

青海省露蕊乌头的分布与危害区预测

赵啟军¹, 牟丹^{1*}, 拉巴才仁², 才吉², 拉毛央琼³, 吴笑天⁴, 刘玉英¹, 谢久祥¹

(1. 青海大学, 青海 西宁 810016; 2. 囊谦县林业和草原综合服务中心, 青海 囊谦 815200;
3. 玉树市林业和草原综合服务中心, 青海 玉树 815000; 4. 青海省自然资源综合调查
监测院, 青海 西宁 810000)

摘要:【目的】了解青海省主要毒杂草露蕊乌头的分布、危害区及影响因子。【方法】用 Max-Ent3.4.4 模型, 预测不同气候情景下青海省露蕊乌头的潜在分布区。【结果】使用 MaxEnt3.4.4 模型分别在当前、SSP126、SSP245、SSP370、SSP585 气候情景下的模拟精度值均大于 0.9, 处于“极好”的水平, 可信度高; 根据模型预测结果将青海省露蕊乌头潜在分布区划分为 4 个适生等级, 其中总危害区面积 $3.80 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、高危害区面积 $2.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、中危害区面积 $6.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、低危害区面积 $1.50 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、非危害区面积 $4.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。高危害区主要分布于青海省南部玉树州南部, 海北州门源县、祁连县, 西宁市大通县等地区。运用刀切法计算各个环境变量对物种分布的影响, 发现年降水量 (Bio12)、归一化植被指数 (NDVI)、月太阳辐射 (Srad)、最湿季降水量 (Bio16), 是影响露蕊乌头分布的主要因素, 其影响机制可能与露蕊乌头的传粉生态学有关。【结论】未来气候情景下, 青海省露蕊乌头的分布呈现收缩趋势, 在 2030s SSP126、SSP245 气候情境下露蕊乌头危害区收缩趋势更为明显, 并且有向东南部迁移的趋势。

关键词: 青海省; 毒害草; 分布区; 传粉; 预测

中图分类号: S567

文献标志码: A

文章编号: 1009-5500(2025)01-0161-12

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.019



长期以来, 受到全球气候变化和人类活动等因素的影响, 青海省草地生态系统稳定性和自我调节能力降低, 草地退化日益加剧^[1-3]。草地退化引发毒杂草害、虫害、鼠害等生物灾害, 造成可食牧草种类和产量减少、生物多样性降低及生态环境恶化^[4-5]。毒杂草大量滋生蔓延, 造成草地毒杂草化, 使自然生态环境

遭受严重的破坏^[6], 毒杂草已成为天然草地重要的生态问题之一, 甚至被称为草地的“绿色杀手”, 严重制约着草地畜牧业生产的可持续发展^[7-8]。毒杂草的比例增加也是草地退化的主要标志之一^[9]。因此, 研究毒杂草的分布区与潜在入侵区域, 对于防控毒杂草的蔓延, 对草原生态系统的维护和畜牧业可持续性发展具有重要意义。

露蕊乌头 (*Aconitum gymnantrum*) 为毛茛科乌头属越年生草本植物^[10]。露蕊乌头是我国天然草地造成危害最大的乌头属有毒植物之一^[11], 海拔 2 000 m 以上的高山地区均有分布^[12]。青海省主要分布于玉树、果洛、海北、海南、黄南及东部农区、弃耕地、道路旁以及退化的草地中^[13]。该毒草大量繁衍, 危害性极大, 占据大量空间, 并抑制优良牧草的生长^[14]。据《中国植物志》记载, 乌头属大多数植物的根、茎、叶均具有较强的毒性, 动物容易因误食而引起中毒, 特别是

收稿日期: 2024-01-08; **修回日期:** 2024-05-02

基金资助: 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”项目[青人才字(2023)1号]; 青海省国土变更调查与检测项目[包十, 青海璇锒公招(服务)2024-017-1]; 青海大学 2023 年度青年科研基金[2023-QNY-5]

作者简介: 赵啟军(2000-), 男, 青海贵德人, 硕士研究生。

E-mail: 13734641604@163.com

*通信作者, 研究方向为草地植物资源。

E-mail: moudan1761@163.com

当草地退化,优良牧草缺乏时被迫采食引起中毒^[15]。在广大牧区,乌头属有毒植物危害各种家畜,采食后致死率极高^[16]。草地退化后,露蕊乌头常造成连片大面积的单一物种聚集分布,由于其根系属于直根型,须根较少,冬季对地表土壤失去遮蔽与固持作用,易造成地表风蚀。到目前为止对露蕊乌头在青海的分布情况和与分布相关的气候环境因子鲜见报道。因此,十分必要对露蕊乌头分布情况及潜在分布区进行研究,以帮助有关部门制定合理的防治措施,防止它在更大范围内扩散并造成危害。

MaxEnt模型主要通过物种危害地点、气候图层数据、软件参数设置进行危害区的预测。该模型经不断改进,在实际预测应用中具有较高的精度^[17-19]。近年来,已广泛应用于药材、入侵物种、濒危植物等多种物种的分布预测^[20]。该模型具有许多优点,在物种分布点数量不定和环境变量之间相关性不明确的情况下预测效果良好,其模拟分布较为客观、准确、精细,接近于物种自然状态下的分布格局^[21],非常适用于物种分布建模。本文通过野外实地调查和查阅大量文献,结合当下和未来两种气候变化场景,利用ArcGIS 10.8地理信息系统和最大熵模型(MaxEnt)评价、预测露蕊乌头在青海省的分布格局,为露蕊乌头的防治提供参考资料。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

青海省是青藏高原的重要组成部分,主要位于昆仑山脉以南和唐古拉山脉以北的广大三江源区域,包括玉树藏族自治州,果洛藏族自治州,黄南藏族自治州河南县、泽库县,海南藏族自治州兴海县、同德县、贵南县及唐古拉山乡(属格尔木市管辖)^[22]。地理坐标为 $89^{\circ}30' \sim 102^{\circ}30' E$, $31^{\circ}30' \sim 36^{\circ}15' N$,面积 $4.07 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占全省总面积的55%,其平均海拔4 200~4 600 m,是青海省重要的畜牧业生产基地^[23],也是我国重要的生态安全屏障^[24]。青海省地域辽阔,海拔落差较大,各地气温呈现垂直变化,植被分布也具有明显的垂直地带性^[25]。植被具有生长期短,物质积累缓慢的特点。青海省植被类型以高寒草甸为主,有高寒草原、高寒灌丛、亚高山灌丛草甸等。优势植物主要有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、小嵩草(*K. humi-*

lis)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、克氏针茅(*Krylov Needlegrass*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、藏嵩草(*K. tibetica*)、早熟禾(*Poa annua*)等。

1.2 青海省露蕊乌头分布点数据采集

通过青海省露蕊乌头种质资源的野外实地调查,以及检索全球生物多样性信息共享平台(<https://www.gbif.org/>)、Inaturalist社区(<https://www.inaturalist.org/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <https://www.cvh.org.cn/>),共收集到地理分布点数据295条。环境生态位模拟工具(Environmental Niche ModelsTools, ENMTTools)是一种生态位分析软件,能够定量分析不同物种或同一物种在不同地理区域的生态位相似性,通过统计测试,如背景比较测试来评估生态位的重叠程度^[26]。为避免利用MaxEnt模型进行物种生境适宜度分布预测时过度拟合,使用ENMTTools输入任意用于模拟的环境因子和露蕊乌头分布点数据,删除同一栅格内的冗余分布点数据,最终得到155个分布位点(图1)。

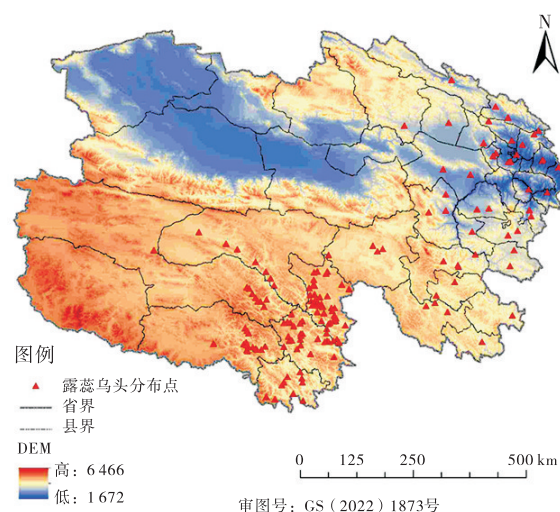


图1 青海省露蕊乌头地理分布点

Fig. 1 Geographic distribution points of *A. leucostomum* in Qinghai Province

1.3 环境数据的获取

(1)气候因子:来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)提供的最新气候数据图层,气候数据时间段为1970—2000年,空间分辨率为30弧度秒(约1 km)。包括年平均气温、昼夜温差月均值、等温性、温度季节性、最暖月最高温度、最冷月最低温、温度年度范围、最湿季度均温、最干季度均温、最暖季度均温、最冷季度均温、年平均降水量、最湿月降

水量、最干月降水量、降水量季节变异系数、最湿季度降水量、最干季度降水量、最暖季度降水量、最冷季度降水量、月最低气温、月最高气温、月平均气温、月平均降水、月太阳辐射、月平均风速和月平均气压,共 26 个数据图层。未来气候数据选择 BCC—CSM2—MR 模式下 2030s(2021—2040)和 2050s(2041—2060)两种年代,并选用 SSP126(低排放浓度)、SSP245(中低排放浓度)、SSP370(中高排放浓度)和 SSP585(高排放浓度)这 4 种温室气体气候情景建立模型,预测不同气候下露蕊乌头的危害区分布变化。

(2) 土壤因子:来源于世界土壤数据库(www.soilgrids.org),空间分辨率为 1 km,包括沙含量、黏土含量、淤泥含量、碎石体积百分比、土壤容重、有机碳含量、土壤 PH、碳酸盐含量、硫酸盐含量、电导率,共 10 个数据图层。

(3) 地形因子:来源于世界气候数据库(http://www.worldclim.org/) 30 弧度秒(约 1 km)的高程数据,导入 ArcGIS 10.4 后提取高程、坡度、坡向,共 3 个数据图层。

(4) 植被因子:来源于 MODIS MOD13A3 植被指数产品,使用 2000—2020 年归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),空间分辨率为 1 km,导入 ArcGIS 10.4 后提取平均值,获得 1 个数据图层。

将气候、土壤、地形、植被、4 类环境变量,共 40 个栅格数据导入 ArcGIS 10.4 软件统一坐标系、范围(1 002 像元×561 像元)、空间分辨率(1 km),以 ASCII 格式保存。为避免各环境因子间相关性过高,造成模型过拟合^[27-29],利用 ArcGIS 10.4 软件的采样工具,基于环境变量提取露蕊乌头各分布点数据信息,通过 SPSS 20 软件进行双变量 Pearson 相关性分析,得到环境因子间的相关系数 r ,当 $|r| > 0.8$ 时^[30],保留刀切法(Jackknife)评价贡献率较高的环境因子,去除预模拟试验中贡献率为 0 的环境因子,最终筛选出露蕊乌头适合的环境因子用于建模(表 1)。

1.4 模型建立与优化

最大熵模型(Maximum entropy modeling, MaxEnt)已广泛应用于物种潜在分布区预测^[31]。主要利用其物种的分布点数据与研究区域的环境因子进行关联,并利用特定算法计算,得出物种分布与环境因

表 1 用于模拟预测的环境变量

Table 1 Environmental variables used for simulation and prediction

序号	变量	贡献率%	置换重要性%
1	年降水量(Bio12)	33.4	31.9
2	归一化植被指数(NDVI)	14.5	5.7
3	高程(DEM)	12.8	28.8
4	月太阳辐射(Srad)	11.6	10.3
5	等温性(Bio3)	11.2	8.1
6	坡向(Aspect)	7	3.6
7	最冷季降水(Bio19)	4.5	7.5
8	最湿季降水(Bio16)	2.6	1.3
9	最热月最高温(Bio5)	2.5	2.9

子间的关系,并将这种关系映射于所研究的区域,进而预测出物种在该区域的潜在分布区^[32]。与其他模型相比,MaxEnt 3.4.4 模型的预测精度更高^[33]。Phillips 等^[34]利用 JAVA 语言编写了 MaxEnt 3.4.4 模型软件,根据物种的存在分布数据和环境变量为约束条件,探寻此约束条件下最大熵的概率分布,并运用线性回归的方法对影响植物分布的主导环境因子进行分析(即 Jackknife 刀切法),使得预测图制作、ROC 曲线分析、主导环境因子分析由 MaxEnt 3.4.4 自动完成,极大提高该模型的应用效率。

露蕊乌头的危害区预测基于最大熵模型(MaxEnt 3.4.4)完成,并利用 ArcGIS 10.8 进行空间特征分析,具体建模步骤为:利用 ArcGIS 10.8 将所有环境变量转化为 MaxEnt 3.4.4 模型所需要的 ASCII 格式文件,将青海省露蕊乌头分布点数据输入 Excel 文档中,并以 csv 格式保存文件。将处理好的环境数据与分布数据导入 MaxEnt 3.4.4 软件进行运算。运算过程中,选取 75% 的监测数据作为训练样本用于建模,其余的 25% 检测数据用于模型检验,模型中的迭代次数为 10 000,重复运算的次数为 10,采用刀切法计算各环境变量的贡献率和置换重要值,结果以 Logistic 格式输出,以迭代运算 10 次的平均值作为最终结果。

1.5 评价标准

受试者工作特征曲线 ROC (Receiver operating characteristic curve)是由横坐标为假阳性率(特异性),纵坐标为真阳性率(灵敏度)绘制而成^[35]。AUC (Area under the curve)值是 ROC 曲线下的面积,取值范围为 0~1,越接近 1,表示模型预测精度越高,预测结果越好^[36]。AUC 值的评价等级划分为 5 级,当

ROC曲线为斜率为45°的对角线时,即AUC值为0.5,表示该模型为随机模型,结果的准确率为50%;当AUC值0.5~0.6时,表示模型预测精度失败;0.6~0.7时,表示模型预测精度较差;0.7~0.8时,表示模型预测精度一般;0.8~0.9时,表示模型预测精度好;0.9~1时,表示模型预测精度极好^[37]。适生性指数(Fitness Index,FI)通常用于衡量一个物种对其生存环境的适应程度,适生范围为0~1,数值越接近1说明物种对环境的适应程度越高。根据露蕊乌头现有分布状况,并参考参照黄晓君等的适生性指数划分方法,本研究利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)进行适生区划分,共划分为4个适生等级:高适生区($0.5 < FI \leq 1$),中适生区($0.26 < FI \leq 0.5$),低适生区($0.08 < FI \leq 0.26$),非适生区($0 < FI \leq 0.08$)^[38]。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

MaxEnt模型的平均训练结果AUC值为0.93,平均测试结果AUC值为0.90,均在0.9以上,且明显大于随机预测分布模型的AUC值,处于“极好”水平(图2)。表明MaxEnt模型预测得到的青海省露蕊乌头潜在分布区具有很好的精度,其预测结果可靠度高,不具有随机性。

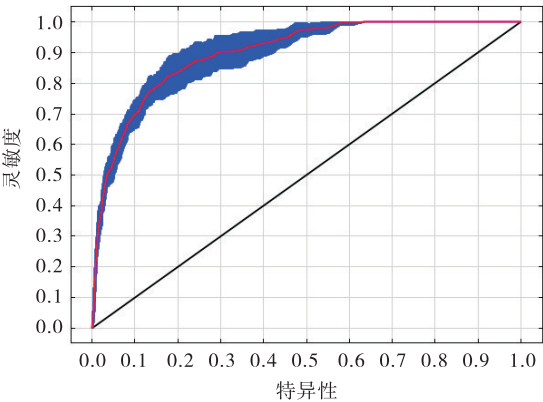


图2 基于MaxEnt模型预测青海省露蕊乌头分布的ROC曲线

Fig. 2 ROC curve for the predicted distribution of *Aconitum gymnanthum* in Qinghai province based on the MaxEnt model

2.4 青海省露蕊乌头分布区预测

在当前气候条件下(1970—2000年),露蕊乌头的高危害区主要分布在青海省南部玉树州的珍秦乡、清水河镇、歇武镇、扎朵镇、干巴乡、麻多乡、上拉秀乡、

隆宝镇、安冲乡、阿多乡,海北州门源县、祁连县、西宁市大通县等地区。对露蕊乌头适宜区面积进行统计,其中高危害区面积 $2.83 \times 10^4 \text{ km}^2$,占青海省面积的4.06%;中危害区面积 $6.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,占青海省面积的8.94%;低危害区面积 $1.45 \times 10^5 \text{ km}^2$,占青海省面积的20.76%;非危害区面积 $4.62 \times 10^5 \text{ km}^2$,占青海省面积的66.24%。

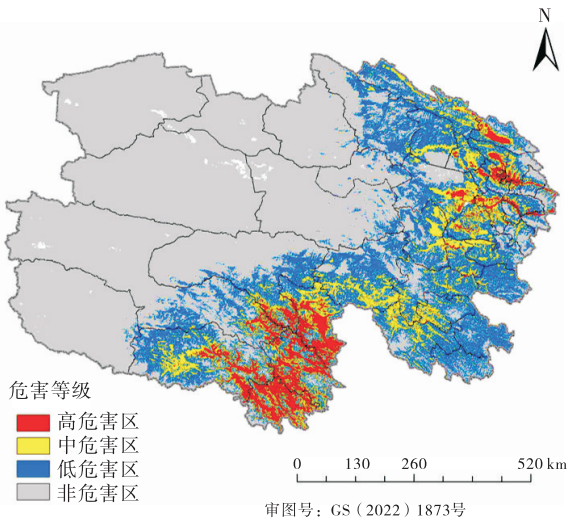


图3 基于MaxEnt模型预测的青海省露蕊乌头潜在分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the potential distribution of *Aconitum gymnanthum* in Qinghai province predicted by the MaxEnt model

2.2 制约露蕊乌头分布的主导气候因子

通过MaxEnt模型输出结果并基于刀切法的正则化训练增益,揭示影响其生态地理分布的主导环境因子。利用刀切法对9个关键环境变量进行检验,得到环境变量对露蕊乌头分布的重要性结果,在“仅此变量”下,正则化训练增益值越大则对物种分布预测的重要性越高。根据输出结果,深蓝色带为仅使用单一环境变量模拟时的增益值,浅蓝色带为不使用该单一环境变量模拟时的增益值,红色带为总增益值。使用单独变量时,正规化训练增益值、增益测试值、AUC值最大的4个环境变量都为年降水量(Bio12)、归一化植被指数(NDVI)、月太阳辐射(Srad)、最湿季降水量(Bio16),贡献率分别为33.4%、14.5%、11.6%、2.6%,累计达到了62.1%(图4,表1)。置换重要性分别为31.9%、5.7%、10.3%,1.3%累计达到了49.2%,说明以上4个环境因子是影响露蕊乌头分布主导环境因子。

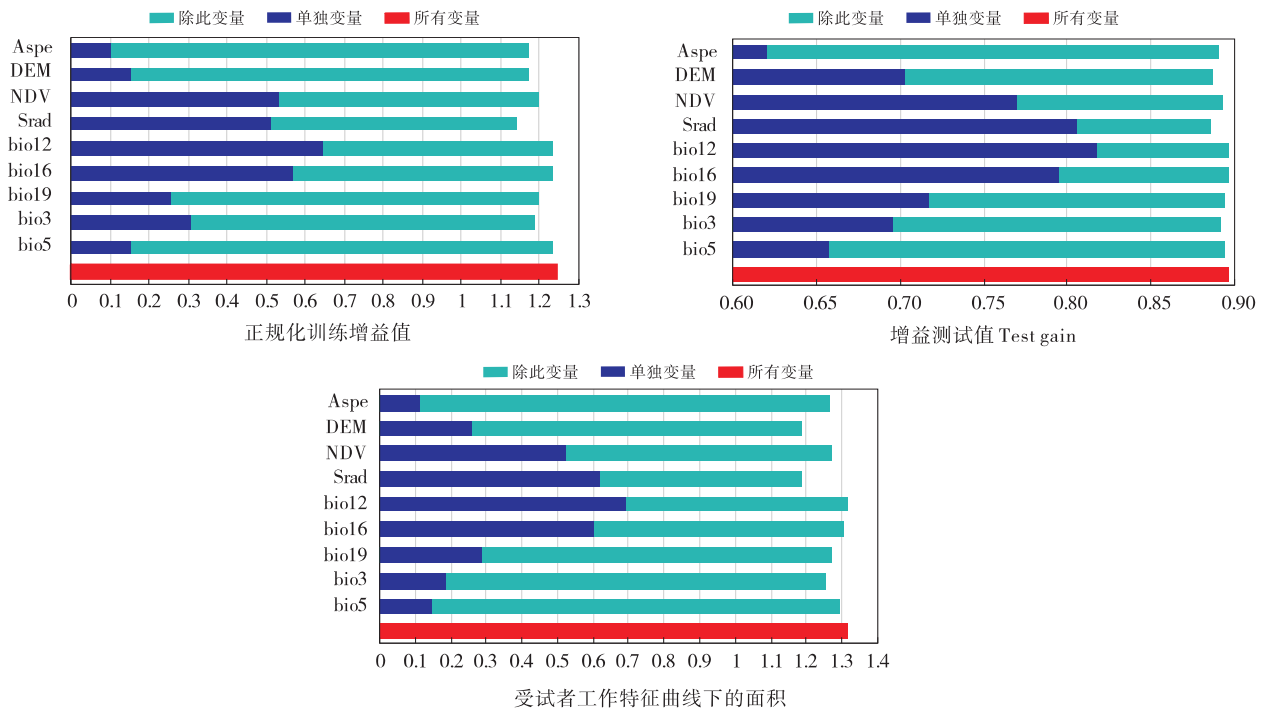


图 4 环境变量重要性 Jackknife 检验

Fig. 4 Jackknife test of environmental variable importance

2.3 主要环境变量响应曲线

根据环境变量响应曲线来判断露蕊乌头存在概率与环境变量之间的关系,适生性指数 ≥ 0.5 的区域为露蕊乌头的高危害区,与现实分布区吻合度高。因此,本研究利用存在概率大于0.5表示在该条件下有利于露蕊乌头的生长,可以清晰的揭示露蕊乌头存在概率与主导环境因子之间的变化趋势。当年降水量(Bio12)小于1.67 mm时露蕊乌头存在概率几乎为0,其存在概率随年降水量的增加而提高,当最冷季度降水量为521.58 mm时,露蕊乌头分布概率达到峰值,此时为其最适生存条件,之后随着Bio12的继续增大存在概率逐渐降低,其最适生存范围为(449.87~578.95 mm)(图5-A)。与年降水量(Bio12)类似,露蕊乌头存在概率随最湿季降水量(Bio16)(图5-B)、归一化植被指数(NDVI)(图5-C)、月太阳辐射(Srad)的增加而提高(图5-D),达到最适生存峰值后又降低,最适峰值分别为314.61mm、0.69、15717.17 KJ/(m²·d)。露蕊乌头最湿季降水量(bio16)最适范围为(274.77~349.81 mm),归一化植被指数(NDVI)最适范围为(0.49~0.81),月太阳辐射(Srad)最适范围为(15121.89~15877.8 KJ/(m²·d))。

2.5 未来气候情景下青海省露蕊乌头分布区预测

本次研究基于当前露蕊乌头的分布预测结果,显

示了2030s(图6-A)、2050s(图5-B)在BBC—CSM2—MR模式的SSP126、SSP245、SSP370、SSP585气候情景下露蕊乌头在青海省分布的变化情况。其各个时期模型运行结果的AUC值均在0.9以上,处于“极好”的水平,预测结果较好,结论可信。露蕊乌头的总危害区面积涵盖了青海省东南部和东北部的绝大部分地区,在未来时期4种温室气体排放场景下,青海大部分地区仍然适宜露蕊乌头的分布,在2021—2040年,较当前高危害区面积逐渐减少,SSP126、SSP245气候情景下显著减少,中、低危害区面积在SSP370、SSP585气候情景下有所增加(图6、图7)。在2041—2060年,高危害区面积在SSP370气候情景下显著增加,在其余气候情景下呈现下降趋势,中危害区面积在SSP370、SSP585气候情景下显著增加,低危害区面积呈下降趋势,SSP585气候情景下降显著。

2.6 未来气候情景下青海省露蕊乌头空间格局变化

在未来4种气候情景下,露蕊乌头在青海省的总危害区面积整体呈现下降趋势,在2041—2060年SSP126、SSP370未来气候情景下扩张趋势较为明显。2021—2040年总危害区收缩面积 4.39×10^5 km², 2041—2060年总危害区收缩面积 1.17×10^5 km²,收缩区域主要集中在露蕊乌头的低危害区,其中、高危害区基本不变(图8,表2)。

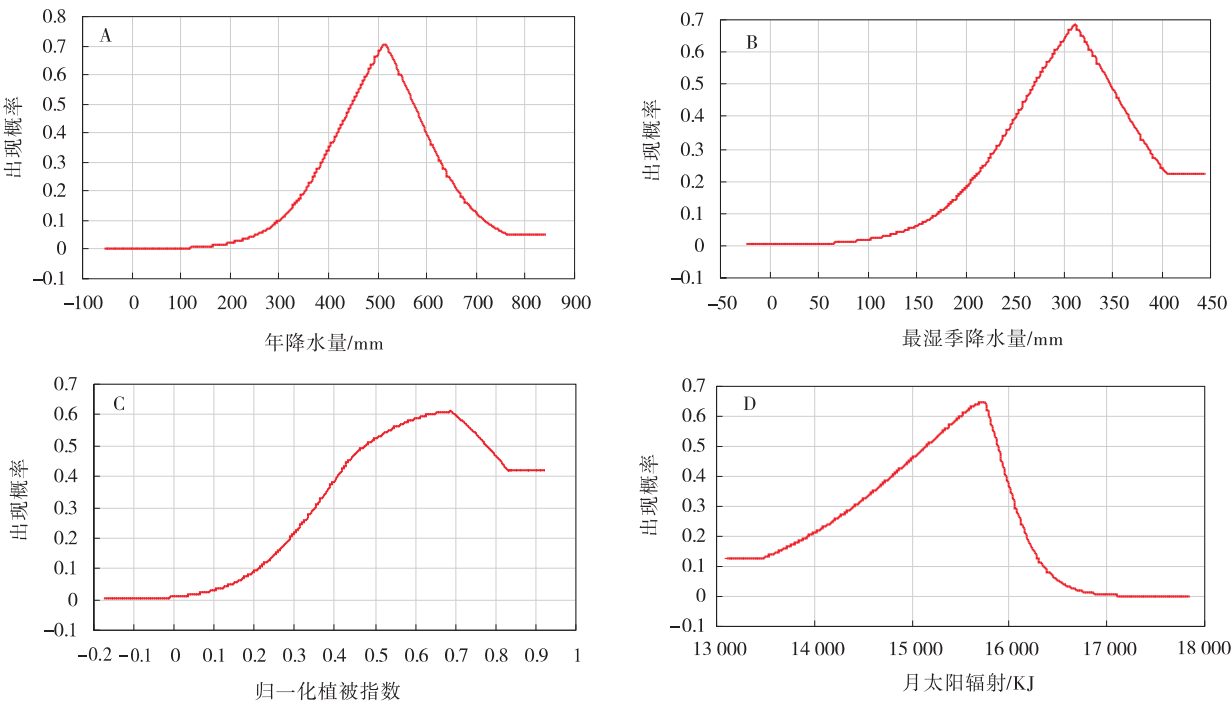


图5 影响露蕊乌头分布的主要环境变量的响应曲线

Figure 5 Response curves of the main environmental variables affecting

注: the distribution of *A.gymnandrum*

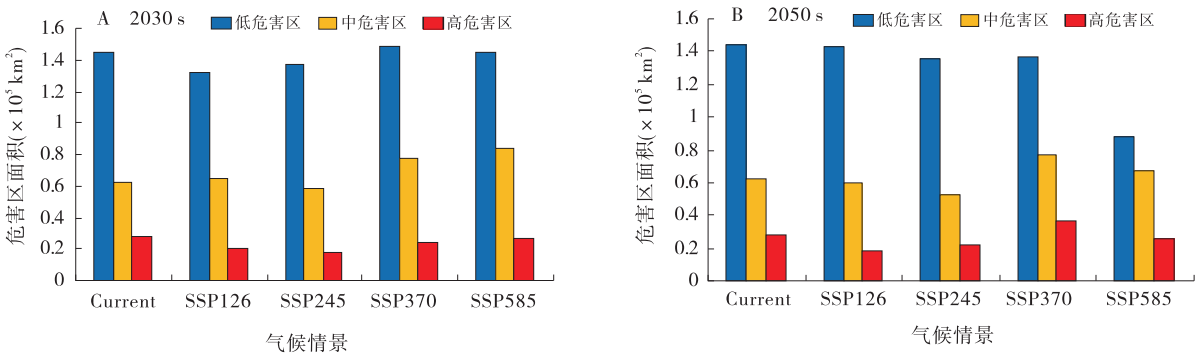


图6 未来不同气候情景下露蕊乌头危害区面积变化

Fig. 6 Changes in the area of *Aconitum gymnandrum* hazard zones under different future climate scenarios

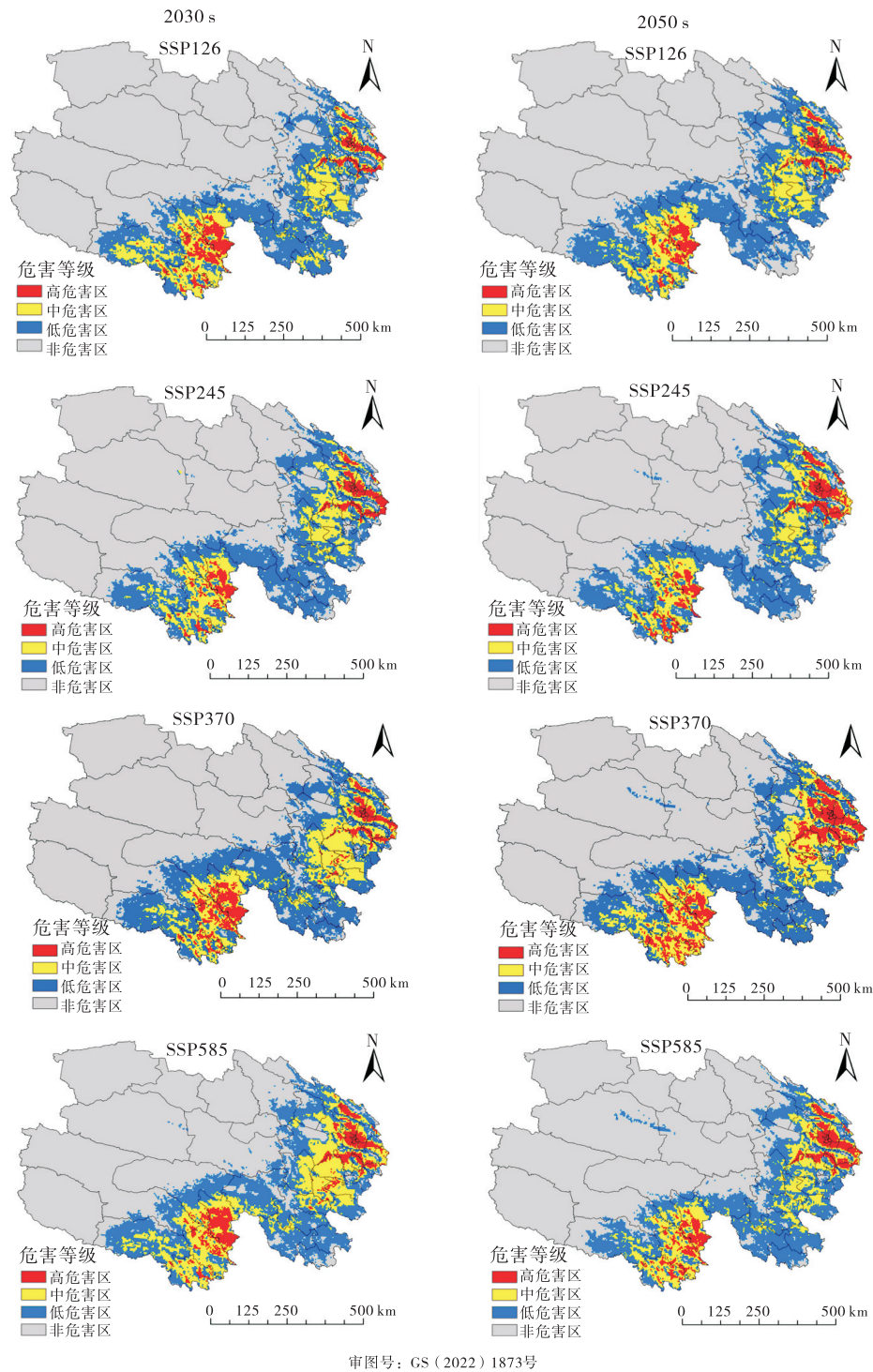
3 讨论

3.1 模型模拟评价

ROC 曲线是以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值,由此计算得到相应的灵敏度和特异度,广泛应用于物种潜在分布预测模型评价中^[39-40]。曲线下的面积 AUC 值被公认为是精度评价的最佳衡量指标^[41]。本研究过程中使用 MaxEnt 3.4.4 最大熵模型进行模拟时的 AUC 值均在 0.9 以上,达到“极好”水平,模拟精度高,效果较好。分布数据来源于野外实地调查、中国数字植物标本馆和全球生物多样性信息网络,经过进一步筛选和整理后参与运算,表明数据精度高,结果可靠。

3.2 主导露蕊乌头分布的环境因子

本研究结果表明,年降水量、最湿季降水量、归一化植被指数、月太阳辐射对青海省露蕊乌头的分布有较为明显的影响,其中受到年降水量(贡献率 33.4%,重要性 31.9%)影响最大。年降水量的最适生存范围为 449.87~578.95 mm,说明本试验中降水量类变量是影响露蕊乌头分布的主要因素。降水量的变化会影响土壤的水分状况,进而影响植物的水分吸收、养分吸收和生理代谢过程^[42]。降水量的增加可能会导致一些植物的生长季节提前或延长,而降水量的减少可能会缩短生长季节。有研究表明降水量与露蕊乌头的生长发育呈正相关,会促进露蕊乌头开花,这一结果与本研究相吻合^[43]。降水量对高寒生境中乌头



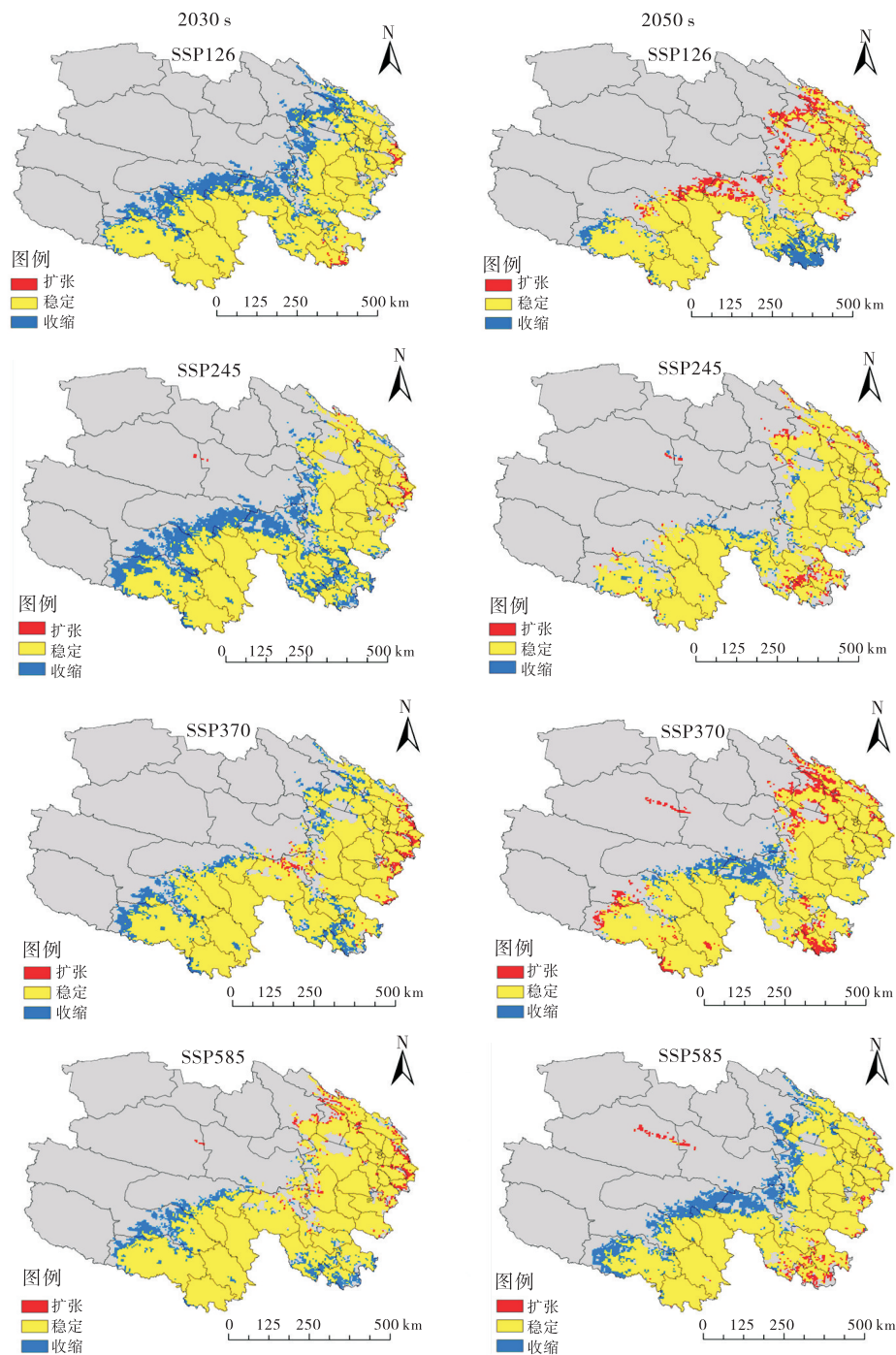
审图号: GS (2022) 1873号

图 7 未来不同气候情景下露蕊乌头在青海省的潜在危害区分布

Fig. 7 Potential distribution of hazard zones for *Aconitum gymnanthum* in Qinghai Province under different future climate scenarios

种子的休眠和萌发有显著影响,随着降水量的增加,乌头种子的发芽率先上升后降低,因此降水量是乌头种子能否出苗的关键因素^[44]。植物光合速率对降水量变化的响应敏感,与年降水量变化趋势呈现一致性^[45]。从年降水量变化的响应曲线可以看出,曲线陡峭程度越高,说明露蕊乌头对于年降水量变化越敏

感,过高或过低都能影响其生存。其次,最湿季降水量也是一个重要的影响因素,最湿季节通常是植物生长最旺盛的时期,降水量的多少直接影响植物的生长速率和生长量。在最湿季节,露蕊乌头如果能够获得充足的水分,有助于其快速生长和扩散,从而在竞争中占据优势。



审图号: GS(2022)1873号

图8 不同气候情景下露蕊乌头的危害区空间格局变化

Fig. 8 Changes in the spatial pattern of hazard zones for *Aconitum gymnantrum* under different climate scenarios

归一化植被指数(NDVI)是一种反映植被生长状态和空间分布的关键参数,同时也是评估区域生态系统健康与植被变化的重要指标^[46]。本研究显示,NDVI值在0.49~0.81为露蕊乌头的最适生长区间。根据野外调查经验和露蕊乌头潜在分布的示意图,可以观察到露蕊乌头的高危害区主要集中在青海省的玉树州、果洛州、海南州和海北州的NDVI值较高的天然草地地带。这一发现表明,露蕊乌头与其他植被之

间存在明显的竞争关系。露蕊乌头作为草地中的主要毒杂草之一,在其高危害区的分布可能会进一步加剧草地的退化现象。这种退化不仅减少了牧草资源,还破坏了草地生态系统的平衡^[47]。因此,对于这些受威胁的区域,实施有效的生态监测和管理措施至关重要。近年来的研究表明^[48],未来太阳辐射呈上升趋势,并且显示出从北向南增强的地理分布特征。太阳辐射强度的增加将直接影响土壤和植物表面温度的

表 2 不同气候情景下露蕊乌头的危害区空间格局变化

Table 2 Spatial changes in hazard zones of *Aconitum gymnantrum* under different climate scenarios

时期	面积/($\times 10^4$ km ²)			总变化
	扩张	稳定	收缩	
2030s_SSP126	0.46	53.19	16.01	-15.55
2030s_SSP245	0.50	51.83	17.33	-16.83
2030s_SSP370	1.67	59.28	8.72	-7.05
2030s_SSP585	2.15	60.86	6.65	-4.50
2050s_SSP126	6.25	57.60	5.81	0.44
2050s_SSP245	2.70	63.54	3.43	-0.73
2050s_SSP370	5.89	58.44	5.33	-0.56
2050s_SSP585	1.76	55.26	12.64	-10.88

升高,进而加速水分的蒸发。在青海的干旱和半干旱地区,水资源的限制性是影响植物生长的主要环境因素之一。太阳辐射的变化有可能是未来露蕊乌头危害区收缩的关键因素之一。在这种趋势的推动下,露蕊乌头可能会从青海省逐渐向与之接壤的甘肃、四川、西藏等地区扩展其生长范围。这种潜在的生态扩张不仅会影响这些区域的植物群落结构和生物多样性,还可能对当地的农牧业活动构成新的挑战。

根据对露蕊乌头传粉生态学的研究,其危害区收缩的另一个主要原因可能是降水对露蕊乌头的传粉造成一定影响。张挺峰等人对青藏高原露蕊乌头的传粉生态学研究发现,露蕊乌头缺乏营养繁殖的能力,不能自花授粉,熊蜂是该植物的主要传粉者^[49],降水的增加对传粉昆虫尤其是熊蜂的行为有着直接和间接的负面影响^[50]。降水会对昆虫造成机械冲刷,还通过影响土壤含水量和空气湿度,进而影响昆虫的生长、发育、生存和繁殖^[51]。降雨前空气湿度增加,气温下降,近地面气压低,风速加快,熊蜂的翅膀沾水后变软变重,飞行受限,如遇暴雨甚至难以回巢^[52]。降水过程往往伴随气温下降和风速增大,也降低了传粉昆虫的活力,这将限制依赖昆虫授粉的高山植物的繁殖^[53]。露蕊乌头萼片开张以及暴露的花药和柱头是适应风媒传粉的特点,风媒在该植物的有性繁殖中也具有一定的作用^[54-57]。在青海省严酷的自然环境条件下,风媒传粉的效率易受降水、风速等气候因素的影响,导致授粉失败和结实率降低^[58]。因此,降水增加,伴随的风速过大、气温降低等均可能是限制露蕊乌头传粉、结实的不利因素,进而限制了其分布。

3.3 未来气候变化下露蕊乌头分布区变迁趋势

在未来气候变化的背景下,露蕊乌头等毒杂草的危害区变迁将成为高寒植物生态学研究的重要议题。随着全球温度上升和降水的改变,露蕊乌头所依赖的主要传粉者熊蜂的活动模式和分布范围受到显著影响。增加的降水量和降低的飞行条件限制了熊蜂的传粉效率,进而影响露蕊乌头的繁殖成功率和种群扩散。降水和温度是影响杂草和种子的主要非生物变量,降水时间和数量的变化可能会改变发芽、植株大小、种子生产和种子的分布,气温升高迫使杂草迁移,并且迁移范围和扩张速度可能随未来气候变化而加速^[59-60]。此外,气候变化导致的温度和湿度变化也可能促使露蕊乌头向海拔较低或气候更为温和的区域迁移。未来的管理策略需要考虑这种植物地理分布的变迁,以制定有效的保护措施,并预测气候变化对生态系统的长期影响。

4 结论

1) 本研究基于 MaxEnt 模型预测了青海省露蕊乌头的潜在危害区,总危害区面积达到 2.35×10^5 km²,占青海省面积的 33.76%,其中高危害区分布于在青海省南部玉树州的珍秦乡、清水河镇、歇武镇、扎朵镇、干巴乡、麻多乡、上拉乡、隆宝镇、安冲乡、阿多乡,海北州门源县、祁连县、西宁市大通县等地区,面积 2.83×10^4 km²,占青海省面积的 4.06%。

2) 年降水量(Bio12)、归一化植被指数(NDVI)、月太阳辐射(Srad)、最湿季降水量(Bio16)为主导露蕊乌头分布的环境因子,其最适生境条件为年降水量(521.58 mm)、归一化植被指数(0.69)、月太阳辐射

(15 717.17 KJ/(m²·d))、最湿季降水量(314.61 mm)

3) 未来气候变化下,青海省露蕊乌头危害区面积总体下降,其空间格局变化总体呈现收缩态,未来分布有向东南部迁移的趋势。

参考文献:

- [1] 白永飞,赵玉金,王扬,等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设[J]. 中国科学院院刊,2020,35(6):675—689.
- [2] 张江,袁旻舒,张婧,等. 近30年来青藏高原高寒草地NDVI动态变化对自然及人为因子的响应[J]. 生态学报,2020,40(18):6269—6281.
- [3] 周华坤,赵新全,周立,等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. 草业学报,2005,14(3):31—40.
- [4] 张骞,马丽,张中华,等. 青藏高原区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. 生态学报,2019,39(20):7441—7451.
- [5] 李军豪,杨国靖,王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报,2020,31(6):2109—2118.
- [6] 周伟,李浩然,石佩琪,等. 三江源区毒杂草型退化草地植被光谱特征分析[J]. 地球信息科学学报,2020,22(8):1735—1742.
- [7] 黄梅,尚占环. 青藏高原毒草型退化草地治理技术研究进展[J]. 草地学报,2019,27(5):1107—1116.
- [8] 徐田伟,赵新全,张晓玲,等. 青藏高原高寒地区生态草牧业可持续发展:原理、技术与实践[J]. 生态学报,2020,40(18):6324—6337.
- [9] 王文婷,高思雨,王淑璠. 甘肃草地4种毒杂草潜在入侵区预测研究[J]. 生态学报,2019,39(14):5301—5307.
- [10] 马文静,赵颖,魏小红,等. GA3浸种对露蕊乌头种子破眠及萌发生理特性的影响[J]. 草地学报,2018,26(1):231—237.
- [11] 冯柯,马青成,宋文杰,等. 我国天然草地毒害草化学防控研究进展[J]. 动物医学进展,2016,37(5):86—91.
- [12] 樊宝丽,赵志刚,孟金柳,等. 露蕊乌头(*Aconitum gym-nandrum* Maxim)花序内位置依赖的性分配[J]. 生态学报,2008,28(6):2909—2915.
- [13] 王庆海,李翠,庞卓,等. 中国草地主要有毒植物及其防控技术[J]. 草地学报,2013,21(5):831—841.
- [14] 王军亮. 新疆放牧草地毒害草种属多样性与综合防控措施研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [15] 陈冀胜,郑硕. 中国有毒植物[M]. 北京:科学出版社,1987:456—468.
- [16] 郭蓉,郭亚洲,王帅,等. 中国天然草地有毒植物及其放牧家畜中毒病研究进展[J]. 畜牧兽医学报,2021,52(5):1171—1185.
- [17] 陈新美,雷渊才,张雄清,等. 样本量对MaxEnt模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学,2012,48(1):53—59.
- [18] 刘婷,曹家豪,齐瑞,等. 基于GIS和MaxEnt模型分析气候变化背景下紫果云杉的潜在分布区[J]. 西北植物学报,2022,42(3):481—491.
- [19] 黄梦伊,赵佳强,石娟. 基于MaxEnt对桉树枝瘿姬小蜂在中国发生趋势的预测[J]. 北京林业大学学报,2020,42(11):64—71.
- [20] 李安,李良涛,高萌萌,等. 基于MaxEnt模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测[J]. 农学学报,2020,10(1):60—143.
- [21] 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[J]. 生态学报,2020,40(18):6552—6563.
- [22] 张国胜,李希来. 青海省天然牧草返青期与地温关系分析及预报方法研究[J]. 草业科学,1992,9(2):47—51.
- [23] 窦永红. 基于AHP的青海省高寒草地脆弱性评估[J]. 青海环境,2018,28(3):145—150.
- [24] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报,2012,67(1):3—12.
- [25] 索朗卓嘎,益西卓玛. 青海省植被指数(NDVI)对气候因子的响应[J]. 农家参谋,2019,633(19):144—145.
- [26] Warren D L, Glor R E, Turelli M. ENMTTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models[J]. Ecography, 2010, 33(3): 607—611.
- [27] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. Diversity & Distributions, 2011, 17(1): 43—57.
- [28] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills[J]. Ecological Engineering, 2013, 51(1): 83—87.
- [29] Zhang M G, Zhou Z K, Chen W Y, et al. Major declines of woody plant species ranges under climate change in Yunnan, China[J]. Diversity and Distributions, 2014, 20(4): 405—415.
- [30] Jiang X L, Aa M, Zheng S S, et al. Geographical isolation

- and environmental heterogeneity contribute to the spatial genetic patterns of *Quercus kerrii* (Fagaceae) [J]. *Heredity*, 2018, 120(3): 219–233.
- [31] 李尤, 唐雪海, 王雷宏, 等. 基于MaxEnt模型的不同气候情景下白蜡树中国适生区预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 100–107.
- [32] 张明珠, 叶兴状, 李佳慧, 等. 气候变化情景下长序榆在中国的潜在适生区预测[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3822–3835.
- [33] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372.
- [34] 胡秀, 吴福川, 郭微, 等. 基于MaxEnt生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测[J]. 林业科学, 2014, 50(5): 27–33.
- [35] 朱耿平, 范靖宇, 王梦琳, 等. ROC曲线形状在生态位模型评价中的重要性—以美国白蛾为例[J]. 生物安全学报, 2017, 26(3): 184–190.
- [36] 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.
- [37] 姜颖倩, 王霞, 刘艳, 等. 基于MaxEnt模型的毛茛苣蓿在中国的潜在适生区预测[J]. 草原与草坪, 2022, 42(2): 67–73.
- [38] Duan X G, Li J Q, Wu S H. MaxEnt modeling to estimate the impact of climate factors on distribution of *pinus densiflora* [J]. *Forests*, 2022, 13(3): 402.
- [39] 应邦肯, 田阔, 郭浩宇, 等. 基于MaxEnt模型预测未来气候变化情境下红树秋茄(*Kandelia obovata*)在中国潜在适生区的变化[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 224–234.
- [40] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993–1009.
- [41] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Cana-comyrica monticola* in New Caledonia [J]. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 2009, 1(4): 94–98.
- [42] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤—植被—水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105–2138.
- [43] Ning N L, Xiao H L, Lin L, *et al.* Variation of nectar production in relation to plant characteristics in protandrous *Aconitum gymnantrum* [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2015, 8(2): 122–129.
- [44] Chen D L, Yuan Z, Luo X P, *et al.* Cold stratification requirements for seed dormancy—break differ in soil moisture content but not duration for alpine and desert species [J]. *Plant Soil*, 2022, 471(1): 393–407.
- [45] 钟尚志. 松嫩草地主要C3和C4植物对降水变异的光合生理响应及生长适应对策[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [46] 黄兰鹰, 张好, 杨育林, 等. 1998–2020年若尔盖地区植被NDVI变化特征及驱动因子分析[J]. 自然保护地, 2024, 4(3): 1–12.
- [47] 张国胜, 李林, 汪青春, 等. 青海省气候变化及其对高寒草甸牧草生长影响的研究[J]. 草业学报, 1999, 8(3): 1–10.
- [48] 王凌钰. 太阳辐射时空动态分布及未来太阳辐射变化趋势研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [49] Zhang T F, Duan Y W, Liu J Q. Pollination ecology of *Aconitum gymnantrum* (Ranunculaceae) at two sites with different altitudes [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2006, 44(4): 362–370.
- [50] 龚燕兵, 黄双全. 传粉昆虫行为的研究方法探讨[J]. 生物多样性, 2007, 15(6): 576–583.
- [51] 常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 等. 环境湿度和降雨对昆虫的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 17(4): 619–625.
- [52] 石雨. 青藏高原气候变化及其对潜在蒸散的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [53] Maria G, Gabriele C, Davide D, *et al.* Reproductive ecology of *Saxifraga florulenta*, a monocarpic perennial paleo—endemic of the Alps [J]. *Taylor & Francis Online*, 2022, 156(1): 1252–260.
- [54] Whitehead, Donald R. Wind Pollination in the Angiosperms: Evolutionary and Environmental Considerations [J]. *Evolution*, 1969, 23(1): 28–35.
- [55] Duan Y, Zhang T, He Y. Insect and wind pollination of an alpine biennial *Aconitum gymnantrum* (Ranunculaceae) [J]. *Plant Biology*, 2010, 11(6): 796–802.
- [56] Arroyo M T K, Armesto J J, Primack R B. Community studies in pollination ecology in the high temperate Andes of central Chile II. effect of temperature on visitation rates and pollination possibilities [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 1985, 149(3): 187–203.
- [57] Goodwillie C. Wind pollination and reproductive assurance in *Linanthus parviflorus* (Polemoniaceae), a self—

- incompatible annual [J]. American Journal of Botany, 1999, 86(7):948—954.
- [58] 朱亚如, 龚燕兵. 风媒传粉的研究方法探讨[J]. 生物多样性, 2017, 25(8):864—873.
- [59] Lippmann R, Babbben S, Menger A, *et al.* Development of wild and cultivated plants under global warming conditions[J]. Current Biology, 2019, 29(24):1326—1338.
- [60] Hatfield J L, Boote K J, Kimball B A. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production [J]. Agronomy Journal, 2011, 103(2):351—370.

Distribution and prediction of hazard area of *Aconitum gymnandrum* in Qinghai Province

ZHAO Qi-jun¹, MOU Dan^{1*}, Labacairen², CAI Ji², Lamaoyangga³, WU Xiao-tian⁴,

LIU Yu-ying¹, XIE Jiu-xiang¹

(1. Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Forestry and Grassland Service Center of Nangqian County, Nangqian 815200, China; 3. Forest and Grass Service Center of Yushu City, Yushu 815000, China; 4. Qinghai Provincial Institute of Natural Resources Comprehensive Survey and Monitoring, Xining 810016, China)

Abstract: 【Objective】 Understanding the distribution of the poisonous weed *Aconitum gymnandrum* in Qinghai Province, its harmful areas and the influencing factors is significant for ecological construction and sustainable development of animal husbandry in the region. 【Method】 The MaxEnt 3.4.4 model was used in this study to predict the potential distribution areas of *Aconitum gymnandrum* under different climate scenarios. 【Result】 The results indicated that the simulation accuracy of the MaxEnt 3.4.4 model under current and future climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) exceeded 0.9, demonstrating excellent reliability. Based on the model's predictions, the potential distribution areas of *Aconitum gymnandrum* in Qinghai Province were categorized into four suitability levels. The total area of the affected regions was approximately $37.99 \times 10^4 \text{ km}^2$, with high-risk areas covering $2.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, medium-risk areas $6.23 \times 10^4 \text{ km}^2$, and low-risk areas $144,600 \text{ km}^2$ and non-hazardous areas $46.15 \times 10^4 \text{ km}^2$. High-risk areas were primarily located in the southern part of Yushu Prefecture, Menyuan and Qilian counties in Haibei Prefecture, and Datong County in Xining City. The Jackknife test was employed to assess the influence of various environmental variables on the species distribution, identifying annual precipitation (bio12), normalized difference vegetation index (NDVI), monthly solar radiation (Srad), and precipitation of wettest quarter (bio16) as the main factors affecting the distribution of *Aconitum gymnandrum*, possibly related to its pollination ecology. 【Conclusion】 Under future climate scenarios, the distribution of *Aconitum leucostomum* in Qinghai Province showed a contraction trend, particularly noticeable under the 2030 s SSP126 and SSP245 scenarios, with a tendency to shift towards the southeast.

Key words: Qinghai Province; poisonous weed; distribution area; pollination; prediction

(责任编辑: 刘建荣)