

DOI:10.11686/cyxb2024319

<http://cyxb.magtech.com.cn>

安玉霞, 王文强, 余殿, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的锁阳分布研究: 现状评估与未来预测. 草业学报, 2025, 34(7): 1—12.

AN Yu-xia, WANG Wen-qiang, YU Dian, *et al.* A study of the distribution of the parasitic herb *Cynomorium songaricum* based on the optimized MaxEnt model: Current status assessment and future predictions. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 1—12.

# 基于优化 MaxEnt 模型的锁阳分布研究： 现状评估与未来预测

安玉霞<sup>1</sup>, 王文强<sup>1</sup>, 余殿<sup>3</sup>, 梁咏亮<sup>2</sup>, 杨君珑<sup>1</sup>, 李小伟<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏哈巴湖国家级自然保护区管理局, 宁夏 银川 751502)

**摘要:** 锁阳系国家二级保护植物, 其药用价值极高, 生长在生态脆弱的荒漠地区。近年来, 由于气候变化, 对锁阳的地理分布构成了严重的威胁。为了明确影响锁阳在中国分布的主要环境因子以及潜在适生区的分布对合理保护和管理具有重要意义。基于 166 条有效分布记录和 39 个自然环境变量, 运用最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)对锁阳当前和未来两个时期(2050 和 2070 年)的代表性路径(SSP126 和 SSP585)潜在的地理分布进行模拟, 探讨影响其地理分布最关键的环境因素, 并预测适生区在气候变化影响下的空间分布格局。采用刀切法评估环境变量对模型的贡献率, 确定影响锁阳分布的主要环境变量。模型预测结果显示, 当前模拟的锁阳潜在分布区与实际分布基本吻合, 受试者工作特征曲线下面积(AUC 值)为 0.900, 预测结果良好。最湿月的降水量和最冷季的平均气温是决定锁阳栖息地的重要变量, 其次为基本饱和度和海拔以及最暖月的最高温度。未来气候的变化会使锁阳的栖息地范围缩小且向东迁移。本研究通过对锁阳潜在适生区的预测可以为锁阳的保护和管理提供参考和指导意义。

**关键词:** 环境因子; 潜在适生区; 质心变化

## A study of the distribution of the parasitic herb *Cynomorium songaricum* based on the optimized MaxEnt model: Current status assessment and future predictions

AN Yu-xia<sup>1</sup>, WANG Wen-qiang<sup>1</sup>, YU Dian<sup>3</sup>, LIANG Yong-liang<sup>2</sup>, YANG Jun-long<sup>1</sup>, LI Xiao-wei<sup>1\*</sup>

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Helan Mountain National Nature Reserve Administration, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Haba Lake National Nature Reserve Management Bureau, Yinchuan 751502, China

**Abstract:** *Cynomorium songaricum* is a nationally protected plant in China, and appears on a list of species accorded “second-class” protection. *C. songaricum* is esteemed for its high medicinal value, and thrives in ecologically fragile desert regions. In recent years, climate change has posed a significant threat to the geographical distribution of *C. songaricum*. This study aimed to clarify the main environmental factors affecting the distribution of *C. songaricum* in China and to emphasize the significance of identifying potential suitable areas for effective protection and management. Based on 166 valid distribution records and 39 natural environmental variables, this study employed

收稿日期: 2024-08-26; 改回日期: 2024-09-18

基金项目: 宁夏自然科学基金(2023AAC03124), 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01), 贺兰山植被群落生物量与草食兽数量的关系研究项目(2022)和贺兰山东麓珍稀濒危植物斑种草保护生物学研究项目(2022)资助。

作者简介: 安玉霞(1998—), 女, 宁夏西吉人, 在读硕士。E-mail: 2975954835@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lxwbq@126.com

the maximum entropy model (MaxEnt) to simulate the potential geographical distribution of *C. songaricum* along two representative climate change projection pathways (SSP126 and SSP585) for both the current period and future scenarios (2050s and 2070s). The study explored the most critical environmental factors affecting *C. songaricum* distribution and predicted the spatial distribution pattern of suitable habitat areas in response to climate change. The knife-cut method was employed to assess the contribution rate of environmental variables to the model, helping to identify the primary factors influencing the distribution of *C. songaricum*. The model's prediction results indicated that the currently simulated potential distribution area of *C. songaricum* closely aligns with its actual distribution. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC value) was 0.900, indicating strong predictive performance. The results indicate that precipitation in the wettest month and average temperature during the coldest season are critical variables determining the habitat of *C. songaricum*. These two criteria are followed in importance by basic soil saturation, altitude, the highest temperature in the warmest month and precipitation in the driest season, in that order. Future climate change is expected to narrow the habitat of *C. songaricum* and shift its distribution eastward. The predictions of potential suitable habitat areas for *C. songaricum* in this study can provide guidelines for its protection and management.

**Key words:** environmental factors; potential fitness zones; center-of-mass changes

人口的持续增长和人类活动的日益增强,导致气候变暖问题日益严峻<sup>[1]</sup>。气候变化对植物物种的灭绝和栖息地丧失具有关键性影响<sup>[2]</sup>。探究物种如何应对气候变化(例如它们在未来气候变化情境下如何分布)对于有效管理和保护生物多样性至关重要<sup>[3]</sup>。未来的气候预测表明气温和温室气体排放呈上升趋势,政府间气候变化相关部门发布的报告指出,至2100年全球气温预计将上升0.3~4.5℃,并呈持续上升趋势<sup>[4]</sup>。Tang等<sup>[5]</sup>的研究也表明全球气温整体出现变暖的趋势,这种变化将对部分物种的栖息地范围产生影响。生境恢复是植物物种保护的一项基本措施,需要准确了解每个生境中物种当前和未来的分布情况<sup>[6-7]</sup>。

因此,理解物种地理分布与环境因素的关联,并对其分布变化进行预测,已成为生态学家面临的基本挑战之一<sup>[8]</sup>。在这种背景下,物种分布模型(species distribution model, SDM)成了开发预测和探究植物群落未来分布的关键工具<sup>[9-10]</sup>,SDM基于适宜性指数来描述不同生态属性之间的关系,并评估特定物种栖息地的适宜性。有多种建模算法,例如CLIMEX模型(climate explorer)<sup>[11]</sup>、最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)<sup>[12]</sup>和BIOMAPPER模型(biogeographical mapping and modelling)<sup>[13]</sup>等,可用于研究物种生态需求和分布区域,以及预测环境因素影响下植物物种的栖息地质量和空间分布<sup>[14-15]</sup>。其中,MaxEnt模型具有运算时间短、操作简易的优点,即使在数据集不完整和样本量有限的情况下,也能在预测物种分布方面表现出色<sup>[16-17]</sup>,是国内外学者最常使用的预测模型之一。

锁阳(*Cynomorium songaricum*),锁阳科(Cynomoriaceae)锁阳属(*Cynomorium*)多年生肉质寄生草本,是一种药食两用植物<sup>[18-19]</sup>。研究表明,锁阳具有益智、抗氧化、清除自由基、促进肠蠕动、抑制良性前列腺增生等功效<sup>[20]</sup>。目前,学者对锁阳的研究主要集中在药用成分、药理价值<sup>[21]</sup>以及品质评价<sup>[22]</sup>等方面。近年来由于气候变化,加之当前锁阳无法人工种植,来源主要以野生资源为主,盗采非常严重,因此锁阳植物的分布范围不断缩小<sup>[23]</sup>,然而对锁阳植物在气候变化下的潜在分布鲜有报道。因而研究气候变化背景下锁阳的潜在适生区分布范围和变化趋势,对于确定锁阳植物保护区域和管理具有重要意义。

因此,本研究以锁阳植物为对象,拟基于R语言中的Kuenm包优化MaxEnt模型,预测当前气候背景下的锁阳潜在分布格局。并运用MaxEnt模型模拟未来两种温室气体排放场景下2个时期的环境数据,以期回答以下3个科学问题:1)明确影响锁阳分布的主要气候因子;2)确定当前气候下锁阳的潜在适生区;3)未来气候变化下锁阳的潜在质心将如何变化。以期为锁阳植物的资源保护及管理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 锁阳分布数据

本试验于2023年11月中旬在宁夏大学农学院开展,研究所用锁阳物种分布数据来源主要有以下几个途径:1)通过野外实地调查获取77个锁阳地理分布数据;2)通过全球生物信息机构网站(<https://www.gbif.org/>)以及中国植物数字标本馆(<https://www.cvh.ac.cn>)搜索并下载锁阳分布数据21个;3)通过搜索国内外相关文献获取分布数据154个。共整理得到252个锁阳地理分布数据。采用ENMTools软件(<https://github.com/danlwarren/ENMTools>)进行去冗余处理(即在 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的范围内只保留一个物种分布数据),避免物种分布数据在最小的分布单元里面有重复而导致模型出现过拟合的结果(图1)。

### 1.2 环境因子数据

本研究所使用的环境数据包括19个气候数据,3个地形数据,17个土壤数据,数据来源主要有以下几个途径:1)气候数据和海拔数据下载于WorldClim(<https://worldclim.org>)。气候数据选取了当前和未来两种(即低浓度温室气体排放场景SSP126和高浓度温室气体排放场景SSP585)温室气体排放场景下2050和2070年两个时期的数据。地形数据为通过下载的高程数据提取坡度和坡向;2)土壤数据根据世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)获得。在ArcGIS软件中,导入自然环境数据,确保其坐标都以WGS 1984为统一基准。随后,借助数据管理工具集,执行一系列的批量重采样命令,以便各来源的数据具有统一的分辨率。最后,通过转换工具,成功地将39个自然环境变量全部转换成“asc”文件格式。

### 1.3 数据处理

为避免39个环境因子之间存在较强共线性,防止模型在运行过程中出现过拟合的现象,需要对其进行相关性分析,对相关性大于0.8的环境因子,综合考量其预试验中的重要性和贡献值。预试验在最大熵模型中初步建模,在训练集中随机抽取了75%的数据用于模型预测,而剩余的25%则用于验证模型的精度。为了确保结果的稳定性和可靠性,将这一过程重复5次,以便更全面地评估自然环境变量对模型预测的贡献度。在数据处理阶段,使用了R语言进行环境变量的相关性分析。通过深入探究每个环境变量的贡献率和它们之间的相关性,确定影响锁阳分布的主要环境因子。

### 1.4 模型优化与构建

物种分布模型近年来在生态、植物保护等诸多领域中广泛应用。其复杂程度与匹配程度主要与2个参数息息相关:第一为组合参数(feature combination, FC),该项参数在软件中能完成自动匹配,即线性(linear, L)、阈值性(threshold, T)、片段化(hinge, H)、二次型(quadratic, Q)、乘积型(product, P)5种要素值,经自动匹配产生31种不同组合,通常软件会根据数据量自动选择参数组合。第二为正则化乘数(regularization multiple, RM),默认RM的值为1,可设置任一大于0的常数,此项设置越小越容易接近现有的数据记录,也越容易过拟合,越大则拟合越分散<sup>[24]</sup>。

MaxEnt模型的默认参数是其开发者在对鸟类、哺乳类、爬行类和植物分布的研究中,根据其模型结果与现实分布的比较而设置的<sup>[25]</sup>。目前国内大多数文章均采用默认设置进行MaxEnt模型分析,但由于不同的环境因子、

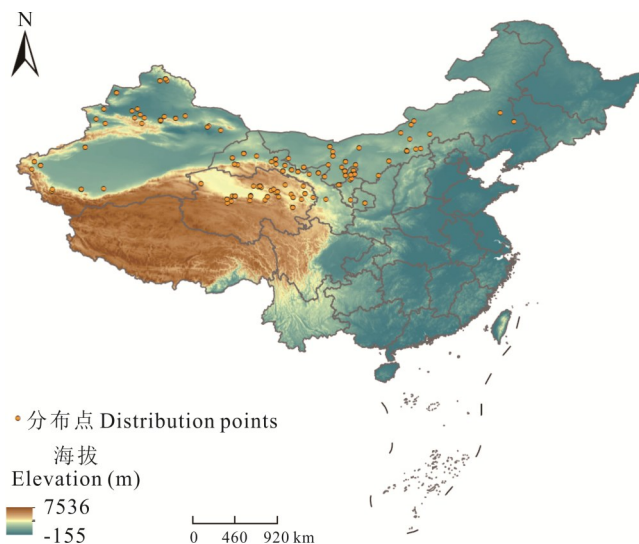


图1 锁阳物种分布点

Fig. 1 Distribution points of *C. songaricum* species

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2767 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

地理分布和物种,设置值应根据参数在统计上的显著性、模型的预测能力以及模型的适宜性来设定,而手动优化又极其耗时且低效。因此,为找到最佳参数组合需进行模型的优化。考虑在数据分析方面使用具有强大优势的R语言进行协助分析。即本研究参考Cobos等<sup>[26]</sup>的方法,采用R语言与Kuenm包进行模型优化。模型的优化过程中设定了起始RM值为0.1,并以0.1为步长递增,直至4结束,总共形成了40个不同的调控倍频。这些倍频与L-线性、Q-二次型、H-片段化、P-乘积型和T-阈值型这5种特征类型进行了排列组合,旨在找出最适合锁阳分布预测的参数组合。

利用赤池信息量准则(akaike information criterion, AIC)来评估模型不同参数组合的拟合度和复杂度<sup>[27]</sup>。从而确保所选模型既简洁又高效。在模型模拟阶段,将筛选后的数据与环境因子导入MaxEnt软件中,再次随机选取75%的数据作为训练集,用于模型分布预测。同时,设置Logistic为输出方式,并启用了随机种子功能,以确保每次模拟的可重复性。随机测试百分比被设定为25%,用于后续对模型精度的验证。重复运行模型10次,以减少单次运行所带来的偶然误差。

为了更直观地评估模型的预测准确性,本研究采用了受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)作为评价指标。AUC作为一种不依赖于阈值的评估方法,能够更全面地反映模型在区分测试点和背景点时的性能。根据AUC的值,可以判断模型的预测效果:当 $AUC \leq 0.6$ 时,模拟结果失败;当 $0.6 < AUC \leq 0.7$ 时,模拟结果较差;当 $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时,模拟结果一般;当 $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时,模拟结果良好;当 $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时,模拟结果优秀<sup>[28]</sup>。

### 1.5 适生区等级划分

MaxEnt模型输出锁阳在中国范围内的分布概率( $P$ ),使用ArcGIS 10.4.1软件中Toolbox的重分类(reclassify)命令,根据分布概率 $P$ 值将锁阳的生境适宜性分布区划分为4个适生区等级<sup>[29-30]</sup>(表1)。

## 2 结果与分析

### 2.1 物种分布与环境因子筛选

经MaxEnt模型预试验建模后,对所有变量进行Pearson相关性分析(图2),最终筛选出10个环境因子(awc\_class、bio5、bio11、bio13、bio17、elev、slope、t\_bs、t\_caco<sub>3</sub>、t\_oc)(表2),其中bio13(最湿月的降水量)的贡献率最大,为48.9%;其次为bio11(最冷季的平均气温,11.8%)、t\_bs(基本饱和度,9.1%)、elev(海拔,7.5%)、bio05(最暖月的最高温度,7.4%),bio17(最干燥季的降水量,5.6%)、t\_caco<sub>3</sub>(碳酸盐或石灰含量,2.9%)、awc\_class(土壤有效水含量,2.7%)、slope(坡度,2.3%)、t\_oc(有机碳含量,1.9%)。

### 2.2 模型优化结果

本研究基于Kuenm及一系列的分析方法,共创建了1160个锁阳分布模型。在这些模型中,有1个模型的表现尤为出色,其遗漏率仅为5%(图3),这一成绩在同类研究中堪称优异。此最优模型的预测受试者工作特征(prediction receiver

表1 适生区划分

Table 1 Division of potential distribution

| 分布概率 Distribution probability ( $P$ ) | 评价等级 Evaluation level     |
|---------------------------------------|---------------------------|
| $P < 0.2382$                          | 非适生区 Non-suitable areas   |
| $0.2382 \leq P < 0.4000$              | 低适生区 Low suitable area    |
| $0.4 \leq P < 0.6$                    | 中适生区 Medium suitable area |
| $0.6 \leq P \leq 1.0$                 | 高适生区 Highly suitable area |

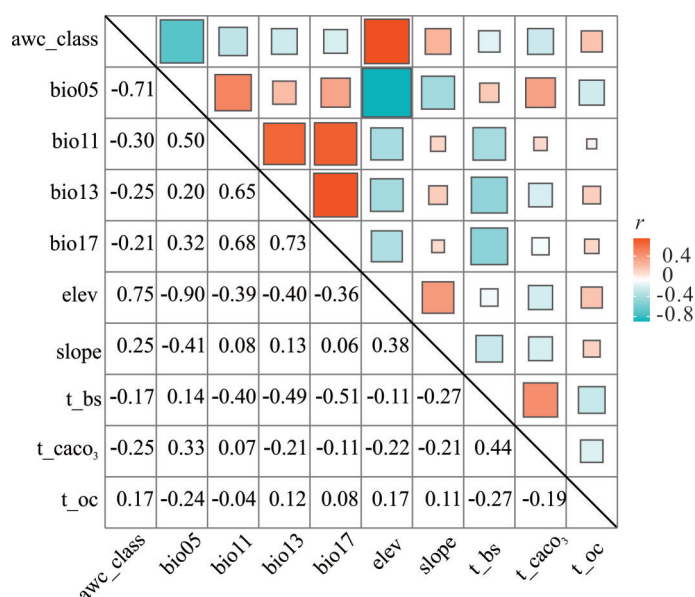


图2 筛选后10个环境因子相关性热图

Fig. 2 Correlation heat map of 10 environmental factors after screening

表 2 锁阳分布模拟的 10 个环境变量

Table 2 Ten environmental variables simulated by *C. songaricum* distribution (%)

| 代码 Code             | 环境因子 Environmental factor                              | 贡献率 Contribution percent | 置换重要性 Permutation importance |
|---------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| bio13               | 最湿月的降水量 Precipitation in the wettest month             | 48.9                     | 54.1                         |
| bio11               | 最冷季的平均气温 The average temperature of the coldest season | 11.8                     | 21.1                         |
| t_bs                | 基本饱和度 Basic saturation                                 | 9.1                      | 2.3                          |
| elev                | 海拔 Elevation                                           | 7.5                      | 3.6                          |
| bio05               | 最暖月的最高温度 The highest temperature of the warmest month  | 7.4                      | 6.2                          |
| bio17               | 最干燥季的降水量 Precipitation in the driest season            | 5.6                      | 3.3                          |
| t_caco <sub>3</sub> | 碳酸盐或石灰含量 Carbonate or lime content                     | 2.9                      | 0.9                          |
| awc_class           | 土壤有效水含量 Soil available water content                   | 2.7                      | 4.6                          |
| slope               | 坡度 Gradient                                            | 2.3                      | 1.2                          |
| t_oc                | 有机碳含量 Organic carbon content                           | 1.9                      | 2.7                          |

operating characteristic, pROC) 值为 0, 遗漏率为 0.034482759, 同时 AIC 值达到了 2624.68108。模型优化后, 确定了最佳的参数组合: RM=3.3 和 FC=QPH。为了验证模型的准确性和可靠性, 将锁阳的分布数据与环境因子导入 MaxEnt 模型。通过筛选后的组合参数与正则化乘数运行, 模型经过 10 次重复和交叉验证, 得出平均 AUC 值为 0.900(图 4), 同时标准偏差仅为 0.002。这一结果表明, 本次模拟的准确度相当高, 模型的可信度也非常强, 因此可用于锁阳适宜分布区域的预测。

2.3 影响锁阳适生区分布的关键环境因子及环境因子适生阈值

为了深入理解哪些环境因子对锁阳适生区分布具有重要影响, 本研究采用了刀切法进行分析(图 5)。结果显示, 在所筛选的 10 个环境因子中, bio13 的增益值最高, 其后依次为 bio11、bio17、elev、t\_bs、t\_caco<sub>3</sub>、slope、t\_oc、awc\_class 和 bio05。除 t\_oc 外, 其他 9 个环境因子的累计贡献率高达 98.2%(表 2), 这表明这些因子在锁阳适生区分布中至关重要。

2.4 当前气候下锁阳的潜在适生区

通过 ArcGIS 10.4.1 软件, 根据模型的分布概率 P 值绘制锁阳在中国的适宜分布图(图 6)。结果表明, 锁阳集中分布于我国西北地区。高适生区: 主要位于新疆维吾尔自治区北部、内蒙古自治区中部、青海西北部、甘肃西北部、宁夏回族自治区北部部分地区和西藏自治区西部小部分地区; 中适生区: 分布范围位于高适生区周围, 主要为新疆维吾尔自治区北部、内蒙古自治区中部和东北部、青海西北部、甘肃西

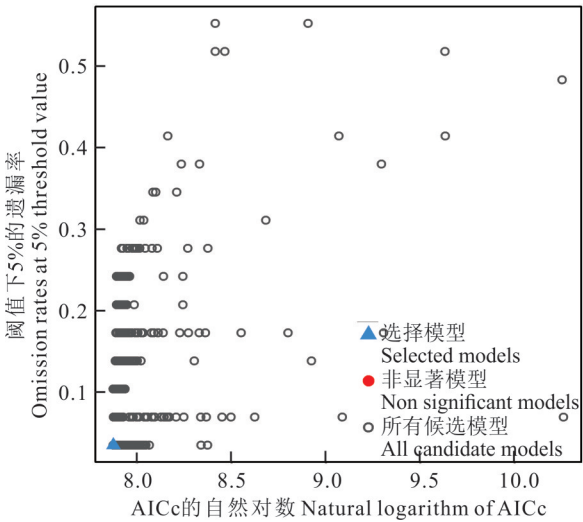


图 3 模型的遗漏率与 AIC 值自然对数  
Fig. 3 The omission rate and the natural logarithm of the AIC value of the model

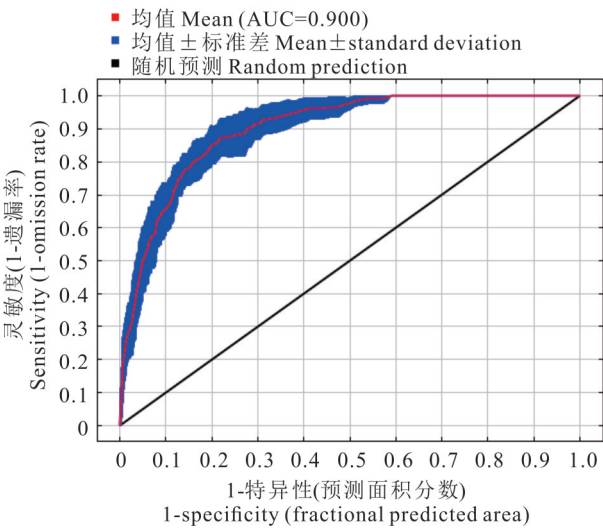


图 4 受试者工作特征曲线预测模型  
Fig. 4 Receiver operating characteristic curve prediction model

北部和东南部分地区、宁夏回族自治区和西藏自治区西南部分地区;低适生区:主要位于新疆维吾尔自治区北部和部分南部地区、内蒙古自治区中部、青海中部和北部、甘肃西北部和东南部、宁夏回族自治区西南部和东北部部分地区以及西藏自治区西部;而黑龙江、辽宁、天津以及绝大部分南部地区并不适宜锁阳的生长。使用 ArcGIS 软件通过投影计算几何面积。结果表明锁阳不适生区面积约 7998142.05 km<sup>2</sup>(约占全国面积的 82.74%)、总适生区面积约 1667326.06 km<sup>2</sup>(约占全国面积的 17.26%),具体而言,高适生区、中适生区、低适生区面积分别约为 357289.09 km<sup>2</sup>(约占全国面积的 3.70%)、630708.56 km<sup>2</sup>(约占全国面积的 6.53%)、679328.42 km<sup>2</sup>(约占全国面积的 7.03%)。

## 2.5 未来锁阳潜在适生区模拟

本研究共选取了未来两个时期(2050 和 2070 年)的代表性路径(SSP126 和 SSP585)来预测锁阳的潜在地理分布,从图 7 可以看出,在 SSP126 情境下,从当前到 2050 年期间,锁阳总适生区从 1667326.06 km<sup>2</sup> 缩小到 1451396.53 km<sup>2</sup>,再到 2070 年缩小至 1407578.38 km<sup>2</sup>。在 SSP585 情境下,从当前到 2050 年期间,锁阳总适生区从 1667326.06 km<sup>2</sup> 缩小到 1260255.14 km<sup>2</sup>,再到 2070 年缩小至 915839.76 km<sup>2</sup>,潜在总适生区面积在当前气候下达到最大,随后呈持续减小趋势,且其高、中和低适生区均呈相同的变化趋势。

## 2.6 潜在适生区质心的转移

为了预测锁阳在不同气候情境下的地理迁移趋势,本研究进一步分析了其潜在适生区的质心变化。从预测结果可知,2050 和 2070 年我国锁阳的适宜区面积均有所减少。根据未来气候变化影响下的总适生区面积的改变,在未来 SSP126 场景下,2050 年锁阳适生区的质心将相对于当前时期向东北方向迁移,2070 年适生区质心相对当前时期有一定程度的东移;在未来 SSP585 场景下,2050 年适生区质心相对当前时期向东北方向迁移;2070 年适生区质心相对当前时期轻微向东南方向迁移(图 8)。

## 3 讨论

### 3.1 模型的可靠性

MaxEnt 模型在数据建模时通常会保留一个随机子集<sup>[31]</sup>,随后对模型的预测能力使用 AUC 进行评估,但该软件存在不足之处<sup>[32]</sup>。当样本偏差影响到测试数据和训练数据时,模型的预测能力可能会被 AUC 高估<sup>[33]</sup>。此外,MaxEnt 模型在模拟潜力时容易出现模型过拟合的问题,这会直接影响到物种的可转移性<sup>[34]</sup>。但是,模型的复杂性可以通过调整 MaxEnt 模型中的 AIC 来选择合适的特征组合进行约束。因此,本研究基于优化后的 MaxEnt 模型,利用筛选后的 10 个环境因子,预测了我国当前和未来两个时期(2050 和 2070 年)的代表性路径(SSP126 和

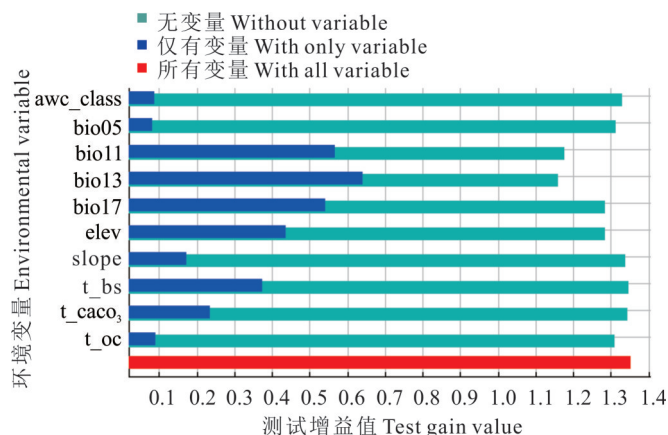


图 5 锁阳地理分布预测刀切图

Fig. 5 *C. songaricum* geographical distribution prediction knife cut figure

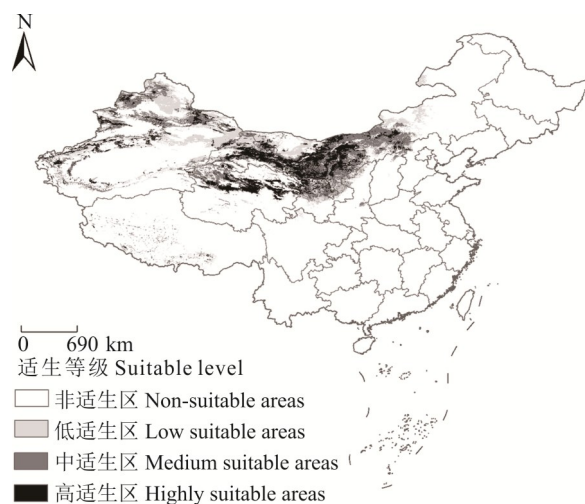


图 6 当前气候下锁阳的潜在适宜区

Fig. 6 Potential suitable area of *C. songaricum* under current climate

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2767 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2767 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

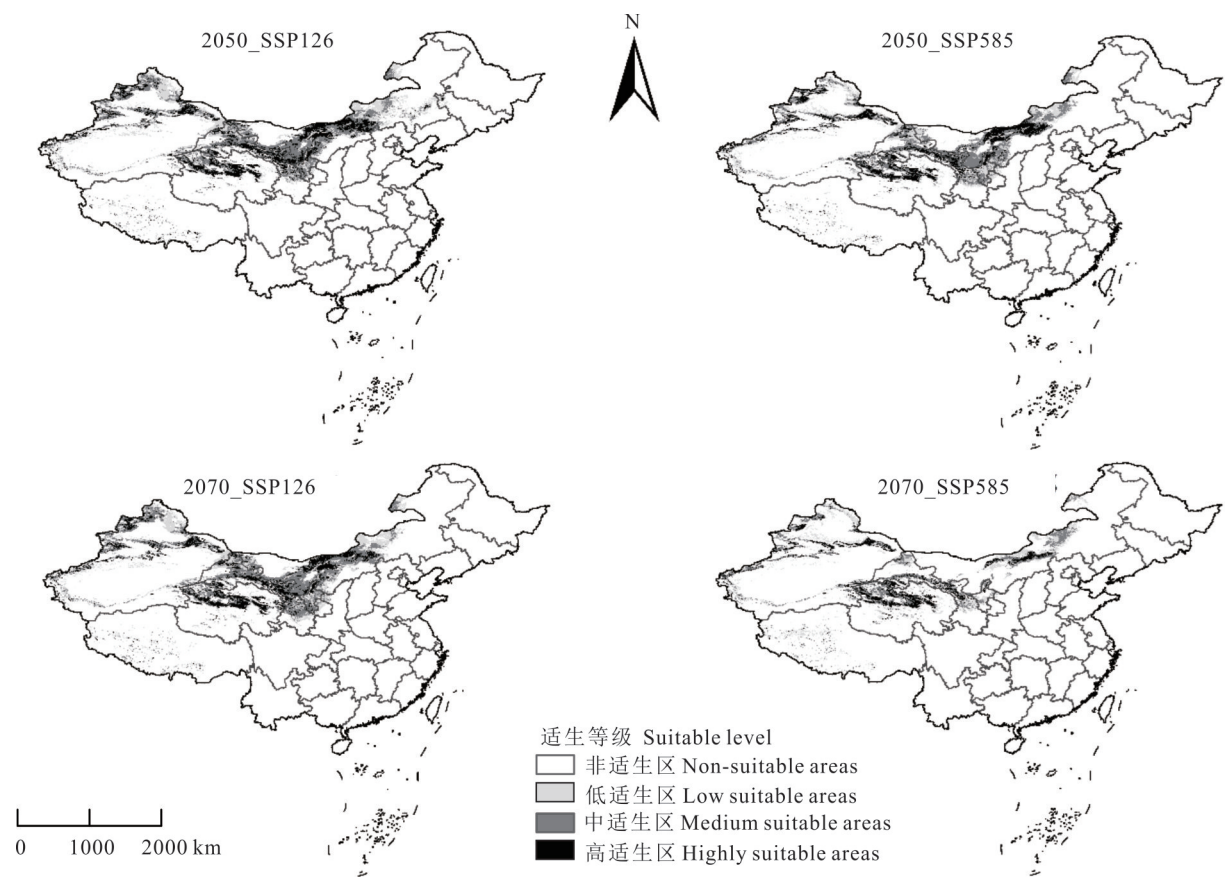


图 7 未来气候变化下锁阳的适生区分布

Fig. 7 The distribution of suitable areas of *C. songaricum* under future climate change

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2767 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2767 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

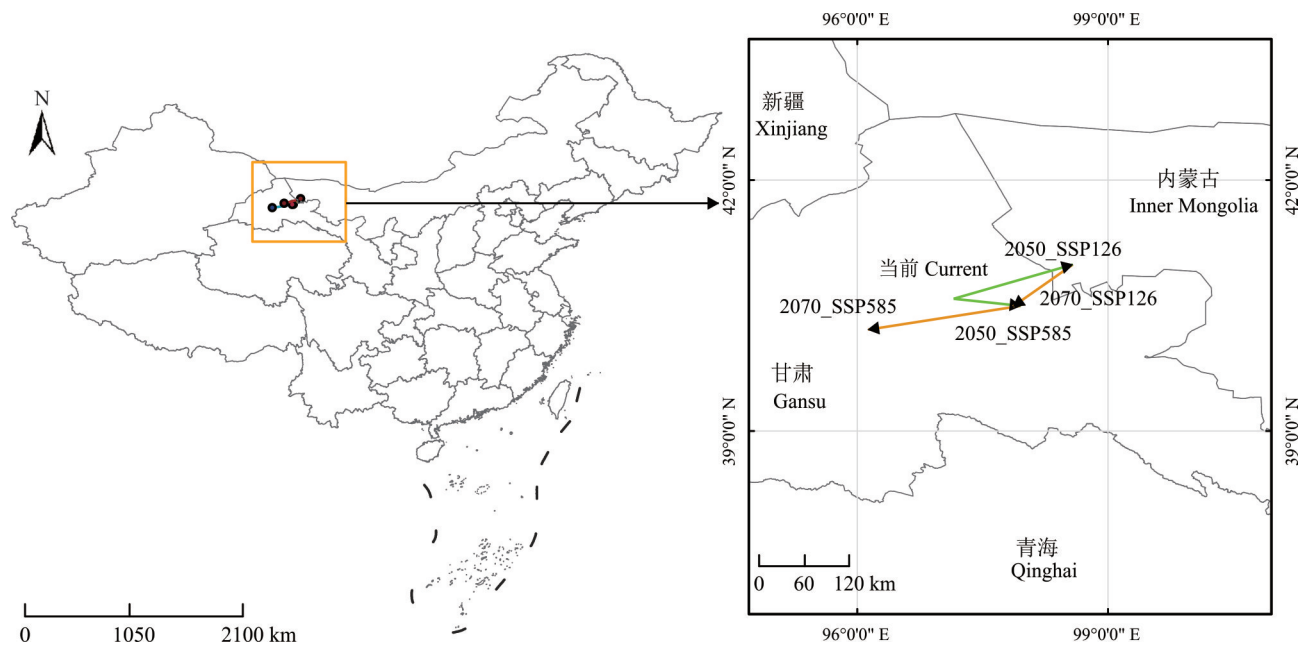


图 8 锁阳潜在适生区质心变化

Fig. 8 *C. songaricum* potential suitable area centroid change

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2767 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2767 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

SSP585)下锁阳的潜在分布情况。结果表明,优化后模型的遗漏率为0.034482759,AIC为2624.68108,AUC为0.900,这表明该模型对锁阳潜在适生区的预测具有较高的可靠性,能够有效地反映其在中国的分布情况。结果还显示,MaxEnt模型具有只需使用较少样本量就能对物种分布进行预测的特点<sup>[35]</sup>,可被广泛应用于生态学中的适宜性评价等领域<sup>[36]</sup>。

### 3.2 影响锁阳植物分布的主要环境因子

影响物种分布的环境因子众多,不同物种的生长习性也各有差异。本研究运用优化后的MaxEnt模型结果表明,对锁阳分布起主要作用的环境因子包括最湿月的降水量、最冷季的平均气温、基本饱和度、海拔、最暖月的最高温度和最干燥季的降水量,它们的总贡献率达90.3%,其中,最湿月的降水量和最冷季的平均气温贡献率达60.7%,表明降水量和温度是影响锁阳地理分布的决定性因子。蒋若衍<sup>[37]</sup>研究表明温度的相关变量对锁阳植物分布具有显著的影响。而锁阳主要生长在生态脆弱的荒漠地带,降水量对荒漠植物生长发育具有显著的影响<sup>[38]</sup>,这进一步证实了锁阳的地理分布受降水量和温度的影响极大。锁阳寄生于白刺属(*Nitraria*)植物根系,也受寄主的影响。段义忠等<sup>[39]</sup>和玛地娜·哈力木江<sup>[40]</sup>的研究表明,降水量和温度对大果白刺(*N. roborowskii*)和小果白刺(*N. sibirica*)的地理分布格局影响极大。

### 3.3 锁阳潜在适生区的分布区域

气候变化对物种维持生态平衡分布格局至关重要<sup>[41]</sup>,不同的物种分布受气候变化的影响也不同。本研究运用优化的MaxEnt模型对锁阳植物不同时期的潜在地理分布进行模拟。研究表明锁阳的适生区在当前时期的分布几乎涵盖中国西北荒漠的大部分地区,在气候分区上主要集中在温带大陆、高原大陆、温带季风和中温带气候类型,与实际所搜集到的锁阳植物分布点坐标基本一致<sup>[42-44]</sup>。本次研究预测的高适生区主要分为4个区域:分别是呈带状分布区的甘肃、内蒙古自治区及呈团块分布区的青海和新疆维吾尔自治区;其他高适生区分布呈星点状,分布于宁夏回族自治区北部,西藏自治区西部等地区。同时,根据《中国植物志》<sup>[45]</sup>记载,锁阳植物种群分布于新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西等省(区),本次试验结果预测与锁阳的实际分布区吻合度较高且本次试验的分布区更广阔,这可能是在划分时由于自然分级法存在的概率阈值所导致。

### 3.4 未来气候变化下锁阳的适生区变化

运用刀切法、置换贡献率和重要值进行分析后,发现对锁阳分布区影响较大的环境变量包括最湿月的降水量、最冷季的平均气温、基本饱和度、海拔、最暖月的最高温度以及最干燥季的降水量。其中,最湿月的降水量和最冷季的平均气温是决定锁阳地理分布的关键因素。根据不同强度气候变化背景下锁阳适生区面积的变化发现,在未来SSP126情境下,锁阳适生区面积缩小范围为43818.15 km<sup>2</sup>,主要是高适生区的缩减;在未来SSP585情境下,锁阳的缩小面积大幅上升,达344415.39 km<sup>2</sup>,即超过27%的分布区域将消失不见。新疆、内蒙古和青海等大部分地区的高适生区将转变为中、低适生区,部分原本适合锁阳生存的区域也将不再适合其生存,初步探讨其原因可能为全球气候变暖导致的高温将加剧干旱、荒漠化及水土流失的发生,加剧环境退化,使得生境不再适宜,从而使其适生区缩减。向竣文等<sup>[46]</sup>研究发现在SSP585情境下全球变暖,降水量增加,施雅风等<sup>[47]</sup>研究西北气候的转型发现,未来西北地区的气候将由暖干向暖湿转变,姚旭阳等<sup>[48]</sup>的研究也显示,从1997年开始,中国西北地区的降水量与气温便迅速增加,本试验的发现与其相似。赵宗慈等<sup>[49]</sup>研究也发现未来全球会明显增暖0.6~7.8℃,而且这种增暖幅度会引起极端气候的发生。因此,在未来温室气体排放的背景下,全球气温升高已成基本趋势,锁阳适生区面积大幅缩小也将成为必然趋势,且其面积缩小的范围会随着排放浓度的增强而增大。同时根据潜在质心的转移发现,其质心方向将向东扩张,在新疆、内蒙古、青海和甘肃等地以东获得适宜的生存条件。锁阳作为荒漠旱生植物,其种群可能在持续的全球变暖情况下选择温度及降水更为适宜的地区从而向东迁移。这与李政升等<sup>[50]</sup>在研究气候变化下青藏高原中亚紫菀木(*Asterothamnus centraliasiatricus*)在未来逐渐向东迁移的趋势相符。同时,有研究者使用MaxEnt建模探讨气候变化下软枣猕猴桃(*Actinidia arguta*)在中国的适生区变化趋势,结果也表明有向东北或东南迁移的趋势<sup>[51]</sup>。锁阳的研究结果与此类似,都表现出向东扩张的趋势<sup>[52]</sup>。这可能是由于典型的温带季风气候适合作为锁阳的避难所。根据未来气候变化背景下对锁阳质心区域变化的预测,

可以在质心迁移方向上建立相关生态保护区,以应对气候变化对锁阳产生的影响<sup>[53]</sup>。

#### 4 结论

综上所述,本研究借助 MaxEnt 模型,预测了锁阳植物在我国当下及未来两个阶段(2050 和 2070 年)的潜在地理分布区域。研究表明,锁阳当前在我国的适宜生长区域主要分布在内蒙古、甘肃、新疆、青海、宁夏和陕西等地,且未来将继续向西北以东方向迁移。通过对影响其潜在地理分布的主要环境因子进行分析,发现气候因子(最冷季的平均气温、最湿月的降水量、最干燥季的降水量)是影响锁阳潜在地理分布的关键因素。本试验为我国锁阳的区域选择提供了科学依据,也为后期锁阳的保护、管理以及环境调控提供了合理的数据支持,同时为我国锁阳潜在适宜区的规划奠定了重要的理论基础。

#### 参考文献 References:

- [1] Chai W W, Jia X, Zhao Y H, *et al.* Spatio-temporal correlation between human activity intensity and vegetation cover on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6708—6721.  
柴文雯, 贾夏, 赵永华, 等. 黄土高原人类活动强度与植被覆盖的时空关联性. *生态学报*, 2024, 44(15): 6708—6721.
- [2] Alberto F J, Aitken S N, Ricardo A, *et al.* Potential for evolutionary responses to climate change-evidence from tree populations. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1645—1661.
- [3] Mendoza-González G, Martínez M L, Rojas-Soto O R, *et al.* Ecological niche modeling of coastal dune plants and future potential distribution in response to climate change and sea level rise. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2524—2535.
- [4] Werners S E, Sparkes E, Totin E, *et al.* Advancing climate resilient development pathways since the IPCC's fifth assessment report. *Environmental Science and Policy*, 2021, 126: 168—176.
- [5] Tang A M, Hughes P N, Dijkstra T A, *et al.* Atmosphere-vegetation-soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2018, 51(2): 156—168.
- [6] Rao J, Tang Q, Feng Y, *et al.* Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 310—318.  
饶洁, 唐强, 冯韞, 等. 三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 310—318.
- [7] Bo C, Cheng K B, Lin L Z, *et al.* Modeling habitat distribution of *Cornus officinalis* with MaxEnt modeling and fuzzy logics in China. *Journal of Plant Ecology*, 2016, 9(6): 742—751.
- [8] Jun H D, Huan J W, Quan S G. Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xi'an, China. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(5): 749—758.
- [9] Qian Q Q, Xu D P, Liao W K, *et al.* Predicting the current and future suitable distribution range of *Trilocha varians* (Walker, 1855) (Lepidoptera: Bombycidae) in China. *Bulletin of Entomological Research*, 2024, 114(3): 317—326.
- [10] Zhang L, Cao B, Bai C, *et al.* Predicting suitable cultivation regions of medicinal plants with MaxEnt modeling and fuzzy logics: a case study of *Scutellaria baicalensis* in China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5): 361.
- [11] Sutherst R W, Maywald G F. A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1985, 13(3): 281—299.
- [12] Phillips J S, Anderson P R, Schapire E R. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231—259.
- [13] Hirzel A, Guisan A. Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2): 331—341.
- [14] Borthakur S, Baruah S P, Deka K, *et al.* Habitat distribution modelling for improving conservation status of *Brucea mollis* Wall. Ex Kurz. —An endangered potential medicinal plant of Northeast India. *Journal for Nature Conservation*, 2018, 43: 104—110.
- [15] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, *et al.* MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83—87.
- [16] Marini Â M, Barbet-Massin M, Lopes E L, *et al.* Predicting the occurrence of rare Brazilian birds with species distribution models. *Journal of Ornithology*, 2010, 151(4): 857—866.
- [17] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, *et al.* Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A

- test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102–117.
- [18] Jin F. Studies on the plant diet culture in Mongolian Nation. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2004.  
金凤. 蒙古族植物饮食文化研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2004.
- [19] Chen H Z. Nutriment analysis and methods establishment for determination of bioactive components in *Cynomorium songaricum*. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.  
陈汉哲. 锁阳营养品质分析及生物活性成分定量方法建立. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [20] Tao R, Miao L, Yu X A, *et al.* *Cynomorium songaricum* Rupr demonstrates phytoestrogenic or phytoandrogenic like activities that attenuates benign prostatic hyperplasia via regulating steroid 5- $\alpha$ -reductase. *Journal of Ethnopharmacology*, 2019, 235: 65–74.
- [21] Xue H Y, Jiao C Y, Yao J. Research progress on pharmacology of *Cynomorii herba*. *Drugs and Clinic*, 2018, 33(3): 709–712.  
薛海燕, 焦婵媛, 姚军. 锁阳药理作用的研究进展. 现代药物与临床, 2018, 33(3): 709–712.
- [22] Zhao P Y, Yang Y Q, Wang F F, *et al.* Content analysis and quality evaluation of main active components and mineral elements of *Cynomorium songaricum* in different habitats. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(4): 908–920.  
赵鹏宇, 杨月琴, 王非凡, 等. 不同生境下锁阳主要活性成分和矿质元素含量的分析及其品质评价. 中国中药杂志, 2023, 48(4): 908–920.
- [23] Zhang R, Gu Z R, Guo Y, *et al.* Content difference of effective components of *cynomorii herba* between different producing areas and its response to environmental factors. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, 28(7): 142–150.  
张锐, 顾志荣, 郭燕, 等. 锁阳有效成分含量的产地差异及对环境因子的响应规律. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(7): 142–150.
- [24] Zhang M R, Guo M N, Sun L, *et al.* Study on the suitability regionalization of *Polygonatum sibiricum* Delar. ex Redoute in Shanxi Province based on optimized MaxEnt model. *Journal of Shanxi University of Traditional Chinese Medicine*, 2023, 24(2): 216–220.  
张孟容, 郭敏娜, 孙靓, 等. 基于优化MaxEnt模型的山西省黄精产地适宜性区划研究. 山西中医药大学学报, 2023, 24(2): 216–220.
- [25] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161–175.
- [26] Cobos M E, Peterson A T, Barve N, *et al.* Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using MaxEnt. *PeerJ*, 2019, 7. DOI: 10.7717/peerj.6281.
- [27] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in MaxEnt: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 2011, 21(2): 335–342.
- [28] Guo Y B, Mo K, Wang G R, *et al.* Analysis of prediction and spatial-temporal changes of suitable distribution of *gastrodiae rhizoma* under future climate conditions. *China Journal of Traditional Chinese Medicine Information*, 2022, 29(7): 1–7.  
郭怡博, 莫可, 王桂荣, 等. 未来气候条件下天麻适生区预测及时空变化分析. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(7): 1–7.
- [29] Zhang M Z, Ye X Z, Li J H, *et al.* Prediction of potential suitable area of *Ulmus elongata* in China under climate change scenarios. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 3822–3835.  
张明珠, 叶兴状, 李佳慧, 等. 气候变化情景下长序榆在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3822–3835.
- [30] Zhang Y B, Liu Y L, Qin H, *et al.* Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 496–502.  
张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测. 应用生态学报, 2019, 30(2): 496–502.
- [31] Eshetae T D S. Spatial characterization and distribution modelling of *Ensete ventricosum* (wild and cultivated) in Ethiopia. *Geocarto International*, 2021, 36(4): DOI: 10.1080/10106049.2019.1588392.
- [32] Warren D L, Wright A N, Seifert S N, *et al.* Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(3/4): 334–343.
- [33] Veloz S D. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models. *Journal of Biogeography*, 2009, 36(12): 2290–2299.

- [34] Zhao D M, Jiao Y M, Qiu Y M, *et al.* Assessment on landslide susceptibility of the core area of Hani race terraces heritage site Maximum Entropy model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 392—399, 407.  
赵冬梅, 角媛梅, 邱应美, 等. 基于MaxEnt模型的哈尼梯田核心区滑坡易发性评价. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 392—399, 407.
- [35] Li Y, Lu L Y, Tian X H, *et al.* Prediction of the suitable habitat distribution of oriental white stork in Shandong Province. *Acta Ecological Sinica*, 2023, 43(6): 2194—2201.  
李雨, 卢柳妍, 田秀华, 等. 东方白鹤在山东省适宜栖息地的分布预测. *生态学报*, 2023, 43(6): 2194—2201.
- [36] Yang Z W, Han S Y, Li Y, *et al.* Impacts and assessment of climate change on the global distribution of potentially suitable habitats for *Panthera uncia*. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1412—1425.  
杨子文, 韩姝伊, 李壹, 等. 气候变化对雪豹全球潜在适生区分布的影响与评估. *生态学报*, 2023, 43(4): 1412—1425.
- [37] Jiang R Y. Distribution of parasitic angiosperms and the parasite—host interactions in China. Nanjing: Nanjing Normal University, 2022.  
蒋若衍. 中国寄生被子植物的分布及其与寄主的关系. 南京: 南京师范大学, 2022.
- [38] Yan B L, Wang Z W, Wang Y H, *et al.* Effect of short-term rainfall change on plant community characteristics in desert steppe. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 1004—1012.  
闫宝龙, 王占文, 王悦骅, 等. 短期降雨改变对荒漠草原植物群落特征的影响. *草业科学*, 2018, 35(5): 1004—1012.
- [39] Duan Y Z, Zhu G X, Du Z Y, *et al.* Simulation and analysis of the suitable environment for *Nitraria* L. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(2): 124—129.  
段义忠, 朱国旭, 杜忠毓, 等. 西北干旱区白刺属植物适生环境的模拟分析. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(2): 124—129.
- [40] Madina·Halimujiang. Study on the geographical distribution patterns and potential suitable areas of four *Nitraria* species. Shihezi: Shihezi University, 2022.  
玛地娜·哈力木江. 四种白刺属植物地理分布格局及其潜在适宜区研究. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [41] Deb J C, Phinn S, Butt N, *et al.* The impact of climate change on the distribution of two threatened dipterocarp trees. *Ecology & Evolution*, 2017, 7(7): 2238—2248.
- [42] Guo Y, Gu Z R, Qi M, *et al.* Multi—index comprehensive quality evaluation of *Cynomorium songaricum* from different producing areas based on Projection Pursuit model. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, 41(8): 14—21.  
郭燕, 顾志荣, 祁梅, 等. 基于投影寻踪模型的不同产地锁阳药材多指标综合质量评价. *中国野生植物资源*, 2022, 41(8): 14—21.
- [43] Sun X, Lin Y L, Li B L, *et al.* Analysis and function prediction of soil microbial communities of *Cynomorium songaricum* in two daodi—origins. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2020, 55(6): 1334—1344.  
孙晓, 林余霖, 李葆莉, 等. 干旱区沙生药用植物锁阳土壤微生物群落分析与功能预测. *药学报*, 2020, 55(6): 1334—1344.
- [44] Gu Z R, Sun L P, Qian Q, *et al.* Study on HPLC fingerprints and content determination of water fraction of *Cynomorii herba* from different producing areas. *Chinese Journal of Information on TCM*, 2020, 27(11): 82—88.  
顾志荣, 孙岚萍, 钱倩, 等. 不同产地锁阳水溶性部位HPLC指纹图谱及含量测定研究. *中国中医药信息杂志*, 2020, 27(11): 82—88.
- [45] Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China*. Beijing: Science Press, 1986.  
中国科学院中国植物志编辑委员会. *中国植物志*. 北京: 科学出版社, 1986.
- [46] Xiang J W, Zhang L P, Deng Y, *et al.* Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(1): 46—57, 81.  
向竣文, 张利平, 邓瑶, 等. 基于CMIP6的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(1): 46—57, 81.
- [47] Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal impact and foreground of climatic shift from warm—dry to warm—humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology Permafrost*, 2002, 24(3): 219—226.  
施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219—226.
- [48] Yao X Y, Zhang M J, Zhang Y, *et al.* New insights into climate transition in northwest China. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 671—683.  
姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 671—683.
- [49] Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Global warming and abrupt climate change. *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 114—120.

赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖与气候突变. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 114—120.

- [50] Li Z S, Ma Y S, Li Y X, *et al.* Spatial and temporal variations of the potential habitat of *Asterothamnus centrali-sinensis* on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(6): 1566—1575.
- 李政升, 马玉寿, 李有鑫, 等. 气候变化下青藏高原中亚紫菀木潜在适生区的时空动态变化. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1566—1575.
- [51] Zhao J P, Wang Y L, Lu X L, *et al.* Climatic suitable area analysis and response to climate change of *Actinidia arguta* in China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1523—1532.
- 赵金鹏, 王闫利, 陆兴利, 等. 软枣猕猴桃在中国的适生区分析及对未来气候变化的响应. 中国生态农业学报, 2020, 28(10): 1523—1532.
- [52] Chen S S, Liu X, Tong X Y, *et al.* Prediction of *Camellia edithae* species distribution based on multi-model combination. Ecological Science, 2020, 39(2): 58—66.
- 陈思斯, 刘想, 童鑫玥, 等. 基于多模型集合预测尖萼红山茶物种分布. 生态科学, 2020, 39(2): 58—66.
- [53] Wan G Z, Luo Y H, Zhang D X, *et al.* Prediction of the potential habitat of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao in Gansu Province based on the Maximum Entropy model and analysis on its ecological characteristics. Chinese Journal of Information on TCM, 2024, 31(1): 1—5.
- 万广珍, 罗永慧, 张鼎新, 等. 基于最大熵模型的甘肃省蒙古黄芪潜在适生区预测及生态特征分析. 中国中医药信息杂志, 2024, 31(1): 1—5.