

DOI: 10.5846/stxb202109112557

尹辉,田聪,马倩倩,吕光辉,曾凡江.气候变化和人类活动干扰下骆驼刺潜在分布格局变化特征.生态学报,2022,42(18):7349-7361.

Yin H, Tian C, Ma Q Q, Lü G H, Zeng F J. Variation characteristics of potential distribution patterns of *Alhagi sparsifolia* Shap. under climate change and human disturbance. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7349-7361.

# 气候变化和人类活动干扰下骆驼刺潜在分布格局变化特征

尹 辉<sup>1,2,3,4,5</sup>, 田 聪<sup>6</sup>, 马倩倩<sup>1,2,3,5</sup>, 吕光辉<sup>4</sup>, 曾凡江<sup>1,2,3,5,\*</sup>

1 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆荒漠植物根系生态与植被修复重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

3 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 策勒 848300

4 新疆大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830046

5 中国科学院大学, 北京 100049

6 新疆畜牧科学院草业研究所, 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 气候变化和人类活动是影响物种分布的最重要因素。骆驼刺是我国荒漠区的重要建群种, 建群种的丧失将对荒漠生态系统产生严重损伤。因此预测气候变化和人类活动影响下骆驼刺适宜生境的变化特点对保护我国荒漠生态系统具有重要的意义。本研究采用 61 个骆驼分布点数据, 和 21 个环境因子数据, 运用最大熵模型 (MaxEnt) 预测骆驼刺当前在有、无人人类活动干扰下的适宜生境分布, 对影响其分布的环境因素进行了评估。并预测未来 (2021—2040, 2041—2060, 2061—2080, 2081—2100) 四条共享社会经济路径 (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) 情景下, 骆驼刺潜在分布区的变化特点。研究结果表明, 在无人人类活动干扰的情况下, 骆驼刺适生区面积达 132.29 万 km<sup>2</sup>, 覆盖我国西北干旱区的大部分面积。年均降水量、最冷季度平均温、平均气温日较差、年均温、温度季节性、降水的季节性和高程被确定为影响骆驼刺潜在分布区的最重要因素。而在加入人类活动强度因素之后, 骆驼刺适生区面积显著下降至 71.31 万 km<sup>2</sup>, 且呈现出破碎化状态。此时, 年降水量、人类活动强度和海拔是影响骆驼刺分布的最重要原因。在未来气候情景下, 骆驼刺的适生区将产生一定的扩张。尤其在中高强迫 (SSP370) 和高强迫 (SSP585) 情景下, 骆驼刺的适生面积将随时间推移产生显著的增加, 且这种扩张主要向高纬度和高海拔地区发展。骆驼刺能保留大部分原有生境, 仅在内蒙古中西部地区发生少量收缩。在气候变化条件下, 骆驼刺能够在西北干旱区生存并扩张, 故可将其作为防沙治沙的优良物种进行保护与开发。

**关键词:** 骆驼刺; 潜在分布区; MaxEnt 模型; 气候变化; 质心转移; 第六次国际耦合模式比较计划; 共享社会经济路径

## Variation characteristics of potential distribution patterns of *Alhagi sparsifolia* Shap. under climate change and human disturbance

YIN Hui<sup>1,2,3,4,5</sup>, TIAN Cong<sup>6</sup>, MA Qianqian<sup>1,2,3,5</sup>, LÜ Guanghui<sup>4</sup>, ZENG Fanjiang<sup>1,2,3,5,\*</sup>

1 Xinjiang Key Laboratory of Desert Plant Roots Ecology and Vegetation Restoration, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 Cele National Station of Observation & Research for Desert Grassland Ecosystems in Xinjiang, Cele 848300, China

4 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2021D01D02); 国家基金委-新疆联合基金培育项目 (U1903102); 国家自然科学基金面上项目 (41977050)

**收稿日期:** 2021-09-11; **采用日期:** 2022-04-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengfj@ms.xjb.ac.cn

6 Institute of Grassland Research, Xinjiang Academy of Animal Science, Urumqi 830000, China

**Abstract:** Climate change and human disturbance are important factors affecting species distribution. *Alhagi sparsifolia* Shap. is an important construction species in desert areas of China. The loss of the construction species will cause serious disruption to the balance of desert ecosystems. Therefore, predicting the changes of suitable habitat under climate change and human disturbance is of great significance for the conservation and development of the species. In this study, 61 geographical distribution data and 21 environmental variables were used to predict the appropriate distribution of *A. sparsifolia* with or without human disturbance. In addition, the change characteristics of distribution areas of *A. sparsifolia* under four shared socio-economic paths (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) were predicted in the future (2021—2040, 2041—2060, 2061—2080, and 2081—2100). The results showed that without the human disturbance, the suitable area of *A. sparsifolia* was 1.32 million km<sup>2</sup>, covering most of the arid area of northwestern China. The annual precipitation, mean temperature of the coldest quarter, mean diurnal range, annual mean temperature, temperature seasonality, precipitation seasonality and elevation were the most important environmental variables affecting the distribution of *A. sparsifolia*. Considering the influence of human disturbance, the distribution area of *A. sparsifolia* reduced to 0.71 million km<sup>2</sup>, showing a state of fragmentation. In this case, the annual precipitation, human activity intensity and elevation were the most important factors affecting the distribution of *A. sparsifolia*. The projected suitable areas of *A. sparsifolia* under different SSPs scenarios may be enlarged. Especially under SSP370 and SSP585 scenarios, the projected suitable area of *A. sparsifolia* would increase significantly with time, and the expansion area mainly developed to high latitudes and altitudes areas. The habitat of *A. sparsifolia* shrank a little in the middle and western part of Inner Mongolia. *A. sparsifolia* can survive in the arid area of northwestern China under climate change, so it is an excellent species for desertification protection and development.

**Key Words:** *A. sparsifolia*; potential distribution area; MaxEnt model; climate change; centroid transfer; Coupled Model Intercomparison Project 6; shared socio-economic path

气候变化和人类活动是全球变化的两个重要方面,它们对生物多样性和生态系统的可持续发展具有重要影响<sup>[1-2]</sup>。气候条件是决定物种分布的最重要原因,它影响着植物的生长、发育、物候等众多方面。不断加剧的气候变化有可能造成某些物种灭绝,从而引起生态系统失衡,严重威胁人类的生存<sup>[3]</sup>。反过来,人类活动尤其是过度开采自然资源、过度改变土地利用类型也会对物种生存产生严重的影响<sup>[4]</sup>。因此,利用气候变量和人类活动变量作为重要的环境因素能够对物种分布区的变化进行良好的预测。

生态位模型正是基于物种的存在数据和环境因素之间的相关性,通过一定的算法来推算物种的生态需求,从而预测物种的潜在分布区<sup>[5]</sup>。最大熵模型(MaxEnt)将物种和其环境因素看成一个系统,计算该系统具有最大熵时的状态参数,从而推测物种的潜在分布区<sup>[6-7]</sup>。最大熵模型自构建以来,对海洋、陆地、荒漠生态系统的大量动植物物种进行了广泛的预测。结果表明其预测出的潜在分布区结果较准确,并能在存在数据相对较少的情况下获得较准确的信息,因而广泛应用于濒危物种保护、入侵物种防御等方面<sup>[8]</sup>。在荒漠区植物的研究中,张华等人运用最大熵模型预测了气候变化对干旱区胡杨潜在分布区的影响<sup>[9]</sup>,塞依丁等人运用最大熵模型预测了人类活动和气候变化背景下干旱区沙拐枣的潜在分布区的变化特征<sup>[10]</sup>。最大熵预测结果与实际情况较接近,获得了良好的效果<sup>[9-10]</sup>。

近年来,大量的研究报道指出,随着气候变化和人类活动的不断加剧,全球荒漠化进程显著加快,预计到21世纪末,全球旱地面积将达到陆地总面积的56%,而且旱地扩张以发展中国家为主<sup>[11]</sup>。骆驼刺是一种耐干旱、耐高温、耐贫瘠的典型的荒漠植物,它是我国干旱区的荒漠和戈壁上的优势物种,对维护干旱区生态平衡、防止沙漠扩张发挥着至关重要的作用<sup>[12]</sup>。骆驼刺对干旱环境具有极强的适应性<sup>[13]</sup>,因而在旱地面积扩张的背景下,骆驼刺的适宜生境应当显著扩张。然而,杨霞等人2017年已对骆驼刺气候变化背景下的潜在分

布区进行了预测,该研究表明,气候变化使得骆驼刺的适宜生境显著收缩<sup>[14]</sup>。值得注意的是,该研究用了 19 个生物气候变量对骆驼刺的潜在分布区进行预测,且未来气候情景运用国际耦合模式比较计划的第五阶段 (Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5) 的 RCP2.6 和 RCP8.5 情景进行,模型运算时也未进行优化,因此模型预测结果有可能出现偏差。由于模型所用的环境因素及模型参数对模型预测结果具有重要的影响,近年来,涌现出大量对 MaxEnt 模型进行优化校准的文献资料,试图提高模型预测的准确度与精确度<sup>[15]</sup>。2020 年,CMIP6 的生物气候因素数据公布,CMIP6 是目前参与的模式数量最多、设计的科学试验最为完善、所提供的模拟数据最为庞大的一次<sup>[16-17]</sup>。CMIP6 充分利用上世纪末气候反转的因素,使得该气候变化模型在未来预测时更加贴合实际<sup>[18-19]</sup>。四个共享社会经济路径情景 (SSPs: 126, 245, 370, 585) 也给模型预测带来了新鲜血液。且众多研究指出,人类活动是造成骆驼刺生境被破坏的重要原因<sup>[12,20]</sup>,故本研究预将人类活动强度的影响加入模型。相信新的环境数据的加入将对模型预测结果产生重要的影响。综上所述,本研究预对 CMIP6 的未来气候情景和人类活动情景下骆驼刺的潜在分布区进行预测。以揭示骆驼刺的潜在分布区的变化特征及其影响因素,确定其是否适合成为我国荒漠化防治的优良物种。

## 1 材料与方法

### 1.1 骆驼刺分布数据来源

为了获得骆驼刺详细的经纬度分布数据,通过查阅文献及全球生物多样性信息平台 (GBIF, [www.gbif.org](http://www.gbif.org)), 中国数字植物标本馆 (CVH, <http://v5.cvh.org.cn/>), 国家标本平台 (NSII, <http://www.nsii.org.cn/>) 等网站,运用 googleearth 软件推演标本位置的经纬度坐标。结合实地调查,获得了 90 个骆驼刺的发生数据。为了防止物种分布数据空间自相关带来的影响,并匹配 2.5 arc-minutes 分辨率的气候数据,本研究在直径 5 km 范围内仅保留一个数据点<sup>[21]</sup>,最终获得 61 个骆驼刺发生点坐标 (图 1),用于最大熵模型的构建。

### 1.2 环境数据的来源与筛选

19 个生物气候变量及 1 个高程数据,被认为是影响物种潜在分布区最重要的环境因子,常常用于生态位模型的构建<sup>[22]</sup>。分辨率为 2.5 arc-minutes 的 19 个生物气候变量 (bio1—bio19) 和高程数据 (elev) 来源于 WorldClim2.0 数据库。为了避免环境因子的多重共线性产生的过拟合现象,通过综合分析环境因子贡献率、环境因子间的相关性及环境因子的生态学意义,对 19 个生物气候因子进行筛选<sup>[23]</sup>。剔除相关系数高于 0.8,且贡献率相对较小的环境因子<sup>[22]</sup>,最后筛选出 6 个优化的环境因子用于建模。

针对未来气候因素,从 WorldClim 2.0 数据集中下载国家气候中心的气候系统模型 (BCC-CSM2-MR)<sup>[16-17]</sup>,CMIP6 下的四个共享社会经济路径 (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)。SSP126 代表低辐射强迫情景,SSP245 代表中等稳定情景;SSP370 代表中高端强迫情景,SSP585 代表高强迫情景<sup>[24]</sup>。本文欲展示不同时期骆驼刺潜在分布区的变化规律及其质心转移特点,故下载了 2021—2040, 2041—2060, 2061—2080, 2081—2100 四个时期的 19 个生物气候因子的栅格数据,提取出与当代对应的 6 个优化的生物气候因子用于构建模型。

人类活动强度数据来源于国际地球科学信息网络中心 (CIESIN) 的人类足迹 (human footprint) 数据层。该数据集由 9 个数据层创建而成,涵盖人口密度、人类土地利用和基础设施建设 (建筑区、夜间灯光、土地利用/土地覆盖) 和人类访问 (海岸线、公路、铁路、河流通航) 等方面。能够客观、全面地反映人类活动强度及其空间分布<sup>[25]</sup>。该数据为 Esri.Grid 格式,将该数据置入 ArcGis10.0 软件中,经过坐标变换、裁剪、配准、格式转

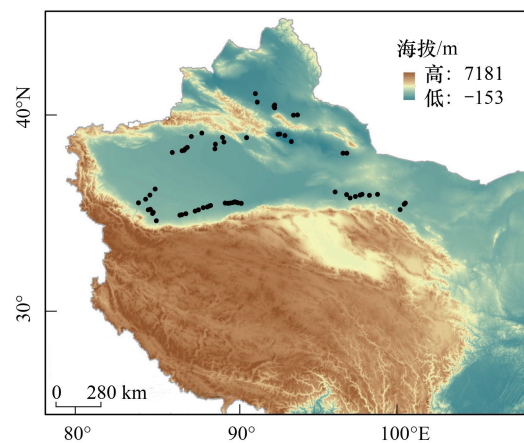


图 1 骆驼刺发生点记录

Fig.1 Occurrence records of *A. sparsifolia*



换等工作,使其与生物气候因子格式一致,用于 MaxEnt 模型的构建。

### 1.3 最大熵模型的优化、建立及评价

运用 R3.6.3 软件的“kuenm”包优化 Maxent 模型参数,其中倍频( regularization multiplier, RM)从 0.5 到 4 (增量 0.5),特征组合(feature classes, FC)采用以下组合(L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT, 其中 L:线性, Q:二次, H:铰链, P:积, T:阈值)<sup>[9]</sup>;运用“kuenm”包对以上参数组合进行测试,通过 Akaike 信息量准则的 delta AICc 值评估模型的拟合度及复杂度,选择 delta AICc 最小的参数组合用于模型构建<sup>[26]</sup>,并运用受试者特征曲线(Receiver Operating Characteristic curve, ROC)下面积(AUC 值)评价和验证模型结果的准确性<sup>[19]</sup>,AUC 值小于 0.6 表示模型失败,0.6—0.7 较差,0.7—0.8 公平,0.8—0.9 良好,大于 0.9 优秀<sup>[27]</sup>。最后将骆驼刺发生点的数据和优化后的环境因子导入 MaxEnt 模型中,运用优化后的模型参数组合,重复运行 10 次,获得骆驼刺当代潜在分布区预测结果。进行 ROC 检验,并运用刀切法获得环境因子贡献率。将预测结果置入 ArcGis10.8 软件中进行重分类,训练灵敏度加特异度的阈值被认为是一种更稳健的划分物种存在与否的方法<sup>[28]</sup>,本研究的 10 次模型预测结果的训练灵敏度加特异度的阈值为  $0.19 \pm 0.06$ ,故本研究将骆驼刺分布区划分为四个适生等级:非适生区(0—0.2),低适生区(0.2—0.4),中适生区(0.4—0.6),高适生区(0.6—1)。最后用 ArcGis10.8 对预测结果进行可视化展示。

未来气候条件下和人类活动条件下骆驼刺潜在分布区预测的数据处理与建模方法与当前气候条件的方法一致。

### 1.4 基于 CMIP6 未来气候情景的骆驼刺潜在分布区的变化及质心转移特点

将 Maxent 模型生成的 ASC II 文件导入 ArcGis10.8 软件,转换成栅格数据后,计算出不同适生等级的骆驼刺分布区在未来不同的情景下与当代发生的面积变化,运用 ArcGis10.8 软件的 SDM 工具包比较未来与当代情景下适生区的变化区域与范围,获得骆驼刺在未来的扩张和收缩面积及地理位置。并以 0.2 为阈值,将其转化成二进制数据,运用 SDM 工具箱计算适生区的质心的位置及其变化方向。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物气候因子的优化及模型精度检验

通过 ROC 检验,模型 AUC 值均大于 0.9(图 2),说明模型预测的准确性极高。

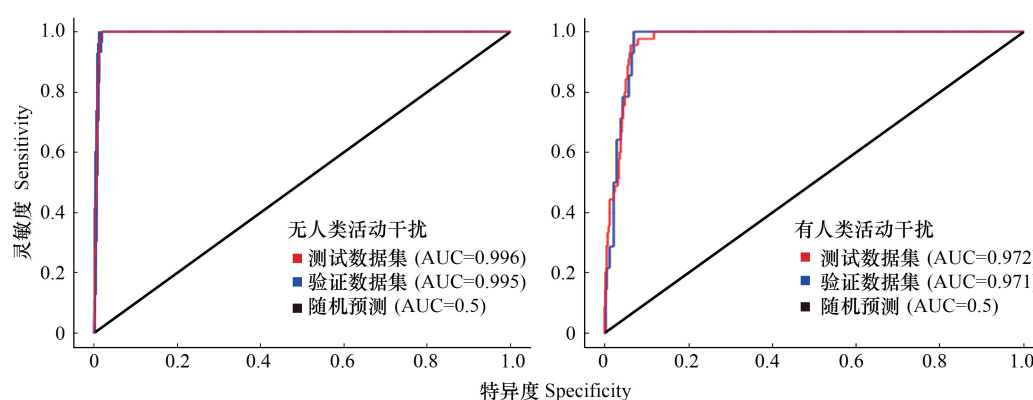


图 2 有无人类活动干扰下,模型预测结果的 ROC 检验

Fig.2 ROC curve and AUC values of the MaxEnt model without or without human disturbance

刀切法的结果表明,无人类活动条件下,年降水量对骆驼刺潜在分布区的贡献最高,达 30.4%;最冷季度平均温次之,达 22.5%;平均气温日较差、年均温和温度季节性的贡献率相仿,分别为 16.4%、16.1%和 12.7%。降水的季节性和高程的贡献率最小,为 1.1%和 0.9%(表 1)。有人类活动条件下,年降水量、人类活动强度、



高程是影响骆驼刺分布的最重要因素,其贡献率分别为:63.8%、17.4%和 13.7%。

表 1 建模的生物气候因子的相对贡献率排序  
Table 1 Relative contributions of variables for modeling

| 环境因子<br>Environmental code | 单位<br>Unit | 无人类活动时的相对贡献率/%<br>Relative contribution without<br>human disturbance | 有人类活动时的相对贡献率/%<br>Relative contribution with<br>human disturbance |
|----------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Bio12                      | mm         | 30.4                                                                 | 63.8                                                              |
| Bio11                      | ℃          | 22.5                                                                 | 0.0                                                               |
| Bio2                       | ℃          | 16.4                                                                 | 3.8                                                               |
| Bio1                       | ℃          | 16.1                                                                 | 0.2                                                               |
| Bio4                       | —          | 12.7                                                                 | 0.1                                                               |
| Bio15                      | —          | 1.1                                                                  | 0.9                                                               |
| Elev                       | m          | 0.9                                                                  | 13.7                                                              |
| Hf                         | —          | 0.0                                                                  | 17.4                                                              |

Bio1:年均温 Annual Mean Temperature; Bio2:平均气温日较差 Mean Diurnal Range; Bio4:温度季节性 Temperature Seasonality; Bio11:最冷季度平均温 Mean Temperature of Coldest Quarter; Bio12:年降水量 Annual Precipitation; Bio15:降水的季节性 Precipitation Seasonality; Elev: 高程 Elevation; Hf:人类活动强度 Human Footprint

2.2 当代骆驼刺的适宜生境分布

无人类活动干扰的情景下,骆驼刺的潜在分布区主要位于新疆维吾尔自治区大部分地区,甘肃省北部,内蒙古自治区西部及青海省北部地区(图 3)。高适生区主要在新疆南部地区。高适生区约 40.06 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 30.28%。中适生区面积约 46.67 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 35.26%。低适生区面积约 45.56 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 34.44%(表 2)。人类活动干扰大大降低了骆驼刺的适生区,且适生区呈现破碎化状态(图 3)。适生区以新疆为主,甘肃省北部和内蒙古西北部也有分布,青海省为非适生区。高适生区仅 10.90 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 15.28%。中适生区面积约 26.76 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 37.53%。低适生区面积约 33.65 万 km<sup>2</sup>,占总适生区的 47.19%(表 2)。

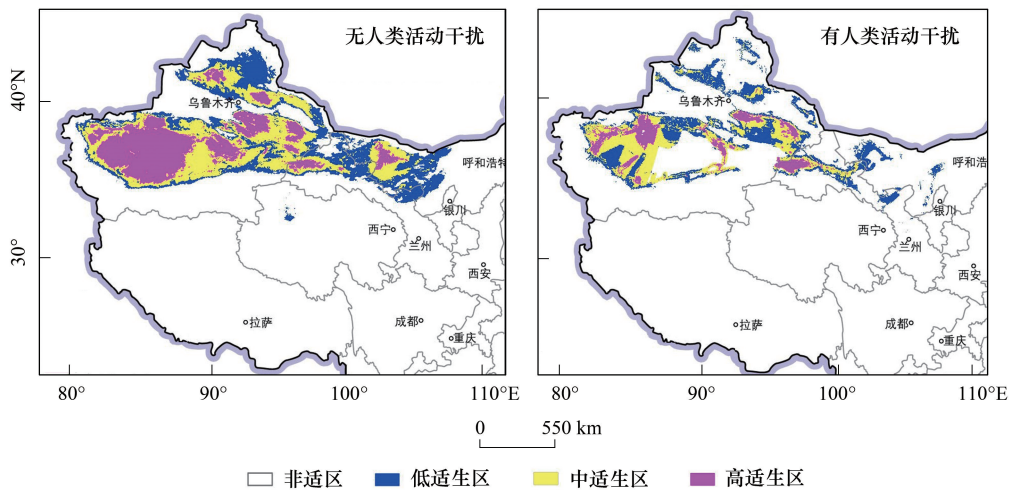


图 3 有、无人类活动干扰下,当代骆驼刺不同等级的潜在分布区

Fig.3 The potential distribution areas of different grades of *A. sparsifolia* in current

2.3 影响骆驼刺潜在适宜分布的生物气候因子分析

根据环境因子响应曲线(图 4),骆驼刺适生区的生物气候因子阈值为:年均温 5.9—15.2 ℃,平均气温日较差大于 13.4 ℃,温度季节变化 106—161,最冷季度平均温-12.3—-0.2 ℃,年降水量 18—145 mm,降水的季

节性 38—118。骆驼刺高适生区的范围很窄,在年均温 9.8—12.2 ℃,平均气温日较差大于 15.9 ℃,温度季节性变化 1175—1281,最冷极度平均温度-6.9—-4.0 ℃,降水量 30—49 mm,降水的季节性 69—90 的区域。

表 2 不同等级的适生区面积及占总适生区面积的百分比

Table 2 The area of different grades and its percentage in the total suitable area

|                         | 无人类活动干扰 Without human disturbance    |               | 有人类活动干扰 With human disturbance       |               |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
|                         | 面积 Areas/ $\times 10^4 \text{ km}^2$ | 百分比 Percent/% | 面积 Areas/ $\times 10^4 \text{ km}^2$ | 百分比 Percent/% |
| 非适生区 Not suitability    | 831.12                               | 0             | 892.09                               | 0             |
| 低适生区 Low suitability    | 45.56                                | 34.44         | 33.65                                | 47.19         |
| 中适生区 Middle suitability | 46.67                                | 35.26         | 26.76                                | 37.53         |
| 高适生区 High suitability   | 40.06                                | 30.28         | 10.90                                | 15.28         |

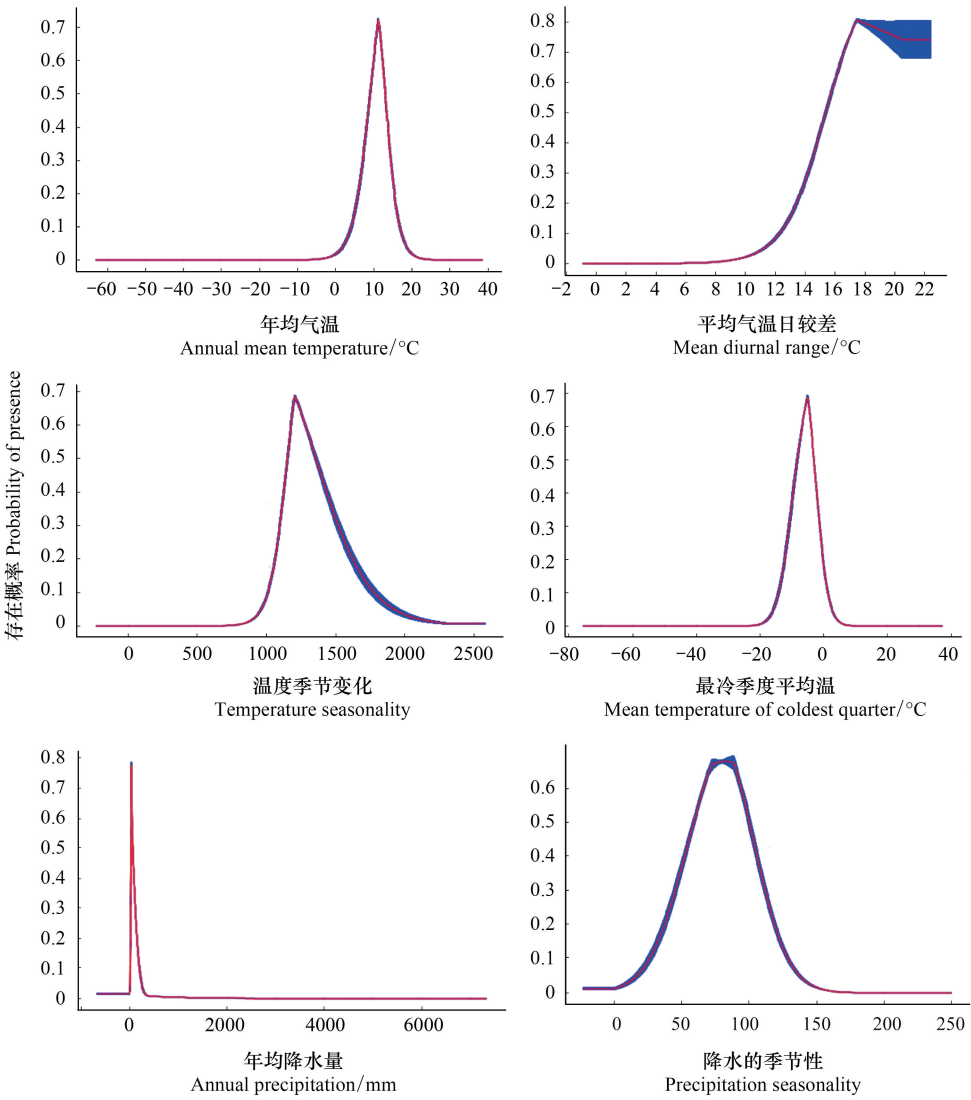


图 4 骆驼刺的环境因子响应曲线

Fig.4 Response curves for the probability of presence for *A. spasiifolia*

红线显示模型运行 10 次获得的平均值,蓝色的边界表示 10 次运算的标准差(SD)

2.4 CMIP6 情景下,未来四个时段骆驼刺不同等级的适生区面积变化

四个共享社会经济路径下,骆驼刺各适生等级的面积变化趋势基本一致。高适生区面积显著增加,低适

生区和中适生区面积减少(图5)。低强迫情景下,适生区面积几乎不随时间推移发生显著变化。而中高强迫情景和高强迫情景下,骆驼刺的低适生区面积随时间推移显著下降,而高适生区面积随时间推移显著增加(图5)。

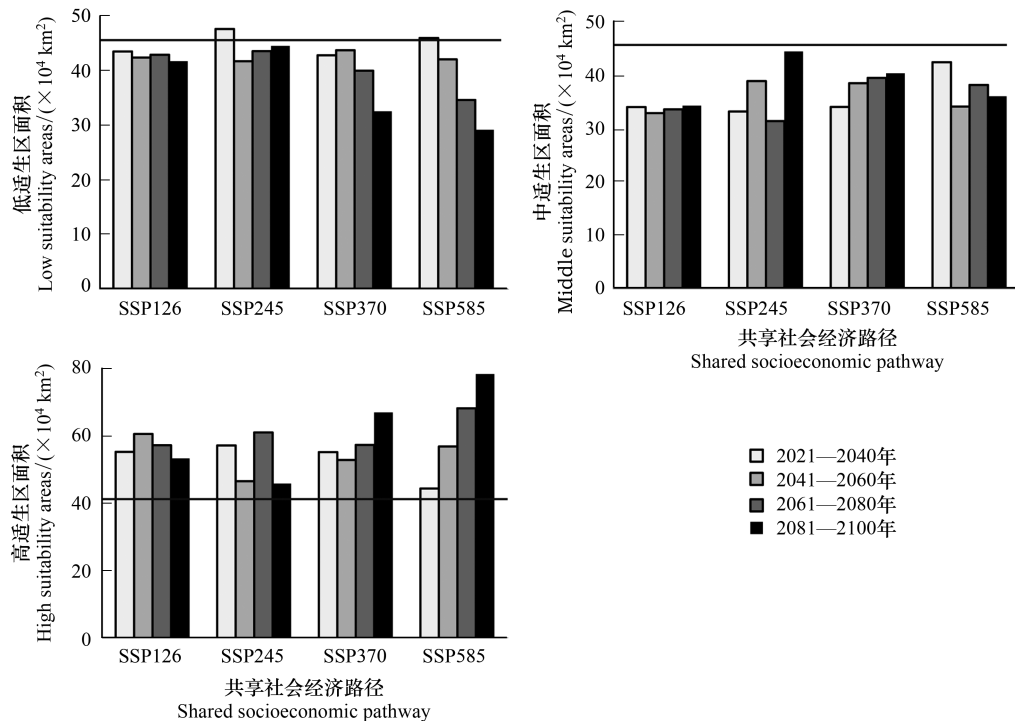


图5 四个共享社会经济路径(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)下,未来四个时间段,骆驼刺在我国各适生等级的面积变化

Fig.5 Under four shared socio-economic paths (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585), the area change of *A. sparsifolia* in each suitable level in China in the future four time periods

黑线表示当代骆驼刺的面积

## 2.5 CMIP6 未来气候情景下,骆驼刺适生区的变化范围及质心转移特征

在 SSP126 情景下,2080 之前的三个年代与当代相比,骆驼刺的适生区呈显著的增加趋势,而 2081—2100 年骆驼刺的适生区却显著下降。四个时间段的变化区域基本一致,扩张区主要位于青海省北部、甘肃省北部及内蒙古西北部地区,收缩区主要在内蒙古中西部地区,适生区的边缘。随时间推移,质心逐渐向西转移(图6)。

在 SSP245 情景下,随时间推移,骆驼刺的适生区呈现先增加后减少再增加的趋势。质心转移方向也呈现先东后西再转东的不规则变化特点。与当代相比,2041—2060 年,骆驼刺在内蒙古的潜在适生区发生了大面积的收缩。而其他年代,骆驼刺的适生区以扩张为主,最显著的扩张区域为青海省北部和内蒙古的西北部(图7)。

在 SSP370 情景下,随时间推移,骆驼刺的适生区逐渐增加。骆驼刺向新疆北部、青海省北部及内蒙古西北部扩张。收缩区域仍以内蒙古中西部、骆驼刺适生区边缘为主。质心向西逐渐转移(图8)。

在 SSP585 情景下,骆驼刺的适生区逐渐增加,扩张区域仍旧以青海省北部、内蒙古西北部为主,新疆北部亦有较大面积的扩张,收缩区域仍旧以内蒙古中西部、骆驼刺适生区边缘为主。质心向西转移(图9)。

## 3 讨论

### 3.1 骆驼刺在当代的潜在适生区及关键的影响因素分析

年降水量是影响骆驼刺分布的最重要的生物气候因子,在有人类活动干扰的情况下,其影响作用更显著,



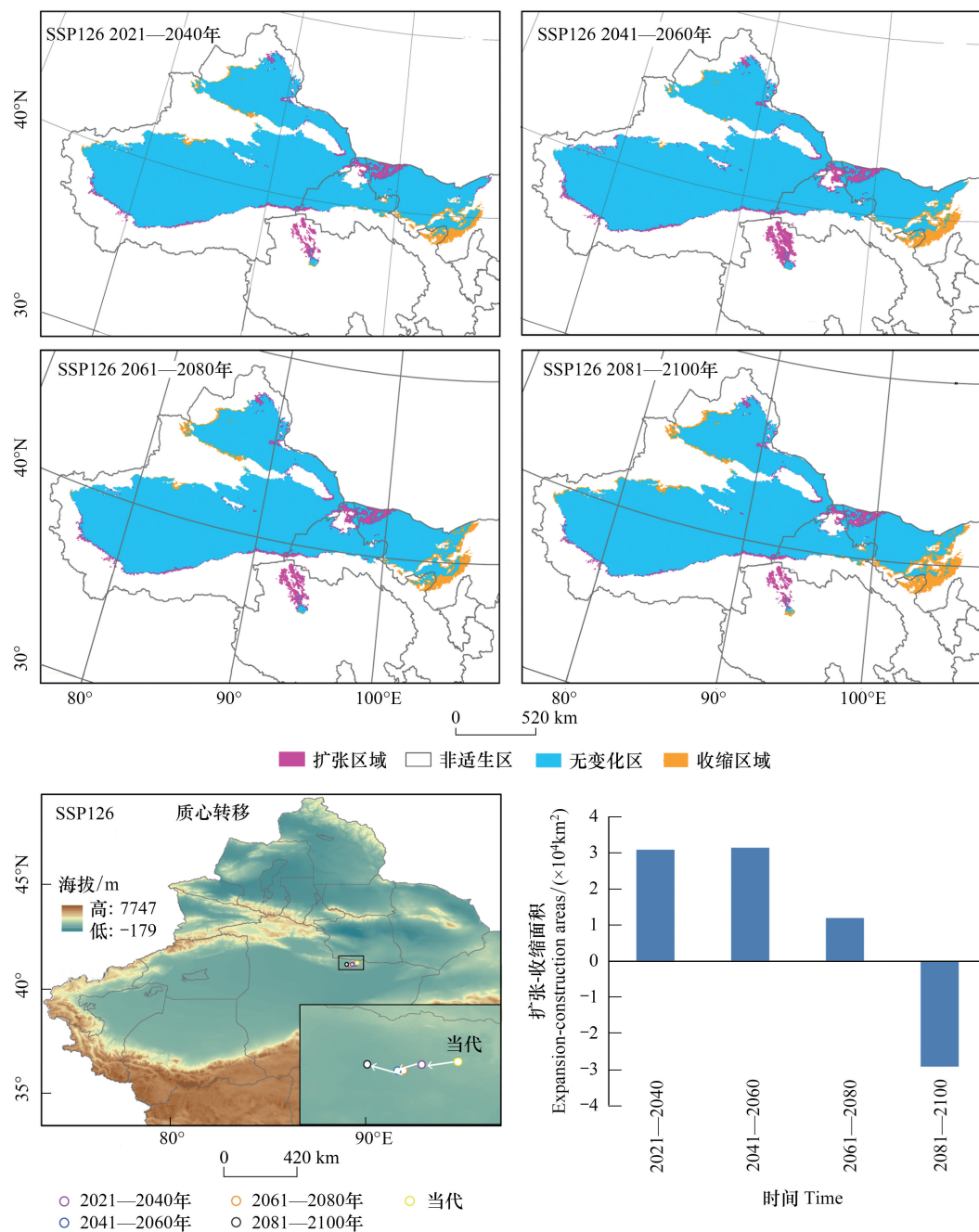


图6 SSP126 情景下,4 个时间段(2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100)与当代相比,骆驼刺适生区的变化范围及质心转移路径

Fig.6 The variation range and centroid distribution transfer of fitness areas between four future periods (2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100) and current under SSP126 scenario for *A. sparsifolia*

质心转移路径用白色箭头的线表示。柱状图显示扩张区与收缩区的面积差

年降水量、人类活动强度和高程对骆驼刺分布区的贡献率达 94.9%。值得注意的是,骆驼刺适生区的年降水量范围非常狭窄,在 18—145 mm 范围内,高适生区的年降水量范围仅 30—49 mm,如此低的降水范围内,其它物种往往很难生存。所以在年降水量低于 36 mm 的塔克拉玛干沙漠南缘和吐鄯托盆地,骆驼刺能够形成单种群群落。而在塔克拉玛干沙漠腹地,骆驼刺不能生存的环境下,便是寸草不生的沙漠。人类活动强度很好地勾画出了干旱区寸草不生的沙漠腹地。从模型结果来看,人类活动干扰大大降低了骆驼刺的潜在适生区面

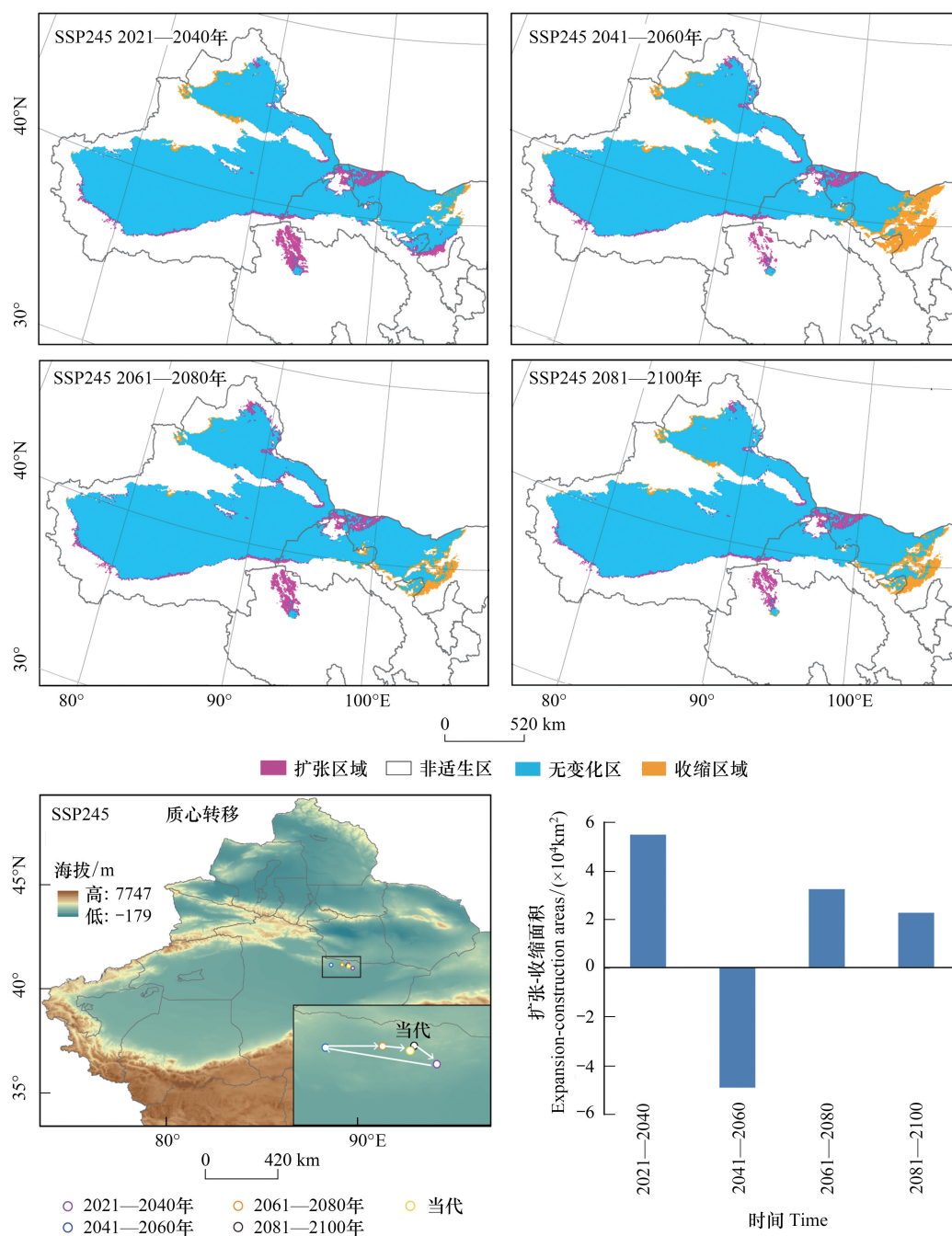


图7 SSP245 情景下,4 个时间段(2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100)与当代相比,骆驼刺的中、高适生区的变化范围及质心转移路径

Fig.7 The variation range and centroid distribution transfer of fitness areas between four future periods (2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100) and current under SSP245 scenario for *A. sparsifolia*

质心转移路径用白色箭头的线表示;柱状图显示扩张区与收缩区的面积差

积,使其适宜生境碎裂化。这一现象有两个主要成因:一、人迹罕至的沙漠腹地寸草不生,只有在沙漠边缘的绿洲地带有植被覆盖,此处也为人类活动相对频繁的地带,因此加入人类活动强度使模型结果更合理。MaxEnt 模型虽然是众多生态位模型中相对准确的一种,然而模型的模拟结果往往会比实际面积偏大<sup>[29]</sup>,这与模型选取的环境变量关系很大,正如本研究中加入人类活动强度因素之后,适生区面积显著减小。对照中国植被地图,发现仅用生物气候因素和海拔因素预测的适生区内有大面积无植被区域,但该预测结果仍旧有

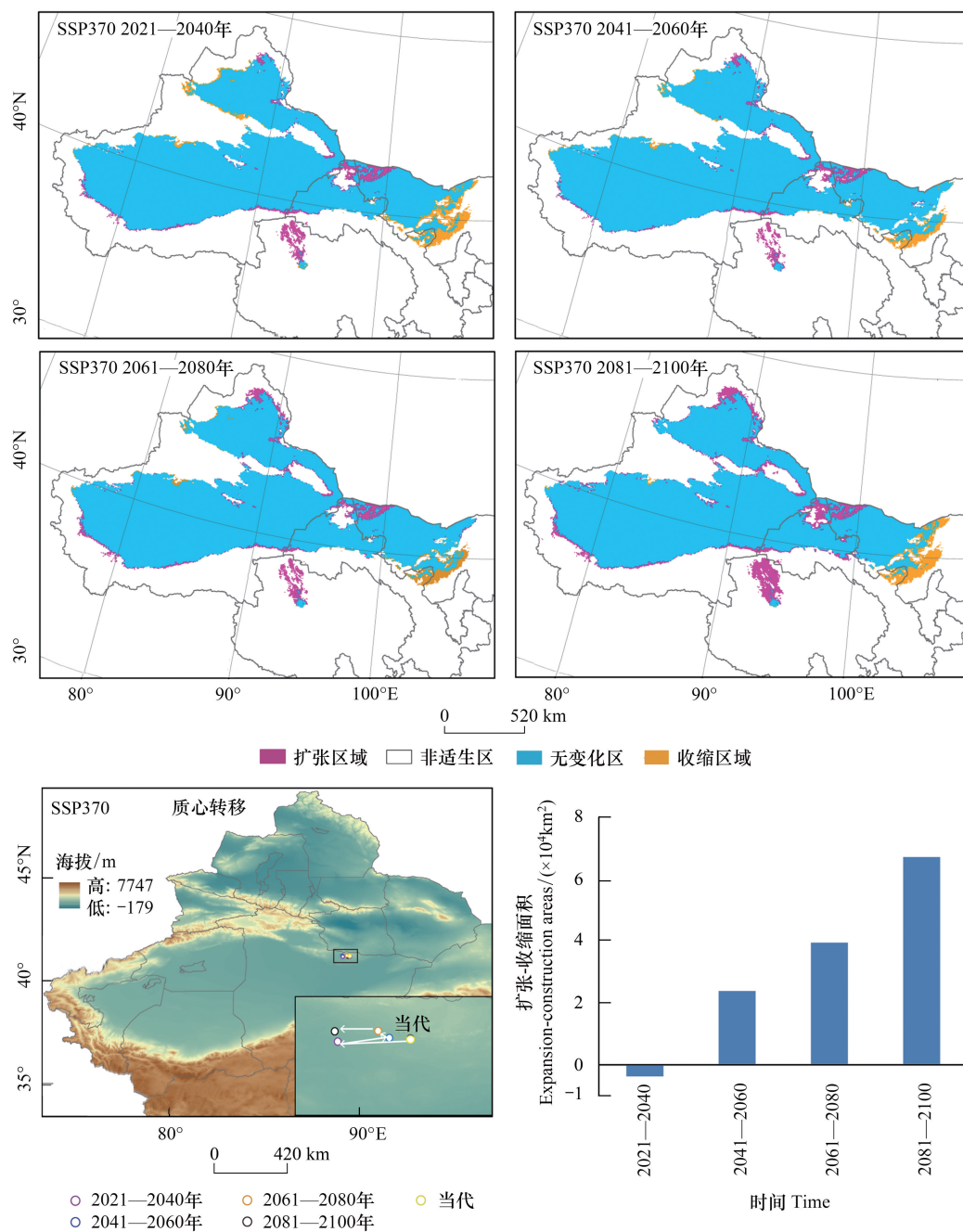


图8 SSP370情景下,4个时间段(2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100)与当代相比,骆驼刺的中、高适生区的变化范围及质心转移路径

Fig.8 The variation range and centroid distribution transfer of fitness areas between four future periods (2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100) and current under SSP370 scenario for *A. sparsifolia*

质心转移路径用白色箭头的线表示;柱状图显示扩张区与收缩区的面积差

很重要的指导意义。因为在广阔的无植被区域,其气候条件适宜骆驼刺的生长,可选用骆驼刺作为该区域的沙漠化防治、或沙漠公路保护的优良植被。二、人为因素,如人口压力、土地利用方式的转变、基础设施建设等均会对骆驼刺的分布产生重要的负面影响,可能造成骆驼刺适宜生境的丧失。研究指出,人类大量开采地下水造成地下水位下降,严重影响了骆驼刺的生存及自然更新<sup>[12]</sup>。且开荒种地直接造成骆驼刺栖息地减少或丧失。前人对于干旱区沙拐枣的研究也得出相似的结论<sup>[10]</sup>,说明干旱区人类活动可能对当地物种的适宜生境

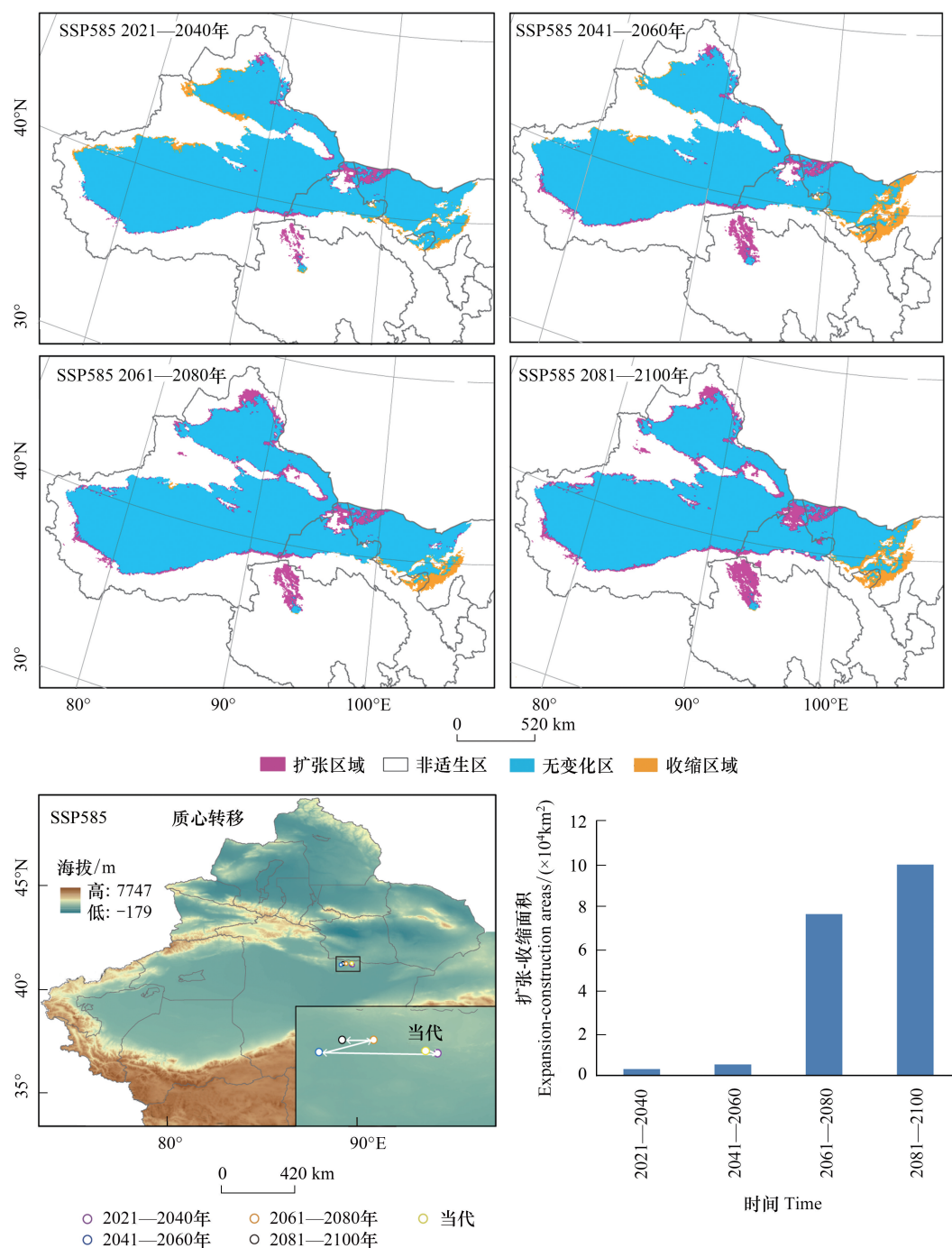


图9 SSP585情景下,4个时间段(2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100)与当代相比,骆驼刺的中、高适生区的变化范围及质心转移路径

Fig.9 The variation range and centroid distribution transfer of fitness areas between four future periods (2021—2040,2041—2060,2061—2080,2081—2100) and current under SSP585 scenario for *A. sparsifolia*

质心转移路径用白色箭头的线表示;柱状图显示扩张区与收缩区的面积差

造成了显著的负面影响。因此在该区域的物种保护及合理开发的过程中,一定要密切关注人类活动的影响。

除去年降水量和人为因素的影响以外,最冷季度平均温、年均温、降水的季节性、温度日较差均是影响骆驼刺生存的重要原因,其中以最冷季节平均温影响最为显著。温度决定了植物的物候和生活史类型,同时直



接影响植物生理生化过程。我国西北干旱区位于高纬度地区,此处植被类型主要为落叶乔灌木、多年生草本和一年生草本植物为主,生长季主要在 4—10 月<sup>[30]</sup>。在寒冷的冬季到来之前,骆驼刺的地上部分全部死亡,靠地下芽越冬<sup>[20,31]</sup>。因此最冷季度平均温并未直接影响骆驼刺的生长,而可能决定骆驼刺的物候期,从而对其分布产生重要的影响。温度日较差大是荒漠和戈壁地区的显著特点,在极端干旱区,部分植物的叶片能够直接吸收微量降水或昼夜温差导致的微量雾水或露水,作为水分补给<sup>[32]</sup>。有研究表明,在空气水分较为充足、辐射较弱的清晨,骆驼刺的气孔全部张开,表现出高光合、高蒸腾的特征,而在炎热的午后,骆驼刺气孔导度明显下降,光合作用速率和蒸腾作用降到最低。骆驼刺在夜间能够获得相对充足的水分补给,从而在整个生育期内,没有表现出显著的水分亏缺<sup>[33]</sup>。因此虽然降水对骆驼刺分布起最重要的作用,但是温度范围及温度日较差对骆驼刺的生存依然起到不可忽视的作用。

### 3.2 CMIP6 情景下骆驼刺未来分布区的变化特点

骆驼刺是一种典型的荒漠植物,具有耐高温、耐旱、耐盐的特性,其生态适应性强,因而可以形成荒漠生态系统的优势种<sup>[12-13,31-34]</sup>。在未来气候变化情景下,骆驼刺显著的扩张,其扩张方向主要是高海拔的青海省北部地区和高纬度的新疆北部及内蒙古西北部地区。据预测,荒漠植物蒙古沙拐枣与骆驼刺在气候变化情景下具有类似的规律,它们会逐渐向高纬度和高海拔地区扩张但可以保留当代栖息地。然而张华等对胡杨潜在分布区的研究结果表明,在未来气候变化的条件下,胡杨将逐渐丧失中、低纬度的栖息地,而向高纬度栖息地转移<sup>[9]</sup>。对干旱区裸果木的研究发现,在气候变化情景下,裸果木也会逐渐丧失现有栖息地,而向水分相对充裕的地区转移<sup>[35]</sup>。众多研究指出,在未来气候情景下,大多植被将向高纬度和高海拔地区转移或扩散,然而地处高纬度地区的干旱区由于降水匮乏并不能成为众多物种的适宜生境<sup>[36]</sup>。因此耐高温、耐干旱、耐贫瘠的骆驼刺、沙拐枣等植被将是荒漠生态系统最重要的捍卫者。

本研究主要研究生物气候因素、海拔和人类活动强度对骆驼刺适生区的影响,并未考虑地下水、土壤因素、植物与环境的相互作用等方面的因素。这些因素对植物的适生区范围也具有重要的影响作用,因此今后的研究应将更多因素纳入模型,以期对骆驼刺资源的保护和开发提供更有价值的理论支持。且未来气候仅使用了 BCC-CSM2-MR 模式下的数据,而在 CMIP6 情景下,具有多种不同的气候模式,且各有偏重。今后的研究应关注不同气候模式下,物种适生区的变迁,以获得更有价值的预测结果。

## 4 结论

不同的环境因素对最大熵模型的预测结果具有影响。在仅考虑生物气候因素和海拔因素的情况下,骆驼刺的适生区覆盖我国西北干旱区的大部分面积。而在加入人类活动强度因素之后,骆驼刺适生区面积显著下降至 71.31 万 km<sup>2</sup>,且呈现出破碎化状态。这种下降一方面是环境因子对模型预测结果的影响,另一方面是人为因素干扰了骆驼刺的生存,使其适生区面积显著下降。无论是否包含人为因素的影响,年降水量始终是影响骆驼刺分布的最重要因素,骆驼刺适生区的年降水量范围较窄,为 18—145 mm。在未来气候情景下,骆驼刺的适生区显著扩张,主要向高海拔的青海北部、高纬度的新疆北部以及内蒙古西北部发展。骆驼刺具有耐高温、耐干旱、耐贫瘠的特点,其在气候变化条件下依然能够在西北干旱区生存,因而可将其作为防沙治沙的优良品种进行保护与开发。

### 参考文献 (References):

- [1] Liu J G, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S X. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 1258832.
- [2] Fei S L, Desprez J M, Potter K M, Jo I, Knott J A, Oswalt C M. Divergence of species responses to climate change. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1603055.
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [4] Sun J J, Feng L, Wang T L, Tian X N, He X, Xia H, Wang W F. Predicting the potential habitat of three endangered species of *Carpinus genus* under climate change and human activity. *Forest*, 2021, 12(9): 1216.

- [5] Radosavljevic A, Anderson R P. Making better MAXENT models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(4): 629-643.
- [6] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning. Banff: ACM, 2004: 655-662.
- [7] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [8] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. *生物学通报*, 2015, 50(11): 9-12.
- [9] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [10] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 李雪萍, 邵华, 阿尔曼·解思斯, 阿腾古丽. 气候变化及人类活动对蒙古沙拐枣分布格局的影响. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1450-1458.
- [11] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [12] 曾凡江, 张希明, 李小明. 骆驼刺植被及其资源保护与开发的意义. *干旱区地理*, 2002, 25(3): 286-288.
- [13] Yin H, Zheng H W, Zhang B, Tariq A, Lv G H, Zeng F J, Graciano C. Stoichiometry of C: N: P in the roots of *Alhagi sparsifolia* is more sensitive to soil nutrients than aboveground organs. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 698961.
- [14] 杨霞, 郑江华, 穆晨, 林峻. 气候变化下骆驼刺潜在地理分布区预测. *中国中药杂志*, 2017, 42(3): 450-455.
- [15] Araújo M B, Anderson R P, Barbosa A M, Beale C M, Dormann C F, Early R, Garcia R A, Guisan A, Maiorano L, Naimi B, O'Hara R B, Zimmermann N E, Rahbek C. Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaat4858.
- [16] Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, Xin X G, Li L, Li W P, Jie W H, Zhang J, Liu Y M, Zhang L, Zhang F, Zhang Y W, Wu F H, Li J L, Chu M, Wang Z Z, Shi X L, Liu X W, Wei M, Huang A N, Zhang Y C, Liu X H. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1573-1600.
- [17] Zhu H H, Jiang Z H, Li L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [18] Gillard M, Thiébaud G, Deleu C, Leroy B. Present and future distribution of three aquatic plants taxa across the world: decrease in native and increase in invasive ranges. *Biological Invasions*, 2017, 19(7): 2159-2170.
- [19] Ahmad R, Khuroo A A, Hamid M, Charles B, Rashid I. Predicting invasion potential and niche dynamics of *Parthenium hysterophorus* (*Congress grass*) in India under projected climate change. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(8): 2319-2344.
- [20] 曾凡江, 郭海峰, 刘波, 曾杰, 张晓蕾. 疏叶骆驼刺幼苗根系生态学特性对水分处理的响应. *干旱区研究*, 2009, 26(6): 852-858.
- [21] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [22] Dan L W, 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.
- [23] Dormann C F, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz J R G, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P J, Münkemüller T, McClean C, Osborne P E, Reineking B, Schröder B, Skidmore A K, Zurell D, Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 2013, 36(1): 27-46.
- [24] Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, Taylor K E. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [25] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The Human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891-904.
- [26] 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.
- [27] Walden-Schreiner C, Leung Y F, Kuhn T, Newburger T, Tsai W L. Environmental and managerial factors associated with pack stock distribution in high elevation meadows: case study from Yosemite National Park. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 52-63.
- [28] Meyer A L S, Pie M R, Passos F C. Assessing the exposure of lion tamarins (*Leontopithecus* spp.) to future climate change. *American Journal of Primatology*, 2014, 76(6): 551-562.
- [29] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [30] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001.
- [31] 金启宏. 疏叶骆驼刺种群性质与植物群落演替. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 255-260.
- [32] 陈林, 杨新国, 宋乃平, 杨明秀, 肖绪培, 王兴. 干旱半干旱地区植物叶片水分吸收性状. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2013, 39(5): 565-574.
- [33] 曾凡江, 李向义, 张希明, Foetzi A, Arndt S K. 新疆策勒绿洲外围四种多年生植物的水分生理特征. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2632-2638.
- [34] 尹辉, 张波, 荆瑞雪, 曾凡江, 牟书勇. 干旱区不同地理种群骆驼刺元素组成及表面结构特征的对比研究. *生态学报*, 2019, 39(18): 6745-6752.
- [35] 张佳琦, 徐振朋, 宛涛, 蔡萍, 伊卫东. 未来气候条件下裸果木在中国的潜在分布区研究. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(3): 51-57.
- [36] 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子. *生态学报*, 2016, 36(14): 4475-4484.