#### DOI: 10.5846/stxb202102220494

徐文力,李庆康,杨潇,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. Xu W L, Li Q K, Yang X, Wang J S.Prediction of potential distribution of the invasive plant *Tagetes minuta* L.(Wild Marigold) in Tibet under climate change.Acta Ecologica Sinica,2022,42(17):7266-7277.

# 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

徐文力1,李庆康2,杨 潇1,王景升2,\*

1 中国人民大学环境学院,北京 100872
2 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

摘要:入侵植物通常由于具有较强的适应性而能够快速繁殖扩散,影响本土物种的生长繁殖,进而威胁到当地生态安全、景观格局和农业生产等。西藏生态环境非常脆弱,一旦发生恶性物种大面积入侵,生态后果不堪设想。为了探究入侵植物印加孔雀草(Tagetes minuta L.)对西藏东南生态安全的影响趋势,基于野外实地调查数据,采用最大熵(MaxEnt)模型,应用 R 语言平台对模型和数据进行优化筛选,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 4.5、RCP 8.5)下,其在西藏的潜在适生区分布情况。结果表明:(1)训练数据集和测试数据集的受试者工作特征曲线下的面积(AUC)均为0.997,模拟效果较好;底层土壤酸碱度、最暖季降水量、土壤有效含水量、最暖月最高温度为影响印加孔雀草分布的主导环境因子,贡献率总和超过 90%。(2)加查县、朗县是印加孔雀草分布密集区域,米林县、林芝市区、察隅县、墨脱县等地为入侵高风险地区。(3)中短期(2050年)内印加孔雀草适生面积增加明显,2070年时面积则会减少;印加孔雀草适生区在藏东南地区进一步向东北区域扩张,分布质心由当前的墨脱县域向波密县域转移。总体而言,印加孔雀草分布受土壤环境、温度和降水影响较大,气候变化将使其向西藏东部、南部扩张。研究结果对于西藏自治区制定植物入侵防控管理办法具有重要参考价值。 关键词:植物入侵;生物多样性丧失;生态风险;模型模拟预测;全球气候变化

# Prediction of potential distribution of the invasive plant *Tagetes minuta* L. (Wild Marigold) in Tibet under climate change

XU Wenli<sup>1</sup>, LI Qingkang<sup>2</sup>, YANG Xiao<sup>1</sup>, WANG Jingsheng<sup>2,\*</sup>

1 Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract**: Invasive plants, which could multiply and spread rapidly due to their strong adaptability, affect the growth and survival of native species, and thus threaten the local ecological security, landscape and agricultural production. Since the ecological environment of Tibet is vulnerable, once the large-scale invasion of malignant species occurs, the consequences of ecological are unimaginable. In order to investigate influence of invasive plant *Tagetes minuta* L. on the ecological security in southeastern Tibet in this study, the adopted MaxEnt model based on the data of field survey was used to explore the main environmental factors which contributed to its geographic distribution, and simulate the distribution of potentially suitable areas in Tibet under contemporary and two climate change scenarios (RCP 4.5, RCP 8.5) by the R language platform. The results show that: (1) both the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of training and test data set were 0.997, indicating that the simulation effect of the model was good. Acidity of the underlying soil,

收稿日期:2021-02-22; 采用日期:2022-04-03

基金项目:农业农村部西藏自治区农业野生植物资源调查收集与监测项目(13200357)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangjsh@igsnrr.ac.cn

precipitation in the warmest season, available water storage capacity of the soil and max temperature of the warmest month were the main environmental factors affecting the distribution of *Tagetes minuta* L., and the total contribution rate was more than 90%. (2) Jiacha County and Lang County are the most densely distributed areas of *Tagetes minuta* L. based on the field survey. Milin County, Linzhi City, Chayu County and Motuo (Medog) County will be the high-risk areas for *Tagetes minuta* L. invasion based on field survey and model prediction. (3) The suitable and potential area for growth and clonization of *Tagetes minuta* L. would increase significantly in the middle and short term (2050s), but will decrease in the 2070s based on the model simulation. The suitable area of *Tagetes minuta* L. would expand furtherly in the southeast of Tibet and will expand to the northeastern area, and its distribution center would move from the current Motuo County to Bomi County. In general, the distribution of *Tagetes minuta* L. was greatly affected by soil environment, temperature and precipitation, and climate change would make it expand more wildly to the east and south area of Tibet. The results could help to provide theoretical support for Tibet to formulate prevention and control strategies for invasive species.

Key Words: plant invasion; biodiversity loss; ecological risk; model simulation and prediction; global climate change

生物入侵是一个威胁自然生态系统的普遍存在的全球性问题,是生物多样性丧失的第二大元凶(仅次于 生物栖息地破坏)<sup>[1-2]</sup>,同时也是全球变化的主要驱动力之一<sup>[3]</sup>。植物入侵随着社会经济的发展,几乎出现 在所有的陆地生态系统中<sup>[4]</sup>,包括超过 20%的大陆植物群落和超过 50%的岛屿植物群落<sup>[5]</sup>,植物入侵已成为 阻碍新世纪生态系统健康发展的重要原因之一。在众多不同种类的陆地生态系统中,高原山地生态系统基于 其高海拔、低温低氧等环境条件的特点,被认为是植物入侵的低风险区域<sup>[6]</sup>,西藏自治区就是其中典型代表, 素有"世界第三极"之称,生物多样性丰富。然而,人类活动强度的不断增大,正逐步使本土生物的原有生境 遭到不可逆转的破坏,气候变化加剧的叠加效应,进一步对生物入侵产生了不同程度的影响<sup>[7]</sup>,大量现有入 侵物种进入大扩散、大暴发阶段<sup>[8]</sup>,原本就较为脆弱的高原生态环境面临严重威胁,已呈现中轻度退化趋 势<sup>[9]</sup>。有害生物的地理分布格局被打破,新的外来物种空间扩散速度不断加快<sup>[10]</sup>,高原地区不再是免于植物 入侵的"净土"。

印加孔雀草(*Tagetes minuta* L.),又名臭罗杰,是菊科(Asteracea)万寿菊属(Tagetes)的一年生草本植物, 原产于南美洲,于 2006 年在中国台湾地区首次发现印加孔雀草归化种<sup>[11]</sup>,2009 年在西藏林芝地区采集到印 加孔雀草标本<sup>[12]</sup>,之后陆续在北京、江苏、河北等地发现自然定殖种群<sup>[13-15]</sup>。印加孔雀草对环境具有较强的 适应性,耐干旱贫瘠,其植株具有特殊的气味<sup>[16]</sup>,可提取精油用以驱蚊杀虫<sup>[17-19]</sup>,有一定的经济价值。值得 注意的是,印加孔雀草对其他植物化感作用显著,伴生植物生长会受到显著抑制<sup>[20]</sup>,对生物多样性造成影响, 影响农作物的生长<sup>[21]</sup>。印加孔雀草结实率高,针状种子小且量多,极易黏着在牲畜皮毛上,也易于通过风媒 传播和沿水流扩散<sup>[22]</sup>,对当地的生态安全、景观格局和农业生产产生较大威胁。

目前国内对于印加孔雀草的研究尚且不多,集中于土壤微生物<sup>[23]</sup>、环境对构件生物量的影响<sup>[24]</sup>,对当地 传粉网络影响<sup>[25]</sup>等方面,较大尺度下针对印加孔雀草分布及未来模拟的研究尚未见报道。采用模型模拟外 来物种的入侵风险不仅是防控的先决手段,也是近年来入侵生物风险预测评估领域的研究热点<sup>[26]</sup>。未来气 候情境下,印加孔雀草在西藏地区会有怎样的扩散趋势?制约其扩散和成功入侵的环境因子又有哪些?为探 究以上问题,基于野外实地调查所查明的印加孔雀草在西藏自治区的分布现状及其实际危害,本研究基于 MaxEnt 最大熵模型和未来气候数据,利用 R 语言优化模型参数,结合 ArcGIS 空间分析技术,分析比较了印加 孔雀草适宜生境面积的空间变化及分布质心的移动轨迹,明确了对其潜在地理分布具有主导作用的环境因 子。本文旨在揭示在全球气候变化、人类经济活动频繁的大背景下,印加孔雀草在西藏地区的扩张趋势,以期 从宏观角度探讨印加孔雀草对气候变化的响应,为后续综合防控及生态系统的修复提供理论依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 物种分布数据来源

本研究所需西藏地区印加孔雀草分布数据点,主要来源于以下方式:(1)野外实地调查。于 2019 年 6— 9月和 2020 年 7—9月两次进行野外实地调查获得大部分分布点数据,发现印加孔雀草即标记为"存在点", 通过全球定位系统(GPS)记录其分布经纬度、海拔等信息。(2)检索物种信息数据库。查询中国数字植物标 本馆(CVH,http://www.cvh.ac.cn/index.php)、中国国家标本资源平台(NSII,http://www.nsii.org.cn/2017/ query.php)、全球生物多样性信息平台(GBIF, https://www.gbif.org/)等数据库。(3)检索以往期刊论文等文 献报道中记录的西藏地区印加孔雀草分布信息。通过以上方式对数据点进行获取补充,共获取 59 个样点数 据,当分布记录精确地理坐标缺失时,本研究采用谷歌地球(http://ditu.google.cn/)进行地址解析。采用 ENM Tools 对分布点进行校对与筛选,以减少空间关联性对模型模拟的影响,防止过拟合发生,剔除环境、土 壤数据缺失或不完整的分布点,最后得到不重复的 47 个地理分布数据用于模拟分析(图1)。



Fig.1 The location of the Tagetes minuta L. in Tibet

### 1.2 环境变量筛选及预处理

本文选取生物气候因子、地形因子、土壤因子、人类活动强度等共 33 个环境影响因子进行综合建模。当前气候下 19 个生物气候变量来源于世界气候数据库 Worldclim 数据集(www.worldclim.org),空间分辨率为 30"(约 1 km),数据由 1960—1990 年期间真实环境数据平均而成,作为基准数据,根据西藏自治区政区图进 行影像的配准、裁剪和叠加。高程数据(DEM)下载自美国国家航空航天局共享的全球数字高程模型(SRTM V4.1,http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/),空间分辨率为 100 m。通过 ArcToolbox 的表面分析根据 DEM 生成 坡度和坡向。土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)发布的世界土壤数据库(HWSD V1.2,http://www.fao. org),选取其中 9 个土壤变量参与环境因子筛选,其中 T\_开头字段表示顶层土壤属性(0—30 cm),S\_开头字 段表示底层土壤属性(30—100 cm)。

人类活动强度数据(模型中字段为:HF)来源于哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(CIESIN)的 人类足迹(Human Footprint)数据集(http://www.ciesin.org/),数据时间为 2009 年,此数据集由人类影响指数

归一化后获得[27],能较为客观全面的反应空间尺度上人类活动的强弱及其分布状态。

2050年和2070年两个未来时间段的相应环境数据源于政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次气候 评估报告发布的 BCC-CSM 1.1 气候模式,由中国国家气候中心开发,是模拟全球气候对温室气体浓度变化响 应的最常用的模型之一,共有4种气候模拟情景(表1),本研究选取其中2种气候变化情景 RCP 4.5 和 RCP 8.5下 2050年和2070年的数据进行模拟,由世界气候数据库下载。以上数据均统一处理至30"分辨率。

由于建模过程中,会存在自相关和多重线性重复等问题,本研究使用开源 R 语言平台对 19 个生物气候 因子进行主成分分析<sup>[28]</sup>,根据特征向量确定各变量贡献度,再通过 Pearson 相关性分析对所有环境因子进行 预处理,本研究所使用 R 语言版本为 4.0.3。综合考虑土壤理化性质对植物入侵性能的影响,相关系数1rl< 0.8的环境因子将选取参与建模,对于相关系数1rl>0.8 的环境因子运用刀切法进行单因子分析<sup>[29]</sup>,测定其对 模型预测的贡献率,保留贡献度较高的因子。因人类活动对入侵植物的分布影响有较为显著的影响<sup>[30-31]</sup>,故 最终确定 3 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强度因子共计 7 个环境变量参与建模 (表 2),随碳排放当量及时间长短不同,温度、降水均有不同程度的变化(表 3),以此模拟不同环境条件。为 了保持时间序列上模型的可比性,假设环境变量、地形因子和人类活动强度因子在未来潜在分布模拟中基本 保持不变。

Table 1	Four scenarios for carbon emissions
情景	描述
Representative concentration pathway(RCP)	Description
RCP 2.6	辐射强迫值为 2.6W/m <sup>2</sup> , CO <sub>2</sub> 当量浓度为 490 mL/m <sup>3</sup>
RCP 4.5	辐射强迫值为 4.5W/m <sup>2</sup> , CO <sub>2</sub> 当量浓度为 650 mL/m <sup>3</sup>
RCP 6.0	辐射强迫值为 6.0W/m <sup>2</sup> , CO <sub>2</sub> 当量浓度为 850 mL/m <sup>3</sup>
RCP 8.5	辐射强迫值为 8.5W/m <sup>2</sup> ,CO <sub>2</sub> 当量浓度为 1370 mL/m <sup>3</sup>

表1 4种碳排放情景

#### 表 2 7 个参与建模的环境因子

	Table 2     Environmental factors involved in modeling and their contribution rates					
受 V	を量名称 ariable name	描述 Description	变量名称 Variable name	描述 Description		
S_	_pH_H <sub>2</sub> O	底层土壤酸碱度	HF	人类活动强度		
В	io18	最暖季降水量	Elevation	海拔高度		
А	.wc_Class	土壤有效含水量	Bio16	最湿季降水量		
В	io5	最暖月最高温度				

表 3	不同气候条件下西藏自治区范围内环境因子均值
100	

	Table 3 Mean val	lue of environmental	factors in Tibet u	nder different clim	atic conditions	
变量名称 Variable Name	描述 Description	现代 Contemporary	RCP45 2050 年	RCP45 2070 年	RCP85 2050 年	RCP85 2070 年
Bio5∕℃	最暖月最高温度	14.3	16.0	16.2	16.5	17.7
Bio16/mm	最湿季降水量	1217	1187	1353	1186	1435
Bio18/mm	最暖季降水量	1190	1067	1219	1286	1398

#### 1.3 软件及矢量图来源

西藏地区区划图来源于中国国家基础地理信息系统(http://ngcc.sbsm.gov.cn/),通过裁剪而成。MaxEnt 模型由 S.J.Phillips 构建<sup>[32]</sup>,模型通过计算最大熵的概率分布来预测目标概率分布,在预测物种分布方面具 有广泛的应用<sup>[33]</sup>,本研究所用 MaxEnt 模型版本为 3.4.4,模拟前在 R 语言中对 MaxEnt 模型参数进行优化<sup>[34]</sup>, 以达到最佳模拟效果。空间分析技术平台 ArcGIS 由美国公司 Esri 开发,在空间分析领域被普遍使用,本研究 所用为 ArcGIS 10.6 版本。

7269

#### 1.4 MaxEnt 模型构建及数据处理

Maxent 模型相较于其他模型具有稳定精确的特点<sup>[35-36]</sup>,对物种适生区的模拟效果相对最好<sup>[37]</sup>,因此,本研究选择 MaxEnt 模型进行印加孔雀草的模拟预测。在 MaxEnt 模型中导入印加孔雀草地理分布数据和 7 个环境变量,选取 25%的印加孔雀草分布点作为测试集,随机选取 75%印加孔雀草分布点作为训练集,运行刀 切法测定各环境变量对印加孔雀草生长的影响比重<sup>[38]</sup>,创建各环境变量的单因子响应曲线。一般采用受试 者操作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve,ROC)下面积值(Area Under Curve,AUC)来作为依据评价模型的模拟结果精度<sup>[39]</sup>,本研究亦是如此。不同的 AUC 值表示着不同的预测效果,当 AUC 值处于 0.5—0.6 之间,表示模拟失败,0.6—0.7 表示模拟结果较差,0.7—0.8 表示结果一般,0.8—0.9 表示结果良好, 0.9—1 表示结果优秀<sup>[40]</sup>。将模型结果导入 ArcGIS,对图层进行重分类,参考以往文献并结合专家经验将适宜 生境等级划分为 4 个<sup>[41]</sup>,分别为: 0—0.10 为非适应区,0.10—0.30 为低适生区,0.30—0.60 为中适生区, 0.60—1.00 为高适生区。运用 ArcGIS 插件 SDM 工具箱 Spatial Data Mining toolbox 计算 4 类适生等级分布区的面积的空间变化,通过各分区几何面积变化确定分布区中心移动轨迹,分析比较印加孔雀草在不同气候变 化情景下的潜在分布范围和格局。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 环境因子对印加孔雀草适生区分布的影响

根据 MaxEnt 模型输出的结果显示,训练集和测试 集的 AUC 值均为 0.997(图 2),表明 MaxEnt 模型模拟 的结果可信度高,印加孔雀草分布模拟结果与可能的实 际分布范围存在高度一致性,基于模拟结果进行适生区 的划分是可行的。模拟前对数据点、环境因子的筛选和 对 MaxEnt 模型参数的优化,都对模拟结果精度起到了 积极作用。

筛选出的 7 个参与建模的环境因子中,贡献率最高的为底层土壤酸碱度(S\_pH\_H<sub>2</sub>O),表明底层土壤酸碱 度是决定西藏地区印加孔雀草分布的关键因子;最暖季 降水量(Bio18)贡献率为 21.2%,排在第二位,为次要因 子;土壤有效含水量(Awc\_Class)和最暖月最高温度 (Bio5)的贡献率均超过 15%,以上因子的贡献率总和 超过 90%,主导着印加孔雀草在西藏地区的地理分布 (表 4)。





ROC: 受试者操作特征曲线, Receiver Operating Characteristic Curve; AUC: 曲线下面积值, Area Under Curve

刀切法检验结果显示(图3),仅单一变量进行建模时,对正规化训练增益影响最大的前三位因子是:海拔 高度,最暖月最高温度和底层土壤酸碱度,这三个变量与其他因子相比具有更为独特的信息。总的来说,土壤 酸碱度、降水因子以及温度因子都影响着印加孔雀草在西藏的扩散。

环境因子响应曲线可以用来判断适宜物种生长的环境变量取值范围,存在概率大于 0.5 表明对应的环境 变量值适宜印加孔雀草的生长,主要环境因子响应曲线见图 4。

适宜印加孔雀草的底层土壤酸碱度范围为 7.5—8.1。当 pH 为 7.1 时,印加孔雀草存在概率上升明显,当 pH 值为 8 时,印加孔雀草达到最大存在概率(0.96), pH 为 8.1 时则迅速降低,趋近于 0。

适宜印加孔雀草的最暖季度降水量范围为 371—498 mm。降水量为 215 mm 时,印加孔雀草存在概率开始上升,当降水量为 404 mm 时,印加孔雀草达到最大存在概率(0.79),之后开始回落,988 mm 时近乎为 0。

表 4 环境因子及其贡献率和最适范围					
Table 4     Environmental variables and their contribution and suitable value ranges					
变量名称 Variable Name	描述 Description	贡献率 Contribution/%	重要值 Important Value	最适范围 Suitable Range	
S_pH_H <sub>2</sub> O	底层土壤酸碱度	39.2	0.5	7.5—8.1	
Bio18	最暖季度降水量	21.2	1	371—498mm	
Awc_Class	土壤有效含水量	16.4	4	0.43—1.15mm/m	
Bio5	最暖月最高温度	15.4	2.8	21.9—23.4°C	
HF	人类活动强度	5.1	1.4	4.2—7.1	
Elevation	海拔高度	2.2	71.6	2840—3267m	
Bio16	最湿季度降水量	0.5	18.8	368—486mm	





适宜印加孔雀草的土壤有效含水量范围为 0.43—1.15 mm/m。含水量为 0 mm/m 时,印加孔雀草存在概率开始上升,当含水量为 0.51 mm/m 时,印加孔雀草达到最大存在概率(0.59),5.31 mm/m 时降至 0。

适宜印加孔雀草的最暖月最高温度范围为 21.9—23.4℃。当气温达到 16.4℃时,印加孔雀草存在概率上 升,21.9℃达到 0.5,气温升至 22.6℃时,印加孔雀草达到最大存在概率(0.73),随后 30.6℃时趋近于 0。其余 环境因子适宜范围见表 4。

2.2 现代气候模式下印加孔雀草适生区模拟

野外实地调查发现印加孔雀草分布于西藏东南部地区,集中于山南地区加查县、林芝地区朗县、米林县和林芝市,其中加查县县城、朗县县城及其下属卧龙镇等地分布密集,印加孔雀草已经大面积定殖,密度最高可达160 株/m<sup>2</sup>,其海拔分布高度范围为2900—3300 m,MaxEnt模拟的当前气候下印加孔雀草在西藏的适生区分布与实地调查情况较为符合。现代气候情境下的模拟结果显示(图5),印加孔雀草的主要适生区为海拔相对较低、人类活动相对密集、生物多样性丰富西藏自治区东南部地区,分布范围主要包括加查县、波密县、朗县、米林县、林芝市、察隅县,总适生面积为12090 km<sup>2</sup>,占西藏自治区总面积的0.98%,与实际调查情况相吻合。

2.3 未来气候模式下印加孔雀草适生区预测

中等温室气体排放情景(图 6)下,印加孔雀草的适宜生境扩大至八宿县、左贡县、隆子县和察雅县域, 2050年和2070年的总适生面积分别为13398.14 km<sup>2</sup>和12845.48 km<sup>2</sup>,不同等级适生区均有所增长。最高温 室气体排放情景下,印加孔雀草的适宜生境范围扩展较为明显,适宜生境范围进一步扩散至类乌齐县、江达县 和贡觉县,中适生区增长相对显著,2050年的总适生面积分别为19164.41 km<sup>2</sup>,而2070年印加孔雀草的适生 面积则降低至11321.20 km<sup>2</sup>。可以发现,随着气候变化,印加孔雀草分布范围逐渐向东部地区扩张,入侵至波



图 4 印加孔雀草存在概率对主要环境因子的响应曲线 Fig.4 Response curves of existence probability of *Tagetes minuta* L.

密县、八宿县、芒康县、左贡县、察隅县等地,而西部和北部地区印加孔雀草适生面积近乎为零,这可能与各地区海拔高度等环境因素不同有关,不适宜印加孔雀草的人侵定殖。两种气候模式下印加孔雀草适生面积都呈扩增趋势,且其在最高温室气体排放情景(RCP 8.5)下对气候变化响应幅度相比更大,值得注意的是,两种气候情景下 2070 年印加孔雀草的适生面积相较当前 2050年均有所降低。不同气候变化条件下各适生等级面积见表 5。

印加孔雀草在不同气候模式下适生区面积变化明显(图7),当前至中等温室气体排放情景下,至2050年,印加孔雀草在西藏自治区的适生面积增加2132.38km<sup>2</sup>,较当前适生面积增长17.6%,至2070年,适生面积





增加 2597.72 km<sup>2</sup>,较当前适生面积增长 21.5%;当前至最高温室气体排放情景下,至 2050 年,印加孔雀草在 西藏的适生面积增加 7971.28 km<sup>2</sup>,较当前适生面积增长 65.9%,至 2070 年,适生面积增加 1777.835 km<sup>2</sup>,较当前适生面积增长 14.7%。

当前至中等温室气体排放情景(RCP 4.5)下,印加孔雀草适宜生境分布区中心先从墨脱县域向东南移

42 卷



Fig.6 Distribution of potential suitable areas of Tagetes minuta L. in Tibet under different climate change scenarios

动,再逐步向东北移动至波密县域;而当前至最高温室气体排放情景(RCP 8.5)下,印加孔雀草适宜生境分布 区中心,则向东南小幅度移动,再大幅东移至波密县域,直线移动距离超过 60 km。未来气候情境下,印加孔 雀草在西藏自治区的适生地理分布范围逐渐扩大,形成以朗县、林芝市为中心,向林芝地区各县、昌都地区各 县辐射状扩散的趋势,分布区中心逐渐向东北部移动。

Table 5 The suitable area (km <sup>2</sup> ) of Tagetes minuta L. in Tibet under different climate change scenarios						
气候变化情景 Climate change scenario		非适生区面积 Unsuitable area	低适生区面积 Low suitable area	中适生区面积 Suitable area	高适生区面积 Highly suitable area	总适生面积 Total suitable area
现代 Contempora	ry	1216310	7306.99	3581.05	1202.40	12090.44(0.98%)
RCP 4.5-2050s		1215002	7770.77	4280.09	1347.29	13398.14(1.09%)
RCP 4.5-2070s		1215555	7947.022	3724.44	1174.02	12845.48(1.05%)
RCP 8.5-2050s		1209236	13015.76	5003.02	1145.638	19164.41(1.56%)
RCP 8.5-2070s		1217079	7181.52	3548.94	590.74	11321.20(0.92%)

表 5 不同气候变化情景下西藏地区印加孔雀草的话生区面积/km<sup>2</sup>

# 3 讨论与结论

## 3.1 环境因子对印加孔雀草分布的影响

模型模拟预测的结果表明,限制印加孔雀草潜在分布范围的主要环境变量为土壤、温度和降水因子,其中 底层土壤酸碱度和最暖季度降水量累积相对贡献率已经超过50%,说明土壤酸碱度与降水量为制约印加孔 雀草潜在分布的关键因子。印加孔雀草喜阳光,不耐荫,一般密集生长<sup>[42]</sup>,对土壤酸碱度变化较为敏感,偏好 中性土壤,过酸或过碱的环境均不利于其生长,与入侵植物一年蓬相似<sup>[43]</sup>。值得注意的是,印加孔雀草属于 浅根系植物,底层土壤酸碱度以及顶层土壤酸碱度如何影响印加孔雀草生长的具体原因,仍需进一步实验来 提供生理生态学证据。印加孔雀草在20—25℃有最大生存能力,植株生物量会随着温度升高而得到提高[44], 其种子在 20—25℃时萌发率超过 90%<sup>[45]</sup>;植株对低温适应能力较弱,但种子在干燥、低温环境下仍可以保留



图 7 未来气候情景对比现代气候情景下印加孔雀草潜在适生区空间变化

Fig.7 Spatial variation of potential habitat of Tagetes minuta L. under future climate scenarios compared with modern climate scenarios



Fig.8 The movement of the distribution center of the potential suitable area of Tagetes minuta L. under different climate scenarios

活性<sup>[46]</sup>,一旦环境恢复到适宜即可大量萌发。印加孔雀草根系较浅,对环境中水分的要求较低,野外调查也 发现其主要生长在砂砾地,这与其抗干旱、抗贫瘠的生长特性相符<sup>[47]</sup>。其他因子对印加孔雀草的潜在地理分 布也有不同程度的影响,但影响可能不显著。人类活动强度对印加孔雀草的影响可能存在滞后或者较不明 显,西北部地区几乎无其适生地理环境,而东南部地区人类活动较为集中,印加孔雀草侵入的可能性更高,这 与现实情况相符。全球气温上升、降水机制改变等都可能改变入侵植物的分布和入侵成功率<sup>[48-49]</sup>,但环境变 化并不总是对植物入侵有所帮助,全球气温上升可能会减少水资源的可用性,从而导致入侵风险的增加或降 低<sup>[50-51]</sup>,也就是说降水、气温等因素对植物入侵的影响存在不确定性,不同入侵物种面对气候变化,会有不同 的响应<sup>[52]</sup>,这可能是导致 2070 年印加孔雀草潜在分布面积减少的原因之一。

3.2 印加孔雀草当前气候下的潜在分布

当前气候下的模型模拟结果与野外实地调查情况一致度较高,山南地区加查县和林芝地区朗县为印加孔 雀草分布中心地带,高适生等级分布区集中,米林县,林芝市区亦有分布。根据模拟结果,可以发现林芝地区 察隅县、波密县、墨脱县等地区环境条件均适合印加孔雀草生长,实际调查中却未发现印加孔雀草的踪迹,原 因可能来自以下两方面:(1)环境数据尚且不足。在实地调查中,作者未能有效获取小生境详细环境数据,所 用数据为大尺度数据,数据时效存在部分失真及滞后,环境因子响应曲线因而呈尖峰状(适宜环境取值范围 较小),最适海拔梯度为2840—3267 m,这使得较低海拔区域不在潜在适生区之内,该物种的真实生态需求仍 需进一步研究支撑。(2)模型存在缺陷。模型以物种现实存在点和环境变量来模拟推算物种的生态需求(生 态位)和模拟物种的潜在分布,未考虑种内、种间竞争等其他影响物种分布的因素<sup>[33]</sup>,但实际上物种的分布受 到各种生物和非生物因素的影响<sup>[54]</sup>,未来增添多样化数据将有助于改善模拟结果。但不可否认的是,随着环 境等因素的变化,模拟得出的印加孔雀草潜在适生区域将有可能成为现实分布区。

3.3 气候变化对印加孔雀草潜在分布的影响

不同气候变化情景及时间段下,印加孔雀草潜在分布面积有不同程度的增减。两种气候情景下,印加孔 雀草中短期(2050年)扩张趋势明显,而长期(2070年)下适生面积则会缩减,与此前案例相一致<sup>[55]</sup>。人为适 生区等级的划分会影响物种潜在分布的面积<sup>[56]</sup>,这是造成预测结果波动变化的原因之一。此外,物种对于气 候变化的响应并不都是一样的,适应性强的物种适宜分布区会增加,而较差的则会缩减<sup>[57-58]</sup>,印加孔雀草适 应性较强,中短期内入侵范围将会扩大,而长期则可能无法适应气候环境的大幅度变化。两种气候情景下的 印加孔雀草潜在分布中心均向东北部移动,从原有高度入侵地,朗县、加查县等地,向左贡县、芒康县等地区扩 散,海拔由现有发生地 3000 米左右,提高至 3500 米以上,超过其最佳适生海拔范围,有向更高的海拔和纬度 地区延展的分布趋势,有的研究结果也发现此种趋势<sup>[59-60]</sup>。全球气候变化的主导力量、地理环境和入侵物种 的特性都是决定入侵物种潜在适生范围的重要因素<sup>[61]</sup>,需要具体问题具体分析。

本研究结果从宏观角度预测了印加孔雀草气候变化下的潜在适生范围,可以为当地主管部门制定防控策略提供参考。但不可否认,模拟预测结果中印加孔雀草潜在适生区域存在差异,原因之一在于本研究假设各变量不会发生改变,实际并非如此,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,增加社会、经济、环境等复合因子模拟现实情况,对印加孔雀草的入侵路径、方式进行溯源,以求更全面的对印加孔雀草的入侵趋势进行预测。

3.3 结论

现代气候情景下,印加孔雀草的潜在适生区主要分布于西藏东南部地区,以朗县为中心,米林县、加查县和林芝市区为高适生地区。未来气候情况下,印加孔雀草的分布范围将逐渐扩大,向西藏东北部扩散至类乌齐县、波密县等地;但长时段来看,分布面积将会缩小,分布中心将逐渐东移。影响印加孔雀草分布主要环境因子为底层土壤酸碱度、最暖季降水量、土壤有效含水量和最暖月最高温度,最适 pH 范围为 7.5—8.1,最适最暖季降水量为 371—498 mm,最适土壤有效含水量 0.43—1.15 mm/m,最适最暖月最高温度为 21.9—23.4 ℃。

综上所述,气候变暖对于西藏地区印加孔雀草的入侵有积极作用,印加孔雀草潜在适生区范围中短期内 逐渐扩大,扩散面积增加明显,需要采取措施进行综合防治,否则将会对高原生态产生较为严重的破坏。

#### 参考文献(References):

<sup>[1]</sup> Drake S J. Assessment of Nonnative Invasive Plants in the DOE Oak Ridge National Environmental Research Park. Office of Scientific and Technical

Information (OSTI), 2002.

- [2] Wekhanya M N, Mbugua P, Mworia J. The effect of invasive species *Lantana* Camara L. on soil nutrients at Ol-Donyo Sabuk National Park, Kenya. Kenyatta University, 2020
- [3] Sardans J, Bartrons M, Margalef O, Gargallo-Garriga A, Janssens I A, Ciais P, Obersteiner M, Sigurdsson B D, Chen H Y H, Peñuelas J. Plant invasion is associated with higher plant-soil nutrient concentrations in nutrient-poor environments. Global Change Biology, 2017, 23 (3): 1282-1291.
- [4] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. Ecology, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [5] Seabloom E W, Williams J W, Slayback D, Stoms D M, Viers J H, Dobson A P. Human impacts, plant invasion, and imperiled plant species in California. Ecological Applications, 2006, 16(4): 1338-1350.
- [6] Pathak R, Negi V S, Rawal R S, Bhatt I D. Alien plant invasion in the Indian Himalayan Region: state of knowledge and research priorities. Biodiversity and Conservation, 2019, 28(12): 3073-3102.
- [7] Merow C, Bois S T, Allen J M, Xie Y Y, Silander J A Jr. Climate change both facilitates and inhibits invasive plant ranges in New England. PNAS, 2017, 114(16): E3276-E3284.
- [8] Pyšek P, Hulme P E. Biological invasions in Europe 50 years after elton: time to sound the ALARM. Fifty Years of Invasion Ecology. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2010; 71-88.
- [9] 牛方曲,封志明,刘慧.资源环境承载力综合评价方法在西藏产业结构调整中的应用.地理学报,2019,74(8):1563-1575.
- [10] Weber E, Li B. Plant invasions in China: what is to be expected in the wake of economic development? BioScience, 2008, 58(5): 437-444.
- [11] Wang C M, Chen C. Tagetes minuta L. (Asteraceae), a newly naturalized plant in Taiwan, TAIWANIA, 2006
- [12] 许敏, 扎西次仁. 青藏高原一新归化种. 广西植物, 2015, 35(4): 555-556.
- [13] 张劲林, 吕玉峰, 边勇, 刘若思, 江璐. 中国境内(内地)一种新的入侵植物——印加孔雀草. 植物检疫, 2014, 28(2): 65-67.
- [14] 董振国,刘启新,胡君,邓懋彬,熊豫宁.中国大陆归化植物新记录.广西植物,2013,33(3):432-434.
- [15] 张瑞海,张国良,宋振,王忠辉,付卫东.印加孔雀草入侵生态风险评估及其管理措施.生物安全学报,2019,28(1):71-75.
- [16] Gakuubi M M, Wagacha J M, Dossaji S F, Wanzala W. Chemical composition and antibacterial activity of essential oils of *Tagetes minuta* (Asteraceae) against selected plant pathogenic bacteria. International Journal of Microbiology, 2016: 7352509.
- [17] Walia S, Kumar R. Wild marigold (*Tagetes minuta* L.) an important industrial aromatic crop: liquid gold from the Himalaya. Journal of Essential Oil Research, 2020, 32(5): 373-393.
- [18] Eguaras M J, Fuselli S, Gende L, Fritz R, Ruffinengo S R, Clemente G, Gonzalez A, Bailac P N, Ponzi M I. An *in vitro* evaluation of *Tagetes minuta* essential oil for the control of the honeybee pathogens *Paenibacillus* larvae and *Ascosphaera apis*, and the parasitic mite *Varroa destructor*. Journal of Essential Oil Research, 2005, 17(3): 336-340.
- [19] Tomova B S, Waterhouse J S, Doberski J. The effect of fractionated *Tagetes* oil volatiles on aphid reproduction. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2005, 115(1): 153-159.
- [20] Arora K, Batish D, Singh H P, Kohli R K. Comparative account of allelopathic potential of essential oil of *Tagetes minuta* L. and its major component cis-β-Ocimene. Annals of Plant Sciences, 2016, 5(9): 1428.
- [21] 土艳丽, 仇晓玉, 罗建, 王喜龙, 段元文. 西藏林芝入侵植物印加孔雀草与农作物藏青稞的竞争研究. 西藏科技, 2018(11): 62-65.
- [22] 彭少麟,向言词.植物外来种入侵及其对生态系统的影响.生态学报,1999,19(4):560-568.
- [23] 郓玲玲,张瑞海,宋振,付卫东,王然,王忠辉,张国良.印加孔雀草对土壤细菌群落多样性的影响.生态环境学报,2020,29(5): 901-909.
- [24] 仇晓玉,徐知远,土艳丽,罗建.入侵植物印加孔雀草在不同生境的种群构件生物量及其分配特征.广西植物, 2021, 41(03): 447-455.
- [25] 土艳丽,王力平,王喜龙,王林林,段元文.利用昆虫携带的花粉初探西藏入侵植物印加孔雀草在当地传粉网络中的地位.生物多样性, 2019,27(3):306-313.
- [26] 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.
- [27] 迈迪娜·吐尔逊. 意大利苍耳在新疆的适生区分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [28] 崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区. 生物多样性, 2018, 26(2): 171-176.
- [29] 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.
- [30] 冯建孟,徐成东.云南省外来植物空间分布格局与环境因子和人类活动的关系.西南大学学报:自然科学版, 2009, 31(8): 78-83.
- [31] 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.
- [32] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [33] 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.
- [34] 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.

- [35] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, Albert D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. Ecography, 2006, 29(5): 773-785.
- [36] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [37] 王运生,谢丙炎,万方浩,肖启明,戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [38] 柳晓燕,李俊生,赵彩云,全占军,赵相健,宫璐.基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区.植物保护学报,2016,43 (6):1041-1048.
- [39] 王茹琳,李庆,封传红,石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [40] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [41] 张东方,张琴,郭杰,孙成忠,吴杰,聂祥,谢彩香. 基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究. 生态学报, 2017, 37 (15): 5111-5120.
- [42] Kumar R, Sharma S, Ramesh K, Pathania V, Prasad R. Irradiance stress and plant spacing effect on growth, biomass and quality of wild marigold (*Tagetes minuta* L.)-an industrial crop in western Himalaya. Journal of Essential Oil Research, 2014, 26(5): 348-358.
- [43] 胡天印,王勇,印丽萍,郭水良. 入侵植物春一年蓬对不同环境的生理适应性研究. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2008,34(4): 395-400.
- [44] Kumar R, Ramesh K, Singh R D, Prasad R. Modulation of wild marigold (Tagetes minuta L.) phenophases towards the varying temperature regimes-A field study. Journal of Agrometeorology, 2010, 12(2): 234-240.
- [45] Hulina N. Wild marigold-Tagetes minuta L., new weed on the island of hvar, and new contribution to the knowledge of its distribution in Dalmatia (croatia). Agriculturae Conspectus Scientificus, 2008
- [46] Forsyth C, Staden J V. Germination of Tagetes minuta L. I. temperature effects. Annals of Botany, 1983, 52(5): 659-666.
- [47] Mohamed M A H, Harris P J, Henderson J, Senatore F. Effect of drought stress on the yield and composition of volatile oils of drought-tolerant and non-drought-tolerant clones of *Tagetes minuta*. Planta Medica, 2002, 68(5): 472-474.
- [48] Wilfried T, David M R, Guy F M. Will climate change promote alien plant invasions? In Ecological Studies. Springer-Verlag, 2007, 193: 197-211.
- [49] Walther G R, Roques A, Hulme P E, Sykes M T, Pyšek P, Kühn I, Zobel M, Bacher S, Botta-Dukút Z, Bugmann H, Czúcz B, Dauber J, Hickler T, Jarošík V, Kenis M, Klotz S, Minchin D, Moora M, Settele J. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(12): 686-693.
- [50] Thomsen M A, D' Antonio C M, Suttle K B, Sousa W P. Ecological resistance, seed density and their interactions determine patterns of invasion in a California coastal grassland. Ecology Letters, 2006, 9(2): 160-170.
- [51] Bradley B A, Oppenheimer M, Wilcove D S. Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? Global Change Biology, 2009, 15(6): 1511-1521.
- [52] Bellard C, Thuiller W, Leroy B, Genovesi P, Bakkenes M, Courchamp F. Will climate change promote future invasions? Global Change Biology, 2013, 19(12): 3740-3748.
- [53] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [54] Bradie J, Leung B. A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. Journal of Biogeography, 2017, 44(6): 1344-1361.
- [55] Hu X G, Jin Y Q, Wang X R, Mao J F, Li Y. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis*. PLoS One, 2015, 10(7): e0132326.
- [56] 王绮, 樊保国, 赵光华. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3774-3784.
- [57] 陈爱莉,赵志华,龚伟,孔芬,张克亮. 气候变化背景下紫楠在中国的适宜分布区模拟. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(5): 435-444.
- [58] 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.
- [59] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. Science, 2008, 320(5884): 1768-1771.
- [60] Roberts D R, Hamann A. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: a palaeoecological perspective. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(2): 121-133.
- [61] Bradley B A, Blumenthal D M, Wilcove D S, Ziska L H. Predicting plant invasions in an era of global change. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(5): 310-318.