

基于 Biomod2 组合模型对气候变化下 青藏高原密花香薹适生区的预测

刘泽渊¹, 魏有海^{1,2}, 侯璐^{1,2}, 郭良芝^{1,2},
程亮^{1,2}, 李跃³, 杨振扬³, 付贞桢³

(1.青海大学农林科学院,青海 西宁 810016; 2.青海省农林科学院,青海 西宁 810016; 3.青海大学农牧学院,青海 西宁 810016)

摘要:密花香薹 (*Elsholtzia densa*) 是青藏高原农田的主要恶性杂草之一,为探究其对农作物的潜在威胁和在未来气候变化情景下的潜在分布区,使用 Biomod2 平台提供的 10 种算法将其组合成一个模型,对影响密花香薹适宜分布的环境变量进行评价分析,预测其当前和未来气候变化背景下的适生区变化和质心转移。结果表明:影响密花香薹分布的主要环境因子是最暖月份的最高温度,当前气候条件下其分布范围在青海、甘肃、四川、云南和西藏等地,总面积为 $1.044 \times 10^6 \text{ km}^2$,占青藏高原总面积的 40.94%。基于气候变化大背景下的预测结果显示,密花香薹在青藏高原的适生区面积明显扩张,在高海拔地区将有更高的生存和繁衍能力,其质心预计将向西北方向迁移。密花香薹入侵严重威胁农作物的产量和品质,需要采取有效的防治策略加以控制,并加强监测其发生和扩散区域,对靶制定高效的防控策略。

关键词:密花香薹; 适生区; 气候变化; Biomod2 组合模型; 青藏高原

中图分类号:S451 **文献标志码:**A

Predicting suitable habitats for *Elsholtzia densa* on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau under climate change using the Biomod2 model

LIU Zeyuan¹, WEI Youhai^{1,2}, HOU Lu^{1,2}, GUO Liangzhi^{1,2},
CHENG Liang^{1,2}, LI Yue³, YANG Zhenyang³, FU Zhenzhen³

(1. College of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Xining, Qinghai 810016, China;

3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: *Elsholtzia densa* is one of the major malignant weeds in agricultural fields on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, and in order to explore its potential threat to crops and potential distribution areas under future climate change scenarios, this study used 10 algorithms provided by the Biomod2 platform combined into a single model to evaluate and analyze environmental variables affecting *Elsholtzia densa*'s fitness for distribution, and to predict the changes in suitable areas and center-of-mass transfer in the context of current and future climate change. The results showed that the main environmental factor affecting the distribution of *Elsholtzia densa* was the maximum temperature of the warmest month, and that it was distributed in Qinghai, Gansu, Sichuan, Yunnan, and Qinghai-Xizang (Tibetan) under the current climatic conditions, with a total area of $1.044 \times 10^6 \text{ km}^2$, which accounted for 40.94% of the total area of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. Predictions based on the context of climate change indicate that *Elsholtzia densa* has significantly expanded its habitat on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, demonstrating a greater ability to survive and reproduce at higher altitudes. Its center of mass is expected to shift northwestward. The invasion of *Elsholtzia densa* poses a serious threat to crop yield and quality, necessitating

收稿日期:2024-07-18

修回日期:2024-10-30

项目基金:青海省科学技术厅重点研发与转化计划(2024-NK-111); 国家科技部第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0303)

作者简介:刘泽渊(2000-),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,研究方向为杂草治理研究。E-mail:18704921744@163.com

通信作者:魏有海(1972-),男,青海湟中人,研究员,主要从事农田杂草治理与利用研究。E-mail:youhaiweiqh@163.com

effective control measures. Strengthened monitoring of its occurrence and spread, along with the development of efficient prevention and management strategies, is essential for mitigating its impact.

Keywords: *Elsholtzia densa*; suitable area; climate change; biomod2 combinatorial modeling; Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau

青藏高原是一个生态脆弱地带,对全球气候变暖极为敏感^[1],农作物种植主要以青稞、小麦和油菜为主,近年来,气候变暖加剧了对植物分布的影响^[2],杂草比作物具有更好的适应潜能,气温升高可能使杂草向北和向高海拔地区扩张^[3],严重威胁青藏高原农作物的生产。气候变暖对物种分布的影响已成为全球植物空间格局变化研究的热点问题,利用物种分布模型(SDM, species distribution model)对植物地理分布进行预测也成为一种研究趋势^[4]。在以往的研究中,研究人员主要使用单一模型最大熵模型,该模型能处理大量的数据,然而 Thuiller 等^[5]发现物种分布模型的稳健度随数据输入量增大而降低,分布区预测仅仅使用某一种模型的作法并非稳定可靠。

基于 R 语言开发的物种分布集成预测平台 Biomod2 是目前最为成熟的多模型平台,拥有 10 种常用的 SDM 算法,用户可自由组合模型进行模拟,从而最大限度地提高模型的精度和预测未来物种分布的准确性^[6]。单一模型在进行物种分布预测时具有各自的优势和缺点,而 Biomod2 组合模型则是在此基础上进行预测,预测过程相对于单一模型更加准确和稳定,为了增加模型精度和减少模拟结果的不确定性,组合模型成为了物种分布研究的热点领域和方向^[7]。唐千鸿等^[8]使用物种分布模型的集成平台 Biomod2,在未来气候变化情景下对杂草节节麦(*Aegilops tauschii*)和豚草(*Ambrosia artemisiifolia* L.)的潜在分布区进行探究,发现随着未来气温升高,节节麦的分布区域会逐渐减少,而豚草分布区域则大幅增加,这为预防杂草入侵农业生态系统提供了依据。

青藏高原农田分布的主要杂草共计 51 科、284 种,其中 59 种单子叶杂草、222 种双子叶杂草、135 种一年生杂草和 149 种多年生杂草^[3]。密花香薷(*Elsholtzia densa*)是唇形科(*Labiatae*)香薷属(*Elsholtzia*)一年生草本植物,其生境主要为海拔 1 800~4 100 m 的高寒草甸、山坡、林地等^[9],具有结实率高、种子易萌发且随着逐渐成熟不断脱落等特点,对作物的生长发育、产量和品质造成严重的影响,在油菜田危害尤甚。由于目前油菜田除草剂品种匮乏,生产上使用的除草剂品种结构不合理和

长期单一使用等问题,使密花香薷在青藏高原的农田里耐药性增强,防除较为困难^[10]。Zhou 等^[11]研究表明,密花香薷对青藏高原农田生态系统造成严重危害,每年都产生许多枯枝和枯叶分解,并向土壤中释放化感物质,干扰周围植物的防御功能,直接抑制周围植物的生长发育。因此,预测气候变化下青藏高原密花香薷的分布不仅对其发生动态的研究有借鉴意义,也有助于实时把握该物种的分布范围和扩散趋势,制定农作物保护和除草剂开发策略。

目前,国内外针对密花香薷的研究主要集中于药理作用、化学成分及生物防治等方面^[12-13],通过预测其在未来气候变化下的分布与扩散趋势,可以更多地了解其在青藏高原种群扩张的潜在风险^[14]。本研究基于青藏高原密花香薷的分布位点调查数据以及当前和未来气候数据,利用 Biomod2 平台集成单一模型对当前和未来的潜在适生区分布进行了系统研究,分析适宜性分布与环境变量之间的联系及潜在适生区的整体变化趋势。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据收集

密花香薷的青藏高原分布信息主要来自以下两种方式:(1)野外调查:通过近 10 年(2014—2024 年)对青海省的密花香薷进行了全面的调查,获得了它们的空间位置。(2)通过查阅全球生物多样性信息数据库(GBIF, <https://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(CHV, <http://www.cvh.ac.cn/>)、国家自然科技资源平台教学标本资源共享平台标本馆(SCU, <http://mnh.scu.edu.cn>)、中国自然标本馆(CFH, <http://www.cfh.ac.cn/>)、中国国家标本资源平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>)和《中国植物志》收集了密花香薷的分布数据^[15]。

基于以上方式,获得 2014—2024 年间 289 条分布数据,将收集到的所有地理分布数据点导入 Excel 处理,同时删除纬度相同的重复位点,利用 R 语言中 ENMTools 筛除自相关的数据点,最终得到青藏高原上密花香薷的 176 个有效分布点(图 1,见 282 页),将分布数据文件转换为 CSV 格式,用于后续建模。本研究中的所有分析均基于 ArcMap 10.2 和 R 版本 4.2.3。

1.2 气候环境变量的筛选

生物气候变量采用世界气候数据库 (WORD-CLIM, <http://www.Worldclim.org>) 中的 19 个气候因子作为建模备选因子,空间分辨率为 30"。未来气候变量数据源自世界气候数据模型 BCC-CSM2-MR,采用第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 的最新共享社会经济路径与代表性浓度路径 (RCP) 组合情景,这些情景基于不同的社会经济假设,反映了未来人类可能的温室气体排放水平^[16]。本项研究选取了两个未来时间段 2050s (2041—2060 年)、2070s (2061—2080 年) 和三种不同的社会经济路径 (RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5) 作为建模的数据来源,并将栅格格式的环境变量使用 WGS_1984_World_Mercator 基准作为默认参数与地理空间对齐。

环境变量是构建生态位模型的重要参数,环境变量之间的高度相关性和共线性会造成过拟合现象,使用 R 语言进行 Pearson 相关性检验,当气候变量相关系数超过 0.8 时,根据物种特性和研究需求,保留一个较为合适的变量。最后采用了 8 个生物气候指标 (表 1) (Bio2、Bio3、Bio5、Bio6、Bio7、Bio15、Bio17、Bio18) 作为本研究的环境变量。

1.3 模型的构建

组合模型的预测效果更值得信赖,Biomod2 是一个物种分布模型 (SDM) 的集成平台,它集成了 10

种广泛使用的建模技术,具有良好的预测性能。本研究使用 R 包“biomod2”3.5.1 版本,分别预测当前、2050s (2040—2060 年) 和 2070s (2060—2080 年) 时期的适生区。首先,使用该程序包自带的 10 个模型进行单个模型建模 (表 2),在建模过程中,随机选取密花香薹 176 个分布点中的 75% 作为训练数据,剩余 25% 作为测试数据用于评估模型的性能^[17]。此外,为满足 Biomod2 建模要求并更好地模拟实际分布,本研究随机生成 1 000 个伪缺失点参与建模,并进行两次重复。最后采用真实技巧统计值 (TSS, true skillstatistic,)、KAPPA 系数和受试者工作特征曲线 (ROC, receiver operator characteristic curve) 的评价拟合精度。本研究将使用 TSS 作为主要的评估标准,选择 TSS 值超过 0.6 的个体模型进行集成建模^[17],进行高精度组合后,得到最优的两种集成模型 EMca 模型 (Concomitant Approach Ensemble Model) 和 EMwm 模型 (Weighted Mean Ensemble Model),分别分析其在当代气候变化下的变化趋势。

1.4 地理空间数据分析

为了研究未来气候情景下密花香薹适生区的变化,统计并计算了不同气候情景和当前气候情景适生区的变化,最终对输出的组合模型结果进行适宜性分级,得到的适宜度图在 0~1 000 之间,指示了物种发生的概率。我们将自然间断法与相等间隔法结合,使用第一个间断值作为间断,并将适宜度图分为非适生区 (0~间断值)、低适生区 (间断值~600)、中等适生区 (600~800) 和高适生区 (800~1 000) 四个等级。

质心迁移可以刻画物种在不同气候情景下的分布变化,利用 ArcGIS10.2 中的 SDM 工具箱模拟了该物种在 6 种气候情景下质心迁移的变化情况,此外,还确定了密花香薹在不同时期的迁移方向。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

利用密花香薹在青藏高原的分布数据以及环境变量,经过两次运行后,通过模型的交叉验证评估,获得组合模型和 10 种模型的 TSS、KAPPA 和 AUC 值 (表 2),KAPPA 值为 0.341~0.976,TSS 值为 0.515~0.993,AUC 值为 0.757~1,通过对 3 个指标的结果评估,认为 RF 是表现最好的模型,而 SRE 算法提供的预测性能最差,选择了预测精度处于中等水平的 TSS 大于 0.6 的模型算法进行集成建模,组合模型 (EMca) 的 KAPPA、TSS 和 AUC 值分别为

表 1 Biomod2 组合模型中使用的 8 个环境变量的描述

Table 1 Description of the eight environmental variables used in the Biomod2 ensemble model

类型 Type	代码 Code	描述 Description	单位 Unit
生物气候因子 Bioclimatic factor	Bio2	平均月温差 Mean diurnal range (Mean of monthly (Max temp-Min temp))	℃
		等温性 (Bio2/Bio7) (×100) Isothermality (Bio02/Bio07) (×100)	
	Bio5	最暖月份最高温度 Max temperature of warmest month	℃
		最冷月份最低温度 Min temperature of coldest month	
	Bio6	年温度范围 (Bio5-Bio6) Temperature annual range (Bio5-Bio6)	℃
		降水季节性变化 (变异系数) Precipitation seasonality (Coefficient of variation)	
	Bio15	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	mm
		最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	
	Bio17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	mm
		最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	

0.658、0.788 和 0.965,组合模型(EMwm)的 KAPPA、TSS 和 AUC 值分别为 0.653、0.784 和 0.963,高于单独算法(SRE、CTA、GLM、FDA 和 MARS)的值,相比单个模型,集成模型的构建降低了拟合的不确定性,表现出较好的准确性和稳定性。本研究采用两种组合模型(EMwm 和 EMca)对当前气候适生区的预测进行比较,由于权重概率法通过权重和概率的加权计算,能够量化不同因素的重要性,从而提供更精确的决策支持,我们使用权重概率法的组合模型(EMwm)进行未来时期的预测。

2.2 生物气候变量影响

我们使用 8 个环境变量输入模型中,通过 10 种模型一同选定气候因子的贡献百分比,最暖月份最高温度(Bio5)在 5 个模型中的重要性均大于 50%(表 3),是影响密花香薷分布的最重要的气候因子(图 2),对模型的贡献率最高,能够较好地表现密花香薷对适生区选择的情况,我们选择 0.5 为存在概率的阈值,当最暖月份的最高温度达到 17~24℃时,最适宜密花香薷的生长。

表 2 每种建模算法和组合模型的评价统计数据

Table 2 Evaluation statistics for each modelling algorithm and ensemble model			
模型 Model	KAPPA	TSS	ROC
表面分布区分室模型(SRE) Surface range envelop	0.341	0.515	0.757
分类树分析(CTA) Classification tree analysis	0.524	0.678	0.842
广义线性模型(GLM) Generalized linear model	0.602	0.707	0.924
柔性判别分析(FDA) Flexible discriminant analysis	0.614	0.694	0.914
多元适应回归样条函数(MARS) Multiple adaptive regression splines	0.617	0.728	0.934
广义相加模型(GAM) Generalized additive model	0.684	0.803	0.955
广义增强模型(GBM) Generalized boosting model	0.689	0.815	0.963
人工神经网络(ANN) Artificial neural network	0.682	0.763	0.940
最大熵模型(MAXENT.Phillips) Maximum entropy	0.747	0.720	0.935
随机森林(RF) Random forest	0.976	0.993	1.000
集成模型投票表决(EMca) Ensemble model concomitant approach	0.658	0.788	0.965
集成模型加权平均(EMwm) Ensemble model weighted mean	0.653	0.784	0.963

2.3 密花香薷当代的潜在适生区

研究发现两种组合模型适生区与实际的分布位点一致,较为准确。我们将自然间断法与相等间隔法结合,将预测的适生区划分为 4 个等级,首先使自然间断法确定间断值,将低于间断值定义为非适生区,其中当代 EMwm 和 EMca 的间断值是 153 和 113,并划分为 3 个适生等级:间断值~600 为低适生区、600~800 为中等适生区、800~1 000 为高适生区。当前气候条件下,两种组合模型预测下的密花香薷适宜区都集中在青藏高原的东部和南部(图 3),主要包括青海、甘肃、四川、云南、西藏和甘肃等地,其中最适宜其生长的地区主要集中在青海东部、甘肃南部以及四川西部等地区。两种组合模型对于适生区的预测标准并不一致,组合模型(EMwm)适生区面积为 1.044×10⁶ km²,占青藏高原总面积的 40.94%,低适生区面积较大,而组合模型(EMca)适生区面积为 6.724×10⁵ km²,占青藏高原总面积的 26.37%,高适生区面积较小。

2.4 未来气候情景下密花香薷气候适生区的变化

结果表明,上世纪 50 年代 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 的间断值分别是 317、210、186;70 年代 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 的间断值分别是 313、184、205,未来适生区分布(图 4)主要集中在青海、甘肃、

表 3 不同模型下环境因子的贡献率/%

Table 3 Contribution of environmental factors under different models								
模型 Model	Bio2	Bio3	Bio5	Bio6	Bio7	Bio15	Bio17	Bio18
GLM	71	42	32	86	37	7	1	46
GBM	2	3	48	2	4	2	0	28
GAM	99	72	73	100	81	14	5	39
CTA	5	4	64	5	5	1	0	44
ANN	16	10	28	36	9	19	11	60
SRE	12	18	25	36	16	10	16	30
FDA	4	4	68	17	11	1	0	14
MARS	6	4	68	16	32	5	0	40
RF	5	3	28	13	6	2	2	16
MAXENT	12	15	51	20	25	15	15	35

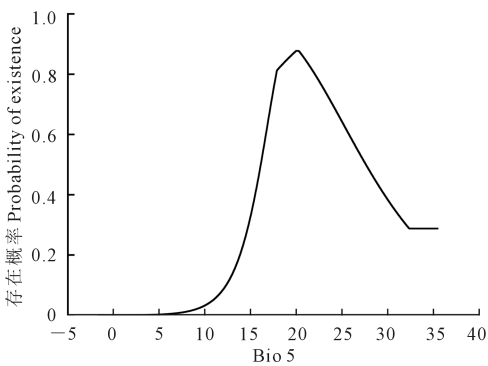
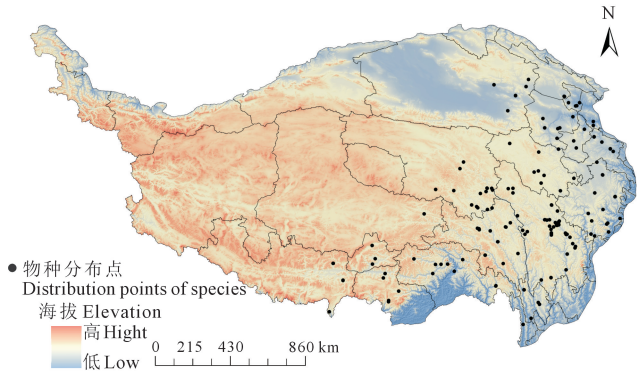


图 2 关键生物气候变量的响应曲线
Fig.2 Response curve for key bioclimatic variables

四川、云南以及西藏南部等地,与目前适生区分布基本吻合。在未来三种气候情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5),密花香薹的分布地点变得越来越广阔,较当前的适生区面积呈现增加的趋势,由表 4 可以看出,在未来的所有气候情景下,低适生区和中等适生区的面积均显示出增加的趋势,特别是在 RCP8.5 情景下,其中低适生区面积增幅最为显著,当前时期到 2050s 从 87.57 万 km²增加到 150.68 万 km²,表明一些地区的气候条件将变得更加有利于密花香薹的生长。在 2050s 时期,RCP8.5 气候情景下密花香薹总适生区的面积最大,达到 200.62 万 km²,适生区面积增加的最多,达到 96.23 万 km²。在 2070s 时期,RCP8.5 气候情景下,密花香薹低适生区和中等适生区的面积增加较多,而高适生区面积则显著减少,甚至降为零,这种变化反映了未来气候变暖会对高海拔物种的生存造成严重影响,最终总适生区面积达到 170.72 万 km²。



注:地图资源来自于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>) 中青藏高原 1 : 1000000 行政边界数据(2017)。
Note: Map resources from the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau 1 : 1,000,000 Administrative Boundary Data (2017) in the National Tibetan Plateau Science Data Centre (<https://data.tpdc.ac.cn/home>).

图 1 青藏高原地区密花香薹的分布点
Fig.1 Distribution points of *Elsholtzia densa* in the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau region

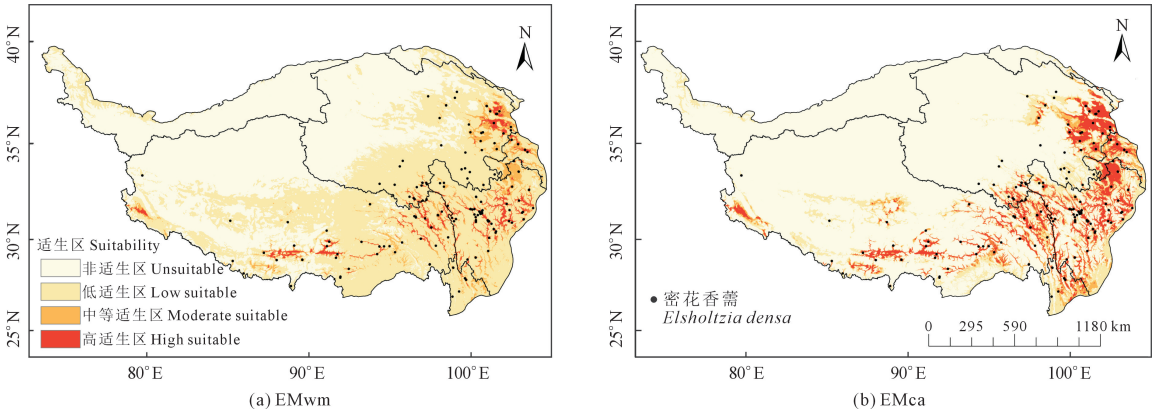


图 3 当前气候条件下两种组合模型的密花香薹潜在适生区

Fig.3 Potential habitat areas of *Elsholtzia densa* under current climatic conditions for the two ensemble models

表 4 不同气候情景下的密花香薹的潜在适生区面积

Table 4 Potential suitable area size of <i>Elsholtzia densa</i> under different climatic scenarios							
时期 Period	排放情景 Emissions scenario	低适生区面积 Low suitable area /($\times 10^4 \text{ km}^2$)	趋势 Trend /($\times 10^4 \text{ km}^2$)	中等适生区面积 Moderate suitable /($\times 10^4 \text{ km}^2$)	趋势 Trend /($\times 10^4 \text{ km}^2$)	高适生区面积 High suitable /($\times 10^4 \text{ km}^2$)	趋势 Trend /($\times 10^4 \text{ km}^2$)
当前 Current		87.57		11.20		5.62	
	RCP2.6	90.90	3.33 ↑	36.66	25.46 ↑	13.44	7.81 ↑
2050s	RCP4.5	111.13	23.56 ↑	33.83	22.63 ↑	11.51	5.89 ↑
	RCP8.5	150.68	63.11 ↑	36.79	25.60 ↑	13.14	7.52 ↑
	RCP2.6	91.30	3.73 ↑	38.87	27.67 ↑	15.12	9.49 ↑
2070s	RCP4.5	117.00	29.43 ↑	35.47	24.27 ↑	4.39	-1.23 ↓
	RCP8.5	121.68	34.11 ↑	49.04	37.84 ↑	0.00	-5.62 ↓

注:向上箭头(↑)表示与当前时期相比增加;向下箭头(↓)表示与当前时期相比减少
Note: Upward arrows (↑) indicate an increase compared to the current period; downward arrows (↓) indicate a decrease compared to the current period.

2.5 质心迁移

通过分析未来气候适生区质心的变化,可以揭示密花香薹随气候变化的迁移趋势,从图 5 可以看

出,当前的质心位置位于昌都市北部,海拔高度达到 2 857 m,在未来 2050s 和 2070s 时期的 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下的质心相较于当前时期会向

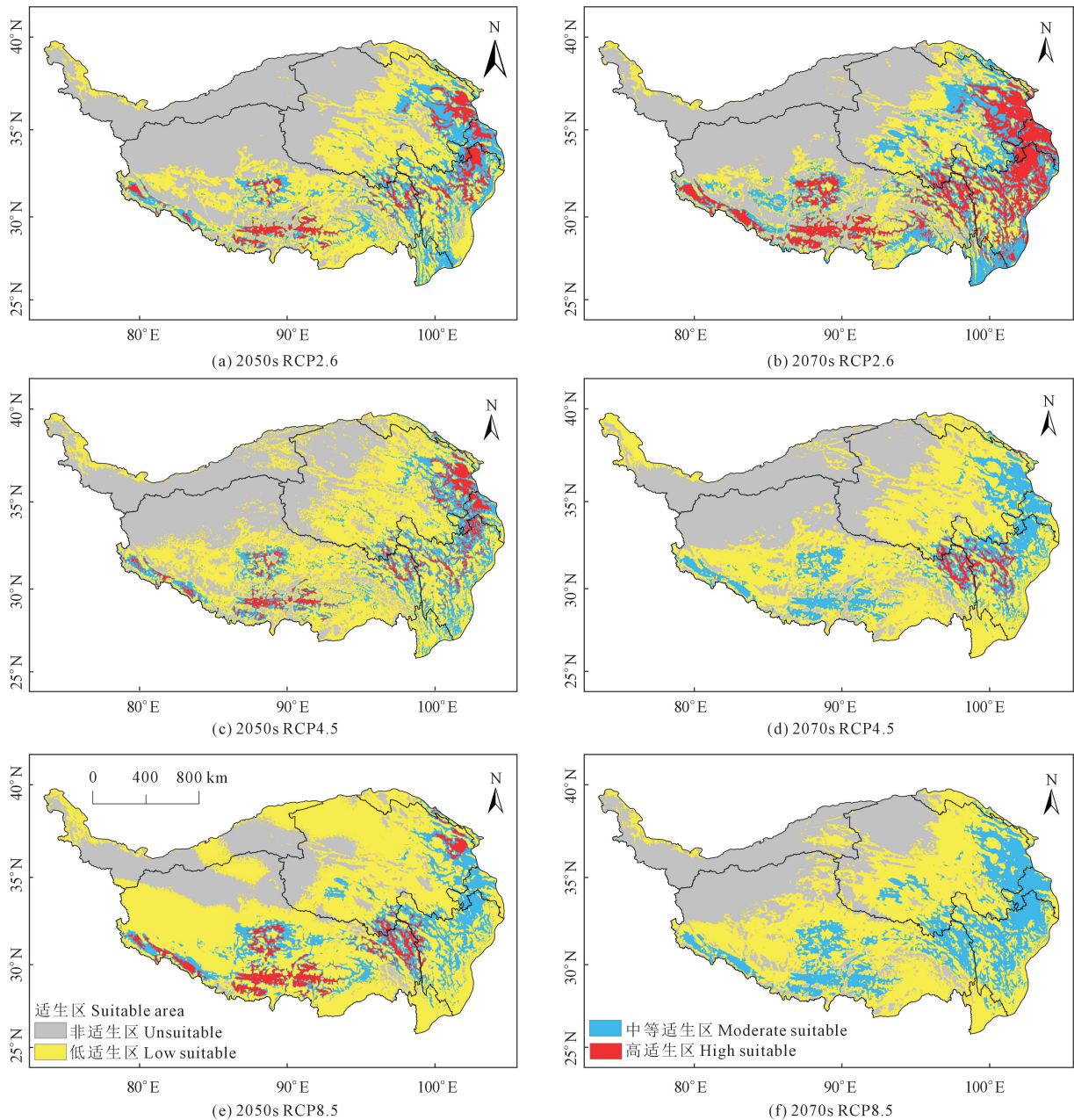


图 4 2050s 和 2070s 未来不同气候情景下密花香薷在青藏高原的潜在适宜分布

Fig.4 Potential suitable distribution of *Elsholtzia densa* on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau in 2050s and 2070s under different future climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5)

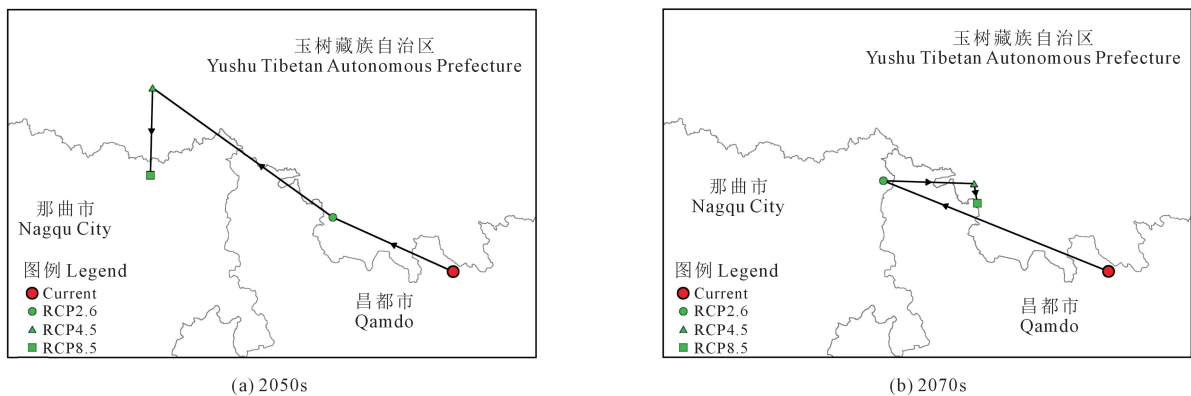


图 5 不同气候情景下密花香薷的质心迁徙路线

Fig.5 Plasmodal migration routes of *Elsholtzia densa* under different climatic scenarios

西北方向迁移,迁移到玉树藏族自治州和那曲市等地,海拔高度达到 3 000 m 左右,其中 2050 年 RCP4.5 情景下密花香薷质心位置迁移距离最远。结果表明在未来气候情境下,高海拔地区密花香薷将有更高的生存和繁衍能力。

3 小结与讨论

3.1 物种分布建模和评估模型效果

物种分布模型(SDM)广泛应用于生态学和地理学领域,用于预测物种潜在的分布区域,依据不同的算法估计物种的生态位,并根据物种生态位与环境之间的潜在关系阐明对气候变化的响应,反映物种对生境的偏好程度、出现概率、生境适宜度或物种丰富度,是目前预测物种潜在分布的最重要方法^[18]。模型过拟是基于气候变化的物种分布模拟的常见问题,会导致对物种潜在分布的解释出现过度预测,而集成模型缓解过拟问题,相比单个模型能较好地提高模型精度^[19],本研究采用 AUC 值、TSS 评分和 KAPPA 评分综合评估模型,尽管 RF 模型在本研究中的评估结果最佳,但考虑到模型可能发生拟合,为确保模拟结果的稳健性,依旧选择构建两种集成模型 EMwm 和 EMca 来预测密花香薷的适生区分布,它们的 TSS、KAPPA、AUC 值分别为 0.658、0.788、0.965 和 0.653、0.784、0.963,表明最终的集成模型效果较好。由于 EMwm 模型考虑了每个决策因素的权重和可能性,提供出更精确的决定,所以将其结果用于未来气候变化的预测。杜毅倩等^[20]在未来气候变化下对我国冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)的适生区进行预测,使用了 Biomod2 中 11 个物种分布模型进行筛选,尽管 XGBOOST 模型在其研究中的评估结果最佳,但由于样本量较小,为确保模拟结果的稳健性,依旧选择构建集成模型预测冷蒿的分布,为理解未来气候变化背景下冷蒿的分布格局提供了参考。

3.2 密花香薷气候因子分析

许多研究在使用物种分布模型来预测物种的地理分布和入侵物种的传播时,都采用生物气候因素和土壤因子作为环境变量,对于密花香薷这样具有广泛土壤适应性的植物,其生长受土壤因子的直接限制相对较少,而更多地受到气候因子如温度和降水的影响。因此,在进行未来分布预测时,应该选择更关键和具有预测力的气候因子纳入模型,以提高模型的解释能力和预测准确性^[21]。在本研究中,最暖月份最高温度(Bio5)在 5 个模型中的重要性均大于 50%,表明这个因素发挥着重要作用,当

最暖月份最高温度达到 17~24℃ 时,最适宜密花香薷的生长。密花香薷能够在较为凉爽的气候条件下生长,通常生长在海拔大约在 1 800~4 100 m 的范围内,而在这些海拔下,最暖月份的温度范围在 20℃ 左右,已有研究表明密花香薷泌蜜最适宜的温度是 20℃ 左右^[22],与本研究得出的温度范围相似,符合其生长和生理活动的需要。申源等^[3]对气候变化下青藏高原农田杂草丰富度格局变化进行研究,通过 OLS 模型和 GWR 模型表明最热月份最高温(Bio5)对农田杂草物种丰富度分布格局有一定的影响,这与本研究结果一致。唐燕等^[23]使用 Maxent 模型对我国中华枸杞(*Lycium chinense*)的潜在分布做出预测并对重要影响因子进行分析,研究表明最暖月最高温度(Bio5)为 32℃ 左右时,最适宜枸杞生长。徐文力等^[24]和王俊伟等^[25]分别对气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草(*Tagetes minuta* L.)和曼陀罗(*Datura stramonium* L.)的适生区进行预测,发现最暖月最高温度(Bio5)是影响其分布的主导环境因子之一。

本研究当前存在一些缺陷和不足,除气候和土壤因子对植物的地理分布有影响外,其他因子也可能会影响植物的地理分布,例如,植被覆盖度、地形条件、人类活动强度等的影响等,这些因素可能对密花香薷的分布产生影响,这为后续研究提供了必要的参考。

3.3 青藏高原密花香薷的适生区变化预测

全球气候变暖会导致物种的地理分布变化、植被带迁移以及其适生区范围改变。在未来气候变化下,密花香薷分布是否会向更高海拔农田扩散?其适生范围的变化值得探讨。在本研究中,我们使用组合模型(EMwm)预测了当前和未来碳排放情景下密花香薷在青藏高原的气候适生区域的变化。结果表明,未来气候条件下密花香薷在青藏高原范围内的适生面积将变得更加广泛,尤其是在较高排放情景下(RCP8.5),高海拔地区环境也逐渐符合密花香薷的生长要求。而在 2070s 的 RCP8.5 情景下,高适生区面积显著减少,这是因为未来气候变暖,高适生区的温度超过当前生长的最适温度。在模拟的三种未来气候情境中,密花香薷的质心移动趋势会呈现出随时间而逐渐向西北偏移,申源等^[3]研究表明,未来青藏高原农田杂草丰富度整体呈由东南向西北方向增加的趋势,与密花香薷迁移的方向一致,这也印证了组合模型预测的可靠性。未来气候变化下,气温升高将对杂草的分布产生重要影响,温度升高将改变青藏高原的水热条件,使得杂草的分布界线往北和高海拔地区延伸,致使新环境

的作物面临新的杂草危害。

3.4 绿色防控技术建议

绿色防控技术是绿色防控技术是按照“绿色植保”理念,采用农业防治、物理防治、生物防治、生态调控以及科学、合理、安全使用农药的技术,达到有效控制农作物病虫草害,确保农作物生产安全、农产品质量和农业生态环境安全,促进农业增产、增收的目的^[26]。

农业防治措施主要包括:(1)播种前和收获后耕翻,使土壤表层的杂草种子深埋,破坏其适生条件,研究表明密花香薹幼茎的顶土能力在 5 cm 以内^[27],进行深翻耕将上层的大量种子深埋于下层土内,可以抑制其萌发;(2)选择对杂草具有抵抗力的作物品种进行种植,从源头上减少杂草的侵害。物理防治措施主要包括实施轮作制度、及时除草等措施,可以有效降低密花香薹种子的出苗率,也可选用秸秆、干土和薄膜等覆盖阻隔空气和光照^[28],抑制密花香薹的呼吸作用和光合作用,降低土壤养分损失,保障作物的营养需求。生物防治措施主要利用真菌、细菌等生物杀死杂草,不仅能够有效控制杂草危害,还可以实现生态环境保护^[29],朱海霞等^[10]以 HL-1 菌株固态发酵获得的菌粉制备成可湿性粉剂,在密花香薹上表现出较强的致病性;李欢等^[30]从自然发病的老鹳草 (*Geranium wilfordii* Maxim.) 叶片分离得到菌株 HY-063,将其喷施于阔叶杂草密花香薹后,会导致叶片发黄枯萎甚至整株枯死;程海洋等^[31]从自然感病的瓜叶葵 (*Helianthus cucumerifo*) 植株叶片上筛选出生防菌 *Alternaria alternata* DT-XRKA,对密花香薹的鲜重防效可达 85.99%。生态调控措施主要是采用水肥管理、合理密植等手段来抑制农田密花香薹生长,提高作物产量和品质,同时减少化学农药和化肥的使用,保护生态环境。化学防治主要采用安全、高效、低毒、低风险除草剂,做到科学选药、适期用药、安全施药,化学除草剂混合使用及不同作用机理品种轮换施用,目前仍然是一种有效防治杂草的方法,李玮^[32]研究发现在马铃薯田施用 25% 氟咯草酮 EC 650 g a.i. · hm⁻² 时,对密花香薹鲜重防效高达 88.14%。施生姣等^[33]研究表明,施用 30% 氨氯 · 二氯 · 氯吡啶酸 SL 135 g a.i · hm⁻²,对油菜田中的密花香薹鲜重防效达到了 90.42%。

绿色防控技术是农业绿色发展的重要内容,事关农产品质量安全、农业生态环境安全 and 国家粮食安全,应做好精准监测、动态预警,开展相关测报技术和调查方法研究,开发储备绿色防控技术,更新

完善防治技术体系,不断提高防控处置能力^[33]。建议增强农民的教育与培训、加大新技术研发投入、实施政策支持与激励机制、构建多方合作平台,以及加强国际合作,这将促进绿色防控技术的广泛应用,推动农业可持续发展和生态环境保护,实现双赢局面。

参 考 文 献:

[1] WEN J, QIN R M, ZHANG S X, et al. Effects of long-term warming on the aboveground biomass and species diversity in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12 (2): 252-266.

[2] 邓海艳,程亮,郭良芝,等. 气候变化下基于 GIS 的农田恶性杂草旱雀麦在中国的分布与发展趋势[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 207-214.

[3] DENG H Y, CHENG L, GUO L Z, et al. Distribution and development trends of farmland malignant weed *Bromus tectorum* L. in China under climate change[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39 (6): 207-214.

[3] 申源,邱鹏,廖梓延,等. 气候变化下青藏高原农田杂草丰富度格局变化[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 897-908.

SHEN Y, QIU P, LIAO Z Y, et al. Changes in distribution patterns of weed species richness in agricultural lands on Qinghai-Tibet Plateau under climate change[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2022, 28(4): 897-908.

[4] 王文强,杨博,李小伟,等. 未来气候变化对中国沙棘潜在地理分布的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2813-2821.

WANG W Q, YANG B, LI X W, et al. Impact of climate change on the potential geographical distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. sinensis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2813-2821.

[5] THUILLER W. BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change [J]. Global Change Biology, 2003, 9(10): 1353-1362.

[6] 毕雅琼,张明旭,陈元,等. 基于 Biomod2 组合模型的中国野生芍药 *Paeonia lactiflora* 适宜生境分布[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(2): 376-384.

BI Y Q, ZHANG M X, CHEN Y, et al. Applying Biomod2 for modeling of species suitable habitats: a case study of *Paeonia lactiflora* in China [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(2): 376-384.

[7] 高明龙,铁牛,张晨,等. 基于 Biomod2 组合模型的我国山杨潜在分布区研究[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(2): 247-255.

GAO M L, TIE N, ZHANG C, et al. Modelling the potential distribution area of *Populus davidiana* in China based on the biomod2[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 247-255.

[8] 唐千鸿,宗冬琳,周静,等. 全球气候变化下农田杂草节节麦和豚草的潜在威胁及其驱动因子[J]. 生态学杂志, 2024, 43(4): 1130-1140.

TANG Q H, ZONG D L, ZHOU J, et al. The potential threat and driving factors of cropland weeds *Aegilops tauschii* and *Ambrosia artemisiifolia* under global climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(4): 1130-1140.

[9] 阿的鲁骥,王长庭,字洪标,等. 不同株高密花香薹光合色素含量和根际土壤酶活性的变化[J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2016, 39(5): 755-759.

A D L J, WANG C T, ZI H B, et al. Change in photosynthetic pigment contents and soil enzyme activities of rhizosphere in *Elsholtzia densa* Benth. with different plant height[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2016, 39(5): 755-759.

[10] 朱海霞,马永强.内生菌 HL-1 可湿性粉剂研制及其除草活性评价[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1301-1308
ZHU H X, MA Y Q. Development of the wettable powder of fungal endophyte HL-1 and evaluation of its herbicidal activity[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1301-1308.

[11] ZHOU X J, XIAO Y X, MA D W, et al. The competitive strategies of poisonous weeds *Elsholtzia densa* Benth. on the Qinghai Tibet Plateau: allelopathy and improving soil environment[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 24139.

[12] ZANG X H, FENG R, TANG Y F, et al. Bioactivities of essential oil extracted from *Elsholtzia densa* Benth. and its main components against *Tribolium castaneum* eggs and pupae[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2024, 202: 105970.

[13] LIANG J Y, SHAO Y Z, WU H S, et al. Chemical constituents of the essential oil extracted from *Elsholtzia densa* and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* and *Lasioderma serricorne*[J]. Foods, 2021, 10(10): 2304.

[14] HUANG D Y, AN Q J, HUANG S P, et al. Biomod2 modeling for predicting the potential ecological distribution of three *Fritillaria* species under climate change[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 18801.

[15] YANG J M, FU Z H, XIAO K Y, et al. Climate change potentially leads to habitat expansion and increases the invasion risk of *Hydrocharis* (*Hydrocharitaceae*)[J]. Plants, 2023, 12(24): 4124.

[16] 李玉枝,杨小玲,周波涛,等. 基于 CMIP6 模式对青藏高原平均降水的模拟评估与预估[J]. 南京大学学报(自然科学), 2024, 60(2): 301-316.
JI Y Z, YANG X L, ZHOU B T, et al. CMIP6 evaluation and projection of precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2024, 60(2): 301-316.

[17] WANG T, ZHANG T J, AN W B, et al. Predicting the potential geographic distribution of invasive freshwater apple snail *Pomacea Canaliculate* (Lamarck,1819) under climate change based on biomod2[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 650.

[18] SADEGHI A, NADOUSHAN M A, SANI N A. Segment-level modeling of wildfire susceptibility in Iranian semi-arid oak forests: unveiling the pivotal impact of human activities[J]. Trees, Forests and People, 2024, 15: 100496.

[19] JIMÉNEZ-VALVERDE A, LOBO J M, HORTAL J. Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling[J]. Diversity and Distributions, 2008, 14(6): 885-890.

[20] 杜毅情,余国杰,殷晓洁,平晓燕. 气候变化对冷蒿在我国潜在地理分布的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1950-1964.
DU Y Q, YU C J, YIN X J, et al. Impact of climate change on the potential geographic distribution of *Artemisia frigida* in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1950-1964.

[21] CONG Y, GU Y F, WANG W J, et al. The interaction between temperature and precipitation on the potential distribution range of *Betula ermanii* in the alpine treeline ecotone on the Changbai Mountain[J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: 100166.

[22] 李萍, 谢鹤. 论密花香薷在宁夏六盘山区蜂业生产中的价值[J]. 中国蜂业, 2013, 64(11): 32-33.
LI P, XIE H. On the value of *Elsholtzia densa* Benth. in bee production in Liupan Mountain area of Ningxia[J]. Apiculture of China, 2013, 64(11): 32-33.

[23] 唐燕,赵儒楠,任钢,等.基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因素分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23-32.
TANG Y, ZHAO R N, REN G, et al. Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 23-32.

[24] 徐文力,李庆康,杨潇,等. 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[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7266-7277.
XU W L, LI Q K, YANG X, et al. Prediction of potential distribution of the invasive plant *Tagetes minuta* L. (Wild Marigold) in Tibet under climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7266-7277.

[25] 王俊伟,陈永豪,曾哲飞,等. 西藏拉萨市入侵植物曼陀罗群落物种多样性研究[J]. 生态环境学报, 2024, 33(6): 900-907.
WANG J W, CHEN Y H, ZENG Z F, et al. Study on species diversity of invasive plant *Datura stramonium* community in Lhasa, Tibet[J]. Ecology and Environment Sciences, 2024, 33(6): 900-907.

[26] 卫佳静,郑少锋,张青松. 数字技术使用、绿色认知与农户绿色防控技术采纳-以晋冀两省梨种植户为例[J]. 世界农业, 2024, (3): 99-112.
WEI J J, ZHENG S F, ZHANG Q S. Digital technology use, green cognition and adoption of green control technologies by farmers-taking pear farmers in Shanxi and Hebei provinces as an example[J]. World Agriculture, 2024, (3): 99-112.

[27] 许鹏,田允温,刘霞. 恶性杂草密花香薷的防除[J]. 新疆八一农学院学报, 1983, (2): 45-49.
XU P, TIAN Y W, LIU X. Prevention and eradication of the malignant weed *Elsholtzia densa*[J]. Journal of Xinjiang Bayi Agricultural College, 1983, (2): 45-49.

[28] 杨柳,蔡静,李娜. 秸秆覆盖还田对土壤、杂草及作物的影响[J]. 水土保持应用技术, 2023, (6): 1-3.
YANG L, CAI J, LI N. Effects of straw mulching on soil, weeds and crops[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2023, (6): 1-3.

[29] 朱海霞. 附球属真菌 DT-014 对杂草的致病性及生物学特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 237-241, 251.
ZHU H X. Study on herbicidal activity and biological characteristics of *Epicoccum* strain DT-014[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 237-241, 251.

[30] 李欢,朱海霞.一株除草活性菌株 HY-041 的除草潜力及其生物学特性研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 194-202,210.
LI H, ZHU H X. The herbicidal potential and biological characteristics of aherbicidally active strain HY-041[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(1): 194-202,210.

[31] 程海洋,程亮,朱海霞,等. 链格孢菌 DT-XRKA 菌株的除草活性及对作物的安全性[J]. 西北农业学报, 2024, 33(4): 752-762.
CHENG H Y, CHENG L, ZHU H X, et al. Herbicidal activity and crop safety of *Alternaria alternata* DT-XRKA[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(4): 752-762.

[32] 李玮. 新型除草剂氟咯草酮在青海高原马铃薯田的应用及安全性[J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 149-154.
LI W. A new herbicide flurochloridone in potato field on Qinghai Plateau: application and safety[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(9): 149-154.

[33] 施生姣,郭良芝,程亮,等. 30%氨氯·二氯·氯氮吡啶酸可溶液剂的除草活性评价[J]. 青海大学学报, 2023, 41(2): 49-55.
SHI S J, GUO L Z, CHENG L, et al. Evaluation of herbicidal activity of 30% Picloram Clopyralid Aminopyralid SL[J]. Journal of Qinghai University, 2023, 41(2): 49-55.

[34] 卓富彦,陈学新,夏玉先,等. 2013-2022 年我国水稻病虫害发生特点与绿色防控技术集成[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(5): 1207-1213.
ZHUO F Y, CHEN X X, XIA Y X, et al. The occurrence characteristics of rice diseases and insect pests and the integration of green control technology in China from 2013 to 2022[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2024, 40(5): 1207-1213.