

DOI: 10.5846/stxb202003140544

汲玉河,周广胜,李宗善.气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性.生态学报,2023,43(8):3348-3358.

Ji Y H, Zhou G S, Li Z S. Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3348-3358.

气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性

汲玉河^{1,4}, 周广胜^{1,2,4,*}, 李宗善³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

4 中国气象科学研究院与郑州大学生态气象联合实验室, 郑州 450001

摘要:刺槐是黄土高原乡土树种,具有优良的水土保持和固碳功能。黄土高原生态恢复实践中实施了大规模的植树造林,刺槐林面积占沟壑丘陵区人工植树造林面积 90% 以上。由于种植时没有考虑刺槐的气候适宜性,一些地区的刺槐林出现了退化现象。采用最大熵模型,在 0.5km×0.5km 空间精度上分别模拟了 1961—1990、1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010,以及 2100 年(典型浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下)黄土高原刺槐的气候适宜性和敏感性。模拟结果显示:黄土高原刺槐分布及其动态变化主要受到最冷月温度、极端低温、降水量、年辐射量等气候因子影响,低温(最冷月温度、极端低温)是影响刺槐的最关键因子。黄土高原西北和北部广大地区,自然环境条件不适合刺槐林生长;黄土高原东南部(关中平原和山西南部)比较适合刺槐生长。相对 1961—1990 年,1961—2010 年期间刺槐林适宜区分布格局基本没有改变,RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下刺槐林适宜区分布格局也没有显著改变。图层叠加分析发现,刺槐的气候适宜度(即存在概率)发生了明显改变。黄土高原西部和北部属于不适宜刺槐生长的非敏感区,东部和东南部是适宜刺槐生长的区域,尤其是山西中南部和陕西关中平原对气候变化非常敏感,展示了刺槐气候脆弱性的一面。研究结果对植树造林,优化人工林空间分布格局,应对气候变化风险和维持黄土高原森林生态系统可持续健康发展具有重要参考价值。

关键词:黄土高原;气候变化;植树造林;刺槐林;气候适宜性;脆弱性

Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau

Ji Yuhe^{1,4}, ZHOU Guangsheng^{1,2,4,*}, LI Zongshan³

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Joint Eco-Meteorological Laboratory of Chinese Academy of Meteorological Sciences and Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: *Robinia pseudoacacia* is a native tree species on the Loess Plateau, which has excellent functions of soil and water conservation, and carbon sequestration. Large scale afforestation was carried out in the practice of ecological restoration in the Loess Plateau, and the area of *Robinia pseudoacacia* forest accounted for more than 90% of artificial afforestation in the gully and hilly areas. However, *Robinia pseudoacacia* forest degenerated in some areas because climate suitability of *Robinia pseudoacacia* was not considered during afforestation. In this study, MaxEnt (maximum entropy

基金项目:国家自然科学基金项目(42141007, 41877539);中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2020Z004)

收稿日期:2020-03-14; **网络出版日期:**2022-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhousg@cma.gov.cn

model) was used to simulate the climate suitability and sensitivity of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau in 1961—1990, 1966—1995, 1971—2000, 1976—2005, 1981—2010, and 2100 (under the climate scenarios of Representative concentration pathway RCP4.5 and RCP8.5, respectively) at the spatial resolution of $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$. The simulation results showed that the distribution and dynamic changes of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau were mainly affected by the coldest month temperature, extreme low temperature, annual precipitation, annual radiation and other climate factors. Low temperature (the coldest month temperature, extreme low temperature) was the most important factor affecting *Robinia pseudoacacia*. The natural environment was not suitable for *Robinia pseudoacacia* forest in the northwest and the north of the Loess Plateau, but it was suitable in the southeast (the Guanzhong Plain and the south of Shanxi Province) of the Loess Plateau. Compared with the period of 1961—1990, the geographical distribution pattern of *Robinia pseudoacacia* forest was basically unchanged during 1961—2010, and its geographical distribution pattern was not significantly changed under the climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5. Overlay analysis showed that climate suitability (namely exist probability) of *Robinia pseudoacacia* changed significantly. The regions in the west and north of the Loess Plateau were not suitable for *Robinia pseudoacacia*, where belonged to non-sensitive areas. The regions in the east and southeast were suitable for *Robinia pseudoacacia*, where was very sensitive to climate change, especially in the south central of Shanxi Province and the Guanzhong Plain in Shaanxi Province, showing significant climate vulnerability. This study has important reference value for choosing suitable area for afforestation, optimizing the spatial distribution of plantation, coping with climate change risk, maintaining the sustainable and healthy development of forest ecosystem on the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; climate change; afforestation; *Robinia pseudoacacia* forest; climate suitability; vulnerability

黄土高原是我国生态脆弱区和生态敏感区,在生态环境保护中具有重要的战略地位。黄土高原的土质疏松,地形非常破碎,植被比较稀疏,有些地方寸草不生。黄土高原属温带大陆性季风气候,东部与南部属半湿润区,西部和北部绝大部分属半干旱区,西北边缘很小的面积属干旱区。黄土高原内部空间异质性非常大,在降水较充足的区域仍然存在一些茂密草地和森林。遥感影像揭示最近几十年整个高原区由黄变绿,植被指数增加,植被覆盖出现上升趋势,生态环境明显改善^[1-3]。1982—2018年黄土高原春、夏、秋和生长季植被覆盖度均呈现升高趋势^[4];2000—2018年黄土高原86.86%区域植被净初级生产力呈增加趋势^[5]。黄土高原生态环境改善与我国实施大规模生态恢复(三北防护林、退耕还林还草等)有直接关系。尽管黄土高原生态环境趋于改善,但是黄土高原仍是生态脆弱区,对气候变化十分敏感。

一般来说,植被生长主要受制于光、热、水等气候因子,以及土壤、地貌等生态因子^[6]。黄土高原地形破碎,气温和降水等气候要素空间差异很大,造成多样化的生境条件。在黄土高原植树造林过程中,人们忽视了地貌、气候等生态限制因子,缺少对植被生境多样性和生态适宜性的科学论证^[7],植树造林存在很大盲目性,导致部分造林区域出现森林衰败、功能低下等问题^[8-9]。调查发现一些区域植树造林后,天然降水提供的土壤水分供应不足,形成大面积的土壤干层。土壤干层导致人工林生长不良而形成“小老树”,或者过早衰败死亡,群落稳定性较差。尤其是人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)群落出现大面积生长减缓、冠层干枯甚至整株死亡的现象,制约当地生态环境的可持续健康发展^[10-12]。

气候变化对该地区植被生态系统有不可忽视的影响^[13]。1961年以来,黄土高原平均降水略有下降,夏季极端降水增多^[14],气温以 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率增加^[15],整体逐渐变干旱^[16],干旱引起的人工林死亡风险增加^[12]。在气候变化驱动下,植被的生境改变,潜在森林面积有所下降,而潜在草地面积有些许增加^[17]。亟需要研究气候变化驱动下黄土高原主要造林物种的气候适宜性和脆弱性,制订适应气候变化的应对策略。

在黄土高原种植的主要树种中,乡土树种刺槐面积占丘陵沟壑区人工林的90%以上^[18]。刺槐具有优良的水土保持功能和固碳功能,是黄土高原的主要造林树种,对改善生态环境具有重要作用^[19]。本研究以黄土高原——刺槐为研究对象,采用最大熵模型(MaxEnt)重点探讨黄土高原刺槐的气候适宜性和敏感性。

MaxEnt 是基于最大熵理论的物种分布模型,适用于研究物种分布及其环境适宜性。根据物种已知的“存在”,通过量化环境变量与物种分布之间的关系,预测多因子协同作用下的物种存在的相对概率,存在概率越大,反映该生态环境越适宜于该物种。通过对黄土高原刺槐的气候适宜性研究,识别出制约刺槐生长的主要环境因子,用存在概率量化每个 $0.5\text{km}\times 0.5\text{km}$ 栅格点的刺槐气候适宜性,预测未来 2100 年(RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下)刺槐的适宜性和敏感性变化。这些研究对选择合适区域进行植树造林,优化人工林空间分布格局,应对气候变化风险,维持森林生态系统可持续健康发展等,具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区

黄土高原位于我国第二级阶梯,包括太行山以西、乌鞘岭以东,秦岭以北、长城以南广大地区,面积约 $62\times 10^4\text{ km}^2$,主体海拔 1000—2000 m。黄土高原是世界上最大的黄土堆积区,长期流水侵蚀下地面被分割得非常破碎,形成沟壑纵横交错其间的塬、梁、峁等地貌类型。该区域属温带大陆性季风气候,总体上降水较少,降水集中在夏季。大部分地区的年均降水量 400—600 mm^[20]。但降水量空间差异很大,从东南向西北逐渐减少^[21]。黄土高原太阳辐射强,日照充足,热量丰富,大部分地区的年平均气温 6—14 °C,自东南向西北逐渐降低^[22]。

黄土高原西部和北部以草地为主,在南部和东部降水较多的地区存在一些森林植被。刺槐是黄土高原森林植被的主要树种。刺槐具有抗旱、耐贫瘠等特点,是我国北方主要造林树种之一。天然生长的刺槐主要分布在黄土高原的东南部和东部地区(图 1)。得益于三北防护林和退耕还林还草等生态恢复工程,在黄土高原刺槐被广泛栽植,刺槐林面积有逐年增加的趋势^[11]。由于忽视了刺槐的适宜性研究,一些区域人工刺槐出现过早衰败,甚至整株死亡的现象,植被生态系统的健康发展受到严重影响。

1.2 MaxEnt 模型

选择 MaxEnt 模拟黄土高原刺槐的气候适宜性。MaxEnt 是基于最大熵原理创建的生态位模型,适于模拟自然环境条件制约下物种分布^[23]。模型不仅可以应用于研究物种的气候适宜性^[24—25],而且可以应用于研究整个生态系统的气候适宜性^[26]。与其它生态位模型相比,MaxEnt 模拟精度较高^[27],不需要复杂的参数,只需栅格环境数据和物种分布数据(图 1)就可以进行环境因子重要性分析,模拟研究区内每个栅格单元的物种存

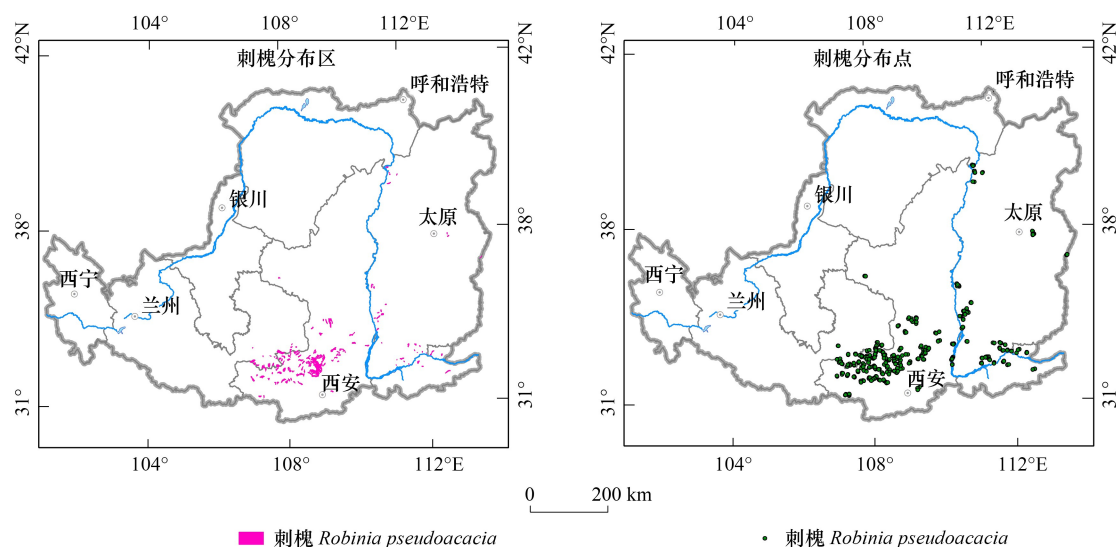


图 1 刺槐林在黄土高原的分布区,以及用于最大熵(MaxEnt)模型的刺槐林分布点

Fig.1 Distribution region of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau, and the distribution sites of *Robinia pseudoacacia* used for MaxEnt model

在概率^[28]。

1.3 数据来源与处理

MaxEnt 模型运行需要的数据,一是研究区范围的栅格环境变量;二是模拟对象(刺槐)的地理分布数据。基于森林生理生态与资源限制因素分析,首先明确了决定刺槐地理分布与功能的 6 个气候因子,即年极端最低温度、陆地表面获得的太阳辐射、最暖月温度(7 月)、最冷月温度(1 月)和年均温度、降水量。考虑到黄土高原地形破碎对森林分布有重要影响,将海拔作为模型的一个环境变量。

气候数据(6 个气候因子)来自于国家气象信息中心 1961—2010 年中国地面气象观测站的数据集。在利用气象站点气温空间插值时,基于海拔升高 100 m 温度降低 0.6 °C 的标准对气温进行了订正。基于 30 年气候标准,建立 1961—1990、1966—1995、1971—2000、1976—2005 和 1981—2010 年的(0.5km×0.5km) 栅格数据集。未来 2100 年(典型浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景)气候数据来自国家气候中心研究人员利用 RegCM4.0 获得的栅格数据。RCP4.5 气候情景是指人类采取一系列措施进行减排,控制温室气体排放,大气中 CO₂ 浓度达到 0.538‰。RCP8.5 气候情景是指不控制温室气体排放,温室气体浓度不断上升,大气中 CO₂ 浓度增加至 0.936‰。

海拔数据来自于 90m 空间分辨率的数字高程模型,利用 ArcGIS 重采样,生成(0.5km×0.5km) 栅格数据。

刺槐地理分布数据来源于 2010 年中国植被图提取的刺槐矢量化分布图。首先,利用 ArcGIS 软件中的 Create Random Points 模块从刺槐矢量化分布图中随机抽取分布点(图 1),作为建立模型的样本点。然后将刺槐分布点的坐标数据存为 MaxEnt 要求的数据格式 *.csv。

1.4 MaxEnt 精度测试

采用受试者工作特征(ROC)曲线下的面积(AUC)值来检验 MaxEnt 预测精度,以评价模型的适用性。ROC 曲线是一种不依赖于阈值的评估方法,以 ROC 曲线下的面积 AUC 值作为模型预测准确性的衡量指标(图 2)。AUC 值指 ROC 曲线与横坐标围成的面积值,取值范围为 0—1。AUC 值越大,表示环境变量与预测物种地理分布模型之间相关性越大,模型预测效果越好,反之说明模型预测效果越差。参考前人判断标准:0.9<AUC<1 表示预测能力极好;0.7<AUC<0.9 表示预测能力较好;0.5<AUC<0.7 表示预测能力一般;AUC<0.5 表示用于预测的模型比随机预测模型还要差^[29—30]。

2 结果与分析

2.1 制约刺槐分布的关键气候因子

MaxEnt 模型可以对变量进行主导因子筛选。MaxEnt 模型输出 2 种方法判断哪个环境变量贡献最大。一是贡献百分率和置换重要性值;二是小刀测试

(Jackknife test)得出的条状图。贡献百分率是模型在训练过程中给出的各个气候因子对模型的贡献值,置换得分值是将训练样点上的气候因子随机替换后进行模拟,得出模型 AUC 值减少值,减少值越多表明模型高度依赖于该变量。Jackknife 小刀法分析中,红色条带代表所有变量的贡献;蓝色的条带代表该变量对物种分布的贡献,蓝色条带越长,说明该变量越重要;绿色的条带长度代表除该变量以外,其他所有变量组合的贡献,绿色条带越短,代表该变量含有其他变量不具有的信息越多。当绿色条带与蓝色条带相差越大时,表明该气候

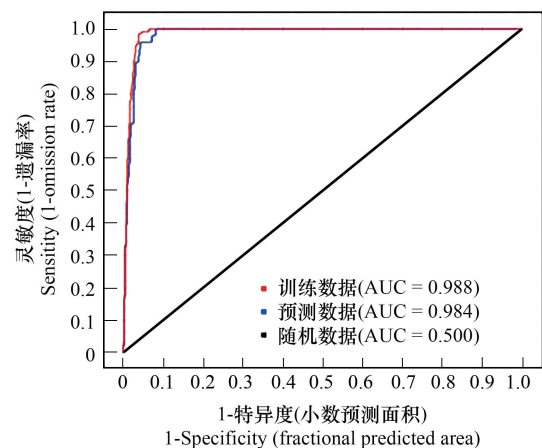


图2 模拟刺槐地理分布的受试者特征曲线(ROC 曲线)和曲线下面积(AUC 值)

Fig.2 Receive operating characteristic curve (ROC) curve and area under curve (AUC) value for simulation of the geographical distribution of *Robinia pseudoacacia*

基于 75%刺槐分布训练子集得到的 MaxEnt 模拟刺槐的 AUC 值为 0.988,达到了“极好”的水平,表明 MaxEnt 模型能够很好地对刺槐地理分布与气候因子的关系进行识别和模拟

因子所包含的分布信息不能被其它气候因子所代替,而当绿色条带与红色条带长度相近时表示该气候因子所包含的信息,可以被其它气候因子所替代(图3)。

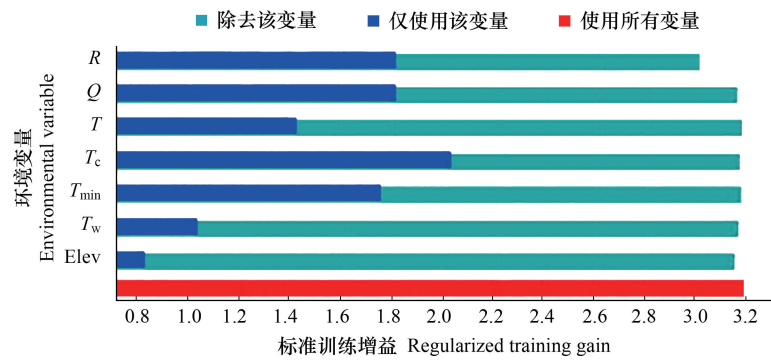


图3 小刀法 Jackknife 分析环境因子对刺槐分布的贡献

Fig.3 Contribution of environment factors to the distribution of *Robinia pseudoacacia* by Jackknife test

R:年降水量 Annual precipitation; Q:年总辐射 Annual total radiation; T:年均温 Annual average temperature; T_c:最冷月温度 The coldest month temperature; T_{min}:年极端最低温度 Annual extreme minimum temperature; T_w:最暖月温度 The warmest month temperature; Elev:海拔高度 Altitude

由 Jackknife 得分可知,各气候因子对刺槐地理分布影响的贡献排序为:年最冷月平均温度(T_c)>年降水量(R)>年辐射量(Q)>年极端最低温度(T_{min})>年均温度(T)>最暖月平均温度(T_w)>海拔(Elev)(图3)。在百分贡献率中,各气候因子影响刺槐地理分布的排序分别为:极端最低温度(T_{min})>年辐射量(Q)>年降水量(R)>最冷月平均温度(T_c)>最暖月平均温度(T_w)>海拔(Elev)>年均温度(T)(表1)。置换重要性值显示各气候因子影响刺槐地理分布的排序分别为,年降水量(R)>海拔(Elev)>最暖月平均温度(T_w)>最冷月平均温度(T_c)>年辐射量(Q)>年均温度(T)>极端最低温度(T_{min})(表1)。

表1 环境因子的百分贡献率和置换重要性

Table 1 The percent contribution and permutation importance of the environment factors

变量 Variables	百分贡献率 Percent contribution	置换重要性 Permutation importance	变量 Variables	百分贡献率 Percent contribution	置换重要性 Permutation importance
T _{min}	31.8	0.5	T _w	6.5	6.3
Q	29.3	3	Elev	1.6	10.9
R	22.9	74.2	T	0.1	0.9
T _c	7.8	4.2			

T_{min}:年极端最低温度 Annual extreme minimum temperature; Q:年总辐射 Annual total radiation; R:年降水量 Annual precipitation; T_c:最冷月温度 The coldest month temperature; T_w:最暖月温度 The warmest month temperature; Elev:海拔高度 Altitude; T:年均温 Annual average temperature

综合考虑 Jackknife 得分、贡献百分率和置换重要性值,结果表明:影响黄土高原刺槐分布的关键因子是最冷月平均温度、极端最低温、年降水量、年辐射量,即低温、降水量和总辐射是制约黄土高原刺槐生存的关键因子。

2.2 刺槐的气候适宜性

MaxEnt 模型模拟了自然环境制约下黄土高原(1961—1990、1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010、2100 年(RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景)刺槐潜在分布区域。在 0.5 km×0.5 km 空间精度上给出了黄土高原刺槐的存在概率(或称适生概率)P。P 值范围为 0—1,值越大代表越适合刺槐的生存。参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告中对“可能性”的表述,存在概率 P≤0.05 为不适宜区,P>0.05 为适宜区^[31]。根据存在概率将适宜区细分为轻微适宜区(0.05<P≤0.2)、基本适宜区(0.2<P≤0.4)、中度适宜区(0.4<P≤0.6)、最适宜区(P>0.6)(图4)。

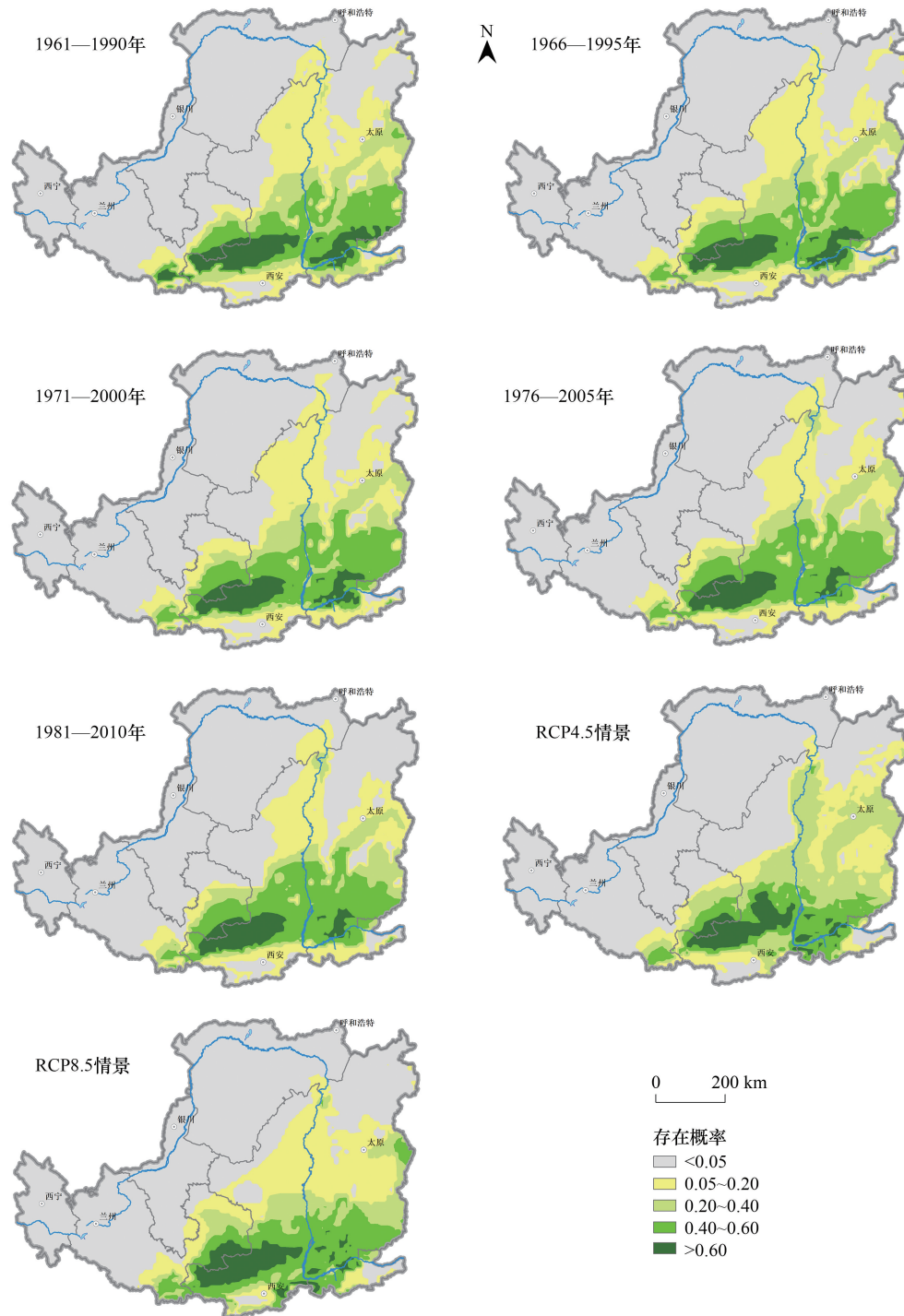


图4 黄土高原刺槐潜在分布

Fig.4 Potential distribution of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau

1961—990、1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010、典型浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 情景

结果显示:自然环境条件适合刺槐生存的区域位于黄土高原地区东部和东南部,大致分布在 400 mm 等降水量线和年均温 8 °C 等温线以南以东的区域。黄土高原的西北和北部广大地区,基本上不适合刺槐生存。相对于基准年 1961—1990,在 1961—2010 期间刺槐潜在的气候分布区域发生一些改变。刺槐存在概率 $P>0.4$ 的中度适宜区和最适宜区主要位于黄土高原南部的关中平原和山西南部,分布区域变化不明显;刺槐存在概率 $P>0.6$ 的最适宜分布区有缩小趋势,尤其是山西省南部(图 4)。

相对于基准年 1961—1990,未来 2100 年(RCP4.5 气候情景下)刺槐存在概率 $P>0.4$ 的区域明显缩小;刺槐存在概率 $P>0.6$ 的最适宜区也明显缩小,尤其是山西南部缩小最明显。未来 2100 年(RCP8.5 气候情景下)刺槐存在概率 $P>0.4$ 的中度适宜区和最适宜区略有缩小;刺槐存在概率 $P>0.6$ 的最适宜区具有明显缩小趋势,尤其是山西南部缩小最明显。但无论 RCP4.5 还是 RCP8.5 气候情景下,刺槐宏观分布格局没有改变。

2.3 刺槐的气候敏感性和脆弱性

刺槐适宜区范围变化,仅从一个侧面笼统地证明刺槐的气候脆弱性和适应性(注:适应性与上述适宜性概念不同。适宜性是自然环境制约下刺槐具有较大存在概率,适应性是气候变化影响下刺槐存在概率保持稳定或增大),不足以详细阐明研究区内部每个栅格格点刺槐表现为脆弱性还是适应性。刺槐的脆弱性和适应性是其在气候变化作用下的一种表现,若在研究期间刺槐林潜在存在概率保持稳定或增加,则表现为气候适应性;若潜在存在概率降低,则表现为气候脆弱性。若在研究期间存在概率显著降低或显著增加,则表现为气候敏感性。

为了阐明每个栅格格点刺槐表现为脆弱性还是适应性,以 1961—1990 为基准年,MaxEnt 输出刺槐存在概率栅格图层,输出评估年(1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010、RCP4.5 和 RCP8.5 情景)刺槐存在概率栅格图层,利用 ArcGIS 软件的空间分析功能模块,评估年刺槐存在概率栅格图层减去基准年栅格图层,得到刺槐存在概率的变化值栅格图层。然后基于栅格图层存在概率的变化值来量化研究区内部每个栅格格点刺槐表现为脆弱性还是适应性。

若定义存在概率变化 < -0.2 为显著脆弱性、 -0.2 — -0.05 为明显脆弱性、 -0.05 — 0.05 为基本没有变化、 0.05 — 0.2 为明显适应、 > 0.2 为显著适应,结果显示 1961—1990 年至评估年(1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010),黄土高原西部和北部广大区域的刺槐存在概率变化幅度较小,一般 -0.05 — 0.05 (灰色),属于非敏感区;在黄土高原东部和东南部边缘区存在概率变化幅度 -0.2 — -0.05 ,属于明显脆弱区(橙色);黄土高原东南部存在概率变化幅度 0.05 — 0.2 ,属于明显适应区(浅绿色);存在概率变化幅度 < -0.2 的显著脆弱(红色)和 > 0.2 的显著适应(深绿色)面积都较小(图 5)。总体上,黄土高原西部和北部区域属于不适宜刺槐生存的非敏感区,东部和东南部是适宜刺槐生存的区域,也是气候变化敏感区,尤其是山西中南部和黄土高原南部的关中平原对气候变化非常敏感。

1961—1990 至评估年 2100(RCP4.5 和 RCP8.5 情景),黄土高原大部分地区刺槐存在概率变化幅度 -0.05 — 0.05 (灰色),属于基本没有变化。存在概率变化幅度 0.05 — 0.2 的明显适应区(浅绿色)和 > 0.2 的显著适应区(深绿色)主要分布黄土高原南部和中东部,即主要分布在黄土高原南部的关中平原,山西省中部等地区。存在概率变化幅度 -0.2 — -0.05 的明显脆弱区(橙色)和 < -0.2 的脆弱区(红色)主要分布在黄土高原东部,尤其是山西省东南部和河南省西北部(图 5)。

以 RCP4.5 情景为例,分析为什么关中平原将变得十分适宜刺槐分布,山西省东南部和河南省西北部将变得不适宜。根据 Jackknife 得分、贡献百分率和置换重要性值,制约刺槐存在概率变化的关键因子为最冷月平均温度、极端最低温和年降水的变化。分析基准年 1961—1990 至评估年 2100(RCP4.5 情景)最冷月平均温度和年降水量的变化,发现关中平原年降水量将大幅度上升(> 100 mm),最冷月温度上升相对较小(0 — 2 °C),个别区域略有下降,该区域更加适合刺槐生长。相对于关中平原,山西省东南部和河南西北部年降水量上升幅度不大(0 — 100 mm),最冷月温度上升略高(0 — 2 °C)(图 6)。这些区域刺槐存在概率降低很可能是降水增加量无法弥补温度升高导致的较高蒸散发量,引发了干旱胁迫。

3 讨论

黄土高原是生态脆弱区和生态敏感区,在我国生态环境保护中具有重要的战略地位。传统观点认为:黄土高原比较干旱,受水分胁迫,降水量是制约刺槐生存的最关键因素^[32—33]。有调查发现,沿着从南到北的降雨梯度,刺槐林生长衰退呈现出明显的南北区域分异现象,降水较少的北部地区刺槐林衰退最明显^[11]。本研

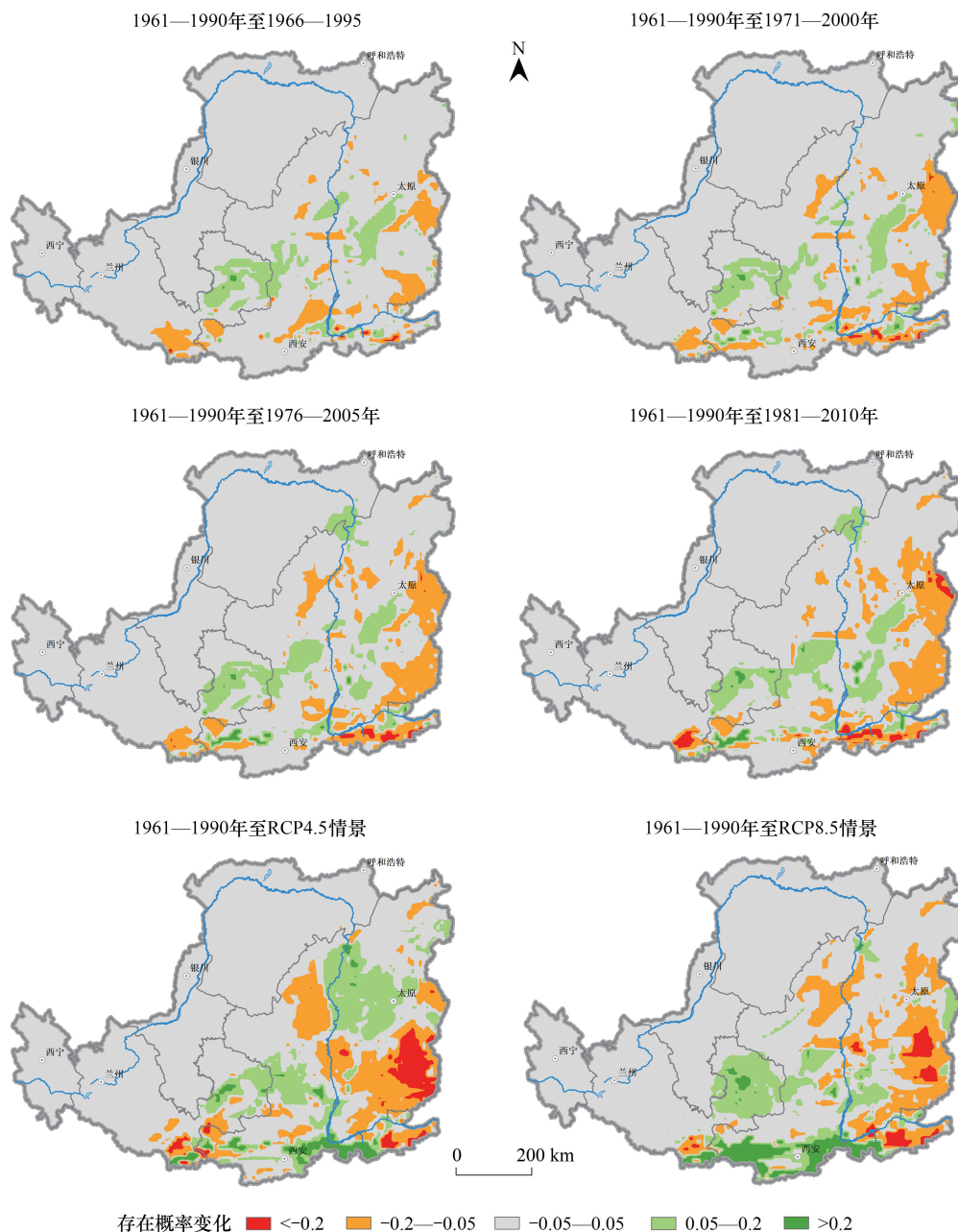


图5 1961—1990 年至评估年(1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010、RCP4.5 和 RCP8.5 情景)黄土高原刺槐林存在概率的变化

Fig.5 The change of the exist probability of *Robinia pseudoacacia* forest from 1960—1990 to assessment periods (1966—1995, 1971—2000, 1976—2005, 1981—2010, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios) in the Loess Plateau

究结果表明低温(最冷月平均温度、极端低温)是制约黄土高原刺槐分布和生存的最关键因素,降水量是第二位的因素。低温能够降低树液(营养和水分)流动速度,甚至能够导致树液流动完全停滞^[18]。沿着从南到北的降雨梯度,气温也是逐渐下降的,很有可能较少降水和低温共同作用,导致了黄土高原北部地区刺槐林出现比较明显衰退现象。

本研究中 MaxEnt 模拟刺槐的 AUC 值为 0.988,达到了“极好”的模拟精度水平。模型输出结果显示黄土高原的西北和北部广大地区的自然环境条件不适合刺槐生存,最适合生存的空间位于黄土高原东南部。MaxEnt 模拟的刺槐空间格局与黄土高原刺槐林生长适宜生态区划结果基本一致^[34],从一个侧面证明 MaxEnt

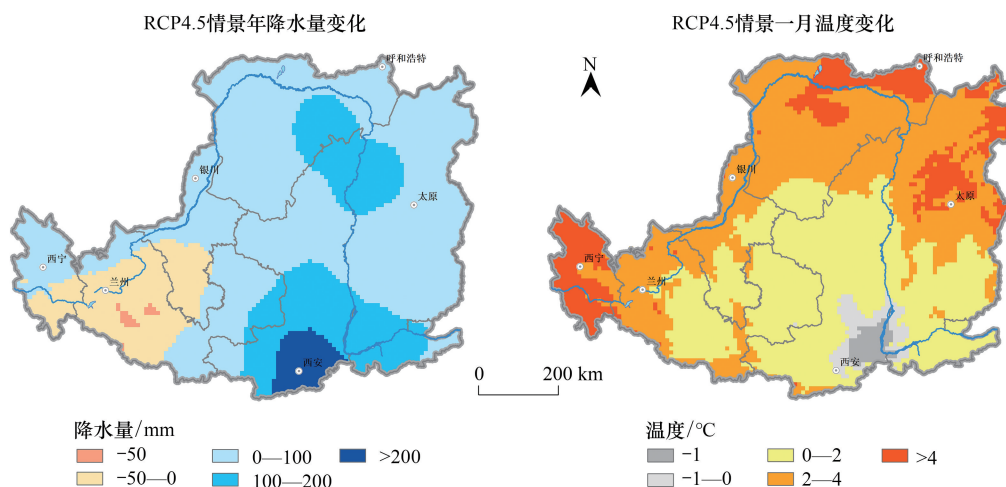


图 6 1961—1990 至 RCP4.5 气候情景下黄土高原年降水量和一月温度的变化

Fig.6 The change of annual precipitation and temperature on January from 1960—1990 to RCP4.5 scenarios in the Loess Plateau

模拟结果的可行性。

植被的气候敏感性和脆弱性一直是生态学家关注的热点^[1, 35]。本研究采用 MaxEnt 模拟气候因子驱动下黄土高原典型人工林——刺槐分布格局及其动态变化。发现无论 1961—2010 年期间还是未来 2100 年 (RCP4.5 和 RCP8.5 情景下), 刺槐气候适宜区主要分布在黄土高原东部和东南部, 整体格局基本上没有改变, 说明刺槐具有较高稳定性, 气候变化难以撼动这种地域分布格局。研究量化了每个 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ 栅格点的刺槐气候适宜性, 预测未来 2100 年 (RCP4.5 和 RCP8.5 情景下) 刺槐林的适宜性, 证明黄土高原刺槐的气候适宜程度 (即存在概率) 发生了明显改变。这些研究对优化刺槐等人工林空间布局, 应对气候变化具有重要意义。

但是影响刺槐的因素很多, 包括自然因素和人为因素^[36—38]。MaxEnt 存在局限性, 仅适于模拟自然环境条件制约下的物种分布。在人口与经济密集区 (如关中平原和汾河谷地) 模拟的仅是潜在分布, 并非实际分布。在 MaxEnt 模拟刺槐分布时选择 6 个关键气候因子和海拔高度作为输入变量, 实际上影响刺槐林分布的自然因素很多, 存在忽略其它自然驱动因素的问题。例如山脉的坡向对降水影响极大, 迎风坡降水明显大于背风坡, 必然对刺槐的分布产生很大影响。此外, 本研究没有考虑人为因素 (抚育或干扰) 的影响, 难以反映人类活动和气候变化共同作用下刺槐的动态变化。

4 结论

黄土高原刺槐分布及其动态变化主要受到最冷月平均温度、极端最低温、年降水量、年辐射量等气候因子影响, 低温 (最冷月平均温度、极端最低温) 是影响刺槐分布的最关键因子。MaxEnt 模拟结果发现: 黄土高原西北和北部广大地区自然环境条件不适合刺槐生存; 在黄土高原东南部 (关中平原和山西南部) 比较适合刺槐生存。刺槐适宜区与非适宜区的分界线大致是 400 mm 等降水量线和年均温 8°C 等温线。相对基准年 1961—1990, 1961—2010 期间刺槐适宜区分布的宏观格局没有改变, 2100 年 (RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景) 刺槐适宜区宏观分布格局也没有显著改变。但是气候适宜性叠加分析发现刺槐的气候适宜程度 (即存在概率) 发生了明显改变。黄土高原西部和北部区域属于不适宜刺槐生存的非敏感区, 东部和东南部是适宜刺槐生存的区域, 也是气候变化敏感区, 尤其是山西中南部和关中平原对气候变化非常敏感, 展示了刺槐脆弱性的一面。

参考文献 (References):

- [1] Xie B N, Jia X X, Qin Z F, Shen J, Chang Q R. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982-2011. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(6): 1583-1594.
- [2] 孟晗, 黄远程, 史晓亮. 黄土高原地区 2001-2015 年植被覆盖变化及气候影响因子. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 211-217.
- [3] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, Tian J, Abbas S, Luo L L, Meresa H K. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. *Science Bulletin*, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [4] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 224-230, 241-241.
- [5] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 584-593.
- [6] Slabejová D, Bacigál T, Hegedúšová K, Májeková J, Medvecká J, Mikulová K, Šibíková M, Škodová I, Zaliberová M, Jarolímek I. Comparison of the understory vegetation of native forests and adjacent *Robinia pseudoacacia* plantations in the Carpathian-Pannonian region. *Forest Ecology and Management*, 2019, 439: 28-40.
- [7] Sun J F, Li G D, Zhang Y, Qin W S, Wang M Y. Identification of priority areas for afforestation in the Loess Plateau region of China. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108998.
- [8] 马文元. 三北防护林分退化及更新改造调研报告(一). *林业科技通讯*, 2016, (3): 10-15.
- [9] 刘晓东. 陇中黄土高原人工防护林退化原因和修复措施. *特种经济动植物*, 2021, 24(6): 63-65.
- [10] Shanguan Z P, Zheng S X. Ecological properties of soil water and effects on forest vegetation in the Loess Plateau. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2006, 13(4): 307-314.
- [11] 韦景树, 李宗善, 冯晓珂, 张园, 陈维梁, 伍星, 焦磊, 王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [12] Zhang Z D, Huang M B, Yang Y N, Zhao X F. Evaluating drought-induced mortality risk for *Robinia pseudoacacia* plantations along the precipitation gradient on the Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 284: 107897.
- [13] Wang X H, Wang B T, Xu X Y. Effects of large-scale climate anomalies on trends in seasonal precipitation over the Loess Plateau of China from 1961 to 2016. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105643.
- [14] 卢珊, 胡泽勇, 付春伟, 樊威伟, 吴笛. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析. *高原气象*, 2022, 41(1): 241-254.
- [15] 刘荔昀, 鲁瑞洁, 丁之勇, 王磊鑫, 刘小楝. 黄土高原气候变化特征及原因分析. *地球环境学报*, 2021, 12(6): 615-631.
- [16] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 李晓明. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系. *生态学报*, 2021, 41(13): 5340-5351.
- [17] 韩庆功, 彭守璋. 黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 188-193, 203-203.
- [18] Ma C K, Luo Y, Shao M A, Li X D, Sun L, Jia X X. Environmental controls on sap flow in black locust forest in Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13160.
- [19] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 李国庆, 吴春荣, 程积民, 杜盛. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子. *生态学报*, 2017, 37(15): 5049-5058.
- [20] Tang X, Miao C Y, Xi Y, Duan Q Y, Lei X H, Li H. Analysis of precipitation characteristics on the loess plateau between 1965 and 2014, based on high-density gauge observations. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 264-274.
- [21] 张艳芳, 王姝. 黄土高原植被降水利用效率对植被恢复/退化的响应. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 138-146.
- [22] Wang H, Liu G H, Li Z S, Ye X, Wang M, Gong L. Driving force and changing trends of vegetation phenology in the Loess Plateau of China from 2000 to 2010. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(5): 844-856.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [24] Yin X J, Zhou G S. Climatic suitability of the potential geographic distribution of *Fagus longipetiolata* in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1143-1149.
- [25] Qin A L, Liu B, Guo Q S, Bussmann R W, Ma F Q, Jian Z J, Xu G X, Pei S X. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 10: 139-146.
- [26] Ponce-Reyes R, Plumptre A J, Segun D, Ayebare S, Fuller R A, Possingham H P, Watson J E M. Forecasting ecosystem responses to climate change across Africa's Albertine Rift. *Biological Conservation*, 2017, 209: 464-472.

- [27] Raghunathan N, François L, Dury M, Hambuckers A. Contrasting climate risks predicted by dynamic vegetation and ecological niche-based models applied to tree species in the Brazilian Atlantic Forest. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(1): 219-232.
- [28] Cunze S, Tackenberg O. Decomposition of the maximum entropy niche function-A step beyond modelling species distribution. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 72: 250-260.
- [29] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [30] Engler R, Randin C F, Thuiller W, Dullinger S, Zimmermann N E, Araújo M B, Pearman P B, Le Lay G, Piedallu C, Albert C H, Choler P, Coldea G, De Lamo X, Dimböck T, Gégout J C, Gómez-García D, Grytnes J A, Heegaard E, Høistad F, Nogués-Bravo D, Normand S, Puşcaş M, Sebastià M T, Stanisci A, Theurillat J P, Trivedi M R, Vittoz P, Guisan A. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2330-2341.
- [31] 何奇瑾, 周广胜. 我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究. *地理学报*, 2011, 66(11): 1443-1450.
- [32] 焦醒, 刘广全. 黄土高原刺槐生长状况及其影响因子. *国际沙棘研究与开发*, 2009, 6(2): 42-48.
- [33] Fan Z M, Li J, Yue T X. Changes of climate-vegetation ecosystem in loess plateau of China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 715-720.
- [34] 王忠林, 薛智德. 黄土高原刺槐林生长适宜生态区划. *水土保持研究*, 1994, 1(3): 43-47.
- [35] Qu L L, Huang Y X, Yang L F, Li Y R. Vegetation restoration in response to climatic and anthropogenic changes in the Loess Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 89-100.
- [36] 吴芳, 陈云明, 于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态. *植物生态学报*, 2010, 34(4): 469-476.
- [37] 吴多洋, 焦菊英, 于卫洁. 陕北安塞退耕恢复 15 年刺槐林与自然植被的物种组成与群落特征. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 12-18, 26-26.
- [38] Wu X T, Wang S, Fu B J, Feng X M, Chen Y Z. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 565-573.