

# 基于 Maxent 模型的河西走廊骆驼蓬潜在适生区研究

余涛,董瑞,甘瑞勋,刘新,唐庄生,楚彬,花立民\*,郝媛媛\*\*

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】了解骆驼蓬(*Peganum harmala*)分布及影响其分布的主要环境因子对科学防控和合理利用骆驼蓬具有重要意义。【方法】基于 MaxEnt 模型,结合分布点数据和 16 个生态因子数据探讨了影响河西走廊骆驼蓬分布的主导生态因子及未来适生区变化。【结果】影响骆驼蓬分布的主导生态因子是人类足迹、最湿月降水量、海拔、坡度和土壤有效水含量。河西走廊骆驼蓬主要分布在古浪县、凉州区、永昌县、山丹县、甘州区、民乐县、临泽县、民勤县、高台县和肃州区等。2030 年和 2050 年适生区面积增长幅度最大的气候情景模式分别为 SSP245 和 SSP126。【结论】人类足迹和最湿月降水量是影响河西走廊骆驼蓬分布的主导生态因子;分布区主要在中东部地区;未来不同气候情景下,骆驼蓬适生区会向高纬度地区扩张。

**关键词:**骆驼蓬;MaxEnt 模型;生态因子;适生区;分布特征,河西走廊

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0182-08

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.021



骆驼蓬(*Peganum harmala*)隶属蒺藜科(Zygophyllaceae)骆驼蓬属(*Peganum*),多年生草本植物,高 30~70 cm,全株有毒,茎基部多分枝,叶互生全裂,花黄白色,硕果近球形,种子三棱形,表面被小瘤状突起<sup>[1]</sup>。骆驼蓬主要生长于荒漠、戈壁滩、路边和土质山坡等地域,分布较广,生长迅速,适应力极强,具有耐旱、抗寒、耐盐、耐碱等特性<sup>[2]</sup>;可药用,具有抗肿瘤、抗

癌、降血糖、抗菌、消炎止痛、抗病毒和抗衰老等功效,具有广阔的开发前景和利用价值<sup>[3]</sup>。种子中毒性含量最大,叶片毒性较小,家畜采食后会引发神经系统异常,甚至死亡<sup>[4]</sup>。植株在幼小青绿时期受到触碰会散发出刺鼻气味,家畜一般不采食,当进入秋冬季后,植株干枯,刺鼻气味会随之消失,家畜会因此误食导致中毒甚至死亡,造成经济损失,阻碍畜牧业发展<sup>[5]</sup>。因此,明确骆驼蓬的潜在地理分布对科学防控和合理利用该毒害草具有重要意义。

河西走廊因其独特的地理环境,是我国西部地区重要的生态屏障<sup>[6]</sup>,对维持生态系统的稳定起着至关重要的作用。然而近几十年来,由于气候变化和人为干扰等因素影响,草地植被破坏严重,草地生产力和物种多样性降低,草原荒漠化日趋加剧<sup>[7]</sup>,已经成为河西走廊面临的主要生态问题之一<sup>[8]</sup>。骆驼蓬作为荒漠草原植被群落的重要组成成分<sup>[2]</sup>,其分布范围增加已经成为草地退化的主要标志之一<sup>[9]</sup>。2020 年国家林业和草原局召开了全国草原有害生物普查工作,制定了普查工作技术方案,骆驼蓬被列入毒害草名录中。本

**收稿日期:**2023-03-27;**修回日期:**2023-05-08

**基金资助:**国家自然科学基金项目(41907406,32160338);甘肃省教育厅重大培育项目(2024CXPT-07);草业生态系统教育部重点实验室揭榜挂帅项目(KLGE-2024-06);甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2023CXZX-625);国家林业和草原局草地啮齿动物危害防控创新团队资助

**作者简介:**余涛(1998-),男,甘肃天水人,硕士研究生。

E-mail:gsauyutao@163.com

\*通信作者,研究方向为草地生态与啮齿动物生态。E-mail:hualm@gsau.edu.cn

\*\*通信作者,研究方向为草地生态遥感及生态恢复。E-mail:haoyy@gsau.edu.cn

研究以骆驼蓬为研究对象,河西走廊为研究区,利用 MaxEnt 模型结合分布点数据和生态因子数据探讨骆驼蓬在河西走廊的空间分布格局,以期为骆驼蓬生态研究和科学防控提供理论依据。

MaxEnt 最大熵值模型是由 S. J. Philips 等于 2004 年利用 JAVA 语言所构建,是众多物种分布模型中预测结果较好且应用较广泛的模型之一<sup>[10]</sup>。目前已有很多学者利用 MaxEnt 模型研究天然草原毒害草的分布格局变化。如李晓辰<sup>[11]</sup>研究了中国温带荒漠植物膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)的地理分布范围、主导生态因子和未来分布格局变化。黄睿杰等<sup>[12]</sup>利用 MaxEnt 模型研究了醉马草(*Achnatherum inebrians*)分布的主导环境因子和未来潜在分布。柳晓燕等<sup>[13]</sup>研究了外来入侵物种豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)在我国潜在分布及扩张趋势,发现湖北、江西和广西中部是其高度适生区。以上研究虽为天然草原毒害草研究提供了科学支撑,但并没有考虑人为干扰对物种分布的影响。目前对于影响荒漠草原毒害草骆驼蓬分布的主导生态因子、潜在分布以及未来气候下分布区变化的研究较少。基于此,本研究基于 MaxEnt 模型,结合分布点数据,选择气候、土壤、地形和人类足迹等因子预测骆驼蓬当前和未来 3 种气候情景下适生区的变化,旨在解决骆驼蓬当前适生区分布及未来适生区变化趋势,明晰骆驼蓬分布的主导环境因子,以期科学防控毒害草扩散蔓延和保护草地多样性提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究以河西走廊天然草原为研究区。河西走廊位于甘肃省西北部( $37^{\circ}10' \sim 42^{\circ}50' \text{ N}$ ,  $93^{\circ}20' \sim 104^{\circ}00' \text{ E}$ ),总面积  $27.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,长约 1 000 km,宽 40~100 km,东起乌鞘岭,西至玉门关,南靠祁连山脉,北临马鬃山和合黎山<sup>[14]</sup>。总体地势南北高中间低,气候干燥,属于温带大陆性气候,多为荒漠戈壁景观,天然植被稀少,生态环境脆弱,昼夜温差大,年平均气温为  $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 30~320 mm,由东南向西北递减,年蒸发量约 2 000~3 500 mm,由东南向西北递增<sup>[15]</sup>。行政区划上包括酒泉、嘉峪关、武威、张掖和金昌 5 个地级市<sup>[16]</sup>,俗称“河西五市”。河西走廊作为西

部地区重要的生态安全屏障,其南部的祁连山是十分重要的水源涵养区,内部孕育着很多冰川,河西绿洲正是在冰川的滋养下,千百年来发挥出了抵御风沙侵袭的能力<sup>[17]</sup>。

### 1.2 分布点数据和预处理

共获取河西走廊骆驼蓬分布点 174 个。其中 170 个分布点数据由实地调查获得,其余 4 个来自于全球生物多样性信息数据库(the Global Biodiversity Information Facility, GBIF, <https://www.gbif.org>)。为了降低分布点之间的空间自相关性,以分布点为中心设置半径为 2 km 的缓冲区,去除缓冲区范围内的重复点,共获得骆驼蓬分布点 74 个(图 1)。根据 MaxEnt 的使用指南,将骆驼蓬的分布点信息按照物种名称、经度和纬度三列输入 Excel,将格式另存为 . csv 备用。

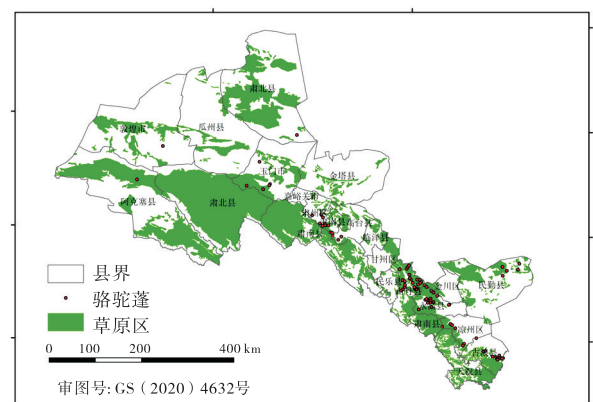


图 1 河西走廊骆驼蓬分布图

Fig. 1 Map of *Peganum harmala* distribution in the Hexi Corridor

### 1.3 生态因子数据的获取和预处理

气候数据来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>),共包括 19 个气候因子。未来气候数据选择适合我国地理环境的 BCC-CSM2-MR 气候模型及两个未来时间段(2021—2040、2041—2060)下的 3 个共享社会经济路径(SSP126、SSP245 和 SSP585)。土壤数据来源于世界粮农组织土壤数据库 V1.2(<https://www.fao.org/soils-portal/en/>)。地形数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>),人类足迹数据(Human Footprint, HFP)是 Li 等<sup>[18]</sup>在《Scientific Data》上在线发表的 2000—2018 年的全球陆地年度人类足迹数据集,由建筑环境、人口密度、夜间灯光、耕地、牧场、道路、铁路和通航水路

8个因子共同组成,来源于FigShare存储库(<https://doi.org/10.6084/m9.figshare>)。

为了避免数据过度拟合,对19个气候因子进行相关性分析。利用ArcGIS分析19个气候因子的皮尔森相关性系数,得到气候变量的相关性矩阵,剔除相关系数绝对值 $|r|>0.8$ 的变量,最终得到昼夜温差月均值(Bio2)、等温性(Bio3)、年温的变化范围(Bio7)、最暖季平均温度(Bio10)、最冷季平均温度(Bio11)、最湿月降水量(Bio13)、最干月降水量(Bio14)、降水量变化的方差(Bio15)共8个气候因子变量,再加上3个地形变量、4个土壤变量和1个人类足迹变量,共16个变量(表1)用于物种分布预测。将所有的气候、地形、土壤、人类足迹数据利用ArcGIS软件按照河西走廊轮廓进行掩膜提取并将格式转换为.asc备用。采用Jackknife刀切法分析计算各生态变量对预测的贡献率,得到影响骆驼蓬地理分布主导生态因子。

表 1 环境因子变量  
Table 1 Environmental Variables

| 简称    | 变量      | 单位                     |
|-------|---------|------------------------|
| Bio2  | 昼夜温差月均值 | ℃                      |
| Bio3  | 等温性     | %                      |
| Bio7  | 年均温变化   | ℃                      |
| Bio10 | 最暖季均温   | ℃                      |
| Bio11 | 最冷季均温   | ℃                      |
| Bio13 | 最湿月降水量  | mm                     |
| Bio14 | 最干月降水量  | mm                     |
| Bio15 | 降雨量变异系数 | —                      |
| AWC   | 土壤有效水含量 | mm                     |
| TOC   | 有机碳含量   | g/kg                   |
| pH    | 酸碱度     | $-\log(\text{H}^+)$    |
| TRB   | 土壤容重    | $\text{g}/\text{cm}^3$ |
| AL    | 海拔      | m                      |
| SL    | 坡度      | °                      |
| AS    | 坡向      | °                      |
| HFP   | 人类足迹    | —                      |

1.4 骆驼蓬预测模型精度评价

MaxEnt模型通过AUC(Area Under Curve,曲线下面积)值反映预测结果的准确性。AUC值是受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve,ROC曲线)下的面积值<sup>[19]</sup>。采用交叉验证的方法模拟运行10次以降低在模拟过程中随机取样造成的影响。

1.5 MaxEnt模型和适生区等级划分

利用ArcGis10.2将10次运行的平均值转化为栅格数据,并在工具箱中选择数据分析工具中的重分类,在分类中将模式选择为Natural Breaks自然断点分级法,分类设置为4类,分别为非适生区(0~0.08)、低适生区(0.08~0.28)、中适生区(0.28~0.58)和高适生区(0.58~1)。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

图2是对数据运行得到的结果,训练数据平均AUC值为0.969,标准差为0.006,AUC值均超过0.9,表示MaxEnt模型预测骆驼蓬适生区分布精度高,模型运行结果准确可靠。

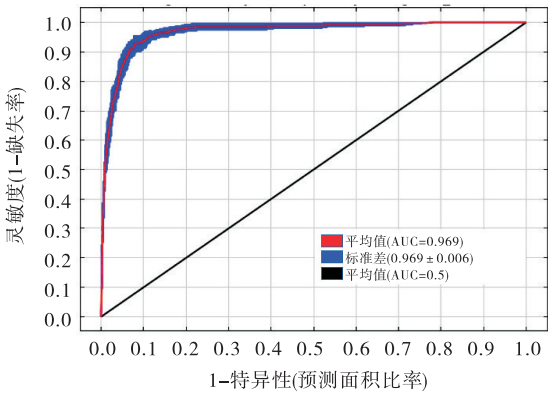


图 2 骆驼蓬MaxEnt模型的受试者操作特性曲线

Fig. 2 Receiver operating characteristic curve of *Peganum harmala* MaxEnt model

2.2 影响骆驼蓬地理分布的主导生态因子

各生态因子贡献率分别为:人类足迹(HFP)48.6%、最湿月降雨量(Bio13)17.3%、坡度(SL)8.9%、土壤有效水含量(AWC)8.3%,贡献率总共达到83.1%,明显高于其他12个生态因子(表2)。比较置换重要性得到5个生态因子,分别为海拔30.2%、人类足迹30.1%、最湿月降雨量8.9%、坡度6.6%、土壤有效水含量6%,所占比重共81.8%,在模型预测过程中起关键性作用。结合贡献率和置换重要性得出骆驼蓬适生区分布的主导生态因子是人类足迹、最湿月降水量、海拔、坡度和土壤有效水含量。

2.3 骆驼蓬分布对生态因子的响应

对5个主要生态因子分别建立MaxEnt模拟预测模型,探究单一变量与骆驼蓬分布间的关系,通过响

表 2 骆驼蓬生态因子的贡献率

Table 2 Percent contribution of ecological variables in *Peganum harmala*

| 编号 | 生态因子           | 贡献率/% | 置换重要性/% |
|----|----------------|-------|---------|
| 1  | 人类足迹(HFP)      | 48.6  | 30.1    |
| 2  | 最湿月降水量(Bio13)  | 17.3  | 8.9     |
| 3  | 坡度(SL)         | 8.9   | 6.6     |
| 4  | 土壤有效水含量(AWC)   | 8.3   | 6.0     |
| 5  | 坡向(AS)         | 3.2   | 2.0     |
| 6  | 降水量变异系数(Bio15) | 3.1   | 4.7     |
| 7  | 土壤有机碳(TOC)     | 3.0   | 1.4     |
| 8  | 海拔(AL)         | 2.8   | 30.2    |
| 9  | 年均温变化(Bio7)    | 1.8   | 1.2     |
| 10 | 最暖季均温(Bio10)   | 1.0   | 5.1     |
| 11 | 最干月降水量(Bio14)  | 0.7   | 0.9     |
| 12 | 昼夜温差月均值(Bio2)  | 0.4   | 1.0     |
| 13 | 最冷季均温(Bio11)   | 0.4   | 1.3     |
| 14 | 土壤容重(TRB)      | 0.4   | 0.4     |
| 15 | 等温性(Bio3)      | 0.1   | 0.3     |
| 16 | 土壤酸碱度(pH)      | 0.0   | 0.1     |

应曲线来反映各生态因子对骆驼蓬分布的影响,存在概率大于0.5表明适宜骆驼蓬分布概率较大。骆驼蓬适宜生存的海拔范围为1 711~2 574 m,最适海拔为2 105 m;当最湿月降雨量在40~74 mm时,适宜骆驼蓬生存,响应曲线峰值为58 mm;土壤有效水含量等于15%时,最适宜骆驼蓬生存,随着土壤有效水含量的降低,骆驼蓬生存概率逐渐减小;随着人类足迹增加,骆驼蓬生存概率迅速增大,逐渐趋于稳定,当人类足迹为8时,骆驼蓬适生概率最大;随着坡度增加,骆驼蓬生存概率逐渐减小(图3)。

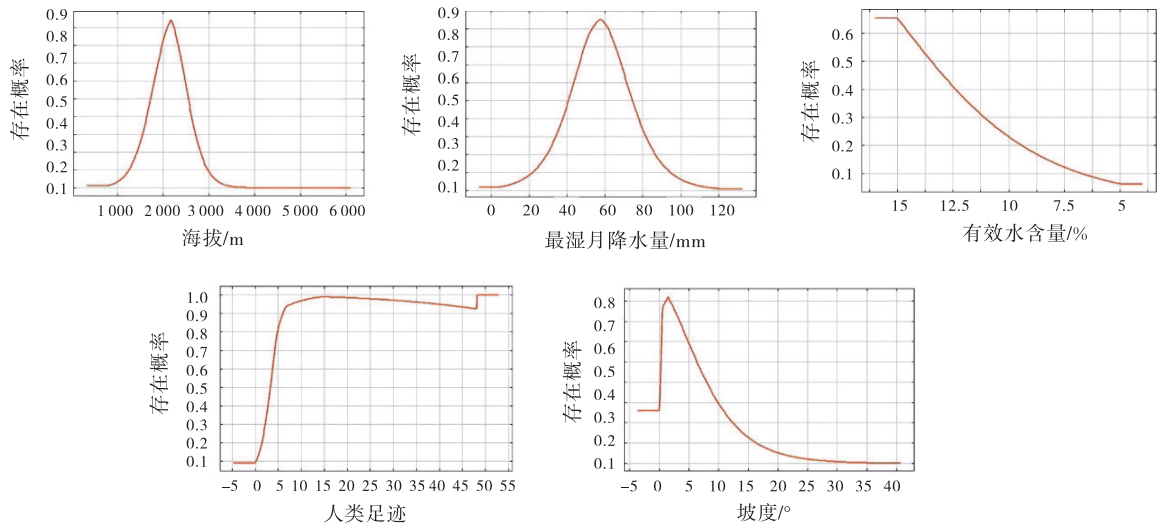


图 3 主要生态因子的响应曲线

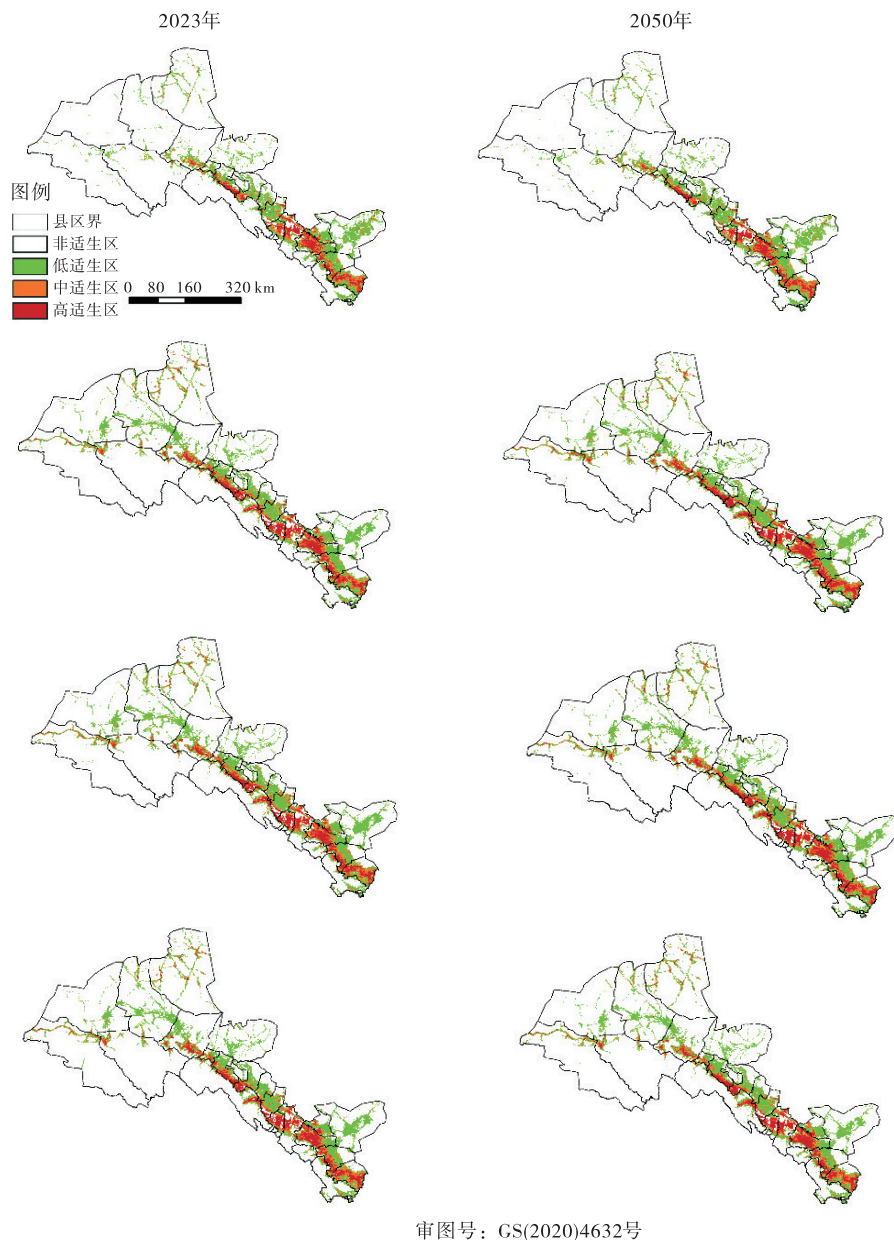
Fig. 3 Response curves for major ecological factors

2.4 不同气候情景下骆驼蓬分布特征

当前气候下,骆驼蓬高适生区面积为0.61×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占河西走廊面积的2.37%,主要分布在古浪县、凉州区、永昌县、山丹县、甘州区、高台县和肃州区;中适生区面积为1.07×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占河西走廊面积的4.15%,主要分布在古浪县、凉州区、永昌县、山丹

县、甘州区、高台县和肃州区;低适生区面积为2.83×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占河西走廊面积的10.98%,主要分布在古浪县、凉州区、永昌县、山丹县、甘州区、民乐县、临泽县、民勤县、高台县和肃州区(图4)。

在未来不同气候情景模式下,骆驼蓬适生区会逐渐向西扩散,各个等级适生区面积在当前适生区面积



审图号: GS(2020)4632号

图4 不同气候情景下骆驼蓬适生区分布图

Fig. 4 Distribution map of suitable areas of *Peganum harmala* under different climatic scenarios

基础上不断扩大(图4)。SSP126情景下,2030年骆驼蓬高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 $0.95 \times 10^4$ 、 $1.18 \times 10^4$ 和 $3.28 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.33%、0.44%和1.78%;2050年骆驼蓬高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 $1.02 \times 10^4$ 、 $1.28 \times 10^4$ 和 $3.40 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.58%、0.83%和2.21%。SSP245情景下,2030年骆驼蓬高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 $1.02 \times 10^4$ 、 $1.30 \times 10^4$ 和 $3.49 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.59%、0.90%和2.59%;2050年骆驼蓬高适生区、中

适生区和低适生区面积分别为 $0.98 \times 10^4$ 、 $1.26 \times 10^4$ 和 $3.38 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.45%、0.75%和2.13%。SSP585情景下,2030年骆驼蓬高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 $0.97 \times 10^4$ 、 $1.22 \times 10^4$ 和 $3.29 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.41%、0.59%和1.80%;2050年骆驼蓬高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 $0.97 \times 10^4$ 、 $1.21 \times 10^4$ 和 $3.26 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,较当前气候下适生区面积分别增加了1.41%、0.56%和1.67%(图5,表3)。

表 3 不同气候情景下骆驼蓬适生区面积变化率

Table 3 Change rate of suitable area of *Peganum harmala* under different climatic scenarios

| 适生区  | 2030s  |        |        | 2050s  |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | SSP126 | SSP245 | SSP585 | SSP126 | SSP245 | SSP585 |
| 低适生区 | 1.78%  | 2.59%  | 1.80%  | 2.21%  | 2.13%  | 1.67%  |
| 中适生区 | 0.44%  | 0.90%  | 0.59%  | 0.83%  | 0.75%  | 0.56%  |
| 高适生区 | 1.33%  | 1.59%  | 1.41%  | 1.58%  | 1.45%  | 1.41%  |

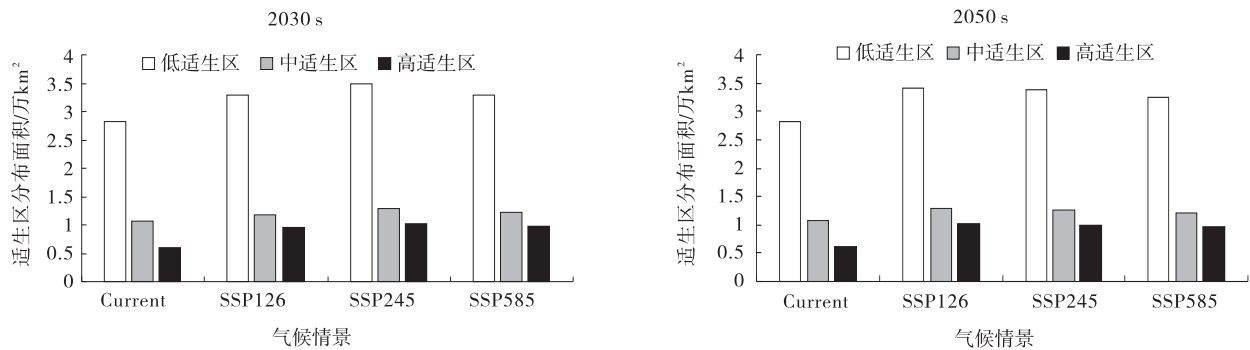


图 5 不同气候情景下骆驼蓬适生区面积分布图

Fig. 5 The distribution map of suitable areas of *Peganum harmala* under different climate scenarios

### 3 讨论

#### 3.1 影响骆驼蓬分布的主导生态因子

近 30 年来,随着气候不断变暖,物种的分布、种群动态和繁殖周期不断发生着变化<sup>[20]</sup>,物种也通过自身适应性进化和改变分布来适应气候变化<sup>[21]</sup>。物种的地理分布是物种与环境长期适应的结果,影响物种分布的主要因素有物种自身机理、物种间相互作用、非生物因素和外界环境等<sup>[22]</sup>。

主导生态因子分析结果显示,对骆驼蓬潜在适生区分布影响较大的生态因子是人类足迹、最湿月降水量、坡度和土壤有效水含量(AWC),其中人类足迹累计贡献率最高,为 48.6%,其次是最湿月降水量,为 17.3%。因此,人类足迹和降水对骆驼蓬生长起着主导作用。实地调查中发现,骆驼蓬主要分布在草原道路两侧及草地退化严重区域,这主要是因为人类活动导致草原退化,为毒害草扩张提供生态位,使其不断扩张蔓延;草原道路上因人类出行而形成低洼地,降雨时会产生积水,为道路两侧的骆驼蓬提供充足的水分。塞依丁·海米提等<sup>[23]</sup>发现人类干扰是影响新疆黄花刺茄(*Solanum rostratum*)的关键因子,且黄花刺茄的扩散与人类干扰强度呈正相关。袁素芬等<sup>[24]</sup>研究了人类干扰对荒漠植物分布特征的影响,发现随着人类干扰增加,荒漠中生长繁盛的植物物种骤减。狄林

楠<sup>[25]</sup>研究表明荒漠植物裸果木(*Gymnocarpus przewalskii*)遗传多样性与人类干扰和进化历史有关。Martínez—Ramos 等<sup>[26]</sup>通过多年实地调查,发现人类干扰正在不断侵蚀保护区生物多样性,改变物种群落组成,破坏生态系统稳定。因此,人类干扰对物种分布、群落组成和多样性的影响较大。

然而,影响骆驼蓬分布的生态因子并不局限于这几种,在未来研究中可以综合多种因素,如植被特征<sup>[27]</sup>、物种间相互作用<sup>[28]</sup>等,可以使模拟预测结果更加精准可靠。

#### 3.2 未来气候变化下骆驼蓬潜在分布区变化

本研究利用 MaxEnt 模型研究了河西走廊骆驼蓬在当前和未来时间段(2021—2040、2041—2060 年)3 种不同气候情景(SSP126、SSP245 和 SSP585)下的潜在分布区和适生区面积的变化趋势。根据骆驼蓬在未来不同气候情景下的分布可以发现,与当前分布区相比,未来骆驼蓬适生区会逐渐向西扩散,这主要是因为近 50 年来,西北地区气温呈波动上升的趋势,降水呈微弱上升趋势,而气温和降水的变化会直接影响物种的分布<sup>[29]</sup>。本研究结果表明,影响骆驼蓬的所有环境因子中,人类足迹贡献率最大,最湿月降水量次之,说明骆驼蓬的生长分布与人为干扰和降雨有较大的关系。已有研究表明,人类对草地不合理利用加之气候变化,草地会发生不同程度的退化,优良牧草多

样性和生产力下降,毒害草扩张蔓延,导致生态环境不断恶化<sup>[30]</sup>。2030年SSP245模式下各个等级适生区面积变化率最大,SSP585模式次之,SSP126模式适生区面积变化率最小;2050年SSP126模式下各个等级适生区面积变化率最大,SSP245模式次之,SSP585模式适生区面积变化率最小。随着时间尺度的不断推移,SSP126模式下各个等级适生区面积均增大,SSP245模式下各个等级适生区面积均减小,SSP585模式下低适生区和中适生区面积均减小,高适生区面积基本一致。这主要是因为SSP245和SSP585情景模式下,人类碳排放会不断增加,导致气温逐渐上升,骆驼蓬分布面积会呈现出先增加后减小的趋势;SSP126模式是较为理想的排放情景,更适宜骆驼蓬生长,骆驼蓬分布区会逐渐增加。

## 4 结论

本研究分析了河西走廊骆驼蓬在气候、地形、土壤和人类足迹等生态因子综合影响下的潜在适生区变化,探讨了影响骆驼蓬分布的主要生态因子以及骆驼蓬分布对单一生态因子的响应,研究结果对科学防控毒害草扩散蔓延和保护草地多样性具有一定的指导意义。得出主要结论如下:

(1) 影响骆驼蓬适生区分布的主要生态因子是人类足迹、最湿月降水量、海拔、坡度和土壤有效水含量。骆驼蓬适宜生境海拔为1711~2574 m,最湿月降水量为40~74 mm,土壤有效水含量大于13.7%,人类足迹大于4,坡度小于5°。

(2) 河西走廊骆驼蓬适生区主要分布在古浪县、凉州区、永昌县、山丹县、甘州区、民乐县、临泽县、民勤县、高台县和肃州区等。其中高、中和低适生区面积分别为 $0.61 \times 10^4$ 、 $1.07 \times 10^4$ 和 $2.83 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。

(3) 在未来不同气候情景模式下,骆驼蓬适生区会逐渐向西扩散,其适生区面积也会在原有基础上不断扩大,其中2030年SSP245气候情景模式下适生区面积增长最大,2050年SSP126气候情景模式下适生区面积增长最大。

### 参考文献:

[1] 安登第,朱艳蕾,唐静,等. 骆驼瘤胃耐受/降解去氢骆驼蓬碱细菌的筛选[J]. 微生物学报,2010,50(8):1001—1007.

[2] 程琳,陈吉祥,李彦林,等. 荒漠草原植物骆驼蓬根际土壤细菌群落分析[J]. 干旱区研究,2018,35(4):977—983.

[3] 李茜,史阔豪,武康雄,等. 骆驼蓬化学成分、药理作用及毒性研究进展[J]. 中成药,2022,44(12):3936—3943.

[4] 张义英,王俊儒,李越鲲,等. 骆驼蓬生物碱生物活性的研究进展[J]. 动物医学进展,2006,(10):37—40.

[5] 郭蓉. 不同物候期骆驼蓬化学成分与营养成分分析及安全性毒理学评价[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2021.

[6] 李善家,王福祥,从文倩,等. 河西走廊荒漠土壤微生物群落结构及环境响应[J]. 土壤学报,2022,59(6):1718—1728.

[7] 秦丽萍,韩胜国,马维新,等. 围栏封育对河西走廊北部温性荒漠草原植被动态变化的影响[J]. 中国草食动物科学,2021,41(2):82—84.

[8] 程小云,张琴,兰芳芳,等. 河西走廊草地荒漠化动态及驱动因素[J]. 中国沙漠,2022,42(6):134—141.

[9] 何毅. 甘肃省天然草场有毒植物及防治[J]. 中国草食动物科学,2001(1):30—31.

[10] 管凤荣. 结合物种分布模型的蜀柏毒蛾在四川的发生分布及影响因子分析[D]. 成都:四川农业大学,2018.

[11] 李晓辰. 中国温带主要荒漠植物的地理分布格局研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.

[12] 黄睿杰,张春艳,温雨婷,等. 当前(1970—2000)与未来气候变化情境下中国醉马苣草潜在分布预测[J]. 草地学报,2022,30(10):2712—2720.

[13] 柳晓燕,李俊生,赵彩云,等. 基于MAXENT模型和ArcGIS预测豚草在中国的潜在适生区[J]. 植物保护学报,2016,43(6):1041—1048.

[14] 李锦超,曹春,方锋,等. 基于卫星和地面监测的河西走廊O<sub>3</sub>浓度时空分布及潜在源区分析[J/OL]. 环境科学,2022:1—17.

[15] 王贵珍,马素洁,杨思维,等. 基于RUE的不同草地类生态评价研究——以河西走廊为例[J]. 自然资源学报,2017,32(4):582—594.

[16] 刚志荣.“一带一路”上的超级通道——河西走廊[J]. 中学地理教学参考,2018,(1):7—8. [17] 仇宇. 河西走廊湿地旅游景观生态美学价值探讨[J]. 美与时代(城市版),2022,(10):87—89.

[18] Li X, Zhou Y, Zhao M, et al. A harmonized global nighttime light dataset 1992—2018 [J]. Sci Data, 2020, 7(1):168.

[19] 董瑞,楚彬,花蕊,等. 未来气候情景下青藏高原瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)的地理分布预测[J]. 中国草地学报,2022,44(4):10—20.

[20] 叶秀林,郭克疾,李欣蕊,等. 气候变化导致青藏高原马

- 鹿种群适应性分布退缩:以类乌齐马鹿国家级保护区为例[J]. 兽类学报, 2022:1—12.
- [21] Franks S J, Sim S, Weis A E. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(4): 1278—1282.
- [22] 楚彬, 包达尔罕, 张飞宇, 等. 青藏高原东缘高原鼠兔分布区的环境因子特征研究[J]. 草原与草坪, 2020, 40(5): 52—58.
- [23] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 阿尔曼·解思斯, 等. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 629—636.
- [24] 袁素芬, 唐海萍, 张宏锋. 准噶尔荒漠短命植物分布特征对干扰的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 122—126.
- [25] 狄林楠. 荒漠孑遗植物裸果木种群分布格局及遗传多样性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- [26] Martinez—Ramos M, Ortiz—Rodriguez I A, Pinero D, *et al.* Anthropogenic disturbances jeopardize biodiversity conservation within tropical rainforest reserves[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113(19): 5323—5328.
- [27] 赵鹏, 屈建军, 徐先英, 等. 长江源区沙化高寒草地植被群落特征及其与地形因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1030—1040.
- [28] 王彦阁, 张博冉, 赵瑞. 种间作用对物种分布模拟的影响及建模方法[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 837—843.
- [29] 李明, 孙洪泉, 苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180—1194.
- [30] 侯星辰, 鲁绍伟, 向昌林, 等. 不同母质温带草地植物群落多样性对人为干扰的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2153—2160.

## Study of potential suitable areas for *Peganum harmala* in the Hexi Corridor

YU Tao, DONG Rui, GAN Rui-xun, Liu Xin, TANG Zhuang-sheng, CHU Bin,  
HUA Li-min\*, HAO Yuan-yuan\*\*

(Pratacultural College of Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control, National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] Understanding the distribution of *Peganum harmala* and the main environmental factors affecting its distribution is of great significance for the scientific prevention and control and rational utilization of *P. harmala*. [Method] Based on MaxEnt model, combined with distribution point data and 16 ecological factors, the dominant ecological factors affecting the distribution of *P. harmala* in Hexi Corridor and the changes of future in suitable habitats were explored. [Result] The dominant ecological factors that affect the distribution of *P. harmala* were human footprint, wettest month rainfall, altitude, slope and soil effective water content. The *P. harmala* of the Hexi Corridor are mainly distributed in Gulang County, Liangzhou District, Yongchang County, Shandan County, Ganzhou District, Minle County, Linze County, Minqin County, Gaotai County and Suzhou District. The climate scenario models with the largest increases in suitable habitat area in 2030 and 2050 were SSP245 and SSP126, respectively. [Conclusion] Human footprint and wettest month rainfall were the dominant ecological factors affecting the distribution of *P. harmala* in Hexi Corridor. The distribution area was mainly in the central and eastern regions; In the future, under different climatic scenarios, the suitable area of *P. harmala* would expand to high latitudes.

**Key words:** *Peganum harmala*; MaxEnt model; environmental variables; suitable area

(责任编辑: 康宇坤)