

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.025

引用格式:才让扎西,刘玉萍,苏旭,等.气候变化背景下青藏高原特有属固沙草属物种潜在适生区预测[J].草地学报,2026,34(4):1430–1442

CAIRANG Zha-xi, LIU Yu-ping, SU Xu, et al. Prediction of the Potential Suitable Habitat of *Orinus* (Poaceae), an Endemic Genus to the Qinghai-Xizang Plateau under the Background of Climate Change[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1430–1442

气候变化背景下青藏高原特有属固沙草属物种 潜在适生区预测

才让扎西^{1,2}, 刘玉萍^{1,2,3}, 苏旭^{1,2,3*}, 曲荣举^{1,2}, 韦凯悦^{1,2}, 冯旭^{1,2},
孙成林^{1,2}, 张凯棋¹

(1. 青海师范大学生命科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 青海师范大学青海省青藏高原生物多样性形成机制与综合利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016)

摘要:本研究旨在明确气候变化背景下固沙草(*Orinus thoroldii*)、青海固沙草(*O. kokonoricus*)和居间固沙草(*O. intermedius*)的潜在适生区。基于物种分布记录与气候因子数据,运用MaxEnt模型与ArcGIS软件进行空间模拟与预测。结果表明,模型预测精度较高(AUC>0.95);影响固沙草适生区分布的关键环境因子为海拔,青海固沙草为最湿季度平均温度,居间固沙草为平均气温日较差。历史时期分析显示,末次间冰期至全新世中期固沙草与青海固沙草的适生区面积减少,居间固沙草增加;未来气候情景下,固沙草与青海固沙草的适生区呈“先增后减”趋势,居间固沙草呈“先减后增”趋势;当前适生区格局表现为固沙草集中于青藏高原西南部,青海固沙草分布于东部,居间固沙草分布于中部与东北部。青藏高原西南、东部、东北及中部为固沙草属高适生区,建议加强就地保护以应对未来气候变化带来的生态压力。

关键词:固沙草属;气候变化;潜在适生区;MaxEnt模型

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1430-13

Prediction of the Potential Suitable Habitat of *Orinus* (Poaceae), an Endemic Genus to the Qinghai-Xizang Plateau under the Background of Climate Change

CAIRANG Zha-xi^{1,2}, LIU Yu-ping^{1,2,3}, SU Xu^{1,2,3*}, QU Rong-ju^{1,2}, WEI Kai-yue^{1,2}, FENG Xu^{1,2},
SUN Cheng-lin^{1,2}, ZHANG Kai-qi¹

(1. School of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 2. Key Laboratory of Biodiversity Formation Mechanism and Comprehensive Utilization of the Qinghai-Xizang Plateau in Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: This study aimed to clarify the potential suitable habitats of three *Orinus* species, including *O. thoroldii*, *O. kokonoricus* and *O. intermedius*, under the background of climate change. Based on the data of species distribution records and climate variables, MaxEnt model and ArcGIS were applied to conduct spatial simulation and prediction of three *Orinus* species. The results showed that the predictive accuracy was high (AUC>0.95). The key environmental factor influencing habitat suitability was altitude for *O. thoroldii*, the mean temperature of the wettest quarter was the main factor for *O. kokonoricus*, while the mean diurnal temperature range was the key one for *O. intermedius*. From the Last Interglacial to the Mid-Holocene, the suitable area for *O. thoroldii* and *O. kokonoricus* decreased, while that for *O. intermedius* increased. Under the future cli-

收稿日期:2025-05-21;修回日期:2025-10-20

基金项目:青海省重点研发与转化计划-国际合作专项(2022-HZ-802);国家自然科学基金项目(32360305)资助

作者简介:才让扎西(2001-),男,藏族,青海化隆人,硕士研究生,主要从事高山植物系统与进化研究, E-mail: cairangzhaxi161915@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: xusu8527972@126.com

mate scenarios, the suitable area of *O. thoroldii* and *O. kokonoricus* showed an initial increase followed by a decrease, whereas the opposite trend was observed for *O. intermedius*. Currently, the high suitable area of *O. thoroldii* was mainly located in the southwest of the Qinghai-Xizang Plateau, that of *O. kokonoricus* was in the east of the Qinghai-Xizang Plateau, while that of *O. intermedius* was in the central part and northeast of the Qinghai-Xizang Plateau. We thought that the high suitable habitat of *Orinus* species was in the southwest, east, northeast and central parts of the Qinghai-Xizang Plateau. It is suggested to strengthen in situ protection to cope with the pressure brought by future climate change.

Key words: *Orinus*; Climate change; Potential suitable habitat; MaxEnt model

全球气候变化直接影响物种的栖息环境,如生态系统结构和功能^[1]、植物物候^[2]、水热环境^[3]等,进而对植物的地理分布格局造成深刻影响^[4]。青藏高原地区对气候变化尤为敏感^[5],许多学者认为水热条件是影响青藏高原地区植物分布的关键因素^[6],气候变化对青藏高原水热条件的影响^[3],导致该地区植物将向更高纬度和更高海拔地区迁移^[7]。全球气候变化背景下,青藏高原地区植物生存受到严重威胁^[8],了解气候变化对植物地理分布格局的影响可为青藏高原地区物种保护奠定基础^[9]。

物种分布模型是评价气候变化对物种分布影响的有力工具之一^[10],其中最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型具有仅依靠物种分布点及环境数据便能进行预测^[11]、运算效率高、且样本量相对较小时仍能保持较好预测性能等优点^[12]。近年来,MaxEnt模型因预测气候变化对植物(如高山栎组(*Quercus sect. heterobalanus*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等)、黑紫披碱草(*Elymus atratus*)和紫芒披碱草(*Elymus purpurastatus*)分布影响研究中展现出优秀的预测能力而得到广泛应用^[13-15],如国际热带农业中心(CIAT)曾利用该模型预测了全球气候变化下主要产区小粒咖啡适宜性变化^[16],窦全慧等^[17]利用该模型预测龙胆科在青藏高原的生境适宜性;王鹏森等^[18]采用MaxEnt模型预测了垂穗披碱草(*Elymus nutans*)未来气候背景下中国的潜在分布,结果表明限制垂穗披碱草分布的主要环境因子是年平均气温、最暖月最高温、等温性、最干月降水量、海拔及人为干扰指数,总潜在分布面积呈增大趋势,质心位置变化向西南迁移后再向东北迁移,认为气候变化对垂穗披碱草分布具有重要影响。

固沙草属(*Orinus*)隶属于禾本科(Poaceae)、画眉草族(Eragrostideae)、三齿稃亚族(Tridentinae)的一个高山特有属^[19],主要分布于青藏高原及其毗邻的高山地区^[20]。已有研究表明,固沙草属仅包含固沙草(*O. thoroldii*)、青海固沙草(*O. kokonoricus*)

和居间固沙草(*O. intermedius*)3个种,其中青海固沙草为国家重点二级保护植物,各自分布在青藏高原的西南部、东部和东北部^[21]。该属具有较强的耐寒、耐旱、耐碱以及抗病、抗风沙能力,同时具有发达的根系,因而是保土固沙重要的种质资源,也是极端荒漠及沙地环境植被主要组成部分,同时也是畜牧业上的主要牧草^[22];所有物种的花序相对粗长,穗大粒多,加之抗逆性强的优点,是农、牧业上禾草良种繁育的重要基因资源^[23]。近年来,国内外学者对固沙草属3个物种的研究主要集中在物种分类^[24]、谱系地理学^[25]、遗传分化^[26]、营养成分^[27]、比较转录组^[28]和基因组学^[29]等诸多领域。固沙草属物种作为青藏高原生态屏障的关键组分和重要抗逆基因库,明确未来适生区变化不仅能直接服务于高原土地沙化防治与生态修复这一国家战略需求,更能从宏观上揭示高山特有类群应对环境变迁的适应性机制,为指导青海固沙草等国家重点保护植物精准保育及未来农牧业抗逆种质资源可持续利用提供关键依据。

据此,本研究运用MaxEnt模型和ArcGIS软件对固沙草属物种末次冰盛期(LGM)、全新世中期(MH)、末次间冰期(LIG)、当前时期(1970—2000)、2050s和2070s 6个时期在青藏高原的分布格局进行模拟预测,结合分布格局变化和影响固沙草属物种青藏高原分布的环境因子进行分析,推测产生这种分布格局的成因,以期对固沙草属种质资源保护、资源开发与可持续利用等提供有效的理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

固沙草属物种地理分布数据主要来源于课题组自2017年至2025年野外实地调查、全球生物多样性数据库(<https://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)、中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn>)以及公开发

表的文献资料等;采用 Google Earth 核对固沙草属样本经纬度坐标信息,剔除重复记录,排除行政区域(省、县)与《中国植物志》记载完全不符记录;之后将数据设置为 .csv 格式导入到 ArcGIS 10.8 软件

中,运用 ENMTools 软件对固沙草属物种地理分布数据进行缓冲区分析,最终确定固沙草、青海固沙草和居间固沙草的地理分布点为 57 个、42 个和 5 个(图 1)。

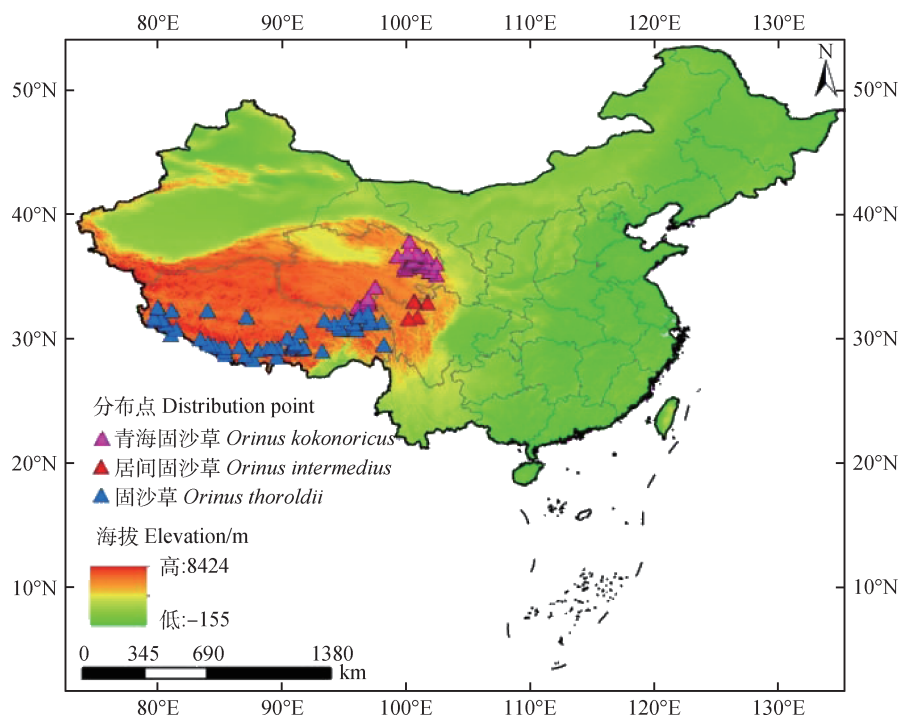


图 1 固沙草属物种的地理分布位点

Fig. 1 Geographical distribution sites of the *Orinus* species

注:基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图无修改

Note: This map is based on the standard map of GS(2024) 0650, downloaded from the National Platform for Common GeoSpatial Information Service. The base map is not modified

1.2 环境数据获取与筛选

访问全球气候数据库 WorldClim2.1 (<https://www.worldclim.org>),选择气候模拟和预测方面表现出色,尤其东亚季风气候、降水模拟及灾害风险预测等方面具有显著优势的 BCC-CSM2-MR 模式^[30],选取 RCP4.5(representative concentration pathway, RCP)浓度路径,RCP4.5 代表全球二氧化碳中度排放情景,下载末次间冰期、末次冰盛期、全新世中期、当前(1970—2000)和未来(2050s、2070s)共 6 个时期的 19 个气候变量和海拔数据^[31],空间分辨率为 2.5 minutes 的气候数据(约 1 km²),地形数据来源于 EarthEnv 数据库 (<http://www.earthenv.org/>),空间分辨率为 2.5 arc-minutes,采用中国标准行政区划数据 GS(2024)0650 号作为底图,在 ArcGIS 10.8 中对 6 个时期的 19 个气候因子数据进行裁剪,获得相应时期的中国气候图层^[32]。因各气候因子之间存在一定的相关性,若不进行筛选容易导致物种分布模

型的过度拟合。因此为了减弱环境变量间自相关性等问题导致的模型预测拟合度过高或产生偏差,本研究先提取固沙草属不同地理分布点的环境变量属性值,利用 SPSS 24.0 软件计算皮尔逊积矩相关系数,剔除相关系数较高($|r| > 0.80$)的环境因子,获得彼此间不相关或相关性较低的环境因子并导入到 MaxEnt 模型建模,经 10 次重复处理后选取 20 个环境变量进行模型分析(表 1)。

1.3 模型建立、优化和评估

筛选的固沙草属地理分布位点和环境因子导入 MaxEnt version 3.4.1 模型建模;采用 R-3.6.3 软件“Kuenm”包优化 MaxEnt 模型要素类型和正则化乘数,选择 Q(Quadratic features)、T(Threshold features)、H(Hinge features)要素类型,正则化乘数 1.6;随机选择分布点的 25% 用于测试模型,75% 用于建模,设置重复运算次数 10 次,勾选刀切法(Jack-

表 1 本研究使用的环境数据
Table 1 Environmental data used in this study

变量描述 Variable description	名称简写 Abbreviated name	单位 Unit
年平均气温 Annual mean temperature	Bio1	℃
平均气温日较差 Mean diurnal range	Bio2	℃
等温性 Isothermality (Bio2/Bio7) (× 100)	Bio3	%
气温季节性变化方差 Temperature seasonality (standard deviation × 100)	Bio4	℃
最暖月最高温度 Max temperature of warmest month	Bio5	℃
最冷月最低温度 Min temperature of coldest month	Bio6	℃
年均温变化范围 Temperature annual range (Bio5—Bio6)	Bio7	℃
最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter(× 10)	Bio8	℃
最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter(× 10)	Bio9	℃
最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter(× 10)	Bio10	℃
最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter(× 10)	Bio11	℃
年降水量 Annual precipitation	Bio12	mm
最湿月降水量 Precipitation of wettest month	Bio13	mm
最干月降水量 Precipitation of driest month	Bio14	mm
降水量季节性变化方差 Precipitation seasonality (coefficient of variation)	Bio15	%
最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	Bio16	mm
最干季度降水量 Precipitation of driest quarter	Bio17	mm
最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	Bio18	mm
最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter	Bio19	mm
海拔 Altitude	Alt	m

knife)衡量环境因子相对重要性,输出 ASCII 结果文件,其余参数设为默认值^[33];MaxEnt 模型自动生成 ROC 曲线(接受者操作特征曲线)和 AUC 值(ROC 曲线下面积)验证模型结果准确性^[34]。AUC 值越高,模型模拟物种空间分布越接近物种实际分布。一般认为,AUC 取值范围为 0.5~1.0^[35],其中 0.5~0.7 表示模型结果可信度较低,0.8~0.9 表示可信度中等,0.9~1.0 表示可信度较高^[36]。MaxEnt 预测结果导入 ArcGIS 10.8 软件,利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)划分适生区,共划分四个等级^[37]:高适生区(0.70~1.00)、中适生区(0.40~0.70)、低适生区(0.09~0.40)和非适生区(0.00~0.09)确定固沙草属物种的潜在分布区,分别统计各适生区的面积。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型优化和准确性评价

受试者工作特征曲线表明,MaxEnt 模型重复运算 10 次后得到固沙草 ROC 曲线下面积 AUC 平均值为 0.986,标准差为 0.004,远大于随机测试值 0.5;青海固沙草 ROC 曲线下面积 AUC 平均值为 0.985,标准差为 0.014,远大于随机测试值 0.5;居间固沙草 ROC 曲线下面积 AUC 平均值为 0.997,

标准差为 0.002,远大于随机测试值 0.5(图 2),说明固沙草、青海固沙草和居间固沙草潜在分布区预测结果准确率好、可信度高。

2.2 固沙草属物种潜在分布区环境影响因子

本研究结果显示,固沙草适生区的主要环境影响变量是海拔(Alt)、最干季度平均温度(Bio9)和年平均气温(Bio1),累计贡献率为 86.6%,置换重要性为 83.6%;影响青海固沙草适生区的主要环境变量为最湿季度平均温度(Bio8)、海拔(Alt)和和降水量季节性变化方差(Bio15),累计贡献率为 65.6%,置换重要性为 64.7%;居间固沙草适生区的主要环境影响变量为平均气温日较差(Bio2)、海拔(Alt)和最冷季度降水量(Bio19),累计贡献率为 89.4%,置换重要性为 95.4%(表 2)。由图 3 可知,海拔对固沙草适生区分布的影响最大,最干季度平均温度和年平均气温影响次之;青海固沙草适生区分布的最主要影响因子为最湿季度平均温度,其次是海拔和降水量季节性变化方差;居间固沙草适生区分布的最主要影响因子为平均气温日较差、海拔和最冷季度降水量。在此变量下,海拔的正规化训练增益值最小,说明固沙草和青海固沙草的适生区分布预测中海拔具有其他多种变量没有的信息,居间固沙草中平均气温日较差具有其他诸多变量没有的信息。

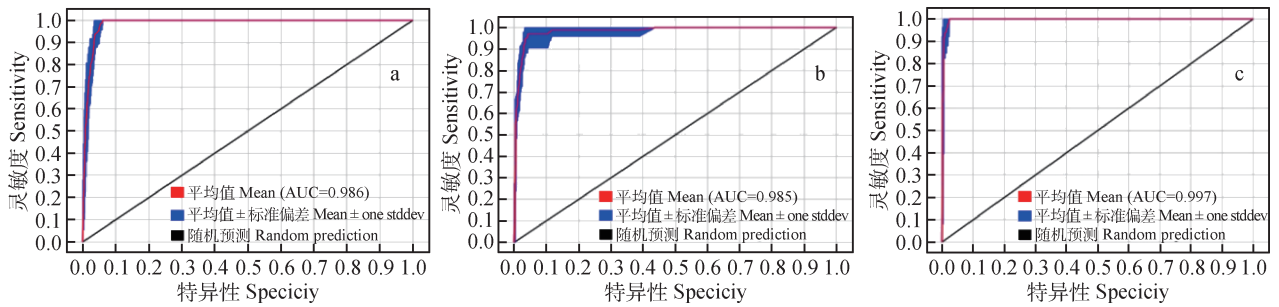


图 2 基于 MaxEnt 模型的固沙草属预测结果 ROC 曲线验证

Fig. 2 ROC curve verification of *Orinus* predicted by MaxEnt model

注:a固沙草;b青海固沙草;c居间固沙草。下同

Note: a *O. thoroldii*; b *O. kokonoricus*; c *O. intermedius*. The same as below

表 2 MaxEnt 模型各主导环境变量的重要性

Table 2 Importance of each dominant environment variable in MaxEnt model

物种 Species	变量 Variable	贡献率 Contribution rate/%	置换重要性 Permutation importance/%
固沙草 <i>O. thoroldii</i>	Alt	59.4	71.9
	Bio9	19.1	7.2
	Bio1	8.1	4.5
青海固沙草 <i>O. kokonoricus</i>	Alt	29.2	4.1
	Bio8	20.8	54.9
	Bio15	15.6	5.7
居间固沙草 <i>O. intermedius</i>	Bio2	38.3	23
	Alt	32.5	43.2
	Bio19	18.6	29.2

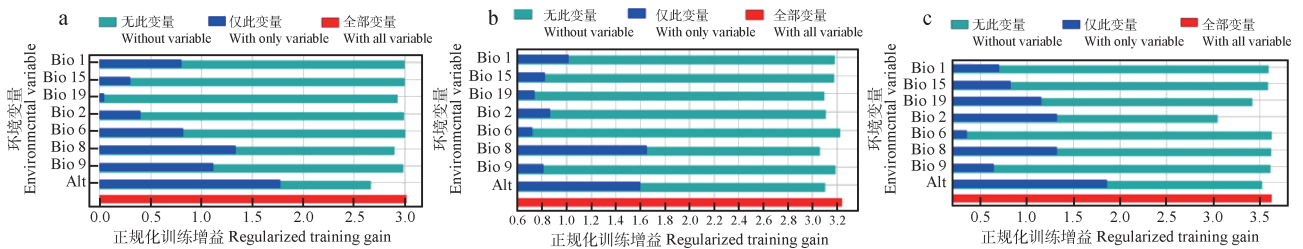


图 3 基于 MaxEnt 模型环境变量重要性的刀切法检验

Fig. 3 Jackknife test of the environmental variable importance based on MaxEnt model

注:a,固沙草;b,青海固沙草;c,居间固沙草。下同

Note: a, *O. thoroldii*; b, *O. kokonoricus*; c, *O. intermedius*. The same as below

2.3 固沙草属物种地理分布对环境因子响应

先前研究认为,当物种存在概率大于0.5时被认为是最有利于物种的生长范围^[34]。单因子响应曲线结果显示,固沙草在海拔774 m以下几乎不存在,随海拔升高其存在概率增大,于4080 m处达到峰值,最适海拔范围为3709~4605 m(图4a);同时,存在概率在最干季度平均温度-3.7℃和年平均气温18.9℃时达到峰值(图4b,4c)。青海固沙草的最适海拔范围为2705~4203 m,峰值位于3040 m;最

湿季度平均温度的最适范围为9.4~13.1℃,峰值在10.1℃;降水量季节性变化最适方差为92.6%~99.4%,峰值在98.7%(图4d-f)。居间固沙草的最适海拔范围为3375~4011 m,峰值位于3626 m;平均气温日较差适宜范围为15.5~17.2℃;最冷季度降水量在13.9~18.3 mm时最适宜生长,峰值出现在15.6 mm,超过17.4 mm后存在概率急剧下降,而低于9.6 mm或高于71.1 mm时几乎无法生存(图4g-i)。

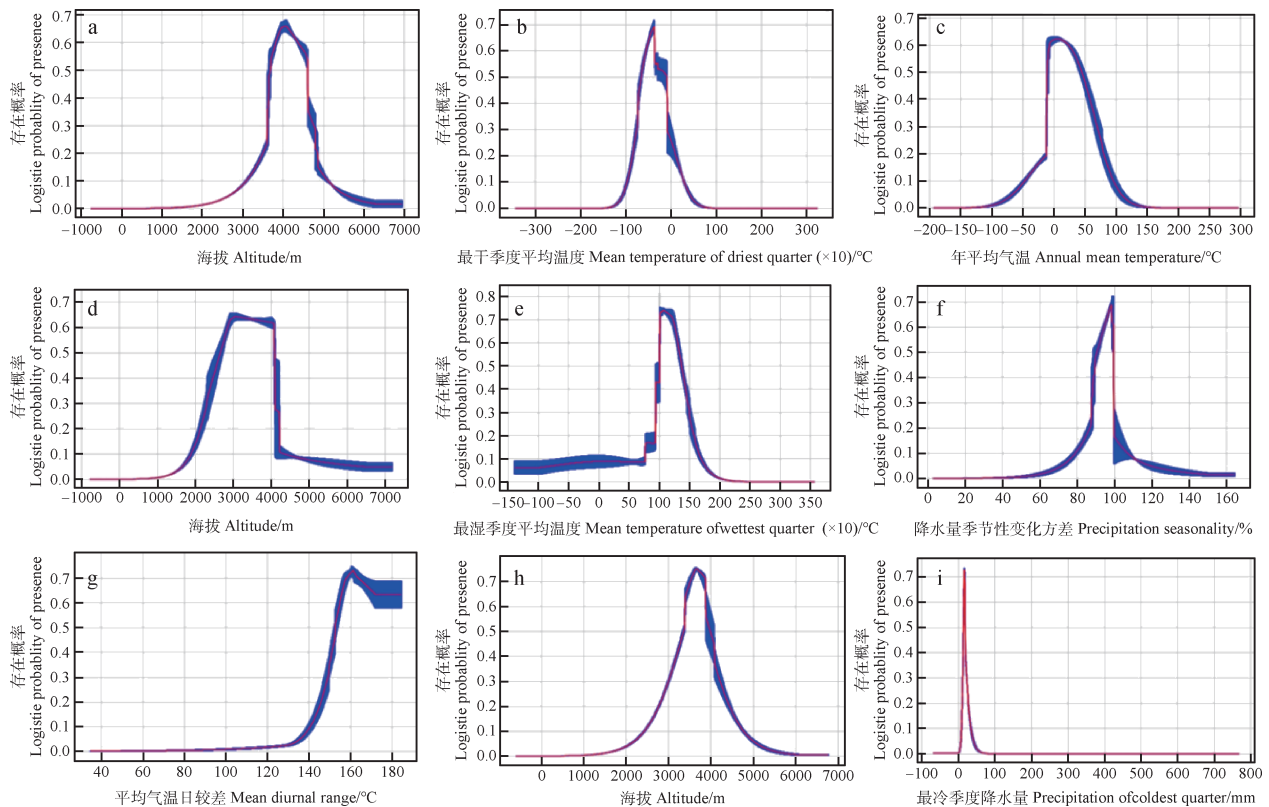


图4 主要环境变量的响应曲线

Fig. 4 Response curves of major environmental variables

注:影响固沙草分布的主导环境因子。a 海拔、b 最干季度平均温度、c 年平均气温;影响青海固沙草分布的主导环境因子:d 海拔、e 最湿季度平均温度、f 降水量季节性变化方差;g 影响居间固沙草分布的主导环境因子:h 平均气温日较差;i 海拔;j 最冷季度降水量

Note: The dominant environmental factors affect the distribution of *O. thoroldii*. a, Altitude; b, Mean temperature of driest quarter; c, Annual mean temperature; d, The dominant environmental factors affecting the distribution of *O. kokonoricus*, e, Altitude; f, Mean temperature of wettest quarter; g, Precipitation seasonality; h, The dominant environmental factors affecting the distribution of *O. intermedius*, i, Mean diurnal range; j, Altitude; i, Precipitation of coldest quarter

2.4 不同气候变化背景下固沙草属物种潜在分布区

不同时期固沙草适生区分布和预测面积存在变化。末次冰盛期(LGM)和全新世中期(MH),固沙草主要分布于青藏高原南部和东南部,西北部也有少量分布,高适生区面积分别为 $18.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $18.40 \times 10^4 \text{ km}^2$;末次间冰期(LIG),固沙草分布区面积大幅缩减,主要集中于青藏高原东南部和东北部,低适生区面积显著增加,为 $51.09 \times 10^4 \text{ km}^2$,同时向甘肃中东部地区存在扩张趋势;当前时期,固沙草高适生区面积减少至 $9.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布于青藏高原西南部,非适生区面积增加至 $897.99 \times 10^4 \text{ km}^2$;未来2050s,固沙草高适生区面积预计显著增加至 $42.21 \times 10^4 \text{ km}^2$,青藏高原南部和部分中部地区存在大面积连续分布,可能是气候变化导致青藏高原南部环境条件适宜生长;2070s,固沙草适宜分布区面积明显收缩,高适生区面积为 $8.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,与当前时期大致相似,认为气温和降水模式变化致使固

沙草适宜生长区域再次缩减,固沙草分布可能随气候条件变化而继续调整(图5和表3)。

当前气候条件下,青海固沙草主要位于青藏高原东部,南部也有少量分布,总适生区面积显著低于其他时期,约为 $53.32 \times 10^4 \text{ km}^2$;末次冰盛期(LGM),青海固沙草分布区位于青藏高原东部和南部,高适生区面积为 $9.21 \times 10^4 \text{ km}^2$;全新世中期(MH),青海固沙草高适生区面积减少至 $7.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布区变化不大;末次间冰期(LIG),青海固沙草高低适生区面积有所回升;未来2050s,青海固沙草高适生区面积预计回升至 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$,2070s进一步增加至 $9.21 \times 10^4 \text{ km}^2$,表明气候变化可能使青藏高原东部和南部地区重新成为适宜青海固沙草生长的地区(图6和表4)。

末次冰盛期(LGM)、全新世中期(MH)和末次间冰期(LIG),居间固沙草的高适生区主要集中于青藏高原东北部和部分中部地区,适生区总面积略

有缩减,分别为 $28.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $24.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $23.22 \times 10^4 \text{ km}^2$;当前气候条件下,居间固沙草适生区有所扩张,尤其青藏高原中部和东北部,总适生区面积为 $35.22 \times 10^4 \text{ km}^2$;未来 2050s,居间固沙草适生区面积略有减少,总面积和分布区域与末次冰

盛期(LGM)基本一致;2070s,居间固沙草高适生区分布面积与当前时期相同,分布区保持在青藏高原中部和东北部,表明未来居间固沙草适生区可能会随气候变化经历一些小的波动,但青藏高原分布总体保持相对稳定(图 7 和表 5)。

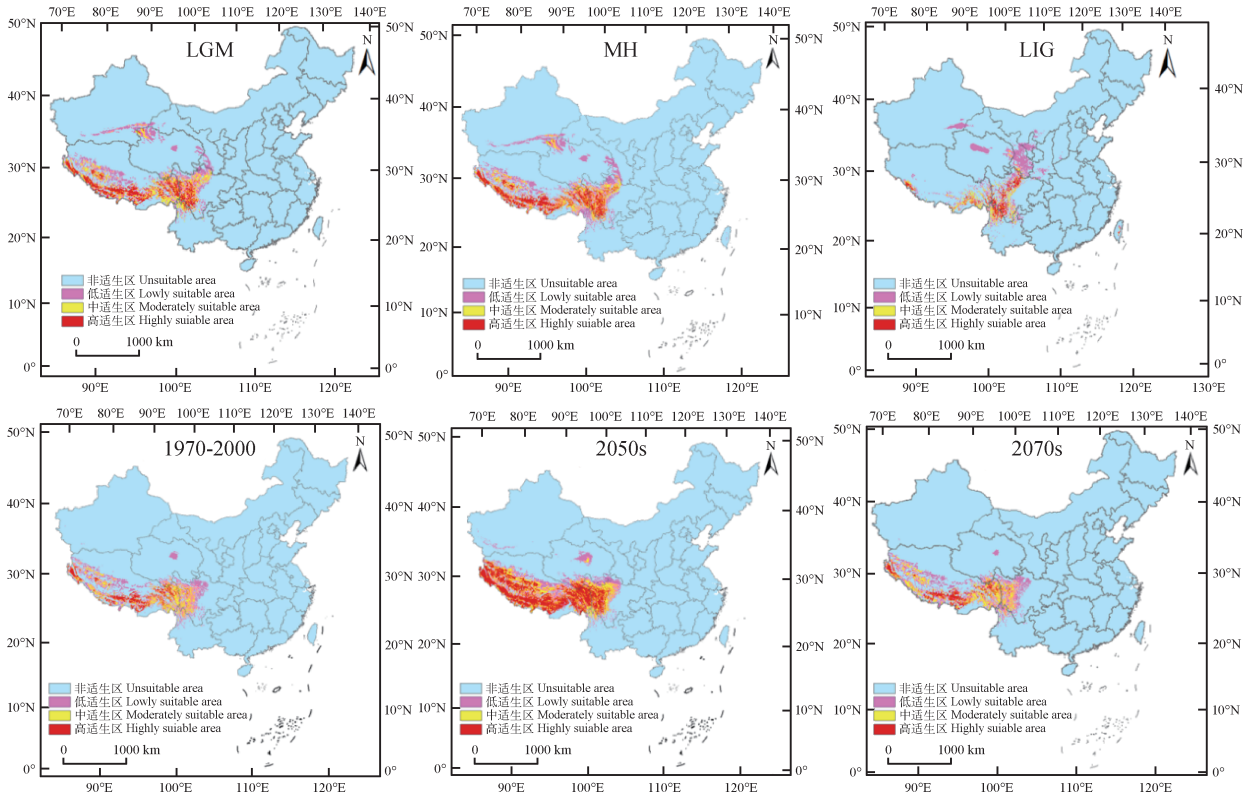


图 5 不同气候变化背景下固沙草的潜在适生区分布

Fig. 5 Potential habitat distribution of *O. thoroldii* under different climatic conditions

注:LGM,末次冰盛期;MH,全新世中期;LIG,末次间冰期。下同。基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2024)0650号标准地图制作,底图无修改

Note: LGM, Last Glacial Maximum; MH, Mid-Holocene; LIG, Last Interglacial. The same below. This map is based on the standard map of GS (2024) 0650, downloaded from the National Platform for Common GeoSpatial Information Service. The base map is not modified

表 3 固沙草潜在适生区面积变化

Table 3 Change of potential suitable area of *O. thoroldii*

时期 Period	预测面积 Prediction area/($\times 10^4 \text{ km}^2$)			
	高适生区 Highly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	低适生区 Low suitable area	非适生区 Unsuitable area
末次冰盛期 LGM	18.20	23.34	39.89	878.57
全新世中期 MH	18.40	22.60	42.86	876.14
末次间冰期 LIG	17.96	23.52	51.09	867.42
当前 Current	9.15	19.92	32.94	897.99
2050s	42.21	31.10	34.06	852.63
2070s	8.63	20.52	33.33	897.53

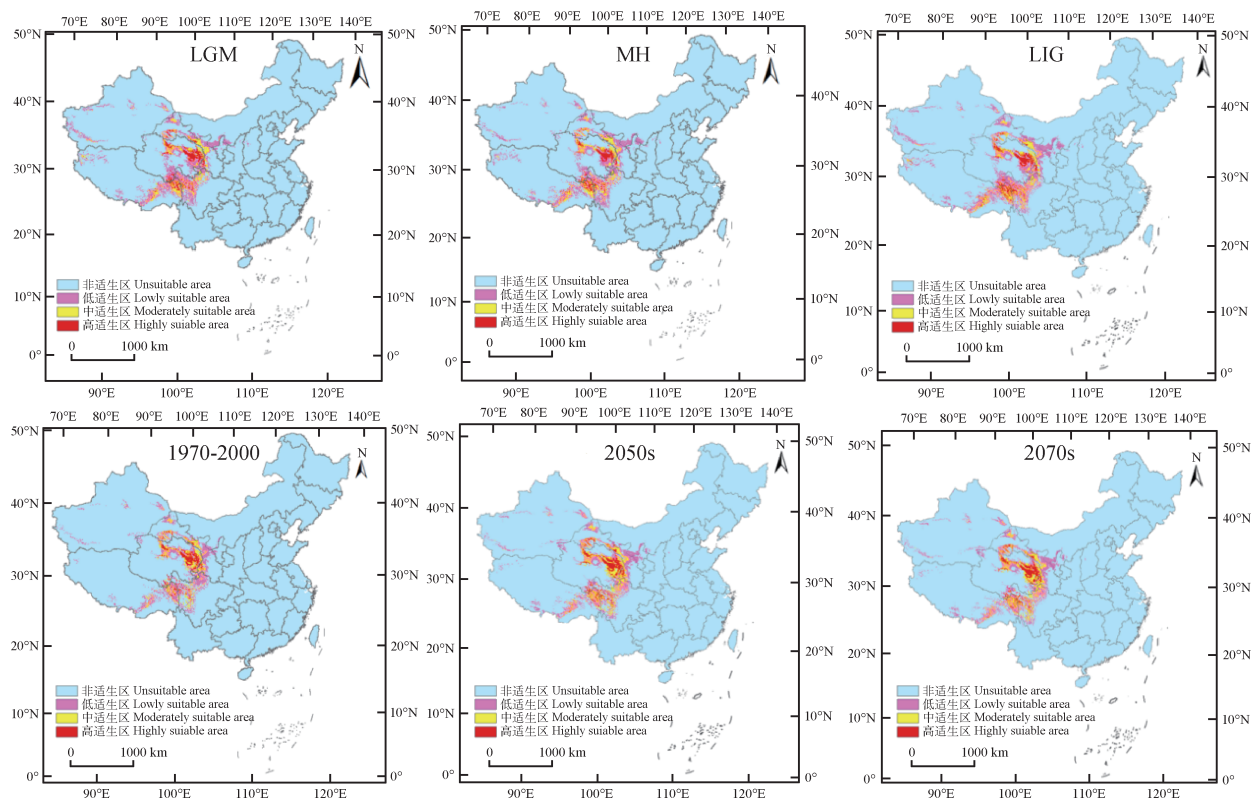


图 6 不同气候变化背景下青海固沙草的潜在适生区分布

Fig. 6 Potential habitat distribution of *O. kokonoricus* under different climatic conditions

注:基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2024)0650号标准地图制作,底图无修改

Note: This map is based on the standard map of GS (2024) 0650, downloaded from the National Platform for Common GeoSpatial Information Service. The base map is not modified

表 4 青海固沙草潜在适生区面积变化

Table 4 Change of potential suitable area of *O. kokonoricus*

时期 Period	预测面积 Prediction area/($\times 10^4 \text{ km}^2$)			
	高适生区 Highly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	低适生区 Low suitable area	非适生区 Unsuitable area
末次冰盛期 LGM	9.21	16.22	47.69	886.88
全新世中期 MH	7.39	16.27	44.13	892.21
末次间冰期 LIG	8.67	16.75	49.07	885.50
当前 Current	6.95	13.87	32.50	906.68
2050s	9	15.38	44.83	887.25
2070s	9.21	12.44	37.17	898.30

3 讨论

3.1 模型评价

物种分布模型(SDMs)的可靠性高度依赖于模型选择、参数优化及分布点数据质量^[38]。本研究将固沙草的模拟范围限定于中国境内,主要考虑全球公开的固沙草有效分布点中98%以上位于中国西北干旱半干旱区,仅2个位点记录于蒙古西南部,但缺乏标本凭证和精确坐标,难以验证;同时,该物种模式标本采自青海湖地区,典型群落为中国西北特有

沙化草地类型,中亚及蒙古未见明确伴生记录,故限定研究范围以保障数据准确性。MaxEnt模型基于最大熵原理,利用物种已知分布点推测潜在分布。Philips等^[39]指出,MaxEnt模型能有效减少抽样偏差,兼容连续与分类变量,考虑变量间交互作用,从而揭示环境因子与物种适宜性的关系。AUC值是评估模型精度的重要指标,可通过参数调试优化。本研究运用MaxEnt预测固沙草属3个物种的潜在适生区,所得AUC值均大于0.9,显示预测精度较高。所选20个环境因子涵盖范围广、空间分辨率达

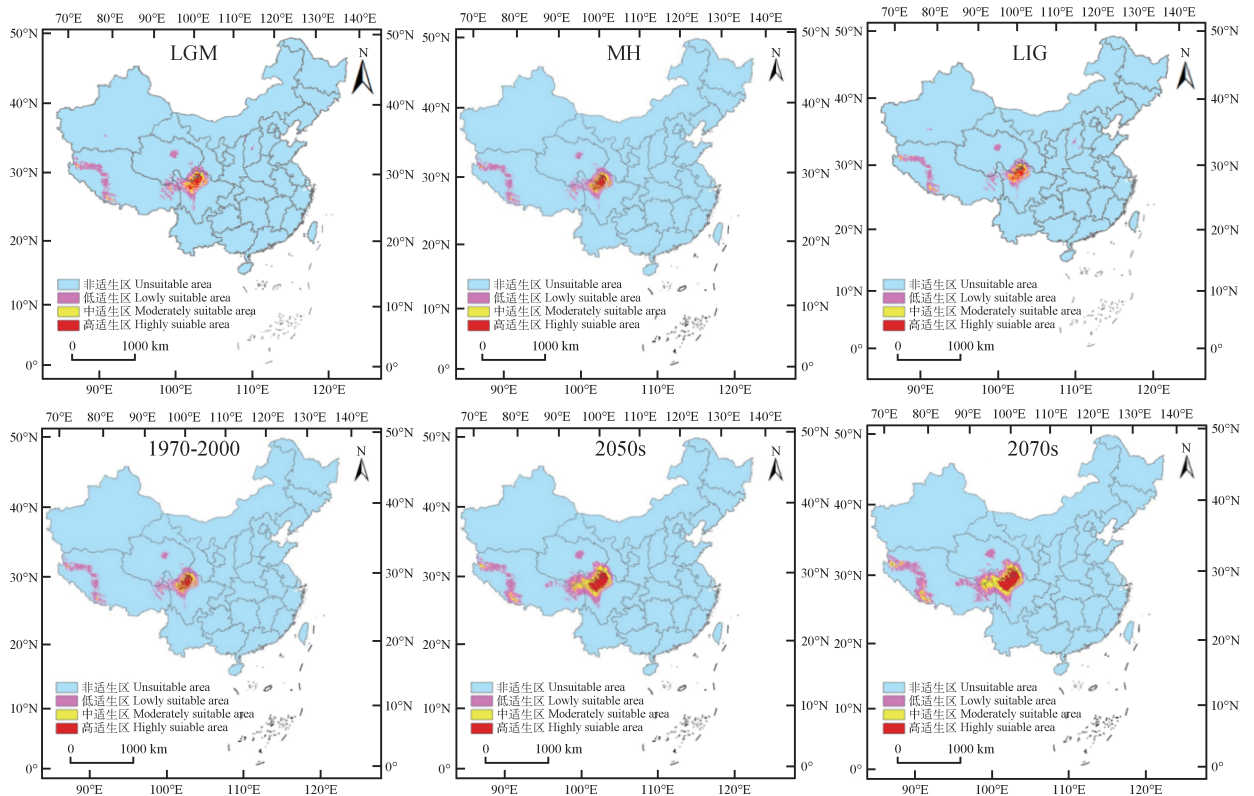


图 7 不同气候变化背景下居间固沙草的潜在适生区分布

Fig. 7 Potential habitat distribution of *O. intermedium* under different climatic conditions

注:基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2024)0650号标准地图制作,底图无修改

Note: This map is based on the standard map of GS (2024) 0650, downloaded from the National Platform for Common GeoSpatial Information Service. The base map is not modified

表 5 居间固沙草潜在适生区面积变化

Table 5 Change of potential suitable area of *O. intermedium*

时期 Period	预测面积 Prediction area/($\times 10^4 \text{ km}^2$)			
	高适生区 Highly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	低适生区 Low suitable area	非适生区 Unsuitable area
末次冰盛期 LGM	2.63	4.34	21.64	931.39
全新世中期 MH	2.58	3.91	17.95	935.57
末次间冰期 LIG	2.42	3.74	17.06	936.79
当前 Current	3.00	5.42	26.80	924.78
2050s	2.64	4.41	22.28	930.66
2070s	3.00	5.42	26.80	924.78

5×5 km²,保障了模型结果的可靠性。然而,即便模型尽可能涵盖物种生态位需求,预测适生区仍常大于实际分布^[36],原因包括物种扩散限制、生物相互作用以及人类活动影响等^[40-41]。人类活动如放牧、砍伐等干扰尤为显著,曹倩等^[42]研究青藏高原植物分布时指出,人类活动因素可导致实际分布偏离预测,建议未来模型纳入更全面的生物与非生物因子以提高准确性。本研究通过 MaxEnt 模拟未来气候变化下固沙草属物种在中国的适生区变化,以期为该属种质资源保护与可持续利用提供理论参考。

3.2 影响固沙草属物种分布的主要环境因子

先前研究表明,物种潜在分布区受多种环境因子的共同作用,反映了物种对气候变化的响应^[43]。本研究发现,固沙草适生区主要受海拔、最干季度平均温度(Bio9)和年平均气温(Bio1)制约,青海固沙草适生区主要受最湿季度平均温度(Bio8)、海拔和降水量季节性变化方差(Bio15)影响,居间固沙草适生区主要受平均气温日较差(Bio2)、海拔和最冷季度降水量(Bio19)限制,因此固沙草属 3 个物种的潜在分布区均受到海拔、温度和降水等主要环境因

子影响。譬如,李小莉等^[44-45]利用MaxEnt模型分别预测了唐古红景天(*Rhodiola tangutica*)和瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)的适生区,同样发现这两个物种的适宜分布区均位于高海拔地区,认为海拔是影响两个物种分布的主要环境因子;张秀娟等^[46]通过对青海省三江源地区雪灵芝潜在分布的研究发现降水对雪灵芝(*Arenaria brevipetala*)的分布响应更为敏感;胡华伟等^[47]研究青藏高原濒危植物山茛菪(*Anisodus tanguticus*)和铃铛子(*Anisodus luridus*)潜在分布时,发现海拔、年降水量、等温性和最冷季平均温度是山茛菪和铃铛子潜在分布的主要环境影响因子,本研究的结果与先前诸多研究极其相似,说明高海拔地区分布物种的生长和发育主要受到海拔、温度和降水因子等环境因子的共同制约。

3.3 固沙草属物种潜在适生区的分布

植物空间分布格局是物种长期适应气候并达到动态平衡的结果,理解气候变化对植物分布的影响,对种质资源保护与可持续利用有重要意义。生态位宽度较大的物种环境适应能力更强^[48]。研究表明,末次间冰期(LIG)、末次冰盛期(LGM)、中全新世(MH)及当代与未来气候情景下固沙草的适生区面积始终大于青海固沙草和居间固沙草。历史气候分析显示,LIG为近150 ka来最暖时期,气候波动剧烈^[49];LGM时期平均气温较现代低约9℃,寒冷干燥,以高山荒漠植被为主^[50-53];至MH阶段,气温上升、降水增加,植被生长更为旺盛^[54-56];全新世中晚期,气候变化呈现从干冷到暖湿或从暖湿到干冷转变^[57]。模拟结果表明,LIG到MH随着水热条件改善,固沙草属物种适生区范围逐步扩大。LGM时期,青海固沙草与居间固沙草适生区面积相对较大,青海固沙草高、低适生区扩展至青藏高原东部和南部。研究指出,LGM时期高原东部以禾本科植被为主^[58],可能为青海固沙草提供了适宜生境。居间固沙草LGM后适生区进一步扩展,主要分布于高原东北部与中部地区。纳木错孢粉记录显示,高原北部存在大量禾本科孢粉^[59],推测因地形阻挡与湖泊调节形成的局部小气候^[60-61],为居间固沙草提供了生存条件。未来气候情景下,2050年代青藏高原南部及部分中部地区趋于暖湿,温度接近物种最适生长阈值,原有低适生区转为高适生区,面积显著增加,符合水热条件改善促使物种分布扩展的规律^[62]。然而,2070年代持续升温与降水季节性失衡导致水热

关系破坏^[63],高适生区大幅收缩至接近当代水平。尽管固沙草属物种整体呈向高海拔扩张趋势,但持续高温引发的暖干化可能造成适生区范围剧烈波动。本研究通过MaxEnt模型揭示了不同气候背景下固沙草属物种适生区的变化规律,为该类群种质资源保护与利用提供了科学依据。

3.4 固沙草属模拟的不确定性和局限性

本研究采用MaxEnt模型与ArcGIS软件模拟分析了固沙草属物种的潜在适生区,但仍存在若干局限性。譬如,居间固沙草仅含5个有效分布点,样本量偏低可能导致模型过拟合,虽采用交叉验证与背景点优化予以缓解,但样本不足仍是重要制约因素。环境因子方面,本研究所选的20个变量可能未完全涵盖影响物种分布的所有关键要素,加上环境数据分辨率限制,部分局地生境特征可能未被准确表征。模型构建过程中,MaxEnt参数设置(如正则化乘数与特征组合)虽经调试优化,仍具有一定主观性,可能影响预测稳健性。此外,物种实际分布还受生物相互作用(如种间竞争)和人类活动(如放牧、土地利用)的显著影响,本研究未系统纳入这些要素,可能导致预测与实际分布间存在偏差。未来气候变化背景方面,尽管选用的BCC-CSM2-MR模型与RCP4.5路径在气候模拟中表现良好,但不同模型与排放情景差异仍带来不确定性,影响适生区预测可靠性。模型精度评估中,AUC值虽高于0.9,但作为单一指标不能完全代表模型的实际预测能力,现有分布点数据本身可能存在抽样偏差,影响验证效果。因此,本研究建议后续通过扩大样本量、提高环境数据分辨率、纳入更多生物与非生物因子,进一步提升模型预测的准确性与适用性。

4 结论

本研究运用MaxEnt模型与ArcGIS软件,明确了固沙草属3个物种在不同气候变化背景下的潜在适生区及主导环境因子。结果显示,模型预测可信度高(AUC值均>0.95);固沙草主导影响因子为海拔,青海固沙草主导影响因子为最湿季度平均温度,居间固沙草则为平均气温日较差,且3个物种均受温度、降水因子制约。末次间冰期至全新世中期,固沙草与青海固沙草适生区面积减少,居间固沙草增加;未来固沙草与青海固沙草适生区呈“先

增后减”趋势,居间固沙草呈“先减后增”趋势。当前青藏高原西南部、东部、中部及东北部为该属高适生区,建议加强这些区域的就地保护,为固沙草属种质资源保护与可持续利用提供理论支撑。

参考文献

- [1] 陈波. 气候变暖影响青藏高原高寒草地植物共存的机制[D]. 兰州:兰州大学,2023:2-4
CHEN B. Mechanisms of climate warming affecting coexistence of alpine grassland plants on the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023: 2-4
- [2] 李红英,王啸天,郑晓倩,等. 新疆农八师垦区木本植物物候期对气候变暖的响应[J]. 中国农学通报,2021,37(12):58-63
LI H Y, WANG X T, ZHENG X Q, et al. Response of woody plants to climate warming during phenological period in No. 8 division of Xinjiang production and construction corps [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(12): 58-63
- [3] GONG B Y, WENG B S, YAN D H, et al. Variation of hydrothermal conditions under climate change in Naqu prefecture, Tibet Plateau, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(10): 2271
- [4] ALBERTO F J, AITKEN S N, ALÍA R, et al. Potential for evolutionary responses to climate change - evidence from tree populations [J]. Global Change Biology, 2013, 19(6): 1645-1661
- [5] YAO T D, XUE Y K, CHEN D L, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444
- [6] MA B B, SUN J. Predicting the distribution of *Stipa purpurea* across the Tibetan Plateau via the MaxEnt model [J]. BMC Ecology, 2018, 18(1): 10
- [7] XING Y F, SHI J J, DE K J, et al. The current distribution of *Carex alataensis* in the Qinghai - Tibet Plateau estimated by MaxEnt [J]. Agronomy, 2023, 13(2): 564
- [8] LU J Z, LU H W, BRUSSEAU M L, et al. Interaction of climate change, potentially toxic elements (PTEs), and topography on plant diversity and ecosystem functions in a high-altitude mountainous region of the Tibetan Plateau [J]. Chemosphere, 2021, 275: 130099
- [9] JIMÉNEZ L, SOBERÓN J. Estimating the fundamental niche: accounting for the uneven availability of existing climates in the calibration area [J]. Ecological Modelling, 2022, 464: 109823
- [10] 李芳菲,李丽,吴巩固,等. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价[J]. 生态学报,2023,43(6):2202-2209
LI F F, LI L, WU G S, et al. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2202-2209
- [11] COLLI-SILVA M, PIRANI J R, ZIZKA A. Ecological niche models and point distribution data reveal a differential coverage of the cacao relatives (Malvaceae) in South American protected areas [J]. Ecological Informatics, 2022, 69: 101668
- [12] YANG J T, HUANG Y, JIANG X, et al. Potential geographical distribution of the edangred plant *Isoetes* under human activities using MaxEnt and GARP [J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 38: e02186
- [13] 王晓帆,段雨萱,金露露,等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. 生态学报,2023,43(16):6590-6604
WANG X F, DUAN Y X, JIN L L, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus sect. Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6590-6604
- [14] 魏玉坤,门永亮,朱耿平. 全球气候变化对喜旱莲子草和莲草直胸跳甲潜在分布的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2023,43(2):28-33
WEI Y K, MEN Y L, ZHU G P. Impact of global climate change on potential distributions of *Alternanthera philoxeroides* and *Agasicles hygrophila* [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2023, 43(2): 28-33
- [15] 雷洁琼,刘玉萍,苏旭,等. 气候变化背景下黑紫披碱草和紫芒披碱草在中国的潜在适生区预测[J]. 草地学报,2025,33(7):2309-2319
LEI J Q, LIU Y P, SU X, et al. Prediction of potential suitable areas of *Elymus atratus* and *Elymus purpuraristatus* in China under climate change scenarios [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2309-2319
- [16] OVALLE-RIVERA O, LÄDERACH P, BUNN C, et al. Projected shifts in *Coffea Arabica* suitability among major global producing regions due to climate change [J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0124155
- [17] 窦全慧,陈程浩,曾太乙亥,等. 基于优化的MaxEnt模型预测龙胆科重要药用植物在青藏高原的生境适宜性研究[J]. 草地学报,2025,33(9):3024-3033
DOU Q H, CHEN C H, ZENGTAI Y H, et al. Evaluation of habitat suitability of important medicinal plants Gentianaceae in the Qinghai-Tibet Plateau based on the optimized maximum entropy model [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(9): 3024-3033
- [18] 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
- [19] SU X, LIU Y P, WU G L, et al. A taxonomic revision of *Orinus* (Poaceae) with a new species, *O. intermedius*, from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Novon, 2017, 25(2): 206-213
- [20] 刘玉萍,吕婷,周勇辉,等. 青藏高原特有属一固沙草属(禾本科)2个类群的修订[J]. 西北植物学报,2017,37(4):820-829
LIU Y P, LV T, ZHOU Y H, et al. Taxonomic notes on two taxa of *Orinus* (Poaceae), an endemic genus from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(4): 820-829
- [21] SU X, WU G L, LI L L, et al. Species delimitation in plants using the Qinghai-Tibet Plateau endemic *Orinus* (Poaceae: triden-

- tinae) as an example[J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(1):35-48
- [22] 杨锡麟. 固沙草属[M]. 北京:科学出版社, 1990:4-5
YANG X L. *Orinus*[M]. Beijing: Science Press, 1990:4-5
- [23] 刘玉萍, 苏旭, 周勇辉, 等. 固沙草属的分类现状及主要存在的问题[J]. *草地学报*, 2015, 23(3):453-456
LIU Y P, SU X, ZHOU Y H, et al. Taxonomic review of *Orinus* (Poaceae) [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(3):453-456
- [24] 苏旭, 岳伟, 刘建全. 青藏高原固沙草属种质资源收集和保存[J]. *植物分类与资源学报*, 2013, 35(3):343-347
SU X, YUE W, LIU J Q. Germplasm collection and preservation of *Orinus* (Poaceae) in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2013, 35(3):343-347
- [25] 刘玉萍, 吕婷, 刘涛, 等. 青藏高原高山特有属一固沙草属谱系地理学研究[J]. *青海科技*, 2017, 24(1):48-52
LIU Y P, LV T, LIU T, et al. Study on pedigree geography of alpine endemic genus of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2017, 24(1):48-52
- [26] 刘玉萍. 青藏高原特有属固沙草属的物种界定与遗传多样性研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2015:2-3
LIU Y P. A study on species delimitation and genetic diversity of the endemic genus *Orinus* on the Qinghai-Tibet Plateau. Xian: Shanxi Normal University, 2015:2-3
- [27] 辛玉春. 青海天然草地牧草营养成分分析[J]. *青海草业*, 2011, 20(1):26-31, 9
XIN Y C. The analysis of nutrition ingredient of grass in Qinhai natural grassland[J]. *Qinghai Prataculture*, 2011, 20(1):26-31, 9
- [28] SU X, LIU T, LIU Y P, et al. Adaptive radiation in *Orinus*, an endemic alpine grass of the Qinghai-Tibet Plateau, based on comparative transcriptomic analysis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2022, 277:153786
- [29] QU K J, LIU A, YIN M, et al. A genome assembly for *Orinus kokonorica* provides insights into the origin, adaptive evolution and further diversification of two closely related grass Genera[J]. *Communications Biology*, 2023, 6:1223
- [30] STUART L, PIMM C N J. Connecting habitats to prevent species extinctions[J]. *American Scientist*, 2019, 107(3):162-16
- [31] 肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 等. 闽楠(*Phoebe bournei*, Lauraceae)地理分布及随气候变化的分布格局模拟[J]. *生态学报*, 2021, 41(14):5703-5712
XIAO J H, DING X, CAI C N, et al. Simulation of the potential distribution of *Phoebe bournei* with climate changes using the maximum-entropy (MaxEnt) model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14):5703-5712
- [32] TAKASAKI M, KONOSHIMA T, KOMATSU K, et al. Anti-tumor-promoting activity of lignans from the aerial part of *Saussurea medusa*[J]. *Cancer Letters*, 2000, 158(1):53-59
- [33] YU R X, JANG L, MELL J, et al. Anti-inflammatory effects of alcohol extract from *Saussurea medusa Maxim* against lipopolysaccharides-induced acute lung injury mice [J]. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2019, 3:112-118
- [34] CAO J Y, DONG Q, WANG Z Y, et al. Megastigmane sesquiterpenoids from *Saussurea medusa* and their anti-inflammatory activities[J]. *Natural Product Research*, 2023, 37(18):3074-3082
- [35] CUENA-LOMBRAÑA A, FOIS M, FENU G, et al. The impact of climatic variations on the reproductive success of *Gentiana lutea* L. in a Mediterranean mountain area[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(7):1283-1295
- [36] 张雪梅, 刘涛, 任世杰, 等. 基于MaxEnt模型的3种野生牧草西藏地区潜在适生区分析[J]. *草地学报*, 2023, 31(8):2314-2322
ZHANG X M, LIU T, REN S J, et al. Identification of potential areas of three wild forages in Tibet Region based on MaxEnt model[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8):2314-2322
- [37] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测[J]. *生态学报*, 2017, 37(24):8556-8566
WANG R L, LI Q, FENG C H, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24):8556-8566
- [38] 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
- [39] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4):231-259
- [40] SOBERON J, PETERSON A T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas[J]. *Biodiversity Informatics*, 2005, 2:1-10
- [41] BARVE N, BARVE V, JIMÉNEZ-VALVERDE A, et al. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(11):1810-1819
- [42] 曹倩, 高庆波, 郭万军, 等. 基于MaxEnt模拟人类活动与环境因子对青藏高原特有植物祁连山牙菜潜在分布的影响[J]. *植物科学学报*, 2021, 39(1):22-31
CAO Q, GAO Q B, GUO W J, et al. Impacts of human activities and environmental factors on potential distribution of *Swertia przewalskii* Pissjauk., an endemic plant in Qing-Tibetan Plateau, using MaxEnt[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(1):22-31
- [43] SANCZUK P, DE LOMBAERDE E, HAESSEN S, et al. Species distribution models and a 60-year-old transplant experiment reveal inhibited forest plant range shifts under climate change[J]. *Journal of Biogeography*, 2022, 49(3):537-550
- [44] 李小莉, 苏旭, 王东, 等. 气候变化背景下青藏高原特有种唐古特红景天的地理分布格局预测[J]. *植物研究*, 2024, 44(2):168-179
LI X L, SU X, WANG D, et al. Prediction of the geographical distribution pattern of *Rhodiola tangutica* (Crassulaceae) under the background of climate change, an endemic species from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2024, 44(2):168-179
- [45] 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
- DONG R, CHU B, HUA R, et al. Geographical distribution prediction of *Stellera chamaejasme* in the Qinghai-Tibet Plateau under future climate change scenarios [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(4): 10-20
- [46] 张秀娟, 王彤新, 杨妍希, 等. CMIP6气候变化情景下青海三江源区雪灵芝潜在适宜分布预测[J]. 草业科学, 2024, 41(4): 790-801
- ZHANG X J, WANG T X, YANG Y X, et al. Projecting the potential suitable distributions of *Arenaria kansuensis* in the Three-Rivers Headwaters region, Qinghai Province, under CMIP6 climate scenarios [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 790-801
- [47] 胡华伟, 魏彦强, 王文颖, 等. 气候变化对青藏高原濒危植物山茛菪和铃铛子潜在分布的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(2): 182-189
- HU H W, WEI Y Q, WANG W Y, et al. Impacts of climate change on the potential distribution of endangered plants *Anisodus tanguticus* and *Anisodus luridus* in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(2): 182-189
- [48] 应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟[J]. 生物多样性, 2016, 24(4): 453-461
- YING L X, LIU Y, CHEN S T, et al. Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(4): 453-461
- [49] 李潮流, 康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 327-335
- LI C L, KANG S C. Review of studies in climate change over the Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 327-335
- [50] 姚檀栋, 施雅风, 秦大河, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1997, 27(5): 447-452
- YAO T D, SHI Y F, QIN D H, et al. Study on climate change records since the last interglacial period in Guriya ice core [J]. Science in China, Ser D, 1997, 27(5): 447-452
- [51] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 95-102
- ZHENG D, LIN Z Y, ZHANG X Q. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(1): 95-102
- [52] TANG L Y, SHEN C M, KONG Z Z, et al. Pollen evidence of climate during the Last Glacial Maximum in eastern Tibetan plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 133-140
- [53] LINSLEY B K. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150, 000 years [J]. Nature, 1996, 380(6571): 234-237
- [54] ZHU L P, LÜ X M, WANG J B, et al. Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 13318
- [55] DYKOSKI C A, EDWARDS R L, CHENG H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2): 71-86
- [56] 侯光良, 许长军, 曹广超, 等. 青藏高原末次冰消期-全新世中期人类扩张的时空模拟[J]. 第四纪研究, 2017, 37(4): 709-720
- HOU G L, XU C J, CAO G C, et al. The spatial-temporal simulation of mankind's expansion on the Tibetan Plateau during last deglaciation-middle Holocene [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(4): 709-720
- [57] 秦蕴珊, 李铁刚, 苍树溪. 末次间冰期以来地球气候系统的突变[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 243-250
- QIN Y S, LI T G, CANG S X. Abrupt changes in earth's climate system since last interglacial [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 243-250
- [58] 唐领余, 沈才明, 孔昭宸, 等. 青藏高原东部末次冰期最盛期气候的花粉证据[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 133-140
- TANG L Y, SHEN C M, KONG Z C, et al. Pollen evidence of climate during the Last Glacial Maximum in eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 133-140
- [59] 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉, 等. 西藏纳木错末次盛冰期以来的古植被、古气候和湖面变化[J]. 地质通报, 2003, 22(S1): 928-935
- WU Z H, ZHAO X T, WU Z H, et al. Changes of paleovegetation, paleoclimate and lake surface since the Last Glacial Maximum in Namco, Xizang [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(S1): 928-935
- [60] 胡忠俊, 张德铨, 于海彬. 基于MaxEnt模型和GIS的青藏高原紫花针茅分布格局模拟[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 505-511
- HU Z J, ZHANG Y L, YU H B. Simulation of *Stipa purpurea* distribution pattern on Tibetan Plateau based on MaxEnt model and GIS [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 505-511
- [61] DU F K, HOU M, WANG W T, et al. Phylogeography of *Quercus aquifolioides* provides novel insights into the Neogene history of a major global hotspot of plant diversity in south-west China [J]. Journal of Biogeography, 2017, 44(2): 294-307
- [62] MA Q L, WEI L Y, CHEN F, et al. Population dynamics of *Agriophyllum squarrosum* along an ecosystem restoration chronosequence in the Tengger Desert, China: indication implications for desertification combating [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 30: e01746
- [63] 黎磊, 陈家宽. 气候变化对野生植物的影响及保护对策[J]. 生物多样性, 2014, 22(5): 549-563
- LI L, CHEN J K. Influence of climate change on wild plants and the conservation strategies [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(5): 549-563

(责任编辑 彭露茜)