

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.021

引用格式:何伟,方强恩,单麟茜,等.气候变化背景下特有种米蒿的分布格局及其空间迁移预测[J].草地学报,2026,34(1):217—230

HE Wei, FANG Qiang-en, SHAN Lin-qian, et al. Predicted Distribution Patterns and Spatial Shifts of the Endemic Species *Artemisia dalai-lamae* under Climate Change[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):217—230

气候变化背景下特有种米蒿的分布格局及其空间迁移预测

何伟,方强恩*,单麟茜,王彤,王振

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,
甘肃兰州730070)

摘要:为探究我国特有种米蒿(*Artemisia dalai-lamae*)的分布格局对未来气候变化的响应,本研究基于标本数据与环境变量数据,通过参数优化后的MaxEnt模型,预测当前及未来(2021—2060年)时期三种气候情景下米蒿的分布格局与质心变化趋势。结果表明:当模型调控倍率(Regularization multiplier, RM)为3,特征组合(Feature combination, FC)为线性加二次型加分段化(LQH)时,模型复杂度和过拟合程度最低,预测准确性高;影响米蒿分布的主要环境因子是海拔、年均降水量、暖季降水量和年平均气温;在当前气候条件下,米蒿的适生区面积为 $122.93 \times 10^4 \text{ km}^2$,最适分布区主要集中在祁连山和昆仑山东段之间;在未来气候条件下,米蒿的适生面积将显著缩减(最大降幅达43.2%),质心有向西北方向高纬度高海拔区域迁移的趋势,表明未来气候变暖将对米蒿生存构成极大威胁。

关键词:最大熵(MaxEnt)模型;气候变化;适生区;米蒿;特有种

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0217-14

Predicted Distribution Patterns and Spatial Shifts of the Endemic Species *Artemisia dalai-lamae* under Climate Change

HE Wei, FANG Qiang-en*, SHAN Lin-qian, WANG Tong, WANG Zhen

(College of Prataculture, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Prataculture Ecosystem of Ministry of Education/China-US
Research Center for Sustainable Development of Grassland Animal Husbandry, Lanzhou, Gausu Province 730070, China)

Abstract: To investigate the responses of distribution patterns of the endemic species *Artemisia dalai-lamae* in China to future climate change, this study utilized a parameter-optimized MaxEnt model with specimen data and environmental variables. The distribution patterns and centroid shifts of *A. dalai-lamae* under current and future (2021—2060) climate scenarios across three representative pathways were predicted. The results indicate that when the Regularization Multiplier (RM) was set to 3 and the Feature Combination (FC) configured as linear, quadratic and hinge (LQH), the model achieved the lowest complexity and overfitting while maintaining high predictive accuracy. The primary environmental factors influencing the distribution of *A. dalai-lamae* were elevation, annual precipitation, precipitation of warmest quarter, and annual mean temperature. Under current climate conditions, the suitable habitat area for *A. dalai-lamae* spans $122.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, with optimal distribution concentrated between the eastern sections of the Qilian and Kunlun Mountains. Under future climate scenarios, the suitable habitat area is projected to significantly decrease (with a maximum reduction of 43.2%), and the distribution centroid shows a northwestward shift toward higher latitudes and elevations.

收稿日期:2025-02-16;修回日期:2025-04-01

基金项目:甘肃省林草局草原生态修复治理科技支撑项目(GSLC-2020-3)(LCJ20210021);草业生态系统教育部重点实验室开放课题(KLGE202212)资助

作者简介:何伟(2001-),男,回族,浙江瑞安人,硕士研究生,主要从事草种质资源评价与利用研究,E-mail:863273202@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:fangqen@163.com

These findings suggest that future climate warming poses a severe threat to the survival of *A. dalai-lamae*.

Key words: MaxEnt model; Climate change; Suitable distribution area; *Artemisia dalai-lamae*; Endemic species

气候变化是影响生物多样性和物种分布的关键驱动力之一^[1]。根据气象数据,自20世纪末以来,全球平均气温上升了约1.1℃^[2]。随着全球变暖加剧,生态系统遭受了重大干扰,许多物种的原有适宜生存环境已不复存在^[3],迫使它们进行大规模迁移^[4],进而改变了它们的地理分布。多项研究表明,全球变暖导致物种的分布范围向极地或更高海拔地区转移,有些物种甚至面临灭绝的风险^[5]。Manes等人的研究指出,气候变化对特有物种的不利影响更为突出^[6]。为量化未来气候变化对物种分布的潜在影响,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)提出了共享社会经济路径(Shared socioeconomic pathways, SSPs)与典型浓度路径(Representative concentration pathways, RCPs)的耦合情景框架^[7]。该框架包括三种主要路径:SSP126(可持续发展路径)假设全球采取积极的气候减缓政策,温室气体排放量在2050年前后达到净零,辐射强迫稳定在 $2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,代表低排放情景;SSP370(区域竞争路径)下温室气体排放持续增加,辐射强迫达到 $7.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,代表中等排放情景;SSP585(化石燃料主导路径)的辐射强迫达到 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,代表高排放情景。这些情景涵盖了从低碳转型到高碳排放的多种可能,为评估气候变化对物种分布的潜在影响提供了全面的分析框架。因此,深入研究气候变化对特有物种栖息地及其分布范围的影响,对于识别限制物种分布的环境因素,预测物种分布模式,以及规划物种保护和资源的可持续利用具有极其重要的价值^[8-9]。

物种分布模型(Species distribution models, SDMs),也被称为生态位模型^[10],用于预测物种在地理空间中的分布情况,进而更深入地理解物种分布的规律^[11]。目前,物种生境适宜性评价模型主要包括生态位模型中气候包络模型(Bioclim)、广义线性模型(Generalized linear models, GLM)、生态位因子分析(Ecological niche factor analysis, ENFA)、随机森林模型(Random forest, RF)、最大熵模型(MaxEnt)等。MaxEnt模型利用最大熵原理来评估物种分布概率,是目前应用最为广泛的物种分布模型^[12]。MaxEnt模型具有预测精度高、模拟稳定、运行速度快等优势^[13],相较于其他生态位模型,在物

种样本数据量小、分布区环境变量不完整的情况下,该模型预测结果准确性和稳定性更高^[14]。因此被广泛的运用于物种潜在分布区预测^[15]、植物多样性保护^[16]、生物入侵评价^[17]等领域中。

米蒿(*Artemisia dalai-lamae*)是我国特有的菊科蒿属植物,仅分布在我国西北干旱区海拔1800~3200 m的干草原、半荒漠草原、盐碱地、干河谷、洪积扇等地^[18]。在这些特殊区域米蒿常作为伴生种或优势种存在,是荒漠化地区的重要先锋植物^[19]。米蒿生长速度快,抗逆性和适应性强,具有耐干旱、耐瘠薄、耐盐碱、耐践踏及抗土壤侵蚀的特性,同时具有较高的饲用和药用等经济价值^[20-21],在我国西北荒漠化综合治理方面具有很大的开发利用潜力。目前,有关米蒿的研究主要集中在群落特征及阻沙能力^[22]、抗逆性^[23]等方面,关于特有种米蒿栖息地适生分布格局以及未来气候变化对分布的影响目前尚不清楚。为此,本研究采用参数优化的MaxEnt模型和地理信息系统(Geographic information system, GIS),分析米蒿在当前和未来不同时期的地理分布,探讨其适生区空间分布的动态变化,剖析制约米蒿分布的主要气候因子,并分析其内在原因,以期为米蒿资源的保护和合理开发利用研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据

本研究的数据源自全球生物多样性信息数据库(Global biodiversity information facility, GBIF)、中国数字植物标本馆(Chinese virtual herbarium, CVH)、中国自然标本馆(Chinese field herbarium, CFH)以及植物智(<https://www.iplant.cn>)等平台获得的关于米蒿植物的标本信息,经过仔细整理、核对和筛选,排除描述模糊以及重复的信息,最终得到52个物种分布样点。利用奥维互动地图来确定52个物种分布样点的经纬度,将结果以物种名称、经度和纬度的格式储存在Excel数据库中。为了降低聚集效应引起的采样偏差对预测精度的影响,通过ENMTools工具剔除冗余数据,最终确定了47个有效的分布位点(图1),并保存为csv格式,用于后续模型构建和使用。

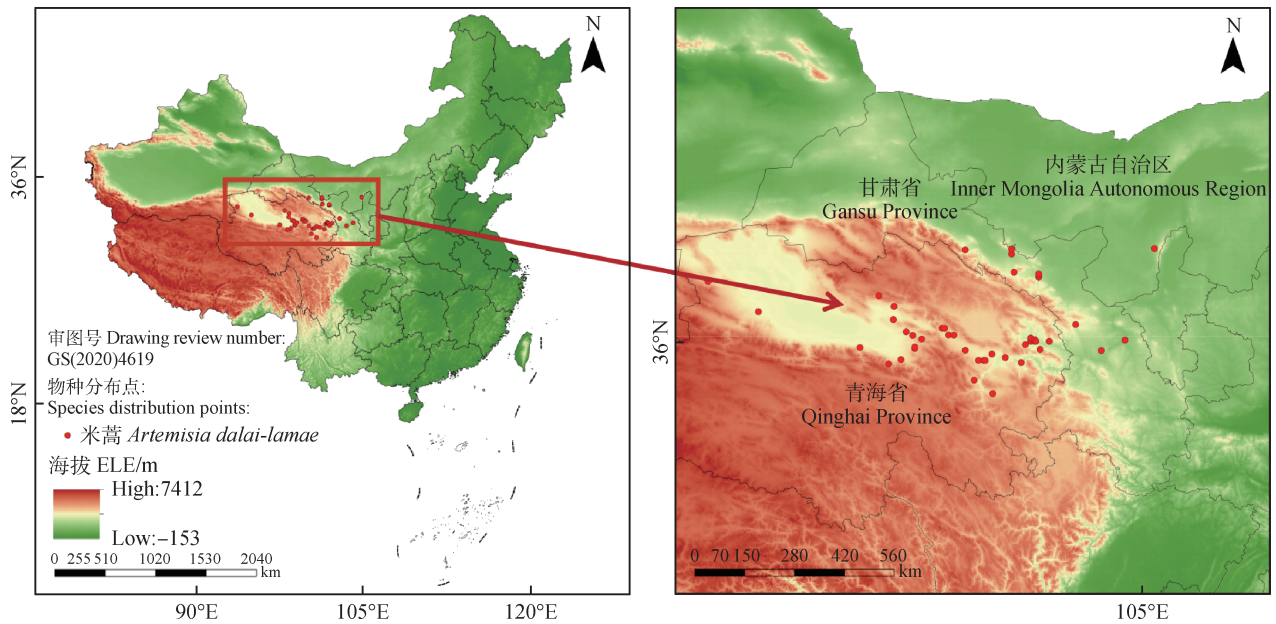


图1 米蒿采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of *Artemisia dalai-lamae* sampling points

1.2 气候与环境数据来源及预处理

气候与环境数据来源于世界气候变量数据库网站 (<https://worldclim.org>), 分别获取 1971—2000 年的气候数据以及 2021—2040 年和 2041—2060 年的未来气候预测数据, 以 3 个时期的 19 个生物气候变量(Bioclim)和 1 个海拔变量(Elevation)作为环境数据(表 1)。未来气候采用基于第 6 次国际耦合模式比较计划(CMIP6)^[24]中的 BCC-CSM2-MR 共享社会经济路径(SSP), 选择 SSP126, SSP370 和 SSP585 这 3 种情景模式。气候数据空间分辨率均选择为 2.5 arc-minutes。

在物种分布模型的构建过程中, 环境变量间的高度相关性可能增加模型复杂度, 从而影响预测精度^[25]。为此, 本研究运用 SPSS 软件开展了 Spearman 秩相关性分析^[26], 用 R 绘制环境因子相关性检验热图(图 2), 来评估气候要素、海拔等变量间的相互作用。在选择变量时, 优先采纳了|相关系数|低于 0.8 的变量, 以减少共线性的干扰; 而对于|相关系数|超过 0.8 的变量, 仅选用对环境特征有明确指示作用的变量。通过对 20 个候选环境变量进行 MaxEnt 模型的初步实验(均选择默认参数), 剔除试验中对模型无贡献或贡献甚微的变量, 并结合相关性分析结果进行综合性筛选^[27]。最终确定 10 个关键环境因子用于模型构建(表 1)。

1.3 模型参数优化

鉴于物种间生态特性的异质性, 直接应用 MaxEnt 模型的默认参数可能引发过度拟合问题, 进而对预测精度产生负面影响^[28]。因此需要进一步寻找最佳参数, 以提高模型的预测准确性。在 MaxEnt 模型中, 调控倍率(Regularization multiplier, RM)和特征组合(Feature combination, FC)是两个至关重要的参数, 它们共同决定了模型的复杂度和拟合程度, 进而对模型的预测性能和泛化能力产生影响^[29]。

在本项研究中, 将 RM 设定为 8 个不同的梯度值(间隔 0.5), 采用 6 种 FC, 包括: 线性(L)、线性加二次型(LQ)、分段化(H)、线性加二次型加分段化(LQH)、线性加二次型加分段化加乘积型(LQHP)以及线性加二次型加分段化加乘积型加阈值型(LQHPT)。利用 ENMeval 工具包优化参数, 确定最佳的参数组合用于模型预测。模型的最优参数组合通过校正的赤池信息准则(Akaike information criterion corrected, AICc)进行评估。AICc 值综合考虑模型拟合优度与复杂度, 其数值越小表明模型在拟合精度与简约性之间的平衡效果越优^[30]。最终, 结合 AICc 值与受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic, ROC)下面积(Area under curve, AUC)的综合评估结果, 确定模型的最优参数组合。

表 1 参与模型构建的环境因子及其贡献率

Table 1 Environmental factors involved in model construction and their contribution rates

数据类型 Data type	环境因子 Environmental factor	代号 Code name	单位 Unit	是否参与 建模构建 Participation in modeling	模型贡献率 Model contribution rate/%	置换贡献率 Replacement contribution rate/%
气候因子 Climatic factor	年平均气温 Annual mean temperature	Bio ₁	℃	是 Yes	1.5	20.3
	平均日较差 Mean diurnal range	Bio ₂	℃	是 Yes	3.0	2.5
	等温性 Isothermality	Bio ₃	/	是 Yes	0.5	0
	气温季节性变动系数 Temperature seasonality	Bio ₄	/	是 Yes	2.2	19.0
	最暖月最高温度 Max temperature of warmest month	Bio ₅	℃	否 No		
	最冷月最低温度 Min temperature of coldest month	Bio ₆	℃	否 No		
	年均温变化范围 Temperature annual range	Bio ₇	℃	否 No		
	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter	Bio ₈	℃	否 No		
	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter	Bio ₉	℃	是 Yes	4.4	4.2
	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter	Bio ₁₀	℃	否 No		
	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter	Bio ₁₁	℃	是 Yes	2.3	1.1
	年均降水量 Annual precipitation	Bio ₁₂	mm	是 Yes	6.5	22.4
	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	Bio ₁₃	mm	否 No		
	最干月降水量 Precipitation of driest month	Bio ₁₄	mm	是 Yes	18.3	1.1
	降水量变异系数 Precipitation seasonality	Bio ₁₅	/	否 No		
	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	Bio ₁₆	mm	否 No		
	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter	Bio ₁₇	mm	否 No		
	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	Bio ₁₈	mm	是 Yes	8.2	11.9
	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter	Bio ₁₉	mm	否 No		
海拔因子 Elevation factor	海拔 Elevation	ELE	m	是 Yes	53.0	17.6

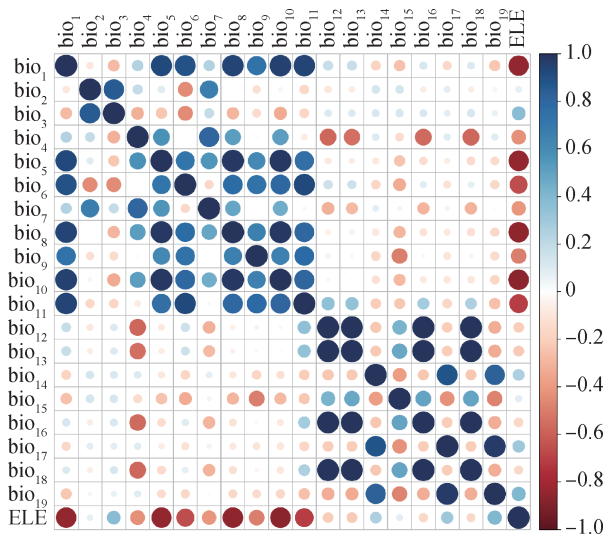


图 2 米蒿 20 个环境因子间皮尔森相关性分析热图

Fig. 2 Heatmap of pearson correlation analysis among 20 environmental factors of *Artemisia dalai-lamae*

1.4 最大熵模型的构建

将收集到的 47 个米蒿分布点数据以 csv 格式与筛选后的 10 个环境因子导入 MaxEnt 3.4.4 软件进行建模。数据集随机划分为训练集(75%)和测试集(25%)用于验证模型预测性能。采用优化后的特征 FC 和 RM,勾选“random seed(增加数据划分和背景

点选择的随机性,有助于评估模型稳定性和泛化能力”,进行 10 次重复运行,迭代 10 000 次,采用“sub-sample(子采样法)”方式,其他参数默认,输出类型为 Logistic 模式。使用刀切法(jackknife test)评估气候变量对米蒿适生区的影响,并通过 AUC 值衡量模型准确性。AUC 的取值范围为 0~1, $0.9 \leq AUC \leq 1$ 时,表示预测极为准确; $0.8 \leq AUC < 0.9$,为较准确; $0.7 \leq AUC < 0.8$ 时,为一般; $0.6 \leq AUC < 0.7$ 时,为较差; $AUC < 0.6$ 则预测接近随机,性能很差^[31]。

将 MaxEnt 模型生成的 ASC 文件导入 ArcGIS10.8 进行可视化分析,导入后,使用重分类工具并采用自然间断点分级法^[32](Jenks natural breaks classification method)将米蒿适生区分布划分为 4 个等级:非适生区(<0.07)、低适生区($0.07 \sim 0.25$)、中适生区($0.25 \sim 0.5$)、高适生区($0.5 \sim 1$)。随后,根据划定的等级区间对不同情境下的适生区进行重分类,并计算各个等级的面积。

1.5 适生区空间格局变化与质心转移分析

参考张殷波等^[33]的方法,对米蒿的当前和未来适宜生长区域进行二值化处理。运用 ArcGIS 软件中的 SDMTtoolbox 工具包的“Distribution Changes

Between Binary”功能,通过空间叠加分析,精确识别区域变化类型,包括非适宜区域、新适宜区域、丧失的适宜区域和保持不变的适宜区域。此分析直观展示了不同时间点米蒿适宜生长区域的空间分布及变化,便于揭示区域格局的动态演变。

气候变化不仅影响物种分布范围的动态变化,还可能引发分布几何中心的位移。通过比较未来三个时期与当前状况的预测结果,基于MaxEnt模型AUC最高值的二值化结果,进行质心转移分析。利用SDMToolbox 工具包中的“Centroid Changes (Lines)”工具,以当前的几何中心为基准,预测未来不同情景下几何中心的变化,该分析有助于理解气候变化对米蒿适宜生长区域分布及质心动态的潜在影响。

2 结果与分析

2.1 模型优化结果及准确性评价

利用 47 个米蒿分布数据和筛选后的 10 个环境因子进行建模,在MaxEnt模型默认参数,RM=1 和 FC=LQHP 时,delta. AICc=216. 055;当 RM=3 和 FC=LQH 时,delta. AICc=0,其 AUC 值也高于默认参数下的 AUC 值。同时,AUC. diff,OR10 以及 ORmpt 的值均低于默认参数下的值(表 2),说明参数优化提高了模型预测精度,减少了拟合,提高了结果的准确性。重复运行得到 AUC 的平均值为 0. 982(图 3),表明模型具有高度的稳定性和可靠性,预测结果可信。

表 2 ENMeval 优化模型参数结果评估

Table 2 ENMeval optimization model parameter results evaluation

参数设置 Parameter setting	特征组合 (FC)	调控倍率 (RM)	校正的赤池 信息准则 (AICc)	受试者工作 特征曲线下面积 (AUC)	训练集与测试集 AUC 差值 (AUC.diff)	最小训练存在 阈值的遗漏率 (ORmpt)	10% 训练存在 阈值的遗漏率 (OR10)
默认 Default	LQHP	1	216.055	0.986	0.014	0.085	0.128
优化 Optimized	LQH	3	0	0.988	0.012	0.064	0.106

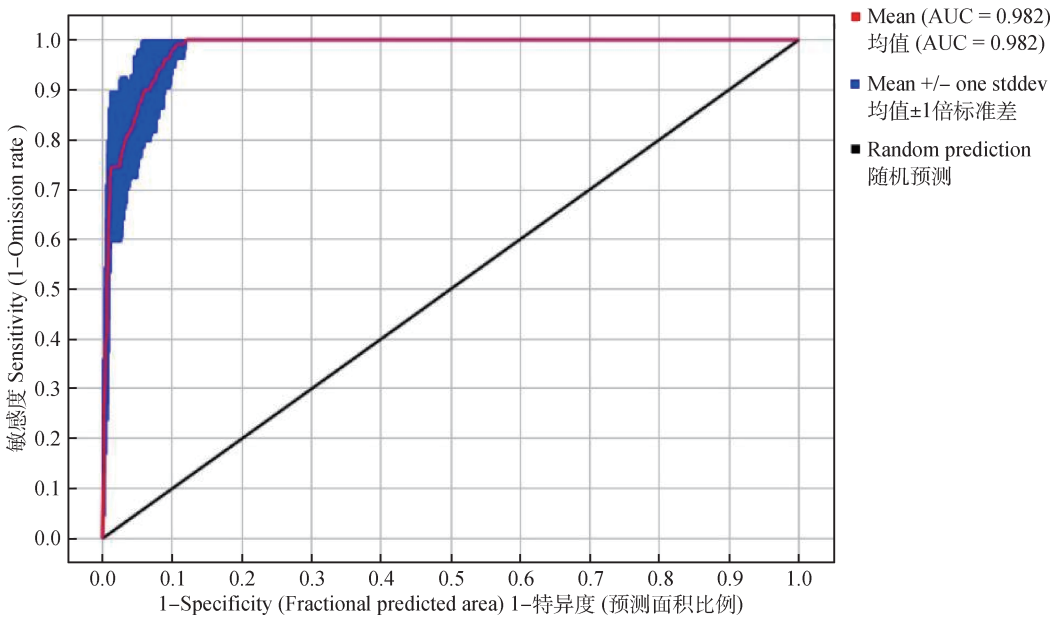


图 3 MaxEnt 模型预测结果的 ROC 检验

Fig. 3 ROC test of MaxEnt model prediction results

2.2 主导环境因子及适宜生境条件

根据环境因子对模型预测的贡献率(表 1)可以分析得出影响米蒿分布的主导因子为海拔(ELE, 贡献率 53. 0%)、Bio₁₄(18. 3%)、Bio₁₈(8. 2%)、Bio₁₂(6. 5%)。在排列重要性中,Bio₁₂ 贡献率最高(22. 4%),其次为 Bio₁(20. 3%)和 Bio₄(19. 0%)、ELE(17. 6%)。

综合贡献率和排列重要性分析,海拔(ELE)、年均降水量(Bio₁₂)、暖季降水量(Bio₁₈)和年均温(Bio₁)被认为是影响米蒿分布的主导环境因子。这 4 个环境因子贡献率合计 69. 2%,置换贡献率合计 72. 2%,表明其对米蒿分布的影响稳定且集中。

响应曲线能够反映物种分布概率与环境因子之间的内在联系^[34]。通过分析MaxEnt模型生成的

环境变量响应曲线(图4),可以揭示米蒿存在概率与关键环境因子的关系。当米蒿的存在概率高于0.5时,表明该环境条件满足其生长需求。结果表明:米蒿适宜生长的海拔范围为2046.59~3529.76 m,在2546.02 m时存在概率最高;年均降水量在

168.70~376.77 mm之间最为适宜,其中230.35 mm时米蒿的存在概率最大;暖季降水量的适宜范围为106.18~229.17 mm,最佳值为142.62 mm;温度在0.09~5.87℃时最适合米蒿生长,以3.03℃的存在概率最高。

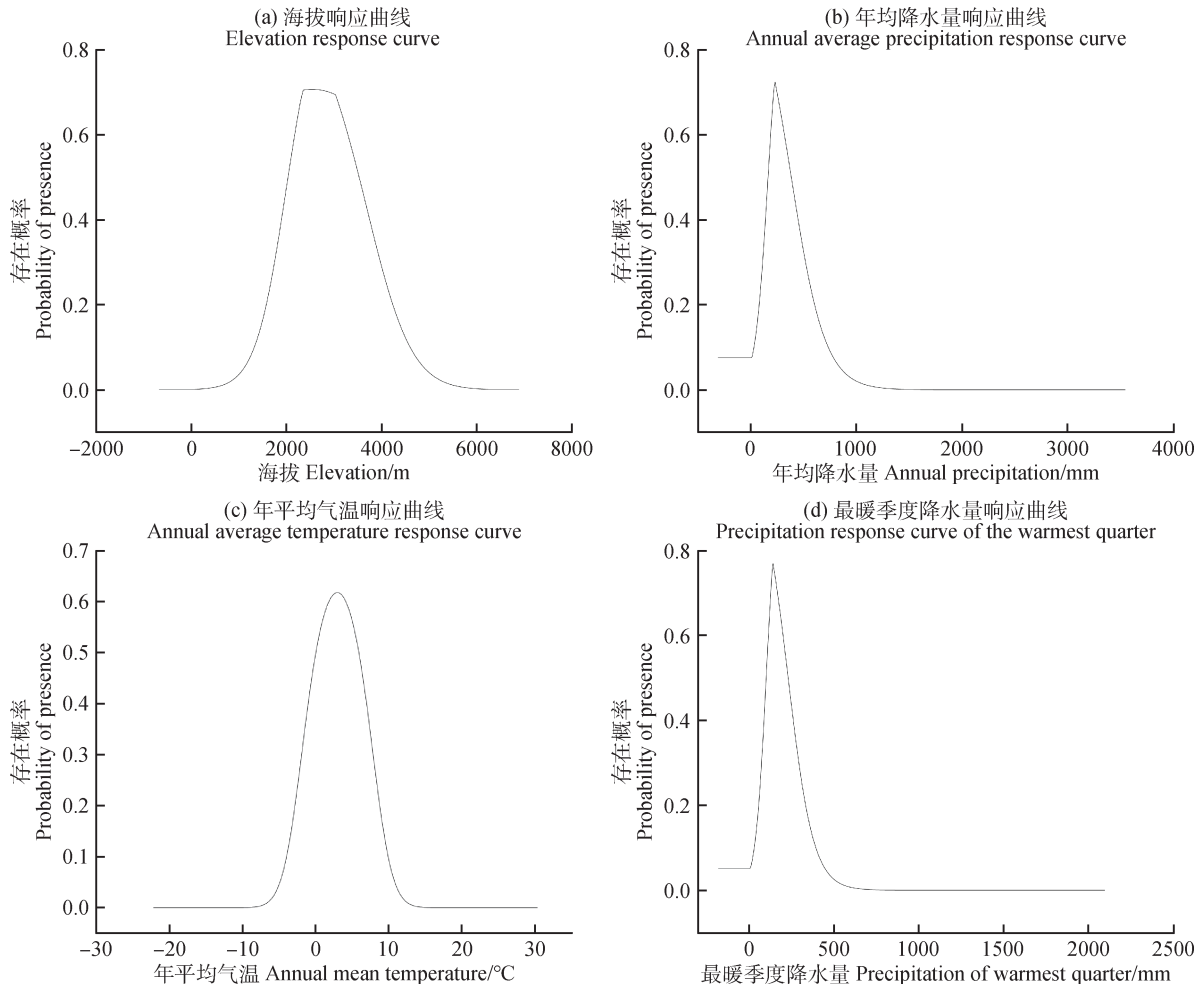


图4 米蒿存在概率与主导环境因子的响应曲线

Fig. 4 The response curve of *Artemisia dalai-lamae* existence probability and main environmental factors

2.3 当前气候条件下米蒿的适生区

当前,米蒿的适生区预测情况如图5所示,适生区总面积为 $122.93 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中高适生区的面积为 $15.90 \times 10^4 \text{ km}^2$,占适生区总面积的12.93%,分布在甘肃(张掖、金昌、武威、白银、兰州等地)、青海(海东市、海南藏族自治州及海西蒙古族藏族自治州东南部)、西藏(日喀则市东南部、山南市西北部)和新疆(铁门关市、阿克苏地区西北部)等地,在青海、甘肃的分布最为集中。中适生区面积为 $25.85 \times 10^4 \text{ km}^2$,占总面积的21.02%,其主要分布区域从高适生区向外扩展,涵盖了甘肃、青海

以及宁夏回族自治区。此外,在内蒙古与甘肃、宁夏交界的地方,还有山西中部地区,也存在着少量的分布情况。而西藏地区以及新疆东南部的分布状况则呈现出碎片化的特征。低适生区面积为 $81.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,占总面积的66.03%,沿中适生区向周边延伸,包括甘肃、青海、内蒙古、山西等地,并在四川、西藏、新疆等地呈碎片化分布。

2.4 未来气候条件下米蒿的适生区

本研究评估了未来两个时间段内,在三种气候情景下米蒿的适生区面积(表3,图6)。在SSP126情景中,2021—2040年期间,米蒿的总适生区面积

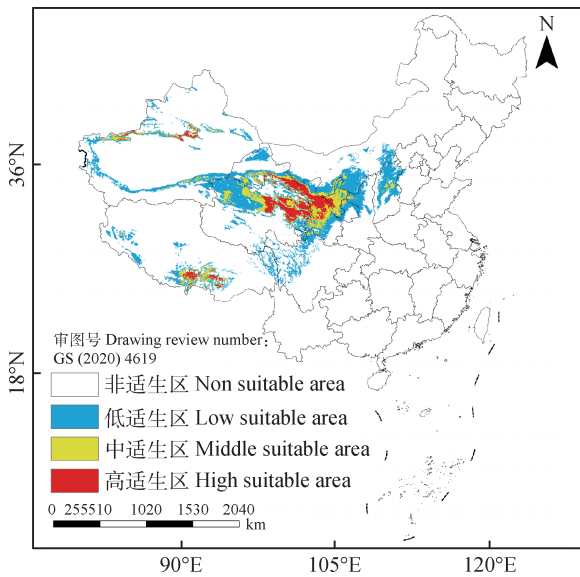


图 5 当前气候条件下米蒿的适生区预测

Fig. 5 Prediction of suitable areas of *Artemisia dalai-lamae* under current climatic conditions

为 $79.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中高适生区为 $8.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区为 $22.20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区为 $49.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。低中高适生区均出现了不同程度的缩减。2041—2060 年期间, 总适生区面积为

$77.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相较于前 20 年有所下降, 其中低适生区面积略有增加, 中、高适生区面积减少。

在 SSP370 情景下, 2021—2040 年的总适生区面积为 $79.81 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区面积为 $50.69 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区面积为 $21.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高适生区面积为 $7.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。到了 2041—2060 年, 低、中、高适生区面积分别为 $47.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, $22.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $8.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总适生区面积减少, 其中, 中、高适生区面积相较于前一时期略有增加, 低适生区面积缩减。

SSP585 情景下, 2021—2040 年的总适生区为 $84.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低适生区面积为 $49.71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区面积为 $24.39 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高适生区面积为 $10.10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该时期适生区总面积以及中、高适生区面积在未来所有情境下均为最大值; 2041—2060 年总适生区面积为 $69.81 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低、中、高适生区面积分别为 $43.41 \times 10^4 \text{ km}^2$, $19.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。这一时期的适生区总面积及低、中适生区面积在未来所有情景下均为最小值。

米蒿的总适生区在未来不同气候情景下均呈现缩减趋势。

表 3 当前和未来气候条件下米蒿的适生区面积

Table 3 Suitable area of *Artemisia dalai-lamae* under current and future climatic conditions 单位: $\times 10^4 \text{ km}^2$

时期 Period	当前时期 Current	2021—2040			2041—2060		
		SSP126	SSP370	SSP585	SSP126	SSP370	SSP585
非适生区 Non suitable area	839.56	882.53	882.68	878.30	884.96	883.53	892.68
低适生区 Low suitable area	81.18	49.23	50.69	49.71	50.17	47.92	43.41
中适生区 Middle suitable area	25.85	22.20	21.53	24.39	20.82	22.31	19.55
高适生区 High suitable area	15.90	8.53	7.59	10.10	6.54	8.73	6.85
总适生区 Total suitable area	122.93	79.96	79.81	84.19	77.53	78.96	69.81

2.5 米蒿适生区面积的空间变化

未来不同时期气候条件下米蒿的适生区面积空间变化如表 4、图 7 所示。在 SSP126 情景下, 2021—2040 年间, 米蒿的适生区新增面积仅为 $5.90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而丧失面积达到 $48.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。新增适生区主要集中在新疆巴音郭楞蒙古自治州东南部、西藏那曲市西部及阿里地区西南部, 丧失适生区主要在山西省、内蒙古的鄂尔多斯市和乌兰察布市、陕西的延安市、甘肃的定西市和甘南藏族自治州、四川省等地。2041—2060 年间, 适生区面积增加 $6.78 \times 10^4 \text{ km}^2$, 丧失面积达 $51.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, 增加和丧失的地理范围与前一时期相似。在

SSP370 情景下, 2021—2040 年间, 适生区面积增加 $6.38 \times 10^4 \text{ km}^2$, 丧失面积为 $48.97 \times 10^4 \text{ km}^2$; 2041—2060 年间, 适生区面积增加 $9.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 丧失面积为 $52.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。SSP585 情景下, 2021—2040 年间, 适生区面积增加 $8.09 \times 10^4 \text{ km}^2$, 丧失面积为 $46.47 \times 10^4 \text{ km}^2$, 空间格局变化与前述时期相似。但在 2041—2060 年间, 该情景显示出最大的面积丧失, 达到 $60.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

与当前气候条件相比, 在未来两个时期内, 所有气候情景下的适生区面积均出现缩减, 其中 SSP585 情景在 2041—2060 年表现出最大减幅, 适生区面积减少 $52.89 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积减少比例达 43.02%。

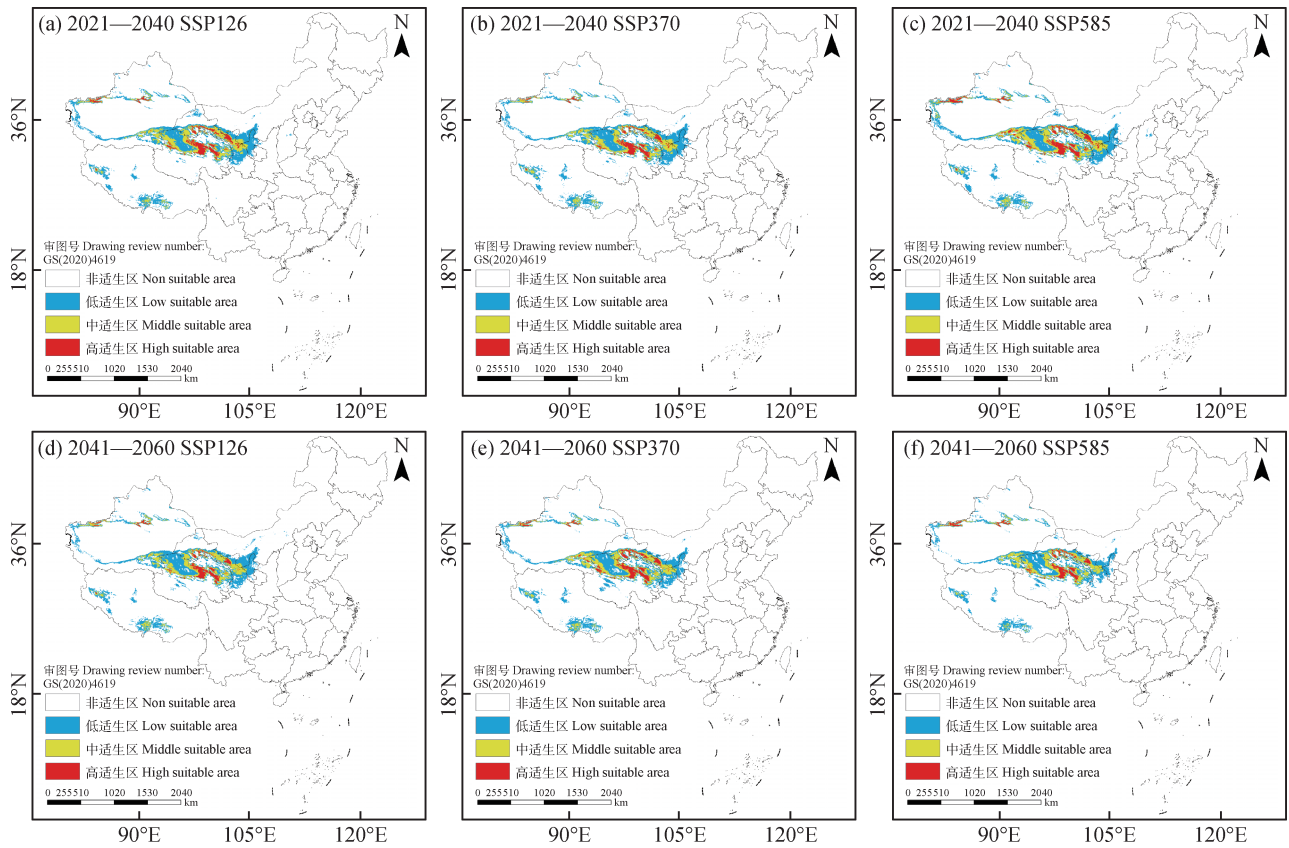


图 6 未来不同气候条件下米蒿的适生区预测

Fig. 6 Prediction of suitable areas of *Artemisia dalai-lamae* under different climatic conditions in the future

表 4 未来不同气候条件下米蒿适生区面积的空间变化

Table 4 Spatial changes of *Artemisia dalai-lamae* suitable area under different climatic conditions in the future

时期 Period	气候情景 Climatic scenario	面积 Area/ $\times 10^4 \text{ km}^2$				变化率 Change rate/%			
		新增 Increased	丧失 Lost	保留 Retain	变化(与当前时期相比) Change(Compared with current period)	新增 Increased	丧失 Lost	保留 Retain	变化(与当前时期相比) Change(Compared with current period)
2021—2040	SSP126	5.90	48.53	72.73	−42.63	4.80	39.48	59.16	−34.68
	SSP370	6.38	48.97	72.73	−42.59	5.19	39.83	59.16	−34.65
	SSP585	8.09	46.47	74.79	−38.38	6.58	37.80	60.84	−31.22
2041—2060	SSP126	6.78	51.83	69.43	−45.05	5.52	42.16	56.48	−36.65
	SSP370	9.21	52.82	68.43	−43.61	7.49	42.97	55.66	−35.47
	SSP585	7.61	60.50	60.75	−52.89	6.19	49.21	49.42	−43.02

2.6 气候变化下米蒿适生区质心变化

米蒿适生区质心在不同时期气候情景下迁移情况不同(图8)。当前时期米蒿适生区质心位于青海省海西蒙古族藏族自治州乌兰县(98.15°E, 36.96°N),在 SSP126 情景下,2021—2040 时期,米蒿的质心向西北方向迁移至青海省海西蒙古族藏族自治州德令哈市(94.77°E, 37.28°N),迁移距离为 302 km;在 2041—2060 时期,质心略向南迁移 9.36 km。在 SSP370 情景下,2021—2040 时期,质心向西北方向迁移至青海省海西蒙古族藏族自治州格尔木市(94.73°E, 37.10°N),迁移距离为

316 km;在 2041—2060 时期,质心继续往西北方向迁移至瑟瑟湖附近(94.29°E, 37.12°N),迁移距离为 39.41 km。在 SSP585 情景下,2021—2040 时期,质心往西北方向迁移至瑟瑟湖西部约 13 km 处(94.13°E, 37.18°N),迁移距离达到 357.34 km;在 2041—2060 时期,质心继续往西北方迁移至东台吉乃尔湖(94.04°E, 37.44°N),迁移距离为 30.33 km。综合分析表明,未来米蒿适生区质心呈现向西北方向偏移的趋势,这一变化反映了在气候变暖背景下,米蒿可能向高纬度、高海拔地区适应性迁移。

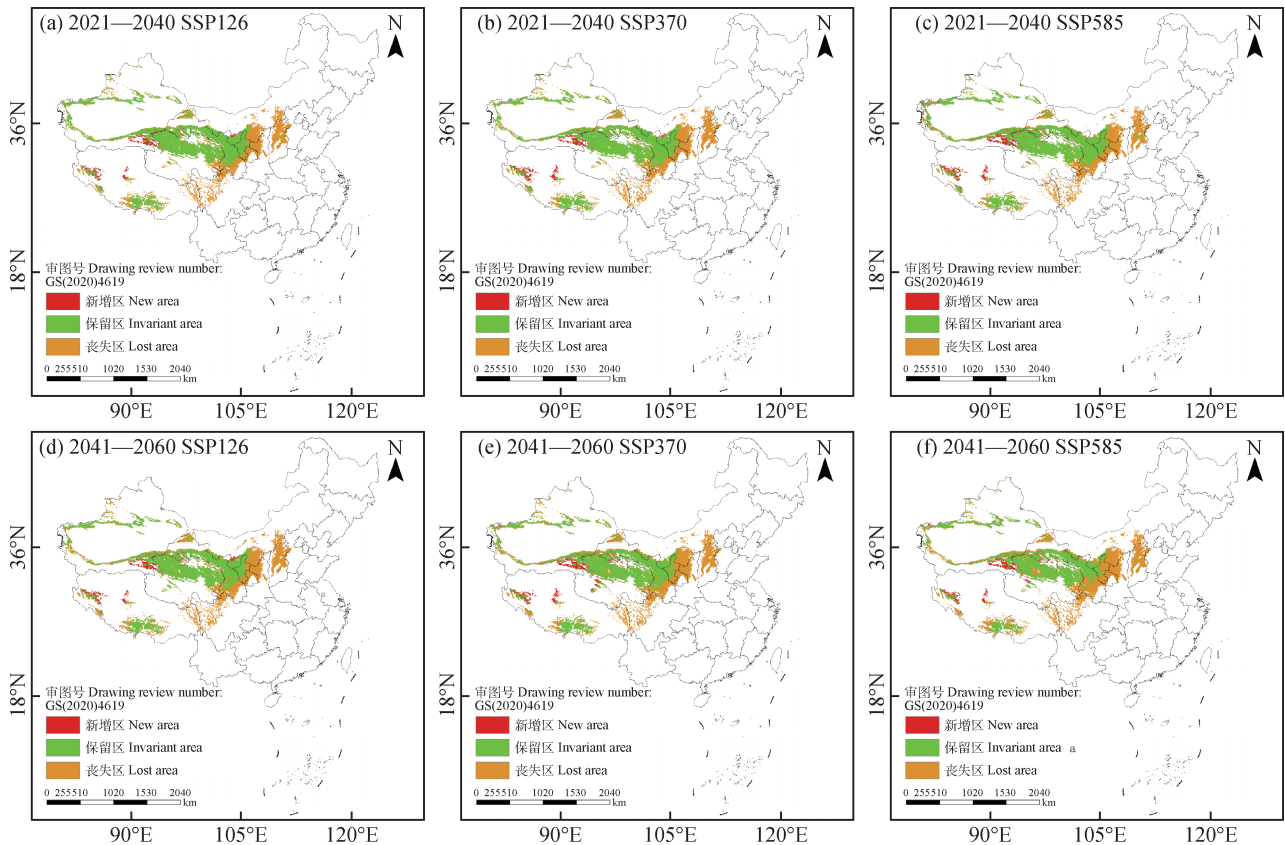


图 7 未来不同气候条件下米蒿适生区的空间变化

Fig. 7 Spatial pattern changes of suitable areas of *Artemisia dalai-lamae* under different climate scenarios in the future

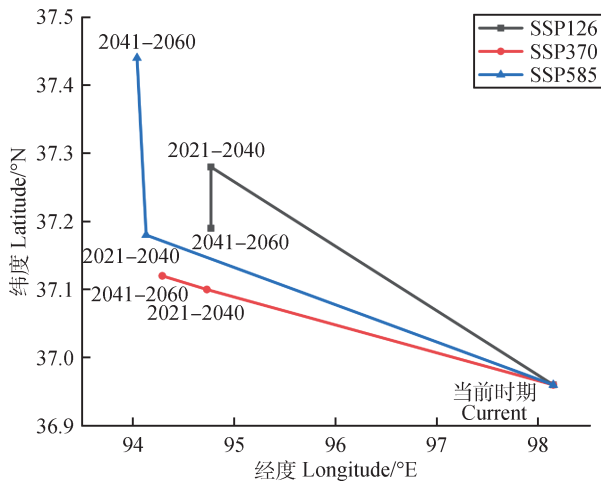


图 8 当前和未来气候条件下米蒿适生区的质心变化

Fig. 8 Change of centroid in suitable area of *Artemisia dalai-lamae* under current and future climatic conditions

3 讨论

3.1 优化后 MaxEnt 模型的准确度

MaxEnt 模型凭借其良好的适应性和稳定性,是当前预测效果较好、应用范围较为广泛的物种分布模型^[35]。模型的精度检验主要通过输出结果的

受试者工作特征曲线下面积 AUC 值进行评估^[31], AUC 值与模型预测精度呈正相关。然而,以往许多研究在预测目标物种的分布时,通常使用默认参数设置,这种做法容易导致模型过度拟合,从而降低结果的准确性^[36]。鉴于物种间生态特性的异质性,各物种均对应独特的最优参数组合。以往研究一般通过 R 语言中的 ENMeval 包,对 RM 和 FC 进行优化,确定最优参数组合,从而提升预测结果的准确性。例如,郑梦月等^[37]的研究表明,在设置 FC 为 LQH 且 RM 为 2.5 时,黄花刺茄 (*Solanum rostratum*) 在中国北方农牧交错带的地理分布预测效果最佳,其 AUC 值达到 0.868,优于默认参数下的预测结果。类似地,王心等^[38]的研究发现,当 FC 为 LQ, RM 设置为 0.5 时,环状镰孢 (*Fusarium circinatum*) 的分布预测 AUC 值为 0.928,高于默认参数下的 AUC 值,显示出更高的预测准确性。本研究利用 47 个分布点和 10 个环境因子,对米蒿在全国范围内的分布进行了预测,同时通过 ENMeval 包对模型参数进行优化。结果显示,当 RM=3 且 FC=LQH 时,Delta. AICc 值为 0,表明此时模型的过拟合较低;同时,优化模型的 AUC 平均值为 0.982 高

于默认参数下的AUC平均值(0.978),说明预测结果更加可靠。此前的研究也表明,当RM值在2~4之间时,模型性能最佳;在FC中添加分段特征(H)可以显著提升模型的准确性^[39],这些发现与本研究结果一致,进一步支持了本研究的可靠性和准确性。

3.2 影响米蒿分布的主导环境因子

通过对优化模型模拟所得到的环境因子贡献率(表2)的分析可知,海拔(ELE)、年均降水量(Bio₁₂)、暖季降水量(Bio₁₈)以及年平均气温(Bio₁)是决定米蒿当前及未来地理分布的主要环境驱动因子。预测结果表明,米蒿适宜生长的海拔范围为2046.59~3529.76 m,年均降水量为168.70~376.77 mm,最适宜的生长温度为0.09~5.87℃。在当前气候条件下,米蒿的高度适宜生境主要分布于青东祁连山地草原区(图5)。该区域气候为高原温带半干旱气候,海拔范围为2500~4500 m;年降水量范围通常在200~400 mm之间;年均气温较低,一般在-2~4℃之间^[40]。该地区的环境特征与本研究预测的米蒿适生环境条件高度匹配,进一步验证了预测结果的可靠性。

植物的潜在分布区特征是气候、地形等环境因子综合作用的结果,同时也反映了植物对环境的适应性响应。本研究发现,海拔是影响米蒿分布的主导环境因子之一,过高和过低的海拔均会影响米蒿的存在概率。这一现象可能与海拔通过光、温、水等因子的协同作用间接影响米蒿的生长有关。高海拔地区虽然光照强度较高,但降水相对匮乏;而低海拔地区尽管降水充沛,却面临光照不足的问题。因此,米蒿在海拔大于3500 m时,随着海拔升高,适生程度降低。年均降水量是影响米蒿地理分布格局的另一关键因子,这与前人对裂叶蒿^[41](*A. tanacetifolia*)预测的研究结果一致。本研究发现,米蒿的存在概率对年均降水量的响应呈现单峰格局(图4),表明降水量过高或过低均会导致其适生等级下降。这一现象可以从生理生态学角度解释:过量降水会导致土壤水涝,造成根系缺氧,进而抑制植物呼吸作用和养分吸收;而降水不足则会引起水分亏缺,降低光合作用效率,最终限制植物生长^[42]。此外,温度也是调控米蒿地理分布的重要环境因子,这与鲁客等^[43]对黑沙蒿(*A. ordosica*)研究结果一致。研究表明,降水与温度之间存在显著的

交互作用,二者共同影响米蒿的生长与分布。温度差异过大会对植物产生多层次的负面影响:高温胁迫会导致植物蒸腾作用加剧,造成水分大量流失,在极端情况下抑制植物生长发育^[44];而低温胁迫则可能引发冷害或冻害,延缓植物生长进程。

在未来气候变化背景下,预测结果显示米蒿的高度适宜生境仍主要集中在青东祁连山地草原区,形成相对稳定的狭域分布格局。从海拔、气温和降水等角度分析,青东祁连山地草原区的气候多样性为不同生态需求的植物提供了生存空间,也为米蒿的生存创造了理想的环境条件。首先,该地区东段受季风影响,降水量相对充足,虽然中西段较为干燥,但高海拔地区降水仍较为充沛^[45],形成从干旱到湿润过渡多样化气候特征,能够满足米蒿对降水的需求;其次,该区域的年平均气温为-2~4℃,随着气候变暖,该地区能够为米蒿提供适应温度变化的缓冲期;此外,该区域内流水系和外流水系并存,不仅为植物提供多样的水分来源,还可以通过调剂微气候,改善土壤条件等方式提高区域内的植物生长适宜性和生态稳定性。

3.3 气候变化下米蒿地理分布中心的迁移趋势

质心指的是物种分布的地理中心,在气候变化的背景下,质心的变化能够反映物种对环境变化的响应^[46],进而为保护策略的制定和未来生物多样性动态的预测提供重要依据。在气候变化的背景下,物种通常会向高纬度、高海拔地区迁移,以寻找适宜生存的环境^[47]。例如,Zhan等^[48]利用优化的MaxEnt模型预测了三七(*Panax notoginseng*)在不同时期的适宜生境,结果表明,在未来气候变化情景下,三七的适宜生境将逐渐减少,并向高海拔地区迁移。类似的研究还发现,连翘(*Forsythia suspensa*)^[49]等植物在未来的适宜生境也呈现出相似的迁移趋势。在本研究中,米蒿当前的质心位于青海省海西蒙古族藏族自治州乌兰县。在未来的各个预测时期,米蒿的适生区整体呈现向西北方向的迁移趋势,并向高纬度和高海拔地区集中,该现象与多数相关研究一致。这一现象的发生可能与气候变暖的加剧密切相关。气候变暖导致气温上升、降水减少以及干旱和暴雨等极端天气事件频发^[50],使米蒿难以在其原生长区域定殖,从而导致其适宜生境在未来气候情景下收缩。与此同时,米蒿被迫迁移至更适宜的生长环境。随着全球气温升高,高纬

度和高海拔地区的温度变得更加温和,逐渐提供了适合植物生长的环境条件。高海拔地区相对稳定的环境有助于植物避开高温、干旱等极端天气的影响,进一步促进其生存和定殖^[51]。但是,对特有种米蒿而言,应对未来气候变化的影响,其质心迁移的空间是有限的。这是因为,米蒿分布中心北部是塔里木盆地,塔里木盆地属于暖温带大陆性极端干旱的荒漠气候,年均降水量仅为25 mm,平均温度为11.5℃,蒸发量高达2906 mm^[52],这种高温干旱的极端气候远远超出了米蒿生存的耐受范围。而其分布中心的南部又是平均海拔高达5500~6000 m的昆仑山脉。特殊的地理位置,导致米蒿形成了相对稳定的狭域分布特征,同时,也使米蒿应对未来气候变化的适生区域空间十分有限。

本研究发现,不同气候情景下的米蒿质心迁移距离有所不同,反映出气候情景对米蒿适生区影响强度的差异:2021—2040时期的质心迁移距离普遍大于2041—2060时期。这种阶段性的变化表明,米蒿的适生区在未来气候变化初期的迁移幅度较大,随后逐渐稳定。这或许是因为在气候变化的初期,物种的生存环境受到了较为显著的影响;而在气候变化后期,适生区逐渐与新的气候条件相适应,从而使得迁移距离逐渐缩小。在全球气候变暖的背景下,和许多植物一样,温度和降水变化仍是未来影响米蒿适生区分布的主要因素^[53]。根据本研究的预测,在未来50年内,米蒿的适生面积将出现显著缩减(图6,图7),在SSP585情景下,2041—2060年间适生区面积缩减最为剧烈,降幅高达43.02%。这表明,未来气候变暖将会对米蒿生存造成极大威胁。

3.4 米蒿的种质资源保护

研究表明,高强度的人类活动也是造成狭域种分布区收缩的重要原因^[54]。本研究虽然尚未考虑人为因素的影响,但从米蒿核心分布区目前现状来看,该区域生态环境已经受到人类活动的严重破坏,主要包括矿产开采、水电建设、农业垦殖、过度放牧、旅游业发展等^[55-56],这些高强度的资源开发、开采,会加剧米蒿生境的破碎化,引起分布范围的进一步缩减。若不及时加强保护,未来米蒿的生存将会面临严峻威胁。

基于未来气候情景下米蒿适生区空间格局的变化特征,建议采取差异化的资源保护策略^[57]:对

于保留区(即未来气候条件下仍适宜米蒿生存的区域),应列为优先保护对象^[58],加强植被保护,严格控制滥砍滥伐,维持原有植物群落的完整性,并建立长期生态监测网络;对于丧失区(即因气候条件变化而不再适宜米蒿生存的区域),需建立种质资源库以保存遗传多样性,同时开展生态适应性研究,分析分布区收缩的驱动机制,积极开展相关研究;对于新增区(即未来可能适宜米蒿生存的新区域),可开展引种试验评估其生态适应性,减少人类活动干扰,制定科学的资源开发规划,并建立生态保护区以促进种群的定殖与扩散,以期实现米蒿资源的可持续利用与生态功能的长期维持。

4 结论

米蒿在当前气候条件下狭域分布于青东祁连山地草原区;海拔、年降水量、暖季降水量和年均温对其分布格局的形成起主导作用;未来气候变化将导致米蒿适生区面积缩减,最高缩减43.02%,并呈现向高纬度和高海拔区域迁移的趋势。据此,我们提出分区保护策略,包括在新增适生区建立生态监测网络,在丧失适生区开展种质资源保存工作,以及通过降低人类活动干扰等综合性措施,以实现对米蒿资源的系统性保护。

参考文献

- [1] ARAÚJO M B, NEW M. Ensemble forecasting of species distributions[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(1): 42-47
- [2] 方运霆,刘冬伟,段伊行,等. 气候变暖对森林生态系统碳汇功能的影响:机制、方法和主要进展[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(9):2551-2565
- [3] FANG Y T, LIU D W, DUAN Y X, et al. Effects of climate warming on carbon sink of forest ecosystems: Mechanisms, methods, and progresses [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(9):2551-2565
- [4] HOWARTH C, VINER D. Integrating adaptation practice in assessments of climate change science: the case of IPCC Working Group II reports [J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, 135:1-5
- [5] JORDA G, MARBÀ N, BENNETT S, et al. Ocean warming compresses the three-dimensional habitat of marine life [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 4(1):109-114
- [6] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918):37-42
- [6] MANES S, COSTELLO M J, BECKETT H, et al. Ende-

- mism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance [J]. *Biological Conservation*, 2021, 257:109070
- [7] PAINTER J, MARSHALL S, LEITZELL K. Communicating climate futures: a multi-country study of how the media portray the IPCC scenarios in the 2021/2 Working Group reports [J]. *Climatic Change*, 2024, 177(6):82
- [8] STEIN B A, STAUDT A, CROSS M S, et al. Preparing for and managing change: climate adaptation for biodiversity and ecosystems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(9):502-510
- [9] JIANG R P, ZOU M, QIN Y, et al. Modeling of the potential geographical distribution of three *Fritillaria* species under climate change [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12:749838
- [10] GUISAN A, TINGLEY R, BAUMGARTNER J B, et al. Predicting species distributions for conservation decisions [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(12):1424-1435
- [11] FENG X, PETERSON A T, AGUIRRE-LÓPEZ L J, et al. Rethinking ecological niches and geographic distributions in face of pervasive human influence in the Anthropocene [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2024, 99(4):1481-1503
- [12] HE Y T, WANG G J, REN Y L, et al. Maxent modelling combined with fuzzy logic provides new insights into predicting the distribution of potato cyst nematodes with limited data [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 222:109035
- [13] 朱耿平, 原雪姣, 范靖宇, 等. MaxEnt模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蜡为例 [J]. *生物安全学报*, 2018, 27(2):118-123
- ZHU G P, YUAN X J, FAN J Y, et al. Effects of model parameters in Max Ent modeling of ecological niche and geographic distribution: case study of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* [J]. *Journal of Biosafety*, 2018, 27(2):118-123
- [14] 杨佳悦, 丁国玉, 田秀君. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2025, 36(2):614-624
- YANG J Y, DING G Y, TIAN X J. Research progress on the application of the MaxEnt model in species habitat prediction [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(2):614-624
- [15] 周威, 钟艳雯, 陈玉贵, 等. 基于MaxEnt模型的中国显齿蛇葡萄潜在适生区分析 [J]. *中国农业气象*, 2025, 46(2):213-225
- ZHOU W, ZHONG Y W, CHEN Y G, et al. Potential distribution region for Chinese *Ampelopsis grossedentata* based on the MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2025, 46(2):213-225
- [16] 姜武, 张立华, 刘雷雷, 等. 基于MaxEnt模型对泰顺县多花黄精适生区的预测及评估 [J]. *浙江农业科学*, 2025, 66(1):224-231
- JIANG W, ZHANG L H, LIU L L, et al. Evaluation and prediction of habitat suitability of *Polygonatum cyrtonema* Hua in Taishun County based on MaxEnt model [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2025, 66(1):224-231
- [17] 王丽丽, 杨采青, 王瑛, 等. 全球入侵物种马铃薯块茎蛾生态位转移及适生区扩展 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3):797-805
- WANG L L, YANG C Q, WANG Y, et al. Ecological niche shift and suitable area expansion of a globally invasive species *Phthorimaea operculella* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3):797-805
- [18] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第七十六卷, 第二分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1991:69
- Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China-Vol. 76, No. 2* [M]. Beijing: Science Press, 1991:69
- [19] 缙倩倩, 刘婧, 王国华, 等. 晋西北丘陵风沙区柠条林下草本植物群落组成和种群生态位变化特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(22):9069-9090
- GOU Q Q, LIU J, WANG G H, et al. Changes of herbaceous plant composition and niche characteristics in different-aged artificial *Caragana korshinskii* forest in sandy-hilly region of north-west Shanxi Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22):9069-9090
- [20] 赵明轩, 谭成虎, 何得元, 等. 驴驴蒿根系的研究 [J]. *草业科学*, 1990, 7(3):55-57
- ZHAO M X, TAN C H, HE D Y, et al. A study of root system of *Artemisia dalailamae* [J]. *Pratacultural Science*, 1990, 7(3):55-57
- [21] 杨福全, 欧庆瑜, 俞惟乐. 驴驴蒿的化学成分研究 [J]. *中国中药杂志*, 1994, 19(3):166-167, 191
- YANG F Q, OU Q Y, YU W L. Studies on the chemical constituents of *Artemisia dalailamae* Kraschen [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 1994, 19(3):166-167, 191
- [22] 贾丽娜, 吴斌, 丁国栋, 等. 宁夏盐池县3种常见沙生植物群落特征及阻沙能力 [J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(11):56-58, 63
- JIA L N, WU B, DING G D, et al. Community characters and sand trapping capability of three common species of Psammophyte in Yanchi County, Ningxia [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(11):56-58, 63
- [23] 余静雅, 夏铭泽, 徐浩, 等. 青藏高原地区3种蒿属植物转录组比较分析 [J]. *植物研究*, 2022, 42(2):200-210
- YU J Y, XIA M Z, XU H, et al. Comparative transcriptome analysis of three *Artemisia* species in Qinghai Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2022, 42(2):200-210
- [24] 周秀华, 何莉阳, 何洁琳, 等. 基于BCC-CSM2-MR模式的广西未来气候变化预估 [J]. *气象研究与应用*, 2024, 45(4):75-83
- ZHOU X H, HE L Y, HE J L, et al. Future climate change prediction over Guangxi based on BCCCSM2-MR model [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2024, 45(4):75-83
- [25] 田新民, 汲旭阳, 王鑫雪, 等. 北极村国家级自然保护区抱栖息地适宜性及活动节律 [J]. *生态学报*, 2024, 44(18):8175-8184

- TIAN X M, JI X Y, WANG X X, et al. Habitat suitability and activity patterns of roe deer in Beijicun National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18): 8175-8184
- [26] 苏静, 李海洋, 王瑞, 等. 外来入侵种地中海大麦在中国的潜在适生区预测[J]. *生态学报*, 2025, 45(3): 1379-1388
- SU J, LI H Y, WANG R, et al. Prediction of potential suitable areas for *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* as an emerging invasive plant in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1379-1388
- [27] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 等. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5674-5684
- LIU P F, WANG L, DU Q X, et al. Estimation of potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliv. in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5674-5684
- [28] 李世成, 易自力, 廖剑锋, 等. 基于Maxent模型对尼泊尔芒适生区时空分布的预测[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(2): 176-183
- LI S C, YI Z L, LIAO J F, et al. Prediction of temporal and spatial distribution of suitable areas of *Miscanthus nepalensis* based on Maxent[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2020, 46(2): 176-183
- [29] 王鹏, 田姗姗, 宋盈盈, 等. 基于MaxEnt预测3种柃属植物在中国的潜在适生区[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(12): 84-99
- WANG P, TIAN S S, SONG Y Y, et al. Predicting the potential habitat of three *Eurya* Species in China based on MaxEnt[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 46(12): 84-99
- [30] 翁慧莹, 刘益鹏, 杨黔越, 等. 福建柏地理分布及随气候变化的分布格局模拟[J]. *生态学报*, 2025, 45(1): 137-146
- WENG H Y, LIU Y P, YANG Q Y, et al. The simulation of geographical distribution and distribution pattern along with climate change of *Chamaecyparis hodginsii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(1): 137-146
- [31] 刘晶晶, 张舟, 张权, 等. 基于参数优化MaxEnt模型的气候变化下青头潜鸭(*Aythya baeri*)在长江流域的潜在适生区预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(3): 295-307
- LIU J J, ZHANG Z, ZHANG Q, et al. Predicting the potential suitable areas of *Aythya baeri* in the Yangtze River Basin under the climate change scenario based on parameter optimization MaxEnt model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(3): 295-307
- [32] 吴开阳, 赵春娴, 吕红健, 等. 基于MaxEnt模型的厚唇裸重唇鱼当下潜在适宜分布[J]. *水生生物学报*, 2025, 49(3): 3-14
- WU K Y, ZHAO C X, LYU H J, et al. Potential suitable distribution of *gymnodiplocheilus pachycheilus* based on MaxEnt model[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(3): 3-14
- [33] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 496-502
- ZHANG Y B, LIU Y L, QIN H, et al. Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 496-502
- [34] 李政升, 马玉寿, 李有鑫, 等. 气候变化下青藏高原中亚紫菀木潜在适生区的时空动态变化[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1566-1575
- LI Z S, MA Y S, LI Y X, et al. Spatial and temporal variations of the potential habitat of *Asterothamnus centralasiaticus* on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1566-1575
- [35] 韩顺鑫, 余婷, 金正, 等. 不同气候情景下三种槐树在中国的潜在分布[J]. *生态学报*, 2025, 45(4): 1775-1787
- HAN S X, YU T, JIN Z, et al. Predicting potential distributions of three locust trees in China under different climate scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(4): 1775-1787
- [36] 贾翔, 王超, 金慧, 等. 基于优化的MaxEnt模型评价红松适宜分布区[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2570-2576
- JIA X, WANG C, JIN H, et al. Assessing the suitable distribution area of *Pinus koraiensis* based on an optimized MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8): 2570-2576
- [37] 郑梦月, 宋彦涛, 李彩琳, 等. 基于MaxEnt模型的黄花刺茄在北方农牧交错带潜在适生区分析[J]. *草地学报*, 2024, 32(12): 3905-3914
- ZHENG M Y, SONG Y T, LI C L, et al. Analysis of potential geographic distribution of *Solanum rostratum* based on optimized MaxEnt model in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(12): 3905-3914
- [38] 王心, 闫子怡, 游崇娟. 基于优化的MaxEnt模型预测环状镰孢的潜在适生区[J]. *菌物学报*, 2025, 44(2): 31-46
- WANG X, YAN Z Y, YOU C J. Prediction of the potential suitable areas for pine pitch canker pathogen *Fusarium circinatum* utilizing an optimized MaxEnt model[J]. *Mycosystema*, 2025, 44(2): 31-46
- [39] 王鹏森, 刘刚, 李旭旭, 等. 未来气候情景下垂穗披碱草在中国的潜在分布[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(2): 590-599
- WANG P S, LIU G, LI X X, et al. Potential distribution of *Elymus nutans* in China under future climate scenarios[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(2): 590-599
- [40] 郑度. 中国自然地理总论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 747-752
- ZHENG D. General physical geography of China [M]. Beijing: Science Press, 2015: 747-752
- [41] 史超逸, 朱媛君, 萨拉, 等. 中国三种常见蒿属植物潜在地理分布及其主导气候因子[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(2): 512-524
- SHI C Y, ZHU Y J, SA L, et al. Potential geographical distribution and the dominant climatic factors of three common *Artemisia* species in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2): 512-524
- [42] 迟晓峰, 韩琳. 对植物逆境胁迫的研究[J]. *种子科技*, 2019, 37(13): 122, 124

- CHI X F, HAN L. Study on plant adversity stress[J]. Seed Science & Technology, 2019, 37(13):122, 124
- [43] 鲁客, 贺一鸣, 毛伟, 等. 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11):3758-3766
- LU K, HE Y M, MAO W, et al. Potential geographical distribution and changes of *Artemisia ordosica* in China under future climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11):3758-3766
- [44] 张亚军, 王丽学, 陈超, 等. 植物对逆境的响应机制研究进展[J]. 江西农业学报, 2011, 23(9):60-65
- ZHANG Y J, WANG L X, CHEN C, et al. Research progress in response mechanism of plants to adversity stress[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(9):60-65
- [45] 杨斐, 张文韬, 张飞民, 等. 1961—2022年祁连山气候特征及其变化[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10):1627-1638
- YANG F, ZHANG W T, ZHANG F M, et al. Climate characteristics and variation in the Qilian Mountains from 1961 to 2022[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10):1627-1638
- [46] 庄晓纯, 王成, 洪维, 等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测蛇鳄龟在中国的潜在适生区域及其对未来气候变化的响应[J]. 生物安全学报(中英文), 2024, 33(4):393-401, 422
- ZHUANG X C, WANG C, HONG W, et al. Potential suitable habitats of *Chelydra serpentina* Linnaeus in China under future climate projection, based on MaxEnt and ArcGIS[J]. Journal of Biosafety, 2024, 33(4):393-401, 422
- [47] CHEN I C, HILL J K, OHLEMÜLLER R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science, 2011, 333(6045):1024-1026
- [48] ZHAN P, WANG F Y, XIA P G, et al. Assessment of suitable cultivation region for *Panax notoginseng* under different climatic conditions using MaxEnt model and high-performance liquid chromatography in China[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176:114416
- [49] WANG E, LU Z R, ROHANI E R, et al. Current and future distribution of *Forsythia suspensa* in China under climate change adopting the MaxEnt model[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1394799
- [50] 周佰铨, 翟盘茂. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象, 2023, 49(3):257-266
- ZHOU B Q, ZHAI P M. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(3):257-266
- [51] 吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 等. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(3):1164-1176
- LÜ Z W, ZHU X R, YE X Z, et al. Impacts of climate change on the suitable habitats and spatial migration of *Tetraena mongolica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3):1164-1176
- [52] 吐尔逊·哈斯木, 韩桂红, 石丽, 等. 历史时期以来气候环境与人类活动对塔里木盆地东部地区环境变迁的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3):55-61
- HASMU T, HAN G H, SHI L, et al. Impact of climate change and human activities on the environmental changes of the eastern part of Tarim basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(3):55-61
- [53] 周杰, 王旭虎, 杜维波, 等. 气候变化背景下的天山云杉潜在分布区预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7):1167-1176
- ZHOU J, WANG X H, DU W B, et al. Prediction of potential distribution area of *Picea schrenkiana* under the background of climate change[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7):1167-1176
- [54] XU W B, SVENNING J C, CHEN G K, et al. Human activities have opposing effects on distributions of narrow-ranged and widespread plant species in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(52):26674-26681
- [55] 李春霞, 陈怀斌. 祁连山生态环境的修复[J]. 中国畜牧业, 2018(14):63-64
- LI C X, CHEN H B. Restoration of ecological environment in Qilian Mountains[J]. China Animal Industry, 2018(14):63-64
- [56] 冯金元, 蒋志仁, 冯宏元, 等. 人类活动对祁连山保护区生态环境的影响[J]. 中国林副特产, 2024(3):23-25
- FENG J Y, JIANG Z R, FENG H Y, et al. Effects of human activities on ecological environment of Qilian Mountain protected area[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2024(3):23-25
- [57] KONG F, TANG L, HE H, et al. Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using Maxent[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(26):34655-34663
- [58] 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[J]. 生态学报, 2021, 41(20):8135-8144
- YE X Z, ZHANG M Z, LAI W F, et al. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20):8135-8144

(责任编辑 闵芝智)