

DOI: 10.20103/j.stxb.202212293697

王俊伟, 陈永豪, 许敏, 陈瑾芳, 拉琼. 气候变化背景下入侵植物曼陀罗在西藏的潜在风险区预测. 生态学报, 2023, 43(20): 8620-8630.

Wang J W, Chen Y H, Xu M, Chen J F, La Q. Prediction of potential risk area of the invasive plant *Datura stramonium* L. in Tibet under the background of climate change. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8620-8630.

气候变化背景下入侵植物曼陀罗在西藏的潜在风险区预测

王俊伟^{1, 2}, 陈永豪^{1, 2}, 许 敏³, 陈瑾芳^{1, 2}, 拉 琼^{1, 2, *}

1 西藏大学生态环境学院, 青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室, 拉萨 850000

2 西藏雅尼湿地生态系统定位观测研究站, 林芝 860000

3 西藏自治区林业调查规划研究院, 拉萨 850000

摘要:生物安全与外来物种入侵是国门生物安全的重大生态学问题, 生物入侵造成了巨大的经济损失与生物多样性快速丧失, 还影响着人类的身体健康。西藏是我国重要的生态安全屏障, 生态类型复杂且丰富多样, 明确西藏区域尺度上外来入侵植物的潜在分布格局及其对气候变化的响应对入侵植物的预防和控制具有重要意义。为了探究入侵植物曼陀罗 (*Datura stramonium* L.) 对西藏生态安全的影响风险, 基于野外实地调查数据, 采用最大熵 (Maxent) 模型, 应用 R 语言和 SPSS 软件对模型参数和数据进行了优化筛选, 探讨影响其地理分布的主要环境因子, 并模拟预测了当代及 2 种气候变化情景 (RCP 45、RCP 85) 下 2050 年和 2070 年, 其在西藏的潜在入侵风险区分布情况。结果表明: 下层土壤酸碱度、年平均气温、最暖月最高温度与土壤有效含水量是影响曼陀罗分布的主导环境因子, 海拔和人类活动影响强度也有重要作用; 朗县、加查县、乃东区、城关区、八宿县、贡嘎县、巴宜区、波密县、察隅县、芒康县等地为入侵高风险地区; 两种气候背景下曼陀罗的各级风险区面积和总风险区面积均呈持续增加的变化趋势, 且在最高碳排放情景 (RCP 85 情景) 下响应更为敏感; 主要沿着低海拔河谷区域东南向西北方向入侵扩散的趋势, 分布中心由当前的墨脱县域向工布江达县域转移。综合来说, 曼陀罗在西藏分布受土壤环境、温度和降水影响较大, 气候变化和人类活动影响强度将使其向西藏西部、北部扩散。研究结果可为西藏地区综合防控曼陀罗的入侵危害与动态监测提供生态学基础理论依据。

关键词:外来入侵植物; 曼陀罗; 最大熵模型; 扩散; 气候变化

Prediction of potential risk area of the invasive plant *Datura stramonium* L. in Tibet under the background of climate change

WANG Junwei^{1, 2}, CHEN Yonghao^{1, 2}, XU Min³, CHEN Jinfang^{1, 2}, LA Qiong^{1, 2, *}

1 Key Laboratory of Biodiversity and Environment on the Qinghai-Tibetan Plateau, (Tibet University & Wuhan University), Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, China

2 Tibet Yanyi Wetland Ecosystem Positioning Observation Research Station, Nyingchi 860000, China

3 Forestry Survey and Planning Research Institute of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

Abstract: Biosecurity and invasive alien species were major ecological issues of biosecurity at the national gate. Biological invasions has caused huge economic losses and rapid loss of biodiversity, and also affected human health. Tibet is an important ecological security barrier in China with complex and rich ecological types. It is of great significance to clarify the potential distribution pattern of invasive alien plants and their responses to climate change on a regional scale in Tibet for

基金项目:国家自然科学基金项目 (31760127); 生态学一流学科建设项目 (00060906-01, 00060835/001); 西藏自然科学博物馆标本征集项目 (16080082)

收稿日期: 2022-12-29; 采用日期: 2023-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhagchong@163.com

the prevention and control of invasive plants. In order to investigate the impact risk of the invasive plant *Datura stramonium* L. on the ecological security of Tibet, we used the Maxent model based on field survey data, applied R language and SPSS software to optimize the model parameters and data screening, explored the main environmental factors affecting its geographical distribution, and simulated and predicted its distribution in Tibet under contemporary and two climate change scenarios (RCP 45 and RCP 85) in 2050s and 2070s. We also simulated and predicted the distribution of potential invasion risk areas in Tibet under contemporary and two climate change scenarios (RCP 45 and RCP 85) in 2050s and 2070s. The results showed that: soil pH of subsoil, annual average temperature, the maximum temperature of the warmest month and available soil water content were the dominant environmental factors affecting the distribution of *Datura stramonium* L., and elevation and intensity of human activities also played an important role; Lang County, Jiacha County, Naidong County, Chengguan County, Basu County, Gongga County, Bayi County, Bomi County, Chayu County, and Mankang County would be the high risk areas for *D. stramonium* L. invasion based on field survey and model prediction; The area of risk areas at the respective levels and in the total risk area of *D. stramonium* L. showed trends of a continuous increase under two climatic backgrounds, and the response was more sensitive under the RCP 85 scenario (the highest carbon emission scenario); The trend of invasion and dispersal was mainly along the low elevation river valley area from southeast to northwest, and the distribution center would move from the current Medog County area to GongbuJiangda County area. To sum up, the distribution of *D. stramonium* L. in Tibet was greatly affected by soil environment, temperature and precipitation, and climate change and intensity of human activities will cause them to spread to western and northern Tibet. The results of the study can provide an ecological basic theoretical basis for the comprehensive prevention and control of the invasion hazard and dynamic monitoring of *D. stramonium* L. in Tibet.

Key Words: alien invasive plant; *Datura stramonium* L.; Maxent model; dispersal; climate change

生物安全与外来物种入侵已成为国门生物安全的重大生态学问题^[1],近年的生物入侵给各国造成了巨大的经济损失同时也成为各地方生物多样性快速丧失的重要原因^[2],更是影响着人类的身体健康,有些外来入侵植物的花粉可使人类致病^[3]。西藏有着世界上海拔最高的高原台面,平均海拔 4500 m,是我国重要的生态安全屏障,生态类型复杂且丰富多样^[4],因此也给外来生物入侵提供了各种可以定殖的生境条件,一旦外来物种成功定居就难以清除^[5]。随着西藏经济社会的快速发展和城镇化等人类活动的影响加剧,给西藏地区外来生物的入侵提供了很大的便利,研究表明西藏地区外来入侵植物有 112 种,这对原本就很脆弱的高原生态安全屏障带来了严重的生态威胁^[6],因此对西藏外来入侵植物的关注与基础研究工作迫在眉睫。

曼陀罗(*D. stramonium* L.)原产墨西哥,俗名洋金花、醉仙桃、醉心花等,是目前在我国已经形成严重入侵类的植物之一,广布于全国各地,常伴人而生,是茄科(Solanaceae)曼陀罗属(*Datura*)一年生直立高大草本植物^[7]。曼陀罗全株含有有毒生物碱,尤其种子有剧毒,可使家畜中毒,误食使人致命^[8],其结实率巨大,种子有休眠性,具有超强的环境适应能力和入侵潜力,有较强的抗干旱性、抗寒性、耐盐性、耐贫瘠、耐生活垃圾污染与重金属污染环境的特性,曼陀罗对土壤要求不高,适生性强,表型可塑性高,在温暖、向阳及排水良好的砂质土壤,长势更好,一旦入侵成功,则很难清除^[9-11]。另外研究还发现曼陀罗是矿山等一些废渣废弃地、路边、房前屋后撂荒地的先锋植物,对重金属镉具有一定的富集能力^[12],可为矿山废弃地的生态修复提供前景,但曼陀罗作为恶性有害杂草,其全株散发着浓烈的恶臭气味,可使人致幻,严重威胁着人居环境的质量。

目前从传粉生态学^[10,13]、污染生态学^[11]、逆境生物学^[11,14]、种群生态学^[15]、植物形态学^[10]、光合特性^[16]、化感作用^[17-19]、药理作用^[20]等角度对曼陀罗进行了大量的基础研究,也有从整个中国的尺度对曼陀罗进行当前气候情景下潜在分布区模拟预测的研究,但该研究得出了曼陀罗除青藏高原以外的各地区均有其潜在分布区,且有继续入侵扩散风险的结论^[21],因此从西藏区域的小尺度进行曼陀罗分布现状、入侵危害程度、潜在入侵风险区的精细研究是具有重要生态学意义的。采用生态位模型模拟分析外来生物入侵的生态危

害与风险评估可以为人们提供对入侵可能性与入侵方式更直接的信息,能够为外来生物的入侵提供预警监测与预防扩散,从而为相关管理者制定管理策略提供科学理论依据^[22]。在众多物种分布模型预测中,最大熵(Maxent)模型运用最为广泛,普遍应用于生态学、保护生物学、进化生物学、生物地理学与气候变化研究中^[23],可用来评估气候变化对物种的潜在影响^[24],也可用于研究珍稀濒危物种保护^[25],也普遍用来预测外来入侵植物的潜在扩散区^[5,26—29]。因此为全面了解外来入侵植物曼陀罗对西藏自治区生态环境的危害现状、以及当前气候前景与外来(2050年与2070年)气候变化情景下在西藏自治区境内的潜在入侵风险区、空间分布格局及扩散面积变化情况,通过采用Maxent生态位模型模拟分析的方法,结合生物气候因子、土壤数据、海拔、人类活动影响指数等多种环境变量对曼陀罗在西藏自治区的适应性及潜在入侵风险区进行分析研究,拟确定曼陀罗在西藏自治区不同区域的潜在适应能力和将来的入侵风险范围,以及影响曼陀罗在西藏自治区分布的主要环境因子,以期对西藏地区综合防控曼陀罗的入侵危害与动态监测提供生态学基础理论参考。

1 材料与方法

1.1 曼陀罗分布数据来源

为了获得详细精确的曼陀罗在西藏的分布点数据,通过野外实际的样线调查法获得本研究所用的物种分布数据。于2019年10月—2022年5月的夏秋植物生长季期间,对西藏7个地区大部分县城区的人类活动强度较大的地区,主要是县城区周边的废弃大渣堆、生活垃圾堆边及主要干道公路旁。

调查范围包括拉萨地区的墨竹工卡县、城关区、林周县、达孜区、当雄县、尼木县;日喀则地区的桑珠孜区、白朗县、谢通门县、南木林县、仁布县、康马县、江孜县、亚东县、岗巴县、定结县、定日县、萨迦县、昂仁县、聂拉木县、吉隆县、仲巴县、萨嘎县、拉孜县;林芝地区的巴宜区、米林县、朗县、工布江达县、墨脱县、波密县、察隅县;山南地区的乃东区、浪卡子县、贡嘎县、桑日县、加查县、曲松县、错那县、隆子县;昌都地区的卡若区、八宿县、左贡县、芒康县、察雅县、江达县、洛隆县、边坝县;那曲地区的色尼区、比如县、嘉黎县;阿里地区的措勤县、改则县、普兰县、札达县、噶尔县、革吉县、日土县。调查记录了西藏自治区31个曼陀罗实际分布点(图1),每个样点之间直线距离都大于10 km以上,有效避免了物种分布数据空间自相关带来的影响,最后将31个曼陀罗分布点数据转为.csv格式文件,以便用于Maxent模型的建立及模拟预测分析。

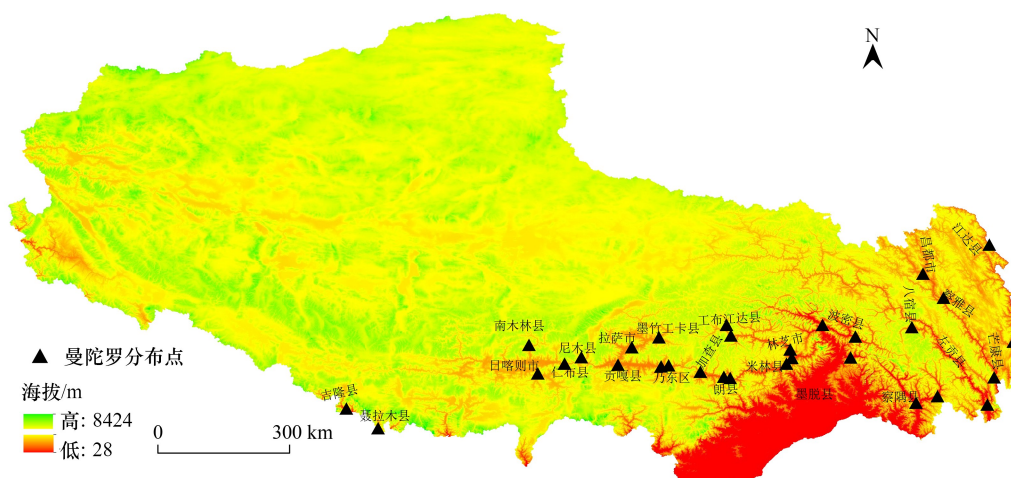


图1 西藏自治区曼陀罗发生点记录

Fig.1 Occurrence records of *D. stramonium* L. in Tibet from China

1.2 环境变量筛选及预处理

本文选取 19 个生物气候因子、1 个地形因子、5 个土壤因子、人类影响强度指数等环境影响因子进行模型模拟预实验分析。当前的 19 个生物气候因子 (Bio1—Bio19) 数据与 1 个地形因子是海拔来源于世界气候数据库 (Worldclim) 数据集 (<https://www.worldclim.org>), 空间分辨率为 30 Seconds (约 1 km), 当前的数据由 1960—1990 年期间真实环境数据平均而成, 以此作为基准数据在 ArcGIS10.4 中根据西藏自治区政区图进行影像的地理配准、叠加与掩膜提取成西藏自治区内的环境影响数据, 再转换为 ASC 格式文件。

5 个土壤因子数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 所构建的世界土壤数据库 (HWSD, <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>), 其中中国境内数据源为第二次全国土地调查中国科学院南京土壤研究所所提供的 1:100 万土壤数据库, 其中以 T_开头属性字段表示上层土壤属性 (0—30 cm), 以 S_开头属性字段表示下层土壤属性 (30—100 cm)。通过在 ArcGIS10.4 中进行属性字段链接、裁剪、重采样、坐标转换等操作与生物气候数据空间分辨率、范围、坐标系统保持一致, 再转换为 ASC 格式文件用于模型分析。

人类活动影响强度指数来源于全球人类影响强度地理数据集 (HII) 中的人类足迹 (HF), 时间范围是 1995—2004 年, 该数据库由哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心机构 (CIESIN) NASA 社会经济数据和应用中心 (SEDAC) 平台于 2005 年 12 月发布 (<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/wildareas-v2-human-influence-index-geographic/>)。通过在 ArcGIS10.4 中进行裁剪、叠加、重采样、坐标转换等操作与生物气候数据空间分辨率、范围保持一致, 再转换为 ASC 格式文件用于模型分析。

未来气候数据 (2050 年与 2070 年) 来源于世界气候数据库 Worldclim 数据集中的 CCSM4 全球气候模式中典型碳浓度排放情景 45 (RCP 45) 和典型碳浓度排放情景 85 (RCP 85) 两种碳排放情景的气候数据, 该模式在中国具有较强的模拟能力^[30—31], 空间分辨率均为 30 Seconds (约 1 km), 再转换为 ASC 格式文件用于模型分析, 分别是 2050—RCP 45、2070—RCP 45、2050—RCP 85、2070—RCP 85 的未来气候数据^[31]。为了避免环境因子之间的多重共线性、自相关、冗余产生的模型过拟合现象的问题, 用 SPSS 统计软件基于物种分布数据对 19 个生物气候因子进行 Pearson 相关性分析, 保留相关系数 $|r| < 0.8$ 的因子, 再通过一次 Maxent 模型的所有环境因子预实验, 对于相关系数 $|r| > 0.8$ 的环境因子再结合预实验的结果去除贡献率低与贡献率为 0 的因子。综合考虑土壤因子对植物入侵的影响, 以及人类活动影响强度是植物入侵的主要方式, 很多都是为了经济利益而人为引入的^[2], 再结合前人的研究成果^[26,29,32], 最终确定 4 个生物气候因子、2 个土壤因子、1 个地形因子、以及人类活动影响强度指数共计 8 个环境变量参与曼陀罗入侵的生态位模型建模预测。为了保持模型运行的可操作性与可对比性, 假设 2 个土壤因子、1 个地形因子、以及人类活动影响强度指数在未来两个时间段 (2050 年、2070 年) 内保持不变。

1.3 Maxent 最大熵模型的优化、构建及评价

Maxent 最大熵模型默认的参数设置会降低模型预测结果的准确性与可靠性^[33—34], Maxent 模型的复杂度与其调控倍频 (RM) 和特征组合 (FC) 参数密切相关。目前 Maxent 中有 5 种特征, 即: 线性 (L), 二次型 (Q), 片段化 (H), 乘积型 (P) 和阈值性 (T)。在其默认设置中, 倍频 RM 的值为 1, 具体特征组合的选择和使用与物种分布点的数量有关。因此基于 R 包 “kuenm” 对模型参数设置进行优化测试^[35], 通过赤池信息量准则 (AICc) 的 AIC 的对比值 (Delta AICc) 评估模型的拟合度及复杂度, 优先考虑 delta AICc 值最小的参数组合用于本研究的模型构建^[36—37]。基于检验选择最佳建模参数设置为特征组合 QPH 和倍频 1。运用受试者工作曲线下面积 (AUC 值) 评价与验证模型预测结果的可靠性, AUC 值处于 0.5—0.6 之间, 表示建模失败, 0.6—0.7 表示预测结果不可靠, 0.7—0.8 表示预测结果一般, 0.8—0.9 表示预测结果良好, 0.9—1 表示预测结果精确^[38]。最后将曼陀罗分布点数据和筛选出各时间段的 8 个环境变量同时导入 Maxent 模型中, 运用优化后的模型参数组合设置, 模型设置重复运行 10 次, 获得曼陀罗在西藏境内的当代及未来潜在风险区预测结果。模型设置刀切法分析获得环境因子对模型预测的贡献率和置换重要值。将重复运算 10 次的预测结果平均值

ASC 文件导入 ArcGIS 10.4 软件中,采用自然间断点法进行重分类,可划分出曼陀罗 4 个入侵风险区等级,分别为:0—0.1 为无风险区,0.1—0.3 为低风险区,0.3—0.5 为中风险区,0.5—1 为高风险区,然后进行可视化制图表达。

1.4 未来气候背景下的曼陀罗潜在风险区变化及质心转移特点

将 Maxent 模型输出的 ASC 结果文件导入 ArcGIS 10.4 软件进行可视化制图,首先转换成.tif 栅格数据文件后,计算出曼陀罗不同入侵风险等级的面积在当前与未来不同的气候情景下发生的面积变化。并以 0.1 为阈值,划分为风险区与非风险区,将其转化成二进制数据,运用 ArcGIS10.4 软件的 SDM 工具箱(SDM Toolbox v2.4)中的“Centroid Changes (Lines)”分析方法计算风险区的质心的位置及其空间变化方向。再运用 SDM 工具箱中的“Distribution Changes Between Binary SDMs”分析方法比较未来与当前情景下风险区的面积空间变化与范围,获得未来时期曼陀罗在西藏的入侵风险扩扩散区与收缩区面积变化动向。

2 结果与分析

2.1 生物气候因子的分析及模型精度检验

本研究基于 Maxent 模型参数优化的要素类型(FC)的组合 QPH 和倍频(RM)为 1 的参数设置,重复运行 10 次的结果,得到模型 AUC 平均值为 0.981。AUC 值越小模型预测结果越不可靠,小于 0.5 说明模型预测结果失败;AUC 值越大模型预测结果越精确,大于 0.9 说明模型预测结果可靠性极高。表明本研究用 Maxent 模型模拟曼陀罗在西藏的潜在入侵分布区与实际地理分布范围吻合度极高,基于模型模拟预测结果对曼陀罗进行入侵风险区面积计算及风险等级划分的研究是可靠的。

在模型运行时设置刀切法,运行结果表明(表 1),8 个参与建模的环境变量中对模型的运算贡献率排序如下,下层土壤酸碱度(S_pH_H₂O)对模型预测的贡献率最高,为 39.1%;其次是年平均气温(Bio1),贡献率为 28.0%;再者是最暖月最高温度(Bio5),其贡献率为 21.0%;最后是土壤有效含水量也起着一定的作用,其贡献率为 3.9%,以上的 4 个环境因子对模型的运算总贡献率为 92%,对入侵植物曼陀罗在西藏区域内的地理分布格局起着决定性的作用。置换重要值(置换重要值是随机置换掉每个环境因子变量在训练存在和背景数据上的数值,值越大表明模型对该变量的依赖性更强)排前三位的环境因子变量为:年平均气温(Bio1) 81.9%,下层土壤酸碱度(S_pH_H₂O)8.6%,海拔(Elevation)3.1%。

表 1 各环境变量对模型预测的相对贡献率

Table 1 Relative Contribution Rate of Environmental Variables to Model Prediction

环境变量 Environmental variable	描述 Description	贡献率 Percent contribution/%	置换重要值 Permutation importance/%
S_pH_H ₂ O	下层土壤酸碱度	39.1	8.6
Bio1	年均气温	28.0	81.9
Bio5	最暖月最高温度	21.0	1.8
Awc_Class	土壤有效含水量	3.9	1.1
Bio3	等温性	2.3	0.5
Elev	海拔	2.3	3.1
Hf	人类影响强度	1.9	0.7
Bio2	昼夜温差日均值	1.5	2.3

6 个主要的环境变量在单独对西藏地区曼陀罗的入侵出现概率起作用时的环境响应曲线(图 2),曼陀罗出现概率大于 0.5 表明相应环境变量区间范围是其生长发育的最适宜区间。因此,西藏地区最适宜入侵植物曼陀罗生长的环境变量区间为:下层土壤酸碱度在 7.0—9.4,当 pH 值为 8.1 时,曼陀罗存在概率达到最大值(0.71);年平均气温在 6.5—15.0 ℃,当年均温为 8 ℃时,曼陀罗达到最大存在概率(0.69);最暖月最高温度在 21.0—25.8 ℃,在 22.5 ℃时,曼陀罗存在概率达到最大值(0.77);土壤有效含水量范围为 1.82—2.25 mm/m,在含

水量 2.03 时,达到曼陀罗最大存在概率(0.68);海拔范围在 1881—3756 m,在海拔 3000—3200 m 时,达到曼陀罗最大存在概率(0.69),海拔达到 4000 及以上后曼陀罗存在概率急剧下降直至降为 0;人类活动影响强度指数从 11.3 起,然后随着指数的增加,曼陀罗出现概率无限接近为 1,与野外调查中发现的曼陀罗常出现在县城周边人为干扰较大的废渣堆荒地上、路边的垃圾堆旁的结果相吻合。

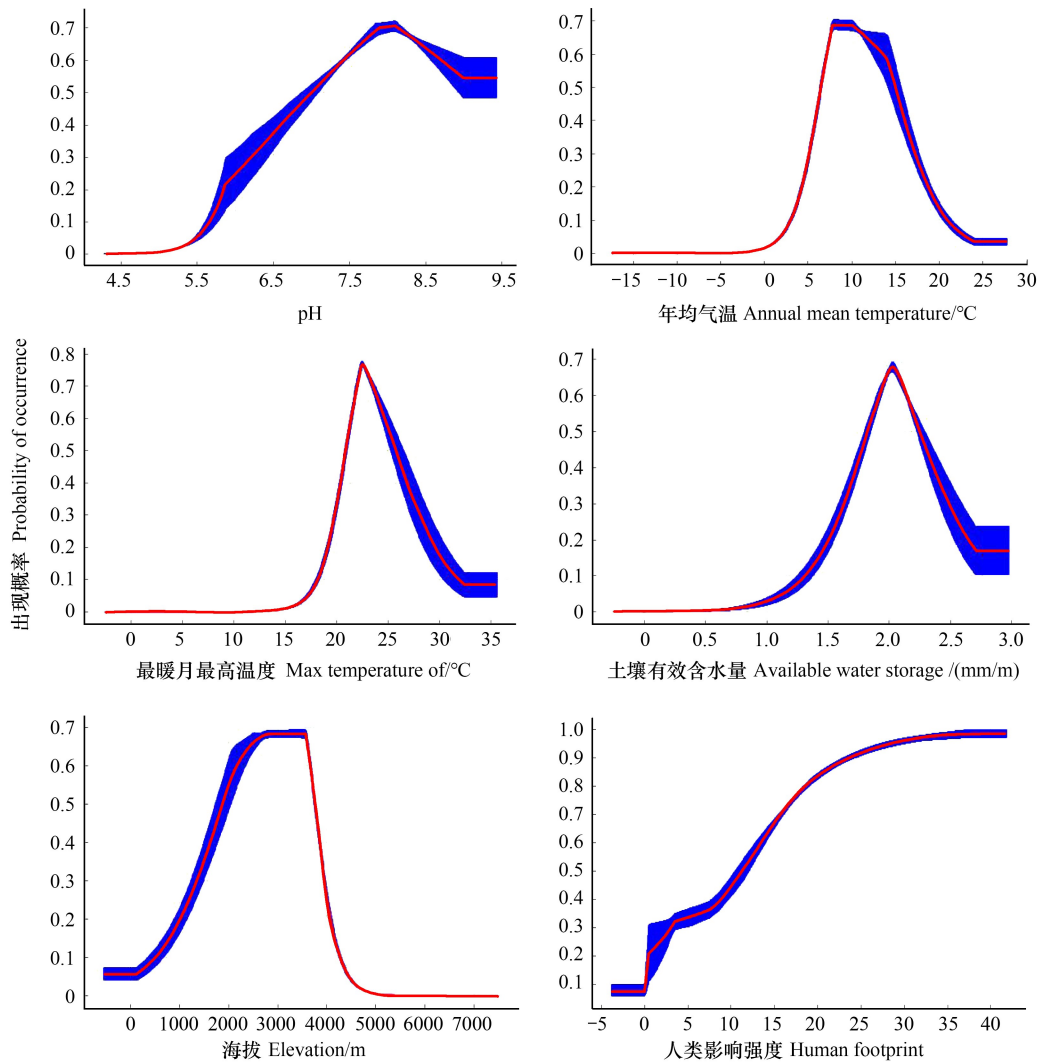


图 2 主要环境变量响应曲线

Fig.2 Response curves of main environmental variables

图中蓝色阴影表示置信区间

2.2 当前气候模式下曼陀罗风险区模拟

通过野外实地调查了西藏大部分县区发现曼陀罗主要分布在西藏东部、东南部、少数南部地区(图 1)。明显的呈现沿低海拔河谷河流流域分布的现象,主要集中分布于雅鲁藏布江及支流拉萨河与尼洋河中下游、怒江、澜沧江、金沙江等三江并流的河谷低海拔地区。从行政区划上看最西可分布到日喀则地区的吉隆县,另外山南地区的贡嘎县、加查县、桑日县、乃东区;拉萨市下辖的城关区、墨竹工卡县;林芝地区的朗县、米林县、巴宜区、工布江达县、波密县、察隅县;昌都地区的芒康县、八宿县、察雅县、卡若区等各县城周边都发现有大面积的定殖,并且有迅速蔓延的趋势,其他调查的各县零星分布,藏北的阿里地区与那曲地区没有调查到曼陀罗的发生点。当前气候情景下曼陀罗在西藏自治区的潜在风险空间分布模拟结果显示(图 3),曼陀罗在西藏的潜在入侵风险区主要集中在河谷低海拔、人类活动影响强度较大的西藏各大城市市区,模拟结果的高风险区

与实际野外调查结果基本吻合。中风险区与低风险区也主要集中分布在西藏东部、东南部的低海拔且生物多样性较高的区域。风险区面积及占比如表 2 显示,总潜在入侵风险区面积为 $7.33 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西藏自治区总面积的 5.96%, 其中低风险区面积为 $4.48 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西藏自治区总面积的 3.64%; 中风险区面积为 $1.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西藏自治区总面积的 1.56%; 高风险区面积为 $0.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西藏自治区总面积的 0.75%。

2.3 未来气候模式下曼陀罗风险区预测及空间变化

曼陀罗在两种碳排放情景,不同时间段(2050 年与 2070 年)在西藏的潜在入侵风险区模拟结果如图 4,再结合表 2 与图 5 的曼陀罗潜在风险区面积及空间变化的内容可知,两种情景下曼陀罗在西藏的潜在入侵风险区面积都在增加,无明显的收缩区,最大碳排放情景下(RCP 85)曼陀罗的入侵速度更快。随着气候变化、人类活动影响强度、碳排放量的增加,在 RCP 85 情景下,到 2070 年的时候西藏所有地级市市区都将成为曼陀罗入侵的潜在高风险地区,主要沿着西藏大江大河向高原西、西北方向入侵扩散的趋势。

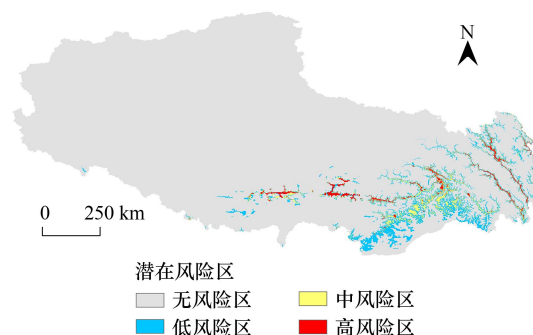


图 3 当前气候情景下曼陀罗在西藏自治区的潜在风险区域分布
Fig.3 Distribution of potential risk areas of *D. stramonium* L. in Tibet from China under current climate scenario

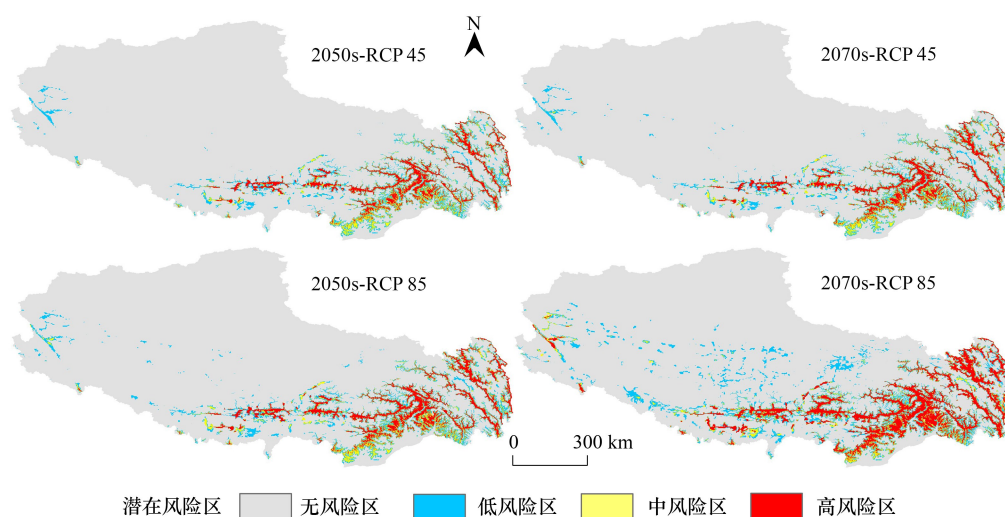


图 4 未来气候变化情景下曼陀罗在西藏自治区的潜在风险区域分布

Fig.4 Distribution of potential risk areas of *D. stramonium* L. in Tibet from China under future climate change scenarios

RCP 85:最高碳排放情景;RCP 45:中等碳排放情景

在中等碳排放情景下(RCP 45),至 2050 年时曼陀罗在西藏入侵的总潜在风险区面积为 $13.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表 2),占西藏自治区总面积的 10.88%,其中低风险区面积为 $5.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,占西藏自治区总面积的 4.53%;中风险区面积为 $3.38 \times 10^4 \text{ km}^2$,占西藏自治区总面积的 2.75%;高风险区面积为 $4.41 \times 10^4 \text{ km}^2$,占西藏自治区总面积的 3.59%,至 2070 年时,低中高各入侵风险等级在 2050 年的基础上还在增加。在最高碳排放情景下(RCP 85),对比 RCP 45 各入侵风险等级的面积都在增加,表明在碳排放越高的背景下,曼陀罗入侵的速度也越快。

曼陀罗在西藏的入侵分布中心转移特征(图 6),在中等与最高两种碳排放情景下,当前、2050 年、2070 年三个时间段作比较,分布中心转移方向都是有规律的从西藏东南部向西北方向移动,迁移轨迹基本重合。RCP 85 情景下,迁移的直线距离最远。通过中心点的经纬度坐标可知当前至 RCP 45 情景 2050 年时,从当前

的墨脱县向西北方向迁移至米林县,迁移了直线距离 69.3 km,到 2070 年时,再从米林县向西北方向小幅度迁移 14.11 km 至巴宜区;最高碳排放情景下 RCP 85,曼陀罗的分布中心转移距离更远,迁移方向与 RCP 45 情景下的一致,至 2050 年时,向西北方向迁移了直线距离 91.26 km 至巴宜区,到 2070 年时,再向西北方向迁移了直线距离 96.30 km 至工布江达县、加查县等地区。说明在未来气候变化情景下长期来看曼陀罗在西藏的潜在入侵风险区范围会大面积的扩大,面积空间变化明显,呈现以东南部为中心向西北方向辐射扩散的趋势,碳排放越大,迁移扩散速度越快。

表 2 不同气候变化情景下西藏自治区曼陀罗的潜在风险区面积/($\times 10^4 \text{ km}^2$)及其比例/%

气候变化情景 Climate change scenarios	面积及占比 Area and proportion	无风险区 Riskless	低风险区 Low risk	中风险区 Medium risk	高风险区 High risk	总风险区 Total risk
当前 Current	面积	115.52	4.48	1.92	0.93	7.33
	占比	94.04	3.64	1.56	0.75	5.96
2050 年-RCP 45	面积	109.49	5.57	3.38	4.41	13.36
	占比	89.13	4.53	2.75	3.59	10.88
2070 年-RCP 45	面积	108.69	5.73	3.52	4.90	14.15
	占比	88.48	4.66	2.87	3.99	11.52
2050 年-RCP 85	面积	107.68	5.91	3.72	5.53	15.16
	占比	87.66	4.81	3.03	4.50	12.34
2070 年-RCP 85	面积	101.21	8.25	4.11	9.27	21.63
	占比	82.39	6.72	3.34	7.55	17.61

RCP 45:中等碳排放情景;RCP 85:最高碳排放情景

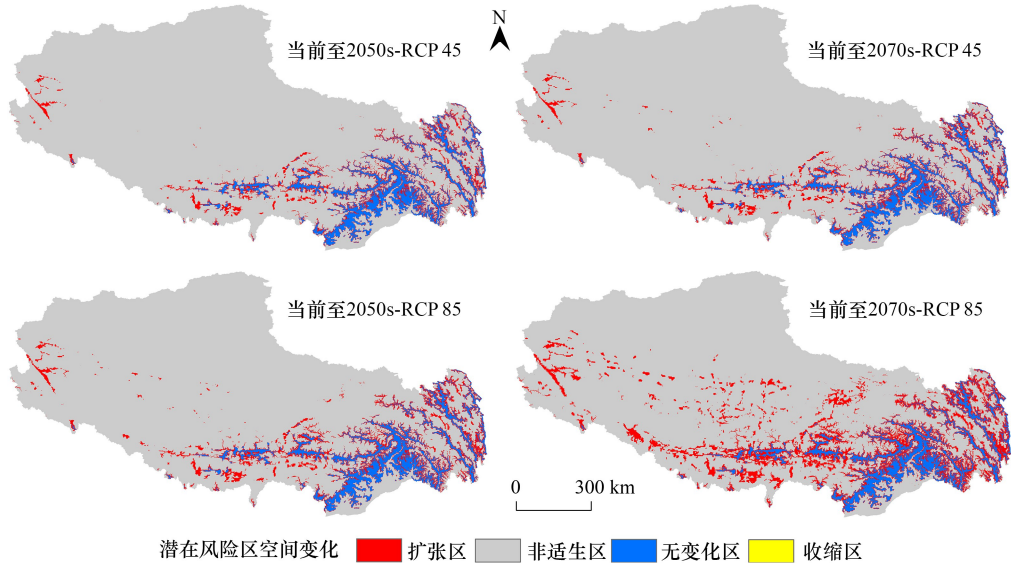


图 5 未来气候情景对比当前气候情景下曼陀罗潜在风险区空间变化

Fig.5 Spatial variation of *D. stramonium* L. potential risk area under future climate scenarios compared with current climate scenario

3 讨论与结论

3.1 讨论

外来物种入侵往往是一个长期的物种进化历史过程,从最初的引入至大面积的扩散通常需要几十年甚至更长的时间^[39]。研究是基于通过野外调查所获得的曼陀罗在西藏的实际分布数据,能够全面的反映曼陀罗

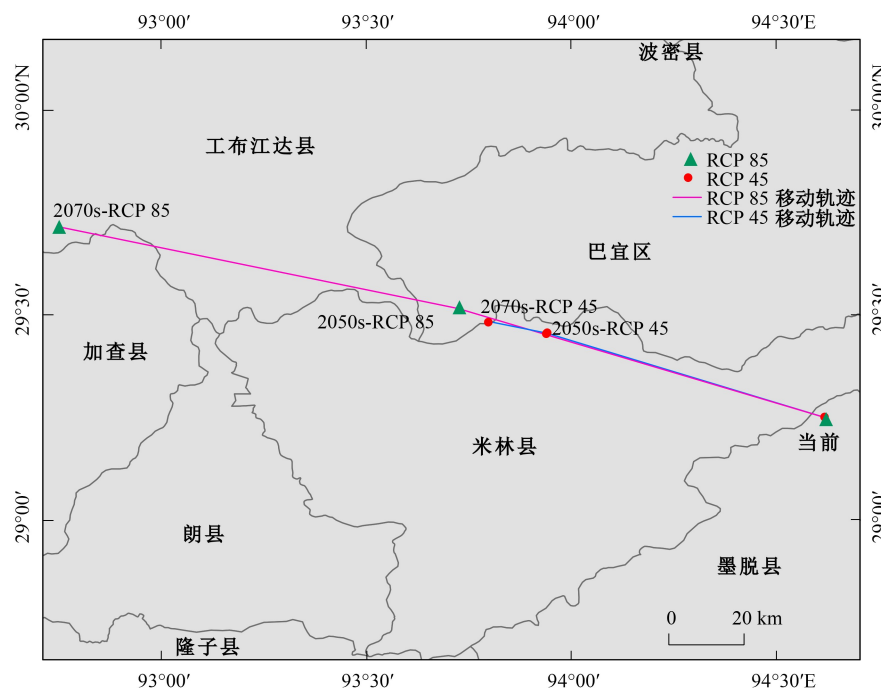


图6 不同气候变化情景下曼陀罗适生区的质心转移路径

Fig.6 The centroid transfer path of *D. stramonium* fitness area under different climate change scenarios

在西藏占有的气候生态位,提高了模型预测的可信度。模型预测结果研究表明选择的8个环境变量中,下层土壤酸碱度、年均气温、最暖月最高温度、土壤有效含水量、海拔等环境因子是影响曼陀罗在西藏区域内分布的主要的环境因子,其中下层土壤酸碱度与年均温度累计相对贡献率超过50%,累计置换重要值超过90%,表明下层土壤酸碱度与年均温度对曼陀罗在西藏的潜在入侵风险区起了决定性的作用。曼陀罗为阳性植物,喜欢阳光,CO₂同化能力较弱^[16],野外调查中也发现曼陀罗喜欢集群伴人而生,常生于房屋旁、路边垃圾堆上、废弃大渣堆上等阳光充足的地方。环境响应曲线表明曼陀罗偏好中性与弱碱性土壤,对土壤酸碱度敏感,过酸过碱的土壤环境均不利于其生长,与入侵植物印加孔雀草 (*Tagetes minuta* L.)、一年蓬 (*Erigeron annuus* (L.) Pers.) 等植物相似^[26]。在环境因子筛选中,研究发现上层土壤酸碱度(0—30 cm)、下层土壤酸碱度(30—100 cm)一起建模时,上层土壤酸碱度对模型贡献率不到1%,曼陀罗也是一年生浅根系的草本植物,与下层土壤酸碱度有着怎样的生态响应机制,值得后续的实验深入研究,这也和前人对西藏地区的入侵植物印加孔雀草的研究结果一致^[26],猜测大部分菊科入侵植物与下层土壤酸碱度有一定的生态适应联系。曼陀罗种子具有休眠性,在自然状态下发芽率极低^[11],发芽需要有温度的累计,年平均气温在6.5—15.0℃与最暖月最高温度在21.0—25.8℃是其在西藏地区生长的最适宜温度,这可能也是当前曼陀罗在西藏西部、北部地区无法生长的原因,但曼陀罗有较强的抗旱性、抗寒性、耐盐性、耐贫瘠、耐生活垃圾污染与重金属污染环境的特性。随着人类活动影响强度的增加与全球气候变暖的加剧,有利于曼陀罗在西藏地区继续的扩散与蔓延至当前其不适应生长的地方。在日喀则地区南木林县的野外调查结果也说明了曼陀罗在人为影响下有巨大的扩散蔓延趋势,这里的海拔有4300 m,当前的气候前景下是不适宜生长的,但通过农户走访在这里调查到一个曼陀罗居群是从拉萨地区人为带种子回来在路边种植的,因其觉得花大美丽而观赏种植用,也得知当地人因曼陀罗常长在废渣堆、垃圾堆等边上而称为“垃圾花”。综上建议加强对西藏地区普通公众的曼陀罗植物知识科学普及、以及相关林草局部门加大对曼陀罗监管与预防,防止大面积的生态危害发生。

当前气候条件下的模型预测结果与野外实际调查结果相吻合,拉萨市区、林芝市区、山南市区、昌都市区是西藏当前曼陀罗入侵高风险等级最密集的区域。根据模拟预测结果,雅鲁藏布江下游地区即藏东南生物多

样性热点地区是曼陀罗当前以及外来 2050 年和 2070 年都是入侵高风险地区,对生物多样性有巨大的潜在威胁,野外调查中发现这一片区虽然没有大面积的曼陀罗定殖,但路边及废渣堆上有零星曼陀罗植株发生,有巨大的入侵扩散潜力,如波密县通麦镇、古乡、排龙等路边;墨脱县格当乡路边等地;米林派镇路边。日喀则市区也没有调查到曼陀罗发生点而是在离市区比较近的白朗县的一处废渣堆上有零星植株,猜测可能是人为从其他地方拉来的废渣堆里掺入的种子。综上都表明曼陀罗在西藏现有的分布区远没有达到潜在分布区域,但未来扩散潜力会在两个层面进行,一方面已经有曼陀罗分布的地方,将会继续扩散和蔓延使种群更为密集;另一方面会向环境适宜区尚未有分布的区域扩散,如沿雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江更为上游的河谷区域,以及西藏南部地区的一些河谷低海拔区域。

未来气候变化使西藏西部、北部与西北部也变得适宜曼陀罗生长,曼陀罗有继续向西扩张的趋势。两种碳排放情景下,曼陀罗分布面积在中短期 2050 年有略微缩减的部分,但不是很明显;长期 2070 年来看面积空间变化没有缩减的现象,并且碳排放越高适生区面积范围更加扩大,表明随着时间的增长和碳排放的增高,曼陀罗扩散蔓延速度更快,与在新疆地区的入侵植物刺苍耳(*Xanthium spinosum* L.)的研究结果一致,对最高温室气体排放情景的响应最敏感^[28],与在西藏地区的入侵植物印加孔雀草的研究结果有相反的趋势,表明长期来说曼陀罗的适应高原环境的能力越来越强^[26],对长期适应性强的物种适宜分布区面积会增加,而像印加孔雀草长期适应性较差的则会缩减^[40]。外来植物经过对入侵地环境的长期适应性进化,有时会发生生态位偏移,甚至可以占据与原产地异质的、非一致性的气候生态位^[41],所以在某种程度上对外来植物入侵风险范围的精确预测具有难度^[42],在未来气候变化条件下根据预测结果,西藏西北部也有很大部分成为曼陀罗入侵的风险地区,虽然是低风险地区,但在对西藏地区的入侵植物实际预防与监测中应该加以重视。本研究结果从宏观角度预测了曼陀罗气候变化下的潜在入侵风险范围,在一定程度上对当地主管部门制定防控策略提供了重要的参考依据。但不可否认的是模拟预测结果中曼陀罗潜在风险区可能存在差异,原因之一在于本研究假设各环境变量如人类活动影响指数、土壤因子等在未来气候变化模拟中不会发生改变,当前的环境变量也是基于 1960—1990 年的均值,实际情况并非如此,同时,本研究所用环境数据等数据质量尚未达到最优,这需要今后进一步优化数据质量,综合社会、经济、环境等更多复合因子模拟现实及将来的变化情况,对曼陀罗的入侵路径、入侵方式进行溯源调查,以求更加全面的对曼陀罗的入侵趋势进行预测。

3.2 结论

现代气候情景下,曼陀罗的潜在高风险区主要分布于西藏中部、东南部、东部地区,以朗县、加查县、乃东区、城关区、八宿县、贡嘎县、巴宜区等为中心辐射扩散。未来气候情况下,曼陀罗的入侵风险范围逐渐扩大,整体向西藏东南向西北扩散的格局;并且长时段来看,分布面积将会逐渐增加,分布中心将逐渐西北方向移动。影响曼陀罗分布的主要环境因子为下层土壤酸碱度、年平均气温、最暖月最高温度与土壤有效含水量,海拔和人类活动影响强度也是重要的因子,最适 pH 范围为 7.0—9.4,最适年平均气温在 6.5—15.0 °C,最适最暖月最高温度在 21.0—25.8 °C,最适土壤有效含水量 1.82—2.25 mm/m,最适宜海拔范围在 1881—3756 m,人类活动影响强度指数从 11.3 起,随着指数的增加,曼陀罗出现概率越来越高且无限接近为 1。

综上,随着全球气候变暖、温室气体排放量的增加对于西藏地区曼陀罗的入侵有着极大促进作用,曼陀罗潜在风险区范围长期来看面积逐渐扩大,并且扩散面积增加显著,为了高原的生态安全屏障建设与生物多样性保护,避免曼陀罗的大面积入侵扩散带来的生态威胁,有必要对其入侵扩散趋势加以采取综合防治措施与动态监测。

参考文献 (References):

- [1] 王瑞,黄宏坤,张宏斌,张艳萍,薛琳,陈宝雄,杨念婉,郭建英,刘万学,万方浩. 中国外来入侵物种防控法规和管理机制空缺分析. 植物保护, 2022, 48(4): 2-9.
- [2] 魏辅文,聂永刚,苗海霞,路浩,胡义波. 生物多样性丧失机制研究进展. 科学通报, 2014, 59(6): 430-437.
- [3] Hulme P E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. Journal of applied ecology, 2009, 46(1): 10-18.

- [4] 吴征镒. 西藏植物志-第一卷. 北京: 科学出版社, 1987: 3-4.
- [5] 陈剑, 王四海, 朱枫, 袁春明. 外来入侵植物肿柄菊在云南的扩散风险研究. 广西植物, 2021, 41(5): 789-798.
- [6] 仇晓玉, 李洪池, 罗建. 西藏外来入侵植物区系、生活型及繁殖特性. 高原农业, 2019, 3(6): 623-631, 649.
- [7] 闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘演, 马海英, 齐淑艳, 马金双. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. 生物多样性, 2014, 22(5): 667-676.
- [8] 徐皓轩, 王圣贤, 吴香伦, 黄鹏, 蓝岳云. 一起农村宴席误饮曼陀罗籽药酒导致食物中毒事件的调查. 实用预防医学, 2022, 29(11): 1388-1390.
- [9] Trueman M, Atkinson R, Guézou A, Wurm P. Residence time and human-mediated propagule pressure at work in the alien flora of Galapagos. Biological Invasions, 2010, 12(12): 3949-3960.
- [10] 权赫根. 曼陀罗生物学特性研究[D]. 延吉: 延边大学, 2022.
- [11] 王越. 不同污染经历的曼陀罗 (*Datura stramonium* L.) 对重金属污染和盐胁迫的响应研究[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [12] Louie M, Kondor N, DeWitt J G. Gene expression in cadmium-tolerant *Datura innoxia*; detection and characterization of cDNAs induced in response to Cd²⁺. Plant Molecular Biology, 2003, 52(1): 81-89.
- [13] 王磊三, 明升平, 冯兴, 拉琼. 拉萨入侵植物曼陀罗 (*Datura stramonium*) 传粉生物学研究. 高原科学研究, 2019, 3(4): 40-46.
- [14] 白鹏莉, 阮成江, 黄明月, 王金妹. 能源植物曼陀罗耐盐性的初步研究. 西北农业学报, 2011, 20(7): 187-191.
- [15] 文传浩, 段昌群, 常学秀, 王宏斌, 王焕校. 重金属污染下曼陀罗种群分化的 RAPD 分析. 生态学报, 2001, 21(8): 1239-1245.
- [16] 于晓霞, 阮成江. 曼陀罗光合特性研究. 植物资源与环境学报, 2011, 20(1): 40-45.
- [17] 马可心, 张梅, 方馨, 唐丽丽, 韩建华, 杨丽芳, 石福臣. 入侵植物曼陀罗对本地植物功能性状和土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响. 植物研究, 2020, 40(6): 867-875.
- [18] 袁美丽, 李韶霞, 王宁. 5 种外来入侵植物对小麦的化感作用. 贵州农业科学, 2016, 44(12): 58-62.
- [19] 王红卫, 程月琴, 袁小巨, 方向民, 宋爽. 曼陀罗植株不同部位浸提液化感作用的比较研究. 中国农学通报, 2009, 25(13): 99-102.
- [20] 邓朝晖, 罗充, 刘彬, 陈玲, 谭金玉. 曼陀罗药用价值的开发和利用. 现代生物医学进展, 2011, 11(7): 1394-1398.
- [21] 张杰, 张咏, 李敏, 敖子强, 杨春燕. 3 种茄科入侵植物在我国的潜在地理分布及气候适生性分析. 南方农业学报, 2019, 50(1): 81-89.
- [22] 陈宝明, 彭少麟, 吴秀平, 王鹏龙, 马建霞. 近 20 年外来生物入侵危害与风险评估文献计量分析. 生态学报, 2016, 36(20): 6677-6685.
- [23] Guisan A, Thuiller W, Zimmermann N E. Habitat suitability and distribution models: with applications in R. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [24] Zhao Z Y, Xiao N W, Shen M, Li J S. Comparison between optimized MaxEnt and random forest modeling in predicting potential distribution: A case study with *Quasipaa boulengeri* in China. Science of The Total Environment, 2022, 842: 156867.
- [25] Li R Q. Protecting rare and endangered species under climate change on the Qinghai Plateau, China. Ecology and evolution, 2019, 9(1): 427-436.
- [26] 徐文力, 李庆康, 杨满, 王景升. 气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草的潜在分布预测. 生态学报, 2022, 42(17): 7266-7277.
- [27] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定. 生态学报, 2017, 37(9): 3124-3132.
- [28] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 许仲林, 阿尔曼·解思斯, 邵华, 维尼拉·伊利哈尔. 气候变化情景下外来入侵植物刺苍耳在新疆的潜在分布格局模拟. 生态学报, 2019, 39(5): 1551-1559.
- [29] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 阿尔曼·解思斯, 邵华, 维尼拉·伊利哈尔. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响. 生态学报, 2019, 39(2): 629-636.
- [30] Otto-Bliesner B L, Marshall S J, Overpeck J T, Miller G H, Hu A X. Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. Science, 2006, 311(5768): 1751-1753.
- [31] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [32] 赵云峰, 赵彩云, 朱金方, 李飞飞, 杨秀清, 郭朝丹. 北京市典型公园外来入侵植物分布格局. 生态学报, 2022, 42(9): 3656-3665.
- [33] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [34] Warren D L, Wright A N, Seifert S N, Shaffer H B. Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern. Diversity and distributions, 2014, 20(3): 334-343.
- [35] Cobos M E, Peterson A T, Barve N, Osorio-Olvera L. Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. PeerJ, 2019, 7: e6281.
- [36] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological applications, 2011, 21(2): 335-342.
- [37] Zhuo Z H, Xu D P, Pu B, Wang R L, Ye M. Predicting distribution of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. in China. BMC ecology, 2020, 20(1): 46.
- [38] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [39] Lambrinos J G. The expansion history of a sexual and asexual species of *Cortaderia* in California, USA. Journal of Ecology, 2001, 89(1): 88-98.
- [40] Deb J C, Phinn S, Butt N, McAlpine C A. The impact of climate change on the distribution of two threatened Dipterocarp trees. Ecology and Evolution, 2017, 7(7): 2238-2248.
- [41] Datta A, Schweiger O, Kühn I. Niche expansion of the invasive plant species *Ageratina adenophora* despite evolutionary constraints. Journal of Biogeography, 2019, 46(7): 1306-1315.
- [42] Guisan A, Petitpierre B, Broennimann O, Daehler C, Kueffer C. Unifying niche shift studies: insights from biological invasions. Trends in ecology & evolution, 2014, 29(5): 260-269.