土壤要求不严格;生长区域年降水量通常在 300~1 600 mm,年均温约 6~14 ℃
大果红杉 <i>Larix potaninii</i> var. <i>australis</i>	西藏东南部、四川西南部及云南西北部	分布在 2 700~4 300 m 高山地带,喜光、怕水涝、耐寒和耐干旱瘠薄土壤,属强阳性树种;在深厚肥沃、排水良好的微酸性森林土壤中生长良好,常与丽江云杉、高山松等混生

中等排放情景(SSPs245),2 种气候情景的选取是为了契合“低碳”理念和社会经济发展模式^[2,14]。

1.3 环境因子筛选

为了避免各环境因子变量间的自相关性,需对环境因子按类别(温度、温度变化、降水、降水变化、

地形和土壤 6 类)进行筛选,将性质相近且贡献率(percent contribution,PC)低的环境因子剔除^[15]。首先利用 37 个环境因子和 20 个乔木物种地理分布数据,通过 MaxEnt 模型进行初步模拟,筛选出贡献率>1%的因子;利用 ArcGIS 的波段集统计(Band

collection statistics) 工具, 对 37 个环境因子进行 Pearson 相关检验分析^[16] (图 1)。若同类环境因子中有 2 个或 2 个以上的相关性系数 $|r| \geq 0.8$, 则选择贡献率最高的因子用于西南地区主要寒温性针叶林乔木树种的地理分布模拟, 筛选结果如表 2 所示。最后, 根据筛选得到的环境因子的累计百分比贡献率, 获得影响西南地区寒温性针叶林主要乔木潜在地理分布的主导环境因子。

表 2 西南地区主要寒温性针叶乔木地理分布模拟的 AUC 值和 MaxSS 逻辑阈值

Table 2 AUC values and MaxSS logic threshold of geographical distribution simulation of main cold-temperate coniferous forest in Southwest China

物种	科	属	物种代码	样点数	AUC 值±SD	阈值±SD
苍山冷杉	松科	冷杉属	CL	28	0.939±0.028	0.082±0.041
锡金冷杉	松科	冷杉属	XL	16	0.913±0.026	0.116±0.035
冷杉	松科	冷杉属	LS	53	0.978±0.014	0.099±0.018
巴山冷杉	松科	冷杉属	BL	50	0.955±0.022	0.113±0.015
岷江冷杉	松科	冷杉属	ML	48	0.970±0.016	0.160±0.084
川滇冷杉	松科	冷杉属	DL	37	0.973±0.012	0.113±0.030
长苞冷杉	松科	冷杉属	CB	55	0.977±0.013	0.135±0.056
急尖长苞冷杉	松科	冷杉属	JL	47	0.981±0.006	0.087±0.032
鳞皮冷杉	松科	冷杉属	LL	61	0.978±0.011	0.093±0.037
云杉	松科	云杉属	YS	131	0.951±0.018	0.136±0.030
麦吊云杉	松科	云杉属	MY	113	0.940±0.014	0.137±0.016
青海云杉	松科	云杉属	QS	26	0.856±0.071	0.318±0.112
丽江云杉	松科	云杉属	LY	59	0.976±0.009	0.127±0.027
川西云杉	松科	云杉属	CY	26	0.942±0.034	0.163±0.114
紫果云杉	松科	云杉属	ZY	74	0.976±0.012	0.102±0.035
西藏云杉	松科	云杉属	XY	16	0.990±0.397	0.252±0.053
青杆	松科	云杉属	QQ	28	0.896±0.049	0.299±0.045
祁连圆柏	柏科	刺柏属	QY	35	0.972±0.014	0.251±0.035
大果圆柏	柏科	刺柏属	GL	18	0.965±0.193	0.143±0.028
大果红杉	松科	落叶松属	DH	31	0.982±0.008	0.283±0.039

表 3 环境因子

Table 3 Environmental factors

类型	编号	因子描述	类型	编号	因子描述
温度	BIO1	年均温	土壤	T_GRAVEL	碎石体积百分比*
	BIO5	最暖月最高温		T_SAND	沙含量
	BIO6	最冷月最低温*		T_SILT	淤泥含量
	BIO8	最湿季均温		T_CLAY	黏土含量
	BIO9	最干季均温		T_USDA_TEX	土壤质地分类
	BIO10	最暖季均温		T_REF_BULK	土壤容重
	BIO11	最冷季均温		T_OC	土壤有机碳含量
温度变化	BIO2	昼夜温差月均值		T_PH_H ₂ O	土壤酸碱度
	BIO3	等温性*		T_CEC_CLAY	黏性层土壤的阳离子交换能力*
	BIO4	温度季节性变化标准差*		T_CEC_SOIL	土壤的阳离子交换能力
	BIO7	温度年较差		T_BS	基本饱和度*
降水	BIO12	年降水量*		T_CACO3	碳酸盐或石灰含量*
	BIO13	最湿月降水量		T_ESP	表层土壤中可交换的钠离子*
	BIO14	最干月降水量		T_ECE	表层土壤电导率
	BIO16	最湿季降水量		T_TEB	交换性盐基
	BIO17	最干季降水量	地形	ALT	海拔*
	BIO18	最暖季降水量		ASP	坡向*
降水变化	BIO19	最冷季降水量		SLO	坡度*
	BIO15	降水量的季节性变异系数*			

注：* 表示经筛选后带入模型的环境因子。

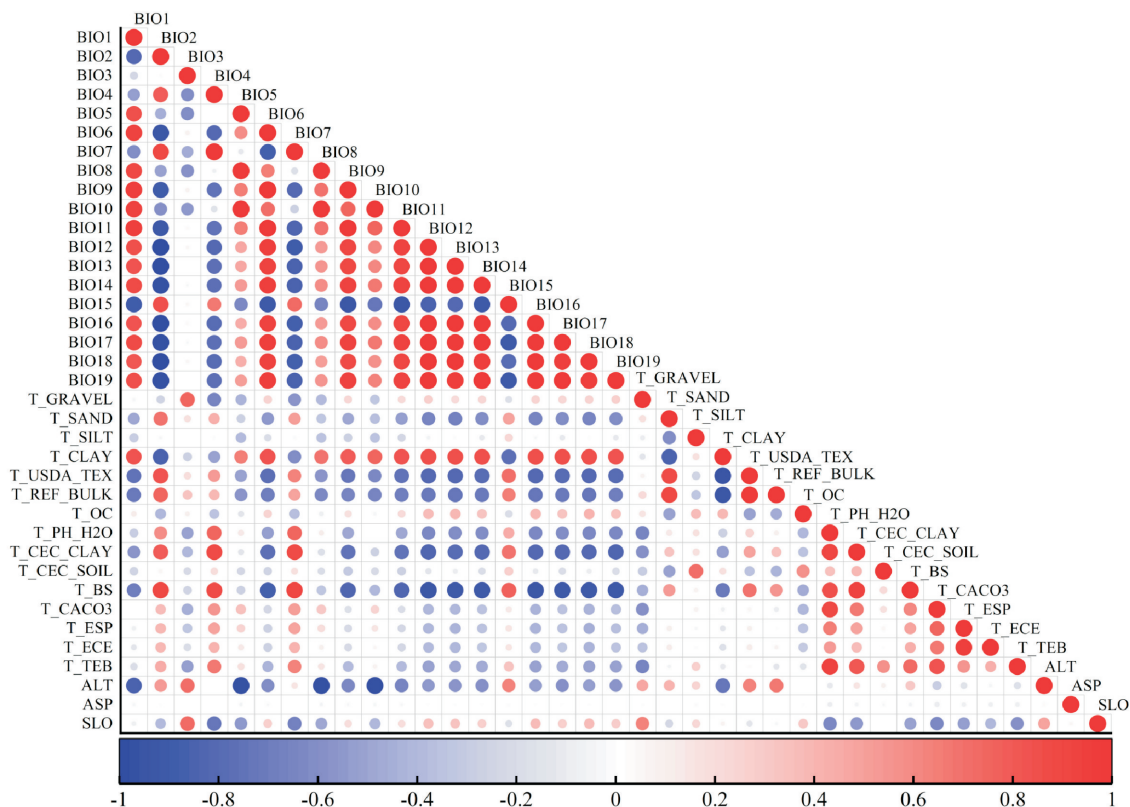


图 1 环境因子间自相关性检验

Fig. 1 Auto-correlation test of environmental factors

1.4 MaxEnt 模型

MaxEnt 模型是 Phillips 团队于 2004 年基于 Java 语言构建的一种生态位模型(ecological niche model, ENM),其原理起源于信息论和统计力学,以生态位理论为基础^[17-18],根据物种所有已知分布点的环境因子建立多种分布函数,从中选取熵值最大者,进而计算其在整个预测范围内的潜在分布情况^[19]。目前,在生态学和自然保护等领域已广泛应用物种地理分布的预测模型,用于分析物种潜在分布区并预测其未来分布^[5,9,20-21],与其他物种分布模型对比,MaxEnt 模型预测结果更优且具有一定稳定性^[22],因此本研究使用该模型进行物种分布模拟。

本研究使用 MaxEnt 3.4.1 版模型,通过随机取样设置 75% 的样点作为验证子集用于验证模型,25% 的样点作为训练子集用于训练模型,建立树种分布与气候因子的关系模型,重复运行 10 次,获得树种地理分布的平均模拟结果。采用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)下的面积 AUC 值(the area under the ROC curve)检验模型模拟效果^[23]。MaxEnt 模型运行的输出结果是 ASCII 格式的文件,为各物种在预测地区出现概率(occurrence probability, P), P 取值范围为 $[0 \sim 1]$,值越大表明该地区越适宜该物种分布。根据最大训练敏感性和特异性

(maximum training sensitivity plus specificity, MaxSS)方法确定阈值(y),将出现概率进行二值化处理,大于该阈值则物种有可能分布,小于阈值则物种无分布^[24]。在此基础上,参考 IPCC 关于评估可能性的划分标准^[25],将研究区的适生等级划分为 3 类: $P < y$ 为非适生区; $P \geq y$ 为适生区($y \leq P < 0.66$ 为低适生区; $P \geq 0.66$ 为高适生区)。

2 结果与分析

2.1 模型准确性评价

通过 MaxEnt 模型进行西南地区 20 种寒温性针叶乔木的地理分布模拟,AUC 均值都 >0.85 (表 2),表明模拟精度均达到“很准确”的水平^[26],且标准差值较低,反映出模型在不同重复之间具有较好的稳定性。因此,MaxEnt 模型可用于 20 种寒温性针叶乔木物种的潜在分布预测研究。其中,除青杆(0.896)和青海云杉(0.856)外,其他 18 个乔木树种 AUC 均 >0.9 ,以西藏云杉最大为 0.990。

2.2 西南地区主要寒温性针叶乔木的潜在地理分布动态分析

2.2.1 冷杉属乔木 冷杉属 9 个树种中,冷杉、长苞冷杉、急尖长苞冷杉、岷江冷杉、川滇冷杉和鳞皮冷杉的潜在适生分布区相对较窄,集中分布于横断山脉及周边地区;巴山冷杉的潜在适生分布区位于

四川盆地周边地区;锡金冷杉和苍山冷杉的潜在适生分布区范围相对较广,主要分布于横断山脉地区、云南大部以及西藏东南部(图 2)。

在 2070 年 SSPs126 和 SSPs245 气候情景下,苍山冷杉、冷杉、长苞冷杉、急尖长苞冷杉和鳞皮冷杉 5 个树种的潜在适生区面积均有所增加,2 个情景下分别增加了 8.6%~14.02%和 8.9%~

27.65%。而川滇冷杉、锡金冷杉、岷江冷杉和巴山冷杉 4 个树种的潜在适生区面积均出现了收缩;其中,巴山冷杉高适生区面积减少最大,在未来 2070 年两情景下分别减少了 62.29%和 81.91%。9 个冷杉属乔木适生区质心均表现为向西偏北和东偏北方向迁移,其中,而锡金冷杉高适生区质心向西北方向分别迁移 157 km 和 242 km(表 4、图 2)。

表 4 不同气候情景下寒温性针叶林适生分布区面积变化及质心移动距离

Table 4 Area change and centroid movement distance of cold-temperature coniferous forest suitable distribution area under different climate scenarios

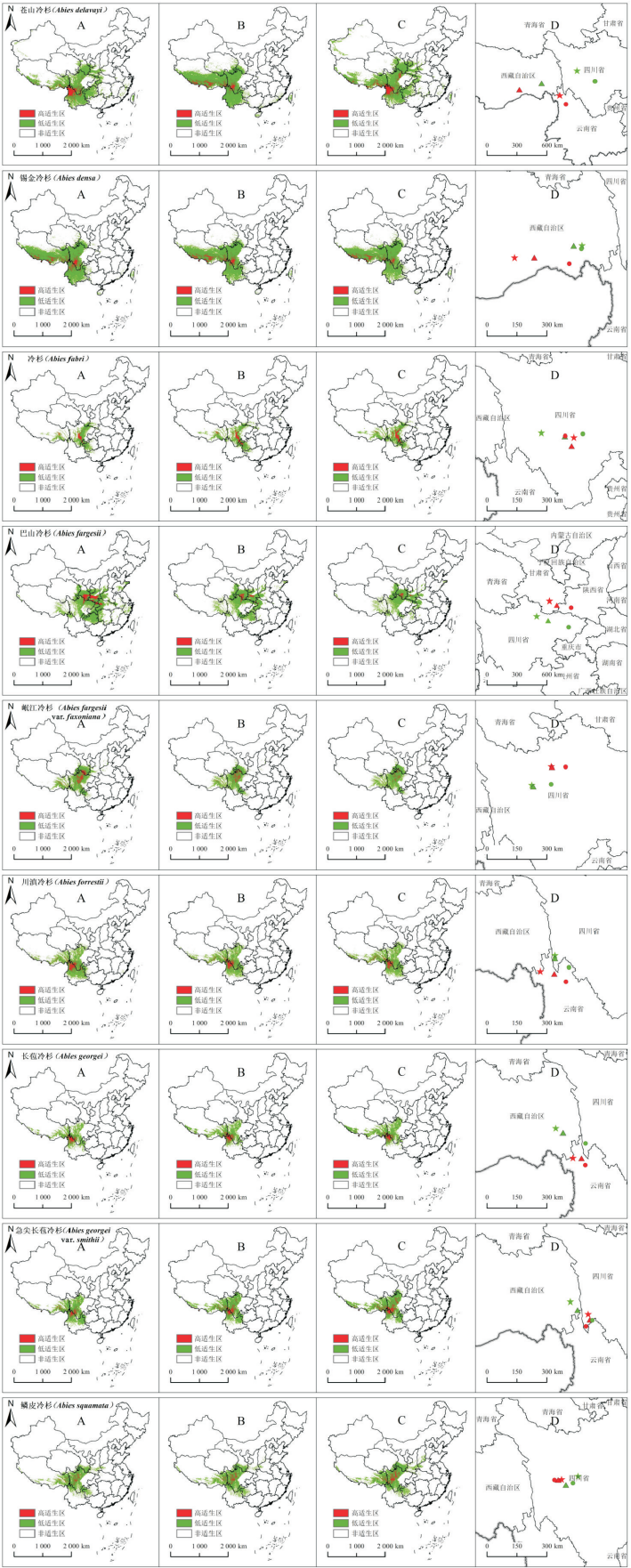
种名	面积变化所占比例(%)				质心迁移距离/km			
	SSPs126		SSPs245		SSPs126		SSPs245	
	适生区	高适生区	适生区	高适生区	低适生区	高适生区	低适生区	高适生区
苍山冷杉	12.42	-10.38	16.85	18.45	468	436	192	104
锡金冷杉	-4.78	-1.08	-9.83	-25.88	37	157	16	242
冷杉	8.60	32.35	8.90	54.10	80	57	181	39
巴山冷杉	-23.44	-62.29	-40.42	-81.91	186	120	292	190
岷江冷杉	-14.06	-31.31	-18.47	-56.29	78	56	82	61
川滇冷杉	-2.80	0.43	-0.70	-8.75	75	64	85	124
长苞冷杉	14.02	20.33	25.08	4.37	112	38	150	66
急尖长苞冷杉	10.53	33.93	16.86	67.65	83	38	134	62
鳞皮冷杉	8.96	22.45	27.65	78.56	31	15	41	30
云杉	22.73	24.15	11.58	-5.02	138	315	89	153
麦吊云杉	-2.60	-11.24	-6.83	-11.87	105	28	91	69
青海云杉	-36.69	-43.36	-45.72	-55.57	182	118	124	35
丽江云杉	29.13	73.30	45.67	118.29	169	84	128	93
川西云杉	23.57	35.08	1.56	42.33	252	56	51	13
紫果云杉	-17.99	-43.33	-28.78	-72.99	69	38	72	114
西藏云杉	12.90	44.43	3.33	27.57	195	283	230	440
青杆	13.89	31.55	10.69	24.77	98	228	213	274
祁连圆柏	-11.56	-19.16	-4.95	-2.51	37	13	82	18
大果圆柏	-2.65	-3.33	-6.00	-13.65	27	56	31	146
大果红杉	0.82	53.11	8.66	29.42	15	47	43	56

2.2.2 云杉属乔木 云杉属 8 个树种中,西藏云杉、丽江云杉、紫果云杉、麦吊云杉和川西云杉适生分布区相对集中,主要分布于四川盆地以西、云南西北部 and 西藏东南部山区。相比于云杉属其他树种,青海云杉的适生分布区偏向西北,主要分布在青海东部、甘肃南部、宁夏等地,但在四川西北部 and 新疆西北部也有少量分布。云杉和青杆的适生分布区比较相似且相对分散,呈西南—东北走向,主要包括西藏东南部、四川盆地周边山地,甘肃东南部、陕西、山西等地,其中青杆的适生分布区向东北方向延伸至河北等地(图 3A)。

在 2070 年 SSPs126 和 SSPs245 气候情景下,云杉、丽江云杉、川西云杉、西藏云杉和青杆 5 个树种的潜在适生区发生不同程度的扩张,2 个情景下面积分别增加了 8.6%~14.02%和 8.9%~

27.65%。而川滇冷杉、锡金冷杉、岷江冷杉和巴山冷杉 4 个树种的潜在适生区面积均出现了收缩,2 个情景下分别减少了 2.6%~36.69%和 6.83%~45.72%;其中,紫果云杉高适生区面积范围收缩最大(减少 72.99%)。8 种云杉属乔木不同等级的适生区质心沿不同方向发生变化,且移动距离差异较大;除紫果云杉外,呈现出向西偏北或东偏北的高海拔高纬度地区移动。紫果云杉因高适生区面积的缩减,导致高适生区质心向东南迁移 114 km(表 2、图 3)。

2.2.3 刺柏属和落叶松属乔木 刺柏属 2 个树种的潜在地理分布差异较大。其中,祁连圆柏的适生分布区范围较小且主要集中于青海东北部、甘肃南部及四川西北部;大果圆柏的适生分布区范围相对较广,主要分布于西藏南部、除东南部外的云南大部及四川西部,青海等地也有少量分布。落叶松属大果红杉适生分布区集中于横断山区(图 4A)。



注：A 表示当前气候情景，B 表示 2070 SSPs126 气候情景，C 表示 2070 SSPs245 气候情景，D 表示适生区质心变化(●表示当前时期质心，▲表示 2070SSPs126 时期质心，★表示 2070SSPs245 时期质心)。底图来源于标准地图服务系统，审图号：GS(2019)1882 号，底图无修改。下同。

图 2 苍山冷杉等 9 种冷杉属乔木的潜在适生区及其质心
Fig. 2 Potential suitable regions and centroids of 9 *Abies* species

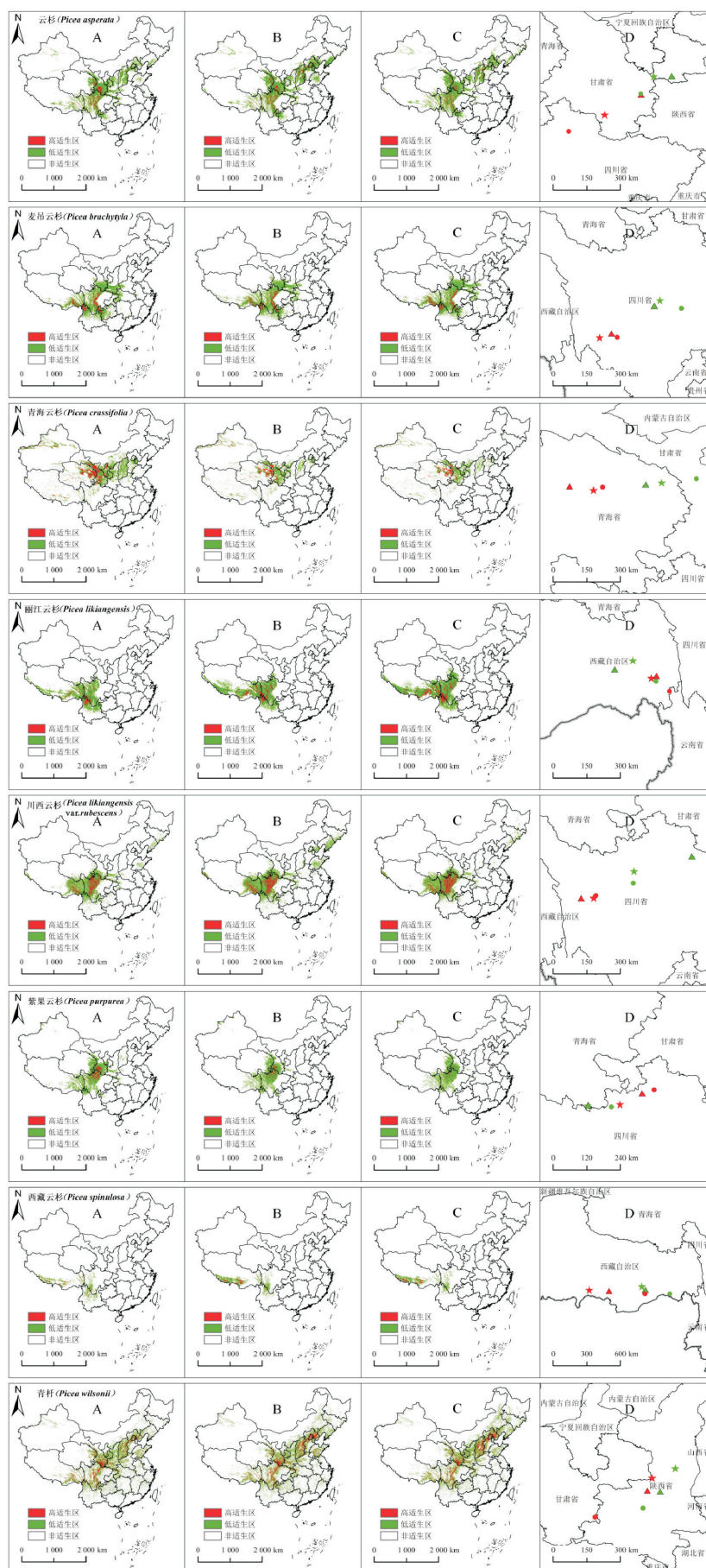


图3 云杉等8种云杉属乔木的潜在适生区及其质心

Fig. 3 Potential suitable regions and centroids of 8 *Picea* species

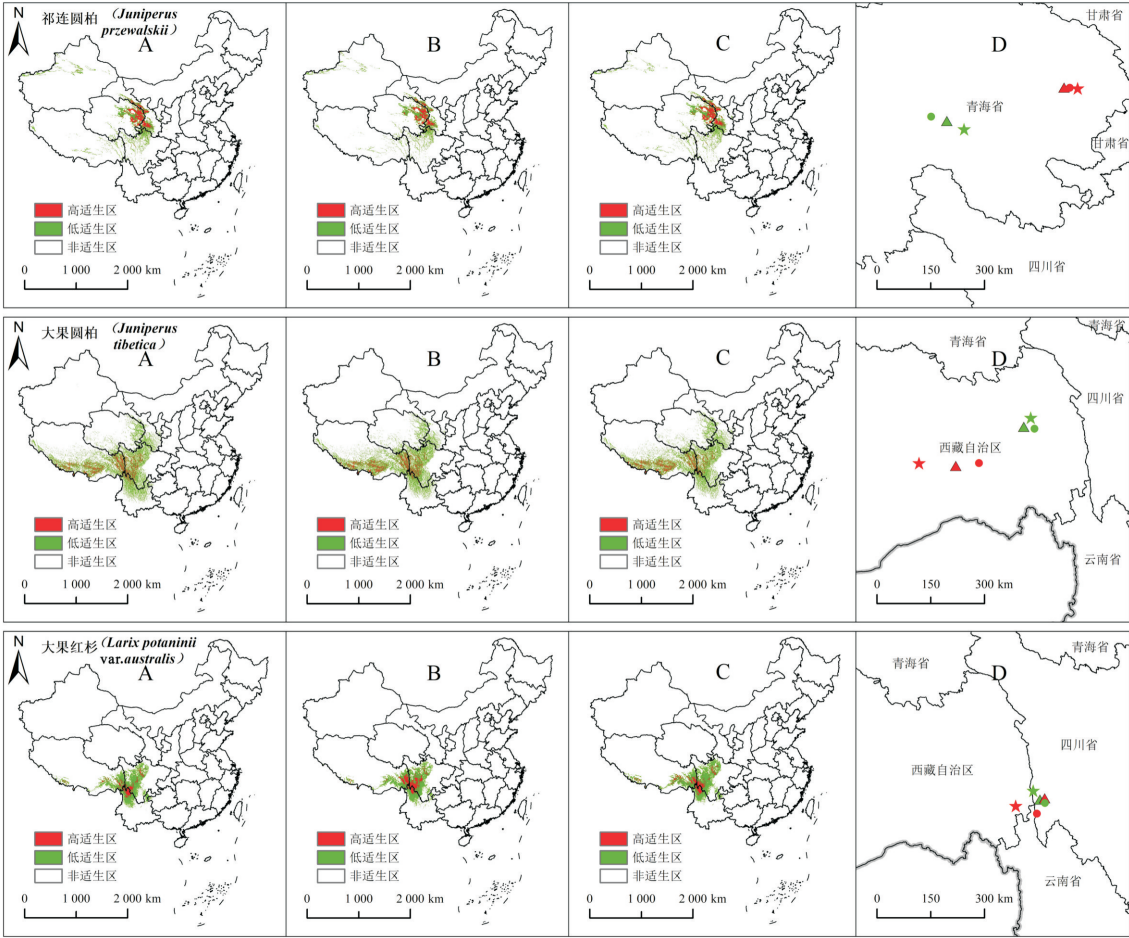


图 4 刺柏属和落叶松属 3 种乔木的潜在适生区及其质心

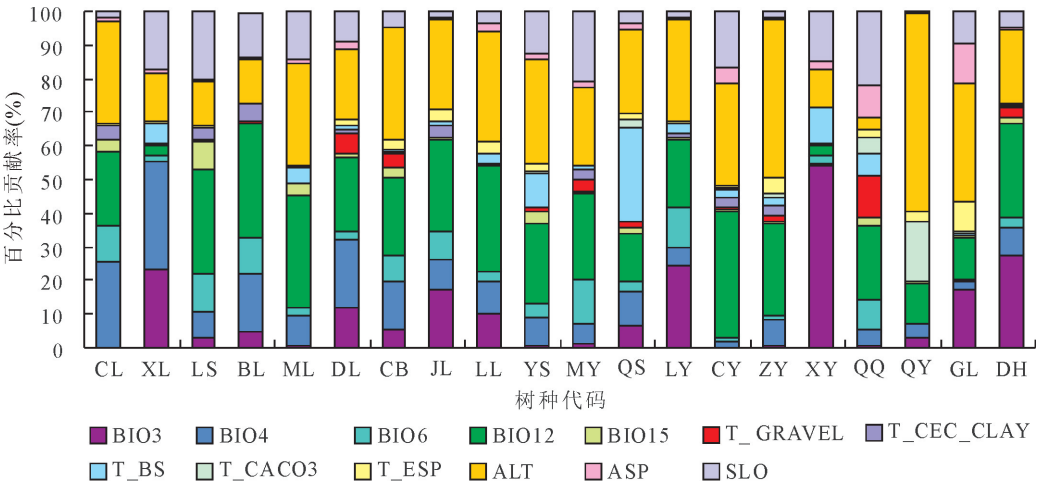
Fig. 4 Potential suitable regions and centroids of 3 species of *Juniperus* and *Larix*

在 2070 年 SSPs126 和 SSPs245 气候情景下,刺柏属 2 个树种的潜在适生区面积均有所减少,且高适生区面积也表现出减少的趋势;大果红杉的适生区范围呈现扩张趋势,2 个气候情景分别增加了 0.82%、8.66%,且高适生区面积也分别增加了 53.11%、29.42%;由于潜在适生区面积的增减,导致 2 个不同级别的适生区质心发生不同程度迁移,其中影响较大

的大果圆柏高适生分布区质心在 SSPs245 气候情景下向西迁移了 146 km(表 4、图 4)。

2.3 影响西南地区寒温性针叶乔木潜在分布区的主要环境因子分析

由图 5 可知,海拔(ALT,PC=26.7%)、年降水量(BIO12,PC=22.7%)、等温性(BIO3,PC=10.6%)、温度季节性变化标准差(BIO4,PC=



注:各环境因子含义见表 1,20 个树种代码含义见表 2。

图 5 西南地区主要寒温性针叶林乔木环境因子百分比贡献率

Fig. 5 Percentage contributions of environmental factors for the main cold-temperate coniferous forest in Southwest China

10.2%)、坡度(SLO, PC=9.8%)、最冷月最低温(BIO6, PC=5.4%) 6 个环境因子的平均百分比贡献率之和为 85.3%, 为影响西南地区 20 种寒温性针叶林主要乔木潜在地理分布的主导环境因子。寒温性针叶树种的分布受海拔影响最大, 受年降水量的影响也较大, 这与中国西南寒温性针叶树种多分布于云南西北部、四川西北部等高寒山区的实际相符。

20 个主要乔木树种适生分布区的最主要环境

因子变化范围如表 5 所示。等温性(BIO3)的均值范围为 30~52, 温度季节性变化(BIO4)的均值范围为 446~1 074, 最冷月最低温(BIO6)变化范围均值为 -20~3 ℃, 年降水量(BIO12)的变化范围均值为 387~1 623 mm, 海拔(ALT)变化范围均值为 1 283~4 800 m, 坡度(SLO)变化范围均值为 2°~34°。综合各主导环境因子的特点可知, 寒温性针叶林在我国西南地区整体具有具有耐寒、耐旱的特性。

表 5 西南地区主要寒温性针叶林乔木主导环境因子变化范围

Table 5 Variation range of dominant environmental factors for the main cold-temperate coniferous forest in Southwest China

物种	环境因子适生区取值					
	BIO3	BIO4	BIO6	BIO12	ALT	SLO
苍山冷杉	23~57	460~850	-19~8	360~2 200	850~5 400	1~39
锡金冷杉	31~50	520~850	-34~15	10~4 500	240~5 800	0~36
冷杉	19~53	400~780	-13~4.5	610~1 600	600~4 300	2~36
巴山冷杉	20~50	550~940	-17~4	480~1 800	100~4 800	1~36
岷江冷杉	28~51	460~840	-19~3	550~1 100	1 300~4 700	3~36
川滇冷杉	35.5~53	366~712	-18.5~7	500~1 400	1 360~5 230	2~36
长苞冷杉	36~51.5	425~690	-16~2	530~1 270	1 850~4 760	2~36
急尖长苞冷杉	36~53	336~703	17.5~2	520~1 430	1 570~4 830	1~36
鳞皮冷杉	34~51	470~775	-19.5~3	495~1 155	1 300~4 860	1~33
云杉	23.5~50	500~1 200	-20~1	300~1 330	990~4 430	1~36
麦吊云杉	26~52	400~840	-16~2	500~1 765	1 050~4 510	0~32
青海云杉	28~45	690~1 250	-25~(-5)	125~740	1 100~4 460	0~36
丽江云杉	37.5~53	410~735	-18.5~2	410~1 100	1 990~4 900	0~36
川西云杉	30~53	380~860	-23~4	540~1 290	1 640~5 120	3~35
紫果云杉	28~50	510~950	-23~1	385~1 150	1 620~4 540	1~35.5
西藏云杉	42.5~53	300~680	-17~1	175~1 380	2 010~5 030	6~34
青杆	20.5~53	350~1 275	-20~3.5	325~4 100	0~4 100	1~36
祁连圆柏	31.5~47	550~1 060	-25~(-7)	145~930	2 220~4 040	1~32
大果圆柏	35.5~54	380~830	-24~2	200~1 220	1 900~5 480	2~15
大果红杉	39~52	460~660	-17.5~1	575~1 000	1 970~4 760	3~36
均值	30~52	446~1074	-20~3	387~1 623	1 283~4 800	2~34

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究采用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析技术, 基于西南地区寒温性针叶林 20 种主要乔木树种的地理分布和生物环境因子的响应关系, 分析西南地区寒温性针叶林地理分布的主导环境因子、适生分布区及对气候变化的响应, 得到以下结论。

(1) MaxEnt 模型在预测西南地区寒温性针叶林潜在地理分布的精度较高, AUC 值均 > 0.85。(2) 影响西南地区寒温性针叶树种地理分布的主导环境因子及范围依次为海拔(1 283~4 800 m) > 年降水量(389~1 623 mm) > 气温的季节性为(446~1 073) > 坡度范围为(2~34°) > 等温性范围为(30~52) > 最冷月最低气温的范围为(-20~3 ℃)。(3) 苍山冷杉、冷杉、长苞冷杉、急尖长苞冷

杉、鳞皮冷杉、大果红杉、云杉、丽江云杉、川西云杉、西藏云杉和青杆的潜在总适生分布区在未来 2 个气候情景下均呈现扩张趋势, 且苍山冷杉的低适生分布区和大果红杉的高适生分布区在 SSPs126 情景下呈现缩小趋势; 锡金冷杉、巴山冷杉、岷江冷杉、祁连圆柏、大果圆柏、麦吊云杉、青海云杉和紫果云杉的潜在适生区在未来 2 个气候情景下呈现缩小趋势; 而川滇冷杉潜在适生区在未来两个气候情景下基本未发生变化。(4) 在气候变化的影响下, 西南地区主要寒温性针叶乔木潜在适生区均表现出向更高纬度和更高海拔迁移的趋势, 其中, 在 SSPs126 情景下苍山冷杉适生区质心整体迁移最大, 高适生区质心向西偏北迁移了 436 km; 而在 SSPs245 情景下, 西藏云杉适生区质心整体迁移最大, 高适生区质心向西迁移了 440 km。

3.2 讨论

3.2.1 未来气候变化下寒温性针叶林潜在分布区变迁的原因 在全球气候变化背景下,预测物种未来潜在地理分布变化趋势,对物种的生物多样性保护具有重要意义^[27]。寒温性针叶林对气候变化的响应表现为:在未来2个气候情景下,其潜在适生区面积均较当代气候条件下的适生区面积发生不同程度的收缩和扩张。而由于不同物种的生态习性存在一定的差异,导致各环境因子对不同物种潜在地理分布预测的影响也不尽相同,但每一个物种均有对其地理分布影响大的主导环境因子,随着主导因子的变化,物种的潜在地理分布面积将会随之变化。因此,确定主导环境因子有助于定量描述环境与目标物种地理分布之间的关系,在简化关系的同时不至于丢失过多有价值的信息^[28]。本研究根据20个寒温性针叶林树种的平均百分比贡献率,筛选出6个主导环境因子,其中云杉、青杆和祁连圆柏受地形和土壤的影响都较大,这与小尺度区域内地形和土壤被认为是影响一些物种分布的重要因子相符^[20]。

气候作为重要的环境驱动因子,其变化可对物种的分布格局产生直接响应^[29]。本研究中气候类因子对西南地区寒温性针叶林潜在分布的累计贡献率最高,达52.35%,这与已有研究的结果相符^[30]。在以往研究中,寒温性针叶树种的分布范围变化方向和程度是不尽相同的^[9,31],而在过去几十年里,物种分布纬度变化的方向和幅度一直都存在很大的争议^[32-33]。本研究结果表明,随着全球气候变暖与环境更加湿润,西南地区寒温性针叶林分布区变化总体呈现向高纬度、高海拔方向扩张,在SSPs126情景下物种的迁移速率总体小于SSPs245情景,寒温性针叶林物种的未来适生区质心均有向高纬度和高海拔移动的趋势,这与已有研究结果一致^[9]。其中,锡金冷杉、巴山冷杉、岷江冷杉、祁连圆柏、大果圆柏、麦吊云杉、青海云杉和紫果云杉的总适生区与高适生区面积的缩小可能与其对温度季节性变化较为敏感有关,在全球气候变化下西南地区的气温季节变动系数呈现增大的趋势^[30],温差的增大将使得许多地区可能不再适宜这些物种的生存,印证了一些寒温性针叶林的分布格局受热量差异的影响较大^[34]。苍山冷杉、冷杉、长苞冷杉、急尖长苞冷杉、鳞皮冷杉、大果红杉、云杉、丽江云杉、川西云杉、西藏云杉和青杆的适生区总体呈现扩张趋势则可能与其在降水量季节变异系数与海拔上有着较强的适应能力有关,未来降水量的季节性变化可能会改变各个地区的地下水径流与土壤含水量,进而对更耐旱的寒温性针叶树种提供了生存机遇^[7]。寒温性针叶

林整体集中分布于南北纵列的川西滇北藏东南的横断山系,由于较大的空间和多样的生境,为寒温性针叶林向高纬度高海拔迁移提供了条件。由于温度随海拔上升而下降,加之孟加拉湾热带暖湿气团向北深入,使在山体中上部形成了适宜寒温性针叶林生存的湿冷环境^[35]。

3.2.2 不足和展望方面 本研究进行区域尺度的物种潜在地理分布研究,应用的环境因子主要包括温度、温度变化、降水、降水变化、地形和土壤6类,未包含其他一些对物种分布可能也有影响的因素如未来气候情景下的土壤数据、人类活动等方面的因素^[34],物种分布受人类活动的影响也较大,在未来发展趋势下,人为改变土地经营方式和土地利用方式等因素也会影响土壤,进而影响寒温性针叶林的生理生态和分布状况;同时,另有一些影响因素很难被量化,如群落动态、种间关系^[36]。此外,本研究所选用的寒温性针叶林20种主要乔木树种的地理分布数据主要来源于数据标本馆,由于受到各种条件的限制,采样点多集中在便于收集的区域,采样点的环境梯度下的随机样本通常缺乏代表性,导致许多物种的实际分布信息不完整,可能影响模拟结果^[28]。精确、定量地确定植被与每一个环境因子的关系仍然是生态学领域的一个难题^[21],而川西滇北的横断山区存在特殊的地形地貌,造就了复杂多样的小生境,这就对后续研究中环境因子的分辨率提出了更高要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[EB/OL]. (2021-08-09) [2021-10-25]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>.
- [3] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, *et al.* Extinction risk from climate change[J]. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [4] ZHANG M J, HE J Y, WANG B L, *et al.* Extreme drought changes in Southwest China from 1960 to 2009[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 3-16.
- [5] 帕尔曼·帕哈尔丁, 楚光明, 常亚玲, 等. 基于最大熵(MaxEnt)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 P, CHU G M, CHANG Y L, *et al.* Prediction and analysis of two potential suitable areas of *Reaumuria* plants in Northwest China based on the maximum entropy (MaxEnt) model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 18-25. (in Chinese)
- [6] CHENG G W, LU X Y, WANG X D, *et al.* Rebirth after death: forest succession dynamics in response to climate change

- on Gongga Mountain, Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1671-1681.
- [7] 刘庆, 吴彦, 何海. 中国西南亚高山针叶林的生态学问题[J]. 世界科技研究与发展, 2001(2): 63-69.
- [8] 郭润小, 白新燕, 宝力道, 等. 中国西南天然林保护工程区森林资源动态变化趋势分析[J]. 中国林业经济, 2019(4): 132-134.
- [9] 李望军. 气候变化对云南省寒温性针叶林潜在生境的影响预测研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
- [10] 陈彬杭. 西南地区森林生态脆弱性随演替和气候的变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [11] 刘增力, 朴世龙, 方精云. 中国冷杉、云杉和落叶松属植物的地理分布[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 577-586.
- [12] 沈涛, 张霖, 申仕康, 等. 西南地区红花龙胆分布格局模拟与气候变化影响评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2499-2508. SHEN T, ZHANG J, SHEN S K, *et al.* Distribution simulation of *Gentiana rhodantha* in Southwest China and assessment of climate change impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2499-2508. (in Chinese)
- [13] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [14] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539.
- [15] 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.
- [16] 魏淑婷, 李涛, 林玉成. 基于 MaxEnt 模型预测四川省松材线虫的潜在适生区[J]. 四川动物, 2019, 38(1): 37-46.
- [17] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecol. Modell, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [18] PHILLIPS S J, DUDIK M J E. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [19] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [20] 陆双飞, 陈禹衡, 周斯怡, 等. 西南地区松属乔木对气候变化的响应[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 466-477.
- [21] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9033-9043. XIONG Q L, He Y L, De F Y, *et al.* Assessment of alpine mean response to climate change in Southwest China based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9033-9043. (in Chinese)
- [22] 王国峥, 耿其芳, 肖孟阳, 等. 基于 4 种生态位模型的金钱松潜在适生区预测[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6096-6104. WANG G Z, GENG Q F, XIAO M Y, *et al.* Predicting *Pseudotsamix amabilis* potential habitat based on four Niche models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6096-6104. (in Chinese)
- [23] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [24] LIU C, WHITE M, NEWELL G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data[J]. Journal of Biogeography, 2013, 40(4): 778-789.
- [25] 孙颖, 秦大河, 刘洪滨. IPCC 第五次评估报告不确定性处理方法的介绍[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 150-153.
- [26] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 辽东栎林潜在地理分布及其主导因子[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 10-14. YIN X J, ZHOU G S, SUI X H, *et al.* Potential geographical distribution of *Quercus wutaishanica* forest and its dominant factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(8): 10-14. (in Chinese)
- [27] 李宁宁, 张爱平, 张林, 等. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测[J]. 植物研究, 2019, 39(3): 395-406.
- [28] 杨志香, 周广胜, 殷晓洁, 等. 中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1429-1436. YANG Z X, ZHOU G S, YIN X J, *et al.* Geographic distribution of *Larix gmelinii* natural forest in China and its climatic suitability[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1429-1436. (in Chinese)
- [29] CAMILLE P, C, GARY Y. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [30] 陈禹衡, 吕一维, 殷晓洁. 气候变化下西南地区 12 种常见针叶树种适宜分布区预测[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(6): 113-120. CHEN Y H, LÜ Y W, YIN X J. Predicting habitat suitability of 12 coniferous forest tree species in Southwest China based on climate change[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2019, 43(6): 113-120. (in Chinese)
- [31] 刘然, 王春晶, 何健, 等. 气候变化背景下中国冷杉属植物地理分布模拟分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 37-46.
- [32] 高健, 赵辉. 基于 MaxEnt 模型评估槭属鸡爪槭组物种的空间分布[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 163-167. GAO J, ZHAO H. Prediction of potentially suitable distribution of section palmata (*Acer*) in East Asia based on MaxEnt[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 163-167. (in Chinese)
- [33] ZHANG M G, SLIK J W F, MA K P. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): e22400.
- [34] 张晓玮, 王婧如, 王明浩, 等. 中国云杉属树种地理分布格局的主导气候因子[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 1-11. ZHANG X W, WANG J R, WANG M H, *et al.* Dominant climatic factors influencing the geographical distribution pattern of *Picea* in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(4): 1-11. (in Chinese)
- [35] 王清春, 李晖, 李晓笑. 中国冷杉属植物的地理分布特征及成因初探[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(9): 11-15. WANG Q C, LI H, LI X X. Geographical distribution characters and generating mechanisms of genus *Abies* in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(9): 11-15. (in Chinese)
- [36] 宋颖, 张港隆, 贾全全, 等. 气候变化下花榈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. SONG Y, ZHANG G L, J 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. (in Chinese)