

DOI: 10.5846/stxb202101260269

张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1420-1428.
Zhang X W, Jiang Y M, Bi Y, Liu X L, Li X, Sun T, Chen H Y, Li J. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1420-1428.

基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析

张晓玮¹, 蒋玉梅², 毕阳², 刘祥林¹, 李星¹, 孙涛¹, 陈浩宇¹, 李捷^{1,*}

¹ 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

² 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070

摘要: 中国沙棘主要分布于我国华北、西北、西南等地森林—草原过渡地带, 是我国北方地区退耕还林、生态修复等工程的重要造林树种, 对维持干旱、半干旱地区的生态环境稳定具有重要意义。探讨限制中国沙棘分布的主导气候因子, 模拟其潜在适宜分布区, 以期为中国沙棘在林业生态工程和生态经济林建设中的合理种植和推广提供理论依据。基于中国沙棘自然分布的 328 个地理样点, 利用最大熵 (MaxEnt) 模型对中国沙棘的潜在分布区的主导气候因子进行分析, 并预测中国沙棘的潜在分布范围。结果表明, 基于气候变量的 MaxEnt 模型训练集和测试集受试者工作特征曲线下面积 (AUC 值) 分别为 0.962 ± 0.001 和 0.949 ± 0.001 , 均大于 0.9, 表明 MaxEnt 模型对中国沙棘潜在分布区的预测具有极高的准确度, 可信度好。基于环境变量贡献率和刀切法的结果表明年降雨情况、生长季的水热状况、最干季降雨和最冷月最低温等是限制中国沙棘分布的主要气候因素, 其中年降雨是限制中国沙棘分布的主导气候因子。通过模拟得到现代中国沙棘潜在地理分布的总适生区面积为 165.1 万 km^2 ; 其中高适生区和中适生区面积共 93.3 万 km^2 , 主要集中分布于河北西部、北部, 山西全境, 陕西北部及秦岭山区, 宁夏南部, 甘肃东部、南部及祁连山区, 青海东部, 四川西部和西藏东部及中部地区; 在吉林东北部, 内蒙古中部、南部, 以及河南西北部地区也有少量分布。

关键词: 最大熵 (MaxEnt) 模型; 中国沙棘; 潜在分布区

Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model

ZHANG Xiaowei¹, JIANG Yumei², BI Yang², LIU Xianglin¹, LI Xing¹, SUN Tao¹, CHEN Haoyu¹, LI Jie^{1,*}

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

² College of Food Science and engineering of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* is mainly distributed in the forest-grass transition zone and is an important afforestation tree species for the conversion of farmland to forests and ecological restoration projects in North, Northwest, and Southwest China, which plays an important role in maintaining the stability of the ecological environment. This paper tries to explore the dominant climatic factors that limit the distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* in China, and to simulate its suitable distribution area. In order to provide a theoretical basis for the overall arrangement and promotion of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* in forestry ecological engineering and ecological economic forest construction. Based on 328 geographical distribution samples within the distribution range of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*, the maximum entropy (MaxEnt) model is used to predict the potential distribution range of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* in China. The receiver operating characteristic curve, Jackknife test and the present contribution of the climatic factors are carried out to analyze to

基金项目: 科技部中俄科技合作专项 (2014DFR31230); 甘肃省自然科学基金 (18JR3RA177); “中-俄沙棘加工技术甘肃省国际科技合作基地”项目 (GHJD201802) 资助

收稿日期: 2021-01-26; 采用日期: 2021-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lj81658@qq.com

the climatic factors limiting the modern potential geographical distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*, and the response curve is used to determine the suitable range of climatic factors. The results showed that the average values of the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of training and test data were 0.962 ± 0.001 and 0.949 ± 0.001 respectively, higher than 0.9, indicated the accuracy of the MaxEnt model was pretty high for modeling potential distribution regions of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*. The combined results from Jackknife test and the present contribution of the climatic factors revealed that annual precipitation, temperature and precipitation of growth season, precipitation of driest quarter and min temperature of coldest month were the key climate factors that rescribed the distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* in China. The total suitable area of the modern potentially geographical distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* based on the climatic factors was $165.1 \times 10^4 \text{ km}^2$. And the total area of the potential most suitable region and suitable region of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* in China was $93.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, mainly located in western and northern Hebei, Shanxi, northern Shaanxi and Qinling Mountains, southern Ningxia, eastern and southern Gansu, Qilian Mountains, eastern Qinghai, western Sichuan, eastern and central Tibet, moreover, there were few suitable region were located in northeastern Jilin, the central and southern Inner Mongolia, as well as northwestern Henan. These regions can be used as the dominant areas for the cultivation and promotion of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*.

Key Words: maximum entropy (MaxEnt) model; *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*; the potential distribution

中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi)是胡颓子科沙棘属沙棘的亚种,为落叶灌木或小乔木^[1]。作为“生态保护的先锋树种”之一^[2],中国沙棘广泛分布于我国华北、西北、西南等环境恶劣、生态脆弱的森林—草原过渡地带^[3],是沙棘属分布面积最大、数量最多的类群^[4-6]。中国沙棘具有喜湿润、耐大气干旱、耐寒、抗盐碱等特征^[7-9],且各器官含有丰富的营养元素和活性成分,具有很高的利用价值,是一类开发潜力巨大的生态经济树种。因此,中国沙棘在我国“三北”防护林体系、退耕还林、生态修复以及生态经济林等生态工程中充当着重要角色,是我国种植面积最大、利用最多的沙棘属植物类群。然而近年来,越来越多沙棘人工林出现大范围早衰或死亡现象,对其生态、经济效益发挥造成了严重影响^[10-13]。导致其早衰或死亡,除树龄老化、病虫害危害以及经营管理不善等因素外,还有早期造林设计时未充分考虑沙棘的生态地理分布和生境适应性^[14-15]。因此,科学预测和评价中国沙棘的潜在适生区,在林业生态工程以及生态经济林建设中合理布局中国沙棘这一生态经济树种具有十分重要理论和实践意义。

影响植物地理分布的因素众多,其中气候是影响植物在地理区域尺度分布的关键因素^[16-18]。目前,有关中国沙棘地理分布格局和区域适应性的研究表明年降水量在影响中国沙棘分布中起到关键作用,中国沙棘一般适合生长在年降水量 400—800 mm^[5,19-20]。然而,这些研究多是基于分布区与各气候因子等量线相似性比较或实践经验的总结^[5,19-22],缺乏深入和系地的分析,且无可可视化的适生范围。目前,有许多关于物种空间分布模拟和可视化的模型^[23-25],其中,基于因子相似性原理的最大熵模型(Maximum Entropy Modeling; MaxEnt)预测能力较高,已被广泛应用于许多物种的潜在分布区模拟^[25-29]。因此,本研究基于气候相似性原理,利用最大熵模型探讨中国沙棘地理分布与气候的关系,以期阐明影响中国沙棘分布的主导气候因子,并结合适生等级对其潜在地理分布范围进行可视化处理,从而为中国沙棘在林业生态工程以及生态经济林建设中的合理布局提供理论支持和数据支撑。

1 材料方法

1.1 中国沙棘现有地理分布数据的收集

通过在线查阅中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)中有关中国沙棘的标本信息,并参考《中国植物志》^[1]、《沙棘》^[30]和相关文献^[6,8,19]中所述该物种的分布范围,对分布点进行筛选,去除明确位于分布范围外的样点、不确定和重复样点,以及明确为非野生状态下(如植物园、树木园等)的样点,最终获得中国沙棘分

布区内的 328 个样点信息(图 1)。

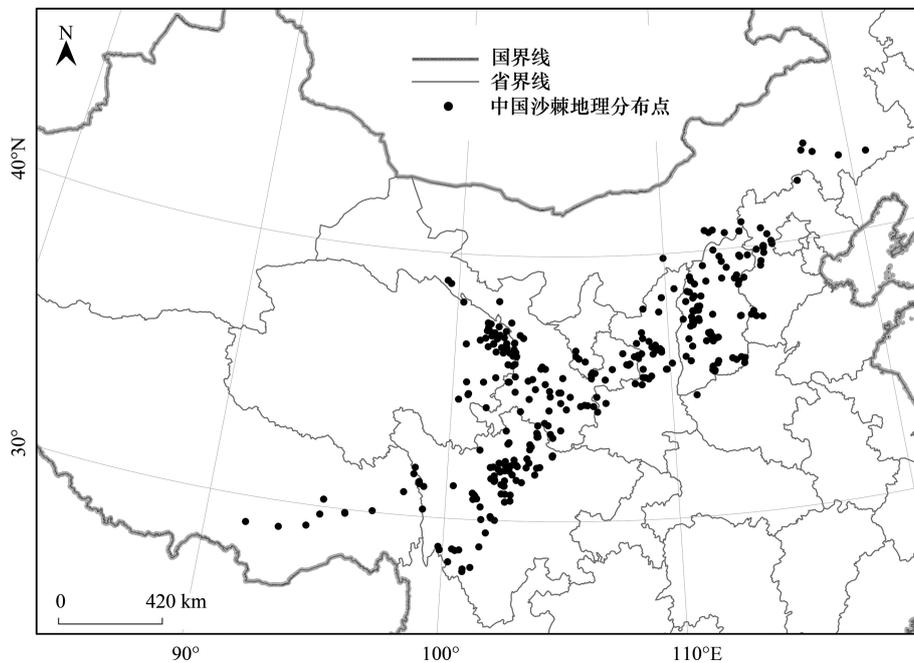


图 1 中国沙棘分布样点

Fig.1 The occurrence sites of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in China

1.2 气候数据的获取

气候变量数据来源于 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>)最新提供的气候数据图层。该网站于 2020 年 1 月更新了与降雨和温度(1970—2000 年)有关的 19 个气候变量图层(Version 2.1)。这 19 个气候变量分别是年均温(Bio01),月均温度变幅(Bio02),等温性(Bio03),温度季节性变化(Bio04),最暖月最高温(Bio05),最冷月最低温(Bio06),温度年变幅(Bio07),最湿季均温(Bio08),最干季均温(Bio09),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)。上述气候因子图层均采用 30"(约 1km)的空间分辨率。

1.3 潜在分布区模拟

物种潜在分布区的预测基于最大熵模型(MaxEnt)来完成。将以上收集的中国沙棘现有分布数据和利用 ArcGIS 10.2.2 软件转化为 ASCII 格式的气候图层导入 MaxEnt 3.4.1 软件(http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)进行运算。运算过程中,设置训练数据集为 75%,测试验证数据集为 25%,迭代次数为 10000,重复训练为 10,进行数据模拟。利用 MaxEnt3.4.1 软件中的 Jackknife 模块,计算各气候变量的贡献率和置换重要值,检验各气候变量对中国沙棘地理分布的限制强度^[25-26]。利用受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC)评估模拟结果的精确度, AUC 值(曲线下面积, Area under the curve, AUC)介于 0—1.0。AUC 值越大,模型的精确度越高,可信度越好^[25]。其值为 0.5—0.7 时表示模型预测精度较差,0.7—0.9 时为一般,值高于 0.9 时说明预测精度较好。模拟结果选择 Cloglog 输出方式,以 .asc 格式保存。其余参数使用 MaxEnt 3.4.1 软件默认设置。

利用 ArcGIS 10.2.2 软件,对模拟结果进行可视化处理和生境适生性划分:根据模拟得到的中国沙棘适生度大小,结合收集的地理分布数据,利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)将其划分为 4 个等级:非适生区(<0.09)、低适生区(0.09—0.33)、中适生区(0.33—0.62)和高适生区(>0.62)^[28-29]。再利用

ArcGIS 10.2.2软件的 Reclassify 工具统计和计算各等级对应分布区面积。

2 结果

2.1 模型预测精度评价

中国沙棘共 328 个样本,在构建其最大熵模型中,随机选取的训练样本为 246 个,验证样本为 82 个,结果显示,模型的平均训练集 AUC 值为 0.962 ± 0.001 ,测试集 AUC 值为 0.949 ± 0.011 ,均大于 0.9,且明显大于随机预测分布模型的 AUC 值。图 2 展示的训练集 AUC 值最大的一次训练。这表明 MaxEnt 模型预测得到的中国沙棘潜在分布区具有很好的精度,其预测结果可靠度高,不具有随机性。

2.2 制约中国沙棘分布的主导气候因子

表 1 为通过运行 MaxEnt 模型得到各气候因子的贡献率,贡献率排名前 5 的气候因子分别为年降雨 (Bio12, $19.40\pm 3.35\%$)、最干季降雨 (Bio17, $15.42\pm 1.07\%$)、最湿季均温 (Bio08, $10.80\pm 2.38\%$)、最冷月最低温 (Bio06, $9.90\pm 3.08\%$) 和最暖季均温 (Bio10, $8.40\pm 3.18\%$),累积贡献率为 63.92%。进一步

基于刀切法分析的不同气候因子的训练增益(图 3)。结果表明,训练增益得分排名前 5 的气候因子依次为最湿月降雨 (Bio13)、最冷月最低温 (Bio06)、最暖季降雨 (Bio18)、最湿季降雨 (Bio16) 和年降雨 (Bio12)。

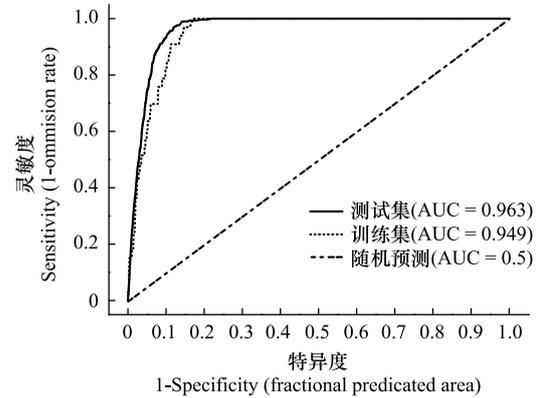


图 2 基于 MaxEnt 模型预测中国沙棘潜在分布的受试者工作特征曲线 (ROC) 曲线

Fig.2 The receiver operating characteristic curve (ROC) curve predicting the current potential distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* 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

表 1 最大熵模型中各气候因子对中国沙棘分布贡献率

Table 1 Contribution rate of each climatic factors for the distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in MaxEnt model

代码 Code	贡献率 Percent contribution/%	代码 Code	贡献率 Percent contribution/%
Bio12	19.40±3.35	Bio13	2.30±2.10
Bio17	15.42±1.07	Bio01	2.10±2.14
Bio08	10.80±2.38	Bio07	1.07±0.47
Bio06	9.90±3.08	Bio05	0.56±0.61
Bio10	8.40±3.18	Bio02	0.41±0.19
Bio11	7.66±1.82	Bio14	0.36±0.09
Bio18	6.96±3.28	Bio09	0.34±0.28
Bio15	5.77±0.62	Bio03	0.20±0.04
Bio04	5.74±1.85	Bio16	0.13±0.20
Bio19	2.49±0.28		

Bio01: 年均温 Annual mean temperature; Bio02: 月均温度变幅 Mean diurnal range; Bio03: 等温性 Isothermality; Bio04: 温度季节性变化 Temperature seasonality; Bio05: 最暖月最高温 Max temperature of warmest month; Bio06: 最冷月最低温 Min temperature of coldest month; Bio07: 年度年变幅 Temperature annual range; Bio08: 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter; Bio09: 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 4 为绘制的上述 8 个气候因子对中国沙棘适生度的响应曲线,由图可知,各气候因子对中国沙棘的生存概率的响应曲线均表现,随着气候因子值的增加,存在概率缓慢升高—快速增高—快速下降—缓慢降低的

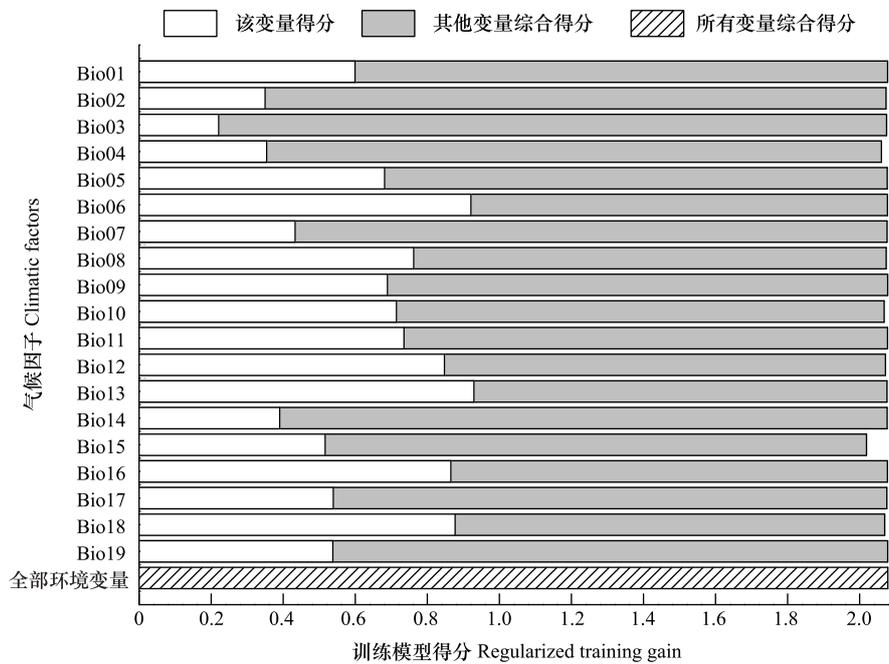


图3 各气候因子对中国沙棘潜在分布模型的 Jackknife 检验得分

Fig.3 Jackknife test for climatic factors in the current potential distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*

图中 All variable 为全部环境变量; Bio01: 年均温 Annual mean temperature; Bio02: 月均温度变幅 Mean diurnal range; Bio03: 等温性 Isothermality; Bio04: 温度季节性变化 Temperature seasonality; Bio05: 最暖月最高温 Max temperature of warmest month; Bio06: 最冷月最低温 Min temperature of coldest month; Bio07: 温度年变幅 Temperature annual range; Bio08: 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter; Bio09: 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

规律。但各气候因子下的最大生存概率有所差异,其中年降雨(Bio12)的最低,仅为0.741,其余为:最湿季降雨(Bio16) < 最干季降雨(Bio17) < 最湿月降雨(Bio13) ≈ 最暖季降雨(Bio18) < 最湿季均温(Bio08) < 最暖季均温(Bio10) < 最冷月最低温(Bio06)。

2.3 中国沙棘分布区的气候特征

适生度 > 0.62 的区域为模拟得到的中国沙棘的高适生区,与现实分布区吻合度很高。因此,本研究利用存在概率大于 0.62 时应对的气候因子范围表征中国沙棘分布区的该气候因子特征。通过图 4 分析,中国沙棘分布区的气候特点为:最冷月最低温(Bio06) -14.0—-6.3℃,最湿季均温(Bio08) 9.1—17.4℃,最暖季平均均温(Bio10) 10.1—18.0℃,年降雨(Bio12) 441—782mm,最湿月降雨(Bio13) 91—134mm,最湿季降雨(Bio16) 227—355mm,最干季降雨(Bio17) 8—18mm,最暖季降雨(Bio18) 224—326mm。

2.4 中国沙棘在我国的潜在分布区及适宜性评价

高适生区:中国沙棘潜在分布的最适生区主要位于我国的河北西部、北部,山西中部、南部,陕西中北部,甘肃东部、南部,青海东部,四川西部以及西藏东部、中部等地区(图 5)。基于 MaxEnt 模型预测中国沙棘潜在分布的最适宜区面积约为 47.1 万 km²(表 2)。

中适生区:中国沙棘潜在分布的中适生区多位于最适生区周围,主要位于河北北部,山西大部,陕西北部,甘肃东部、南部及祁连山区,青海东部,四川西部以及西藏东部、中部等地区。此外,吉林东北部,内蒙古中部、东部,河南西北部也存在小量中适生区分布。中国沙棘潜在分布的适生区较为狭窄(图 5),面积约为

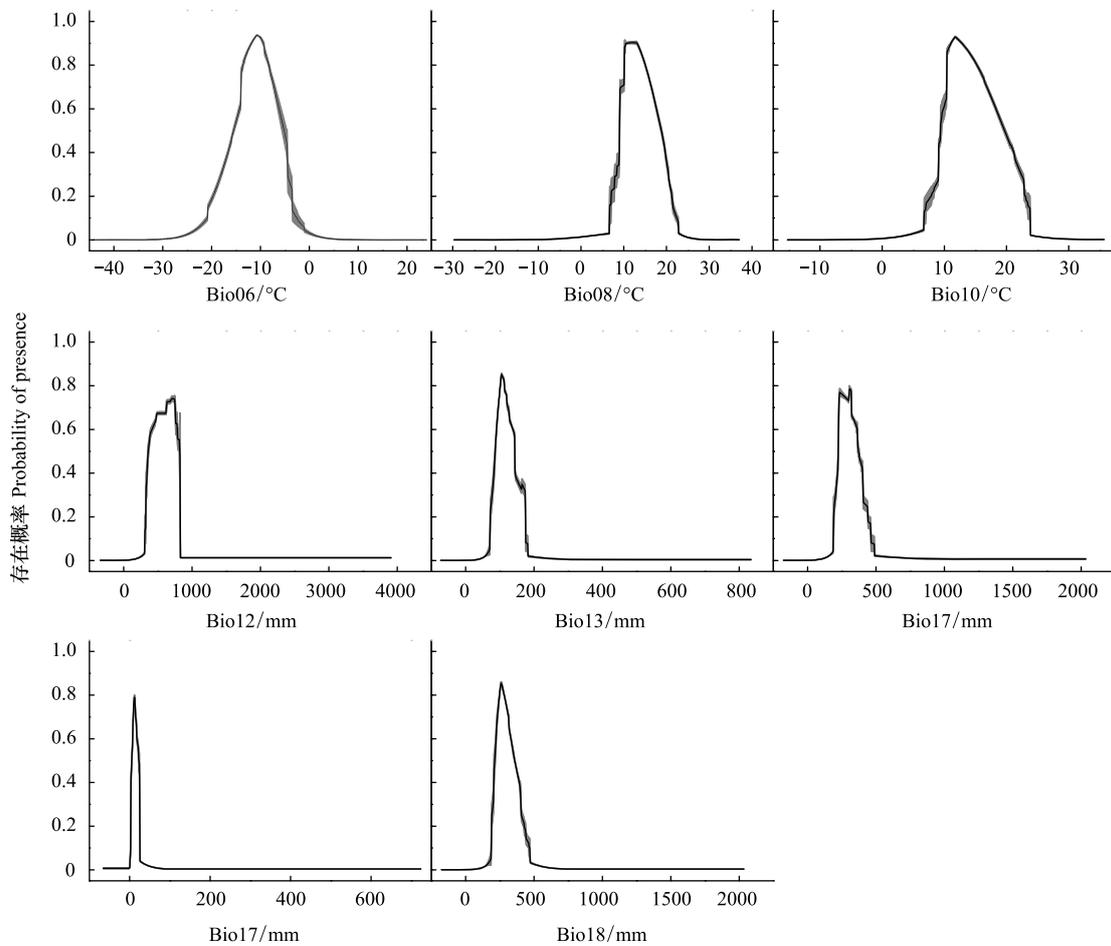


图 4 主要气候因子存在概率响应曲线

Fig.4 Response curves of probability of presence to main climate factors

46.2 万 km^2 (表 2)。

低适生区:中国沙棘潜在分布的低适生区在我国东北、华北、西北和西南地区各省,主要有黑龙江东南部,吉林东部,辽宁南部、西北部,河北北部、西部,河南西部,内蒙古中东部,陕西秦岭及以北大部,宁夏南部,甘肃中部及祁连山区,青海东部,四川西部、南部,西藏东部、南部等地。此外,在贵州北部也有少量低适生区(图 5),低适生区面积约为 71.8 万 km^2 (表 2)。

非适生区:除上述地区外,研究范围内的其他地区均不适宜中国沙棘生长。这部分地区主要为东北大部、河北东南部、甘肃北部、青海南部、西藏北部、四川东部、新疆大部,以及我国南方(图 5)。

表 2 中国沙棘的潜在分布适生区面积

Table 2 Potential distribution area of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*

等级 Classification	模拟面积 Simulated area/ km^2	等级 Classification	模拟面积 Simulated area/ km^2
最适生区 Most suitable region	4.71×10^5	次适生区 Sub-suitable region	7.18×10^5
适生区 Suitable region	4.62×10^5		

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。本研究采用 MaxEnt

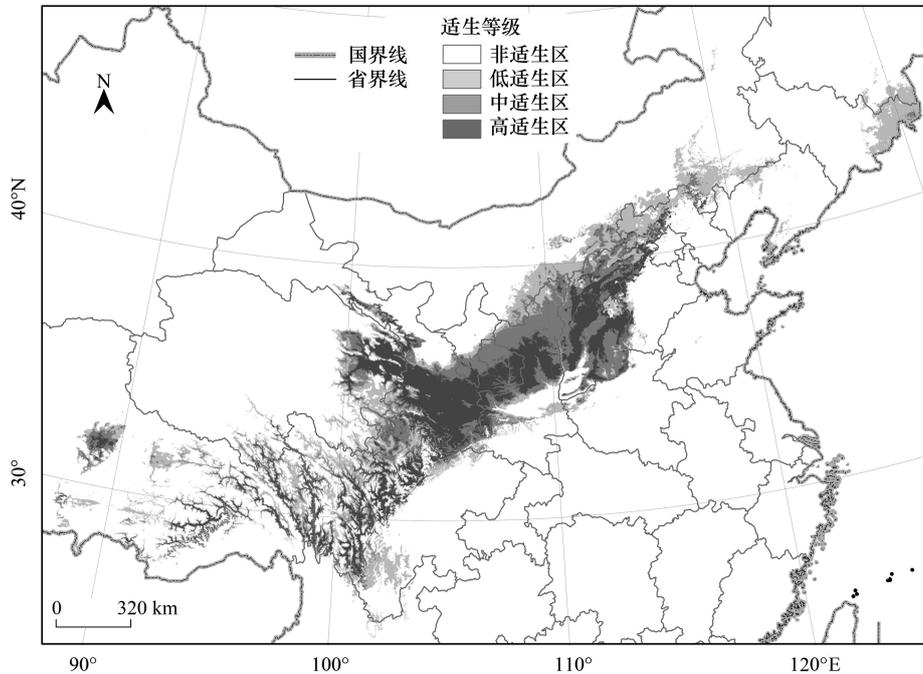


图5 基于 MaxEnt 模型预测的中国沙棘在我国的潜在分布示意图

Fig.5 Potential distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in China based on MaxEnt

模型模拟了中国沙棘在我国的潜在分布区,通过综合各气候因子贡献率、训练增益和气候因子—存在概率响应曲线,表明影响中国沙棘分布的主要气候因子为年降雨(Bio12)、生长季温度(最湿季均温 Bio08、最暖季均温 Bio10)和降雨(最湿季降雨 Bio16、最暖季降雨 Bio18)、最湿月降雨(Bio13)最干季降雨(Bio17)、以及最冷月最低温(Bio06),其中,年降雨影响最大。由此可见,水分条件是影响中国沙棘分布的主导气候因子,其次为生长季的热量条件^[20]。

廉永善^[5]指出降雨量限制中国沙棘分布,当年均降雨量<400mm 会影响中国沙棘的正常生长发育。如,中国沙棘从西南川西高原经秦巴山区向西北黄土高原、毛乌素沙地和内蒙古砒砂岩地区分布时,随着降雨量的降低,其个体由乔木状向灌木状转变,且种群寿命明显下降^[22]。同时,降雨量的减少还会导致中国沙棘将更多的生物量向地下分配^[31],从而导致新枝生长缓慢^[32]、果实产量减少^[33]。这些研究结果都表明降雨是影响中国沙棘分布的主要气候因子。同时,本研究通过量化了中国沙棘分布区的年均降雨量、最暖季降雨量、最干季降雨量等降雨相关的气候因子,进一步证实中国沙棘主要分布于年降雨量在 400—800mm 范围。

由于中国沙棘分布区较为广阔,其温度适应范围则较宽,且其以夏季生长为主,秋季结束生长较早。因此,本研究发现年均温对中国沙棘分布区模拟的贡献仅为(2.10±2.14)%,这也证实年均温对中国沙棘分布影响不大的说法^[34]。尽管如此,本研究表明生长季温度情况也是影响中国沙棘分布的重要气候因子,因为生长季温度影响中国沙棘果实发育和种子成熟。生长季温度低的地区往往热量不足,生长期较短,果实丰产性较差。中国沙棘在中国亚热带低海拔地区的引种试验中成活率 14%—25%^[35],表明生长季温度过高也会限制中国沙棘的分布。此外,冬季低温还会影响次年中国沙棘种子的萌发和花芽的发育^[36]。孙坤等^[37]研究表明尽管在较宽的温度范围(15—30℃)内中国沙棘种子均有较高的发芽率,但温度过低时则表现出明显的“坐或等”的发芽对策^[38],从而影响中国沙棘种群的分布。

将本研究模拟得到的潜在分布区域与关于中国沙棘人工林大范围早衰或死亡报道的地区进行对比分析,可知中国沙棘人工林出现大面积早衰或死亡的地区多位于本研究模拟出的低适生区或非适生地区,如辽宁建平县、内蒙古鄂尔多斯东部、毛乌素沙地,以及大部分“三北”防护林带^[10—15]。这一现象表明中国沙棘种植于

低适生区虽能存活,但容易发生早衰或死亡现象,这也从侧面证实本研究对中国沙棘适生区等级划分的可靠性。有研究表明存在概率在 0.33 以上的区域为物种存在几率较高,易于物种生长^[39-40]。因此,中国沙棘的核心适生区以模拟得到的高适生区和中适生区为主,预测结果显示,中国沙棘的潜在的高适生分布区和中适生分布区主要集中于:河北西部及北部、山西全境、陕西北部及秦岭山区、宁夏南部、甘肃东部、南部及祁连山区、青海东部、四川西部和西藏东部山区及西藏中部地区,以及吉林东北部、内蒙古中部和南部以及河南西北部地区有少量分布。由于上述地区中国沙棘的适生度较高,在未来可作为重点区域种植和推广中国沙棘。

利用 ArcGIS 10.2.2 软件对模拟结果重新分类,统计了中国沙棘不同适生区面积,结果表明中国沙棘的潜在分布区总面积为 165.1 万 km²,其中核心分布区面积为 93.3 万 km²,潜在分布的高适生区(存在概率>0.62)面积达 47.1 万 km²。与其他物种研究结果一样^[25,28],本研究模拟的得到的中国沙棘适生分布区也存在面积远高于已知的中国沙棘林总面积(包括人工林在内约 1.36 万 km²),可能的原因有:1)本研究重点从气候因子与物种分布关系的角度探讨中国沙棘的分布,没有考虑分布海拔、坡向、土壤、土地利用类型等其他因素的影响;2)MaxEnt 模型基于气候相似性进行模拟,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^[25,28,41];3)作为温带森林-草原过渡带树种,森林破坏后侵入生长,森林恢复后则迅速衰退,只是森林地带演替阶段上的一个暂时性植被^[5]。随着我国林业系统的天然林保护,以及森林生态系统修复和恢复工程的实施,缩短了演替阶段的时间,压缩了中国沙棘的生长空间。这些可能的原因都会造成预测得到的潜在分布区大于实际已知区域的结果。尽管如此,利用 MaxEnt 模型得出的中国沙棘潜在分布区域均具有相似的气候特点,说明中国沙棘具有很高的适应性^[5,42],可为上述地区进行生态系统修复和恢复树种选择提供一定的参考价值。

此外,本研究主要以中国沙棘野生分布样点为基础进行的模拟,并未涉及以中国沙棘及其近缘类群为基础人为选育推广种植品种的分布。人为选育沙棘品种多以高产、少棘刺、长果柄等栽培性状为目的。如高产品种的选育一般通过优良单株或亲本杂交得到单一纯化的发育节律整齐统一的类群,并且一般在集约化条件下栽培,往往牺牲了物种群体水平的适应潜力^[5]。因此,基于经济林树种考虑时,中国沙棘的潜在适宜分布区有待进一步探讨。

4 结论

1)本研究通过最大熵模型分析表明水分条件是影响中国沙棘分布的主导气候因子,其次为生长季的热量条件。同时,本研究明确了中国沙棘适生区的各主导气候因子范围。其中,适生区的年降雨量 441—782 mm,生长季降雨量占全年降雨的 50%左右,最干季降雨量 8—18mm,最湿季均温 9.1—17.4℃,最暖季平均温 10.1—18.0℃,最冷月最低温-14.0—-6.3℃。

2)预测了中国沙棘在我国的潜在分布区面积为 165.1 万 km²,核心分布区面积为 93.3 万 km²,其中高适生区主要位于我国的河北西北部、山西中部、陕西北部、甘肃东部及南部、青海东北部、四川西部以及西藏东部和中部等地区,面积约为 47.1 万 km²。

参考文献 (References):

- [1] 方文培,张泽荣.中国植物志第五十二卷第二分册.北京:科学出版社,1983,64-65.
- [2] 张伟华,张昊,李文忠,周心澄.青海大通中国沙棘人工林对土壤有机质和含氮量的影响.干旱区资源与环境,2005,19(1):154-158.
- [3] Ruan C J, Rumpunen K, Nybom H. Advances in improvement of quality and resistance in a multipurpose crop: sea buckthorn. Critical Reviews in Biotechnology, 2013, 33(2): 126-144.
- [4] 胡建忠.沙棘的生态经济价值及综合开发利用技术.郑州:黄河水利出版社,2000:240-240.
- [5] 廉永善.沙棘属植物生物学和化学.兰州:甘肃科学技术出版社,2000:57-79.
- [6] 王清.中国沙棘适生立地条件调查研究.青海农林科技,2009,(3):62-63.
- [7] 陈学林,马瑞君,孙坤,廉永善.中国沙棘属种质资源及其生境类型的研究.西北植物学报,2003,23(3):451-455.
- [8] 吕荣森.沙棘在中国西部生态环境建设中的作用.沙棘,2003,16(1):3-7.

- [9] 潘志辉. 不同品种沙棘种子特性的比较. 安徽农学通报, 2013, 19(14): 29-31.
- [10] 陈文思, 朱清科, 刘蕾蕾, 马欢, 赵维军, 王瑜. 陕北半干旱黄土区沙棘人工林的死亡率及适宜地形因子. 林业科学, 2016, 52(5): 9-16.
- [11] 惠兴学, 洪新, 于欣, 张立霞. 辽西地区沙棘退化林分的修复与前景. 国际沙棘研究与开发, 2009, 7(4), 24-27, 31-31.
- [12] 张增悦, 姜准, 李甜江, 肖智勇, 李根前. 毛乌素沙地中国沙棘人工林早衰原因与特点. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 1-6.
- [13] 周章义. 内蒙古鄂尔多斯市东部老龄沙棘死亡原因及其对策. 沙棘, 2002, 15(2): 7-11.
- [14] 李秀寨, 李根前, 韦宇, 贺斌. 中国沙棘大面积死亡原因的探讨. 沙棘, 2005, 18(1): 24-28.
- [15] 唐翠平, 乌拉, 袁思安, 郭峰, 李根前, 尤燕. 沙棘人工林早衰及其更新复壮. 西北林学院学报, 2014, 29(5): 47-52.
- [16] Gaston K J. The structure and dynamics of geographic ranges. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [17] Lambers H, Chapin III F S, Pons T L. Plant physiology ecology. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2008: 1-9.
- [18] 张晓玮, 王婧如, 王明浩, 杨毅, 赵长明. 中国云杉属树种地理分布格局的主导气候因子. 林业科学, 2020, 56(4): 1-11.
- [19] 陈学林, 廉永善. 沙棘属植物的分布格局及其成因. 沙棘, 2007, 20(4): 1-5.
- [20] 顾恒, 张浩, 陈雏, 刘显波. 青藏高原中国沙棘的资源分布格局及其影响因素. 国际沙棘研究与开发, 2008, 6(3): 10-16.
- [21] 侯霄, 卫罡, 李晓艳, 尤利霞, 李宋玲, 郑津英. 山西沙棘资源及生境初步分析. 国际沙棘研究与开发, 2014, (4): 27-29, 37-37.
- [22] 代光辉, 李根前, 李甜江, 李孙玲, 肖智勇. 水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 1-8.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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): 5232-5240.
- [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] 厉静文, 郭浩, 王雨生, 辛智鸣, 吕永军. 基于 MaxEnt 模型的胡杨潜在适生区预测. 林业科学, 2020, 55(12): 133-139.
- [28] 郭飞龙, 徐刚标, 卢孟柱, 孟艺宏, 袁承志, 郭恺琦. 基于 MaxEnt 模型分析胡杨潜在适宜分布区. 林业科学, 2020, 56(5): 184-192.
- [29] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [30] 李旻辉, 刘勇, 廉永善, 肖培根. 沙棘. 北京: 中国医药科技出版社, 2016: 63-76.
- [31] 刘增文, 高国雄, 吕月玲, 李骁. 不同立地条件下沙棘种群生物量的比较与预估. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(1): 37-41.
- [32] 李根前, 赵一庆, 唐德瑞, 聂向东. 毛乌素沙地中国沙棘生长过程与水土条件的关系. 西北林学院学报, 1999, 14(1): 10-15.
- [33] 金争平, 李永海, 温秀凤, 顾玉凯, 金书源, 郭海. 干旱对中国沙棘人工生态林果实产量的影响. 国际沙棘研究与开发, 2006, 4(2): 31-36.
- [34] 廉永善, 陈学林, 郭建魁. 甘肃省的沙棘资源及开发设想. 林业科学, 1989, 25(1): 82-85.
- [35] 李海涛, 梁涛, 朱璐平, 徐双民, 程火孙. 中国沙棘在中国亚热带低海拔地区引种驯化试验的初步观察. 中国农学通报, 2011, 27(16): 65-69.
- [36] 田良才, 徐宏英, 张明仪. 中国沙棘种子化学成分, 吸水力, 发芽温度的分析与研究. 沙棘, 1990, (3): 28-31.
- [37] 孙坤, 吕小旭, 苏雪, 王瑞雪, 侯勤正. 不同温度下中国沙棘种子的萌发策略. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 84-87.
- [38] Greenberg C H, Smith L M, Levey D J. Fruit fate, seed germination and growth of an invasive vine: an experimental test of 'sit and wait' strategy. Biological Invasions, 2001, 3(4): 363-372.
- [39] 欧阳林男, 陈少雄, 刘学锋, 何沙娥, 张维耀. 赤桉在中国的适生地理区域及其对气候变化的响应. 林业科学, 2019, 55(12): 1-11.
- [40] 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.
- [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] 吴帅. 中国沙棘种源抗旱性综合评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.