

DOI: 10.5846/stxb201906111232

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.

Zhang H, Zhao H X, Wang H. Potential geographical distribution of *populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on Maxent model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6552-6563.

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

张 华*, 赵浩翔, 王 浩

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 胡杨(*Populus euphratica*) 是全世界干旱和半干旱区急需优先保护的林木基因资源, 预测未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布将为胡杨种群资源的保护和管理提供科学依据, 并为绿洲恢复过程中胡杨的合理种植和配置提供有价值的理论指导。基于胡杨在中国地区的 92 条有效分布记录和 10 个环境因子变量, 利用 Maxent 模型和 ArcGIS 软件预测了未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布, 综合环境因子变量贡献率及置换重要值、刀切法检验评估制约现代胡杨潜在地理分布的重要因子, 采用响应曲线确定环境因子变量的适宜区间, 定量确定胡杨未来受威胁的潜在地理分布区域和面积。结果表明: (1) Maxent 模型的预测准确度极高, 受试者工作曲线面积(AUC 值)达 0.932, 现代胡杨潜在地理分布的总适生区面积为 $289.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要位于内蒙古中西部地区(额济纳旗和阿拉善地区)、新疆大部分地区、甘肃北部和西北部地区、青海中西部地区和宁夏北部地区; (2) 影响胡杨的潜在地理分布的主要环境因子变量为气温因子变量(年均温和最冷月最低温)和降水因子变量(最湿月降水量和最干季降水量), 最湿月降水量是影响胡杨潜在地理分布的关键因素; (3) 在未来 4 种气候变化情景下, 胡杨不同等级潜在地理分布区的面积较现代潜在地理分布区面积均有不同程度的缩小, 且整体上看胡杨的潜在地理分布区有向高海拔区域迁移的趋势。

关键词: 胡杨; 气候变化; Maxent 模型; 地理分布

Potential geographical distribution of *populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on Maxent model

ZHANG Hua*, ZHAO Haoxiang, WANG Hao

College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: *Populus euphratica* is a forest genetic resource that is urgently needed to be protected in arid and semi-arid regions of the world. Predicting the potential geographical distribution of *Populus euphratica* in China under the future climate change scenario will provide a scientific basis for the protection and management of *Populus euphratica* population resources. It also provides valuable theoretical guidance for the rational planting and allocation of *Populus euphratica* in the process of oasis restoration. Based on 93 effective distribution records and 10 environmental factor variables of *Populus euphratica* in China, the potential geographical distribution of *Populus euphratica* was predicted by Maxent model and ArcGIS software. Combined with the contribution rate of environmental factor variables and the important value of replacement, the knife cutting method was used to test and evaluate the important factors restricting the modern potential geographical distribution of *Populus euphratica*, and the response curve was used to determine the suitable range of environmental factor variables. The quantitative determination of potential geographical distribution and area of *Populus*

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461011); 兰州市人才创新创业项目(2019-RC-105)

收稿日期: 2019-06-11; **网络出版日期:** 2020-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghua2402@163.com

euphratica threatened in the future. The results show that (1) the prediction accuracy of the Maxent model is extremely high, and the work curve area (AUC value) of the subject is 0.932. The total suitable area of the modern potentially geographical distribution of *Populus euphratica* is $289.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, mainly located in the central and western regions of Inner Mongolia (Ejina Banner and Alashan Region), most of Xinjiang, northern and northwestern Gansu, central and western Qinghai, and northern Ningxia. (2) The main environmental factor variables affecting the potential geographical distribution of *Populus euphratica* are temperature factor variable (annual average temperature and coldest monthly lowest temperature) and precipitation. The factor variables (the wettest monthly precipitation and the driest season precipitation) and the wettest monthly precipitation is the key factor affecting the potential geographical distribution of *Populus euphratica*. (3) Under the next four climate change scenarios, the area of potential geographical distribution of different grades of *Populus euphratica* will be smaller than that of modern potential geographical distribution, and on the whole, the potential geographical distribution of *Populus euphratica* tends to migrate to the high altitude area.

Key Words: *Populus euphratica*; climate change; Maxent model; geographical distribution

植被对气候变化的响应一直是全球变化和生物地理学研究的热点问题^[1]。气候被认为是在区域和全球范围内影响物种和植被分布最重要的环境因子,气候变化对生物多样性和物种分布范围有着巨大的影响^[2]。20 世纪以来,受人类干扰以及自然因素的影响,全球气候变化以变暖为主要特征。IPCC 第一工作组第五次评估报告表明:全球地表持续升温,1885—1990 年平均气温和 2003—2013 年平均气温相差 0.78°C ,全球平均气温在 2016—2035 期间相较于 1986—2005 年,可能升高 $0.3\text{—}0.7^\circ\text{C}$ ^[3]。随着全球气候变暖,物种的潜在地理分布可能会发生较大改变,所以研究物种的潜在地理分布对未来气候变化的响应以及预测未来气候变化情景下物种的潜在地理分布的变化,对制定生物多样性保护策略具有非常重要的作用^[4-5]。

物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)已被广泛应用于研究气候变化对物种潜在地理分布的影响,利用最高温度、最低温度、相对湿度、降雨量和其他环境因素可以推断物种的潜在地理分布^[6-8]。Maxent 模型是基于环境变量图层和物种分布记录,并以机器学习和最大熵原理为基础对物种的潜在地理分布进行模拟的一种生态位模型。该模型具有许多优点,例如,Maxent 模型依据物种分布点进行建模,在物种分布点数量不定和环境变量之间相关性不明确的情况下预测效果较好,非常适用于物种分布建模^[9-11]。该模型作为一种能对物种未来潜在地理分布预测的定量化分析工具,具有较广的应用范围,不仅包括了狭义范围内的濒危物种^[12]和入侵物种^[13]等,而且包括广义上的珍稀动物的适宜生境^[14]和森林破坏^[15]等生态退化过程,即时在物种分布记录较少(<20)的情况下也有着准确的预测结果^[16]。Elith 等^[17]运用 16 种生态位型对 226 个物种的潜在地理分布进行了预测,结果表明 Maxent 模型的预测结果相对于其他生态位模型更加精确。王运生等^[18]应用了 5 种生态位模型对植物病原线虫—相似穿孔线虫(*Radopholus similis*)在中国的潜在地理分布进行了预测,并且对 5 种模型的预测结果进行了比较分析,结果表明 Maxent 模型具有稳定性和扩展性。基于 Maxent 最大熵模型和 ArcGIS 对物种的潜在地理分布进行预测,可以对气候变化给生物多样性带来的潜在风险进行预测,从而能使科学家和决策者能提出相应的策略来降低气候变化对生物多样性造成的影响^[19]。

胡杨(*Populus euphratica*)是杨柳科杨属中最原始、最古老的落叶中型天然乔木,是荒漠地区特有的珍贵树种^[20],该物种适应中国西北干旱区的大陆性气候,已成为抵御风沙、遏制沙漠化、保护生物多样性和维护干旱区生态平衡的重要屏障,是我国内陆荒漠河岸植被中重要的建群种和表征种^[21]。联合国粮农组织(FAO)在 1993 年召开的林木基因资源专组例会上,将胡杨确定为全世界干旱和半干旱区急需优先保护的林木基因资源^[22]。目前,国内对胡杨的研究大多集中在对其种群分布格局、生理生化等方面,对胡杨的潜在地理分布区的研究较少^[23-24]。本研究通过收集和筛选胡杨物种地理分布信息,结合相关环境数据,利用 Maxent 模型和 ArcGIS 软件的空间分析技术对在不同气候条件下胡杨在中国的潜在地理分布变化进行预测,旨在研究以下问题:(1)现代气候条件下胡杨在中国的潜在地理分布,并以此为依据探究胡杨在中国的潜在地理分布与环

境因子的关系,探讨限制胡杨潜在地理分布的重要环境因子;(2)未来气候变化情景下,胡杨在中国的潜在地理分布区的变化和几何中心的转移。研究结果可为绿洲恢复过程中胡杨的合理种植和配置提供科学理论依据。

1 数据和方法

1.1 物种分布数据

通过检索中国数字标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、全球生物多样性信息平台(<http://www.gbif.org>)等相关网站,共收集胡杨种群在中国的自然分布记录 663 条,其中大部分标本记录缺乏精确的地理坐标,本研究根据标本记录的位置信息结合谷歌地球(<http://ditu.google.cn>)确定经度和纬度,并且去除了描述不够具体和经纬度重复的分布点。最终得到全面且准确的 92 个分布记录(图 1),将样本的经纬度坐标存储在 Excel 数据库中,并转换成 csv 格式,用于建立 Maxent 模型。

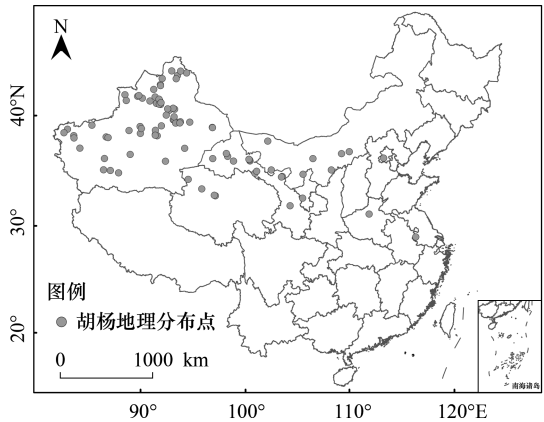


图 1 胡杨在中国的分布点数据

Fig.1 Distribution data of *Populus euphratica* in China

1.2 环境变量数据来源及预处理

本研究所用的现代气候数据(1970—2000 年)来源于世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>),未来气候数据(2060—2080 年)采用在中国具有较强模拟能力的 CCSM4 模式^[25],该模式包括 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次排放报告^[3]中的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 四种排放情景(表 1),本研究选用了其中 19 个生物气候变量(表 2),数据分辨率为 2.5'。

表 1 四种排放情景^[26]

Table 1 Four emission scenarios^[26]

情景 Emission	描述 Description
RCP8.5	辐射强迫上升至 8.5 W/m ² ,2100 年 CO ₂ 当量浓度达到约 1370 mL/m ³
RCP6.0	辐射强迫稳定在 6.0 W/m ² ,2100 年后 CO ₂ 当量浓度稳定在约 850 mL/m ³
RCP4.5	辐射强迫稳定在 4.5 W/m ² ,2100 年后 CO ₂ 当量浓度稳定在约 650 mL/m ³
RCP2.6	辐射强迫在 2100 年之前达到峰值,到 2100 年下降到 2.6 W/m ² ,CO ₂ 当量浓度峰值约 490 mL/m ³

RCP: 典型浓度路径 Representative Concentration Pathways

表 2 19 个生物气候变量

Table 2 19 bioclimatic variables

指标 Index	描述 Description	指标 Index	描述 Description
Bio1	年平均气温	Bio11	最冷季平均温度
Bio2	平均气温日较差	Bio12	年降雨量
Bio3	等温性	Bio13	最湿月降水量
Bio4	温度季节性变化标准差	Bio14	最干月降水量
Bio5	最热月最高温	Bio15	降水量季节性变异性系数
Bio6	最冷月最低温	Bio16	最湿季降水量
Bio7	温度年较差	Bio17	最干季降水量
Bio8	最湿季平均温度	Bio18	最热季降水量
Bio9	最干季平均温度	Bio19	最冷季降水量
Bio10	最热季平均温度		

Bio:生物气候 Bioclimatic

本研究所用的地下水数据来源于中国生态系统研究网络(CERN, Chinese Ecosystem Research Network)34个台站采用人工或自动记录方法观测的2005—2014年地下水深度数据^[27],在ArcGIS 10.2中运用反距离权重法(IDW, Inverse Distance Weighted)对该数据进行插值,最终得到分辨率为2.5'的中国地下水数据深度分布图。

将经过预处理的19个现代生物气候变量数据、和地下水数据导入Maxent软件中,使用刀切法测试环境因子变量的重要性,运行3次,最终选取10个累计贡献率大于90%的环境因子变量用于胡杨潜在地理分布的预测(表3)。

表 3 参与运算的环境因子变量
Table 3 Environmental variables in Maxent model

指标 Index	描述 Description	指标 Index	描述 Description
Bio1	年均温	Bio7	温度年较差
Bio2	平均气温日较差	Bio13	最湿月降水量
Bio3	等温性	Bio15	降水量季节性变异系数
Bio4	温度季节性变化标准差	Bio17	最干季降水量
Bio6	最冷月最低温	GW-depth	地下水埋深

GW:地下水 Ground Water

1.3 矢量图及模型来源

1:100万中国行政区划图来源于国家基础地理信息系统网站(<http://nfgis.nsdi.gov.cn>)。Maxent V3.4.1版下载于网站(http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/Maxent/)。本文所用的ArcGIS软件版本为10.2版。

1.4 最大熵模型的构建

将胡杨的地理分布数据和环境变量数据导入Maxent软件中,进行建模运算,模型参数设置为:选择25%分布点作为测试集,75%分布点作为训练集,采用交叉验证方法(Crossvalidate,即将物种分布数据随机平均分成10份,每次选取其中1份最为测试集,其实9份选取作为训练集,重复运行10次,数据利用率较高),默认设置最大迭代次数为500次,最大背景点数量为10000个,其余选择默认设置,最终输出的ASCII结果文件是10次重复的平均值^[28]。将结果文件导入ArcGIS 10.2软件中,结合空间分析工具(spatial analyst tools)中的重分类命令(reclassify),利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)将适宜度分为4个等级^[29]:不适生区(0—0.08),低适生区(0.08—0.26),高适生区(0.26—0.51),最适生区(0.51—0.95),从而得到胡杨在中国的潜在地理分布区。

1.5 模型精度评价

使用接受者操作特征曲线(ROC, Receiver Operating Characteristic Curve)进行模拟预测效果检验,取曲线下的面积值(AUC, area under curve)作为模型预测衡量标准,该曲线把预测结果的每一个值作为可能的判断阈值,通过计算得到了相应的灵敏度和特异度,以假阳性率(1—特异度)为横坐标,以真阳性率(灵敏度)作为纵坐标,由于AUC值不受判断阈值影响,可以用来比较不同模型,因此成为目前最佳的模型预测准确度衡量指标。AUC的取值范围为0—1,取值越大表示与随机分布相距越远,预测的效果就越好,评估标准为:0.7—0.8较准确,0.8—0.9很准确,0.9—1.0极准确^[30]。

1.6 环境变量的重要性评估

利用Maxent模型运行得出的贡献率、置换重要值和刀切法(Jackknife)检验对限制胡杨在中国潜在地理分布的环境变量重要性进行评估,Maxent模型可以模型中贡献率高的环境变量进行追踪,然后通过对比单一要素进行逐步修正来提高增益值,然后将增益值分配给该要素依赖的环境变量,并以百分比的形式给出。环境变量的贡献率以百分比的形式表示,置换重要值是由该环境变量在训练点(存在点,背景点)中的随机置换值和由此导致的AUC值的下降幅度来决定,AUC值的降幅大小表明着该变量对模型的依赖程度^[32]。刀切法

(Jackknife) 检验通过依次使用和排除某一环境变量以及使用所有环境变量对模型进行创建,通过提供正规化训练增益、测试增益和 AUC 值 3 种检验结果来衡量环境变量的重要性。

2 结果与分析

2.1 胡杨潜在地理分布的影响因子

根据 Maxent 模型模拟的预测结果,ROC 曲线训练集的 AUC 值为 0.932,测试集的 AUC 值为 0.931,说明使用 Maxent 模型预测胡杨在中国的潜在地理分布模拟精度非常准确,获得的 ROC 曲线如图 2 所示。

用于 Maxent 模型预测的 10 个环境因子变量中,贡献率排前三位的环境因子变量依次为:最湿月降水量 (Bio13, 51%), 年均温 (Bio1, 9.1%), 最干季降水量 (Bio17, 8.8%), 累计贡献率为 68.9%;置换重要值(置换重要值是随机置换掉每个环境因子变量在训练存在和背景数据上的数值,值越大表明模型对该变量的依赖性更强)排前三位的环境因子变量为:年均温 (Bio1, 36.3%), 最湿月降水量 (Bio13, 33.1%), 最冷月最低温 (Bio6, 11.7%), 累积值为 81.1%(表 4)。

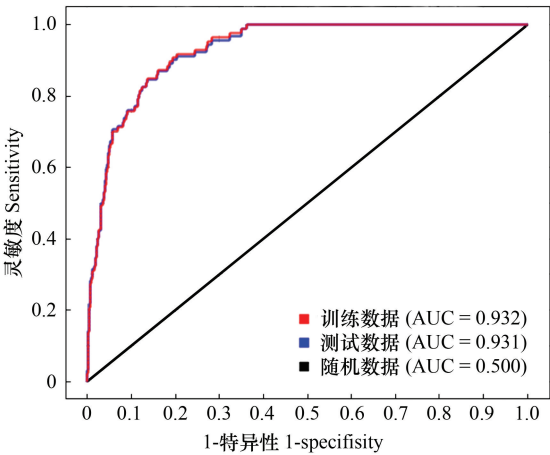


图 2 胡杨 Maxent 模型的接受者操作特性曲线
Fig.2 Receiver operating characteristic curve of *Populus euphratica* Maxent model
AUC:曲线下的面积值 Area Under Curve

表 4 环境变量及其贡献率和适宜区间

Table 4 Environmental variables and their contributions and suitable value ranges			
指标 Index	贡献率 Percent contribution/%	置换重要值 Permutation importance/%	适宜区间 Suitable range
Bio13	51	33.1	3—38 mm
Bio1	9.1	36.3	7.5—25.8 ℃
Bio17	8.8	6.1	0—30 mm
Bio15	8.4	0.7	23%—87%, 108%—151%
Bio6	7	11.7	—38.3—15 ℃
Bio4	6.5	4.1	810—1490 ℃
Bio2	4.5	3.3	4.7—14.1 ℃
Bio3	3.3	0	15.0%—51.5%
Bio7	1	2.6	13.7—51.0 ℃
GW—depth	0.4	2	0.4—16 m

由刀切法 (Jackknife) 检验结果 (图 3) 可知:仅使用单一环境因子变量时,对正规化训练增益影响最大的三个环境因子变量为:最湿月降水量 (Bio13), 年均温 (Bio1), 最冷月最低温 (Bio6), 表明这些环境因子变量包含其他环境因子变量不具有的信息。综合来看,影响现代胡杨潜在地理分布的主要因子为:气温因子变量 (年均温和最冷月最低温) 和降水因子变量 (最湿月降水量和最干季降水量)。

可以根据环境因子变量响应曲线来判断胡杨的存在概率与环境因子之间的关系 (图 4), 当胡杨的存在概率大于 0.5 时,其对应的环境因子值有利于胡杨的生长。

最湿月降水量 (贡献率 51%, 置换重要值 33.1%) 在 3 mm 时胡杨的存在概率最高 (0.74), 随着降水量增加, 胡杨的存在概率开始下降, 在 38 mm 左右时生存概率开始降低到 0.5 以下, 所以适合胡杨生长的最湿月降水量适宜范围为: 3—38 mm。

年均温 (贡献率 9.1%, 置换重要值 36.3%) 在约 7.5℃ 以下时胡杨的生存概率在 0.5 以下。随着年均温的

增高,胡杨的生存概率开始增高,在 17.5℃时达到最大值(0.9),随后增加至 25.8℃时达到胡杨生存概率的临界值,温度上升过程中存在概率呈稳定不变状态。所以适合胡杨生长的年均温范围为:7.5—25.8℃。

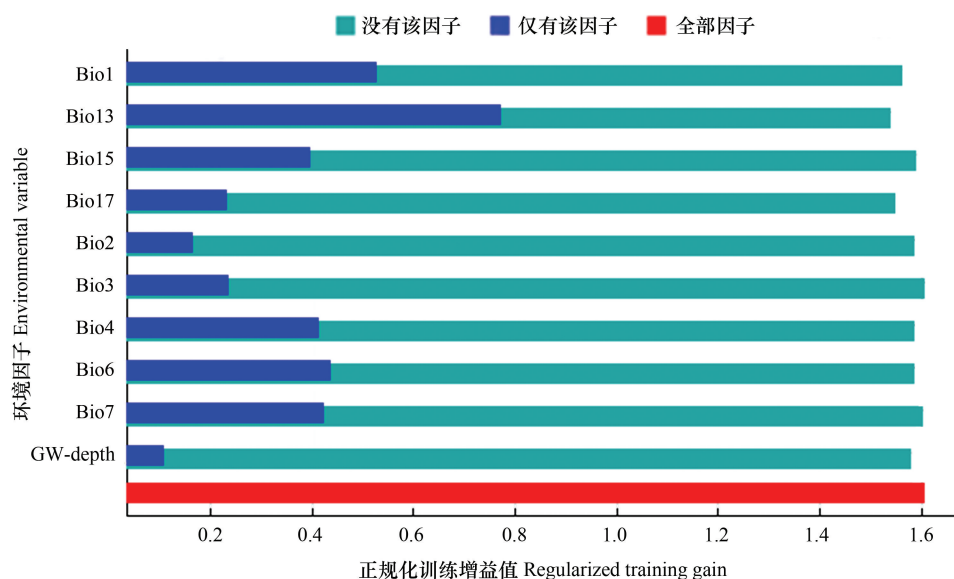


图3 胡杨环境因子刀切法检验结果

Fig.3 The jackknife test result of environmental factor for *Populus euphratica*

GW:地下水 Ground water

最干季降水量(贡献率 8.8%,置换重要值 6.1%)从 0 mm 开始,胡杨的生存概率开始迅速增加,达到约 5 mm 时,生存概率达到最大值(0.57),随后生存概率开始迅速下降,在最干季降水量约 30 mm 时,生存概率降低到 0.5,所以适合胡杨生长的最干季降水量范围为:0—30 mm。

最冷月最低温(贡献率 7%,置换重要值 11.7%)从-38.3℃开始,胡杨是生存概率迅速增加,在约-28℃时达到最大值(0.78),随后开始下降,在约-15℃时胡杨的生存概率降低到 0.5,所以适合胡杨生长的最冷月最低温范围为:-38.3—-15℃。其他适宜胡杨生长的环境因子变量范围见表 3。

2.2 胡杨在现代气候条件下的潜在分布区

经 Maxent 模型运算模拟出胡杨在现代气候条件下的潜在地理分布区(图 5),在 92 个胡杨有效分布记录的存在概率逻辑值中,最高逻辑值为新疆吐鲁番市托克逊县(0.90),最低逻辑值为新疆且末县(0.05),平均逻辑值为 0.55。胡杨在现代气候下的潜在分布区主要位于中国的北部地区和西北部地区,北部地区主要分布在内蒙古中西部地区,西北部地区主要分布在新疆大部分地区、甘肃北部和西北部地区、青海中西部地区和宁夏北部地区。

胡杨最适生区面积为 $40.71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 4%(表 5),胡杨最适生分布区主要位于新疆哈密地区、塔里木河流域、和田河流域、乌苏和乌尔禾等地区,甘肃的祁连山、酒泉和民勤等地区 and 青海的格尔木地区;胡杨高度适生区面积为 $90.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要位于内蒙古的额济纳旗和阿拉善地区、新疆的阿勒泰地区、额尔齐斯河流域和叶尔羌河流域, 占中国总面积的 9%(表 4);胡杨总适生面积为 $289.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 30%(表 5)。从 Maxent 模型预测结果分析,胡杨的潜在地理分布范围远大于胡杨的现代地理分布范围(图 1,图 5)。

2.3 气候变化对胡杨潜在地理分布的影响预测

本研究利用 Maxent 模型预测了在现代气候条件下和 2070 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 四种排放情景下胡杨的潜在地理分布,从而得到了胡杨在中国的潜在地理分布区(图 6)和不同气候条件下胡杨不同潜在地理分布等级的面积(表 5)。

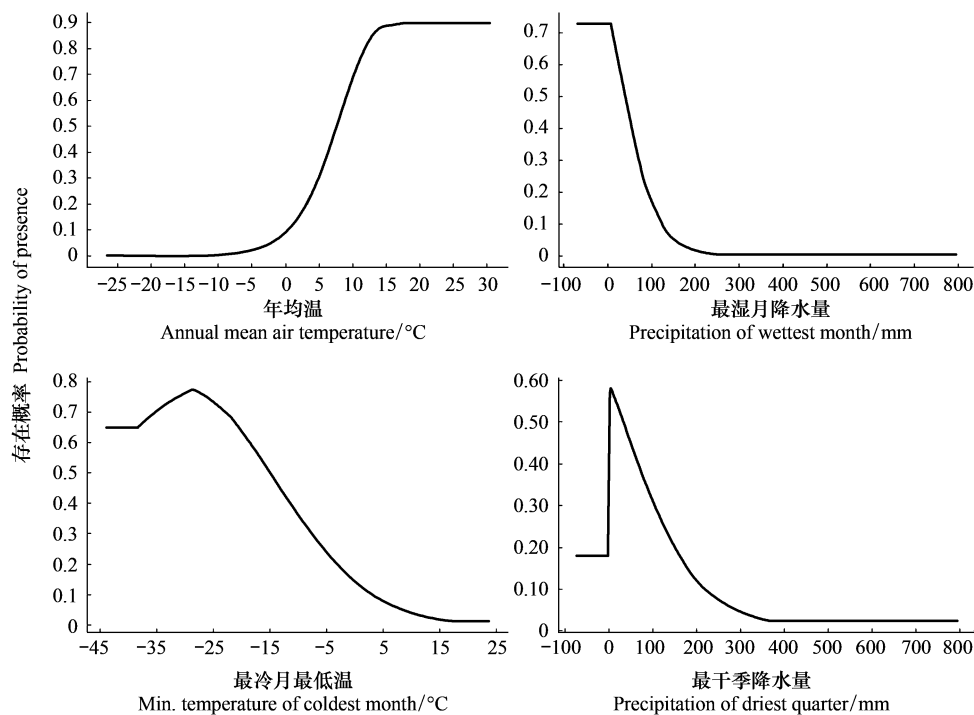


图 4 胡杨存在概率对主要气候因子的响应曲线

Fig.4 Response curves of existence probability of *Populus euphratica*

表 5 不同时期胡杨各适生区面积/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 5 Suitable areas for <i>Populus euphratica</i> under different climate change scenarios				
时期 Period	最适生区面积 Most suitable area	高适生区面积 Highly suitable area	低适生区面积 Marginally suitable area	总适生区面积 Total suitable area
现代 Present	40.71	90.22	159.12	289.94
2070 年 RCP2.6	19.70	38.77	63.34	121.81
2070 年 RCP4.5	18.16	40.64	66.48	125.28
2070 年 RCP6.0	26.59	34.00	65.23	125.82
2070 年 RCP8.5	17.35	33.87	74.71	125.93

由表 5 可知,在 2070 年 RCP2.6 排放情景下,胡杨的最适生面积为 $19.7\times 10^4 \text{ km}^2$;高适生面积为 $38.77\times 10^4 \text{ km}^2$;胡杨的总适生面积为 $121.81\times 10^4 \text{ km}^2$ 。较现代气候条件下胡杨的最适生面积、高适生面积和总适生面积分别减少了 $21.01\times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $49.58\times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $168.13\times 10^4 \text{ km}^2$ 。

在 2070 年 RCP4.5 排放情景下胡杨的最适生面积为 $18.16\times 10^4 \text{ km}^2$;高适生面积为 $40.64\times 10^4 \text{ km}^2$;总适生面积为 $125.28\times 10^4 \text{ km}^2$ 。较现代气候条件下胡杨的最适生面积、高适生面积和总适生面积分别减少了 $22.55\times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $49.58\times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $164.66\times 10^4 \text{ km}^2$ 。

在 2070 年 RCP6.0 排放情景下胡杨的最适生面积为 $26.59\times 10^4 \text{ km}^2$;高适生面积为 $34.00\times 10^4 \text{ km}^2$;总适生面积为 $125.82\times 10^4 \text{ km}^2$ 。较现代气候条件下胡杨的最适生面积、高适生面积和总适生面积分别减少了 $14.12\times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $56.22\times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $164.12\times 10^4 \text{ km}^2$ 。

在 2070 年 RCP8.5 排放情景下胡杨的最适生面积为 $17.35\times 10^4 \text{ km}^2$;高适生面积为 $33.87\times 10^4 \text{ km}^2$;总适生面积为 $125.93\times 10^4 \text{ km}^2$ 。较现代气候条件下胡杨的最适生面积、高适生面积和总适生面积分别减少了 $23.36\times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $56.35\times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $164.01\times 10^4 \text{ km}^2$ 。

在 2070 年 RCP6.0 排放情景下胡杨的最适生面积最大;在 2070 年四种排放情景下胡杨的总适生面积均

相互接近,胡杨的潜在地理分布区和几何中心逐渐向高海拔地区(中国西北地区)转移,胡杨的最适生区、高适生区和总适生区的面积均有所减少。

3 讨论与结论

3.1 气候因子对现代胡杨潜在地理分布的制约

Maxent 模型预测分析结果表明:限制胡杨潜在地理分布的重要环境因子为气温和降水因子。刘普幸等^[31]研究胡杨生长季对气候变化的响应表明:90 年代以后酒泉绿洲的胡杨林生长期终日显著推迟,并在 21 世纪初达到近 56a 以来的顶峰,表明胡杨对 21 世纪全球气候变暖的信号有着强烈的响应。刘树宝^[32]研究降水对黑河下游胡杨水分来源的影响表明:胡杨幼苗降雨前对 0—30 cm 的土壤水利用比例高达 88%—90%,对地下水的利用最高仅仅为 10%;降雨后对降水的利用

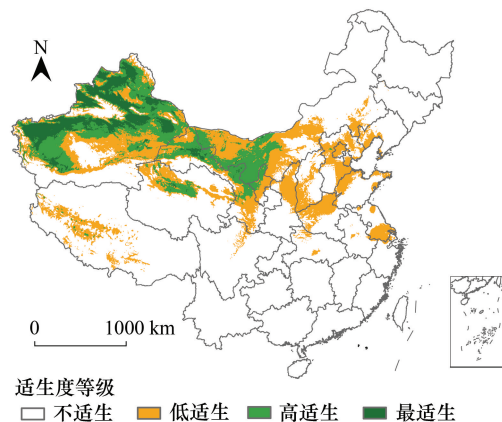


图 5 现代气候条件下胡杨的潜在地理分布

Fig.5 Potential geographical distribution of *Populus euphratica* under modern climate conditions

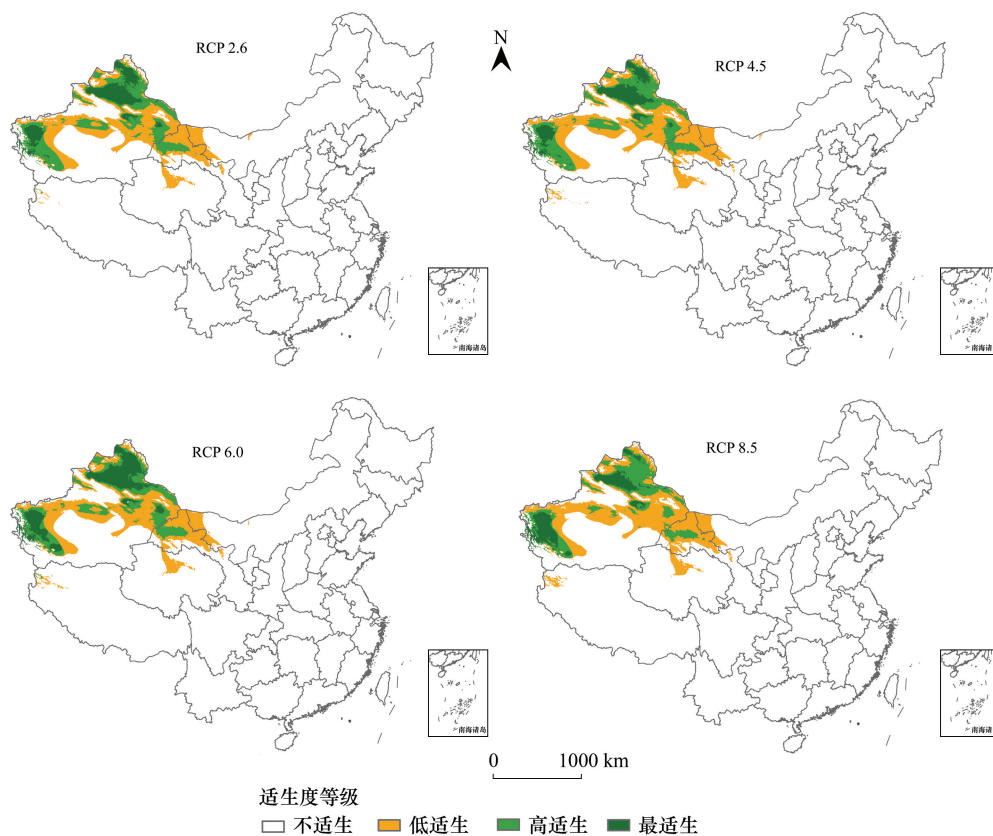


图 6 未来气候变化情景下胡杨的潜在地理分布

Fig.6 Potential geographical distribution of *Populus euphratica* under future climate change scenarios

最高达 60%,可见降雨对胡杨的幼苗影响较大。

本研究中限制胡杨生长的重要环境因子变量:最湿月降水量、年均温和最干季降水量。张晓芹^[33]对西北干旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究表明胡杨的潜在地理分布明显受到与水文相关气候因子的影响,由于西北干旱区降水的胁迫性往往比温度的胁迫性更突出,而胡杨主要分布在西北干旱区,所以胡

杨的潜在地理分布更依赖降水相关的环境因子变量。气温的变化对植被带的纬向迁移有重要的影响,在不考虑水分的限制条件下,随着全球气候变暖,植物生长受热量限制的地区将会增多,对植物的生长会产生影响^[34],这说明虽然降水因子对胡杨潜在地理分布的影响要大于气温因子,但是在制约胡杨潜在地理分布的因素中,气温也起着不可忽视的作用。

其他环境因子变量如:未来的土壤和植被覆盖等数据对胡杨的潜在地理分布变化也有影响,由于未来时期的土壤和植被覆盖数据难以获取,未加入对胡杨潜在地理分布的预测,所以本研究得到的潜在地理分布部分可能不适合胡杨的种植,在实际应用时必须结合当地的土壤和水文地质条件,但是本研究结果是宏观规划的第一步,对绿洲恢复过程中胡杨的合理种植至关重要。

3.2 未来气候变化情景下胡杨潜在地理分布区的变化

本研究利用未来气候情景下 4 种不同排放情景的环境因子变量结合现代气候条件,利用 Maxent 模型预测了在未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布的变化(图 7),预测结果表明:2070 年四种排放情景下与现代气候条件下胡杨的潜在地理分布相比,胡杨的潜在地理分布呈面积减少和破碎化特点,内蒙古中部地区胡杨的潜在地理分布完全丧失,位于中、低海拔的潜在地理分布区适宜度降低或者基本消失。在 2070 年 RCP2.6 排放情景下,胡杨最适生区主要位于新疆的吉木乃、阿勒泰、乌尔禾、吐鲁番、哈密、叶尔羌河流域和克拉玛依等地区,高适生区主要位于新疆西部大部分地区、西北部的和田河流域等地区,哈密地区也有少量胡杨高适生区分布,胡杨在塔里木河流域的生存适宜度降低,在新疆北部地区最适生面积减少,在 2070 年 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 排放情景下胡杨的最适生区和高适生区分布范围与 RCP2.6 排放情景下接近;在 2070 年 RCP4.5 排放情景下新疆克拉玛依地区最适生区面积减少,较现代气候条件下新疆西南部和西北部地区的胡杨生长适宜度降低,李文庆等^[35]利用 Maxent 模型分析了四子柳在不同气候情景下的亚洲潜在地理分布格局变化,结果表明:在 RCP2.6 和 RCP8.5 排放情景下四子柳的潜在地理分布在未来存在丧失的风险,本研究结论与之接近;在 2070 年 RCP6.0 排放情景下新疆塔城和吉木乃地区的胡杨生长适宜度降低,白碱滩和乌尔禾地区的胡杨生长适宜度增高,胡杨潜在地理分布消失区范围在 2070 年 4 种排放情景下最大;在 2070 年 RCP8.5 排放情景下胡杨的潜在地理分布区范围和胡杨潜在地理分布稳定区与 RCP2.6 和 RCP6.0 接近,最适生区和增加区范围最大。杜鹃花在未来气候变化情景下潜在地理分布范围将会缩小,并且几何中心将向中国西北方向转移^[36],本文研究结论与之基本一致。中国在 RCP8.5 排放情景下增加的降水量要高于低浓度排放情景下增加的降水量^[37],这表明高浓度排放情景下增加的降水量能降低或者解决降水因子对物种分布的限制,在低浓度排放情景下增加的降水量不能降低或解决降水因子对物种分布的限制,反而会随着全球变暖导致可供物种吸收的有效水减少,所以在低浓度排放情景下位于沙漠边缘的物种潜在地理分布部分可能丧失,这可能也是在 RCP8.5 排放情景下胡杨的最适生区和增加区最大的原因。

Leng 等^[38]利用 Random Forest 模型分析了 IPCC 第四次评估报告(IPCC AR4)中三种排放情景下,随着未来气候变化,对中国东北地区 3 种落叶松的潜在地理分布产生的影响,结果表明:到 21 世纪末,未来气候变化情景下,3 种落叶松的潜在地理分布明显向高纬度地区移动,同时潜在地理分布范围将大大缩小;Flower 等^[39]利用 Bioclimatic Envelope 模型分析 IPCC AR4 中三种排放情景下加拿大不列颠省 3 种云杉和 1 种黄杉的潜在地理分布发生的变化,结果表明:未来气候变化情景下,4 种树种在加拿大不列颠省的潜在地理分布明显向高纬度和高海拔地区移动;Thuiller 等^[40]利用 Biomod 集合预测平台分析了 IPCC 第三次评估报告中四种排放情景下欧洲 1350 种植物的潜在地理分布发生的变化,结果表明:假设在物种不能进行自发扩散的条件下,到 21 世纪 80 年代,超过一半的研究对象会随着气候变化而变成受威胁物种(IUCN 标准 A3)。熊巧利等^[41]基于 Maxent 模型对西南地区高山植被对气候变化的响应进行了评估,结果表明:1960—2050 年研究区高山植被潜在地理分布的气候适宜性面积呈减少趋势。魏博等^[42]利用 Maxent 模型对裸木适宜分布区对未来气候变化情景的可能响应的研究结果表明:未来气候下,裸木在我国西北荒漠区的潜在地理分布将明显减少。上述研究结果表明:随着气候变暖,物种的现代潜在地理分布范围将会缩减,并且有着向高海拔地区迁移的趋

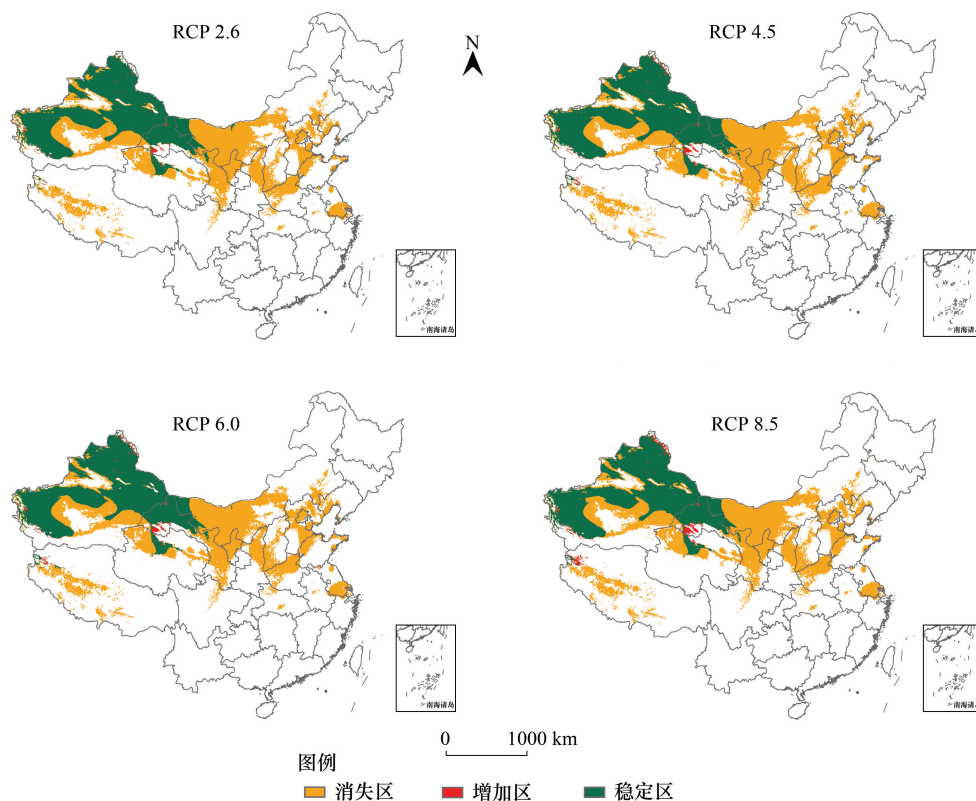


图 7 未来气候变化情景下胡杨的潜在地理分布区变化

Fig.7 Changes of potential geographical distribution of *Populus euphratica* under climate change scenarios in the future

势,本研究结论与之一致。本研究仅采用了 2060—2080 年这一个时间段的环境因子变量,因此,在今后气候变化情景下物种潜在地理分布的变化研究中,可以选择多研究时期,从而得出研究对象潜在地理分布总体的变化趋势。

3.3 结论

胡杨的现代气候条件下的潜在地理分布主要位于中国内蒙古中西部地区(额济纳旗和阿拉善地区)、新疆大部分地区、甘肃北部和西北部地区、青海中西部地区和宁夏北部地区,其中胡杨在新疆地区的潜在地理分布范围最大。胡杨在未来气候变化情景下,潜在分布区将显著缩小,并且向中国西北部地区迁移。限制胡杨生长的重要环境因子变量分别为:最湿月降水量、年均温和最干季降水量,适宜胡杨生长的环境因子变量范围为最湿月降水量为 3—38 mm、年均温为 7.5—25.8℃ 和最干季降水量为 0—30 mm。

综上所述,气候变暖对物种潜在地理分布的潜在影响主要表现为引起物种潜在地理分布区缩小及导致物种向高纬度、高海拔地区移动,胡杨在未来气候情景下的潜在分布区的缩小和转移也符合这一规律。

参考文献 (References):

- [1] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [2] 江泽慧. 全球变化背景下土地退化防治的挑战与创新发展. *世界林业研究*, 2013, 26(6): 1-4.
- [3] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [4] Williams J W, Jackson S T, Kutzbach J E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(14): 5738-5742.
- [5] 马松梅, 聂迎彬, 段霞, 余存生, 王荣学. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性. *生态学报*, 2015, 35(9): 2960-2966.
- [6] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, Howell C A, Snyder M A. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and

- uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(S2): 19729-19736.
- [7] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [8] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [9] Ahmed S E, Mcinerny G, O'Hara K, Harper R, Salido L, Emmott S, Joppa L N. Scientists and software-surveying the species distribution modelling community. *Diversity and Distributions*, 2015, 21(3): 258-267.
- [10] Barbosa F G, Schneck F. Characteristics of the top-cited papers in species distribution predictive models. *Ecological Modelling*, 2015, 313: 77-83.
- [11] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [12] Matyukhina D S, Miquelle D G, Murzin A A, Pikunov D G, Fomenko P V, Aramilev V V, Litvinov M N, Salkina G P, Seryodkin I V, Nikolaev I G, Kostyria A V, Gaponov V V, Yudin V G, Dunishenko Y M, Smirnov E N, Korkishko V G, Marino J. Assessing the influence of environmental parameters on Amur tiger distribution in the Russian far east using a Maxent modeling approach. *Achievements in the Life Sciences*, 2014, 8(2): 95-100.
- [13] 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 2014, 22(2): 182-188.
- [14] Hotta M, Tsuyama I, Nakao K, Ozeki M, Higa M, Kominami Y, Hamada T, Matsui T, Yasuda M, Tanaka N. Modeling future wildlife habitat suitability: serious climate change impacts on the potential distribution of the Rock Ptarmigan *Lagopus muta japonica* in Japan's northern Alps. *BMC Ecology*, 2019, 19(1): 23.
- [15] De Souza R A, De Marco Jr P. The use of species distribution models to predict the spatial distribution of deforestation in the western Brazilian Amazon. *Ecological Modelling*, 2014, 291: 250-259.
- [16] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 2009, 1(4): 94-98.
- [17] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J, R Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [18] 王运生, 谢丙炎, 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.
- [19] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 637-669.
- [20] 周婧. 利用 BIBAC 文库建立胡杨转化基因组学平台及鉴定胡杨耐盐基因(簇)的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [21] 韩路, 王海珍, 彭杰, 席琳乔, 马春晖. 塔里木河上游灰胡杨种群生存分析. *林业科学*, 2010, 46(1): 131-135.
- [22] 冯起, 司建华, 李建林, 席海洋. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 765-772.
- [23] 李亚飞, 于静洁, 陆凯, 王平, 张一驰, 杜朝阳. 额济纳三角洲胡杨和多枝怪柳水分来源解析. *植物生态学报*, 2017, 41(5): 519-528.
- [24] 郭彦龙, 李新, 赵泽芳, 卫海燕. 黑河流域胡杨适宜生境分布模拟. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 537-553.
- [25] Otto-Bliesner B L, Marshall S J, Overpeck J T, Miller G H, Hu A X, CAPE Last Interglacial Project Members. Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 2006, 311(5768): 1751-1753.
- [26] Van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G C, Kram T, Krey V, Lamarque J F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose S K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 5-31.
- [27] 朱治林, 唐新斋, 袁国富, 张心昱, 孙晓敏, 常学向, 程一松, 褚国伟, 戴冠华, 窦山德, 杜娟, 傅伟, 官有军, 郭永平, 何其华, 姜峻, 蒋正德, 来剑斌, 李猛, 李少伟, 李伟, 李小丽, 林静慧, 林永标, 刘文杰, 刘新平, 刘勇刚, 鲁志云, 路永正, 盛钰, 苏宏新, 唐家良, 杨风亭, 尹春梅, 张法伟, 张志山, 赵常明, 赵岩, 朱睦楠. 中国生态系统研究网络 2005 年—2014 年地下水位数据集(2005—2014 年). (2017-03-31) [2018-12-19]. <http://hdl.handle.net/21.86109/casearth.5c19a5630600cf2a3c557a26>.
- [28] 李垚, 张兴旺, 方发明. 小叶桉分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1164-1178.
- [29] 宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 韩淑梅, 钟云芳. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 946-954.
- [30] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(1988): 1285-1293.
- [31] 刘普幸, 朱小娟, 赵敏丽, 姚玉龙, 陈丽丽. 酒泉绿洲天然胡杨林主要生长季对全球气候变化的响应. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 101-108.
- [32] 刘树宝. 基于稳定同位素技术的荒漠河岸林胡杨水分来源研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.

- [33] 张晓芹. 西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究[D]. 咸阳: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [34] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001.
- [35] 李文庆, 徐洲锋, 史鸣明, 陈家辉. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测. 生态学报, 2019, 39(9): 3224-3234.
- [36] Yu F Y, Wang T J, Groen T A, Skidmore A K, Yang X F, Ma K P, Wu Z F. Climate and land use changes will degrade the distribution of *Rhododendrons* in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 515-528.
- [37] 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 刘士军, 童瑞, 周萌. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估. 水文, 2016, 36(4): 37-43.
- [38] Leng W F, He H S, Bu R C, Dai L M, Hu Y M, Wang X G. Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 420-428.
- [39] Flower A, Murdock T Q, Taylor S W, Zwiers F W. Using an ensemble of downscaled climate model projections to assess impacts of climate change on the potential distribution of spruce and Douglas-fir forests in British Columbia. *Environmental Science & Policy*, 2013, 26: 63-74.
- [40] Thuiller W, Lavorel S, Araújo M B, Sykes M T, Prentice I C. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(23): 8245-8250.
- [41] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 李同艳, 余岚. 基于 Maxent 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9033-9043.
- [42] 魏博, 孙芳芳, 马新, 黄婷婷, 马松梅. 荒漠濒危植物裸果木适宜分布区对未来气候变化情景的可能响应. 石河子大学学报: 自然科学版, 2019, 37(4): 490-497.