

DOI: 10.20103/j.stxb.202209162641

荣文文, 黄祥, 牛攀新, 刘津岐, 闫然, 苏金娟, 胡善超, 楚光明. 基于最大熵模型的中药材木贼麻黄潜在适生区. 生态学报, 2023, 43(20): 8631-8646.

Rong W W, Huang X, Niu P X, Liu J Q, Yan R, Su J J, Hu S C, Chu G M. Potentially suitable areas for traditional Chinese medicinal material *Ephedra equisetina* based on MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8631-8646.

基于最大熵模型的中药材木贼麻黄潜在适生区

荣文文¹, 黄祥¹, 牛攀新¹, 刘津岐², 闫然¹, 苏金娟¹, 胡善超¹, 楚光明^{1,*}

1 石河子大学农学院, 石河子 832000

2 山东亚华低碳科技集团有限公司, 济南 250014

摘要:木贼麻黄(*Ephedra equisetina*)具有重要的药用和经济价值,在水土保持、生态平衡、荒漠化防治等方面也发挥重要作用,被列为国家二级保护植物。全球气候变化和人类活动严重威胁到木贼麻黄资源保护与利用,因而预测其潜在适生区空间变化具有重要意义。基于最大熵(MaxEnt)模型和 ArcGIS 软件,结合 201 条木贼麻黄在中国的有效分布记录和 21 个环境变量,预测在自然环境影响及人类活动干扰下中药材木贼麻黄适生区分布,并将木贼麻黄高适生区与土地利用类型进行叠加分析。结果表明:(1)模型添加人类活动因子后曲线下面积(AUC)值由 0.919 升至 0.948,预测结果精度提高,而添加人类活动因子使木贼麻黄适生区面积严重减少,部分适生区等级退化,其分布愈破碎化稀疏零散;(2)木贼麻黄适生区多集中分布于新疆、甘肃、宁夏、陕西和山西地区,未来时期两种情景下木贼麻黄适生区都出现不同程度的扩张,RCP2.6-2050 年相对当前时期高适生区面积增加最多;(3)参与建模的环境因子中贡献度较高的酸碱度(pH)、海拔(Altitude)和年平均温度(Bio1)对木贼麻黄地理分布有关键影响;(4)未来时期下木贼麻黄高适生区的几何质心出现不同程度向东迁移的现象,多分布于甘肃省境内;(5)木贼麻黄高适生区部分土地已经被开发利用,剩余未利用的土地分布于新疆、甘肃、内蒙古和宁夏地区,可在这些地区因地制宜发展木贼麻黄种植业。为木贼麻黄的就地、迁地保护、优先保护区以及人工种植选地提供理论依据,这对木贼麻黄资源保护与利用具有重要的现实意义。

关键词:最大熵(MaxEnt)模型;木贼麻黄;人类活动;环境变量;潜在适生区

Potentially suitable areas for traditional Chinese medicinal material *Ephedra equisetina* based on MaxEnt model

RONG Wenwen¹, HUANG Xiang¹, NIU Panxin¹, LIU Jinqi², YAN Ran¹, SU Jinjuan¹, HU Shanchao¹, CHU Guangming^{1,*}

1 Agricultural College of Shihezi University, Shihezi 832000, China

2 Shandong Yahua Low Carbon Technology Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China

Abstract: *Ephedra equisetina* as a national secondary protected plant has great medicinal and economic value. It also plays an important role in preventing water and soil erosion, keeping ecological balance, desertification governance and other aspects. However, the deterioration of the global climate as well as human activities seriously threatens the conservation and utilization of *E. equisetina* resources. Therefore, it is of great significance to predict the changes in the potential suitable areas of *E. equisetina*. Based on MaxEnt model and ArcGIS software, we combined 201 effective distribution records of *E. equisetina* in China and 21 environmental variables selected, this study predicted the changes of potential suitable areas of Chinese herbal medicines *E. equisetina* under two scenarios of natural environmental disturbance and human activity

基金项目:国家自然科学基金项目(31460187)

收稿日期:2022-09-16; 采用日期:2023-07-21

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

disturbance in the future. In addition, the predicted highly suitable areas of *E. equisetina* and land use types were superimposed by analysis. The results showed that: (1) After adding the human activity factor to the MaxEnt model, the area under curve (AUC) increased from 0.919 to 0.948, and the accuracy of the prediction results was improved. However, we noticed that the area of the totally suitable areas of *E. equisetina* under the disturbance of human activities was seriously reduced, and some of the suitable levels had degraded, with the distribution of suitable areas became more sparse, scattered and fragmented. (2) The suitable areas of *E. equisetina* were mostly distributed in Gansu, Ningxia, Shaanxi, Shanxi, and Xinjiang. Both scenarios for the future period showed different degrees of expansion in the suitable areas of *E. equisetina*. Compared with the current period, the representative concentration pathways of 2.6 for the period of 2050 (RCP2.6-2050), which has the largest increase in the highly suitable areas of *E. equisetina*. (3) Acidity and basicity (pH), altitude (Altitude) and annual mean temperature (Bio1), which were the higher contributors among the 21 environmental factors involved in the modeling, and these three factors had a significant influence on the geographical distribution of *E. equisetina*. (4) The geometric centroid of the highly suitable areas was projected to move eastward, distributed mostly in Gansu Province. (5) Some parts of the land in the potentially highly suitable areas of *E. equisetina* had already been developed and utilized, and the remaining little unused land was distributed in Xinjiang, Gansu, Inner Mongolia and Ningxia, where could be suitable for the development of *E. equisetina* cultivation industry according to local conditions. All of these provide the theoretical basis for in-situ conservation, ex-situ conservation, priority protection areas and site selection for artificial cultivation of *E. equisetina*, which is of great practical significance for the protection and sustainable utilization of *E. equisetina* resources.

Key Words: MaxEnt model; *Ephedra equisetina*; human activities; environmental variables; potential suitable areas

中药麻黄为麻黄科植物草麻黄、中麻黄或木贼麻黄的干燥草质茎^[1]。其中,木贼麻黄(*Ephedra equisetina*)是麻黄科麻黄属直立小灌木,具有重要的药用、经济和生态价值^[2-7],其野生资源濒危,被列为国家二级保护植物^[8-9]。主要分布于河北、山西、内蒙古、陕西、甘肃、宁夏及新疆等省区,生长在干旱山地、荒漠、戈壁等处。

木贼麻黄是千百年来抗击瘟疫的一味关键药,如今在我国抗击新型冠状病毒肺炎疫情中也发挥了积极的作用^[10]。木贼麻黄全株可入药,其麻黄碱的含量比其他种类都高,是提制麻黄碱的重要原料^[11]。木贼麻黄具有抗旱、耐盐碱等优势,对西北地区的水土保持、生态平衡和荒漠化防治具有一定的社会效益和生态效益^[12-13]。在过去 20 年中,由于气候巨大差异导致木贼麻黄栖息地的变化、商业市场对麻黄的需求增加、人类不加保护的乱采乱挖及连年的干旱及病虫害等原因,使麻黄资源面临枯竭^[14-18]。为了持续获得木贼麻黄资源,部分地区开始人工种植木贼麻黄,但因生境限制导致人工种植和野生麻黄的药用成分差异很大^[19-20]。此外,木贼麻黄种植点和品种选择缺乏科学指导以致资源浪费。因此,木贼麻黄确定最适栖息地和优先保护区对于促进麻黄资源保护与利用至关重要。

本研究通过最大熵(MaxEnt)和 ArcGIS 软件预测气候变化下木贼麻黄在中国范围内潜在适生区分布,探索人类活动对木贼麻黄分布的影响,并结合土地利用类型科学选择木贼麻黄最适栖息地和优先保护区,为保护和持续利用木贼麻黄资源提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 木贼麻黄分布数据

本研究所用木贼麻黄的分布数据有以下 3 个来源:(1)通过查阅中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、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/>)获取木贼麻黄在中国的分布点经纬坐标信息。(2)通过 2021 年 6 月—2022 年 4 月期间陆续对新疆、甘

肃、宁夏和陕西 4 省部分木贼麻黄天然种群进行了实地勘查,并整理了 58 个分布点(附表 1)。(3)通过查阅并整理国内外相关文献中的报道整理出木贼麻黄在中国的地理分布区数据。木贼麻黄在中国分布点最终整理得到 269 个分布点,为避免集群效应所致模型过拟合,利用 ArcGIS 10.4.1 将所收集数据以 10km 设置缓冲区,去除叠置数据,最终得到 201 个有效分布点(图 1)。

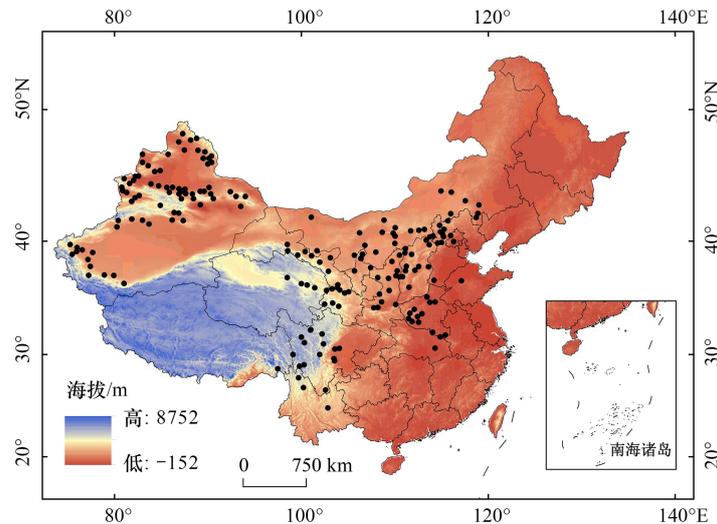


图 1 木贼麻黄在中国的分布点数据

Fig.1 Distribution data of *E. equisetina* in China

1.2 自然环境数据

本文所用的自然环境数据包括气候数据、土壤数据和地形数据,其来源为:(1)从全球气候数据库 WordClim (<https://www.worldclim.org>) 下载海拔数据和气候数据,分别选取当前时期(1970—2000 年)气候数据和未来两种排放情景(RCP2.6 和 RCP8.5)下 2050 年、2070 年的气候数据,每个时期 19 个气候变量。(2)土壤数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn>),其中包括 12 个土壤数据。(3)地形数据是通过 ArcGIS 10.4.1 空间分析模块从海拔中提取坡度和坡向。共选取了 35 个独立的自然环境变量(表 1)进行研究。

1.3 数据处理

选择的 35 个自然环境变量间存在一定的相关性,应避免过度拟合。将自然环境数据导入 ArcGIS 10.4.1 中,坐标统一为 WGS—1984。利用数据管理工具,执行批量重采样命令,对各个来源的数据统一分辨率。通过转换工具,将 35 个自然环境变量全部转为“asc”格式,添加筛选后木贼麻黄的地理分布数据导入 MaxEnt 3.4.1 软件进行建模运算,随机选取 75% 的数据作为训练集用于模型预测,其余 25% 数据用于验证模型精度,模型重复运行 5 次,得到自然环境变量贡献度。利用 ArcGIS 10.4.1 软件对各变量图层进行多重共线性分析,检验各变量之间的相关性。结合各自然环境变量的贡献率和相关性,确定主要环境变量。

1.4 MaxEnt 模型构建与评估。

本研究使用 MaxEnt 3.4.1 模型预测木贼麻黄在中国的潜在分布。将筛选后的木贼麻黄分布数据和自然环境变量数据导入 MaxEnt 软件中,分布数据中随机选取 75% 的数据作为训练集,剩余 25% 的数据作为测试集做模型预测^[21—23],设置迭代数为 10000,模型重复 10 次,通过刀切法对自然环境变量数据进行重检验,其他参数默认。

计算受试者工作特征曲线(ROC)下面积(AUC)量化 MaxEnt 模型预测准确性,AUC 的取值范围为[0—1],AUC 值越接近 1,模型预测结果越精准,可信度越好^[24]。一般而言,当 $AUC \leq 0.6$ 时认为模型预测结果失败; $0.6 < AUC \leq 0.7$ 时,模型预测结果较差; $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时,模型的预测结果一般; $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时,模型预

测结果良好; $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时, 模型预测结果优秀^[25-26]。

表 1 35 个自然环境变量
Table 1 35 Natural environment variables

变量 Variables	描述 Description	单位 Unit	变量 Variables	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年平均温度 Annual Mean Temperature	°C	Bio19	最冷季平均降雨量 Precipitation of Coldest Quarter	mm
Bio2	昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range	°C	TN	全氮 Total Nitrogen	mg/kg
Bio3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	%	TP	全磷 Total Phosphorus	mg/kg
Bio4	温度季节性 Temperature Seasonality	°C	TK	全钾 Total Potassium	mg/kg
Bio5	最热月最高温 Max Temperature of Warmest Month	°C	BD	土壤容重 Soil Bulk Density	g/cm
Bio6	最冷月最低温 Min Temperature of Coldest Month	°C	SA	砂粒 Sand Grains	重量百分比
Bio7	年温变化范围 Temperature Annual Range	°C	SI	粉粒 Powder Grains	重量百分比
Bio8	最湿季均温 Mean Temperature of Wettest Quarter	°C	CL	粘粒 Sticky Particles	重量百分比
Bio9	最干季均温 Mean Temperature of Driest Quarter	°C	GRAV	砾石 Gravel	重量百分比
Bio10	最暖季均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	°C	pH	酸碱度 Acidity and Basicity	—
Bio11	最冷季均温 Mean Temperature of Coldest Quarter	°C	SOM	有机质含量 Organic Matter Content	%
Bio12	年均降雨量 Annual Precipitation	mm	POR	孔隙度 Porosity	%
Bio13	最湿月降雨量 Precipitation of Wettest Month	mm	CEC	阳离子交换量 Amount of Cation Exchange	mol/kg
Bio14	最干月降雨量 Precipitation of Driest Month	mm	LC	土地覆盖 Land Cover	—
Bio15	季节性降水 Precipitation Seasonality	mm	Altitude	海拔 Altitude	m
Bio16	最湿季降雨量 Precipitation of Wettest Quarter	mm	Aspect	坡向 Aspect	°
Bio17	最干季降雨量 Precipitation of Driest Quarter	mm	Slope	坡度 Slope	°
Bio18	最暖季平均降雨量 Precipitation of Warmest Quarter	mm			

1.5 木贼麻黄适生等级划分

MaxEnt 模型输出木贼麻黄在中国范围内的分布概率 (P), 使用 ArcGIS 10.4.1 软件 ArcToolbox 的重分类 (Reclassify) 命令, 根据分布概率 P 值将木贼麻黄的生境适宜性分布区划分为四个适生区等级 (表 2)。

表 2 适生区划分
Table 2 Division of potential distribution

分布概率 (P) Probability distribution	评价等级 Evaluation level	分布概率 (P) Probability distribution	评论等级 Evaluation level
$P < 0.1$	非适生区	$0.1 \leq P < 0.3$	低适生区
$0.3 \leq P < 0.6$	中适生区	$0.6 \leq P \leq 1$	高适生区

1.6 人类活动干扰下木贼麻黄适宜生境分析

人类活动数据来源于国际地球科学信息网络中心 (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>) 的人类足迹 (HF) 数据层^[27], 此数据层是由人类土地利用、基础设施建设、人口密度、公路、铁路等 8 个全球数据层生成的人类影响指数通过归一化得到的, 能客观且全面的反应人类活动的强弱及空间分布状态。对 HF 的原始数据进行坐标与格式转换等处理^[28]。将处理后的 HF、木贼麻黄分布数据和主要自然环境数据导入 MaxEnt 模型中运行 10 次, 得到人类活动干扰下木贼麻黄适宜生境, 与自然环境 (无人人类活动) 影响下的适宜生境作比较。

1.7 木贼麻黄潜在适生区与土地利用遥感信息叠加分析

从地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn>) 下载 2020 年土地利用遥感数据, 根据一级分类对土地进行划分, 一级分类将土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地和海洋。将木贼麻黄高适生区与土地利用遥感数据进行叠加分析。

2 结果与分析

2.1 自然环境变量的筛选

本研究选取的自然环境变量较多, 而各个自然环境变量之间存在一定的相关性, 一定程度上会出现模型过度拟合, 预测不准确的现象。利用 ArcGIS 10.4.1 软件提取 35 个自然环境变量的相关性 (图 2), 再将变量导入 MaxEnt 3.4.1 软件, 模型运算 5 次, 得到自然环境变量的贡献率。综合考虑相关性较低和贡献率相对较高的自然环境变量, 最终确定 21 个自然环境变量参与模型建模 (表 3)。

2.2 模型预测结果

本研究的 ROC 曲线验证结果显示: 自然环境影响下训练集 AUC 值为 0.919, 测试集 AUC 值为 0.854; 人类活动干扰下训练集 AUC 值为 0.948, 测试集 AUC 值为 0.925。其中, 人类活动干扰下 AUC 值均大于自然环境影响下的 AUC 值, 添加 HF 对木贼麻黄地理分布具有一定的影响。

表 3 参与建模的 21 个自然环境变量

Table 3 21 natural environmental variables involved in modeling

变量 Variables	贡献率 Percent contribution/%	变量 Variables	贡献率 Percent contribution/%
pH	22.7	Bio10	1.6
Altitude	14.2	Bio13	1.5
Bio1	12.7	Aspect	1.3
Bio17	7.8	SI	1.1
Bio15	7.7	Slope	0.8
GRAV	7.3	POR	0.6
LC	5.0	Bio5	0.6
Bio2	4.4	SOM	0.6
Bio3	4.3	TP	0.5
CEC	2.8	SA	0.5
Bio14	2.0		

2.3 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 P 值从低到高将木贼麻黄的生境适宜区划分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区四个等级, 分别比较自然环境影响和人类活动干扰下木贼麻黄适生区面积变化。

自然环境影响下 (图 3), 在 RCP2.6 情境中, 2050 年相对当前时期适生区总面积约增加 $20.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2070 年相对当前时期适生区总面积约增加 $54.6 \times 10^4 \text{ km}^2$; 在 RCP8.5 情景中, 2050 年相对当前时期适生区总

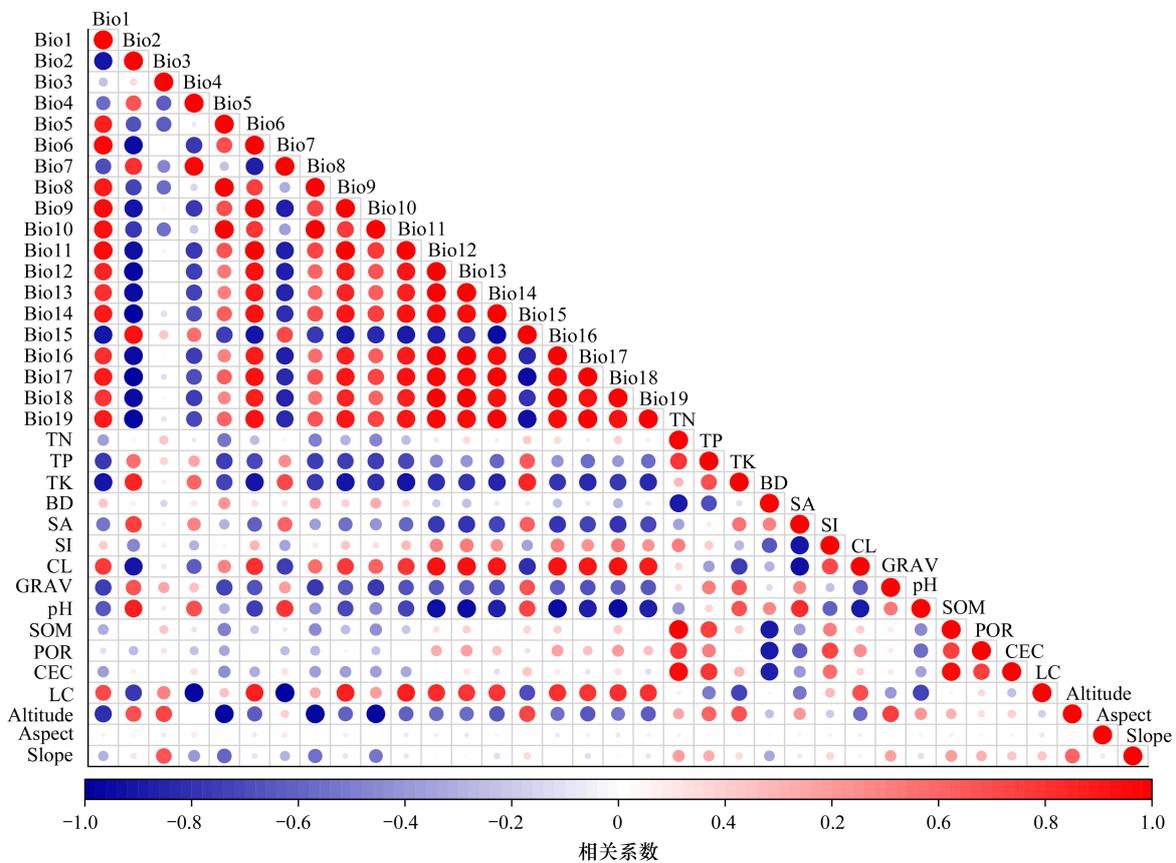


图2 影响木贼麻黄地理分布的自然环境变量相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of natural environmental variables affecting the geographical distribution of *E. equisetina*

Bio1:年平均温度;Bio2:昼夜温差月均值;Bio3:昼夜温差与年温差比值;Bio4:温度季节性;Bio5:最热月最高温;Bio6:最冷月最低温;Bio7:年温变化范围;Bio8:最湿季均温;Bio9:最干季均温;Bio10:最暖季均温;Bio11:最冷季均温;Bio12:年均降雨量;Bio13:最湿月降雨量;Bio14:最干月降雨量;Bio15:季节性降水;Bio16:最湿季降雨量;Bio17:最干季降雨量;Bio18:最暖季平均降雨量;Bio19:最冷季平均降雨量;TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾;BD:土壤容重;SA:砂粒;SI:粉粒;CL:粘粒;GRAV:砾石;pH:酸碱度;SOM:年有机质含量;POR:孔隙度;CEC:阳离子交换量;LC:土地覆盖;Altitude:海拔;Aspect:坡向;Slope:坡度

面积约增加 $105.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2070 年相对当前时期适生区总面积约增加 $162.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。人类活动干扰下(图4),在 RCP2.6 情境中,2050 年相对当前时期适生区总面积约增加 $173.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2070 年相对当前时期适生区总面积约增加 $40.8 \times 10^4 \text{ km}^2$;在 RCP8.5 情境中,2050 年相对当前时期适生区总面积约增加 $39.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2070 年相对当前时期适生区总面积约增加 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

其中,总适生区面积最大是 RCP8.5-2070 年(自然环境影响下),面积约 $530.7 \times 10^4 \text{ km}^2$;总适生区面积最小的是当前时期(人类活动干扰下),面积约 $207.3 \times 10^4 \text{ km}^2$;高适生区面积最大的是 RCP2.6-2050 年(自然环境影响下),面积约 $196.9 \times 10^4 \text{ km}^2$;高适生区面积最小的是当前时期(人类活动干扰下),面积约 $12.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。自然环境影响下的总适生区面积均多于人类干扰下的总适生区面积,自然环境影响下的高适生区面积同样多于人类干扰下的高适生区面积。

2.3.1 当前时期木贼麻黄潜在分布

在自然环境影响下(图5),木贼麻黄高适生区主要分布于甘肃中南部(兰州、白银、临夏、武威中部、张掖零星分布)、宁夏西北部(中卫、银川、吴忠北部)、陕西中北部(延安、榆林东南角、渭南中部、西安北部、咸阳南缘)、新疆西北部(阿勒泰中北部、塔城西北缘和东南缘、博乐中部、昌吉南部、石河子、伊犁中北部、喀什中西

图 3 自然环境影响下木贼麻黄潜在适生区面积分布/($\times 10^4 \text{ km}^2$)Fig.3 Area distribution of potential suitable habitats of *E. equisetina* under disturbance by natural environment图 4 人类活动干扰下木贼麻黄潜在适生区面积分布/($\times 10^4 \text{ km}^2$)Fig.4 Area distribution of potential suitable habitats of *E. equisetina* under disturbance by human activities

部)、山西西部边缘有零星分布、河南北部有零星分布,高适生区总面积约 $38.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的4.01%。中适生区主要以高适生区为核心向外发散分布,主要分布于甘肃东部、陕西边缘、山西、河南、河北西缘、内蒙古中部、新疆(天山山脉附近、阿尔泰山脉附近、西缘)、青海零星分布、四川零星分布、山东零星分布,中适生区总面积约 $138.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 14.46%。低适生区以中适生区为核心向外发散分布,主要分布于甘肃西缘、内蒙古锡林郭勒盟、湖北中部、山东北缘、河北东部、辽宁北缘、吉林西缘、新疆西北缘,低适生区总面积约 $191.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 19.90%。除了上述地区外,研究区域的其他地区均为非适生区,这部分地区主要包括新疆南部、西藏、青海西部、云南、四川大部分地区、贵州、重庆、广西、湖南、江西、广东、海南、福建、浙江、安徽、江苏、内蒙古东北部、黑龙江、吉林部分地区、台湾、香港等地区,非适生区面积约 $591.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 61.63%。

在人类活动干扰下(图 5),木贼麻黄总适生区面积较自然环境影响下的总适生区面积大幅度减少,分布稀疏零散。其主要零星分布于甘肃、宁夏、陕西、山西、新疆等地。其中,高适生区面积约 $12.04 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 1.25%, 较自然环境影响下高适生区面积减少 2.76%;中适生区面积约 $45.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 4.72%, 较自然环境影响下中适生区面积减少 9.74%;低适生区面积约 $149.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 15.62%, 较自然环境影响下低适生区面积减少 4.28%;总适生区较自然环境影响下适生区面积减少 16.78%。

2.3.2 未来时期木贼麻黄的潜在分布

选取 RCP2.6、RCP8.5 情景下 2050 年和 2070 年的气候变量,导入 MaxEnt 模型中对木贼麻黄的分布进行

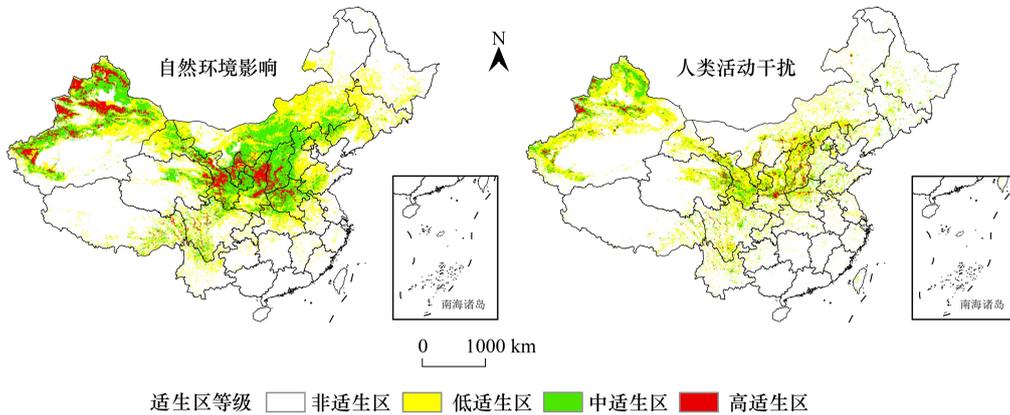


图 5 当前时期木贼麻黄潜在地理分布

Fig.5 Potential geographic distribution of *E. equisetina* in the current period

模拟预测。在这两种情景下,未来时期总适生区面积与当前时期相比都增加了。

RCP2.6 情景下(图 6),2050 年自然环境影响下木贼麻黄总适生区面积约 $388.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 40.51%, 较当前时期总适生区分布面积增加了 2.14%。其中高适生区面积大幅度增加, 中适生区、低适生区面积均减少, 甘肃中北部、宁夏、陕西中北部、山西、河南西部边缘、河南北部边缘、内蒙古、吉林西部边缘、新疆中部及边缘分布、青海中部等地区由中适生区升为高适生区; 新疆中部偏南部由非适生区升为中适生区; 青海西北部、内蒙古西部边缘由非适生区升为中、高适生区; 四川中西部零星、西藏东部边缘、云南北部边缘、湖北北部由低适生区降为非适生区。

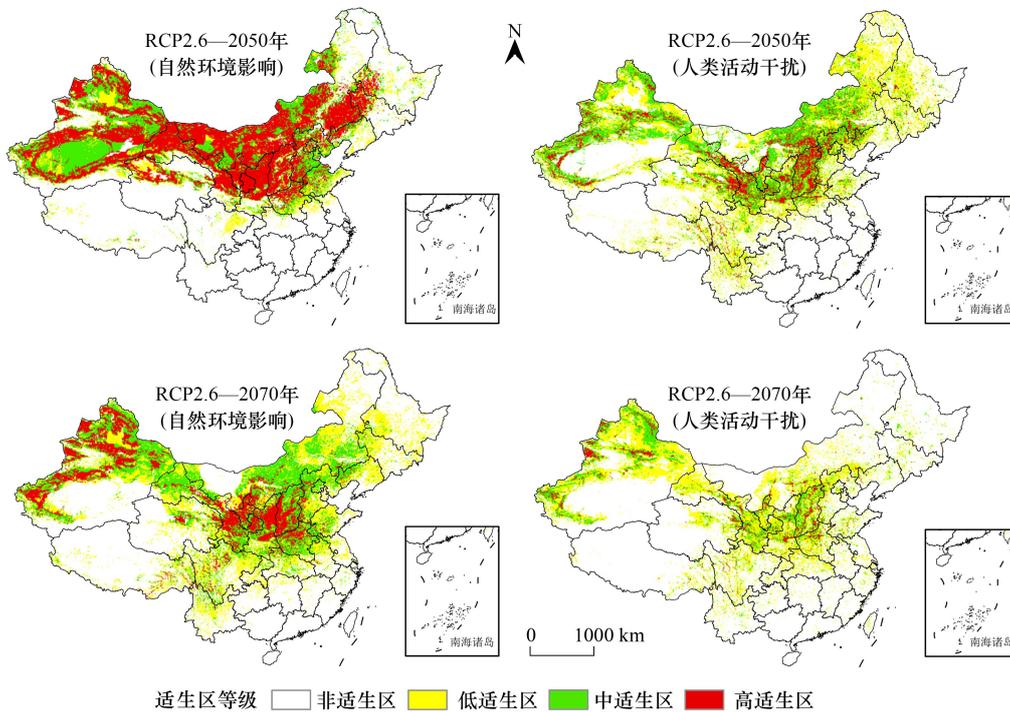


图 6 RCP2.6 情景下 2050 年和 2070 年木贼麻黄潜在地理分布预测

Fig.6 Prediction of the potential geographical distribution of *E. equisetina* in 2050 and 2070 under the RCP2.6 scenario

2050 年人类活动干扰下木贼麻黄总适生区面积约 $380.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 39.67%, 较当前时期人

类活动干扰下总适生面积增加了 18.08%。但较 2050 年自然环境影响下高适生区面积约减少 $145.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区约增加 $19.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区总适生区面积约增加 $11.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区约减少 $8.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2070 年自然环境影响下木贼麻黄总适生区面积约 $422.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 44.06%, 较当前时期分布面积增加了 5.70%。其中高适生区面积大幅增加、中适生区面积略增加、低适生区面积减少。与当前时期相比, 高、中、低适生区均向外微微扩散。

2070 年人类活动干扰下木贼麻黄总适生面积约 $248.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 25.85%, 较当前时期人类活动干扰下总适生区面积增加了 4.25%。但较 2070 年自然环境影响下高适生区面积减少 $64.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区减少 $96.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区面积减少 $14.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区面积减少 $174.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

RCP8.5 情景下(图 7), 2050 年自然环境影响下木贼麻黄总适生面积约 $474.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 49.40%, 较当前分布面积增加了 11.03%。其中高适生区大幅度增加, 中、低适生区面积也略增加。高适生区以陕西中部为核心向东扩散至河北西部, 向西扩散至青海东部, 新疆高适生区微微向四周扩散, 内蒙古略有零星分布。四川东部、重庆、贵州、云南中南部由非适生区升为低适生区。

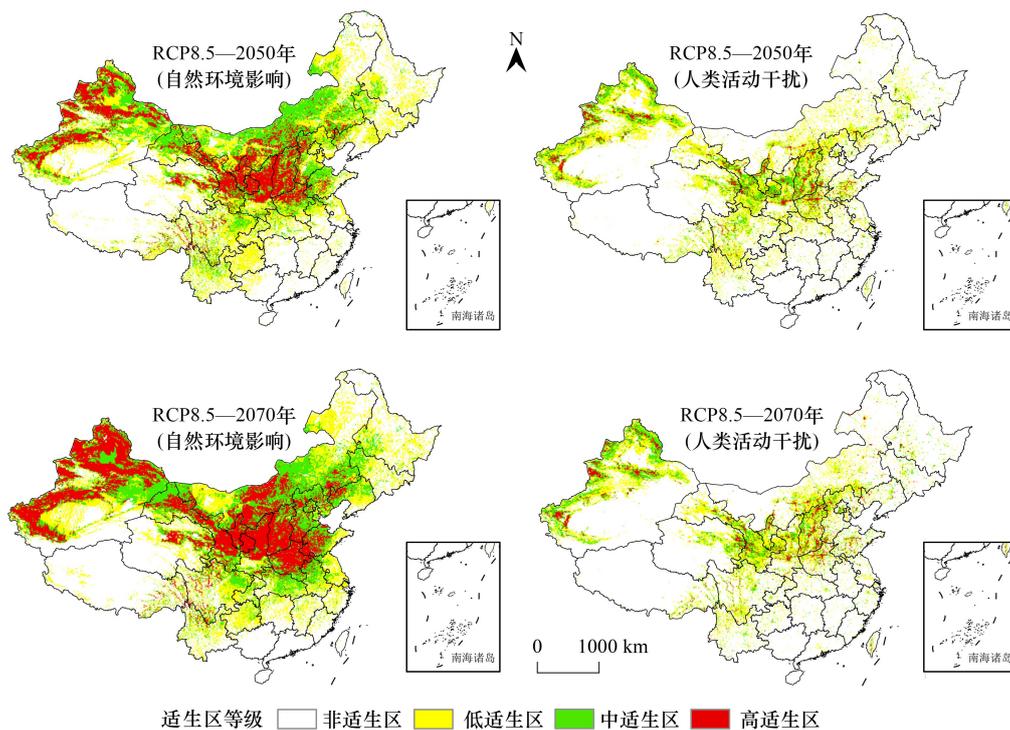


图 7 RCP8.5 情景下 2050 年和 2070 年木贼麻黄潜在地理分布预测

Fig.7 Prediction of the potential geographical distribution of *E. equisetina* in 2050 and 2070 under the RCP8.5 scenario

2050 年人类活动干扰下木贼麻黄总适生面积约 $246.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 25.71%, 较当前时期分布面积增加了 4.12%。其中高适生区、中适生区、低适生区面积均增加。但较 2050 年自然环境影响下高适生区面积减少 $81.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区减少 $96.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区面积减少 $49.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区面积减少 $227.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2070 年自然环境影响下木贼麻黄总适生面积约 $530.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 55.29%, 较当前时期分布面积增加了 16.92%。其中高适生区大幅度增加, 中、低适生区面积也略增加。甘肃中北部、宁夏、陕西北部、山西中南部、河南、新疆西北部、河北西部边缘、山东西部边缘由中适生区升为高适生区, 贵州、云南、湖南、江西、江苏、上海、浙江、福建等零星地段由非适生区升为低适生区。

2070 年人类活动干扰下木贼麻黄总适生面积约 $209.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 21.82%。较当前时期分布

面积增加了 0.23%。其中高适生区和中适生区面积增加,低适生区面积减少。但较 2070 年自然环境影响下高适生区面积减少 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区减少 $116.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区面积减少 $61.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区面积减少 $321.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.3.3 高适生区质心分布变化

从预测结果可知,2050 年和 2070 年我国木贼麻黄的适宜区面积均有所增加,在人类活动干扰下总适生区面积少于自然环境影响下的总适生区面积,可见人类活动因子对木贼麻黄的生长分布具有一定的影响,预测得到的适生区的形状并不规则,在人类活动干扰下适生区较自然环境影响下适生区破碎化。采用高适生区质心位置变化来表现木贼麻黄在不同情景下地理迁移变化(图 8)。自然环境影响下,RCP2.6-2050 年高适生区质心相对当前时期有一定程度的东移,从肃北蒙古自治县(39.39N,96.78E)移至内蒙古阿拉善右旗(40.59N,102.95E);RCP2.6-2070 年高适生区质心从肃北蒙古自治县移至肃北裕固族自治县(39.14N,98.44E);RCP8.5-2050 年和 RCP8.5-2070 年高适生区质心相对当前时期均有一定程度的东移,从肃北蒙古自治县移至甘州区(39.16N,100.71E)(39.28N,100.49E)。在人类活动干扰下,RCP2.6-2050 年高适生区质心相对当前时期有一定程度的东移,从肃南裕固族自治县(38.49N,100.44E)移至民勤县(38.75N,103.65E);RCP2.6-2070 年高适生区质心轻微向西移;RCP8.5-2050 年高适生区质心轻微向南移,由肃南裕固族自治县移至青海祁连县(38.12N,100.53E);RCP8.5-2070 年轻微向东北方向移动,从肃南裕固族自治县移质山丹县(38.79N,101.04E)。

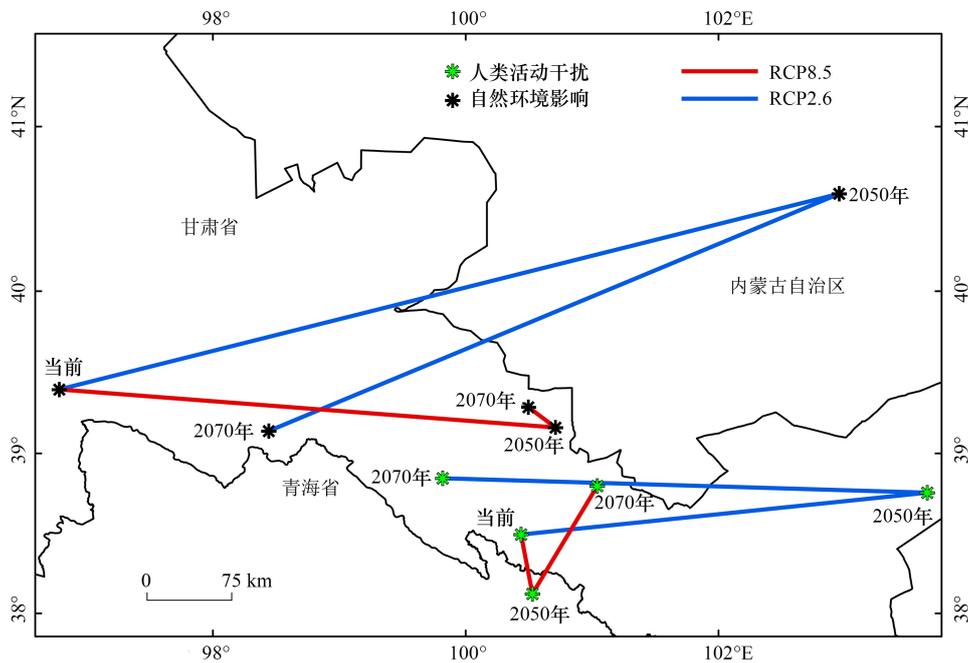


图 8 高适生区质心迁移

Fig.8 Centroid migration in highly suitable areas

2.4 木贼麻黄潜在高适生区与土地利用遥感信息叠加分析

通过木贼麻黄高适生区与 2020 年土地利用类型叠加分析(图 9),木贼麻黄的高适生区多数已被开发利用,还有一部分处在未利用的土地上,主要分布在新疆、甘肃、内蒙古和宁夏地区。在自然环境影响下,高适生区处于未利用土地上的平均面积约为 $23.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, RCP2.6-2050 年的高适生区未利用土地面积最多,约为 $66.3 \times 10^4 \text{ km}^2$; RCP2.6-2070 年和 RCP8.5-2070 年的高适生区未利用土地面积较少,约为 $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在人类活动干扰下,高适生区处于未利用土地上的平均面积约为 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, RCP2.6-2050 年的高适生区未利用

土地面积最多,约为 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$;当前时期的高适生区未利用土地面积较少,约为 $0.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。总体而言,预测结果中显示自然环境影响下未利用土地均多于人类活动干扰下的未利用土地,未来时期下木贼麻黄高适生区处于未利用土地上的面积均多于当前时期。

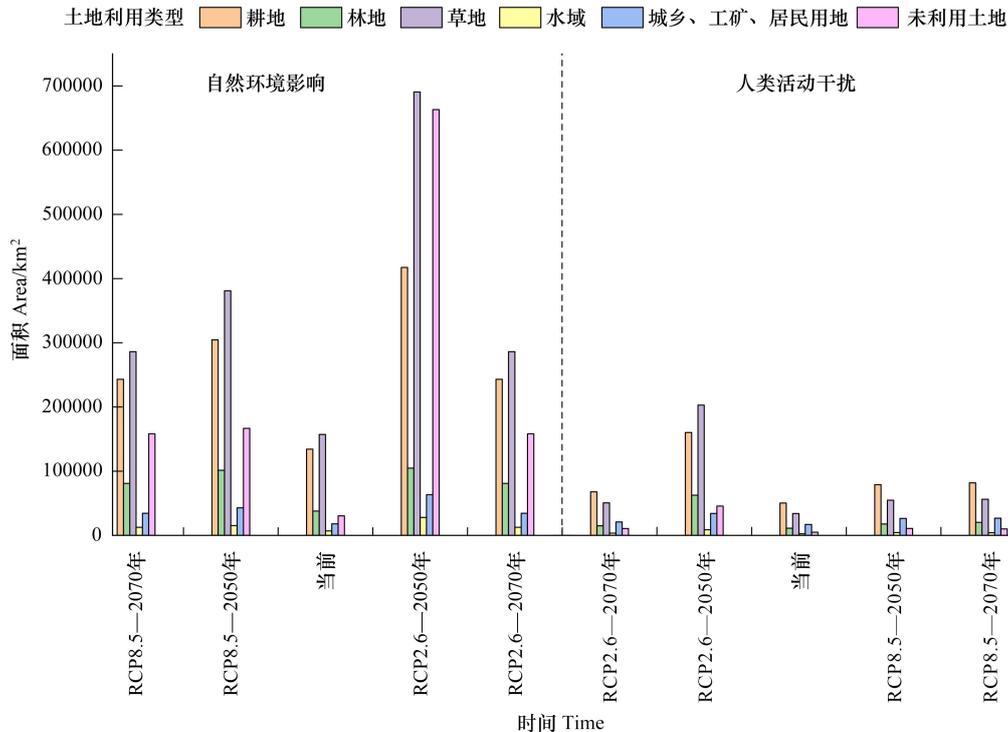


图9 不同时期木贼麻黄高适生区中各土地类型的分布面积

Fig.9 Distribution area of various land types in the high suitable area of *E. equisetina* under different scenario

3 讨论

在中国麻黄有上千年的用药历史,时至今日仍是中医的一味常用中药。本研究使用 MaxEnt 和 ArcGIS 模型模拟了中国范围内木贼麻黄的潜在分布,揭示了人类活动对木贼麻黄未来生长分布的影响,明确了木贼麻黄最适栖息地和优先保护区。这些对木贼麻黄的发现将提高其药用价值、保护木贼麻黄资源和调节生态平衡等做出重要贡献^[29]。

MaxEnt 模型已广泛用于物种潜在分布区研究,玉竹等中药材^[30-32]、梭梭等荒漠植物^[22,33]也应用该模型进行了适宜性区划研究,并取得了较好的预测结果。前人研究表明,AUC 值作为模型预测衡量标准,区间为 [0—1],值越大表明该模型模拟效果良好^[34]。本研究中,自然环境下训练集 AUC 值为 0.919,人类活动干扰下训练集 AUC 值上升至 0.948,其 AUC 值均在 0.9—1 之间,表明本研究预测结果可靠度高,模型模拟效果极好^[24,34]。同时,添加人类活动因子提高了该模型预测精度,说明人类活动因子和木贼麻黄分布之间的相关性很大。研究结果显示,人类活动干扰下木贼麻黄的总适生区面积明显小于自然环境影响下总适生区面积,总适生区面积严重减少且呈破碎化状态,表明人类活动因子对木贼麻黄适生区的影响主要体现在适生区面积减少和适生区等级退化,即高适生区大面积向中、低适生区过渡,多沦为低、非适生区,人类活动威胁到木贼麻黄资源可持续发展,并进一步影响其地理分布^[35]。盐碱、温度、降水等自然因子对麻黄属植物生长发育有关键影响^[36-43]。本研究中发现,酸碱度 (pH)、海拔 (Altitude) 和年平均温度 (Bio1) 对模型预测结果贡献度较高,表明盐碱、海拔和温度是木贼麻黄适生区主要影响因素。此外,在牛蒡子、黄芪、中麻黄等物种的研究中也发现这些因子对其地理分布分布具有重要影响^[44-47],这与药用、荒漠植物的生物学特性相关。

当前时期木贼麻黄在我国的适生区分布较为广泛,主要集中在甘肃、宁夏、陕西、山西、四川、河北、河南、内蒙古、新疆等地,主要以高适生区为核心向外发散分布,其中高适生区多分布于甘肃、陕西、山西、宁夏和新疆,这与《中国植物志》记载和多数学者研究的麻黄分布结果基本一致^[2,8,9,48-51]。未来时期,木贼麻黄适生区呈逐渐扩张趋势,不同干扰、不同情景下在 2050 年、2070 年其适生区面积均有所增加,表明在全球气候变暖背景下木贼麻黄生存空间较 20 世纪末期有良好回转的趋势。多数物种在适应气候变化过程中,核心分布区会向高纬度迁移^[52]。本研究中,在 RCP2.6 情境下,木贼麻黄高适生区质心总体向高纬度迁移(仅自然环境影响下 2070 年轻微向低纬度迁移);RCP8.5 情境下,质心总体轻微向低纬度迁移(仅人类活动干扰下 2070 年向高纬度迁移),总体质心有“东迁”的趋势,其中迁移方向、迁移距离在不同情景下存在差异,可能是由于人类活动和气候变暖程度不一、该物种对海拔和温度条件的要求较宽泛有关^[53]。本研究中参与建模的环境指标包括了气候因子、人类活动、土壤和地形等因素,但仍存在一定的局限性,同时,研究尺度的选择也是物种分布预测的不确定性因素之一^[54],又因气候变暖会增加极端天气出现的频率以致栖息地的地退化和丧失,所以木贼麻黄实际适生区分布可能要小于此次预测结果^[55]。

近年来气候环境恶化和人类活动严重威胁到木贼麻黄资源可持续利用,其栖息地限制了人工种植和野生麻黄的主要药用成分,特别是麻黄碱和伪麻黄碱的含量存在很大差异^[19-20,56-57]。基于前期调查和本研究结果,建议在新疆北部靠近塔克拉玛干沙漠附近、甘肃武威和张掖等高适生区,制定木贼麻黄资源人工种植激励机制,大力发展种植基地;在甘肃西部、古尔班通古特沙漠、库木塔格沙漠、内蒙古中部等低适生区,建立自然保护区,引导和鼓励当地群众参与恢复保护工作。未来木贼麻黄高适生区多以被开发利用,部分分布在耕地、草地和未利用土地,建议在绿洲边缘的荒漠区采取封禁保护措施快速恢复栖息地,在未利用土地因地制宜发展木贼麻黄种植业。

4 结论

迄今气候变化和人类活动干扰对木贼麻黄适生区的预测研究鲜有报道。本研究使用 MaxEnt 模型评估和预测木贼麻黄在中国的适生区,结果显示:(1)模型 AUC 值均在 0.9 以上,表明模拟效果好;(2)未来木贼麻黄适生区呈扩张趋势,影响其地理分布的主要因子为酸碱度、海拔、年平均温度;(3)未来木贼麻黄高适生区多数已被开发,剩余部分多分布于耕地、草地和未利用土地上,几何质心有向“东迁”的趋势;(4)人类活动干扰下适生区面积严重减少且呈破碎化状态,今后应密切关注人类活动对木贼麻黄地理分布的影响;建议日后在新疆、甘肃、内蒙古等地区进行自然恢复和人工恢复相结合的治理方式,推动麻黄资源和天然药物产业的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—部: 2020 年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 333.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—部: 2000 年版. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 卓小玉, 陈晶, 田明, 刘玉婷, 逢弓一郎. 麻黄的化学成分与药理作用研究进展. 中医药信息, 2021, 38(2): 80-83.
- [4] Xiu L M, Miura A B, Yamamoto K, Kobayashi T, Song Q H, Kitamura H, Cyong J C. Pancreatic islet regeneration by ephedrine in mice with streptozotocin-induced diabetes. *The American Journal of Chinese Medicine*, 2001, 29(3n4): 493-500.
- [5] 刘敏, 程发峰, 王庆国, 闫军堂. 麻黄免疫调节作用研究进展. 河北中医, 2015, 37(7): 1104-1106.
- [6] 严士海, 朱萱萱, 孟达理, 顾和亚, 许芝银. 麻黄多糖对 EAT 小鼠甲状腺激素及相关抗体水平的影响. 江苏中医药, 2008, 40(10): 111-113.
- [7] 齐佳慧, 韩秋菊, 王菲, 李薇, 王战勇. 木贼麻黄多糖的提取及体外抗氧化活性研究. 中国现代应用药学, 2018, 35(9): 1342-1346.
- [8] 吉颖. 山西木贼麻黄群落特征研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- [9] 吉颖, 许强, 张钦弟, 姜晓燕, 金鑫, 毕润成. 山西五鹿山自然保护区木贼麻黄群落优势种的种间关联性分析. 西北植物学报, 2017, 37(5): 1004-1011.
- [10] 程大敦, 郭平, 赵俊. 木贼麻黄生物碱动态变化的研究. 中国药物化学杂志, 1992, 2(3): 17-21.

- [11] 田楠楠, 杨茜和, 朱雅暄, 曾雪珊, 袁佳焯, 杨军令, 贾伟伟, 李川. 麻黄的化学成分及其药效作用和药代特征. 中国中药杂志, 2022, 47(13): 3409-3424.
- [12] Tao C, Du C G. Medicinal herbs for the management of desertification. *Journal of Agriculture, Biotechnology and Ecology*, 2010, 3(2): 124-132.
- [13] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 陈同同. 柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源. 生态学报, 2014, 34(21): 6277-6286.
- [14] Ostad Ali Askari K, Javadinejad S, Eslamian S. The analysis of the most important climatic parameters affecting performance of crop variability in a changing climate. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2021, 11(1): 1.
- [15] Talebmorad H, Koupai J A, Eslamian S, Mousavi S F, Akhavan S, Ali Askari K O, Singh V P. Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2021, 11(3): 333.
- [16] Camarero J J, Valeriano C, Gazol A, Colangelo M, Sánchez-Salguero R. Climate differently impacts the growth of coexisting trees and shrubs under semi-arid Mediterranean conditions. *Forests*, 2021, 12(3): 381.
- [17] Ning K, Wang N A, Yang Z J, Zhang L L, Wang Y X, Li Z L, Bi Z. Holocene vegetation history and environmental changes inferred from pollen records of a groundwater recharge lake, Badain Jaran Desert, northwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021: 110538.
- [18] Ostad-Ali-Askari K, Kharazi H G, Shayannejad M, Zareian M J. Effect of climate change on precipitation patterns in an arid region using GCM models: case study of Isfahan-borkhar plain. *Natural Hazards Review*, 2021, 21(2): 04020006.
- [19] Zhang J S, Tian Z, Lou Z C. Quality evaluation of twelve species of Chinese Ephedra (ma huang). *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 1989, 24(11): 865-871.
- [20] 高湘, 许爱霞, 宋平顺, 张建新, 葛斌. 甘肃不同采收期人工种植及野生麻黄中麻黄碱与伪麻黄碱含量分析. 兰州大学学报: 医学版, 2006, 32(2): 43-45, 49.
- [21] Moreno R, Zamora R, Molina J R, Vasquez A, Herrera M Á. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, 2011, 6(6): 364-370.
- [22] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [23] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1420-1428.
- [24] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [25] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [26] 张童, 黄治昊, 彭杨靖, 王泳腾, 王萍, 王诗童, 崔国发. 基于 Maxent 模型的软枣猕猴桃在中国潜在适生区预测. 生态学报, 2020, 40(14): 4921-4928.
- [27] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Behr J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7: 12558.
- [28] Bjornlie D D, Thompson D J, Haroldson M A, Schwartz C C, Gunther K A, Cain S L, Tyers D B, Frey K L, Aber B C. Methods to estimate distribution and range extent of grizzly bears in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Wildlife Society Bulletin*, 2014, 38(1): 182-187.
- [29] 吴明珠. 甘肃省野生麻黄资源调查[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [30] 李宏群, 刘晓莉, 汪建华, 符勇耀, 金冬桂. 基于 MaxEnt 模型荔枝在中国的潜在种植区预测. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 394-400.
- [31] 章鹏飞, 张虹, 张小波, 尹永飞, 刘守金, 李雷, 彭代银. 多花黄精生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2020, 45(13): 3073-3078.
- [32] 王哲, 李波, 姜大成, 齐伟辰. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术的吉林省玉竹主导环境因子与生态适宜性区划研究. 时珍国医国药, 2018, 29(9): 2250-2253.
- [33] 刘津岐, 刘永萍, 张俊逸, 文阳兴家, 楚光明. 盐爪爪属 5 种植物的潜在分布及其适生性分析. 草业科学, 2022, 39(1): 133-148.
- [34] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [35] He P, Li J Y, Li Y F, Xu N, Gao Y, Guo L F, Huo T T, Peng C, Meng F Y. Habitat protection and planning for three *Ephedra* using the MaxEnt and Marxan models. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108399.
- [36] 袁锋, 罗倩, 夏心慧, 潘国营, 李茂瑾, 江传阳, 苏亲桂, 陈灿. 盐胁迫对木麻黄和台湾相思种子萌发及幼苗生长的影响. 广西植物, 2023, 43(4): 587-595.
- [37] 张艳阳, 冀瑞朴, 李晗, 刘俊喜, 袁卉馥. 外源物质对盐胁迫下麻黄幼苗根系生长的影响. 林业与生态科学, 2020, 35(3): 320-324.
- [38] 许基全. 木麻黄可在极重盐渍化土壤生长. 中国林业, 2010(1): 28.

- [39] 刘芬, 姜清彬, 马英姿, 仲崇禄, 张勇, 陈羽, 陈珍. 7 个短枝木麻黄种源耐寒评价及综合分析. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(6): 40-44, 62.
- [40] 李向平. 不同环境温度刺激下麻黄-桂枝药对效应成分发汗作用的研究. 临床医药文献电子杂志, 2014, 1(5): 655-657.
- [41] 张丽, 贾志国, 刘雪霞, 范翠丽, 袁卉馥. 外源物质对干旱胁迫下麻黄种子萌发及生理特性的影响. 中药材, 2016, 39(11): 2450-2455.
- [42] 赵海洋, 许寅生, 王玉祥, 郭亚丽. 电场对干旱胁迫下麻黄种子萌发及幼苗生理指标的影响. 农业科技通讯, 2017(11): 141-145.
- [43] 张红梅, 王明艳, 李玲玉, 刘娟娟. 不同温度对不同品种的麻黄种子萌发的影响. 安徽农业科学, 2009, 37(26): 12561-12562.
- [44] 喻洁, 曹广超, 戎战磊, 李华非. 基于 Maxent 模型的冬虫夏草中国潜在适生区预测. 生态科学, 2023, 42(2): 202-210.
- [45] 陈敏艳, 张琳琳, 曹博, 白成科. 基于 MaxEnt 和 GIS 的黄芩属 6 种药用植物最适潜在分布区预测. 中兽医医药杂志, 2022, 41(5): 7-12.
- [46] 杨春, 师立伟, 王莉, 魏琴芳, 焦旭升. 基于 MaxEnt 模型的甘肃省牛蒡子生态适宜性分布研究. 中国野生植物资源, 2022, 41(10): 77-80.
- [47] 马晓辉, 卢有媛, 黄得栋, 朱田田, 吕培霖, 晋玲. 中麻黄生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2017, 42(11): 2068-2071.
- [48] 江苏新医学院. 中药大词典-下册: 缩印本. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 2221.
- [49] 金世元, 王琦. 中药饮片炮制研究与临床应用. 2004: 630.
- [50] 洪浩, 陈虎彪, 徐凤, 臧新钰, 杨东辉, 王璇, 蔡少青, 御影雅幸. 麻黄药材原植物资源和市场品种调查. 中国中药杂志, 2011, 36(9): 1129-1132.
- [51] 崔治家, 晋玲, 朱田田, 马毅, 王振恒, 廉永善. 甘肃省麻黄属野生种质资源及保护利用. 中兽医医药杂志, 2014, 33(4): 24-28.
- [52] Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, Riofrío-Dillon G, de Ruffray P, Vidal C, Pierrat J C, Gégout J C. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 2011, 479(7374): 517-520.
- [53] 杨宏, 董京京, 吴桐, 周华近, 陈洁, 李蒙, 王贤荣, 伊贤贵. 基于 MaxEnt 模型的迎春樱桃潜在适生区预测. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 131-138.
- [54] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [55] 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]. 北京: 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.
- [56] 木合塔尔·吐尔洪, 楚刚辉, 木尼热·阿不都克里木. 新疆戈壁野生木贼麻黄中麻黄碱和盐酸伪麻黄碱含量的测定. 南开大学学报: 自然科学版, 2016, 49(5): 74-78.
- [57] 晋玲, 张弦飞, 崔治家, 朱田田, 王振恒, 马毅, 林丽, 高天鹏. HPLC 法测定不同产地和种属麻黄中麻黄碱与伪麻黄碱的含量. 中兽医医药杂志, 2013, 32(1): 43-46.

附表:

附表 1 58 个木贼麻黄分布数据
Appendix table 1 Distribution data of 58 *E. equisetina*

编号 Numbers	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	海拔 Altitude/m	采样地 Sampling sites
1	90.2859	43.8345	1281	新疆昌吉州木垒县
2	90.3482	43.8464	1275	新疆昌吉州木垒县
3	86.2142	44.3043	468	新疆昌吉州玛纳斯县
4	89.1807	43.9996	726	新疆昌吉州吉木萨尔县
5	87.1546	43.9916	612	新疆昌吉州昌吉市二六工镇 G30 附近
6	89.6085	44.5284	685	新疆昌吉州奇台县
7	89.5736	46.5662	831	新疆阿勒泰地区富蕴县
8	89.5749	46.5936	824	新疆阿勒泰地区富蕴县 G216 附近
9	87.4868	47.1119	498	新疆阿勒泰地区福海县
10	88.1413	47.8455	858	新疆阿勒泰地区阿勒泰市
11	82.0515	44.8549	533	新疆博乐市赛里木湖路 G219 附近
12	81.0247	44.9688	1350	新疆博尔塔拉蒙古自治州温泉县
13	83.5924	46.2198	834	新疆塔城地区托里县
14	83.5997	45.9551	1062	新疆塔城地区托里县
15	82.9825	45.8642	1106	新疆塔城地区托里县
16	84.7137	44.4178	485	新疆塔城地区乌苏市
17	82.2317	43.4825	776	新疆伊犁哈萨克自治州巩留县
18	80.8789	44.0562	638	新疆伊犁霍城县
19	87.3874	44.0141	558	新疆乌鲁木齐头屯河区
20	87.6732	43.8974	711	新疆乌鲁木齐市水磨沟区
21	87.6379	43.9988	439	新疆乌鲁木齐米东区
22	93.0104	43.5999	1638	新疆哈密市巴里坤县
23	77.4137	37.883	1355	新疆喀什地区叶城县
24	75.2589	39.7191	2162	新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州乌恰县
25	86.8773	42.2818	1104	新疆巴音郭楞蒙古自治州和硕县
26	79.9221	37.1142	1382	新疆和田地区和田市 G315 附近
27	82.9896	41.7068	1071	新疆阿克苏地区库车市
28	103.8269	36.0594	1541	甘肃兰州市城关区
29	104.1136	35.8431	1999	甘肃兰州市榆中县
30	103.9184	36.3388	1680	甘肃兰州市皋兰县
31	99.6098	38.8486	2290	甘肃张掖市肃南裕固族自治县
32	98.5473	39.2267	3495	甘肃张掖市肃南裕固族自治县
33	103.5074	34.5892	2543	甘肃甘南州卓尼县
34	102.9234	37.5622	1883	甘肃武威市古浪县
35	102.5391	38.2589	1518	甘肃金昌市永昌县
36	104.7735	34.4388	2354	甘肃定西市岷县
37	98.4942	39.7324	1481	甘肃酒泉市肃州区 G312 附近
38	106.3592	38.5544	1111	宁夏银川市贺兰县
39	106.2597	38.4712	1112	宁夏银川市金凤区
40	105.7972	37.5754	1181	宁夏中卫市中宁县
41	105.6856	37.4915	1183	宁夏中卫市中宁县
42	105.6535	37.4669	1192	宁夏中卫市中宁县
43	106.5110	38.8936	1110	宁夏石嘴山市平罗县

续表

编号 Numbers	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	海拔 Altitude/m	采样地 Sampling sites
44	107.4279	37.7934	1346	宁夏吴忠市盐池县
45	109.3294	36.8638	1062	陕西延安市安塞区
46	109.4327	35.7622	1144	陕西延安市洛川县
47	108.1763	36.9269	1307	陕西延安市吴起县
48	109.4188	35.8346	1165	陕西延安市洛川县
49	108.2241	34.3822	569	陕西咸阳市乾县
50	108.5812	34.7986	892	陕西咸阳市淳化县 G211 附近
51	108.2536	34.2603	438	陕西咸阳市武功县
52	110.1216	37.0895	882	陕西榆林市清涧县 G6521 附近
53	109.9813	37.1533	954	陕西榆林市子长市
54	110.8873	38.9063	1081	陕西榆林市府谷县
55	109.6813	38.2768	1074	陕西榆林市榆阳区
56	108.0671	37.4281	1427	陕西省榆林市定边县
57	107.7249	34.2841	518	陕西宝鸡市眉县
58	110.0763	34.5661	373	陕西渭南市华阴市