

DOI: 10.5846/stxb202012313336

潘少安, 李旭华, 冯秋红, 刘兴良, 孙建新. 四川省岷江冷杉对气候变化的响应及其潜在分布格局. 生态学报, 2022, 42(10): 4055-4064.

Pan S A, Li X H, Feng Q H, Liu X L, Sun J X. Response of *Abies faxoniana* to future climate change and its potential distribution patterns in Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4055-4064.

四川省岷江冷杉对气候变化的响应及其潜在分布格局

潘少安¹, 李旭华^{2,3,*}, 冯秋红^{2,3}, 刘兴良^{2,3}, 孙建新¹

¹ 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

² 四川省林业科学研究院, 森林和湿地生态恢复与保育四川省重点实验室, 成都 610081

³ 四川卧龙森林生态系统国家定位观测研究站, 成都 610081

摘要: 四川省是我国气候变化的敏感区之一, 区域气候的暖干化趋势严重影响植物物种组成与分布。岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 作为我国特有种, 其分布的动态变化对气候变化具有十分重要的指示作用。基于现有岷江冷杉分布数据、气候、土壤、地形等环境因子, 运用最大熵模型 (MaxEnt) 预测当代气候条件下岷江冷杉潜在分布区, 并分析未来时期 (2050s 和 2070s) 不同气候变化情景下 (RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5) 岷江冷杉潜在适生分布区, 筛选影响岷江冷杉分布的主导环境因子及阈值, 探讨岷江冷杉分布对气候变化的响应机制。结果表明: (1) 当前岷江冷杉的高适生区集中分布于岷江流域上游地区, 在未来两个时期岷江冷杉潜在中、高适生区的面积较当代气候条件下适生区面积均有所增加, 且适生区总体向四川南部扩张, 北部适宜生境丧失。(2) 岷江冷杉潜在中适生区在低排放浓度下 (RCP2.6) 面积占比最高, 而潜在高适生区在高排放浓度下 (RCP8.5) 的面积占比最高。(3) 影响岷江冷杉分布的主要环境因子分别是: 降水季节性变异系数、气温年变化幅度、年降水量和海拔 (累计贡献 > 70%)。适宜岷江冷杉潜在分布的环境条件是气温年变化幅度 29.3—32.5 °C, 降水季节性变异系数 76.5—85.4, 年降水量 694.1—791.7 mm, 以及海拔 2310—3757 m。研究预测了岷江冷杉潜在分布区在不同气候变化条件下的变化格局, 能够为岷江冷杉未来的更新与恢复以及大熊猫栖息地的迁移与保护提供指引。

关键词: 岷江冷杉; 潜在分布区; 最大熵模型; 环境因子; 气候变化

Response of *Abies faxoniana* to future climate change and its potential distribution patterns in Sichuan Province

PAN Shao'an¹, LI Xuhua^{2,3,*}, FENG Qiuhong^{2,3}, LIU Xingliang^{2,3}, SUN Jianxin¹

¹ School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Sichuan Province Key Laboratory of Sichuan Ecological Restoration and Conservation on Forest and Wetland, Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

³ Sichuan Wolong Forest Ecosystem Research Station, Chengdu 610081, China

Abstract: Being sensitive to climate change, Sichuan Province (China) has been seriously affected by the warming and drying regional climate. In particular, *Abies faxoniana*, an endemic species in China that forms the habitats for giant pandas, has been a research focus. Understanding how *Abies faxoniana* responds to the climate change is useful to guide future activities to protect or restore the forests. To predict how *Abies faxoniana* distribution may change in the future, we firstly used an ecological niche model to determine the suitable climate for *Abies faxoniana* based on current climate and species distribution. Then, we projected the potential suitable distribution areas for *Abies faxoniana* in two future periods (2050s and 2070s) at three different climate change scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP 8.5). Lastly, we explored the

基金项目: 四川省省财政专项项目 (2020CZZX07); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502104)

收稿日期: 2020-12-31; **网络出版日期:** 2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhli2011@126.com

key environmental factors and thresholds that drove *Abies faxoniana* distribution change. The model results suggested that: (1) high suitable areas of *Abies faxoniana* were concentrated in the upper reaches of the Minjiang River Basin in contemporary. In the future two periods, the area of the potential medium and highly suitable areas for *Abies faxoniana* would increase compared with the suitable areas under contemporary climatic conditions, and the suitable areas would expand to southern Sichuan Province, while the suitable habitats in the north would be degenerated. (2) The potential moderately suitable area of *Abies faxoniana* had the highest area proportion under the low emission concentration (RCP2.6), while the potentially highly suitable area had the highest area under the high emission concentration (RCP8.5). (3) The key environmental drivers for the shift of potential distribution of *Abies faxoniana* were precipitation seasonality, temperature annual range, annual precipitation, and altitude (cumulative contribution >70%). The suitable climate conditions for *Abies faxoniana* were temperature annual range from 29.3—32.5 °C, precipitation seasonality from 76.5—85.4, and annual precipitation 694.1—791.7 mm. The model results highlighted the key drivers for *Abies faxoniana* distribution shift in the future, and the areas that were prone to climate change. The model results may help guide future renewal and restoration of *Abies faxoniana*, as well as protection and migration of giant panda living habitats.

Key Words: *Abies faxoniana*; potential distribution area; MaxEnt model; environmental variables; climate change

多年前,科学家们就已证实,全球气候变化已经无可争辩^[1]。当前的气候变化趋势和气候预测均表现出温度上升随气候变化的一致趋势^[2]。陆地生态系统对温度变化高度敏感,且温室气体的增加使陆地生态系统面临发生重大转变的危险^[3]。近几十年来,气候变暖导致亚高山针叶林分布向更高海拔转变^[4],而水分的减少限制了亚高山树木的分布范围,同时还可能导致林木数量的减少^[5]。有研究表明峨眉冷杉在海拔 3000 m 处分布面积逐渐减少最终消失并被其它物种取代,而在 3600 m 处以分散分布出现,最终成为优势物种^[6]。亚高山森林分布的动态变化对气候变化具有十分重要的指示作用^[7],尤其是冷杉属物种,对气候变化十分敏感,对温湿度稳定性有着严格要求^[8],因此,研究岷江冷杉对气候的响应对于理解全球变化具有极其重要的意义。

岷江冷杉(*Abies faxoniana*)为松科冷杉属常绿乔木,是我国特有树种,也是川西亚高山地区森林的优势树种之一,通常在海拔 2800 m 以上的区域形成纯林,或与红杉、方枝柏等形成混交林^[9],是岷江上游地区阴坡林线的主要建群树种^[10]。岷江冷杉林是四川省面积最大的原始森林类型和大熊猫的重要栖息场所,在涵养水源、保持水土方面具有十分重要的功能,亦维持着大熊猫栖息地生态系统的稳定与安全^[11–12]。目前关于岷江冷杉的研究较为丰富,涉及岷江冷杉林的群落动态变化^[13]、凋落物分解^[14]、年轮—气候响应研究^[15–17]、林地水源涵养^[18]以及天然更新^[19–20]等多个方面。在全球气候变化背景下,岷江冷杉种群的潜在分布格局及其对未来气候变化的响应方面的研究却鲜有报道。

近年来,研究表明森林群落随着气候变暖而向上迁移,但很少提及这些变化的具体方式和具体方法,而植物在应对气候变化的过程中,迁移或扩散能力是植物生存的先决条件^[21]。我国学者在对目标物种的潜在分布区预测,以及物种分布对气候变化的响应等方面已开展了诸多研究^[22],而物种分布模型即为最常用的研究方法,该方法的基本原理是利用观测到的物种分布数据及其对应的环境变量信息,关联性构建二者的相关模型,进而确定目标物种的实际分布并对物种的潜在分布进行预测^[23]。目前常用的物种分布模型有 MaxEnt 模型、Garp 模型、Bioclim 模型、Dumain 模型、广义线性模型、广义可加模型等^[24],但 MaxEnt 模型以其运行样本量要求低、易操作、运行时间短、数据处理能力强、预算精度高等优点^[25–26]而得到广泛应用。因此,本研究采用物种分布模型—最大熵模型(MaxEnt)和 ArcGIS 软件,对岷江冷杉在当代气候条件和未来气候变化情景下的潜在分布区和生境适宜性进行评估和分析,并确定影响岷江冷杉空间分布格局的主要影响因子和分布阈值,分析岷江冷杉对未来气候变化的响应策略,为川西山地岷江冷杉天然更新、大熊猫栖息地恢复、退化森林质量精准提升等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 岷江冷杉分布数据的采集

岷江冷杉的地理分布数据主要从 3 个方面获取:包括岷江冷杉样地调查数据、公开发表文献资料、权威的标本信息网络数据库,如全球生物多样性信息网 GBIF (<https://www.gbif.org>),中国数字植物标本馆等 (<http://www.cvh.org.cn>)。对搜集到的物种分布数据进行整理,剔除重复的和研究区域范围外的坐标点,共得到 93 个参与模型运算的物种分布点,并按要求将其另存为 csv 格式。

1.2 环境数据的收集与预处理

本文所用的环境数据包括气候数据、土壤数据和地形数据,其中气候数据来源于世界气候数据库 WorldClim (<https://www.worldclim.org/>),分别选取当代(1970—2000 年)气候数据和未来两个时期(2050s 和 2070s)3 种气候变化情景 RCP2.6,RCP4.5 和 RCP8.5 的生物气候变量,3 种气候情景分别表示未来时期 CO₂ 排放浓度低、中、高的 3 种可能变化路径^[27],每个时期的气候数据变量均为 19 个。土壤数据从寒区旱区科学数据中心提供的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD)中提取出研究区域与岷江冷杉生长相关的土壤因子,如表层土壤容重、pH 值、沙粒含量、粉粒含量、粘土含量、碎石百分比、有机碳含量、基本饱和度、碳酸盐含量等。地形数据包括海拔、坡度和坡向,其中海拔数据(空间分辨率 1 km)从全球海拔数据库 (<https://globalmaps.github.io/>)中下载并提取,坡度和坡向则分别根据海拔数据运用 ArcGIS 中的空间分析工具计算得到。对上述所有环境因子进行研究区掩膜提取和空间处理,使其具有统一的空间坐标系(GCS-WGS84)和相同的空间分辨率(30 arc sec×30 arc sec,约 1 km)。

1.3 环境因子的相关性分析

研究指出环境因子间的多重共线性会导致物种分布模型的过度拟合^[28—29],因此在运行模型前,对环境因子分别进行 Pearson 相关性分析,进而筛选出相关性较低且对物种分布有重要影响的环境因子(相关系数 $|r|<0.8$)来参与模型运算。最终共选取了 16 个环境因子参与岷江冷杉分布区预测与生境评价,包括 6 个气候因子,7 个土壤因子和 3 个地形因子。具体指标情况见表 1。

表 1 用于 MaxEnt 模型的环境变量
Table 1 Environmental variables for the MaxEnt model

变量类型 Variable type	环境变量 Environmental variables	变量简称 Variables abbreviation	单位 Unit	变量类型 Variable type	环境变量 Environmental variables	变量简称 Variables abbreviation	单位 Unit
气候变量 Climate variables	年平均气温	bio-1	℃	地形变量 Topography variables	土壤有机质比例	soc	%
	昼夜温差月均值	bio-2	℃		土壤碎石百分比	gravel	%
	温度季节性变化	bio-4			土壤砂粒含量	sand	%
	气温年变化幅度	bio-7	℃		土壤粉粒含量	silt	%
	年降水量	bio-12	mm		土壤粘土含量	clay	%
	降水量季节性变异系数	bio-15			海拔	elevation	m
土壤变量 Soil variables	土壤饱和度	bs	%		坡度	slope	°
	土壤酸碱度	pH			坡向	aspect	

1.4 模型运行与准确性

将符合 MaxEnt 模型格式要求的岷江冷杉物种分布数据,分别与当前和未来两个时期不同气候情景下的环境变量数据导入模型中,随机选取 25%的分布点作为测试集,75%的物种分布点作为训练集,模拟共得到 7 个岷江冷杉适生分布区的预测结果。模型预测结果的精确度则通过受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic curve,ROC 曲线)下面积(Area Under Curve,AUC)进行评价^[30],该值大小与模型的预测精度呈正相关^[31],当 AUC 值小于 0.6 时模型预测失败,当 AUC 值介于 0.8—0.9 表明模型预测精度较好,达到 0.9—

1.0 时则模型预测精度很高^[32]。同时,模型通过贡献率、置换重要值和刀切法检验(Jackknife test)3个方面来综合评估个各环境变量在影响岷江冷杉地理分布中的重要性。

1.5 适宜分布区划分及未来适生区空间变化分析

模型的预测结果是通过物种在待预测地区的存在概率 P (取值0—1)来表示物种的分布适宜性^[33],将模型运行得到的分布区预测结果进行适宜性等级划分和可视化表达,结合岷江冷杉的生态学特点,采用重分类中的人工(Manual)分级方法,将岷江冷杉的潜在分布区划分为4个等级,分别是:适宜性指数在0—0.1为非适生区,0.1—0.3为低适生区,0.3—0.5为中适生区,0.5—1.0为高适生区。为了进一步分析岷江冷杉在未来气候变化情景下适宜分布区的空间变化格局,对比当代适生区分布结果,我们分别提取了新增适生区、丧失适生区、保留适生区和非适生区4种岷江冷杉适生区的变化类型。

2 结果与分析

2.1 模型的预测精度

模型运行结果显示,训练集和测试集的AUC值分别为0.955和0.853(图1),达到了模型预测精度要求,由此表明该模型对岷江冷杉潜在分布区预测结果的可信度较高。

2.2 当代气候条件下岷江冷杉的潜在分布区预测

对预测的岷江冷杉潜在适生区等级划分的结果如图2所示,经空间分析模块统计各适生区的分布面积,结果表明岷江冷杉中适生分布区和高适生分布区的面积约为33176.86 km²和31416.84 km²,分别占全省总面积的5.91%和5.60%,低适生区占全省总面积的12.30%,而非适生区的占比最高为76.19%。岷江冷杉的中、高适生区集中分布于阿坝藏族羌族自治州汶川县、理县、黑水县、松潘县等地;雅安市的天全县、宝兴县、绵阳市的平武县、北川县等地,除此之外在成都市大邑县、甘孜藏族自治州的丹巴县、康定县等地的零星的面积也是岷江冷杉的潜在适生分布区。

2.3 环境变量贡献率及主导因子筛选

在影响岷江冷杉地理分布的环境因子中,气候因子的累计贡献率为74.16%,地形因子和土壤因子的累计贡献率分别为13.33%和12.51%,而这三类因子对应的置换重要性则分别为84.79%、12.25%和2.96%(表2),由此表明岷江冷杉地理分布主要受气候因子的影响,而地形对岷江冷杉地理分布的影响次之。

具体来讲,对岷江冷杉地理分布贡献率较高的前4个环境变量分别是降水季节性变异系数、气温年变化幅度、昼夜温差月均值和海拔,其累计贡献率为80.77%;置换重要值较高的环境因子分别是气温年变化幅度、年降水量、海拔和降水季节性变异系数,其累计值达到了84.99%(表2)。此外,根据刀切法检验结果,在仅使用单变量时的正规化训练增益最高的3个变量分别是气温年变化幅度、年降水量、海拔,而在使用除单个环境变量外的其他变量时,气温年变化幅度和降水季节性变异系数的增益值降低幅度最大(表2),由此可见,这二者具有其他环境变量中没有的有效信息。综合上述3类评估结果,影响岷江冷杉地理分布的气候因子主要是降水季节性变异系数、气温年变化幅度和年降水量,地形因子则主要是海拔。

2.4 主要贡献率环境变量阈值分析

根据环境因子响应曲线,计算影响岷江冷杉地理分布的各主导因子的阈值(即物种存在概率>0.5的范

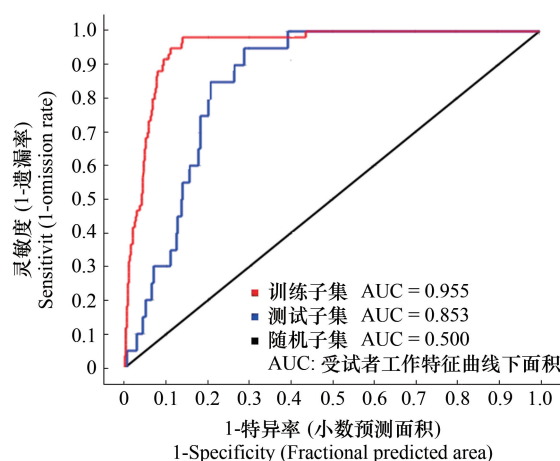


图1 岷江冷杉分布区预测的受试者工作曲线

Fig.1 Receiver operating characteristic (ROC) of *Abies faxoniana*

AUC: 曲线下面积 Area under curve

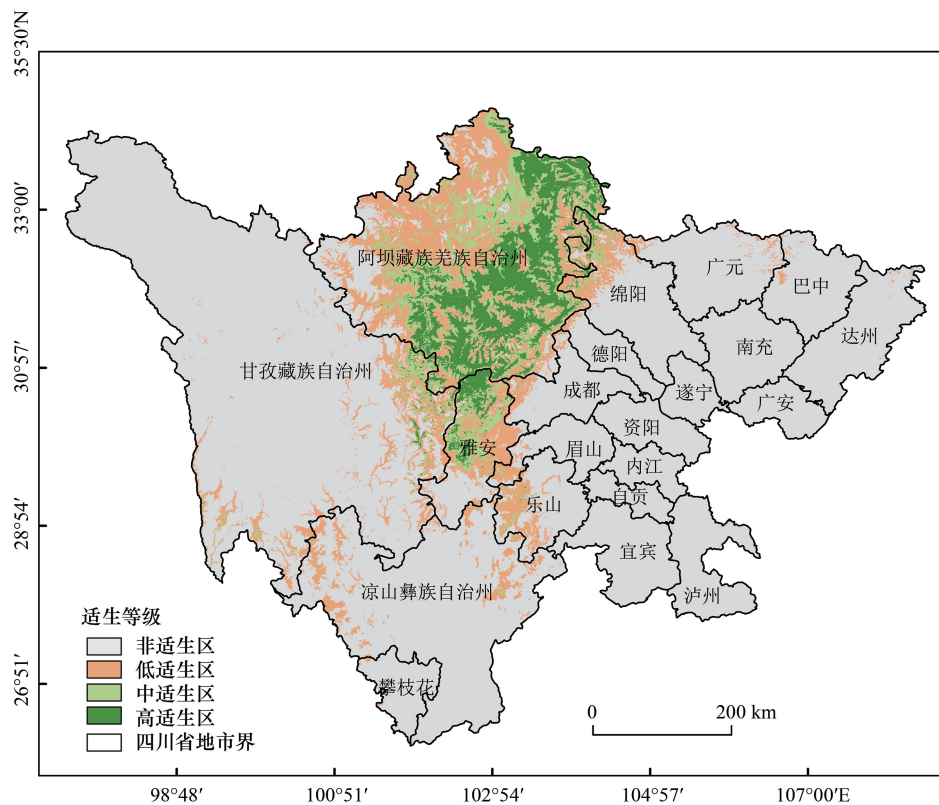


图 2 当代气候条件下岷江冷杉适生等级地理分布格局

Fig.2 Geographic distribution pattern of suitable grade for *Abies faxoniana* in contemporary China

围)。结果显示(图 3),岷江冷杉适宜生长的海拔范围是 2310—3757 m;气温年变化幅度的适宜范围为29.3—32.5 ℃;降水季节性变异系数的适宜范围为 76.5—85.4,最适宜为 81.7 左右;而适宜岷江冷杉生长的年降水量的范围是 694.1—791.7 mm。

表 2 影响岷江冷杉分布的环境因子贡献率

Table 2 Contribution percent of environmental factors affecting the *Abies faxoniana* distribution

变量类型 Variable type	环境变量 Environmental variables	变量贡献率 Variables contribution		置换重要值 Permutation importance		正规化训练增益 Regularized training gain	
		变量 Variable	类 Type	变量 Variable	类 Type	仅适用该变量 With only variable	不使用该变量 Without variable
气候变量 Climate variables	bio-15	33.77	74.16	7.64	84.79	0.45	1.44
	bio-7	20.01		49.38		0.63	1.44
	bio-2	14.14		5.49		0.38	1.53
	bio-12	5.39		16.48		0.53	1.47
	bio-4	0.84		5.80		0.38	1.56
	bio-1	0.01		0.00		0.41	1.57
地形变量 Topography variables	elevation	12.85	13.33	11.49	12.25	0.49	1.53
	slope	0.46		0.72		0.15	1.56
	aspect	0.02		0.04		0.00	1.57
土壤变量 Soil variables	gravel	7.70	12.51	1.91	2.96	0.40	1.54
	bs	2.80		0.00		0.18	1.57
	clay	1.85		0.75		0.10	1.56
	sand	0.11		0.30		0.17	1.57
	silt	0.05		0.00		0.16	1.57
	pH	0.00		0.00		0.16	1.57
	soc	0.00		0.00		0.26	1.57

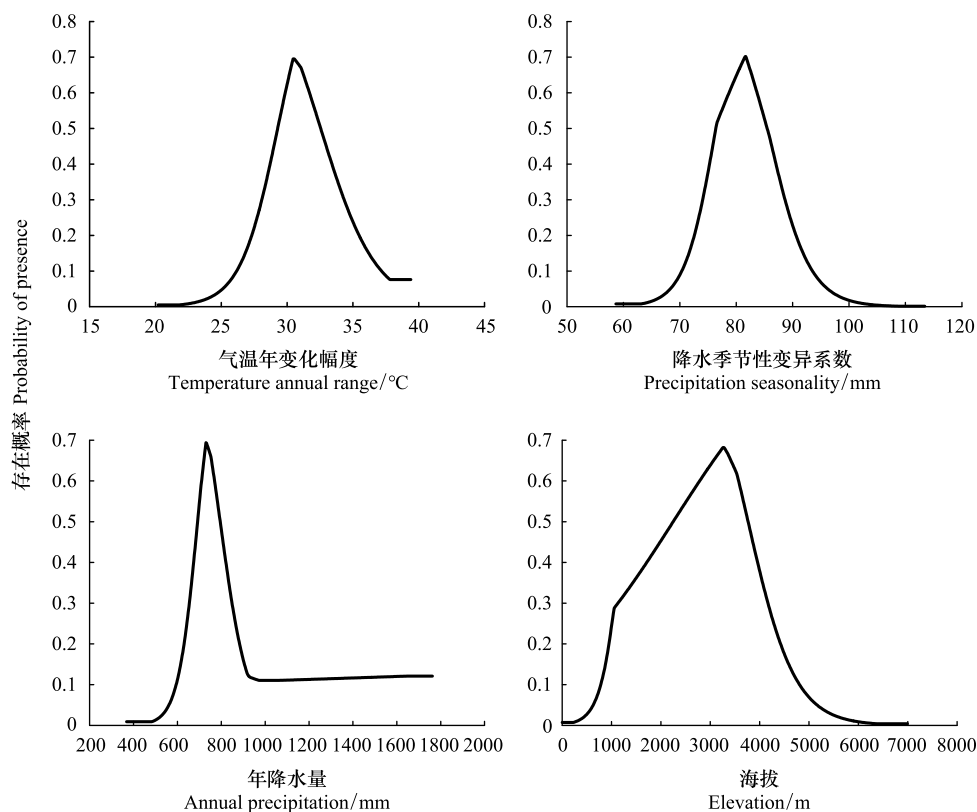


图 3 主要环境因子的响应曲线

Fig.3 Response curves of four major environmental factors

2.5 未来气候变化情景下岷江冷杉适生区及其空间格局变化

在未来两个时期(2050s 和 2070s)的不同气候变化情景下,岷江冷杉潜在中适生区和高适生区的面积较当代气候条件下适生区面积均有所增加,且潜在高适生区面积的增加幅度总体上高于中适生区面积的增加幅度。此外,未来两个时期的中适生区的面积占比均随着排放浓度的增加而逐渐减少,而高适生区的面积占比则表现出先增加后降低的变化(表 3),即在中等排放浓度时的潜在高适生区面积最高。

表 3 不同气候模式下岷江冷杉潜在分布区的面积占比/%

Table 3 Proportions of the potential distribution area of *Abies faxoniana* under different climate models

适生等级 Suitable level	当代气候 Contemporary climate	2050s			2070s		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
非适生区 Unsuitable	76.19	74.31	74.34	74.81	73.32	74.82	76.53
低适生区 Low suitable	12.30	12.31	12.46	12.20	12.47	11.69	10.53
中适生区 Middle suitable	5.91	6.86	6.57	6.54	7.46	6.52	6.32
高适生区 High suitable	5.60	6.51	6.62	6.45	6.74	6.98	6.61

RCP: 典型浓度路径 representative concentration pathway

岷江冷杉适生分布区的空间变化格局显示,在未来不同气候变化情景下,岷江冷杉的潜在适生分布区总体向南移,新增适生区多分布于盆周山地,而丧失适生区集中分布于原适生区北缘和西北缘(图 4)。其中在 2050s 三种排放情景下,岷江冷杉潜在适生区的新增率在 RCP8.5 排放情景下最高,为 34.27%,其次是 RCP2.6 排放情景下的 34.20%(表 4);而在 2070s,岷江冷杉新增适生区面积在 RCP8.5 排放情景下最少,新增率为 31.62%,在 RCP4.5 排放情景下的新增适生面积最大,新增率为 39.79%。岷江冷杉潜在适生区在未来两个时期不同气候变化情景下,丧失面积最大的是 2070s 的 RCP8.5 排放情景,丧失面积最小的是在 2070s 的 RCP4.5 排放情景。

表 4 未来气候变化情景下岷江冷杉适生区的变化率/%

适生区 Suitable area	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	2050s	2070s	2050s	2070s	2050s	2070s
保留率 Reserved rate	81.97	81.34	81.34	83.61	82.93	80.77
新增率 Increase rate	34.20	33.26	31.51	39.79	34.27	31.62
丧失率 Lost rate	18.03	18.66	18.66	16.39	17.07	19.23

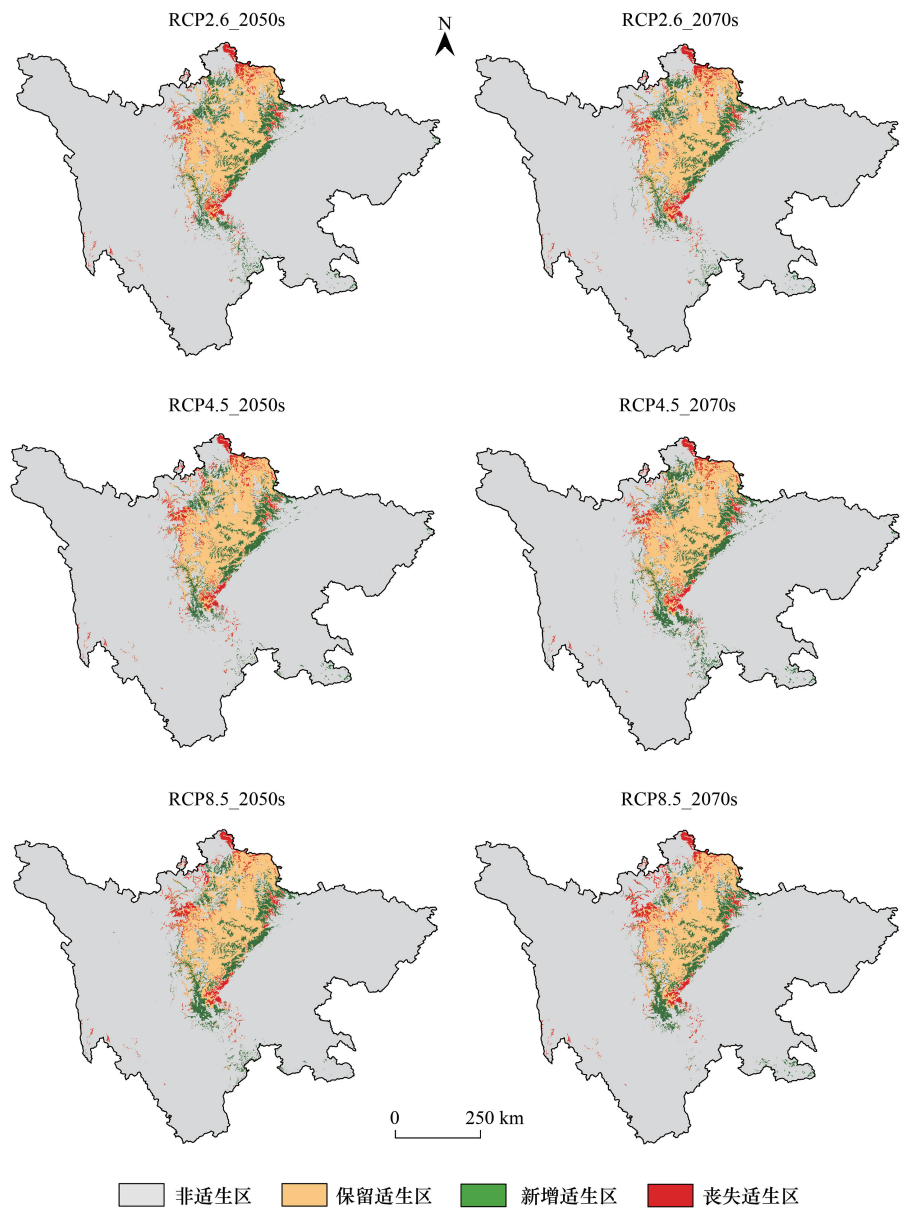


图 4 不同气候变化情景下岷江冷杉适生区空间变化格局

Fig.4 Spatial variation patterns of suitable areas of *Abies faxoniana* under different climate change scenarios

RCP: 典型浓度路径 representative concentration pathway

3 讨论

3.1 模型模拟可靠性及岷江冷杉的潜在分布区分析

当前,利用物种分布模型来预测物种的地理分布已开展了很多研究,在众多物种分布模型中,最大熵模型

(MaxEnt)是使用最为广泛且具有较好预测能力的模型^[22]。本研究基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析,定量展示了当代气候变化条件下岷江冷杉在四川省境内的适生分布区,预测结果显示岷江冷杉潜在分布区要比实际已知的生长区域范围大,主要分布于阿坝藏族羌族自治州、雅安市中部和北部以及甘孜藏族自治州丹巴县、康定县等地的零星地区,这些地区所在的森林分区为川西亚高山云冷杉林区,位于青藏高原东南缘,也是金沙江、大渡河、岷江、涪江等大江大河主要的水源涵养区或源头。适生分布区的气候受高原地形的决定性影响,形成冬寒夏凉的高山气候特点,这也符合岷江冷杉耐阴性强,喜冷湿气候的生物学特性。研究结果表明,当代气候条件下,岷江冷杉潜在适生区(中适生区和高适生区)的面积占研究区总面积的 11.51%,说明岷江冷杉的生态位较为狭窄。此外,模型模拟结果经 ROC 曲线精度检验,AUC 值高于 0.8,且预测的潜在分布区与实际调查分布基本一致,由此表明了 MaxEnt 模型对岷江冷杉的预测精度较好,较为真实地反映了岷江冷杉潜在适生区的分布情况,但模拟的精度尚未达到很高,这可能与物种分布数据量不足有关,模型的表现与物种分布数据的数量正相关^[34]。

3.2 影响岷江冷杉地理分布的主导因子

在不同的环境尺度下,影响物种分布的各类因素的作用程度是不同的。Soberon 和 Peterson^[35]将影响物种分布的因素总结为 4 类:(1)非生物因素,包括气候、土壤条件、地形、水文等;(2)生物因素,包括种间竞争、取食、互利共生等;(3)该物种自身迁移能力和地理区域的特性;(4)物种或种群对新环境的适应能力。通常,非生物因素主要在大尺度空间影响物种的分布,这些因素很大程度上决定了物种的分布范围和格局,包括生理制约、物种对气候和生境梯度的响应和选择等。刘晓彤等^[22]文中指出,统计自 2000 年以来有关物种分布模拟的研究中,有 50% 以上的研究只考虑了气候因素,涉及地形和土壤及其他因子的研究较少,本研究综合考虑了气候、地形及土壤因子对岷江冷杉潜在分布区的影响。结果表明,气候因子对岷江冷杉地理分布预测的贡献最大,土壤因子和地形对分布预测的贡献率较小。后者可能在小尺度范围内影响植物的分布,但在区域尺度上的影响较小,这可能是由于地形和土壤因子对植物的影响是间接的^[36]。影响岷江冷杉分布的降水因子主要是降水季节性变异系数,这一气候因子反映了岷江冷杉在不同生长期对降水的需求不同,研究表明降水量的季节性变异系数在 76.5—85.4 的区域为岷江冷杉的适宜生长范围。影响岷江冷杉分布的温度因子是年均气温变化幅度,其适宜范围是 29.3—32.5 °C,即在年均气温变幅较高的地区适合岷江冷杉分布。上述两个气候因子的主导性反映了气候条件的变异性决定了岷江冷杉的分布格局。在地形因子中岷江冷杉受海拔的影响最大,在海拔 2310—3757 m 区间是岷江冷杉的适宜生长范围,而《四川松杉植物地理》^[37]指出岷江冷杉垂直分布于海拔 2400—4000 m,坡度>25°的阴坡、半阴坡的高山地带,本文结果符合岷江冷杉的实际生长环境;虽然海拔适宜范围的最低阈值低于 2400 m,说明在海拔 2300—2400 m 的亚高山地带也是岷江冷杉的潜在适生分布区,在未来气候变化或人工种植的情况下岷江冷杉是可以存活的。本研究中参与模型构建的环境数据只涉及了非生物因素,未考虑岷江冷杉自身适应能力、种间相互作用及人类干扰数据,因而预测结果与实际情况也会存在一定的偏差。

3.3 岷江冷杉地理分布对未来气候变化的响应

在全球气候变化背景下,预测物种在未来气候变化下的分布变化趋势,对物种多样性保护具有重要意义^[27]。岷江冷杉对气候变化的响应表现为:在未来两个时期的不同气候变化情景下,其潜在适生区面积均较当代气候条件下的适生区面积有所增加,但中等适生区的面积占比均随着排放浓度(低、中、高)的增加而逐渐减少,而潜在高适生区面积在中等浓度时最高,表明不同生境中的岷江冷杉对不同 CO₂ 浓度以及温度的变化产生不同的响应,在同一个时期内随着 CO₂ 浓度的升高,一定温度范围内,温度升高很大程度上将抑制低海拔岷江冷杉的生长,从而导致岷江冷杉部分生境丧失;但在高浓度排放情景下,高海拔地区的温度升高明显,使得岷江冷杉有向高海拔低温区扩张的可能^[38],高海拔地区升高的温度有利于岷江冷杉形成层更早的活动,表明高海拔地区将由不适宜生境逐渐向适宜生境转变;在未来更长的时间内,中等 CO₂ 浓度排放情景更有利

于岷江冷杉林生境的扩张,低 CO_2 浓度排放情景和高 CO_2 浓度排放情景下,升温幅度低于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 和升温幅度太高都对岷江冷杉的生长不利。

未来气候变化情景下岷江冷杉的潜在适生分布区总体向南迁移,这与 Liao^[8] 等人的研究结果一致,该研究表明在未来气候变化情景下,岷江冷杉的潜在适生区会沿着岷江流域向南扩张至云南省的东北部。综合各个排放情景,生境丧失区域主要分布在阿坝藏族羌族自治州的若尔盖县北部、阿坝县,以及雅安市、乐山市、眉山市以及凉山彝族自治州交界的马尔康县、天全县、荣经县、泸定县、石棉县等。根据生境适宜分布区预测结果(图 2),这些分布区主要位于非适生区和低适生区的交界处,处于岷江冷杉分布的林线下缘。全球变暖背景下,中低海拔岷江冷杉存在季节性水分胁迫,抑制岷江冷杉生长,尤其是对大龄树木的影响更加强烈^[15]。此外,物种生长过程中的局部环境的生存竞争压力也发挥着不可忽视的作用。高海拔地区气温逐渐升高,原本不利生境条件得到改善,林线下缘岷江冷杉面临更大的资源竞争压力^[39]。较大的生存压力对岷江冷杉种群幼苗的存活极为不利,以至于岷江冷杉种群幼苗死亡率较高,不利于种群的更新与扩张^[10]。四川省地形复杂多样,海拔垂直梯度较大,复杂的地形地貌条件导致局部气候变化多样,四川省生物气候类型未来转变趋势由温度低的类型像温度高的类型转变^[40],低海拔一些原本不适宜岷江冷杉分布的区域,可能转化成潜在适宜分布区。

对于物种的新增适生区,表明未来气候变化使得这些区域的气候条件更加适宜该物种的生长,物种分布的可能性增加,但实际的分布格局还要取决于物种向新增分布区迁移的可能性^[41]。未来气候变化条件下的新增适生区能够为岷江冷杉未来的更新与恢复提供指引,可以通过人为的方式在这些区域引种或培育岷江冷杉,增加其迁入的可能性。而对于丧失适生区,可以通过采取迁地保护、提高岷江冷杉幼苗繁育等措施来提高其应对气候变化的能力。未来气候变化条件下,保留适生区是物种应对气候变化的安全地和避难所^[42],因而更应该注重和加强该区域岷江冷杉的保护。可以看到,未来不同气候变化情景下岷江冷杉适生区的保留率基本保持在 80% 左右,说明岷江冷杉应对气候变化的能力较强。

4 结论

(1) 最大熵模型 MaxEnt 能够较好地预测岷江冷杉的潜在适生分布(AUC 值 >0.8)。在当代气候条件下,岷江冷杉的中、高适生区集中分布于阿坝藏族羌族自治州、雅安市中部和北部、绵阳市的平武县、北川县等地,分别占全省总面积的 5.91% 和 5.60%。

(2) 影响岷江冷杉地理分布的气候因子主要是降水季节性变异系数、气温年变化幅度、年降水量、海拔和土壤碎石体积百分比。其中气候因子占主导作用,地形因子次之。适宜岷江冷杉分布的海拔范围 2310—3757 m,气温年变化幅度的范围为 $29.3\text{—}32.5\text{ }^\circ\text{C}$;降水季节性变异系数的适宜范围为 76.5—85.4,以及年降水量的适宜范围为 694.1—791.7 mm。

(3) 在未来气候变化情景下,岷江冷杉的适生分布区南移,新增适生区多分布于盆周山地,而丧失适生区则主要分布于原适生区北缘和西北缘。其中在岷江冷杉潜在适生区在未来两个时期不同气候变化情景下,丧失面积最大的是 2070s 的 RCP8.5 排放情景,丧失面积最小的是在 2070s 的 RCP4.5 排放情景。

参考文献(References):

- [1] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306(5702): 1686-1686.
- [2] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [3] Nolan C, Overpeck J T, Allen J R M, Anderson P M, Betancourt J L, Binney H A, Brewer S, Bush M B, Chase B M, Cheddadi R, Djamali M, Dodson J, Edwards M E, Gosling W D, Haberle S, Hothkiss S C, Huntley B, Ivory S J, Kershaw A P, Kim S H, Latorre C, Leydet M, Lézine A M, Liu K B, Liu Y, Lozhkin A V, McGlone M S, Marchant R A, Momohara A, Moreno P I, Müller S, Otto-Bliesner B L, Shen C M, Stevenson J, Takahara H, Tarasov P E, Tipton J, Vincens A, Weng C Y, Xu Q H, Zheng Z, Jackson S T. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science*, 2018, 361(6405): 920-923.
- [4] Nakashizuka T, Shimazaki M, Sasaki T, Tanaka T, Kurokawa H, Hikosaka K. Influences of climate change on the distribution and population

- dynamics of subalpine coniferous forest in the Hakkoda Mountains, Northern Japan//Kudo G, ed. Structure and Function of Mountain Ecosystems in Japan: Biodiversity and Vulnerability to Climate Change. Tokyo: Springer, 2016: 1-15.
- [5] Andrus R A, Harvey B J, Rodman K C, Hart S J, Veblen T T. Moisture availability limits subalpine tree establishment. *Ecology*, 2018, 99(3): 567-575.
- [6] Cheng G W, Lu X Y, Wang X D, Sun J. Rebirth after death: forest succession dynamics in response to climate change on Gongga Mountain, Southwest China. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(8): 1671-1681.
- [7] Motta R, Nola P. Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12(2): 219-230.
- [8] Liao Z Y, Zhang L, Nobis M P, Wu X G, Pan K W, Wang K Q, Dakhlil M A, Du M X, Xiong Q L, Pandey B, Tian X L. Climate change jointly with migration ability affect future range shifts of dominant fir species in Southwest China. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(3): 352-367.
- [9] 顾人和, 王朗自然保护区的大自然景观类型分析与评价. *生物学杂志*, 2005, 22(3): 1-4.
- [10] 程伟, 吴宁, 罗鹏. 岷江上游林线附近岷江冷杉种群的生存分析. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 349-353.
- [11] 康文. 川西亚高山岷江冷杉更新与林窗的关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [12] Taylor A H, Jang S W, Zhao L J, Liang C P, Miao C J, Huang J Y. Regeneration patterns and tree species coexistence in old-growth *Abies-Picea* forests in southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1/3): 303-317.
- [13] 缪宁, 史作民, 冯秋红, 刘兴良, 何飞. 川西亚高山岷江冷杉种群的空间格局分析. *林业科学*, 2008, 44(12): 1-6.
- [14] Liu Y, Chen Y M, Zhang J, Yang W Q, Peng Z, He X H, Deng C C, He R L. Changes in foliar litter decomposition of woody plants with elevation across an alpine forest - tundra ecotone in eastern Tibet Plateau. *Plant Ecology*, 2016, 217(5): 495-504.
- [15] 徐宁, 王晓春, 张远东, 刘世荣. 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2013, 33(12): 3742-3751.
- [16] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 姜春前. 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应. *生态学报*, 2014, 34(7): 1831-1840.
- [17] Li Z S, Liu G H, Gong L, Wang M, Wang X C. Tree ring-based temperature reconstruction over the past 186 years for the Miyaluo Natural Reserve, western Sichuan Province of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 120(3/4): 495-506.
- [18] 张启东, 谢强, 杨晗, 王蒙, 徐玮. 四姑娘山国家级自然保护区岷江冷杉枯落物及土壤的持水能力研究. *四川环境*, 2013, 32(2): 42-45.
- [19] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 缪宁. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中岷江冷杉天然更新状况及其影响因子. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 646-657.
- [20] 冯秋红, 蒲远凤, 李登峰, 陈素芬, 刘兴良, 陈艳, 康永鸿, 陈进. 疏伐桦木对川西亚高山岷江冷杉+桦木混交林林下岷江冷杉更新的影响研究. *四川林业科技*, 2018, 39(3): 35-39.
- [21] Corlett R T, Westcott D A. Will plant movements keep up with climate change? *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(8): 482-488.
- [22] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283.
- [23] Araújo M B, Peterson A T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 2012, 93(7): 1527-1539.
- [24] 刘丹. 基于分布适宜性和潜在生产力的定量适地适树研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [25] 吕振刚, 李文博, 黄选瑞, 张志东. 气候变化情景下河北省3个优势树种适宜分布区预测. *林业科学*, 2019, 55(3): 13-21.
- [26] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893.
- [27] 李宁宁, 张爱平, 张林, 王克清, 罗红燕, 潘开文. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测. *植物研究*, 2019, 39(3): 395-406.
- [28] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Peterson A T. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102-117.
- [29] 庄鸿飞, 秦浩, 王伟, 张殷波. 基于 MaxEnt 模型的云南红豆杉潜在适宜分布预测. *山西大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(1): 233-240.
- [30] Wang Y Q, Ma J F, Li X Q, Wang Y F, Cao S, Xie A T, Ye S F, Dong B X, Zhao W X, Qin Y X, Xia F, Zheng Z Y, Zhu X M, Jiang J Y, Dong Z P. The distribution of *Aethis lepigone* and prediction of its potential distribution based on GARP and MaxEnt. *Journal of Applied Entomology*, 2017, 141(6): 431-440.
- [31] 王书越, 潘少安, 王明睿, 王明馨, 叶吉. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布. *生态学报*, 2019, 39(9): 3277-3286.
- [32] 王运生, 谢润炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.
- [33] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [34] Hirzel A, Guisan A. Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 331-341.
- [35] Soberon J, Peterson A T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2005, 2: 1-10.
- [36] Nettesheim F C, Damasceno E R, Sylvestre L S. Different slopes of a mountain can determine the structure of ferns and lycophytes communities in a tropical forest of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 2014, 86(1): 199-210.
- [37] 管中天. 四川松杉植物地理. 成都: 四川人民出版社, 1982: 36-37.
- [38] Sun Y S, Abbott R J, Li L L, Li L, Zou J B, Liu J Q. Evolutionary history of Purple cone spruce (*Picea purpurea*) in the Qinghai-Tibet Plateau: homoploid hybrid origin and Pleistocene expansion. *Molecular Ecology*, 2014, 23(2): 343-359.
- [39] 刘红润, 李凤日. 红松天然林种内和种间竞争关系的研究. *植物研究*, 2010, 30(4): 479-484.
- [40] 逯亚峰, 刘艳青, 王玉宽, 刘媛, 王爱华. 未来气候变化对山地生物气候类型分布的影响——以四川省为例. *生态学报*, 2015, 35(21): 7052-7060.
- [41] 潘石玉, 朱志红, 姚天华, 王彦星, 周佩. 气候变化背景下药用植物何首乌在中国适生区分布预测. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(1): 192-198.
- [42] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 496-502.