

DOI: 10.5846/stxb202105111226

李晓辰, 贡璐, 魏博, 丁肇龙, 朱海强, 李岳峰, 张涵, 马勇刚. 气候变化对新疆雪岭云杉潜在适宜分布及生态位分化的影响. 生态学报, 2022, 42(10): 4091-4100.

Li X C, Gong L, Wei B, Ding Z L, Zhu H Q, Li Y F, Zhang H, Ma Y G. Effects of climate change on potential distribution and niche differentiation of *Picea schrenkiana* in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4091-4100.

气候变化对新疆雪岭云杉潜在适宜分布及生态位分化的影响

李晓辰^{1,2}, 贡璐^{1,2,*}, 魏博³, 丁肇龙^{1,2}, 朱海强^{1,2}, 李岳峰^{1,2}, 张涵^{1,2}, 马勇刚^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:探究气候变化对天山森林植物潜在空间分布的影响及其模拟预测有助于揭示中尺度下植物分布格局对气候变化的适应对策和反馈机制,对促进干旱区山地森林生态系统的生物多样性保育和森林资源可持续管理有着重要的科学和实践意义。基于雪岭云杉的分布点数据和环境因子数据,利用最大熵(MaxEnt)模型、GIS工具及R软件估计其在基准气候(1970—2000年)及2050(2041—2060年)和2070(2061—2080年)时段基于RCPs气候情景下的潜在分布范围、空间格局变化及生态位分化。结果表明:(1)雪岭云杉在基准气候下的潜在分布与2019年秋季的NDVI植被覆盖变化基本保持一致,高适生分布区主要分布在东疆的哈密、巴里坤和伊吾,北疆主要分布在天山北坡、博格达山、北塔山和伊犁河谷,南疆主要分布在天山南坡。另外,在阿尔泰山南坡、塔城、裕民、托里、西昆仑山和小帕米尔山地也有分布。(2)限制雪岭云杉潜在分布的关键因子为降水(最干月降水量、最冷季降水量和降水季节性)和温度(最干季平均温度、年均温、等温性和气温年较差)、土壤剖面有效含水量、土壤碳密度及海拔,其累计贡献率之和达到87.28%。(3)2050和2070时段,雪岭云杉的适宜分布范围均呈不显著的增加趋势,但RCP6.0情景比RCP2.6较显著,分别扩增了3.33%和3.47%;低、中、高适生区均保持相对稳定的变化,从RCP2.6到RCP6.0情景下增幅分别在1.78%、1.26%和0.98%左右;适生分布区的重心总体上呈现出向高纬度、向东北迁移的趋势,但变化幅度不显著。(4)PCA分析表明雪岭云杉在南疆的气候生态位最广泛、北疆次之、东疆最窄,生态位分化检测表明北疆、南疆和东疆未发生明显分化。

关键词:雪岭云杉;潜在分布范围;空间格局;生态位分化;MaxEnt模型

Effects of climate change on potential distribution and niche differentiation of *Picea schrenkiana* in Xinjiang

LI Xiaochen^{1,2}, GONG Lu^{1,2,*}, WEI Bo³, DING Zhaolong^{1,2}, ZHU Haiqiang^{1,2}, LI Yuefeng^{1,2}, ZHANG Han^{1,2}, MA Yonggang^{1,2}

1 College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Education Ministry, Urumqi 830046, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Exploring the impact of climate change on the potentially spatial distribution of forest plants in Tianshan

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01C022);国家自然科学基金项目(31760142)

收稿日期:2021-05-11; **网络出版日期:**2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gonglu721@163.com

Mountain and its simulation and prediction can help to reveal the adaptation strategies and feedback mechanisms of plant distribution patterns to climate change at the mesoscale. It has important scientific and practical significance for promoting biodiversity conservation and sustainable management of forest resources in Arid Mountainous Forest Ecosystem. Based on the data of distribution points of *Picea schrenkiana* and environmental factors data, the maximum entropy (MaxEnt) model, GIS tools and R software were used to estimate the potential distribution range, spatial pattern changes and niche differentiation of *P. schrenkiana* under the reference climatic (1970—2000), Representative Concentration Pathways (RCPs) based climate scenarios in 2050 (2041—2060) and 2070 (2061—2080). The results showed that: (1) the potential distribution of *P. schrenkiana* in the reference climatic was basically consistent with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) vegetation cover change in autumn of 2019. The high suitability distribution areas are mainly distributed in Hami, Balikun and Yiwu in Eastern Xinjiang, the north slope of Tianshan Mountain, Bogda Mountain, Beita Mountain and Yili Valley in Northern Xinjiang, and the south slope of Tianshan Mountain in Southern Xinjiang. In addition, it was also distributed in the southern slope of Altay Mountain, Tacheng, Yumin, Tuoli, Western Kunlun Mountain and little Pamirs mountain. (2) The key factors limiting the potential distribution of *P. schrenkiana* were precipitation (Precipitation of driest month, Precipitation of coldest quarter and Precipitation seasonality), temperature (Mean temperature of driest quarter, Annual mean temperature, Isothermality and Annual temperature range), soil profile available water capacity, soil carbon density, and altitude. Their cumulative contribution rate reached 87.28%. (3) In 2050 and 2070 periods, the suitable distribution range of *P. schrenkiana* showed no significant increasing trend, but the RCP6.0 scenario was more significant than the RCP2.6, with an increase of 3.33% and 3.47%, respectively; The low, middle and high suitable areas maintained relatively stable changes, the growth rates from RCP2.6 to RCP6.0 scenarios are about 1.78%, 1.26%, and 0.98%, respectively; and the center of gravity of suitable distribution areas showed a trend towards higher latitude and northeastward, but the change amplitude was not significant. (4) PCA analysis showed that the climate niche of *P. schrenkiana* was the most extensive in Southern Xinjiang, followed by Northern Xinjiang, and the narrowest in Eastern Xinjiang. Niche differentiation test indicated that there was no significant differentiation in the Northern, Southern and Eastern Xinjiang.

Key Words: *Picea schrenkiana*; potential distribution range; spatial pattern; niche differentiation; MaxEnt model

陆地生态系统对全球气候变化的响应与反馈,一直是当前生态学研究热点问题之一。气候变化可通过改变温度和降水的时空分异,进而作用到各种陆表过程^[1]。物种的地理分布及其空间格局的变化是对未来气候变化的直接响应,气候变化会直接或间接影响物种原有的空间分布格局及其相关的生态因子^[2],从而使物种的分布区域、范围和数量发生改变^[3]。因此,研究气候变化下物种适宜生境和空间分布格局的变化,不仅对物种的保护和资源利用至关重要,而且对生态系统可持续管理、生物多样性保护也具有重要意义^[4]。

新疆位于欧亚大陆腹地,属中纬度干旱和半干旱地区,降水少而蒸发强烈、植被稀疏,生态系统脆弱易受气候变化的影响,是全球气候变化的敏感区域之一。雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是松科(Pinaceae)云杉属(*Picea*)的乔木,在新疆天山地区有广泛的分布,向西至西天山、向东达巴里坤,伊犁、西昆仑山及小帕米尔山地也均有分布^[5]。雪岭云杉是新疆山地森林中分布最广的主要树种,对天山的水源涵养、水土保持、改善气候、维护和调控荒漠地区的生态平衡起着重要的作用^[6]。近年来,对雪岭云杉开展的研究主要有:小尺度的氮添加、个体基因组学、生理生态、化学计量特征等^[6-9],中尺度的种群动态及其空间分布、群落动态特征等^[10-12],大尺度的生物量估算、碳储量格局等^[13-14]。而雪岭云杉在新疆的潜在分布范围、适生程度、限制其潜在分布的驱动因子、生态位分化程度及未来气候变化对雪岭云杉的适宜分布范围和空间格局造成怎样的影响尚不可知,成为科学管理、保护和利用该植物资源的瓶颈。

探究物种的空间分布范围及其与环境因子之间的关系,有助于深入了解物种的历史演化过程,揭示环境

差异性及其对物种生态位的影响与生态适应性的进化机制^[15]。物种分布模型(Species Distribution Model, SDM)通过物种分布点与环境数据之间的关系来模拟物种在整个分布区的潜在分布范围^[16]。在多种不同的物种分布模型中,如生态位因素分析模型(Ecological niche factor analysis, ENFA)、多元自适应样条模型(Multiple Adaptive Regression Splines, MARS)及最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt)等^[17]。其中,MaxEnt模型比其他分布模型具有更强区分物种适(非)生区的能力^[18],且在分布点数据有限或小样本数据的情况下,预测结果更好、准确性更高^[19],已广泛应用于物种保护区规划^[20]、入侵物种控制^[21]、气候变化对物种分布区的影响^[22]、生态系统稳定性研究^[23]及潜在适生分布区预测^[24]等领域,对保护生物学、生物地理学和生态学等研究都具有重要作用。本研究基于IPCC第5次评估报告的RCP2.6(低排放情景)和RCP6.0(中等排放情景)排放情景^[22]的气候数据、海拔和土壤因子数据,利用GIS工具、R软件和MaxEnt模型估计基准气候和未来气候下雪岭云杉在新疆的潜在分布范围、空间格局变化及生态位分化,旨在解决以下科学问题:(1)获得基准气候下雪岭云杉的潜在分布范围、高适生分布区及影响其分布的关键因子;(2)明确未来气候变化对雪岭云杉的适宜分布范围、空间格局造成的影响;(3)确定未来气候变化下不同地理组间雪岭云杉的生态位分化程度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与分布点数据来源

新疆地处中国西北干旱区,位于 $73^{\circ}40' - 96^{\circ}18' E, 34^{\circ}25' - 48^{\circ}10' N$ 之间,面积约为 $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$,远离海洋、深居内陆、属典型的山体、盆地相间的地貌类型、具有“三山夹两盆”的独特地貌特征,北部为阿尔泰山,天山山系横亘于中部呈东西走向(约1700 km),南部为昆仑山系^[25]。境内为典型的温带大陆性气候,具有温差大、夏季干热、冬季寒冷、降水少而蒸发强烈和日照充足等特征,独特的地形与气候特点,使得该区内植被覆盖度较低,植被具有显著的水平分布与垂直地带性差异,空间差异明显,生态系统较为脆弱、敏感^[26]。

雪岭云杉的自然分布数据主要来源于已发表的文献^[27-33]、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)及中国自然保护区资源平台(<http://www.papc.cn/>)。共获得65个自然分布点,基本覆盖了雪岭云杉在新疆的自然分布区。对已获得的分布点,删除了描述不够具体以及经纬度重复或相似的分布点。最终,整理获得53个具有准确分布信息的点,用于本研究的模拟。

1.2 环境数据来源与处理

本研究涉及气候因子、海拔因子、土壤因子和植被覆盖度的相关数据。基准气候数据(1970—2000年)和未来气候情景下的19个气候因子及海拔因子均来源于全球生物气候数据库(<http://www.worldclim.org>,空间分辨率30 s)。其中,19个气候因子和海拔因子分别为:年均温(bio1)、平均气温日较差(bio2)、等温性(bio3)、气温季节性变动系数(bio4)、最热月最高温(bio5)、最冷月最低温(bio6)、气温年较差(bio7)、最湿季平均温度(bio8)、最干季平均温度(bio9)、最热季平均温度(bio10)、最冷季平均温度(bio11)、年降水量(bio12)、最湿月降水量(bio13)、最干月降水量(bio14)、降水季节性(bio15)、最湿季降水量(bio16)、最干季降水量(bio17)、最暖季降水量(bio18)、最冷季降水量(bio19)和海拔(Alt)。未来气候数据基于IPCC第五次评估报告的两个气候时段2050(2041—2060平均气候)和2070(2061—2080平均气候)。对于每一个气候时段,选择了2个典型浓度路径RCP2.6(低排放情景)和RCP6.0(中等排放情景)^[22]。7个土壤数据(0—100 cm)来源于美国橡树岭国家实验室分布式动态档案中心(<https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/igbp-surfaces.html>,空间分辨率5 arcmin),分别为容重(Bk: Bulk density)、田间持水量(Fc: Field capacity)、土壤剖面有效含水量(Spawc: Soil profile available water capacity)、土壤碳密度(Sc: Soil carbon density)、土壤热容量(Tc: Thermal capacity)、总氮密度(Tn: Total nitrogen Density)及萎蔫点(Wp: Wilting point)。同时,下载了中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)2019年秋季(9—11月)的NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)植被覆盖度数据,验证基准模拟的准确性。本研究所用的地图数据来源于国家基

基础地理信息系统(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)下载的 1:400 万的中国行政区划。

在模型构建之前,首先利用 ArcGIS 10.2 将 7 个土壤数据基于双线性插值方法重采样成 30 s,用新疆的地理范围将气候、土壤、海拔和 NDVI 数据进行提取,进一步以文献中记载的 1200—3500 m 的海拔范围提取雪岭云杉的 NDVI 植被覆盖图。然后利用 MaxEnt v3.3.4 的刀切法^[34](jackknife)将 27 个环境因子按贡献率大小排序,共筛选出影响雪岭云杉潜在分布的 14 个环境因子(表 1)。利用 R 语言 ecospat 包进行地理组间的生态位一致性检验(Nich identity tests),通过 1000 次模拟重复计算 Schoener's *D* 和 Warren *et al.*'s *I* 值,两个值的范围为[0,1]。若生态位观测值 *D* 与 *I* 显著低于 100 次重复的生态位相似性分布,表明地理组间的生态位发生了分化^[35];利用“vegan”包进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),分析不同组间的环境因子的差异。

表 1 本研究所用的 14 个环境因子

Table 1 The 14 environmental factors used in this study

环境因子 Environmental factors	描述 Description	环境因子 Environmental factors	描述 Description
Bio14/mm	最干月降水量	Alt/m	海拔
Bio15	降水季节性	Bio3	等温性
Bio19/mm	最冷季降水量	Bio1/°C	年均温
Bio9/°C	最干季平均温度	Bio2	平均气温日较差
Spawc(%)	土壤剖面有效含水量	Bio5/°C	最热月最高温
Bio7/°C	气温年较差	Bio11/°C	最冷季平均温度
Sc/(kg/m ²)	土壤碳密度	Bio6/°C	最冷月最低温

1.3 模拟预测与数据分析

基于雪岭云杉分布点数据与 14 个环境因子进行基准气候下的分布模拟,将分布点数据与环境因子数据导入 MaxEnt 模型,参数设置为 10 次重复、随机测试百分率为 25%、500 次迭代、收敛阈值为 0.00001,其他参数不变。利用 AUC 值^[36](the area under the ROC curve)和 NDVI 植被覆盖分布检验模拟的精度。其中,AUC 和 NDVI 的取值范围分别为[0,1]和[-1,1],AUC 值为 1 是理想情况,表明模型预测的分布区与物种实际分布区完全吻合;值>0.5,表示模拟效果好于随机;AUC 值 \geq 0.9 表示模拟效果极好。NDVI 指数负值表示地面覆盖为云、水、雪等,0 表示有岩石或裸土等,正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。

按上述方法构建基准气候下的模拟,分别运用到 2050 和 2070 时段下的气候情景(RCP2.6、RCP6.0),计算不同气候情景下的 AUC 均值,利用 ArcGIS 10.2 的空间分析工具中的自然间断点分级法(Jenks)划分适生等级(非适生区、低适生区、中适生区和高适生区),并计算不同气候情景下适生等级的阈值均值。同时,提取基准气候和未来气候下雪岭云杉的适生分布区(潜在发生概率 \geq 30%)及其几何中心,分析不同气候条件下几何中心的移动轨迹与趋势,揭示适生分布区的变化。

2 结果与分析

2.1 基准气候下的潜在地理分布

在不同气候情景或时段下,雪岭云杉 10 次重复模型的 AUC 值均大于 0.9(标准差 $SD \leq 0.005$),说明不同重复之间的稳定性较好;10 次重复模拟的阈值也具有较好的稳定性,低适生区 $SD \leq 0.491$ 、中适生区 $SD \leq 0.103$ 和高适生区 $SD \leq 0.219$ (表 2)。

根据 MaxEnt 模型预测结果,在基准气候条件下,雪岭云杉的高适生分布区主要在新疆天山南北两坡、伊犁河谷及哈密地区。具体说,在新疆东部主要分布在哈密、巴里坤和伊吾等地,北疆主要分布在博格达山、北塔山,天山北坡的木垒、奇台、吉木萨尔、乌鲁木齐、阜康、昌吉、呼图壁、玛纳斯、石河子、沙湾、奎屯和精河等地,天山南坡主要分布在库尔勒、轮台、开都河、库车、拜城、温宿、乌什和阿合奇等地,伊犁河谷主要分布在伊

宁、尼勒克、巩留、新源、特克斯、昭苏、赛里木湖和那拉提等地。另外,在阿尔泰山南坡、塔城、裕民、托里、西昆仑山和小帕米尔山地也均有分布。同时,雪岭云杉的潜在分布区和 2019 年秋季的 NDVI 植被覆盖分布基本一致(图 1)。

表 2 分布模型在不同气候下的 AUC 值和阈值

Table 2 AUC values and thresholds of distribution models at different climate conditions

气候情景 Climate scenarios	AUC 值 AUC values	阈值 Thresholds		
		低适生区 Low suitable area	中适生区 Middle suitable area	高适生区 High suitable area
1970—2000	0.945±0.002	8.901±0.490	28.261±0.077	55.314±0.073
2050(RCP2.6)	0.946±0.002	8.901±0.491	28.263±0.078	55.287±0.047
2050(RCP6.0)	0.946±0.003	9.001±0.439	29.480±0.103	57.473±0.219
2070(RCP2.6)	0.947±0.004	8.902±0.490	28.232±0.013	55.360±0.136
2070(RCP6.0)	0.947±0.005	9.031±0.487	29.441±0.077	57.287±0.066

AUC: 曲线下方面积 Area under the curve RCP: 典型浓度路径 Representative concentration pathways

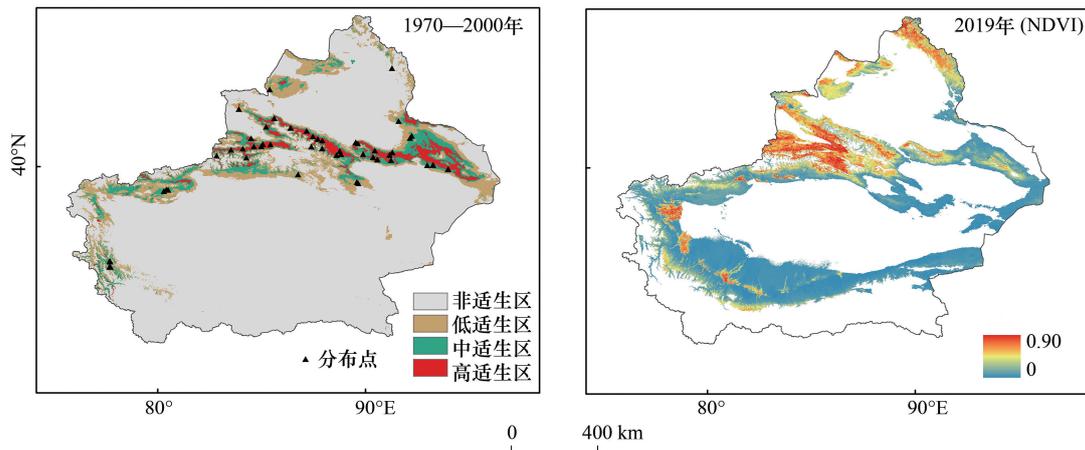


图 1 基准气候下雪岭云杉的潜在分布及 2019 年秋季的 NDVI 空间分布

Fig.1 Potential distribution under reference climate and NDVI spatial distribution in autumn of 2019 of *P. schrenkiana*

NDVI: 归一化植被指数

2.2 影响地理分布的驱动因子

在基准气候条件下,控制雪岭云杉潜在分布的关键因子(概率 $\geq 30\%$)、变化范围及均值为:最干月降水量(1—7 mm、2.98 mm)、降水季节性(61—85、75.53)、最冷季降水量(5—18 mm、10.63 mm)、最干季平均温度(-17—-12℃、-10.82℃)、气温年较差(31—44℃、42.59℃)、等温性(26—31、29.00)、年均温(-3—6、3.31℃)、土壤剖面有效含水量(16%—22%、17.76%)、土壤碳密度(5—18 kg/m²、8.56 kg/m²)和海拔(1500—3200 m、2132 m),其累计贡献率之和达到 87.28%,且各因子对 10 次重复模型的贡献率较稳定,标准差 SD ≤ 3.18 (表 3)。另外,最冷月最低温和最冷季平均温度对雪岭云杉潜在分布的影响较小,累积贡献率为 4.30%。

2.3 未来气候变化对潜在分布范围及格局的影响

雪岭云杉在 2050 和 2070 时段下的潜在分布范围与基准气候相比,均呈不显著的增加趋势,但 RCP6.0 情景下的扩增相比 RCP2.6 较显著,分别扩增了 3.33%和 3.47%,且潜在适生分布区没有减少(图 1、图 2、表 4)。新增的潜在分布区主要集中在北疆的富蕴和精河地区、北塔山西南麓、巴里坤以西及托里地区,南疆主要在和静和和硕地区、库车、新和和拜城地区,而在东疆的哈密盆地南缘、博格达峰南麓、南疆的塔里木盆地西端及昆仑山北麓呈分散的小面积增加趋势。在 RCP2.6 情景下,零星的减少区域主要在天山南坡,分别减少了 0.08%

和 0.01%。

表 3 MaxEnt 分析定义的关键因子对雪岭云杉潜在分布的变化范围、均值及贡献率

Table 3 The variation range, mean value and contribution rate of key factors to the potential distributions of *P. schrenkiana* defined by MAXENT

气候变量 Climate variables	变化范围 Range of variation	均值 Mean value	贡献率/% Contribution rate
最干月降水量 Precipitation of driest month/mm	1—7	2.98	17.10±3.18
降水季节性 Precipitation seasonality	61—85	75.53	13.41±1.66
最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter/mm	5—18	10.63	12.30±1.71
最干季平均温度 Mean temperature of driest quarter/°C	-17—-12	-10.82	8.12±1.35
气温年较差 Annual temperature range/°C	31—44	42.59	6.30±1.33
等温性 Isothermality	26—31	29.00	5.87±0.78
年均温 Annual mean temperature/°C	-3—5	2.31	5.41±2.22
土壤剖面有效含水量 Soil profile available water capacity/%	16—22	17.76	6.93±1.32
土壤碳密度 Soil carbon density/(kg/m ²)	5—18	8.56	6.01±0.69
海拔 Altitude/m	1500—3200	2132	5.83±0.46

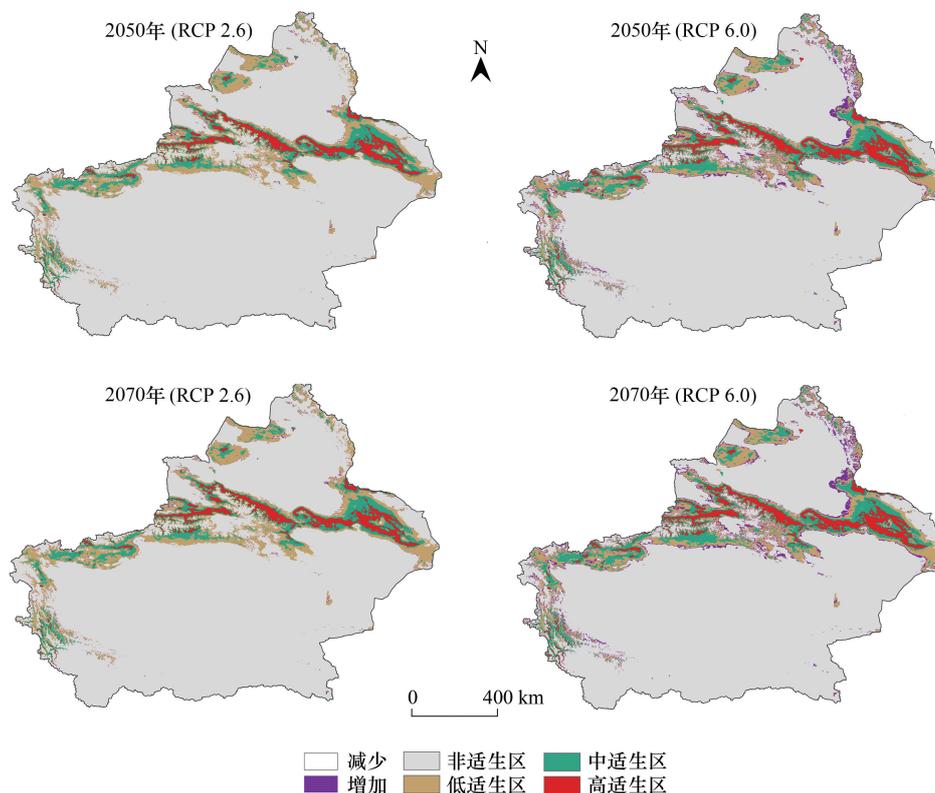


图 2 在 2050 和 2070 时段基于 RCP2.6 和 RCP6.0 情景预测的潜在分布范围和格局相对基准气候下的变化

Fig.2 Estimated change in predicted distribution range and patterns of *P. schrenkiana* in 2050 and 2070 according to scenarios RCP2.6 and RCP6.0 compared to the distributions under the reference climatic conditions

低适生区、中适生区和高适生区都基本保持相对稳定的变化趋势,但从 RCP2.6 到 RCP6.0 情景下表现出并不显著的增加趋势,增幅分别在 1.78%、1.26%和 0.98%左右。而非适生区在 RCP2.6 和 CP6.0 情景下也基本保持不变(表 4)。

不同时段及其气候变化情景下,适生分布区的重心(几何中心)定量描述了雪岭云杉适生分布区的变化

趋势。从基准气候到 2050 和 2070 时段的 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下,雪岭云杉适生分布区的重心总体上呈现出向高纬度、向东北迁移的趋势,但变化幅度不显著(图 3)。

表 4 不同气候下雪岭云杉非适生、适生、增加和减少面积占新疆面积的百分比/%

Table 4 Percentage of the unsuitable, suitable, new and lost area distributions of *P. schrenkiana* to the total areas of Xinjiang under different climate conditions

气候情景 Climate scenarios	适生等级 Suitable grade				增加 New	减少 Lost
	非适生区	低适生区	中适生区	高适生区		
	Unsuitable area	low suitable area	middle suitable area	high suitable area		
1970—2000	68.37	17.88	9.07	4.68	0	0
2050(RCP2.6)	67.77	17.94	9.38	4.91	0.78	0.08
2050(RCP6.0)	63.71	19.76	10.67	5.86	3.33	0
2070(RCP2.6)	67.76	17.92	9.42	4.89	1.52	0.01
2070(RCP6.0)	63.77	19.68	10.65	5.90	3.47	0

2.4 地理组间的生态位分化

基于 14 个环境因子的 PCA 分析解释了雪岭云杉分布点 72.3% 的气候变异,其第一主成分轴可解释 47.7% 的变异,PCA 分析表明雪岭云杉在南疆的气候生态位最广泛、北疆次之、东疆最窄,生态位分析表明雪岭云杉在北疆、南疆和东疆未发生明显的生态位分化(图 4)。但其生境还是存在一些差异,如东疆的生境更偏向温度温和(bio1)和极端温度(bio11 和 bio5)条件小的趋势。

3 讨论

预估雪岭云杉在新疆的潜在适宜分布,对于干旱区山地森林的生物多样性保护、水源涵养及可持续利用具有重要意义。在基准气候下,雪岭云杉在新疆的潜在分布与中国植物志中记载的分布范围和 2019 年秋季的 NDVI 植被覆盖范围基本一致,但在 NDVI 植被覆盖图中南疆的喀什、莎车、皮山、和田和于田等地,北疆的阿尔泰山南坡均表现出较高的覆盖度指数,前者与当地绿洲植被增加的人工干扰有关,后者与阿尔泰山地区其他树种的存在相关,如西伯利亚红松、西伯利亚云杉和西伯利亚冷杉等^[37]。

气候因子制约物种在区域尺度上的空间分布范围,其中水热条件对其起着主导作用^[38]。本研究通过 MaxEnt 生态位模型对潜在影响雪岭云杉分布的环境因子评估后,结果表明降水(最干月降水量、最冷季降水量和降水量变异系数)和温度(最干季平均温度、年温差、等温性和气温年较差)是影响雪岭云杉分布的主要环境因子。降水和温度通常在中大尺度空间上影响物种的地理分布范围和适生分布区,也是环境解释方面的重要参数^[39]。这与已有研究利用 MaxEnt 模型模拟青海云杉在祁连山的潜在分布及青海云杉和紫果云杉在青藏高原潜在分布的关键因子都是极端温度和降水一致^[40—41]。同时,本研究模拟表明土壤剖面有效含水量、土壤碳密度和海拔也成为影响其分布的环境因子之一。之前的部分大尺度物种分布模型中未考虑土壤因素,事实上土壤条件是影响物种分布的重要因子,土壤水分是植被生长的最主要水分来源、对植物的生长发育具有极其重要的影响作用^[42],土壤有机碳也直接关系到碳氮循环、水分储存和利用,其空间格局与物种多样性密切相关^[43]。此外,雪岭云杉主要分布在海拔 1200—3500 m 之间^[44],海拔也是影响其分布的主要因素之一。

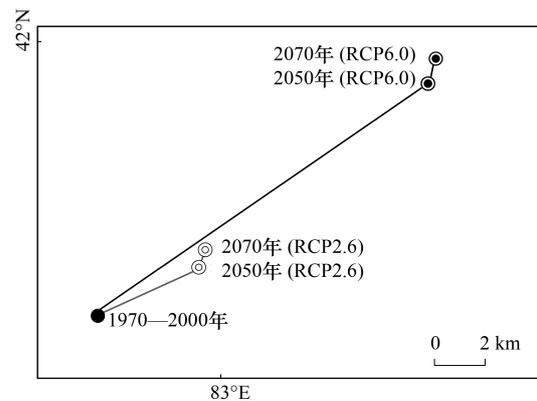


图 3 气候变化下雪岭云杉在适生分布区的重心及其移动轨迹

Fig. 3 Gravity center of suitable distribution areas and its moving trajectory of *P. schrenkiana* under climate change

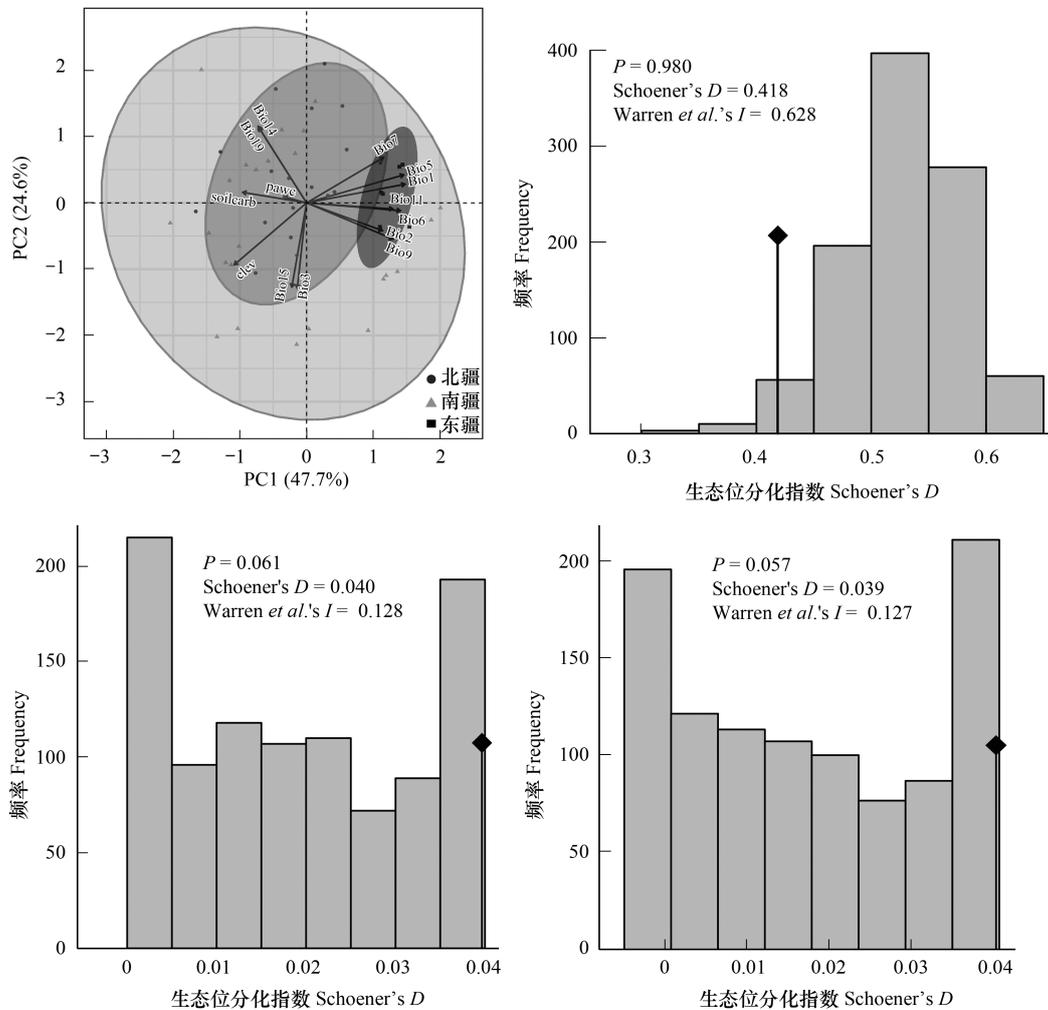


图 4 14 个环境因子的 PCA 分析及不同地理组间生态位分化的一致性检验

Fig.4 PCA analysis of 14 environmental factors and consistency test of niche differentiation among different geographical groups

PCA: 主成分分析

在未来气候变化背景下,雪岭云杉在 2050 和 2070 时段下的潜在分布范围均呈不显著的增加趋势,但 RCP6.0 情景下的扩增相比 RCP2.6 较显著。研究表明在一定范围内升高大气中 CO₂ 浓度,可促进陆地植物的生长^[45],说明中等浓度的 CO₂ 排放有利于雪岭云杉的生长。另一方面,在未来气候变化下,新增潜在分布区的阿尔泰山东部地区温度、降水呈现明显的增加趋势,巴里坤地区降水、温度增幅较小^[46],使雪岭云杉在新增潜在分布区的环境变化更有利于其生长有关。而雪岭云杉在天山南坡潜在适生分布区的零星减少,可能与未来气候变化下天山南部降水呈现减少、温度增加的趋势有关^[46]。同时,在未来气候变化下降水在潜在分布区虽呈增加趋势,但温度变化较为缓和且极端温度和降水对山地气候的影响并不显著^[46-47],可能使其在未来气候变化下的潜在适生分布区(低、中、高)变化较为稳定。雪岭云杉适生分布区的重心总体上呈现出向高纬度、向东北迁移的趋势,但变化幅度不显著,这与未来气候变化下物种趋向高海拔和高纬度地区迁移的研究相一致^[48]。

物种气候生态位是由多因素构成的气候空间中,物种所拥有的生态幅度^[49]。PCA 分析表明雪岭云杉在南疆的气候生态位最为泛、北疆次之、东疆最窄。这与雪岭云杉在南疆的天山南坡、西昆仑山和小帕米尔山地等地区的潜在地理分布范围大于北疆,且北疆大于东疆,加之天山南北存在的差异^[50],使得雪岭云杉在南疆的气候生态位最广泛。同时,生态位分析表明雪岭云杉在北疆、南疆和东疆未发生明显分化。一方面,与雪岭

云杉的海拔高度有关,在未来气候变化下,温度和降水的增加或减少对山地森林的影响并不显著^[47]。另一方面,雪岭云杉在不同海拔高度的种子库分布、生活力及种子质量等都存在差异^[51],加之局部地形条件的不利影响,也可能限制雪岭云杉的传播范围,导致生态位发生分化较为缓慢。

4 结论

本研究基于 MaxEnt 模型模拟结果表明降水、温度、土壤剖面有效含水量、土壤碳密度及海拔是影响雪岭云杉分布的主要环境因子;在未来气候变化下,雪岭云杉潜在适生分布区增加不显著,低、中、高适生区均保持相对稳定的变化,但其高适生区仍在天山南北两坡、伊犁河谷及哈密地区;潜在分布区重心呈不显著的向高纬度和东北方向迁移的趋势;生态位未发生明显分化且气候生态位南疆比北疆广泛。

参考文献 (References):

- [1] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] Tape K D, Christie K, Carroll G, O'Donnell J A. Novel wildlife in the Arctic: the influence of changing riparian ecosystems and shrub habitat expansion on snowshoe hares. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 208-219.
- [3] Williams P, Hannah L, Andelman S, Midgley G, Araújo M, Hughes G, Manne L, Martinez-Meyer E, Pearson R. Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the Cape Proteaceae. *Conservation Biology*, 2005, 19(4): 1063-1074.
- [4] Jiménez-Alfaro B, Draper D, Nogués-Bravo D. Modeling the potential area of occupancy at fine resolution may reduce uncertainty in species range estimates. *Biological Conservation*, 2012, 147(1): 190-196.
- [5] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [6] 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希. 氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性. *环境科学*, 2021, 42(1): 403-410.
- [7] Li D L, Yang Y, Yang S, Chen Y K. The complete chloroplast genome sequence of *Keteleeria hainanensis* (Pinaceae). *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, 4(2): 2934-2935.
- [8] 赵晶晶. 氮添加对新疆天山雪岭云杉细根生理生态特征的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [9] 宋昕妮, 许仲林, 李路, 常亚鹏, 罗庆辉. 雪岭云杉林土壤-叶片碳、氮化学计量特征对 NDVI 及环境因子的响应. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 69-76.
- [10] 王婷, 任海保, 马克平. 新疆中部天山雪岭云杉种群动态初步研究. *生态环境*, 2006, 15(3): 564-571.
- [11] 张绘芳, 张景路, 朱雅丽, 地力夏提·包尔汉, 高亚琪, 雷亚君. 天山西部天然乔木林空间分布与地形因子的定量关联. *新疆农业科学*, 2020, 57(1): 139-148.
- [12] 王慧杰. 天山雪岭云杉 8ha 森林动态监测样地的群落动态及其影响因素[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- [13] 罗庆辉, 徐泽源, 许仲林. 天山雪岭云杉林生物量估测及空间格局分析. *生态学报*, 2020, 40(15): 5288-5297.
- [14] 许文强, 杨辽, 陈曦, 高亚琪, 王蕾. 天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 364-373.
- [15] 张志东, 臧润国. 海南岛霸王岭热带天然林景观中主要木本植物关键种的潜在分布. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1079-1091.
- [16] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(11): 915-927.
- [17] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90-98.
- [18] 魏博, 马松梅, 宋佳, 贺凌云, 李晓辰. 新疆贝母潜在分布区域及生态适宜性预测. *生态学报*, 2019, 39(1): 228-234.
- [19] 方亦午, 刘乐乐, 郭恺, 陈先锋, 顾建锋. 基于 MaxEnt 的苹果根结线虫在中国的适生区预测. *植物检疫*, 2020, 34(5): 68-73.
- [20] Svenning J C, Skov F. The relative roles of environment and history as controls of tree species composition and richness in Europe. *Journal of Biogeography*, 2005, 32(6): 1019-1033.
- [21] Larson E R, Olden J D. Using avatar species to model the potential distribution of emerging invaders. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(11): 1114-1125.
- [22] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [23] 翟禹佳. 基于最大熵模型的食物网度和碳通量分布研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [24] 王国峥, 耿其芳, 肖孟阳, 张孟源, 张云燕, 王中生. 基于 4 种生态位模型的金钱松潜在适生区预测. *生态学报*, 2020, 40(17): 6096-6104.
- [25] 李利平, 贾秀红, 尹林克. 新疆植物分布区特征及其与气候和丰富度的关系. *中国科学: 生命科学*, 2017, 47(3): 314-324.
- [26] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 陈芸芝, 汪传建. 新疆生态质量变化趋势遥感分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2907-2919.

- [27] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 方修琦. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应. 地理学报, 2004, 59(6): 863-870.
- [28] 张绘芳, 高亚琪, 朱雅丽, 地力夏提·包尔汉, 李霞. 新疆雪岭杉生物量模型对比研究. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 52-58.
- [29] 陈峰, 尚华明, 袁玉江. 新疆东部雪岭云杉和胡杨树轮记录的干湿变化对比分析. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 34-40.
- [30] 张瑞波, 秦莉, 范子昂, 邹陈, 尚华明, 喻树龙, 张同文. 托什干河流域额河杨和雪岭云杉径向生长对环境的响应对比. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 41-46.
- [31] 张艳静, 于瑞德, 郑宏伟, 甘森, 杨美琳, 石冰冰. 天山东西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2149-2159.
- [32] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 何清, 张瑞波, 喻树龙, 陈峰. 开都河中游地区雪岭云杉林上下限树轮宽度对比及其气候响应分析. 干旱区地理, 2013, 36(4): 680-690.
- [33] 彭正兵, 李新建, 张瑞波, 秦莉, 张合理, 陈友平, 刘蕊. 不同趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应. 生态学报, 2019, 39(5): 1595-1604.
- [34] 岳茂峰, 冯莉, 崔焯, 张纯, 田兴山. 基于 MaxEnt 模型的入侵植物白花鬼针草的分布预测及适生性分析. 生物安全学报, 2016, 25(3): 222-228.
- [35] Warren D L, Glor R E, Turelli M. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. Ecography, 2010, 33(3): 607-611.
- [36] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 1997, 24(1): 38-49.
- [37] 郎峰峰. 新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松林分生长特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [38] Schofield C J. Biogeography: an ecological and evolutionary approach (6th edn) by C. Barry Cox and Peter D. Moore. Parasitology Today, 2000, 16(9): 406.
- [39] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.
- [40] Xu Z L, Zhao C Y, Feng Z D. A study of the impact of climate change on the potential distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 278-285.
- [41] 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.
- [42] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [43] 肖安序. 亚高山不同植被土壤有机碳、氮素及其影响因素研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [44] 吴燕良, 甘森, 于瑞德, 杨美琳, 郭艳飞, 赵鹏. 基于树轮生理模型的雪岭云杉径向生长的模拟研究. 干旱区地理, 2020, 43(1): 64-71.
- [45] 崔桂莲. CO₂浓度升高和温度上升对斜生栅藻诱导型防御的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [46] 李兰海, 白磊, 姚亚楠, 杨青. 基于 IPCC 情景下新疆地区未来气候变化的预估. 资源科学, 2012, 34(4): 602-612.
- [47] 王政琪, 高学杰, 童尧, 韩振宇, 徐影. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估. 大气科学, 2021, 45(2): 407-423.
- [48] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, De Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.
- [49] Coulleri J P, Simelane D O, Mawela K, Ferrucci M S. Climatic niche dynamics of three widespread *Cardiospermum* (Paullinieae, Sapindaceae) species revealed possible dispersal pathways. Systematic Botany, 2020, 45(4): 879-890.
- [50] 张连成, 胡列群, 李帅, 侯小刚. 基于 GIS 的天山南北坡雪线分布特征及其影响因素分析. 水土保持研究, 2015, 22(3): 259-263.
- [51] 李华东. 天山云杉林土壤种子库年际变化与海拔梯度分布格局研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.