

DOI:10.11686/cyxb2024138

http://cyxb.magtech.com.cn

田丛嫣, 王文强, 杨博, 等. 沙芦草的分布及潜在适生区预测. 草业学报, 2025, 34(2): 27-40.

TIAN Cong-yan, WANG Wen-qiang, YANG Bo, et al. Prediction of potentially suitable areas for *Agropyron mongolicum* to enhance its distribution. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 27-40.

## 沙芦草的分布及潜在适生区预测

田丛嫣<sup>1</sup>, 王文强<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>, 黄文广<sup>2</sup>, 梁咏亮<sup>3</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. 宁夏回族自治区草原工作站, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 沙芦草是我国二级重点保护植物, 具有极强的耐旱性和适应性, 在荒漠草地植被恢复和小麦遗传育种方面具有重要价值。沙芦草对环境变化敏感, 探究沙芦草栖息地的适宜特征, 预测不同气候情境下沙芦草的潜在适生区, 对保护沙芦草有重要指导意义。本研究基于119条有效分布记录和39个自然环境变量, 利用最大熵模型和ArcGIS软件对自然环境下沙芦草当前和未来两种不同气候情境(SSP1-2.6和SSP5-5.8)的适生区进行预测。结果显示最湿月降水量、气温季节性变动系数和土壤酸碱度是影响沙芦草分布的主导自然因子。当前沙芦草的适生区主要集中在中国北部干旱地带, 高适生区在内蒙古、陕西和宁夏的交界地带; 在未来两种气候情境下, 沙芦草的栖息地均有不同程度的西移。在未来气候条件下, 沙芦草潜在分布区的总体分布格局与现在相似, 但适生等级变化幅度大, 高适生区在未来气候条件下有向北迁移聚集的趋势, 主要集中分布在内蒙古中部地区。因此, 对沙芦草的保护应该着眼于当前时期沙芦草群落集中的地区, 并关注内蒙古中部地区的沙芦草潜在栖息地。

**关键词:** 沙芦草; 最大熵模型; ArcGIS软件

## Prediction of potentially suitable areas for *Agropyron mongolicum* to enhance its distribution

TIAN Cong-yan<sup>1</sup>, WANG Wen-qiang<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, HUANG Wen-guang<sup>2</sup>, LIANG Yong-liang<sup>3</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 Grassland Workstation, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Helan Mountain National Nature Reserve Administration, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** *Agropyron mongolicum*, a plant under second-level key protection in China, possess strong drought resistance and adaptability. Hence, this species has significant value for the restoration of desert grassland vegetation and as a genetic resource for wheat (*Triticum aestivum*) breeding. Because *A. mongolicum* is sensitive to changes in environmental factors, it is important to identify its optimal habitat conditions to forecast its potential distribution under various climate scenarios; such information will provide crucial guidance for its conservation. In this study, a maximum entropy model was constructed using 119 accurate distribution records and data for 39 environmental variables. The model, which was implemented in ArcGIS software, was used to predict the current and future suitable growth areas for *A. mongolicum* under two different climate scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-5.8). The results show that precipitation of wettest month, seasonal variation coefficient of temperature, and soil pH are the

收稿日期: 2024-04-23; 改回日期: 2024-06-05

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01), 宁夏草原监测项目(2023), 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籽麻黄保护生物学研究项目(2022)资助。

作者简介: 田丛嫣(2001-), 女, 土家族, 湖北恩施人, 在读硕士。E-mail: 793679189@qq.com

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

primary natural factors influencing the distribution of *A. mongolicum*. At present, suitable growth areas for *A. mongolicum* are predominantly in northern China's arid zones, with large populations distributed along the borders of Inner Mongolia, Shaanxi, and Ningxia. Under both projected climate scenarios, the suitable habitat for *A. mongolicum* is expected to shift westward to varying extents. Under future climate change scenarios, the overall distribution pattern of *A. mongolicum*'s potential growth areas will resemble the current one, but there will be substantial changes in suitability for *A. mongolicum* growth. Highly suitable areas for *A. mongolicum* are projected to migrate northward under these future climate scenarios, primarily to central Inner Mongolia. Consequently, conservation efforts for *A. mongolicum* should concentrate on areas which currently have dense communities and pay attention to potential future habitats in central Inner Mongolia.

**Key words:** *Agropyron mongolicum*; maximum entropy model; ArcGIS software

全球气候变化是影响自然环境的主要因素之一<sup>[1]</sup>。气候变化能引起物候、物种分布、生物入侵以及粮食产量波动等生态变化<sup>[2-4]</sup>。气候因素直接决定了物种的生态位和分布区<sup>[5]</sup>。探究物种分布与气候变化之间的复杂关系,对生物多样性保护和生态系统可持续发展有重大意义<sup>[6]</sup>。在全球气候变化背景下<sup>[7]</sup>,物种的地理分布正在发生深刻变化<sup>[8]</sup>。因此,在此背景下,对保护物种分布的预测不仅能够预知物种适生范围和迁移路线,还能揭示潜在的生态位,可为保护物种提供有效的保护和管理措施。

近年来,物种分布模型(species distribution models, SDM)已成为研究物种分布格局的重要工具<sup>[9]</sup>。其中,基于最大熵原理的最大熵(MaxEnt)模型在模拟物种地理分布方面表现突出,其优点是能有效处理变量间的复杂交互关系,对样本量少<sup>[10]</sup>、取样不规则或有少量位点偏差的数据可以提供准确的预测结果<sup>[11-12]</sup>。最大熵模型在入侵物种的适宜区域研究<sup>[13]</sup>、气候变化对物种分布的影响<sup>[14-15]</sup>、保护濒危物种<sup>[16-17]</sup>和预测传染病风险分布<sup>[18-20]</sup>等方面的应用已经取得了进展。

沙芦草(*Agropyron mongolicum*)隶属于禾本科冰草属,为我国二级保护植物<sup>[21]</sup>,主要分布于内蒙古、山西、陕西、甘肃等地。沙芦草有着极强耐旱性、耐寒性和适应性,是优良的抗旱耐寒野生牧草资源。研究发现,沙芦草能在固定、半固定沙丘以及砾石质坡地等严酷的环境中形成群落,有效控制流沙移动,显著改善生态环境<sup>[22]</sup>;在不良环境条件下通过改变种群数量<sup>[23]</sup>、养分分配<sup>[24-25]</sup>和土壤理化性质<sup>[26]</sup>等策略适应环境。沙芦草群落能通过根际效应提高土壤性质,进而提高土壤质量<sup>[27]</sup>。在遗传学方面,相关研究发现沙芦草具有许多耐旱基因<sup>[28]</sup>和耐寒基因<sup>[29]</sup>,使其具有很强的耐逆性。沙芦草作为小麦(*Triticum aestivum*)的野生近缘种,可为小麦提供抗性改良的理想供体<sup>[30]</sup>。此外,沙芦草还是荒漠草原中产量高、营养丰富的优质牧草<sup>[31]</sup>;是荒漠草原地区退化草场补播的较好材料<sup>[32]</sup>,可用于干旱地区植被恢复。

近年来,由于土地利用方式改变、人类活动的加剧以及全球气候变化,沙芦草种群的栖息地遭受破坏,种群数量下降,以至于日渐濒危<sup>[33]</sup>。因此,本研究结合优化的最大熵(MaxEnt)模型和ArcGIS软件预测未来自然条件下沙芦草的潜在适生区分布情况,为科学实施保护措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 沙芦草分布数据

本研究所用沙芦草的地理位置坐标数据主要来源于中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>)、全球生物多样性信息平台(<http://www.gbif.org/>)、野外调查和国内外相关文献,总共整理了146个分布点。通过ENMtools工具对中立的分布数据去冗余,以防止模型预测过程中过拟合,最终得到了119个沙芦草有效分布数据(图1)。

### 1.2 自然环境数据

本研究选择了自然环境数据中的气候、土壤和地形3部分数据。共选取了39个独立的自然环境变量(表1)进行研究。1)气候数据:从全球气候数据库WorldClim(<https://www.worldclim.org>)下载海拔数据和气候数据。当前时期和未来时期的环境数据均来自WorldClim 2.1(<https://worldclim.org/data/index.html>),该数据由政府

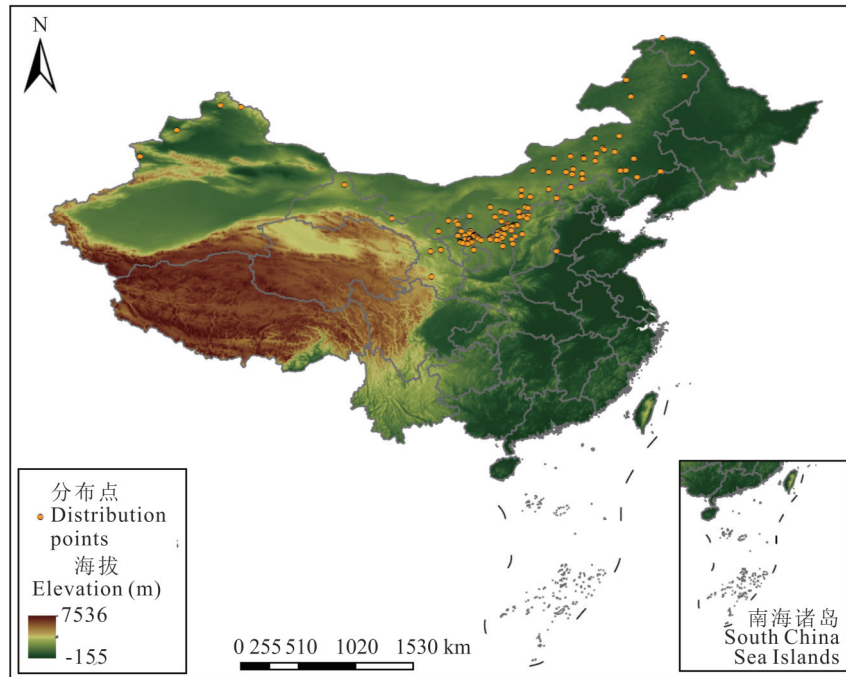


图 1 沙芦苇在我国的分布点

Fig. 1 Distribution points of reed grass in China

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 of the Ministry of Natural Resources GS(2023) No. 2767, the boundaries of the base map have not been modified.

间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)第 6 次耦合模型比较项目(coupled model intercomparison project 6, CMIP6)构建。本研究中未来的环境数据采用共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSP)来表示。未来环境数据包括两种温室气体排放场景:低浓度(SSP1-2.6)和高浓度(SSP5-5.8)。本研究选取了 2050 和 2070 年两个时期的气候数据。2) 土壤数据来自世界土壤数据库 HWSD (<https://www.fao.org>),筛选并下载了 17 个土壤环境因子数据。3) 地形数据:包括坡度和坡向,都是在 ArcGIS 软件的空间模块中分析海拔数据得到的。

### 1.3 数据处理

将统一坐标为 WGS 1984 后的自然环境数据导入 ArcGIS 10.4.1 软件。打开数据管理工具,通过批量重采样,将沙芦苇分布数据统一为 2.5 m 分辨率。将转换为“asc”格式的自然环境变量导入沙芦苇有效分布数据,通过 MaxEnt 3.4.1 软件进行建模运算,随机选取 75% 的数据预测模型,余下数据验证模型精度,重复 5 次,最终得到各自然环境的贡献度。为避免环境因子之间存在较高的共线性导致模型过拟合,本研究使用 R 语言对 39 个环境因子进行相关性分析。根据相关性分析结果,保留  $R \geq 0.8$  的环境因子,并在预实验中选择对模型贡献率高的环境因子作为主要环境变量。

### 1.4 MaxEnt 模型优化与构建

本研究参考 Cobos 等<sup>[34]</sup>的方法,使用 R 语言软件与 Kuenm 包(<https://github.com/marlonecobos/kuenm>) 优化 MaxEnt 模型。将沙芦苇分布数据与筛选后的环境因子导入 MaxEnt 软件中,运行 5 个模型要素类型(feature combination, FC)和正则化乘数(regularization multiplier, RM)的不同组合并验证,选择 Akaike 信息量准则评估下的最优模型。Akaike 信息量准则,简称 AICc,是用于评估模型不同参数组合的拟合度和复杂度的一种评估方法。

将筛选后的地理坐标数据和自然环境数据导入 MaxEnt 3.4.1 中,运行优化后的模型。运行时随机选择 75% 作为训练集,剩下作为测试集。在模型预测过程中,本研究设定了迭代次数为 10000 次,并进行 10 次重复,利用刀切法<sup>[35]</sup>重检验自然环境变量数据,以确保结果的准确性。

表1 39个独立的自然环境变量

Table 1 39 independent natural environment variables

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年平均温度 Average annual temperature	°C
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean temperature difference between day and night	°C
Bio3	昼夜温差与年温差比值 Temperature difference between day and night/annual temperature difference	%
Bio4	气温季节性变动系数 Seasonal variation coefficient of temperature	
Bio5	最热月最高温 Max temperature of warmest month	°C
Bio6	最冷月最低温 Min temperature of coldest month	°C
Bio7	年温度变化范围 Temperature annual range	°C
Bio8	最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter	°C
Bio9	最干季均温 Mean temperature of driest quarter	°C
Bio10	最暖季均温 Mean temperature of warmest quarter	°C
Bio11	最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter	°C
Bio12	年均降水量 Annual precipitation	mm
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	mm
Bio15	季节性降水量 Precipitation seasonality	mm
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	mm
Bio17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	mm
Bio18	最暖季平均降水量 Mean precipitation of warmest quarter	mm
Bio19	最冷季平均降水量 Mean precipitation of coldest quarter	mm
aws_class	土壤有效水含量 Available water content of soil (AWC)	%
s_clay	亚表层土壤黏粒组分 Subsoil clay fraction	重量百分比 (wt. %)
t_bs	盐基饱和度 Topsoil base saturation	%
t_cacos3	碳酸盐或石灰含量 Topsoil calcium carbonate	重量百分比(wt. %)
t_cacos4	硫酸盐含量 Topsoil gypsum	重量百分比 (wt. %)
t_cec_clay	黏性土壤的阳离子交换能力 Topsoil cation exchange capacity (CEC)(clay)	comL·kg <sup>-1</sup>
t_cec_soil	表层土壤阳离子交换量 Topsoil cation exchange capacity (CEC)(soil)	comL·kg <sup>-1</sup>
t_ece	电导率 Soil conductivity (Elco)	ds·m <sup>-1</sup>
t_esp	可交换钠盐 Soil exchangeable sodium (ESP)	%
t_gravel	表层土壤砾石含量 Topsoil gravel content	体积百分比(vol. %)
t_oc	有机碳含量 Topsoil organic carbon	重量百分比(wt. %)
t_ph_h2o	酸碱度 Topsoil pH (H <sub>2</sub> O)	
t_ref_bulk	土壤容重 Topsoil reference bulk density	g·cm <sup>-3</sup>
t_sand	沙含量 Topsoil sand fraction	重量百分比(wt. %)
t_silt	表层土壤粉粒组分 Topsoil silt fraction	重量百分比(wt. %)
t_teb	交换性盐基 Topsoil exchange base (TEB)	comL·kg <sup>-1</sup>
t_usda_tex	USDA 土壤质地分类 Topsoil USDA texture classification	
elev	海拔 Elevation	m
slope	坡度 Slope	°
aspect	坡向 Aspect	°

AUC(ROC 曲线下的面积 area under curve)是一种基于阈值无关的性能评价方法,其主要应用于对 MaxEnt 进行评估,因此,本研究拟采用被试工作特性曲线下区域(AUC)作为检测点与背景点的判别能力。本研究拟采用训练 AUC 与测试 AUC 之间的差值(the difference between training and testing AUC)、10% 训练遗漏率(10% training omission rate)、最小训练集合遗漏率(minimum training presence omission rate)对各参数的拟合程度进行评价,筛选出最适宜的模型参数<sup>[36]</sup>。通过研究被试的工作特性曲线(receiver operating characteristic curves,ROC)下面积(AUC)来定量评价 MaxEnt 模型的预测精度,AUC 在 0~1 的范围内,AUC 值越逼近 1,则表明该模型的预测精度和可靠性都较高。一般来说,在  $AUC < 0.6$  的情况下,该模型的预测将被视为是不合格的。在  $0.6 < AUC < 0.7$  的情况下,该模型的预测效果不佳。在  $0.7 < AUC < 0.8$  的情况下,该模型预测效果一般。在  $0.8 < AUC < 0.9$  的条件下,该模型得到了较好的预测效果。在  $0.9 < AUC < 1.0$  的情况下,该模型预测结果为优秀<sup>[37]</sup>。

### 1.5 沙芦苇适生区划分

将物种出现点位和筛选后的环境数据导入 MaxEnt 软件,模拟出沙芦苇的生境适宜性指数。然后,将适宜性指数值大于最大测试敏感性和特异性逻辑阈值(maximum test sensitivity plus specificity logistic threshold)的区域作为该物种的适生区<sup>[38]</sup>。输出沙芦苇的分布概率( $P$ )。使用 ArcGIS 10.4.1 软件 ArcToolbox 工具箱中的重分类(reclassify)命令,根据分布概率  $P$  值将沙芦苇的生境适宜性分布区划分为 4 个适生等级(表 2)。

表 2 适生区等级划分

Table 2 Classification of suitable areas

分布概率 Distributed probability	评价等级 Evaluation level
$P < 0.16$	非适生区 Uninhabitable area
$0.16 \leq P < 0.30$	低适生区 Low suitable area
$0.30 \leq P < 0.60$	中适生区 Medium suitable area
$0.60 \leq P < 1.00$	高适生区 High suitable area

## 2 结果与分析

### 2.1 自然环境变量的筛选

结合 R 语言得到的 39 个自然环境变量的相关性与 MaxEnt 软件得到的贡献率,以及刀切法分析自然环境变量,最终确定 8 个自然环境变量参与模型构建(图 2)。最终确定相关性系数均小于 0.8 的 8 个环境变量(Bio13、Bio4、t\_ph\_h2o、Bio1、t\_sand、elev、Bio15、Bio3)。

在最终确定参与建模的自然环境变量中,Bio13(最湿月降水量)的贡献率最大,为 46.8%;其次为 Bio4(气温季节性变动系数,33.9%)、t\_ph\_h2o(酸碱度,7.4%)、Bio1(年平均温度,5.3%)、t\_sand(沙含量,2.9%)、elev(海拔,2.7%)。其中最湿月降水量和气温季节性变动系数贡献率总占比达到了 80.7%,是影响沙芦苇适生区的关键因素(表 3)。

### 2.2 环境变量响应曲线

基于 8 个环境因子分别进行单因子建模,其结果(单因子响应曲线)显示预测物种的存在概率随环境变量的变化,可以表征沙芦苇的适生区存在概率与环境因子之间的相关变化趋势。从 8 个单因素响应曲线(图 3)可知,沙芦苇的适生条件为:年平均温度  $-3 \sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、昼夜温差与年温差比值 20%~33%、气温季节性变动系数 1000~1900、最湿月降水量 35~140 mm、季节性降水量 73~163 mm、海拔 350~3000 m、土壤酸碱度 5.9~9.3、沙含量  $-5 \sim 101 \text{ wt}\%$ 。

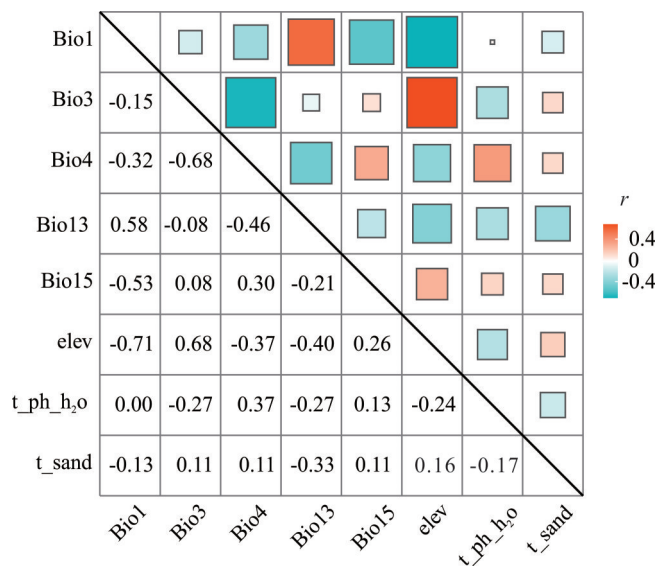


图 2 8 个因子的相关性热图

Fig. 2 Correlation heat map of 8 factors

2.3 模型的优化和准确性评估

在 Kuenm 包创建的 1160 个分布模型中, 最优模型有 1 个。最优模型符合 5% 的遗漏率标准。其遗漏率 = 0.03333333、AICc = 2634.099102, 优化模型参数倍频 = 2.7, FC = lpth。结果显示平均 AUC = 0.946(图 4), 标准偏差 = 0.011。依据 AUC 来评估优化后的最大熵模型, 本研究的模型属于优秀的范围, 准确度较高, 可信度较好, 用于沙芦苇的适宜分布区域预测的结果可靠。

2.4 潜在地理分布及适生区评价

将 MaxEnt 模型预测结果添加至 ArcGIS 10.4.1 中, 选择浮点型转换为栅格数据, 对栅格数据进行重分类, 按照分布概率阈值  $P(0.16)$  将沙芦苇划分为非适生区和适生区, 将适生区划分

表 3 8 个自然环境变量及其贡献率和重要值

Table 3 8 natural environment variables and their contribution rates and important values

变量 Variable	贡献率 Percent contribution (%)	重要值 Permutation importance
Bio13 最湿月降水量 Precipitation of wettest month	46.8	41.8
Bio4 气温季节性变动系数 Seasonal variation coefficient of temperature	33.9	41.0
t_ph_h2o 酸碱度 Topsoil pH (H <sub>2</sub> O)	7.4	2.6
Bio1 年平均温度 Average annual temperature	5.3	6.8
t_sand 沙含量 Topsoil sand fraction	2.9	0.7
elev 海拔 Elevation	2.7	6.1
Bio15 季节性降水量 Precipitation seasonality	0.6	0.6
Bio3 昼夜温差与年温差比值 Isothermality	0.3	0.5

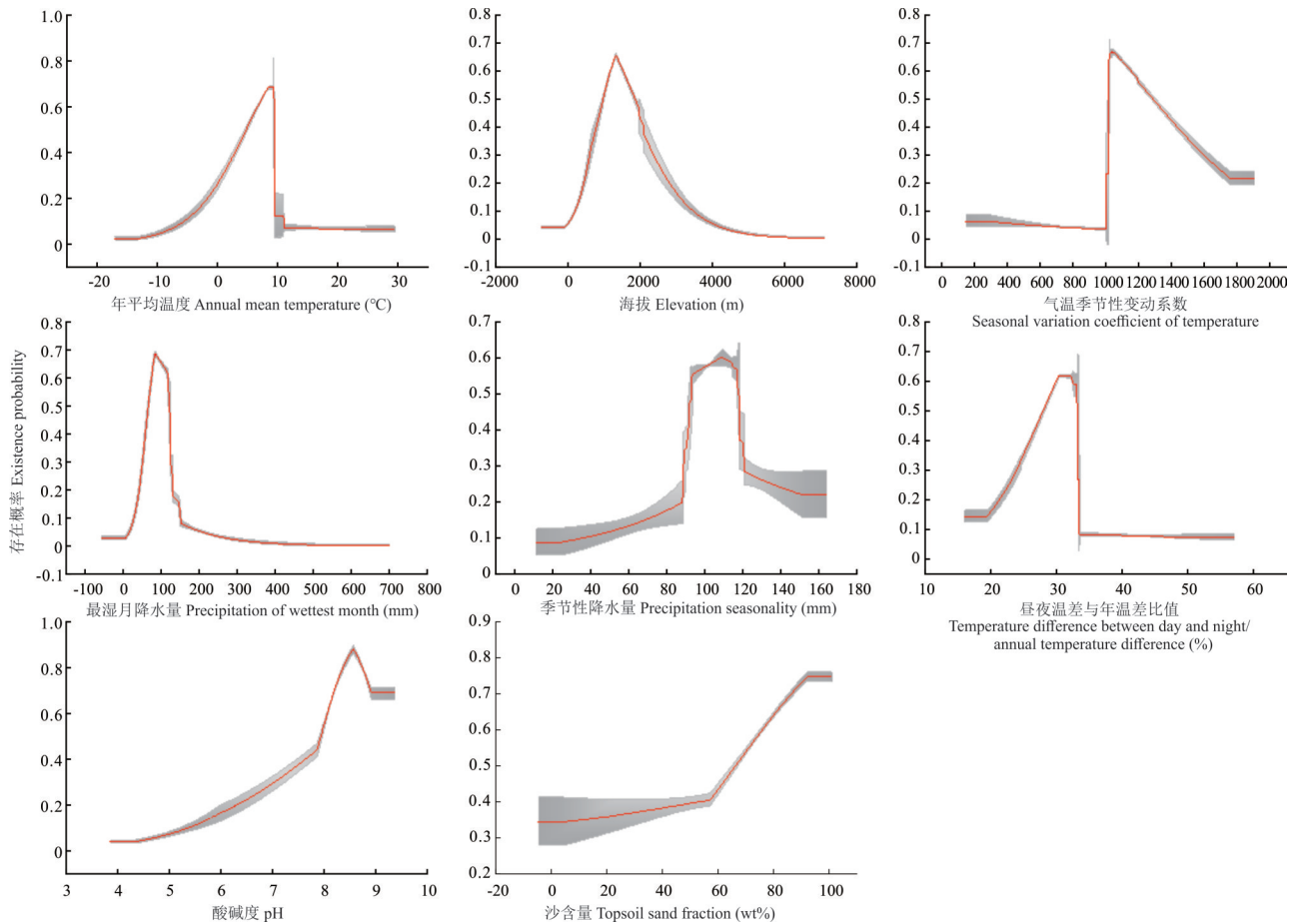


图 3 8 个环境因子响应曲线

Fig. 3 Response curves of 8 environmental factors

为低适生区、中适生区和高适生区。通过 ArcGIS 统计不同等级适生区的面积, 并比较自然环境影响下不同年限、不同情境中沙芦苇适生面积变化(图 5 和图 6)。

当前环境条件下,沙芦苇适生区总面积为  $118.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占我国国土面积的 13%。其中,高适生区面积为  $22.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占适生区总面积的 19%; 中适生区面积为  $52.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占适生区总面积的 44%; 低适生区面积为  $43.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占适生区总面积的 37% (图 5)。自然环境变化影响下,在 SSP1-2.6 情境中,2050 年相对当前时期适生区约增加  $12.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 2070 年相对当前时期适生区约增加  $8.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 在 SSP5-5.8 情境中,2050 年相对当前时期适生区约减少  $4.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 2070 年相对当前时期适生区约减少  $1.69 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 6)。

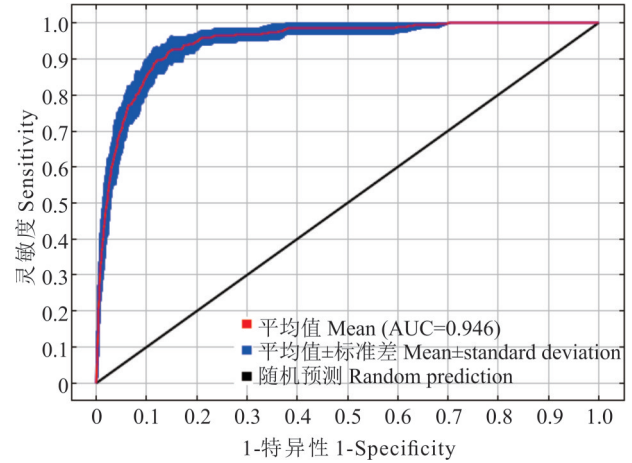


图 4 模型 ROC 曲线  
Fig. 4 Model ROC curve

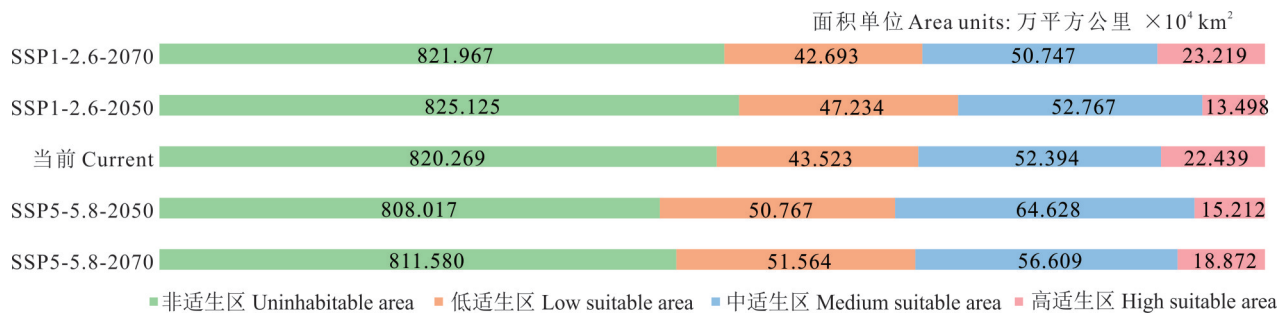


图 5 沙芦苇适生区面积变化  
Fig. 5 Area change of suitable area of reed grass

总适生区面积最大的是 SSP1-2.6-2050, 面积约为  $130.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 总适生区面积最小的是 SSP5-5.8-2050, 面积约为  $113.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 高适生区面积最大的是 SSP5-5.8-2070 年, 面积约  $23.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 高适生区面积最小的是 SSP5-5.8-2050 年, 面积约为  $13.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 沙芦苇总适生区面积预计会逐年缩小。

**2.4.1 当前时期沙芦苇潜在分布** 当前自然环境影响下(图 7), 沙芦苇适生区主要集中在我国内陆干旱地区, 分布在内蒙古、宁夏、陕西、山西、甘肃等省份。目前的高适生区分布在内蒙古南部、中部, 宁夏中部, 陕西北部, 山西北部, 河北西北部部分地区, 甘肃中部部分地区。中适生区集中分布在内蒙古中部大多数地区, 甘肃中部部分地区, 山西中部和宁夏北部等地区。低适生区主要分布在新疆西北部部分地区, 甘肃东北部, 内蒙古北部、中部地区, 山东北部部分地区, 以及河北北部地区。

**2.4.2 未来时期沙芦苇的潜在分布** 通过预测, 在未来两个情境中, 沙芦苇潜在适生区都呈放射状分布, 中心为高适生区, 周围为中适生区, 最边缘为低适生区(图 8)。

在未来时期自然环境影响下, 在 SSP1-2.6 情境中, 2050 年, 沙芦苇适生区主要集中在我国内陆干旱地区, 分布在新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、黑龙江等省份; 2070 年, 沙芦苇适生区主要集中在我国内陆干旱

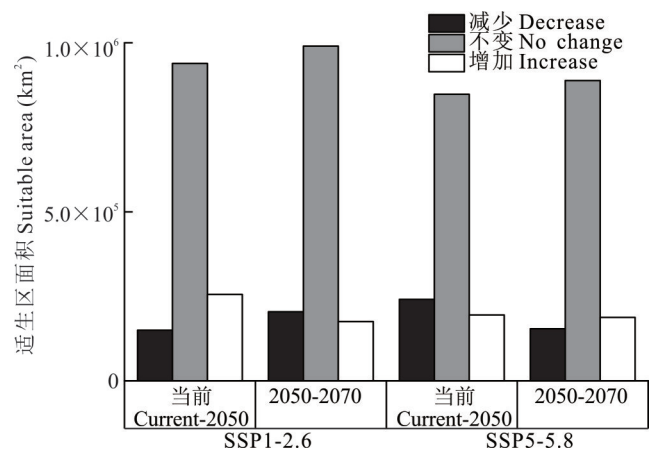


图 6 适生区面积变化  
Fig. 6 Changes in suitable areas

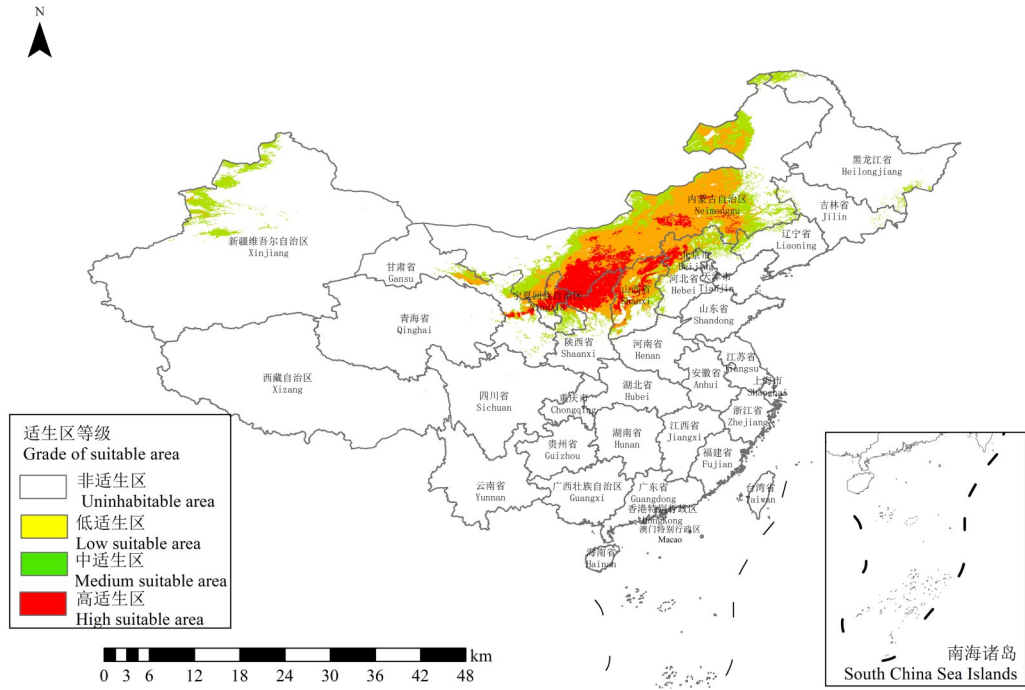


图7 当前自然条件下沙芦草潜在适生区分布

Fig. 7 Distribution of potential suitable areas under current natural conditions

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 of the Ministry of Natural Resources GS(2023) No. 2767, the boundaries of the base map have not been modified.

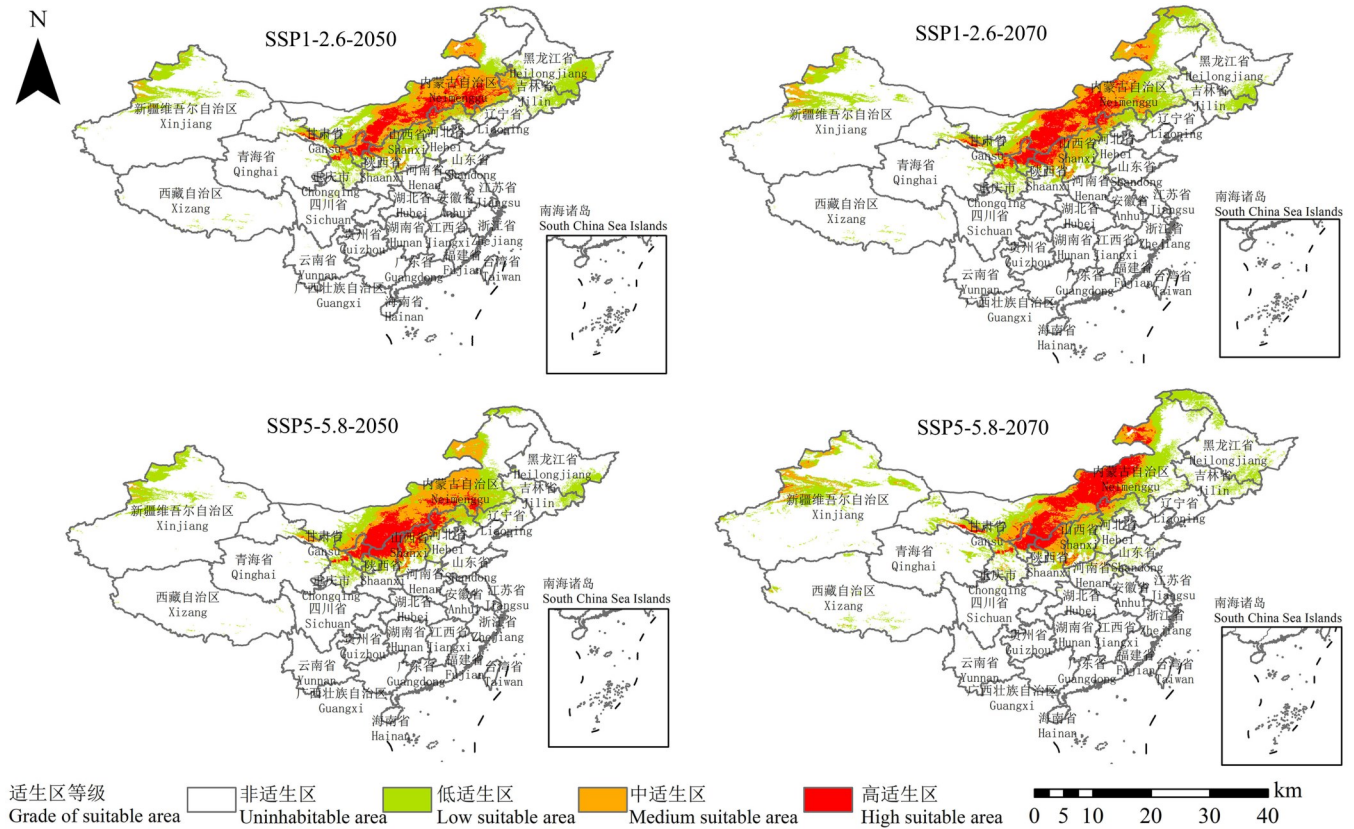


图8 两种未来环境下2050和2070年沙芦草潜在适生区分布

Fig. 8 Distribution of potential habitat areas of reed grass in 2050 and 2070 under two future environments

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 of the Ministry of Natural Resources GS(2023) No. 2767, the boundaries of the base map have not been modified.

地区,分布在新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、黑龙江等省份。具体而言,SSP1-2.6-2050年,沙芦草的高适生区分布在甘肃中部,宁夏中部,陕西西北部局部地区,内蒙古中部,河北北部。中适生区集中分布在内蒙古中部,宁夏北部,陕西中部,甘肃中部,山西北部,河北北部,吉林北部部分地区。低适生区主要分布在新疆西北部局部地区、中部局部地区,甘肃中部、南部,内蒙古西部,宁夏南部,陕西中北部,山西中北部,河北北部,吉林北部、南部,黑龙江南部。到2070年,沙芦草高适生区向西北稍稍偏移,主要在陕西地区,内蒙古地区有所增加;中适生区内蒙古东南部有所减少;低适生区在内蒙古东南部,黑龙江北部、南部有所增加。

在未来时期自然环境影响下,在SSP5-5.8情境中,2050年,沙芦草适生区主要集中在中国内陆干旱地区,分布在甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西等省份;2070年,沙芦草适生区主要集中在中国内陆干旱地区,分布在甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北等省份。具体而言,SSP5-5.8-2050年,沙芦草的高适生区分布在甘肃中部,宁夏中东部,内蒙古中部。中适生区集中分布在新疆西北部,内蒙古中部,宁夏西北部,陕西东北部,山西西部。低适生区主要分布在新疆西北部部分地区、中部部分地区,甘肃南部,宁夏西南部,内蒙古中部部分地区,山西东部,河北西北部,吉林南部,黑龙江南部和北部。到2070年,沙芦草的高适生区更加集中,内蒙古地区的高适生区有所增加;中适生区分布较2050年变化不大;低适生区有所增加,主要是内蒙古东南部有增加。总体适生区分布变化不大。

**2.4.3 适生区质心分布变化** 研究结果显示,沙芦草适生区在不同排放情境下的质心都在内蒙古自治区内,且都有轻微偏移。在当前气候条件下,沙芦草适宜区的质心(图9)位于内蒙古自治区四子王旗。SSP1-2.6情境下,沙芦草适宜区的质心先向东北方向偏移,再向西偏移,直到2070年,质心位置转移至达尔罕茂明安联合旗。SSP5-5.8情境下,沙芦草适宜区的质心向西偏移,2070年时,质心位于乌拉特中旗。不同排放情境下,沙芦草未来适生区质心偏移方向略有差异,但总体方向一致,均为向西偏移。

### 3 讨论

#### 3.1 最大熵模型的准确度分析

本研究基于最大熵模型对沙芦草进行了潜在生态适宜区的预测。MaxEnt模型作为SDM的其中一种,因其模拟结果的准确度高、稳定性好而被生态学者广泛使用<sup>[39]</sup>。MaxEnt模型被广泛应用于动物、植物的分布预测研究中,Morales等<sup>[40]</sup>综述了近年来已发表的相关文章中最大熵模型的使用情况,结果显示大多数文章都直接使用最大熵模型的默认参数进行模拟,缺少对软件最佳参数的优化过程,导致预测结果不准确,难以评价相应的物种分布。因此,最大熵模型的参数优化对于物种分布预测结果的可靠性和准确性至关重要<sup>[41]</sup>。AUC值是评估最大熵模型的可靠方法<sup>[37]</sup>,其值为0.9~1.0,可评价模型为优秀水平。本研究选用模型的AUC值为0.946,标准偏差为0.011,具有很高的精度,并对未来两个气候情境下沙芦草适生区进行了预测,将对沙芦草的保护提供可靠的价值。

#### 3.2 影响沙芦草的环境因子

气候变化将导致某些物种的适宜分布区发生变化,生境破碎化,全球生物多样性加速丧失<sup>[41]</sup>。沙芦草的主要潜在地理分布区集中在我国北方荒漠地区,占全国面积的13%。结合刀切法检验结果,本研究中影响沙芦草适生区分布的环境因子主要是Bio13(最湿月降水量)、Bio4(气温季节性变动系数)、t\_ph\_h<sub>2</sub>o(酸碱度)、elev(海拔)。其中气候因素最湿月降水量和气温季节性变动系数贡献率分别为46.8%和33.9%,是影响沙芦草适生区分布的主导因素。从环境因子响应曲线来看,沙芦草虽然耐旱,但生长关键期对水分供应敏感。马子元等<sup>[32]</sup>研究表明,沙芦草苗期缺水会直接导致其生长速率减慢。中国北部地区最湿月一般为7月下旬至8月上旬,正值沙芦草的生长季,适宜的降水可以保障沙芦草完成生长繁殖,增加种群数量<sup>[33]</sup>。沙芦草在20~30℃时供给适宜水分可提高萌发率<sup>[42-43]</sup>,中国北部的7-8月温度和水分均为沙芦草适宜生长环境。近年来,气候变暖日益加剧,气温季节性变动系数也随之发生了明显变化<sup>[42]</sup>,这就会导致沙芦草某些重要生长发育期极度干旱,进而导致沙芦草减少繁殖投入。生物在面对温度季节性变化时,会通过生理适应和行为改变等方式来适应环境,从而维持生命活动<sup>[43-44]</sup>。沙芦草适宜生长在荒漠区的弱碱性土地上,具有较强的耐盐碱性<sup>[45]</sup>,本研究中土壤酸碱度是沙芦草的重

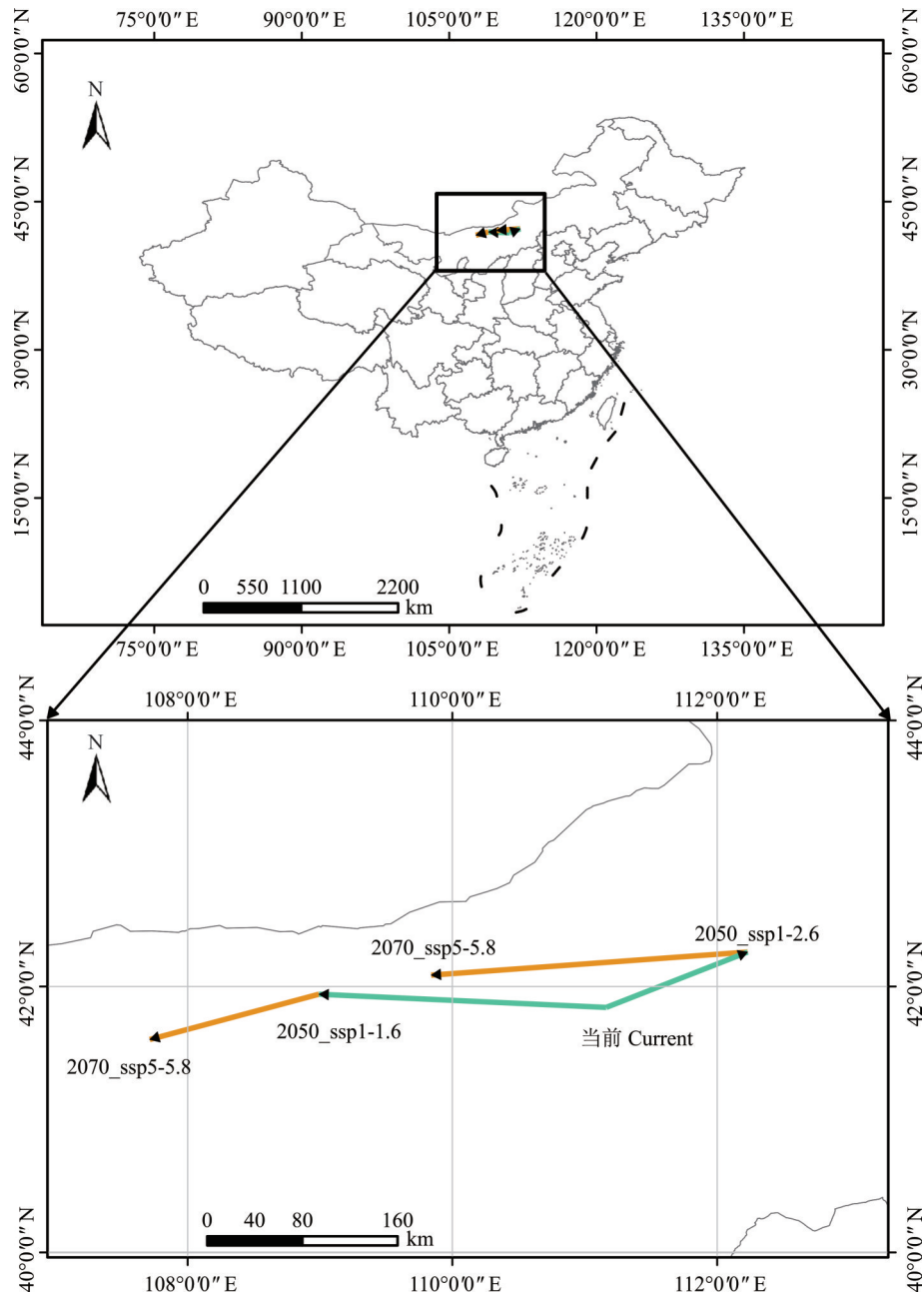


图9 高适生区质心转移

Fig. 9 Centroid transfer in high suitability area

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 of the Ministry of Natural Resources GS(2023) No. 2767, the boundaries of the base map have not been modified.

要土壤因子与其相吻合。地形因子对沙芦苇适生区存在一定影响,沙芦苇在海拔350~3000 m都存在适生区。海拔升高伴随着降水量的增加<sup>[46]</sup>,充足的水分为沙芦苇生长发育提供有利条件,但海拔过高时,气温较低,气候寒冷,植被类型转变为灌丛等高山植被<sup>[47]</sup>,沙芦苇的适生区减少。影响沙芦苇适生区分布的因子不仅有气候因子,土壤和地形因子也发挥了重要作用,沙芦苇的适生区分布变化与气候变化密不可分。

### 3.3 面积变化,质心转移

当前沙芦苇主要分布于我国北方干旱沙地,与《中国植物志》<sup>[48]</sup>记载一致。未来时期,沙芦苇适生区面积虽然变化不大,但不同等级适生区分布地区有所改变,这与未来时期自然环境变化相关。SSP1-2.6情境下,到2050年,沙芦苇主要高适生区有向东移动的趋势,这与未来时期黄土高原北部降水增多<sup>[49]</sup>,温度季节性增强<sup>[50]</sup>的趋势

一致。2050—2070年,高适生区在内蒙古的分布地区更为集中,出现适生区等级升高的现象。本研究发现,SSP5-5.8情境下,沙芦苇主要高适生区有向北移动的趋势,到2070年,内蒙古高适生区最为集中,因为未来时期内蒙古自然环境适宜沙芦苇生长,从而使其种群密集,成为高适生区。沙芦苇适生区的质心在不同排放情境下,偏移方向略有差异,这也可能是由于在未来不同排放情境降水量增加量和气温上升幅度有差异<sup>[51]</sup>引起的。

### 3.4 对沙芦苇保护的展望

本研究发现,沙芦苇在未来不同二氧化碳排放情境下,适生区会存在一定的西移,未来对沙芦苇的保护应当基于现有保护区域向西扩大范围,以保证沙芦苇的繁育。除此之外,还可以对沙芦苇进行定期的野外监测,以减少人类活动对野生沙芦苇群落的破坏。基于本研究,沙芦苇未来的发展空间更多地集中在内蒙古中部地区,可以考虑在内蒙古中部地区采用围封的保护措施<sup>[52]</sup>。

## 4 结论

本研究通过结合最大熵模型和 ArcGIS 软件对国家二级保护植物沙芦苇进行了当前自然条件下潜在适生区预测,以及未来两种自然条件下不同时期潜在适生区预测。依据 AUC 值评估最大熵模型,本研究采用的优化后的模型为优秀模型。预测结果显示当前沙芦苇的主要栖息地在中国北部干旱地带(内蒙古、宁夏和陕西的交界地带);SSP1-2.6情境下,到2050年,沙芦苇主要高适生区有向东移动的趋势,2050—2070年,高适生区在内蒙古中部更为集中,出现了适生区等级提升的现象;SSP5-5.8情境下,沙芦苇主要高适生区有向北移动趋势,到2070年,内蒙古中部高适生区最为集中。在不同排放情境下,沙芦苇的适生区质心预计均向西移动。综上,沙芦苇当前主要分布在中国中北部的干旱地区,而在不同排放情境下,未来将有西移的可能。因此,未来对沙芦苇的保护应注重内蒙古中部地区,可以采用围封的方式来予以保护,同时注意野生沙芦苇种群的监测。

## 参考文献 References:

- [1] Min F, Hideaki S, Li C. Environmental and economic risks assessment under climate changes for three land uses scenarios analysis across Teshio watershed, northernmost of Japan. *The Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 451—463.
- [2] Gong L, Tian B, Li Y, *et al.* Phenological changes of soybean in response to climate conditions in frigid region in China over the past decades. *International Journal of Plant Production*, 2021, 15: 363—375.
- [3] Novikova L Y, Bulakh P P, Nekrasov A Y, *et al.* Soybean response to weather and climate conditions in the Krasnodar and Primorye territories of Russia over the past decades. *Agronomy*, 2020, 10(9): 1278.
- [4] Oban H O, Orucu O K, Arslan E S. MaxEnt modeling for predicting the current and future potential geographical distribution of *Quercus libani* Olivier. *Sustainability*, 2020, 12(7): 1—17.
- [5] Cetin M, Sevik H, Koc I, *et al.* The change in biocomfort zones in the area of Muğla province in near future due to the global climate change scenarios. *Journal of Thermal Biology*, 2023, 112: 103434.
- [6] Licite I, Popluga D, Rivza P, *et al.* Nutrient-rich organic soil management patterns in light of climate change policy. *Civil Engineering Journal*, 2022, 8(10): 2290—2304.
- [7] Al-Ghussain L. Global warming: Review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019, 38(1): 13—21.
- [8] Prakash S. Impact of climate change on aquatic ecosystem and its biodiversity: An overview. *International Journal of Biological Innovations*, 2021, 3(2): 312—317.
- [9] Sun S X, Zhang Y, Huang D Z, *et al.* The effect of climate change on the richness distribution pattern of oaks (*Quercus* L.) in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140786.
- [10] Wang R H, Ru X Y, Jiang T C, *et al.* Based on the phenological model to study the possible changes of apple flowering dates under future climate scenarios in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2021, 42(9): 729—745.  
王润红, 茹晓雅, 蒋腾聪, 等. 基于物候模型研究未来气候情景下陕西苹果花期的可能变化. *中国农业气象*, 2021, 42(9): 729—745.
- [11] Ye X Z, Zhang M Z, Lai W F, *et al.* Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8135—8144.  
叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等. 基于MaxEnt优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 2021, 41(20): 8135—8144.

- [12] Jia X, Wang C, Jin H, *et al.* Assessing the suitable distribution area of *Pinus koraiensis* based on an optimized MaxEnt model. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 38(8): 2570–2576.  
贾翔, 王超, 金慧, 等. 基于优化的MaxEnt模型评价红松适宜分布区. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2570–2576.
- [13] Sayit H, Nurbay A, Xu Z L, *et al.* Simulation of potential distribution patterns of the invasive plant species *Xanthium spinosum* L. (Bathurst burr) in Xinjiang under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1551–1559.  
塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 许仲林, 等. 气候变化情景下外来入侵植物刺苍耳在新疆的潜在分布格局模拟. 生态学报, 2019, 39(5): 1551–1559.
- [14] Zhang A H, Tang C Y, Hu N, *et al.* Investigation on the development of the *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. industry in China. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(6): 25–32.  
张爱华, 唐春艳, 胡楠, 等. 我国山苍子产业发展现状及对策. 生物质化学工程, 2020, 54(6): 25–32.
- [15] Gong Z N, Su S, Du B, *et al.* Habitat selection and dispersal of red-crowned cranes during breeding period in Zhalong Wetland National Nature Reserve. Journal of Natural Resources, 2021, 36(8): 1964–1975.  
宫兆宁, 苏朔, 杜博, 等. 扎龙湿地丹顶鹤繁殖栖息地的选择及扩散. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1964–1975.
- [16] Lai W F, Ye X Z, Wen G W, *et al.* Analysis of potential suitable regions for the precious Tibetan medicine *Sinopodophyllum hexandrum* based on the optimized MaxEnt model. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 51(1): 112–120.  
赖文峰, 叶兴状, 文国卫, 等. 基于优化后的MaxEnt模型对珍贵藏药桃儿七潜在适生区分析. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(1): 112–120.
- [17] Ji L T, Zheng T Y, Chen Q, *et al.* Responses of potential suitable area of *Paris verticillata* to climate change and its dominant climate factors. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 89–96.  
姬柳婷, 郑天义, 陈倩, 等. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子. 应用生态学报, 2020, 31(1): 89–96.
- [18] Coro G. A global-scale ecological niche model to predict SARS-CoV-2 coronavirus infection rate. Ecological Modelling, 2020, 431: 109187.
- [19] Raffini F, Bertorelle G, Biello R, *et al.* From nucleotides to satellite imagery: Approaches to identify and manage the invasive pathogen *Xylella fastidiosa* and its insect vectors in Europe. Sustainability, 2020, 12(11): 4508.
- [20] Yu H Y, Sun C K, Huo X, *et al.* Predicting the transmission risk of H7N9 using ecological niche modeling. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 46(2): 206–210.
- [21] Lan B X, Li L H, Wang H. Genetic diversity of *Agropyron mongolicum* Keng populations. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(3): 468–473.  
兰宝祥, 李立会, 王辉. 蒙古冰草居群遗传多样性研究. 中国农业科学, 2005, 38(3): 468–473.
- [22] Li X Q, Gao Y H, Liu Y, *et al.* The genetic diversity of 9 populations of dry-desert *Agropyron mongolicum* collected in northern China. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3): 77–85.  
李晓全, 高有汉, 刘扬, 等. 我国北方9份旱生—沙生植物蒙古冰草遗传多样性研究. 草业学报, 2016, 25(3): 77–85.
- [23] Liu W L, Xu D M, Shi J M, *et al.* Plant cluster structure and leaf functional characters of *Agropyron mongolicum* populations in different plant species associations. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(8): 72–80.  
刘万龙, 许冬梅, 史佳梅, 等. 不同群落生境蒙古冰草种群株丛结构和叶片功能性状的变化. 草业学报, 2022, 31(8): 72–80.
- [24] Shi J M. Study on phenotypic traits and ecophysiological adaptation strategies of *Agropyron mongolicum* under heterogeneous habitats. Yinchuan: Ningxia University, 2022.  
史佳梅. 异质生境下蒙古冰草表型性状及生理生态适应策略研究. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [25] Li Y K, Liu J L, Xu D M, *et al.* Resource allocation characteristics of *Agropyron mongolicum* in the desert steppe in Ningxia. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(4): 1125–1133.  
李永康, 刘金龙, 许冬梅, 等. 宁夏荒漠草原蒙古冰草资源分配特征. 草地学报, 2023, 31(4): 1125–1133.
- [26] Liu M G, Shi J M, Xu D M, *et al.* Physiological and ecological characteristics of *Agropyron mongolicum* in desert steppe under heterogeneous habitats. Grassland and Turf, 2023, 43(6): 94–100.  
刘梦鸽, 史佳梅, 许冬梅, 等. 异质生境条件下荒漠草原蒙古冰草生理生态特征的研究. 草原与草坪, 2023, 43(6): 94–100.
- [27] Li Y F, Zhang X, Liu Z X, *et al.* Response of functional traits and rhizosphere effects of *Agropyron mongolicum* to soil

- properties in desert of Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8683–8691.
- 李云飞, 张雪, 刘智贤, 等. 宁夏荒漠草原蒙古冰草功能性状和根际效应对土壤性状的响应. *生态学报*, 2023, 43(21): 8683–8691.
- [28] Zhang X T, Liu X T, Ma Y H, *et al.* Construction of expression vector and prediction of target genes of drought-responsive amo-miR5 in *Agropyron mongolicum*. *Genomics and Applied Biology*, 2018, 37(3): 1302–1307.
- 张旭婷, 刘旭婷, 马艳红, 等. 蒙古冰草抗旱相关 amo-miR5 靶基因预测及表达载体构建. *基因组学与应用生物学*, 2018, 37(3): 1302–1307.
- [29] Zhao Y, Han H J, Zhang R, *et al.* Functional identification of *MwMYB4* gene from *Agropyron mongolicum* Keng. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(4): 565–571.
- 赵彦, 韩慧杰, 张锐, 等. 蒙古冰草 *MwMYB4* 基因功能鉴定. *西北植物学报*, 2020, 40(4): 565–571.
- [30] Ma Y H, Zhang X T, Yu X X, *et al.* Differential expression analysis of drought-responsive microRNA and prediction of their target genes in *Agropyron mongolicum* at seedling stage. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(9): 1168–1174.
- 马艳红, 张旭婷, 于肖夏, 等. 蒙古冰草苗期抗旱相关 microRNA 的差异表达分析及靶基因预测. *麦类作物学报*, 2017, 37(9): 1168–1174.
- [31] Chen Y D, Zhang G J, Huang S. Analysis of rumen degradation characteristics and feeding value of psammophytes in desert area of Northwest China. *Feed Research*, 2021, 44(1): 1–5.
- 陈毅东, 张桂杰, 黄帅. 西北荒漠区沙生植物瘤胃降解特性及饲用价值分析. *饲料研究*, 2021, 44(1): 1–5.
- [32] Ma Z Y, Qian Z H, Ma H B, *et al.* Evaluation of drought resistance of native plants in Ningxia desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(4): 67–75.
- 马子元, 钱志豪, 马红彬, 等. 宁夏荒漠草原乡土植物的抗旱性评价. *中国草地学报*, 2022, 44(4): 67–75.
- [33] Zhang J Y, Li X W, Liu W D, *et al.* A study on the *Agropyron mongolicum* community classification and the relationship between that community characteristics and the environment in Ningxia. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(2): 498–509.
- 张嘉玉, 李小伟, 刘万弟, 等. 宁夏沙芦草群落分类及群落特征与环境关系的研究. *草地学报*, 2023, 31(2): 498–509.
- [34] 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: 6281.
- [35] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, *et al.* Opening the black box: an open-source release of MaxEnt. *Ecography*, 2017, 40(7): 887–893.
- [36] Anderson R P, Martínez-Meyer E, Nakamura M, *et al.* Ecological niches and geographic distributions (MPB-49). *Monographs in Population Biology*: Princeton University Press, 2011, 49: 173.
- [37] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285–1293.
- [38] Hu Q, Lin H Q, Dai Q, *et al.* Niche differentiation among three middle-sized carnivores in Wolong Nature Reserve. *Chinese Journal of Zoology*, 2020, 55(6): 685–691.
- 胡强, 林红强, 戴强, 等. 卧龙保护区三种中型食肉动物的生态位差异. *动物学杂志*, 2020, 55(6): 685–691.
- [39] Swanti S, Kusum A, Dhruval B, *et al.* Modeling habitat suitability of *Perilla frutescens* with MaxEnt in Uttarakhand—A conservation approach. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2018, 10: 99–105.
- [40] Morales N S, Fernández I C, Baca-González V. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review. *PeerJ*, 2017, 5: 3093.
- [41] Tamura K, Peterson D, Peterson N, *et al.* MEGA5: molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Molecular Biology and Evolution*, 2011, 28(10): 2731–2739.
- [42] Hou C Z, Huang D Q, Gui D W, *et al.* Spatiotemporal variations of climate extremes and influential factors in deserts and sandy fields of northern China from 1961 to 2019. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(8): 1495–1505.
- 侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 等. 1961–2019年中国北方沙漠沙地极端气候变化特征及其影响因素. *地理科学*, 2023, 43(8): 1495–1505.
- [43] Gao X Q, Fu B Z, Wu X J, *et al.* Salt tolerance of *Agropyron mongolicum* at seedling stage. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(11): 2602–2606.
- 高雪芹, 伏兵哲, 吴晓娟, 等. 宁夏野生沙芦草苗期耐盐性研究. *湖北农业科学*, 2014, 53(11): 2602–2606.
- [44] Tian Z P, Jiang D. Enhanced seasonality of surface air temperature over China during the mid-holocene. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2023, 16(5): 100393.
- [45] Zhang Z Y. Development of EST-SSR markers and identification of germplasm resources of *Agropyron mongolicum* Keng based

- on transcriptome sequencing. Yinchuan: Ningxia University, 2021.  
张则宇. 基于转录组测序的沙芦苇EST-SSR分子标记开发及种质资源鉴定. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [46] Gao W D, Wang Y, Li Z X, *et al.* Analysis on the characteristics of climate change in the endorheic area in alpine region based on extreme precipitation index. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(6): 1693—1703.  
高文德, 王昱, 李宗省, 等. 高寒内流区极端降水的气候变化特征分析. *冰川冻土*, 2021, 43(6): 1693—1703.
- [47] Ren X M, Yang G H, Zhu Y, *et al.* Effect of environmental variables on species composition and richness of alpine vegetation in Taibai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 6993—7003.  
任学敏, 杨改河, 朱雅, 等. 环境因子对长白山高山植被物种组成和丰富度的影响. *生态学报*, 2014, 34(23): 6993—7003.
- [48] Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China*. Beijing: Science Press, 1987.  
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, 1987.
- [49] Niu Y Y, Li C L, Wang J, *et al.* Performance evaluation of ERA5 reanalysis precipitation data and spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in Inner Mongolia. *Arid Land Geography*, 2023, 46(9): 1418—1431.  
牛怡莹, 李春兰, 王军, 等. 内蒙古ERA5再分析降水数据性能评估与极端降水时空特征分析. *干旱区地理*, 2023, 46(9): 1418—1431.
- [50] Bu H, Ulan T Y, Siqin C T, *et al.* Response of vegetation fraction cover change to meteorological drought in Inner Mongolia from 1982 to 2009. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(5): 1—9.  
布和, 乌兰图雅, 斯琴朝克图, 等. 1982—2009年内蒙古地区植被覆盖变化对气象干旱的响应. *西北林学院学报*, 2023, 38(5): 1—9.
- [51] Meng Y J. Simulation assessment and projection of climate change based on CMIP5 and RegCM4 models under RCPs scenarios in Inner Mongolia. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2021(2): 3—8.  
孟玉婧. 基于CMIP5和RegCM4模式的内蒙古气候变化模拟评估及未来RCPs情景预估. *内蒙古气象*, 2021(2): 3—8.
- [52] Yang Y D, Ma J L, Ma H B, *et al.* Effects of grazing exclusion on root trait characteristics of dominant plants in the desert steppe. *Pratacultural Science*, 2023, 40(6): 1507—1517.  
杨彦东, 马静利, 马红彬, 等. 封育对荒漠草原优势植物根系性状特征的影响. *草业科学*, 2023, 40(6): 1507—1517.