

基于MaxEnt模型的云杉潜在分布模拟

苏玉良, 赵伊玲, 殷宝, 宁春如, 张晓玮*

甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月15日; 发布日期: 2024年11月22日

摘要

目的: 云杉(*Picea asperata* Mast.)作为中国西秦岭、横断山区、四川盆地及其边缘地区的主要建群树种, 在维系地区生态平衡、水土保持以及林木资源供给等方面具有重要作用。方法: 本研究基于40个云杉自然分布样点, 利用最大熵模型(MaxEnt)探究云杉在主要气候因子影响下的潜在适宜分布区。结果: MaxEnt模型的潜在分布模拟结果具有极高精确度, 所有模型的AUC值均大于0.99; 气候因子响应曲线表明温度(温度季节性变化)是限制云杉分布的主导因子; 经过模拟得到的云杉潜在分布区范围约46.79万km², 高适生区面积为3.05万km², 中适生区面积为8.93万km², 低适生区面积为34.81万km²。结论: 云杉高适生区的精确预测可为森林管理提供针对性的保护和种植策略, 建议在高适生区将云杉种植作为生态恢复和造林项目的主要树种。

关键词

最大熵(MaxEnt)模型, 云杉(*Picea asperata* Mast.), 潜在分布, 主导环境因子

Potential Distribution Simulation of *Picea asperata* Based on MaxEnt Model

Yuliang Su, Yiling Zhao, Bao Yin, Chunru Ning, Xiaowei Zhang*

College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 15th, 2024; published: Nov. 22nd, 2024

Abstract

Objective: *Picea asperata* Mast. is the main constructive tree species in the western Qinling Mountains, Hengduan Mountains, Sichuan Basin and its marginal areas in China. It plays an important role in maintaining regional ecological balance, soil and water conservation, forest resources supply and so

*通讯作者。

文章引用: 苏玉良, 赵伊玲, 殷宝, 宁春如, 张晓玮. 基于 MaxEnt 模型的云杉潜在分布模拟[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6211-6219. DOI: 10.12677/mos.2024.136569

on. Method: Based on the natural distribution of 40 *P. asperata* samples, the maximum entropy model (MaxEnt) was used to explore the potential suitable distribution area of *P. asperata* under the influence of main climatic factors. **Result:** The results showed that the potential distribution simulation of MaxEnt model had extremely high accuracy, and the AUC values of all models were greater than 0.99. The response curve of climatic factors showed that temperature (seasonal variation of temperature) was the dominant factor limiting the distribution of *P. asperata*. The potential distribution area of *P. asperata* obtained by simulation was about 467,900 km², the high suitable area was 30,500 km², the medium suitable area was 89,300 km², and the low suitable area was 348,100 km². **Conclusion:** The accurate prediction of *P. asperata* at high suitable area can provide targeted protection and planting strategies for forest management. It is suggested that *P. asperata* planting should be the main tree species for ecological restoration and afforestation projects at high suitable area.

Keywords

Maximum Entropy (MaxEnt) Model, *Picea asperata* Mast., Potential Distribution, Dominant Environmental Factors

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

云杉(*Picea asperata* Mast.)隶属于松科(Pinaceae)云杉属(*Picea*), 是一种中国特有的常绿乔木。主要分布于我国西秦岭、横断山区、四川盆地及其周边地区, 海拔介于 1800 至 4000 米之间[1]。云杉因其独特的生物学和生态学特性, 在生态系统服务、林业资源可持续利用、生物多样性保护、环境修复等方面具有重要价值[2], 是高海拔脆弱生态地区主要的优质造林树种[3] [4]。目前对云杉的研究主要集中在育苗造林[5]、病虫害防治[6]、生态化学计量特征研究[7]等。然而受气候变化、人类活动、生境破碎化加剧等影响[8], 导致云杉生长区域缩减, 林分质量下降, 严重威胁到地区生态系统的稳定性和生物多样性[9]。研究表明, 四川盆地以及川西高原等地区在 2000~2015 年降水减少、气温增加, 气候变化对植被覆盖度变化产生明显抑制作用的地区占到总研究区面积的 12.22% [10], 主要分布在川西高原和山地区域。云杉作为高海拔地区主要造林树种, 研究限制云杉分布的主要气候因子, 并模拟云杉的潜在地理分布, 有利于云杉在林业生态工程和地区生态恢复建设中的合理种植和推广。

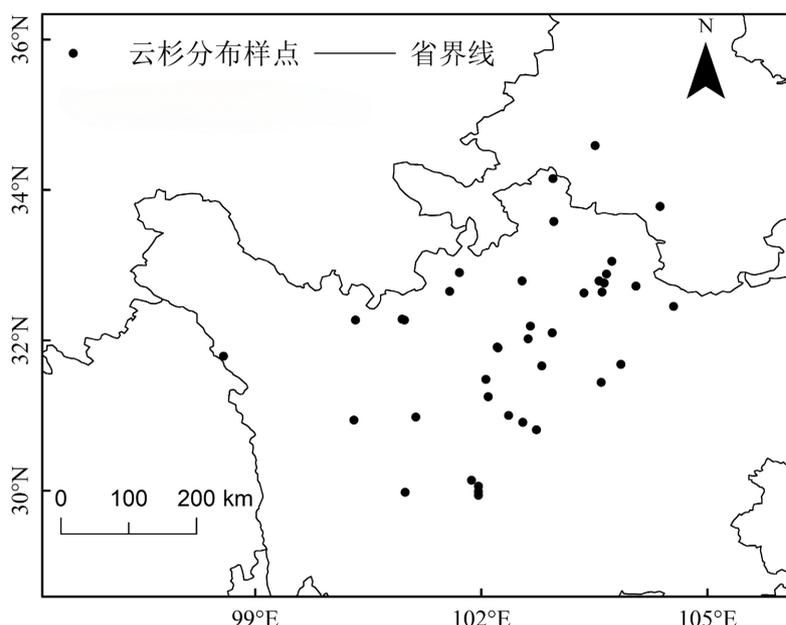
物种分布模型(Species Distribution Model, SDM)是物种分布预测的重要方法[11], 该原理以生态位理论为基础, 通过整合物种出现点数据和生态环境变量, 采用数学和统计方法预测物种在地理空间上的分布概率, 从而预测物种潜在分布区域的生态位模型[12]。物种分布模型的选取要与研究物种的特性相结合, 目前主要有最大熵模型(MaxEnt)、生物气候分析系统(BIOCLIM)、生态位因子分析模型(ENFA)、分类与回归树模型(CART)等[13]。与其它物种分布模型相比, MaxEnt 模型灵活性高, 处理非线性关系的能力强, 在数据有限的情况下, 预测结果直观[14]。已被广泛应用于生态环境修复、入侵物种分布模拟、动物适生环境预测、病虫害适生区预测研究等。

本研究拟利用野外采集分布点数据, 基于气候相似性原理, 利用最大熵模型, 绘制影响云杉生长的主要环境因子的响应曲线, 探讨限制云杉分布的主要气候因子, 模拟当前气候条件下云杉的潜在分布面积, 以期为云杉的合理种植和生态修复提供科学依据。

2. 数据来源与分析

2.1. 云杉现有地理分布数据的收集

获取云杉的地理分布数据渠道主要有以下几方面：1) 中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>), 通过云杉拉丁名进行主要检索；2) 中国国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)；3) 教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/list/locality>), 搜寻云杉的已有记录标本样点, 获得较为明确样点的经纬度坐标, 确保样点分布可以覆盖所有主要的生态区和地形, 减少由于人类活动如林业、农业等造成的干扰, 获得较为明确样点的经纬度坐标, 将 40 个地理分布点标记为现有云杉分布区域, 如图 1 所示。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Distribution of *P. asperata* Mast sampling points

图 1. 云杉采样点分布

2.2. 气候数据的获取

气候环境数据来源于 WorldClim (<https://worldclim.org/>)提供的最新数据。该网站于 2020 年 1 月更新了与降雨和温度(1970~2000 年)有关的 19 个生物气候变量(表 1)。将以上 19 个通用格式的生物气候变量数据转换为 ASCII 格式文件, 直接导入 MaxEnt 软件。

Table 1. Climate variable data

表 1. 气候变量数据

数据图层编号	数据说明	环境变量	数据说明
bio01	年均温(°C)	bio10	最暖季均温(°C)
bio02	月均温度变幅(°C)	bio11	最冷季均温(°C)
bio08	最湿季均温(°C)	bio12	年降雨(mm)
bio03	等温性(%)	bio13	最湿月降雨(mm)

续表

bio04	温度季节性变化	bio14	最干月降雨(mm)
bio05	最暖月最高温度(°C)	bio15	降雨季节性变化
bio06	最冷月最低温度(°C)	bio16	最湿季降雨(mm)
bio07	温度年变幅(°C)	bio17	最干季降雨(mm)
bio08	最湿季均温(°C)	bio18	最暖季降雨(mm)
bio09	最干季均温(°C)	bio19	最冷季降雨(mm)

2.3. 潜在分布区模拟

本研究使用最大熵模型 MaxEnt 软件, 将筛选出的 40 处云杉样 75% 的分布点作为训练数据, 25% 作为测试集进行模型检验, 然后绘制受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)进行评估。采用 ROC 曲线下方面积(area under the ROC curve, AUC)对其模拟结果的精确度进行评估, AUC 取值范围为[0~1.0], AUC 值越大, 模型的可信度越高。值于 0.5~0.7 表示模型预测精度较差, 值于 0.7~0.9 表示一般, 值大于 0.9 时说明预测精度较好。利用 MaxEnt 软件中的刀切法(Jackknife), 自动生成环境变量贡献率来检验不同环境变量限制云杉地理分布的重要性大小。环境变量贡献率表示在模型迭代过程中, 对模拟位点拟合的结果, 贡献率越高表明环境因子限制天山云杉地理分布的重要性越大。

基于 MaxEnt 软件生成的阈值, 利用 ArcGIS 软件中自然断点法将云杉当前时期的适宜分布划分为 4 个等级: 不适区(<0.10)、低适区(0.10~0.30)、中适区(0.30~0.60)、高适区(>0.60)。将其云杉地理信息导入世界标准地图, 比较预测云杉适宜分布区与其现实分布区的一致性, 检验其模拟结果可信度。采用 ArcGIS 融合工具统计计算其云杉适宜分布区面积。

3. 结果与分析

3.1. 模拟预测精度评价

基于云杉全分布范围内共 40 个样本, 以随机选取的 10 个训练样本为例在 MaxEnt 构建模型。根据结果显示, 其训练集 AUC 值为 0.998, 测试集 AUC 值为 0.999, 训练集和测试集均大于 0.9, 并明显大于随机预测分布模型的 AUC 值, 根据 AUC 的评估标准, 本研究预测模型的准确度达到较高的标准, 由图 2 所示的测试集 AUC 训练数据是最大的一次, 表明 MaxEnt 模型模拟所得到云杉潜在分布区具有极高的准确性。

3.2. 影响云杉分布的主导因子

在 MaxEnt 模型运行过程中自动生成的各因子贡献率见表 2。由表 2 可知, 贡献率排名前六的气候因子分别为: 温度季节性变化(bio04)为 27.9%, 其贡献率最高, 其次是年降雨(bio12)为 15.4%、最湿季均温(bio08)为 12.6%、等温性(bio03)为 8.9%、最干月降雨(bio14)为 7.7%、最冷季降雨(bio19)为 7.1%, 以上六个环境变量累积贡献率达到 79.6%, 对云杉的潜在分布具有重要影响。其中温度变量(bio04、bio08、bio03)累积贡献率为 49.4%, 降水变量(bio12、bio14、bio19)累积贡献率为 30.2%, 说明温度是影响云杉的主要气候因子。

3.3. 云杉分布区的气候特征

图 3 为 6 个主要气候因子对云杉适生度的响应曲线, 可以发现当植物的存在概率大于 0.60 时, 对应

环境因子最适合植物生长, 结果显示年降雨为 698~773 mm、最干月降雨为 6.4~9.6 mm、最冷季降雨为 19.7~41.3 mm、等温性>39.1%、最湿季均温为 9.2℃~12.7℃时最适合云杉生长, 温度季节性变化为 623.2~701.5, 云杉的存在概率最大。

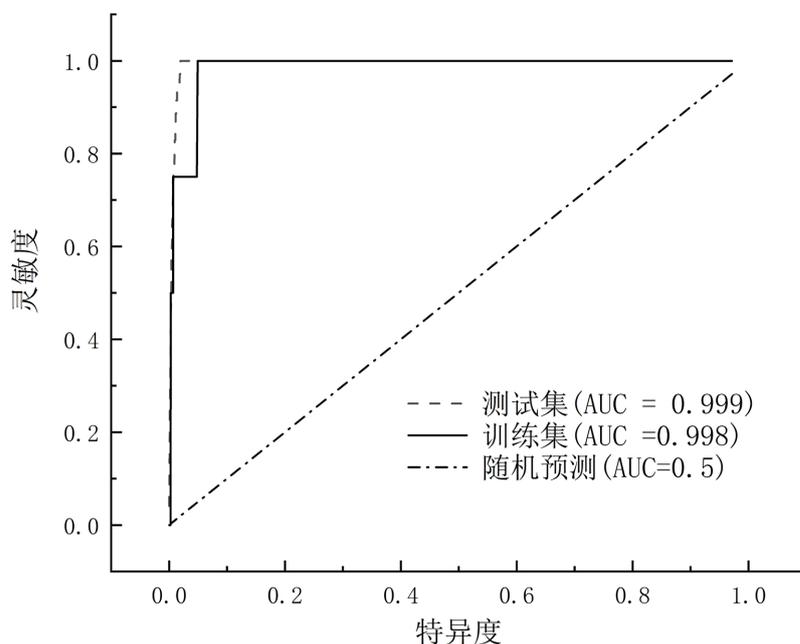


Figure 2. (ROC) curve for predicting the potential distribution of *P. asperata* based on MaxEnt model
图 2. 基于 MaxEnt 模型预测云杉潜在分布的受试者工作特征曲线(ROC)曲线

Table 2. Current environmental variables and their contribution rates
表 2. 当前环境变量及其贡献率

环境变量	描述	贡献率%	环境变量	描述	贡献率%
bio04	温度季节性变化	27.9	bio15	降雨季节性变化	2.3
bio12	年降雨(mm)	15.4	bio06	最冷月最低温度(℃)	1.8
bio08	最湿季均温(℃)	12.6	bio02	月均温度变幅(℃)	0.4
bio03	等温性(%)	8.9	bio01	年均温(℃)	0.2
bio14	最干月降雨(mm)	7.7	bio05	最暖月最高温度(℃)	0.1
bio19	最冷季降雨(mm)	7.1	bio09	最干季均温(℃)	0
bio11	最冷季均温(℃)	6.1	bio13	最湿月降雨(mm)	0
bio10	最暖季均温(℃)	3.8	bio17	最干季降雨(mm)	0
bio07	温度年变幅(℃)	3.2	bio18	最暖季降雨(mm)	0
bio16	最湿季降雨(mm)	2.6			

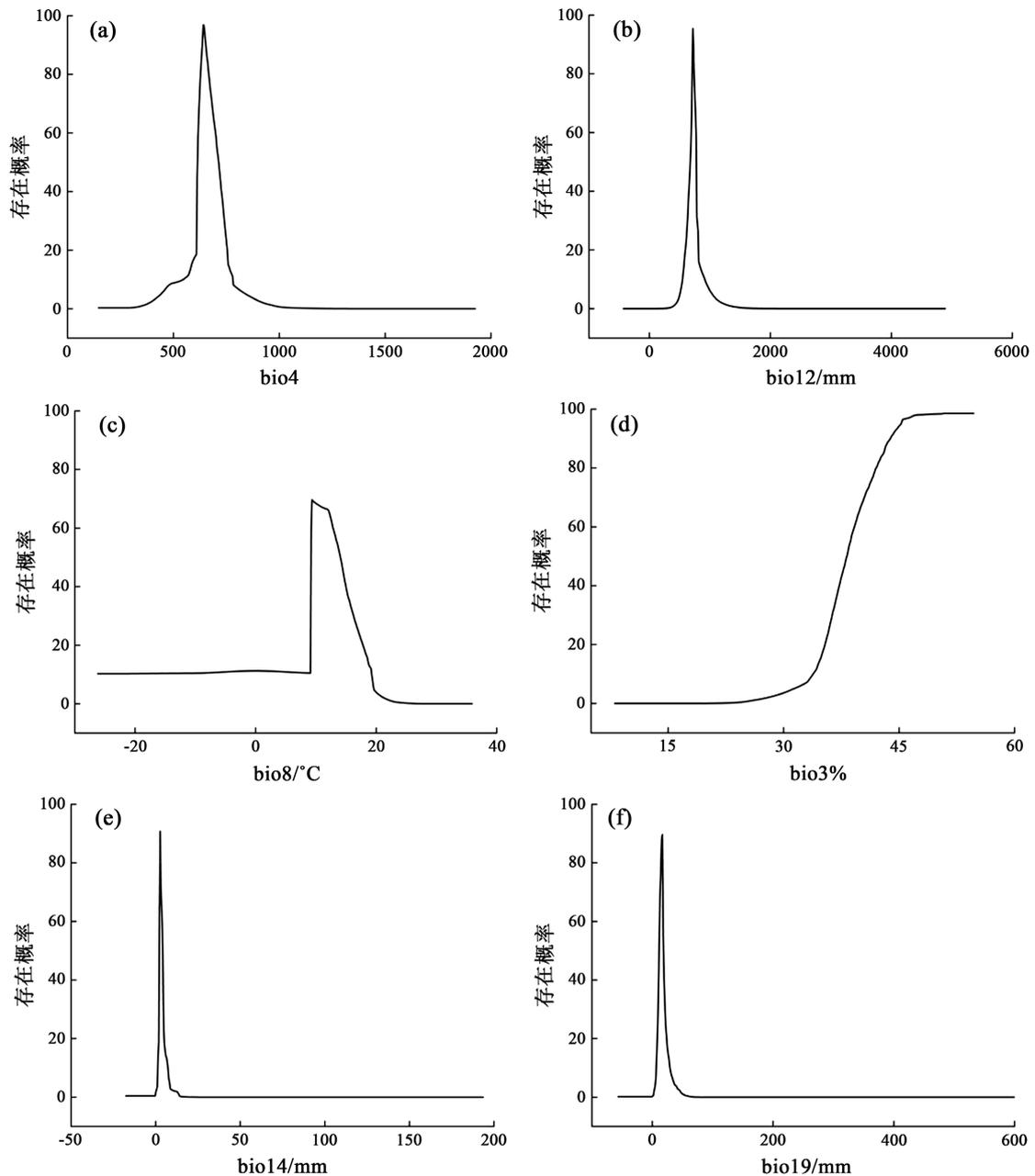
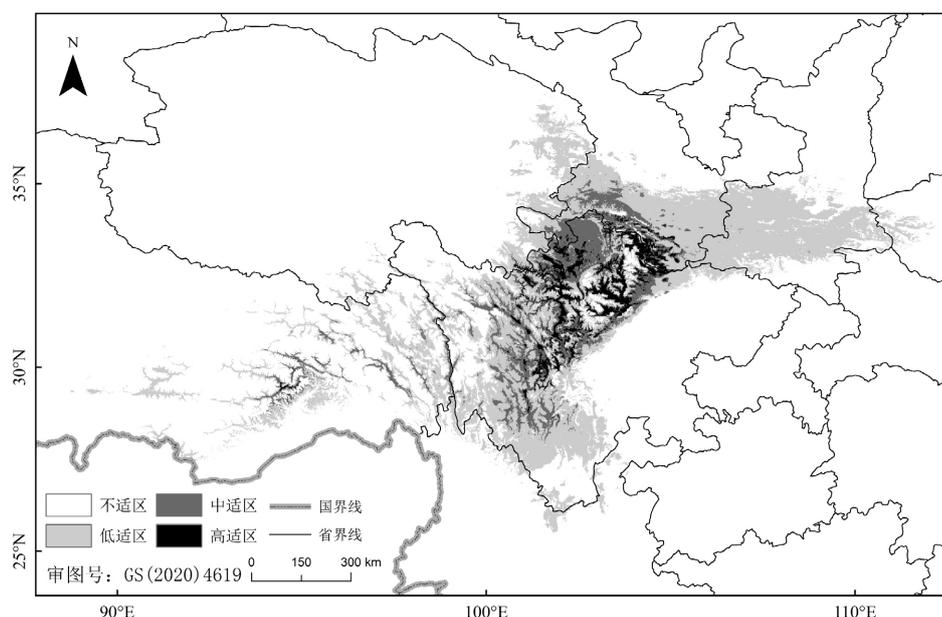


Figure 3. The probability response curve of the main climatic factors affecting the distribution of *P. asperata*
图 3. 影响云杉分布的主要气候因子存在概率响应曲线

3.4. 云杉在我国的潜在分布区及适宜性评价

图 4 是基于 MaxEnt 模型预测的云杉潜在分布区面积,其中高适生区主要位于我国四川大部分地区,以及甘肃南部和西藏也有小范围分布,面积约为 3.05 万 km² (表 3)。

中适生区主要位于四川中部、西部及北部、西藏东部、甘肃东南部及西南部、陕西少量分布,面积约为 8.93 万 km² (表 3); 低适生区主要位于四川南部及西部、甘肃东南部分地区、青海东部及南部、陕西南部(秦岭)少量地区波及,以及云南、西藏少部分地区均有适生区分布,面积约为 34.81 万 km² (表 3)。除以上地区以外,本研究范围内的其他地区为云杉生长低适生区,不适宜云杉生长。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. Potential distribution of *P. asperata* in China predicted by MaxEnt model

图 4. 基于 MaxEnt 模型预测的云杉潜在分布示意图

Table 3. Area of potential distribution area of *P. asperata*

表 3. 云杉的潜在分布适生区面积

等级	高适生区	中适生区	低适生区
模拟面积/km ²	3.05×10^4	8.93×10^4	34.81×10^4

4. 讨论

MaxEnt 模型已被广泛应用于生态学、生物地理学、保护生物学等领域, 通过 MaxEnt 生态位模型结合环境变量进行分析, 从而推算物种的生态需求和模拟物种的潜在分布[15]。总体而言, 样点数量以及空间分布都会影响模型预测的结果, 一般样点数量与模拟结果准确度成正比。但有研究表明 MaxEnt 模型在小样本量模拟过程中能够抵消过度拟合的趋势, 其预测结果也有高准确性[16], 这是因为物种的地理分布受多种环境因素影响。同时, 样本点在空间上的分布差异也会影响模拟的结果。本研究利用 MaxEnt 模型模拟了云杉在我国的潜在分布区, 结果表明, AUC 值(训练集和测试集数据)均大于 0.9, 表明其预测结果较好, 同时也说明本研究对云杉分布的模拟结果精度较高。

物种分布受多种因素共同影响, 在宏观尺度的研究中, 气候往往成为影响物种分布的主导因子[17]。物种响应曲线阐述了环境因子与物种出现概率间的关联性[18], 显现出物种对其分布范围内环境条件的耐受能力, 结果表明影响云杉分布的主要气候因子为温度季节性变化、最湿季均温、等温性、年降雨、最干月降雨、最冷季降雨, 其中最主要的气候因子是温度。云杉多生长于高山、亚高山地区的阴坡和半阴坡, 生长条件偏温凉[19], 其生长过程与温度的波动密切相关[20]。温度通过影响植物光合作用、呼吸作用等生理过程, 限制植物的生长、发育与种子的成熟和萌发[21], 高温会导致植物光合作用受阻[22]、生理代谢异常[23]、水分胁迫[24]等, 从而影响植物生长分布; 低温对云杉从细胞到组织、器官以及整个植物个体生长速率和生殖能力等方面都有不良影响[25], 抑制植物生长, 导致植物存活率下降。如冻害作

用,低温会导致植物细胞内的水分结冰,造成细胞壁破裂和细胞膜受损[26],从而引发组织坏死和植株死亡。以及在低温环境下,土壤中的营养元素的有效性通常会下降[27],限制云杉的根系吸收营养的能力,影响其生长发育。这种温度敏感性成为限定其分布范围的一个主要因子[28]。因此温度季节性变化要求云杉必须能够适应低温条件,这通过增强细胞抗冻性,减少细胞内水分的冻结损伤等机制实现[29]。这种抗寒能力使云杉能够在寒带和部分高山地区成功生存和繁衍[30]。是造成云杉对高寒地区具有独特适应性的重要原因。

本研究表明,当前气候条件下,云杉的潜在分布区位于四川中部和西部及北部、西藏东部少量分布、甘肃东南部及西南部、青海东部及南部、陕西南部(秦岭)少量的分布。但预测生成的分布区大于云杉实际分布,原因可能是云杉抗逆性较差,极易受到病虫害威胁和干扰,气候变暖为一些病虫害提供适宜生存环境。如虫蛹在过冬时,因气温升高、土壤湿润,提高了害虫的成活率,导致来年虫害概率升高[31],限制云杉生长分布。本文着重探讨物种分布格局响应气候变化的关系,尚未考虑海拔、坡向、等地理空间因素[32]。物种的现实分布受到多重因素影响,如种内种间关系[33]、种子传播条件[34]、人类活动[35]等都可能造成预测的潜在分布区域大于实际生长区域的结果。尽管如此,根据 MaxEnt 模型得出的云杉潜在适宜分布区均具有气候相似性的特点,表明云杉具有较高的恢复能力,可为上述地区的生态保护、树种栽培等提供理论依据。

5. 结论

本文通过最大熵模型结合 ArcGIS 等工具对云杉的潜在分区进行模拟,影响云杉分布的主要气候因子为温度和降雨,适宜云杉生长的温度季节性变化、最湿季均温、年降雨、最干月降雨的阈值分别为 623.2~701.5、9.2°C~12.7°C、698~773 mm、6.4~9.6 mm。云杉高适生区主要集中于我国四川大部分地区,甘肃南部及西藏也有少量分布,建议在云杉高适生区内建立自然保护区,为云杉提供更好的保护条件。对于云杉中低适生区,如四川中部、西部及北部、甘肃东南部分地区、青海东部及南部、陕西南部,以及云南、西藏少部分地区应维系好当地生态系统平衡,确保在未来气候变化的负面影响下云杉适生区面积不再缩减。

基金项目

国家自然科学基金项目(31860197)。

参考文献

- [1] 苏宇, 吴世磊, 贺维, 等. 弓杠岭不同海拔云杉细根生物量及形态特征[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 138-144.
- [2] 王亚, 王军辉, 王福德, 等. 末次间冰期以来及未来气候情景下红皮云杉适生分布区模拟[J]. 林业科学, 2023, 59(12): 1-12.
- [3] 申静霞, 袁秀锦, 李迈和, 等. 土壤温度和水分变化对川西云杉幼苗氮和磷含量的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 31-41.
- [4] 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, 23(2): 63-69.
- [5] 杨慧珍. 云杉的育苗技术[J]. 林业经济, 2016, 38(7): 98-102.
- [6] 吴文君. 川西云杉育苗造林技术[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(2): 139-140+155.
- [7] 冬克尔. 甘肃祁连山自然保护区青海云杉常见病虫害防治技术[J]. 现代园艺, 2023, 46(22): 76-78.
- [8] 吴贤忠, 李毅, 张世才, 等. 甘南高原城市面山绿化林土壤生态化学计量特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(6): 145-154.
- [9] Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. and Courchamp, F. (2012) Impacts of Climate Change on the Future of Biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>

- [10] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 气候变化与人类活动在四川植被覆盖度变化中的相对作用[J]. 西部林业科学, 2022, 51(6): 8-16.
- [11] 张殷波, 刘彦岚, 张晓龙, 等. 气候变化对文冠果适宜生境及空间迁移的影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4597-4606.
- [12] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [13] 吴艳, 王洪峰, 穆立蕾. 物种分布模型的研究进展与展望[J]. 高师理科学刊, 2022, 42(5): 66-70.
- [14] Low, B.W., Zeng, Y., Tan, H.H. and Yeo, D.C.J. (2020) Predictor Complexity and Feature Selection Affect Maxent Model Transferability: Evidence from Global Freshwater Invasive Species. *Diversity and Distributions*, 27, 497-511. <https://doi.org/10.1111/ddi.13211>
- [15] 赵晓同, 巩娟霄, 赵莎莎, 等. 样本量及其空间分布对物种分布模型的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 208-215.
- [16] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [17] 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.
- [18] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [19] 郭滨德. 川西高原不同坡向和海拔云冷杉树轮对气候变化的响应差异[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [20] 韩超, 申海玉, 刘庆. 云杉种子萌发和幼苗生长对气候变暖与 UV-B 辐射增强的响应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(8): 1632-1638.
- [21] 康淑媛, 杨保. 甘肃省南部两种云杉树种树木径向生长对气候因子的响应[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 619-625.
- [22] 欧阳芳群, 崔夏, 张辉, 邓军育, 等. 不同温度和胁迫时长下蓝云杉的光合响应[J]. 林业科学研究, 2024, 37(2): 60-71.
- [23] 赵志江, 康东伟, 李俊清. 川西亚高山不同年龄紫果云杉径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 173-179.
- [24] 王瑛, 胡晓清. 水分胁迫对云杉生理特性的影响[J]. 绿色科技, 2023, 25(13): 163-166.
- [25] 张兆涵, 范梓晗, 焦蕊, 等. 低温胁迫下林木的生理响应特征[J]. 温带林业研究, 2024, 7(1): 38-41+46.
- [26] 陈思琪, 孙敬爽, 麻文俊, 等. 植物低温胁迫调控机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(17): 51-61.
- [27] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1083-1094.
- [28] 李贺, 张维康, 王国宏. 中国云杉林的地理分布与气候因子间的关系[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 372-381.
- [29] 成京晋, 李浩, 早浩龙, 等. 植物响应低温胁迫的分子调控机制[J]. 分子植物育种, 2021, 19(9): 3104-3115.
- [30] 连娥, 赵栋, 陈蓉, 等. 温度对青海云杉种子萌发特征的影响[J]. 现代园艺, 2020, 43(16): 3-4.
- [31] 陈浩功, 陈启伟. 祁连山国家级自然保护区云杉常见病虫害及其综合防治技术[J]. 南方农业, 2023, 17(8): 80-82.
- [32] 裴薇薇, 王新, 王云英, 等. 祁连山区青海云杉林生长季水热通量特征及影响因素解析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 144-150.
- [33] 刘卫敏, 南宏伟, 扬帆, 等. 草本竞争对云杉更新苗叶片生物量和形态特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(6): 19-25.
- [34] 吕东, 张宏斌, 李秉新, 等. 青海云杉无性系开花特性及种子园花粉流时空变化[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(3): 68-73.
- [35] 曾蒙秀. 四川西部晚冰期以来植被和气候变化及其对人类活动的影响[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.