

DOI: 10.5846/stxb201809151999

曹雪萍,王婧如,鲁松松,张晓玮.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.生态学报,2019,39(14): - .

Cao X P, Wang J R, Lu S S, Zhang X W. Simulation of the potential distribution patterns of *Picea crassifolia* in climate change scenarios based on the maximum entropy (Maxent) model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

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

曹雪萍¹, 王婧如², 鲁松松¹, 张晓玮^{1,*}

¹ 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

² 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000

摘要:青海云杉(*Picea crassifolia*)是我国青藏高原东北缘特有树种,在维系我国西北地区生态平衡、水土保持、水源涵养和生物多样性等方面发挥着重要作用。基于其分布范围内的 69 个地理分布样点,利用最大熵(Maxent)模型对现实气候条件下青海云杉的潜在分布及其分布的主导气候因子进行分析,同时结合 3 种大气环流模型模拟青海云杉在 3 种气候变化情景(温室气候排放量不同)下未来 2050s 和 2080s 潜在分布区的变化。结果表明:Maxent 模型对青海云杉潜在分布区的预测具有极高的准确度,所有模型的平均受试者工作特征曲线下面积(AUC 测试值)均高于 0.99;Jackknife 检验和气候因子响应曲线表明年最低降雨量是限制青海云杉分布的主导因子;当前青海云杉的潜在分布区主要集中于青海东部、甘肃东南部、宁夏大部分地区、西藏东部、四川西部山区以及陕西、新疆和内蒙古部分地区。在未来 3 种增温情景下,青海云杉在 2050s 和 2080s 的潜在分布总面积与当前相比变化不明显,但不同适生等级的潜在分布面积变化较大,其中,中度适生区和低度适生区受气候增温影响显著,中度增温下这些区域在 2080s 的面积明显增大,而高度适生区(核心分布)则在所有增温情景下均呈缩小趋势。同时,在未来 3 种增温情景下,青海云杉在 2050s 和 2080s 的潜在分布区有向北移动趋势,但其心分布区域(高度适生区)仍然以青海东部、甘肃北部为主,无明显变迁趋势。从气候因素角度考虑,本研究表明未来气候变化情景下,青海云杉依然在西部高山地区,特别是作为我国重要生态屏障的祁连山、贺兰山等山区具有重要的经济价值并将持续其生态服务功能。

关键词:最大熵(Maxent)模型;青海云杉;潜在分布区;气候变化

Simulation of the potential distribution patterns of *Picea crassifolia* in climate change scenarios based on the maximum entropy (Maxent) model

CAO Xueping¹, WANG Jingru², LU Songsong¹, ZHANG Xiaowei^{1,*}

¹ Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

² School of Life Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) is the endemic tree species in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) in China. It plays an important role in maintaining ecological balance, biodiversity, and soil and water conservation in northwestern China. In this study, the current potential distribution of Qinghai spruce and its dominant climatic factors were analyzed firstly based on 69 distributional records via the maximum entropy model (Maxent). Then the distribution patterns of Qinghai spruce under three climate change scenarios (i.e., the lowest, a moderate, and the highest greenhouse gas emission scenarios; RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) with three general atmospheric circulation models were predicted by Maxent for two future decades: the 2050s and 2080s. The results showed that the accuracy of the Maxent

基金项目:甘肃农业大学公招博士科研启动基金(GSAU-RCZX01707);甘肃农业大学学科建设专项基金(GAU-XKJS-2018-099)

收稿日期:2018-09-15; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxw@gasu.edu.cn

model was pretty high for modeling potential distribution regions of Qinghai spruce, and the average values of the area under the receiver operator characteristic curve (AUC) were higher than 0.99. The results from the Jackknife test and climate factor response curves revealed that the annual lowest precipitation is the key factor that limited the distribution of Qinghai spruce; the current potential distribution regions of Qinghai spruce are mainly concentrated in eastern Qinghai, southeastern Gansu, most of Ningxia, eastern Tibet, mountainous areas of western Sichuan, and parts of Shaanxi, Xinjiang, and Inner Mongolia. The total potential distribution area of Qinghai spruce in the 2050s and 2080s was changed little compared to the current distribution in all three scenarios, but its potential distribution area at different levels of fitness was changed a lot. Among them, the regions with fitness of less than 0.1 and in the range of 0.1—0.3 were significantly affected by the climate changes, and their area was largely increased in the medium emission scenario. In contrast, the regions with fitness in the range of 0.5—0.8 were shrunk in all scenarios. At the same time, the distribution patterns of Qinghai spruce in the 2050s and 2080s had a tendency to move northward in all scenarios, whereas its central distributional regions (more suitable regions) were still kept in eastern Qinghai and northern Gansu, with no obvious trend to change. From the perspective of climatic factors, this study showed that Qinghai spruce would continue to have important economic values and ecological service functions in the western mountains, especially in the Qilian Mountains and Helan Mountains, which are the important ecological barriers in China.

Key Words: maximum entropy (Maxent) model; *Picea crassifolia*; the potential distribution; climate change

青海云杉(*Picea crassifolia*)为松科云杉属多年生常绿针叶乔木,是我国青藏高原东北缘特有树种,主要分布于中国甘肃、宁夏、内蒙古、青海等海拔 1600—3800 米地带^[1]。青海云杉因其树形高大通直,材质轻软、纹理直、有弹性,是重要的工业用材,同时其抗旱性较强,生长迅速,是青海东部、甘肃北部山区和祁连山区优良的造林树种^[2-3]。贺兰山区是青海云杉的遗传多样性中心,而其分布中心主要位于祁连山北坡^[4]。在祁连山北坡青海云杉多呈带状、块状与草原镶嵌形成森林—草原复合生态系统。上述山区是我国西北地区重要的生态安全屏障,作为其森林的优势树种,青海云杉在维系我国西北地区生态平衡、水土保持、水源涵养和生物多样性等方面发挥着重要作用^[5-8]。目前的研究主要集中在青海云杉生理学、生态学、育苗造林、病虫害防治,以及青海云杉林的林学特征、水源涵养和生态效益等领域^[9-11],但对该物种地理分布格局的研究主要集中于祁连山地区^[8,12-13],而未见有关该物种整体分布区的相关模拟研究。且有关研究表明,祁连山中部正处于相对干旱和相对高温时期,并呈现出向暖干化发展的趋势^[14],而降水减少和气候变暖均会严重影响青海云杉的生长^[15-17]。

植物地理分布是由气候、水文、土壤、人类活动等多种因素长期共同作用的结果,其中,气候是决定植物在区域尺度上地理分布的最主要因素^[18-20]。通过研究气候与物种分布的关系,可找出影响物种分布的主导因子,可探索物种分布形成的原因、确定物种的潜在分布区以及分析未来气候变化下物种分布区的变化情况,因此,物种的空间分布模拟一直是生物地理学的重要研究内容之一^[12,21]。目前,因相关研究的侧重点不同,已建立了多种物种分布模型^[21-24],其中以最大熵模型(Maxent)的预测能力较高,被广泛应用于濒危物种、入侵物种和重要经济物种的适生区预测和物种保护方面^[25-26]。例如,独叶草(*Kingdonia unioflora*)、毛红椿(*Toona ciliata* var. *pubescens*)、红豆杉(*Taxus chinensis*)和水葫芦(*Eichhornia crassipes*)等植物的研究^[27-30]。

本研究以青海云杉为研究对象,基于气候相似性原理,利用最大熵模型筛选影响青海云杉地理分布的主导因子,给出其潜在的地理分布范围,并预测其在未来气候变化背景下潜在分布区的变化,从而深化未来气候变暖对其潜在分布区变化影响的认识,以期对青海云杉的经营管理及应对气候变化提供依据。

1 材料方法

1.1 收集物种现有分布数据

青海云杉的现有分布样点通过在线查阅中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)中已有记载的标

本样点和收集实验室已有野外采集样点而得,并参考《中国植物志》中所述该物种的分布范围,对分布点进一步筛选,去除不确定和重复样点,最终确定 69 个样点,用于后续分析(见表 1)。

表 1 青海云杉样点地理信息
Table 1 Geographic information of Qinghai spruce records

编号 Number	采集地 Sites	经度/(E, °) Longitude	纬度/(N, °) Latitude	编号 Number	采集地 Sites	经度/(E, °) Longitude	纬度/(N, °) Latitude
1	甘肃古浪昌灵山	103.69	37.47	36	青海互助北山林场	102.39	36.93
2	甘肃徽县嘉陵乡严坪	106.26	33.62	37	青海互助加定大通河谷	102.41	37.02
3	甘肃靖远哈思山	104.40	37.01	38	青海互助加定乡	102.43	36.97
4	甘肃酒泉嘉峪关	98.12	39.83	39	青海互助加定镇附近	102.48	36.97
5	甘肃康乐莲花山	103.77	34.95	40	青海互助至仙米林场	102.13	37.28
6	甘肃山丹大黄山	101.24	38.45	41	青海互助大板山	101.91	37.16
7	甘肃山丹龙首山	101.00	38.92	42	青海湟源扎藏寺	101.15	36.75
8	甘肃肃南白石山	98.57	39.37	43	青海湟中三合林场	101.96	36.43
9	甘肃肃南大河区松木滩	99.78	38.76	44	青海湟中群加林场	101.69	36.28
10	甘肃肃南祁连山九条岭	102.06	37.87	45	青海坎布拉	101.82	36.09
11	甘肃肃南海牙沟	99.64	38.71	46	青海乐都马营	102.67	36.6
12	甘肃渭源	104.02	34.99	47	青海乐都曲坛	102.31	36.35
13	甘肃夏河拉卜楞寺	102.52	35.20	48	青海乐都药草台林场	102.25	36.29
14	甘肃夏河清水附近	102.87	35.37	49	青海玛沁德可河	100.68	34.34
15	甘肃永昌祁连山北坡	101.41	38.1	50	青海玛沁军功乡	100.65	34.69
16	甘肃永登连城林区	102.75	36.69	51	青海玛沁西哈隆	100.56	34.70
17	甘肃张掖马蹄山	100.43	38.48	52	青海门源早台乡	101.74	37.37
18	甘肃舟曲黑峪河老沟	104.21	33.92	53	青海门源仙米林场	102.01	37.31
19	甘肃舟曲洛大乡	103.88	33.95	54	青海门源朱固寺沟	102.36	37.13
20	甘肃卓尼拉加村	102.92	34.96	55	青海民和西沟	102.6	36.17
21	内蒙阿拉善左旗哈拉乌北沟	105.91	38.87	56	青海祁连八宝河	100.21	38.20
22	内蒙大青山九峰山	110.6	40.69	57	青海祁连东沟	98.98	38.64
23	内蒙大青山旧窝铺	111.28	40.86	58	青海祁连南山	99.94	38.33
24	内蒙阿拉善贺兰山大梁介子沟	105.92	38.96	59	青海祁连牛心山	100.24	38.12
25	内蒙阿拉善左旗水磨沟	105.87	38.96	60	青海天峻	98.74	37.69
26	宁夏贺兰山北寺山上	105.98	38.71	61	青海同德江千沟	100.58	35.00
27	宁夏吴忠罗山自然保护区	106.29	37.31	62	青海同仁瓜什则乡	102.24	35.53
28	宁夏贺兰山兔儿坑	105.92	38.74	63	青海同仁兰采区	101.91	35.62
29	宁夏贺兰县 小口子	105.93	38.61	64	青海同仁双朋西林区	102.2	35.56
30	宁夏隆德县	106.11	35.61	65	青海乌兰哈尔哈特	98.67	37.04
31	宁夏平罗崇岗汝箕沟	106.26	38.94	66	青海乌兰希里沟	98.53	36.78
32	青海大通东峡鹑子沟	101.86	37.04	67	青海兴海河卡羊曲伪香	100.06	35.79
33	青海海晏白头岩湾	101.27	36.91	68	青海泽库麦秀林场	101.95	35.35
34	青海海晏青海湖东部	100.91	36.62	69	四川若尔盖求吉乡	102.87	33.95
35	青海河南宁木特	101.33	34.56				

1.2 当前及未来潜在分布区预测

1.2.1 获取气候数据

当前气候图层下载自 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>),该网站提供了 1970—2000 年 30 间与降雨和气温有关的 19 个气候变量:年均温(bio1),月均温度变幅(bio2),等温性(bio3),温度季节性变化(bio4),最暖月最高温(bio5),最冷月最低温(bio6),温度年变幅(bio7),最湿季均温(bio8),最干季均温

(bio9),最暖季均温(bio10),最冷季均温(bio11),年降雨(bio12),最湿月降雨(bio13),最干月降雨(bio14),降雨季节性变化(bio15),最湿季降雨(bio16),最干季降雨(bio17),最暖季降雨(bio18),最冷季降雨(bio19)。

未来 20 世纪 50 年代和 80 年代(2050s 和 2080s)的气候图层下载自 CCCFS 网站(<http://www.ccafs-climate.org>),气候增温情景则参照了 Ren 等人的方法^[31],从 CMIP5 计划中选取了 3 种大气环流模型(General circulation models, GCMs: BCC-CSM1-1、CCCma_CanESM2 和 CSIRO-Mk3.6.0)和 3 种代表性浓度路径情景(Representative concentration pathways, RCPs: RCP2.6、RCP4.5 和 RCP 8.5)。这 3 种情景代表了不同的温室气体排放策略:RCP2.6 下通过提高能源使用率和使用可再生新能源替代化石燃料等方法降低温室气体排放量,到 2100 年控制中国平均气温增幅低于 2℃(缓和情景);RCP4.5 和 RCP8.5 则分别为中度稳定和高度温室气体排放情景,两种情景下,到 2100 年中国平均气温分别增加 2.88℃和 5.51℃^[32-33]。以上数据图层均采用 2.5'的空间分辨率。

1.2.2 潜在分布区预测

物种潜在分布区的预测基于最大熵模型(Maxent)来完成。Maxent 通过物种现有分布数据可构建物种当前潜在分布模型,并能预测物种在气候变化下未来的潜在分布,是目前应用最广泛的物种分布模型^[34-35]。将以上收集的青海云杉现有分布数据和当前及未来 2050s 和 2080s 气候图层导入软件 Maxent,使用软件默认参数,计算得到青海云杉当前和未来潜在分布模型。在此过程中,从数据基中抽取 75%作为训练数据,剩余 25%作为交互数据以评估模型的有效性。模拟结果的精确度通过受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC)进行评估,用曲线下面积(Area under the curve, AUC)表示,AUC 值介于 0—1.0,其值为 0.5—0.7 时模型预测精度较差,0.7—0.9 时为一般,值高于 0.9 时预测精度较好。各气候因子对青海云杉物种潜在分布的贡献率通过 Jackknife 模块进行评估。

此外,结合植物志描述的实际分布区和野外调查结果,本研究将青海云杉当前和未来潜在分布区域划为 4 个等级:<0.1 为非适生区;0.1—0.3 为低度适生区;0.3—0.5 为中度适生区;0.5—0.8 为高度适生区。通过分别计算各等级对应分布区面积,以明确气候变化对青海云杉实际分布的影响。另外为对比青海云杉未来潜在分布区总面积与当前的差异,本研究在进行模型运算时采用了第 10 分位训练存在阈值(10th percentile training presence threshold),以获取物种分布的二元分布图像(仅指示适生与非适生两种状态)。以上分布区面积的计算和图形绘制皆在 ArcGIS 10.3 中完成。

2 结果

2.1 影响我国青海云杉地理分布的主要气候因子

基于 Maxent 模型预测青海云杉当前潜在分布的 ROC 曲线显示,其训练集和测试集的曲线下面积(AUC)均高于 0.99,表明该模型对青海云杉潜在分布预测的准确度很高(图 1)。通过 Jackknife 模块对各气候因子的贡献率进行评估可知,等温性(bio3)和最冷季降雨(bio19)的训练得分值为最高,其次为最干季降雨(bio17)、最干月降雨(bio14)、降雨季节性变化(bio15)、最冷月最低温(bio6)、最干季均温(bio9)和最冷季均温(bio11)(图 2)。绘制以上 8 个气候因子对青海云杉适生度的响应曲线可以发现,这些曲线均存在显著峰值,且最干月、最干季和最冷季降雨的适生范围显著低于其他因子,表明一年中的最低降雨量是影响青海云杉分布的主导因子(图 3)。

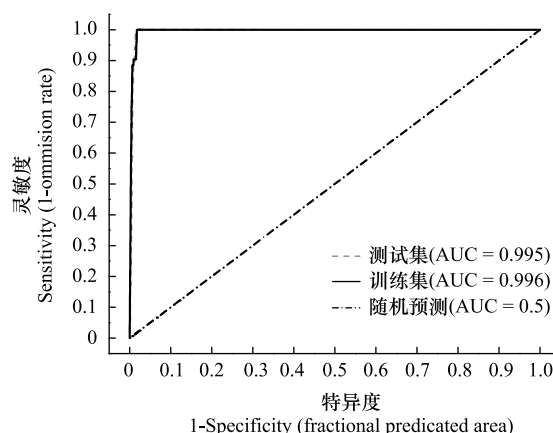


图 1 基于 Maxent 模型预测青海云杉当前潜在分布的受试者工作特征曲线(ROC)曲线

Fig.1 The receiver operating characteristic curve (ROC) curve predicting the current potential distribution of *Picea crassifolia* based on Maxent

图中 AUC 表示受试者工作特征曲线下面积 Area under the receiver operating characteristic curve

2.2 青海云杉未来潜在分布区变化

在 3 种情景、3 种大气环流模型 (GCMs) 和两个时间段 (2050s 和 2080s) 下,通过模拟得到 18 个青海云杉的未来潜在分布模型,且所有模型的平均 AUC 测试值均高于 0.99,表明模型的预测精度极高。对比潜在分布区面积变化发现 (表 2),尽管在 3 种增温情景下,青海云杉在 2050s 和 2080s 的总分布区面积与当前相比变化并不大 (—1%),但不同适生等级的潜在分布面积变化显著。其中,0.1—0.3 和 0.3—0.5 (低度和中度适生区) 两个等级的分布受气候增温影响显著,在低度和高度增温情景 (RCP2.6 和 RCP8.5) 下这两个适生等级在 2080s 的分布区面积大幅下降 (>30%),而中度增温情景 (RCP4.5) 下,低度和中度适生区面积则显著增加 (>10%)。与此相对,青海云杉高度适生区的面积在所有情景下,与当前相比均呈减少趋势 (表 2)。从分布图上看,3 种增温情景下,与当前相比,在 2050s 青海云杉在青藏高原中部及南部的潜在分布区 (低度适生区) 大幅减少,而增加了其在中国东部的潜在分布 (低度和中度适生区),呈现出潜在分布区向东迁移的趋势;在 2080s,青海云杉在青藏高原的潜在分布 (低度适生区) 进一步减少,而东部边缘地区 (低度和中度适生区) 依然呈扩张趋势 (图 4)。尽管如此,青海云杉的核心分布区域 (高度适生区) 仍然以青海东部、甘肃北部为主,无明显变迁趋势 (图 4)。

3 讨论

植物在区域尺度上的地理分布主要受气候因子的制约,其中水热条件起主导作用。本研究通过 Maxent 模型的 Jackknife 模块对影响青海云杉分布的气候因子进行评估后,证明了年最低降雨量是影响青海云杉分布的主要气候因子。与此不同,Xu 等人利用最大熵模型模拟青海云杉在祁连山的分布后得出影响其分布的主要气候因子是最暖月最高温和最湿季均温^[36]。这种结果的出现可能与预测分布尺度的差异有关:在本研究中,对青海云杉潜在分布的预测是基于全球尺度,远大于祁连山尺度。前人研究表明,青海云杉对气候因子的响应受海拔因素的影响,在森林上限 (海拔 3300 m) 温度是影响青海云杉径向生长的主要因素,而在森林下线 (海拔 2770 m) 其径向生长主要受降雨量的影响^[37]。因此,我们推测在区域水平上,青海云杉的分布受到温度的影响,但其总体分布仍然受限于最低年降雨量。

Maxent 模型预测结果显示,当前气候条件下,青海云杉的潜在分布区主要集中于:青海东部、甘肃东南部、宁夏大部分地区、西藏东部、四川西部山区以及陕西、新疆和内蒙古部分地区。此预测分布范围大于青海云杉的实际分布范围。原因可能来自于多方面:1) 随着人类活动的加剧导致以青海云杉为优势树种的森林生态系统遭受了严重的破坏^[38],仅 1989 年到 1998 年期间祁连山保护区的森林植被就减少了 33.5%^[39]。别强等^[8]通过分布 1960 年至 2000 年期间祁连山保护区青海云杉林分布的动态变化发现,自 20 世纪 60 年代至

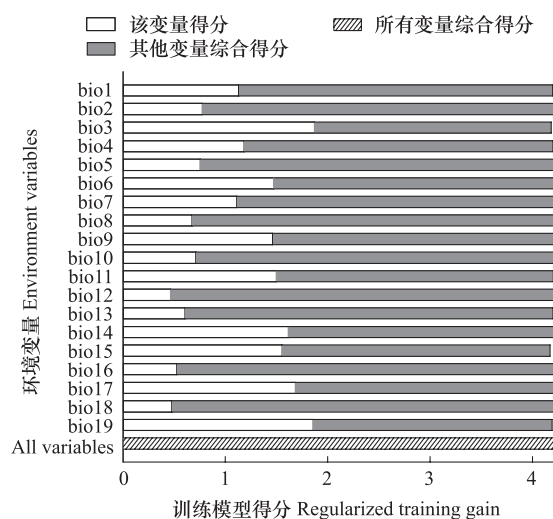


图 2 各气候因子对青海云杉当前潜在分布模型的 Jackknife 检验得分

Fig. 2 Jackknife test for climate factor contributions in the current potential distribution of *Picea crassifolia*

图中 All variable 为全部环境变量; bio1: 年均温 Annual mean temperature; bio2: 月均温度变幅 Mean diurnal range; bio3: 等温性 Isothermality; bio4: 温度季节性变化 Temperature seasonality; bio5: 最暖月最高温 Max temperature of warmest month; bio6: 最冷月最低温 Min temperature of coldest month; bio7: 温度年变幅 Temperature annual range; bio8: 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter; bio9: 最干季均温 Mean temperature of driest quarter; bio10: 最暖季均温 Mean temperature of warmest quarter; bio11: 最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter; bio12: 年降雨 Annual precipitation; bio13: 最湿月降雨 Precipitation of wettest month; bio14: 最干月降雨 Precipitation of driest month; bio15: 降雨季节性变化 Precipitation seasonality; bio16: 最湿季降雨 Precipitation of wettest quarter; bio17: 最干季降雨 Precipitation of driest quarter; bio18: 最暖季降雨 Precipitation of warmest quarter; bio19: 最冷季降雨 Precipitation of coldest quarter

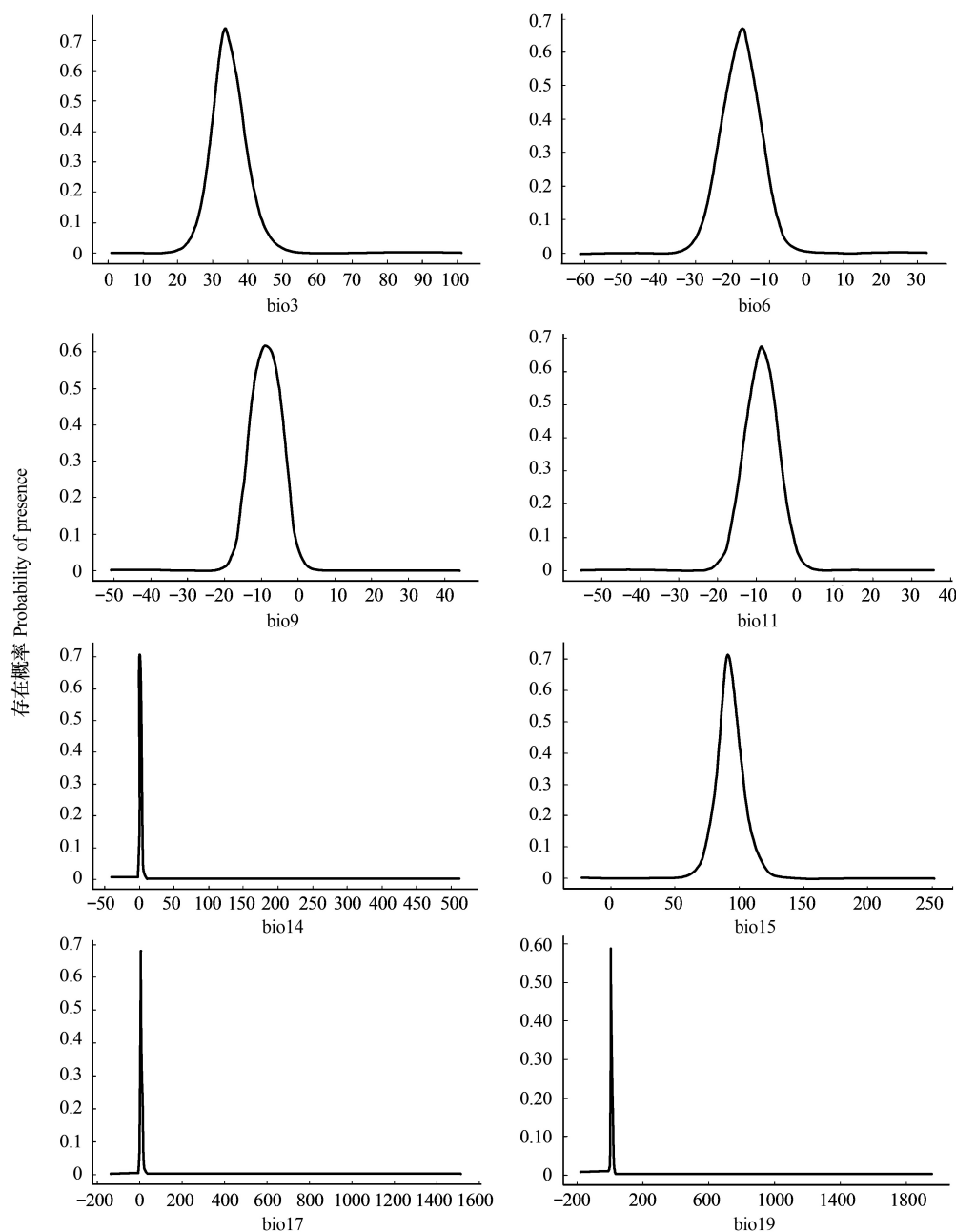


图3 主要气候因子的响应曲线

Fig.3 Response curves of main climate factors

本世纪初青海云杉面积显著减少,减少率最大时达到 11.7%;2) 青海云杉作为青藏高原东北边缘特有树种,主要集中分布于海拔 2500—3200 m 的范围^[38],而本研究重点探讨气候因子与物种分布的关系,没有考虑分布海拔、坡向等地理空间因素,可能会造成预测的潜在分布区域大于实际已知生长区域的结果;3) Maxent 模型基于气候相似性进行模拟,但并未考虑到物种现实分布时受到的其他因素,如物种的生长特性、扩散和迁移能力、自然更新能力、生物间的相互作用等^[40-41]。尽管如此,利用 Maxent 模型得出的青海云杉潜在分布区域均具有相似的气候特点,说明青海云杉林具有很高的恢复潜力^[42],可为上述地区进行森林生态系统修复与恢复提供一定的树种参考价值。

气候变化背景下,尽管青海云杉的总潜在分布面积波动较小(—1%),但其在不同适生等级的潜在分布面积及分布范围均发生了改变。这种差异的产生可能与本研究中对潜在分布的等级划分有关,总适生面积是

存在地区气候变幅差异有关^[44-45]。

4 结论

本研究基于最大熵模型证明了年最低降雨量是影响青海云杉分布的主要气候因子;在未来气候变化情景下,青海云杉分布范围虽然有减小趋势,但其高度适生区仍以祁连山、贺兰山区为主。因此在未来西部高山地区,特别是作为我国重要生态屏障的祁连山、贺兰山区,青海云杉依然具有重要的经济价值并将持续其生态服务功能。

参考文献(References):

- [1] Fu L G, Li N, Robert R M. Pinaceae // Wu Z Y, Peter H R, Hong D Y eds. Flora of China. Beijing and St. Louis: Science Press and Missouri Botanical Garden Press, 1999, 4: 11-52.
- [2] 张亚琦. 我国青海云杉研究文献分析. 青海农林科技, 2010, (2): 38-40.
- [3] 段荣贵. 祁连山南坡青海云杉林的分布规律. 青海大学学报: 自然科学版, 2012, 30(3): 74-79.
- [4] Meng L H, Yang R, Abbott R J, Miehle G, Hu T H, Liu J Q. Mitochondrial and chloroplast phylogeography of *Picea crassifolia* Kom. (Pinaceae) in the Qinghai-Tibetan Plateau and adjacent highlands. Molecular Ecology, 2007, 16(19): 4128-4137.
- [5] 张明军, 周立华. 祁连山水源涵养林生态系统服务价值估算. 甘肃林业科技, 2003, 28(1): 7-9.
- [6] 孟好军, 刘建泉, 刘贤德, 赵维俊. 祁连山青海云杉群落物种组成及 α 多样性垂直分布. 生态环境学报, 2011, 20(3): 435-440.
- [7] 刘建泉, 孙建忠. 东大河林区青海云杉林健康评价. 草业科学, 2012, 29(4): 624-628.
- [8] 别强, 赵传燕, 强文丽, 何磊. 祁连山自然保护区青海云杉林近四十年动态变化分析. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 176-180.
- [9] 裴雯, 汪有奎, 尹承陇, 张耀荣, 高松, 李进军. 青海云杉种实害虫为害损失量调查. 东北林业大学学报, 2001, 29(2): 62-63.
- [10] 刘胜, 贺康宁, 常国梁. 黄土高原寒区青海云杉人工林地土壤水分物理特性研究. 西部林业科学, 2005, 34(3): 25-29.
- [11] 王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14.
- [12] 彭守璋, 赵传燕, 许仲林, 王超, 柳逸月. 黑河上游祁连山区青海云杉生长状况及其潜在分布区的模拟. 植物生态学报, 2011, 35(6): 605-614.
- [13] 许仲林, 赵传燕, 冯兆东. 祁连山青海云杉林物种分布模型与变量相异指数. 兰州大学学报: 自然科学版. 2011, 47(4): 55-63.
- [14] 王亚军, 陈发虎, 勾晓华, 杜淑英. 祁连山中部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建. 中国沙漠, 2001, 21(2): 135-140.
- [15] 李雁, 邵雪梅, 国珈. 柴达木盆地东缘地区青海云杉生长的气候响应机制初步探讨. 高原气象, 2010, 29(2): 349-358.
- [16] 刘晓宏, 安文玲, 梁尔源, 王文志, 邵雪梅, 黄磊, 秦大河. 祁连山青海云杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的时空变化及其气候意义. 冰川冻土, 2010, 32(4): 666-676.
- [17] 徐金梅, 吕建雄, 鲍甫成, 黄荣凤, 刘贤德, Evans R, 赵有科. 祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 115-121.
- [18] Gaston K J. The Structure and Dynamics of Geographic Ranges. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [19] Lambers H, Chapin III F S, Pons T L. Plant Physiology Ecology. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2008: 1-9.
- [20] 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. 植物生态学报, 2012, 36(5): 372-381.
- [21] Thuiller W, Araújo M B, Lavorel S. Generalized models vs. classification tree analysis: predicting spatial distributions of plant species at different scales. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(5): 669-680.
- [22] 徐晓婷, 杨永, 王利松. 白豆杉的地理分布及潜在分布区估计. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1134-1145.
- [23] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 基于 DOMAIN 和 NeuralEnsembles 模型预测中国毛竹潜在分布. 林业科学, 2011, 47(7): 20-26.
- [24] 周先容, 余岩, 周颂东, 何兴金. 巴山榧树地理分布格局及潜在分布区. 林业科学, 2012, 48(2): 1-8.
- [25] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 何奇瑾, 李荣平. 辽东栎林潜在地理分布及其主导因子. 林业科学, 2013, 49(8): 10-14.
- [26] 王婧如, 王明浩, 张晓玮, 孙杉, 赵长明. 同倍体杂交物种紫果云杉的生态位分化及其未来潜在分布区预测. 林业科学, 2018, 54(6): 63-72.
- [27] 徐军, 曹博, 白成科. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3354-3359.
- [28] 黄红兰, 张露, 贾黎明, 梁跃龙, 温婷, 程子珊, 刘远生, 甘文峰. 基于 MaxEnt 模型的毛红椿全球潜在适生区分布及其特征预测研究. 江西农业大学学报, 2018, 40(2): 241-247.
- [29] 李灿, 刘贤安, 王娟, 彭培好, 邵怀勇, 仙魏. 基于 MaxEnt 模型的四川省红豆杉潜在分布区分析及适宜性评价. 林业调查规划, 2018, 43(1): 22-29.

- [30] 李宏群, 李宇轩, 刘晓莉, 丁世敏, 张倩倩, 倪福明, 郑秋燕. 基于 Maxent 生态位模型的水葫芦在中国的适生区预测. 生态科学, 2018, 37(3): 143-147.
- [31] Ren Z P, Wang D Q, Ma A M, Hwang J, Bennett A, Sturrock H J W, Fan J F, Zhang W J, Yang D, Feng X Y, Xia Z G, Zhou X N, Wang J F. Predicting malaria vector distribution under climate change scenarios in China: challenges for malaria elimination. Scientific Reports, 2016, 6: 20604.
- [32] Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, Daniel J S, Kainuma M L T, Lamarque J F, Matsumoto K, Montzka S A, Raper S C B, Riahi K, Thomson A, Velders G J M, Van Vuuren D P P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic Change, 2011, 109(1): 213-241.
- [33] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs 情景下中国 21 世纪气候变化预估及不确定性分析. 热带气象学报, 2016, 32(2): 183-192.
- [34] McPherson M J, Jetz W. Effects of species' ecology on the accuracy of distribution models. Ecography, 2007, 30(1): 135-151.
- [35] Slater H, Michael E. Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling. PLoS One, 2012, 7(2): e32202.
- [36] 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.
- [37] 袁亚鹏. 祁连山中部不同海拔青海云杉径向生长对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [38] 刘建泉. 祁连山保护区青海云杉种群分布格局的研究. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 152-155.
- [39] 郭锐, 杨兰芳, 李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化. 应用气象学报, 2003, 14(6): 700-707.
- [40] Boulangeat I, Gravel D, Thuiller W. Accounting for dispersal and biotic interactions to disentangle the drivers of species distributions and their abundances. Ecology Letters, 2012, 15(6): 584-593.
- [41] 李颖, 姜小龙, 邓敏, 李谦盛. 乌冈栎的潜在分布模拟及分析. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2971-2978.
- [42] 彭守璋. 祁连山区青海云杉林生长过程及其固碳能力研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [43] 张永香. 祁连山青海云杉对 20 世纪 50 年代以来气候变化的响应分析[D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 2009.
- [44] Xu Y, Xu C H. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi - models. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 489-494.
- [45] Xu D Y, Yan H. A study of the impacts of climate change on the geographic distribution of *Pinus koraiensis* in China. Environment International, 2001, 27(2/3): 201-205.