

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.024

引用格式:陈梦甜,刘文昊,王生菊,等.气候变化对伊犁河谷5种草原毒害草发生趋势的影响[J].草地学报,2026,34(4):1413–1429

CHEN Meng-tian, LIU Wen-hao, WANG Sheng-ju, et al. Impact of Climate Change on the Occurrence Trends of Five Grassland Poisonous Weeds in the Ili River Valley[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1413–1429

气候变化对伊犁河谷5种草原毒害草发生趋势的影响

陈梦甜, 刘文昊, 王生菊, 靳瑰丽*, 李嘉欣, 李文雄, 杜玟霖, 李 超

(新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为明确未来气候变化下草原毒害草发生趋势,科学预防草原毒害草、降低畜牧业经济损失,本研究基于伊犁河谷5种频发草原毒害草:苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、白喉乌头(*Aconitum leucostomum*)、刺苍耳(*Xanthium spinosum*)、天山酸模(*Rumex thianschanicus*)和骆驼蓬(*Peganum harmala*)的分布数据,结合55个影响因子,运用最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt)探讨气候变化对5种草原毒害草发生趋势的影响。结果表明:5种草原毒害草预测模型精度均大于0.8,准确度较高;未来4种气候情景下,白喉乌头潜在发生区总面积缩减,其余4种草原毒害草潜在发生区总面积增加;中高排放的SSP370情景下草原毒害草更易扩张危害;从迁移方向看,未来白喉乌头、天山酸模、骆驼蓬主要向南迁移,苦豆子向东迁移,刺苍耳向东南和东北方向迁移,草原毒害草整体呈向低纬度方向迁移趋势;未来4种气候情景下,草原毒害草多物种重叠区面积均增加,高排放的SSP585情景下重叠区面积最大。综上,碳排放持续增加会加剧草原毒害草危害扩散。

关键词:草原毒害草;MaxEnt模型;趋势分析

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1413-17

Impact of Climate Change on the Occurrence Trends of Five Grassland Poisonous Weeds in the Ili River Valley

CHEN Meng-tian, LIU Wen-hao, WANG Sheng-ju, JIN Gui-li*, LI Jia-xin, LI Wen-xiong,

DU Wen-lin, LI Chao

(Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To clarify the occurrence trends of poisonous weeds in grasslands under future climate change, and to scientifically prevent their spread and reduce economic losses in the livestock industry, this study based on the distribution data of five frequently occurring grassland poisonous weeds in the Ili River Valley: *Sophora alopecuroides*, *Aconitum leucostomum*, *Xanthium spinosum*, *Rumex thianschanicus*, and *Peganum harmala*—and combined with 55 influencing factors, employed the Maximum Entropy model to explore the impact of climate change on the occurrence trends of these five grassland poisonous weeds. The results showed that the prediction models for the five grassland poisonous weeds all had an accuracy greater than 0.8, indicating high precision. Under four future climate scenarios, the total potential occurrence area of *Aconitum leucostomum* decreased, while that of the other four grassland poisonous weeds increased. Under the medium-to-high emission scenario (SSP370), grassland poisonous weeds were more prone to expansion and posed greater risks. In terms of migration direction, in the future, *Aconitum leucostomum*, *Rumex thianschanicus*, and *Peganum harmala* would mainly migrate southward, *Sophora alopecuroides* would migrate eastward, and *Xanthium spinosum*

收稿日期:2025-06-03;修回日期:2025-07-18

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0401)资助

作者简介:陈梦甜(2000-),女,汉族,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态研究,E-mail:2656356642@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:jguili@126.com

would migrate toward the southeast and northeast, with an overall trend of grassland poisonous weeds migrating toward lower latitudes. Under the four future climate scenarios, the area of overlapping zones for multiple grassland poisonous weed species increased, with the largest overlapping area occurring under the high-emission scenario (SSP585). In conclusion, continuous increases in carbon emissions will exacerbate the spread and harm of grassland poisonous weeds.

Key words: Grassland poisonous weed; MaxEnt model; Trend analysis

气候是决定植物生长发育及空间分布的主要非生物因素^[1],也是草地生态系统的重要影响因子之一,可直接影响草地覆盖度及生物量^[2-3]。近年来,全球气候变化加剧,极端天气出现频率增加,草地生态系统因此面临严峻的风险与挑战。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,持续增温可能会引发更剧烈的极端气候事件^[4],进一步加剧草地生态系统的脆弱性。因此,必须重视未来时期草地生态系统的保护,以免其生态功能继续退化。为更好理解气候变化的机制及趋势,世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)发起国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP),通过全球气候模型的比较和改进,为气候变化研究提供科学支持。截至目前,已发展至第六阶段——CMIP6^[5]。CMIP6基于不同共享社会经济路径及最新的人为排放趋势,提出了共享社会经济路径情景(Shared Socio-economic Pathway, SSP)^[6],用于模拟未来气候变化,共包含4种气候情景:SSP126(弱碳排放)、SSP245(适度减排)、SSP370(中高排放)和SSP585(高排放)^[7]。

草原毒害草是对人和动物存在直接或者潜在危害的植物^[8]。凭借其较强的抗逆性和竞争力,会挤占优良牧草的生存资源,导致可食牧草生产力下降。据统计,我国草原毒害草危害面积约占天然草原面积的10.5%,造成的直接和间接经济损失高达100亿元,已成为制约畜牧业发展的重要因素之一^[9]。我国草原毒害草治理工作遵循“预防为主,科学防治”的原则^[10],科学掌握草原毒害草的发生趋势,对于草地生态修复和畜牧业可持续发展具有重要意义。然而,毒害草型草地退化因缺乏地表裸露和植被减少等典型特征,导致传统遥感指标难以识别,甚至可能误判为草地“变绿”,不利于草原毒害草科学预防^[11-13]。

物种分布模型是将目标物种的分布情况和该物种所在地的相关影响因子通过算法关联起来,推算物种分布所需的生态要求,并将运算结果投射到

未来特定时空条件下,预测某地区物种潜在发生趋势^[14-16]。其中最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt)对预测结果具有较高的准确性,仅利用少量的数据和环境变量就可以获得更准确的物种分布预测结果,因此常用于物种分布预测研究。例如,董瑞等^[17]利用MaxEnt模型,预测了青藏高原瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)的潜在分布区;Huang等^[18]利用MaxEnt模型,预测了中国地区黄芪(*Astragalus membranaceus*)的潜在分布区;黄睿杰等^[19]利用MaxEnt模型,预测了中国地区醉马草(*Achnatherum inebrians*)的潜在分布区。所得模型预测结果均较好,在生态保护方面具有重要作用。然而,目前对于草原毒害草发生趋势预测的研究多集中于单一物种对气候的响应,忽略了气候变化下多物种生态位重叠的变化。因此,本研究基于CMIP6的4种气候情景,预测了苦豆子、白喉乌头、刺苍耳、天山酸模和骆驼蓬5种草原毒害草在当前时期及未来4个时期(2030s, 2050s, 2070s和2090s)的发生趋势,通过将未来时期发生趋势与当前时期进行对比,分析了未来不同气候情景下5种草原毒害草发生区空间格局、分布中心和多物种生态位重叠的变化趋势,以为未来时期草原毒害草科学预防提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷(80°09'~84°56' E, 42°14'~44°50' N)属温带大陆性气候,光热资源相对丰富,年日照数2870 h,年平均气温10.4℃,年降水量417.6 mm^[20-21],土地资源主要分为山地、丘陵及河谷平原三种,其中山地占总土地面积最多,为66.97%,土壤类型多样,有草甸土、沼泽土、栗钙土、灰钙土、黑钙土等13种土壤型,有机质含量丰富^[22]。整体地势由东向西倾斜,主要由低山丘陵及冲积平原组成^[23],河谷以草地生态系统为主导,天然草地占新疆总草地资源的比例为6.38%。得益于优越的水热条件,该地区农牧业发达,是新疆重要的天然牧场^[24-25](图1)。

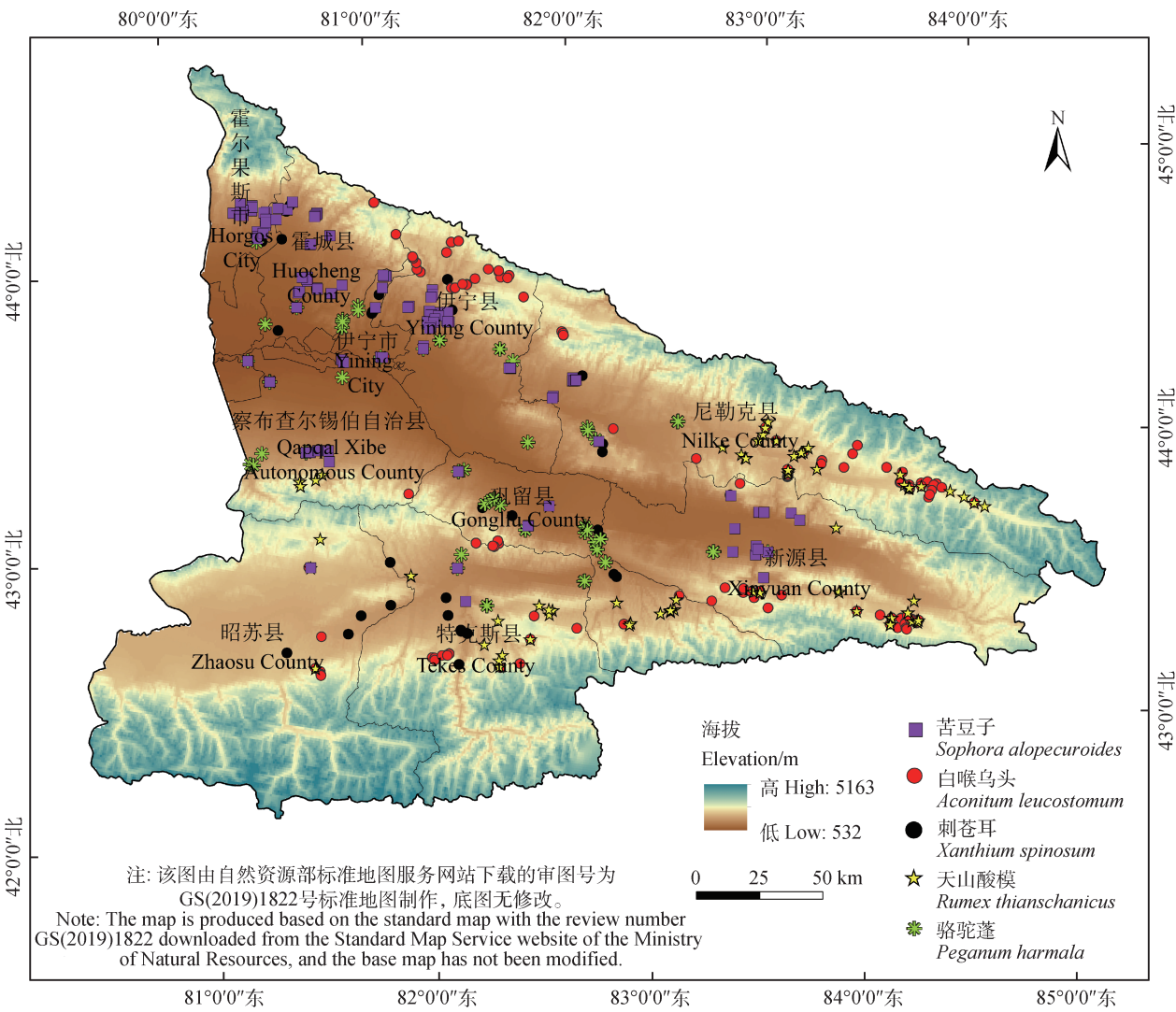


图 1 研究区概况

Fig. 1 Study area overview

1.2 物种分布点位数据来源及筛选

物种分布信息来源于野外实地采集和全球生物多样性信息网络 (<https://www.gbif.org/zh/>) 数据库。2022—2024 年 7、8 月植物地上生物量高峰期在伊犁河谷草地布设样地。根据草原毒害草种类及其分布区域,按交通便利、分布广泛、代表性强的原则,统筹布设 498 个样地。其中苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、白喉乌头 (*Aconitum leucostomum*)、刺苍耳 (*Xanthium spinosum*)、天山酸模 (*Rumex thianschanicus*)、骆驼

蓬 (*Peganum harmala*) 样地数量分列前 5 位,确定为本研究的目标物种,同时获取了全球生物多样性信息网络数据库中 5 种草原毒害草的物种分布信息。为避免空间自相关现象,基于环境变量的空间网格分辨率 (1 km×1 km),利用 ArcGIS 软件中的 SDMtools 工具对物种分布点位数据进行筛选^[26],对于同一草原毒害草,在 1 km×1 km 的网格中仅保留一条分布数据,并按照物种名、经度、纬度的格式整理为 csv 格式用于 MaxEnt 模型构建 (表 1)。

表 1 物种点位数量/条

Table 1 Number of species points/entries

物种 Species	筛前点位数量 The number of points before screening	筛后点位数量 The number of points after screening
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	489	89
白喉乌头 <i>Aconitum leucostomum</i>	391	100
刺苍耳 <i>Xanthium spinosum</i>	226	52
天山酸模 <i>Rumex thianschanicus</i>	203	60
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	175	43

1.3 影响因子的获取与筛选

本研究选择了可能影响毒害草分布的 55 个影响因子(表 2),包括气候、地形、土壤、草地类型、归一化植被指数、距河流距离。生物气候因子和地形因子均源自 WorldClim 数据库(<https://worldclim.org/>),其中当前气候数据为 1970—2000 年的均值,空间分辨率 30 s(约 1 km×1 km)^[27];未来气候数据基于北京气候中心 BCC-CSM2-MR 模式^[28],涵盖 2021—2040 年(2030s)、2041—2060 年(2050s)、2061—2080 年(2070s)、2081—2100 年(2090s)四个时期,以及 SSP126(弱碳排放)、SSP245(适度减排)、SSP370(中高排放)、SSP585(高排放)4 种路径,各路径 2100 年辐射强度分别为 2.6 W·m⁻²,4.5 W·m⁻²,7.0 W·m⁻²,8.5 W·m⁻²,数值越大碳排放越高^[29-30];地形因子包括海拔、坡度和坡向,其中海拔数据来源于 Worldclim 数据库,

并利用 ArcGIS 软件从海拔数据中提取出坡向(ASPECT)及坡度(SLOPE)数据^[31]。土壤因子来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)^[32]。草地类型数据(GT)来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心新疆 1:100 万草地类型数据(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>)^[33]。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/main/>)中国 1 km 分辨率逐月 NDVI 数据集。距河流距离(DW)来源于 OSM(OpenStreetMap, OSM)平台(<https://www.openstreetmap.org/>),利用 ArcGIS 计算各栅格距河流的欧氏距离^[34]。将所有影响因子数据统一重采样为 1 km 空间分辨率。对于未来情景的预测,研究假设未来地形和土壤与当前相比不会发生明显变化。

表 2 环境变量及注释

Table 2 Environment variables and annotations

类型 Type	变量 Variables	注释 Annotation	类型 Type	变量 Variables	注释 Annotation
气候因子 Climatic factors	BIO1	年均温/℃		SLOPE	坡度/°
	BIO2	昼夜温差月均值/℃	土壤因子 Topographic factors	T,S_GRAVEL	上、下层土壤碎石体积百分比/%
	BIO3	等温性/%		T,S_SAND	上、下层土壤沙含量/%
	BIO4	温度季节性变化标准差/℃		T,S_SILT	上、下层土壤淤泥含量/%
	BIO5	最暖月最高温/℃		T,S_CLAY	上、下层土壤黏土含量/%
	BIO6	最冷月最低温/℃		T,S_USDA_TEX	上、下层土壤 USDA 质地分类
	BIO7	年均温变化范围/℃		T,S_REF_BULK	上、下层土壤容重/(kg·dm ⁻³)
	BIO8	最湿季均温/℃		T,S_OC	上、下层土壤有机碳含量/%
	BIO9	最干季均温/℃		T,S_TEB	上、下层土壤交换性盐基/(cmol·kg ⁻¹)
	BIO10	最暖季均温/℃		T,S_PH_H2O	上、下层土壤酸碱度/—log(H ⁺)
	BIO11	最冷季均温/℃		T,S_CEC_CLAY	上、下层土壤黏性层的阳离子交换能力/(cmol·kg ⁻¹)
	BIO12	年均降水量/mm		T,S_CEC_SOIL	上、下层土壤的阳离子交换能力/(cmol·kg ⁻¹)
	BIO13	最湿月降水量/mm		T,S_BS	上、下层土壤基本饱和度/%
	BIO14	最干月降水量/mm		T,S_CACO3	上、下层土壤碳酸盐含量/%
	BIO15	降水量变异系数/%		T,S_CASO4	上、下层土壤硫酸盐含量/%
	BIO16	最湿季降水量/mm		T,S_ESP	上、下层土壤可交换钠盐/%
	BIO17	最干季降水量/mm		T,S_ECE	上、下层土壤电导率/(dS·m ⁻¹)
	BIO18	最暖季降水量/mm	草地类型 Grassland type	GT	草地类型
地形因子 Topographic factors	BIO19	最冷季降水量/mm	植被指数 Vegetation index	NDVI	归一化植被指数
	ELEV	海拔/m	距河流距离 Distance from river	DW	距河流距离/km
	ASPECT	坡向/°			

为避免影响因子间多重共线性导致模型过度拟合,研究先将各影响因子与物种点位数据分别代入模型初运行,再依据结果剔除各物种中贡献率

小于 1 的因子;对剩余因子进行相关性分析后,进一步剔除相关系数绝对值高于 0.8 的组合中贡献率较低的因子^[35],最终筛选结果如下(表 3):

表 3 5 种草原毒害草最终建模因子

Table 3 Final modeling factors for five types of grassland poisonous and harmful weeds

物种 Species	建模因子及其贡献率 Modeling factors and their contribution rates
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	ELEV (20.10%)、GT (5.10%)、NDVI (4.80%)、BIO12 (4.20%)、ASPECT (2.70%)、BIO6 (2.60%)、DW (2.60%)、BIO7 (1.70%)、S_CASO4 (1.70%)、S_BS (1.60%)、BIO2 (1.50%)、SLOPE (1.40%)、BIO8 (1.30%)、S_PH_H2O (1.10%)
白喉乌头 <i>Aconitum leucostomum</i>	BIO1 (13.70%)、T_OC (11.70%)、BIO7 (8.90%)、SLOPE (5.50%)、GT (5.10%)、T_CEC_CLAY (4.40%)、BIO2 (4.10%)、ASPECT (3.10%)、BIO3 (2.80%)、BIO16 (2.40%)、NDVI (2.00%)、DW (1.50%)
刺苍耳 <i>Xanthium spinosum</i>	S_BS (12.90%)、GT (11.30%)、BIO1 (9.50%)、ASPECT (5.40%)、NDVI (4.20%)、BIO6 (3.20%)、BIO8 (3.10%)、SLOPE (2.90%)、T_BS (2.80%)、BIO15 (2.70%)、S_ECE (1.90%)、DW (1.50%)、BIO7 (1.40%)、T_PH_H2O (1.30%)、S_CEC_SOIL (1.00%)、S_SILT (1.00%)
天山酸模 <i>Rumex thianschanicus</i>	NDVI (22.90%)、DW (9.30%)、SLOPE (6.10%)、T_OC (5.70%)、BIO4 (5.10%)、T_GRAVEL (4.50%)、T_CACO3 (4.30%)、ASPECT (4.20%)、BIO2 (3.60%)、BIO15 (3.20%)、GT (3.10%)、BIO9 (2.10%)、T_SILT (2.00%)、BIO3 (1.90%)、ELEV (1.60%)、S_ESP (1.30%)、T_CEC_SOIL (1.00%)
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	NDVI (18.40%)、BIO11 (9.30%)、BIO8 (9.00%)、GT (8.60%)、BIO5 (6.00%)、BIO15 (4.50%)、DW (3.30%)、ASPECT (3.10%)、S_BS (2.90%)、BIO4 (2.60%)、S_CASO4 (1.80%)、S_ECE (1.80%)、SLOPE (1.70%)、BIO3 (1.40%)、S_SILT (1.00%)

1.4 模型优化及建模

优化正则化系数(Regularization multiplier, RM)和特征组合 (Feature combination, FC)是 MaxEnt 模型的两个关键建模参数,在 MaxEnt 的默认参数设置下,调节倍率 RM=1,特征组合 FC=LQHPT,但默认参数的 MaxEnt 模型不仅预测结果不可靠,而且有时很难解释^[36]。因此,分别基于 5 种草原毒害草的分布

点位及影响因子,运用 ENMeval 包对 MaxEnt 模型进行调优, RM 取值为 0.5~4,每隔 0.5 取值,共 8 个;FC 取 L、LQ、LQH、H、LQHP 和 LQHPT (L 为线性、T 为阈值性、Q 为二次型、H 为片段化、P 为乘积型)进行参数之间的交叉组合,在 ENMeval 包中将上述 48 种组合进行参数调测,最终选择 delta. AICc=0,即最佳参数组合进行建模^[37],结果如表 4 所示。

表 4 5 种草原毒害草预测模型最佳参数组合

Table 4 Optimal parameter combinations for prediction models of five types of grassland poisonous weeds

物种 Species	优化特征组合 Optimized feature combination	优化调控倍率 Optimized regularization multiplier
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	LQ	1
白喉乌头 <i>Aconitum leucostomum</i>	LQH	2
刺苍耳 <i>Xanthium spinosum</i>	LQHP	3
天山酸模 <i>Rumex thianschanicus</i>	LQHPT	3
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	LQ	3.5

1.5 模型预测效果评价

采用受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 和曲线下面积 (Area under the curve, AUC) 验证模型的精度, AUC 是 ROC 曲线下的面积,取值范围在 0 到 1 之间, AUC 值越大,预测结果越准确:0.5~0.7 表示预测结果较差,0.8~0.9 表示预测结果较好,0.9~1.0 表示预测结果非常好^[38]。

1.6 发生区等级划分

选取自然间断法对模型运行结果进行重分类^[39],得到发生区的梯度分类,共分为 4 个等级:0~0.08 为无危区,0.08~0.24 为低危区,0.24~0.43 为中危区,0.43~1 为高危区。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

模型 AUC 值越高,预测效果越好。苦豆子、白喉乌头、刺苍耳、天山酸模和骆驼蓬发生趋势预测模型 10 次运行的平均 AUC 值均超过 0.80,表明模型预测效果较好,具有较高的可信度(图 2)。

2.2 当前气候条件下毒害草潜在发生区

当前气候条件下,苦豆子发生区总面积为 $2.00 \times 10^4 \text{ km}^2$,占伊犁河谷总面积的 36.76%,主要分布于伊犁河谷北部地区,行政区域上主要集中分布在霍尔果斯市、霍城县、伊宁市、伊宁县、巩留县、察布查尔锡伯自治县、尼勒克县及新源县。白喉乌头发生区总面积为 $2.50 \times 10^4 \text{ km}^2$,占伊犁河谷总面

积的45.96%,主要分布于伊犁河谷南部及东北部地区,行政区域上主要集中于尼勒克县、新源县、昭苏县、特克斯县、巩留县、伊宁市、霍城县。刺苍耳发生区总面积 $2.49 \times 10^4 \text{ km}^2$,占伊犁河谷总面积的45.77%,大面积分布于伊犁河谷中部,行政区域上在伊犁河谷各县市均有分布。天山酸模发生区总

面积为 $2.94 \times 10^4 \text{ km}^2$,占伊犁河谷总面积的54.04%,大面积分布于伊犁河谷全区,在各县市均有分布。骆驼蓬发生区总面积为 $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,占伊犁河谷总面积的21.32%,主要分布于伊犁河谷北部,行政区域上主要集中于除昭苏县以外的9县市(图3)。

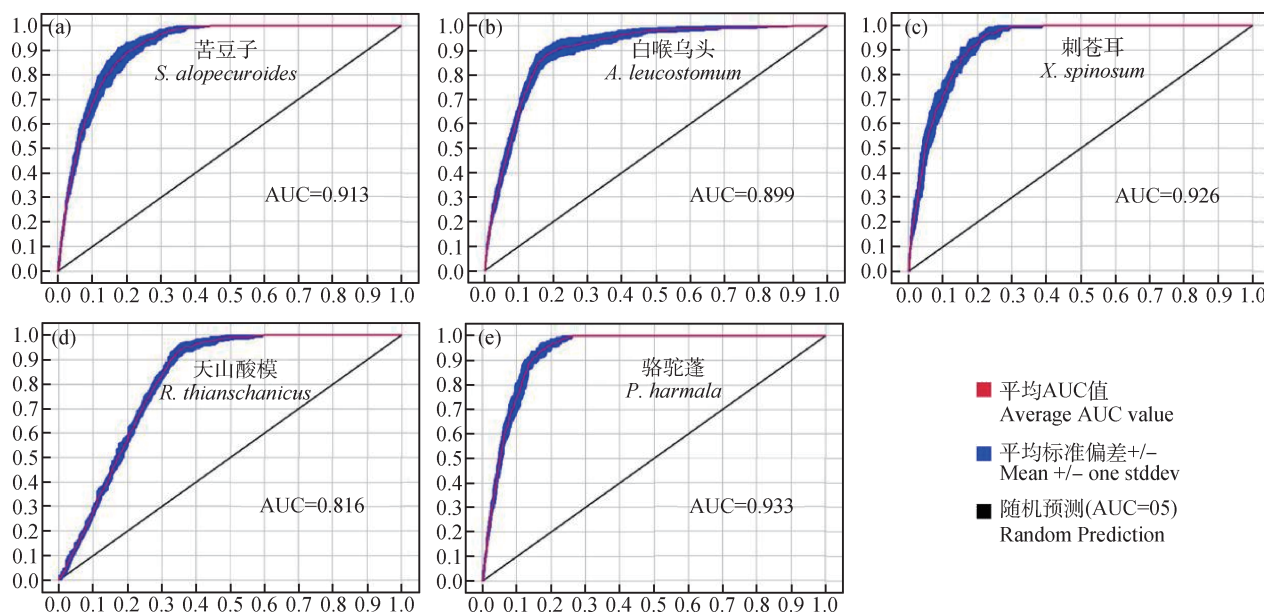


图2 5种草原毒害草MaxEnt模型AUC值

Fig. 2 AUC values of MaxEnt models for five types of grassland poisonous weeds

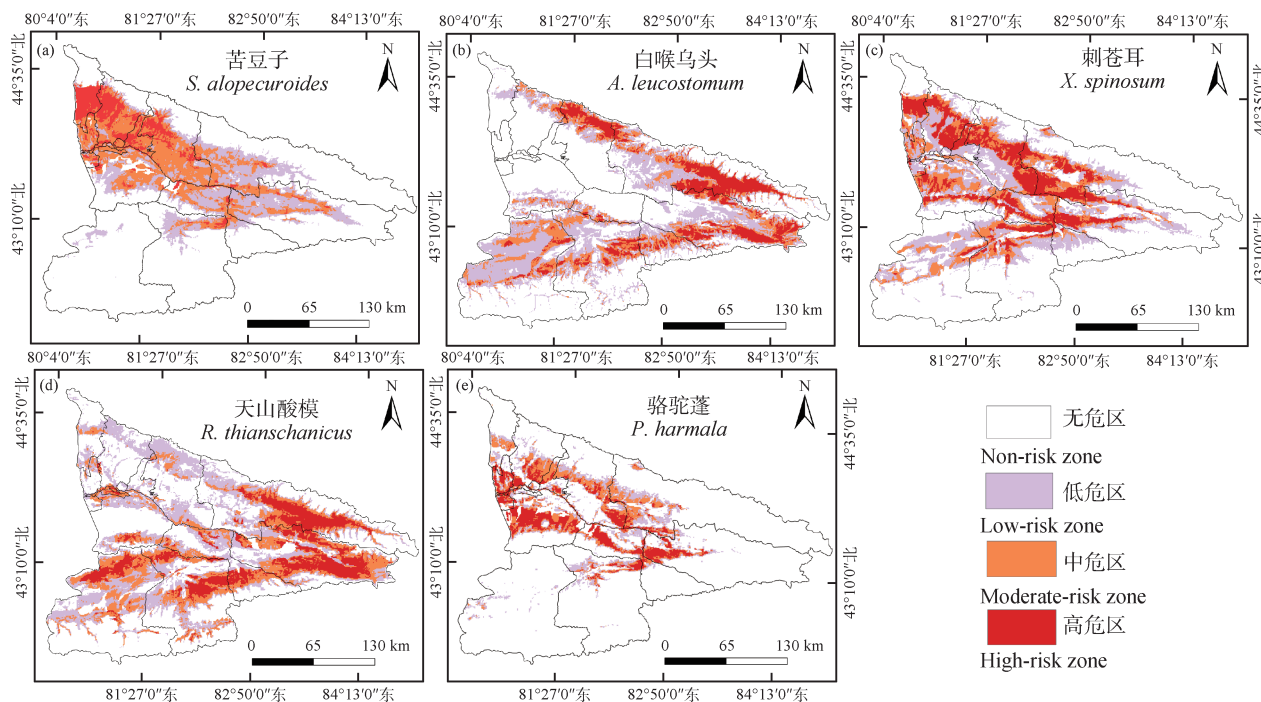


图3 当前时期毒害草潜在分布区

Fig. 3 Potential distribution areas of poisonous and harmful weeds in the current period

2.3 未来气候条件下毒害草潜在发生区变化

从发生区域来看,未来 SSP126, SSP245,

SSP370, SSP585 4种气候情景下,苦豆子仍大面积发生于伊犁河谷北部地区,与当前时期基本一致;

从发生面积来看,4 种气候情景下苦豆子发生面积较当前时期均增加,平均增幅分别为 $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.91 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 SSP245 情景下高危区平均增幅最大,为 $2.03 \times 10^4 \text{ km}^2$,

SSP370 情景下,扩张区占比均值最高,为 31.82%, 扩张区域主要集中在昭苏县和特克斯县。综合来看,SSP245 情景下,苦豆子危害性更强;SSP370 情景下,苦豆子更易扩散(图 4、表 5)。

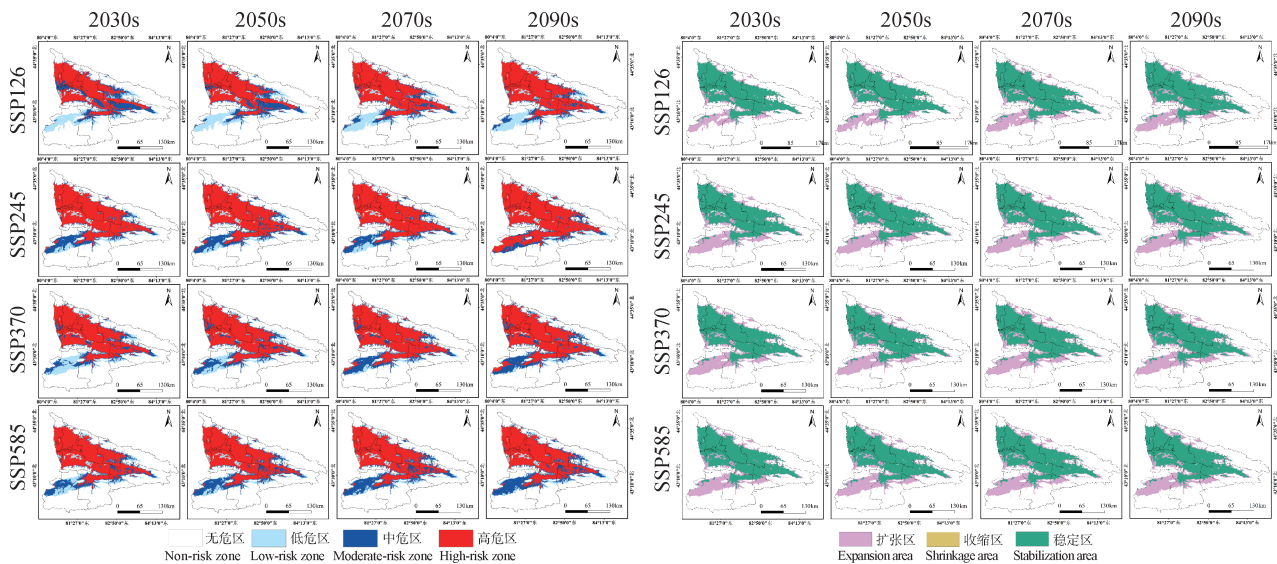


图 4 未来不同气候情景下苦豆子潜在发生区

Fig. 4 Potential occurrence areas of *Sophora alopecuroides* under different future climate scenarios

表 5 未来不同气候情景下苦豆子潜在发生区

Table 5 Potential occurrence areas of *Sophora alopecuroides* under different future climate scenarios

气候情景 Climate scenario	年份 Year	发生区面积 Occurrence area/($\times 10^4 \text{ km}^2$)				各情景发生区 面积均值 ($\times 10^4 \text{ km}^2$) Average occurrence area per scenario	发生区空间格局变化 Spatial pattern change of occurrence areas								
							变化面积 Area Change/($\times 10^4 \text{ km}^2$)			变化面积占比 Area change percentage			各情景变化面积占比均值 Average proportion of areal change per scenario		
		低危区 Low-risk zone	中危区 Moderate-risk zone	高危区 High-risk zone	总发生区 Total occurrence zone		扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone
/	当前	0.83	0.85	0.32	2.00	2.00	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SSP126	2030s	0.63	0.64	1.36	2.63	2.73	0.64	0.01	1.99	24.21	0.28	75.50	26.99	0.16	72.85
	2050s	0.66	0.57	1.44	2.67		0.68	0.01	1.99	25.23	0.26	74.51			
	2070s	0.64	0.40	1.78	2.82		0.82	0.00	2.00	29.15	0.06	70.79			
	2090s	0.62	0.40	1.81	2.83		0.83	0.00	2.00	29.36	0.05	70.58			
SSP245	2030s	0.41	0.52	1.97	2.89	2.92	0.90	0.00	2.00	30.99	0.06	68.96	31.68	0.05	68.28
	2050s	0.40	0.58	1.93	2.91		0.91	0.00	2.00	31.27	0.05	68.68			
	2070s	0.45	0.51	1.93	2.89		0.89	0.00	2.00	30.85	0.05	69.10			
	2090s	0.28	0.43	2.30	3.01		1.01	0.00	2.00	33.59	0.03	66.37			
SSP370	2030s	0.61	0.48	1.78	2.87	2.93	0.87	0.00	2.00	30.41	0.04	69.56	31.82	0.02	68.16
	2050s	0.51	0.56	1.82	2.90		0.91	0.00	2.00	31.20	0.03	68.77			
	2070s	0.39	0.62	1.96	2.97		0.97	0.00	2.00	32.70	0.02	67.29			
	2090s	0.36	0.65	1.97	2.98		0.98	0.00	2.00	32.97	0.01	67.02			
SSP585	2030s	0.52	0.53	1.82	2.88	2.91	0.88	0.00	2.00	30.53	0.04	69.43	31.43	0.03	68.54
	2050s	0.43	0.61	1.86	2.90		0.90	0.00	2.00	31.13	0.03	68.84			
	2070s	0.42	0.70	1.81	2.93		0.93	0.00	2.00	31.79	0.03	68.18			
	2090s	0.40	0.72	1.83	2.95		0.95	0.00	2.00	32.28	0.02	67.70			

从发生区域来看,未来 SSP126, SSP245, SSP370, SSP585 4 种气候情景下,白喉乌头大面积

集中于伊犁河谷南部及东北部地区,与当前时期基本一致;从发生面积来看,4 种气候情景下白喉乌头

发生面积较当前时期均减少,平均减幅分别为 $0.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.20 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中SSP370情景下高危区面积均值和扩张区占比均值最高,分别为 $0.53 \times 10^4 \text{ km}^2$,

19.92%,扩张区域主要集中在霍尔果斯市、察布查尔锡伯自治县、昭苏县、特克斯县、巩留县、新源县、尼勒克县。SSP370情景下,白喉乌头危害性更强且更易扩散(图5、表6)。

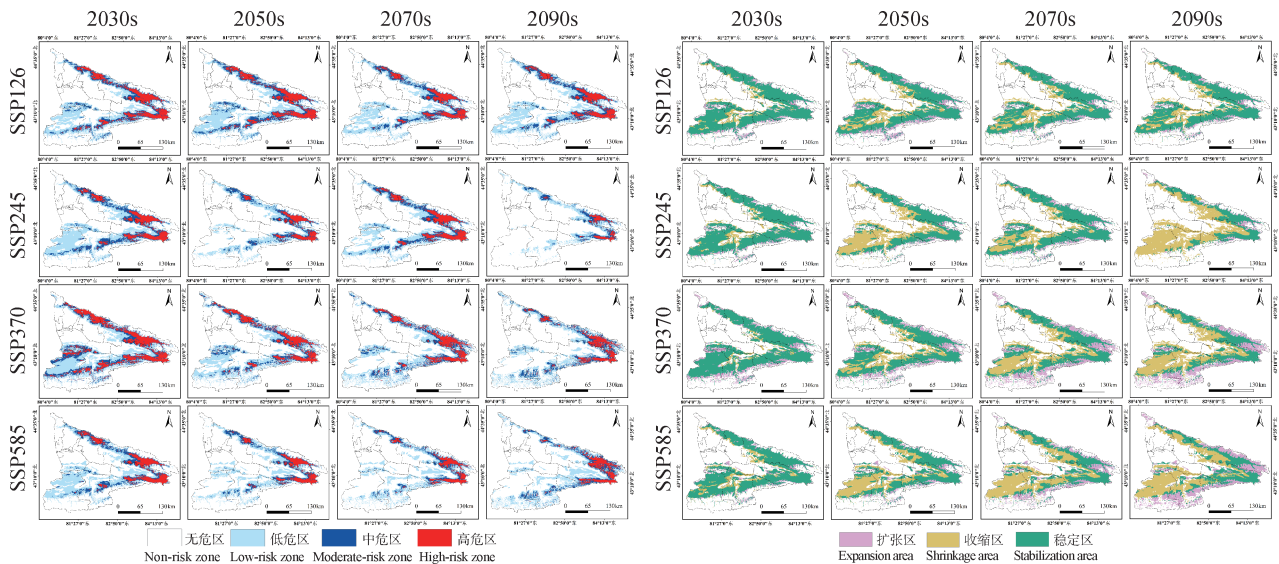


图5 未来不同气候情景下白喉乌头潜在发生区

Fig. 5 Potential occurrence areas of *Aconitum leucostomum* under different future climate scenarios

表6 未来不同气候情景下白喉乌头潜在发生区

Table 6 Potential occurrence areas of *Aconitum leucostomum* under different future climate scenarios

气候情景 Climate scenario	年份 Year	发生区面积 Occurrence area/(×10 ⁴ km ²)				各情景发生区 面积均值 (×10 ⁴ km ²) Average occurrence area per scenario	发生区空间格局变化 Spatial pattern change of occurrence areas								
		低危区 Low-risk zone	中危区 Moderate-risk zone	高危区 High-risk zone	总发生区 Total occurrence zone		变化面积 Area Change/(×10 ⁴ km ²)			变化面积占比 Area change percentage			各情景变化面积占比均值 Average proportion of areal change per scenario		
							扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone
/	当前	1.32	0.67	0.51	2.50	2.50	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SSP126	2030s	1.37	0.59	0.53	2.50	2.29	0.35	0.35	2.15	12.17	12.30	75.53	11.89	19.46	68.65
	2050s	1.28	0.54	0.53	2.35		0.45	0.60	1.90	15.31	20.37	64.33			
	2070s	1.24	0.46	0.39	2.09		0.26	0.66	1.84	9.26	24.02	66.72			
	2090s	1.31	0.48	0.42	2.21		0.30	0.59	1.91	10.82	21.16	68.01			
SSP245	2030s	1.42	0.57	0.42	2.41	1.74	0.26	0.36	2.15	9.51	12.92	77.57	8.51	36.57	54.93
	2050s	0.89	0.35	0.26	1.51		0.19	1.18	1.32	6.94	43.92	49.15			
	2070s	1.13	0.48	0.46	2.06		0.31	0.75	1.75	11.05	26.70	62.26			
	2090s	0.63	0.24	0.13	1.00		0.17	1.68	0.82	6.53	62.73	30.74			
SSP370	2030s	1.36	0.71	0.79	2.86	2.30	0.56	0.19	2.32	18.17	6.18	75.65	19.92	25.93	54.16
	2050s	1.32	0.51	0.51	2.34		0.52	0.68	1.83	17.22	22.34	60.44			
	2070s	1.16	0.49	0.46	2.11		0.70	1.08	1.43	21.85	33.68	44.46			
	2090s	1.09	0.45	0.34	1.88		0.72	1.34	1.17	22.42	41.50	36.08			
SSP585	2030s	1.42	0.48	0.42	2.32	1.92	0.26	0.44	2.06	9.54	15.97	74.49	15.89	35.02	49.09
	2050s	1.12	0.34	0.30	1.77		0.31	1.04	1.46	10.96	37.02	52.01			
	2070s	1.11	0.31	0.27	1.69		0.55	1.35	1.15	17.87	44.41	37.72			
	2090s	1.20	0.40	0.31	1.92		0.84	1.43	1.08	25.19	42.66	32.14			

从发生区域来看,未来4种气候情景下,刺苍耳大面积集中于伊犁河谷中部,与当前时期基本一致;

从发生面积来看,4种气候情景下刺苍耳发生面积较当前时期均增加,平均增幅分别为 $0.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,

$0.60 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.69 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 SSP370 情景下高危区面积均值和扩张区占比均值最高, 分别为 $2.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、22.88%, 在伊犁

河谷各县市中均有扩张。综合来看, SSP370 情景下, 刺苍耳的危害性更强且更易扩散(图6、表7)。

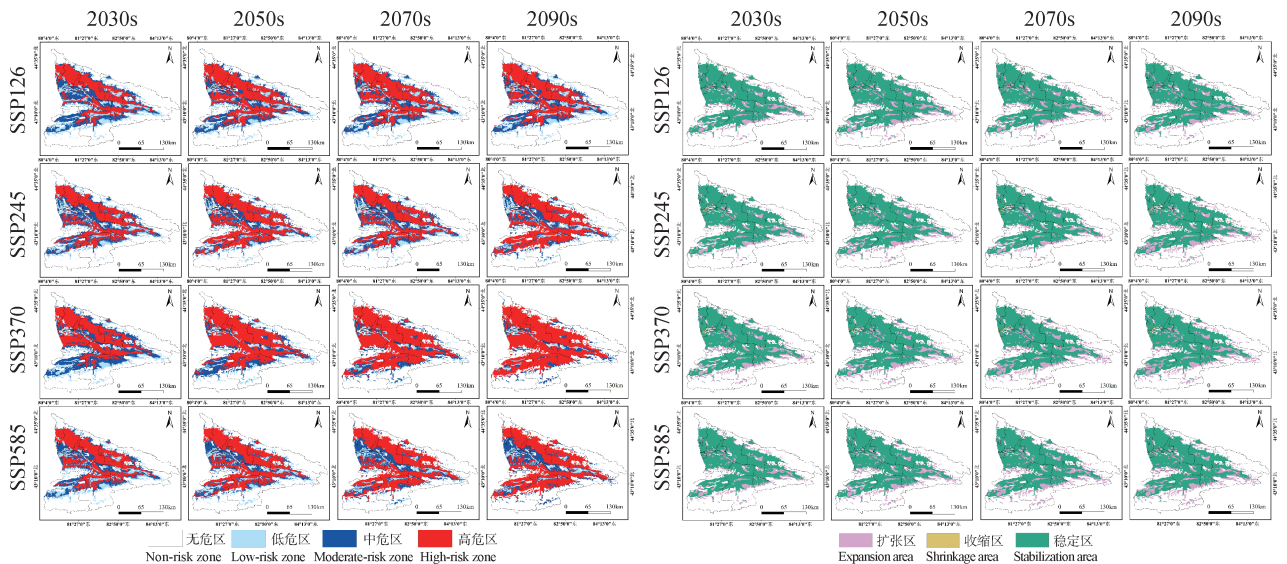


图6 未来不同气候情景下刺苍耳潜在发生区

Fig. 6 Potential occurrence areas of *Xanthium spinosum* under different future climate scenarios

表7 未来不同气候情景下刺苍耳潜在发生区

Table 7 Potential occurrence areas of *Xanthium spinosum* under different future climate scenarios

气候情景 Climate scenario	年份 Year	发生区面积(×10 ⁴ km ²) Occurrence area				各情景发生区 面积均值 (×10 ⁴ km ²) Average occurrence area per scenario	发生区空间格局变化 Spatial pattern change of occurrence areas								
							变化面积(×10 ⁴ km ²) Area Change			变化面积占比 Area change percentage			各情景变化面积占比均值 Average proportion of areal change per scenario		
		低危区	中危区	高危区	总发生区		扩张区	收缩区	稳定区	扩张区	收缩区	稳定区	扩张区	收缩区	稳定区
		Low-risk zone	Moderate-risk zone	High-risk zone	Total occurrence zone		Expansion zone	Shrinkage zone	Stabilization zone	Expansion zone	Shrinkage zone	Stabilization zone	Expansion zone	Shrinkage zone	Stabilization zone
/	当前	1.13	0.67	0.68	2.49	2.49	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SSP126	2030s	0.75	1.06	1.28	3.09	3.13	0.60	0.01	2.49	19.46	0.30	80.24	20.52	0.25	79.23
	2050s	0.67	0.87	1.61	3.15		0.66	0.01	2.49	21.02	0.23	78.75			
	2070s	0.67	0.85	1.62	3.14		0.66	0.01	2.49	20.86	0.23	78.92			
	2090s	0.68	0.89	1.57	3.14		0.65	0.01	2.49	20.75	0.23	79.02			
SSP245	2030s	0.61	0.92	1.49	3.02	3.09	0.55	0.02	2.48	17.93	0.63	81.44	19.73	0.56	79.71
	2050s	0.53	0.74	1.84	3.12		0.64	0.02	2.48	20.46	0.50	79.04			
	2070s	0.61	0.85	1.58	3.04		0.57	0.02	2.48	18.54	0.59	80.87			
	2090s	0.48	0.72	1.98	3.17		0.70	0.02	2.48	21.97	0.53	77.50			
SSP370	2030s	0.56	1.08	1.52	3.17	3.22	0.69	0.02	2.48	21.60	0.50	77.90	22.88	0.49	76.64
	2050s	0.37	0.81	2.02	3.21		0.74	0.02	2.48	22.83	0.49	76.68			
	2070s	0.28	0.60	2.36	3.24		0.77	0.02	2.48	23.48	0.49	76.04			
	2090s	0.21	0.41	2.63	3.25		0.77	0.02	2.48	23.59	0.47	75.94			
SSP585	2030s	0.68	0.91	1.50	3.09	3.18	0.60	0.01	2.49	19.47	0.29	80.23	21.83	0.27	77.90
	2050s	0.56	0.83	1.79	3.18		0.69	0.01	2.49	21.72	0.24	78.04			
	2070s	0.42	0.81	1.99	3.23		0.74	0.01	2.49	22.96	0.26	76.78			
	2090s	0.37	0.75	2.11	3.23		0.75	0.01	2.49	23.15	0.29	76.56			

从发生区域来看,未来4种气候情景下,天山酸模在伊犁河谷各县市均有分布,与当前时期基本一致;从发生面积来看,4种气候情景下天山酸模发生面积

较当前时期均增加,平均增幅分别为 $1.70 \times 10^4 \text{ km}^2$, $2.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.27 \times 10^4 \text{ km}^2$, $0.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 SSP370 情景下,高危区面积均值最大,为 $2.13 \times$

10^4 km^2 , SSP245 情景下, 扩张占比均值最高, 为 41.85%, 在伊犁河谷各县市中均有所扩张。综合

来看, SSP370 情景下, 天山酸模危害性更强, SSP245 情景下, 更易发生扩散(图 7、表 8)。

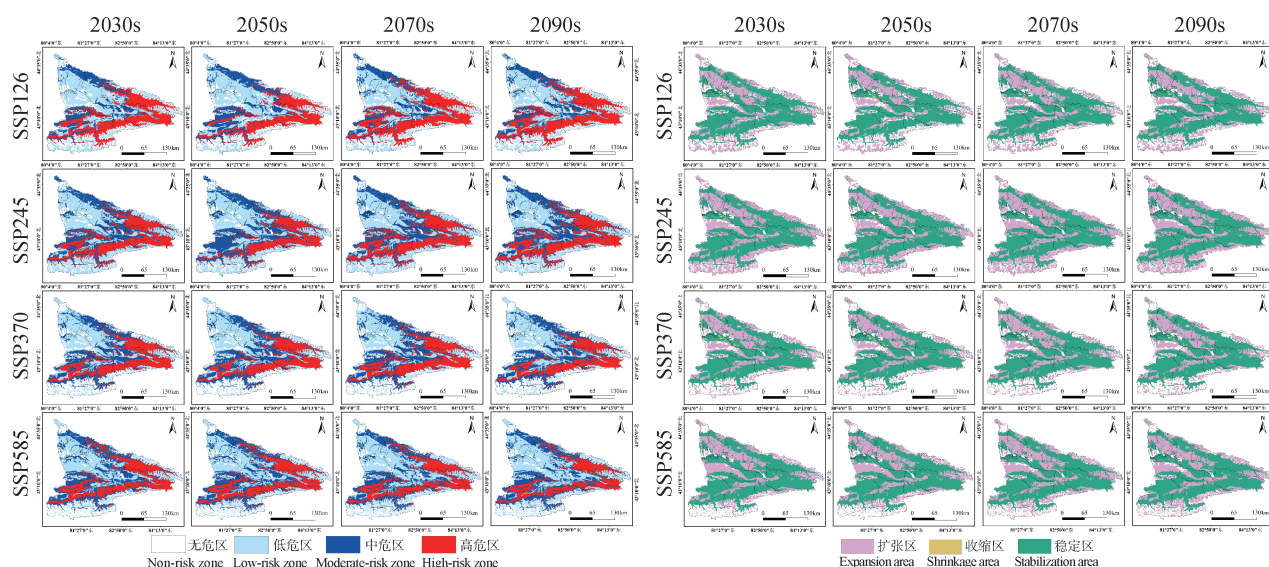


图 7 未来不同气候情景下天山酸模潜在发生区

Fig. 7 Potential occurrence areas of *Rumex thianschanicus* under different future climate scenarios

表 8 未来不同气候情景下天山酸模潜在发生区

Table 8 Potential occurrence areas of *Rumex thianschanicus* under different future climate scenarios

气候情景 Climate scenario	年份 Year	发生区面积(×10 ⁴ km ²) Occurrence area				各情景发生区 面积均值 Average occurrence area per scenario/ (×10 ⁴ km ²)	发生区空间格局变化 Spatial pattern change of occurrence areas								
							变化面积(×10 ⁴ km ²) Area Change			变化面积占比 Area change percentage			各情景变化面积占比均值 Average proportion of areal change per scenario		
		低危区 Low-risk zone	中危区 Moderate-risk zone	高危区 High-risk zone	总发生区 Total occurrence zone		扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone
/	当前	1.36	0.96	0.62	2.94	2.94	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SSP126	2030s	2.09	0.96	1.60	4.66	4.64	1.74	0.03	2.92	37.06	0.68	62.27	36.81	0.62	62.58
	2050s	2.09	1.12	1.32	4.54		1.62	0.04	2.92	35.46	0.79	63.75			
	2070s	1.94	0.98	1.75	4.68		1.75	0.02	2.93	37.23	0.47	62.30			
	2090s	1.98	0.99	1.73	4.70		1.77	0.02	2.93	37.48	0.52	62.00			
SSP245	2030s	2.20	1.39	1.47	5.05	5.07	2.11	0.01	2.94	41.73	0.29	57.99	41.85	0.21	57.95
	2050s	2.27	1.64	1.08	5.00		2.06	0.01	2.94	41.08	0.25	58.68			
	2070s	2.10	1.43	1.57	5.10		2.16	0.01	2.94	42.21	0.17	57.62			
	2090s	2.10	1.42	1.59	5.12		2.17	0.01	2.95	42.36	0.14	57.50			
SSP370	2030s	0.56	1.08	1.52	3.17	3.22	1.60	0.03	2.92	35.11	0.66	64.23	34.91	0.68	64.42
	2050s	0.37	0.81	2.02	3.21		1.55	0.03	2.92	34.45	0.70	64.85			
	2070s	0.28	0.60	2.36	3.24		1.61	0.03	2.92	35.22	0.64	64.14			
	2090s	0.21	0.41	2.63	3.25		1.58	0.03	2.92	34.84	0.70	64.46			
SSP585	2030s	0.68	0.91	1.50	3.09	3.18	1.78	0.01	2.94	37.63	0.27	62.11	38.16	0.27	61.58
	2050s	0.56	0.83	1.79	3.18		1.81	0.01	2.94	38.02	0.27	61.71			
	2070s	0.42	0.81	1.99	3.23		1.84	0.01	2.94	38.41	0.26	61.33			
	2090s	0.37	0.75	2.11	3.23		1.86	0.01	2.94	38.59	0.27	61.15			

从发生区域来看, 未来 4 种气候情景下, 骆驼蓬在伊犁河谷各县市均有分布; 从发生面积来看, 4 种气候情景下骆驼蓬发生面积较当前时期均增加, 平均增幅分别为 $1.85 \times 10^4 \text{ km}^2$, $2.04 \times 10^4 \text{ km}^2$, $2.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,

$2.42 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 SSP585 情景下, 骆驼蓬高危区面积均值和扩张区占比均值最大, 分别为 $2.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、66.97%。综合来看, SSP585 情景下, 骆驼蓬的危害性更强且更易扩散(图 8、表 9)。

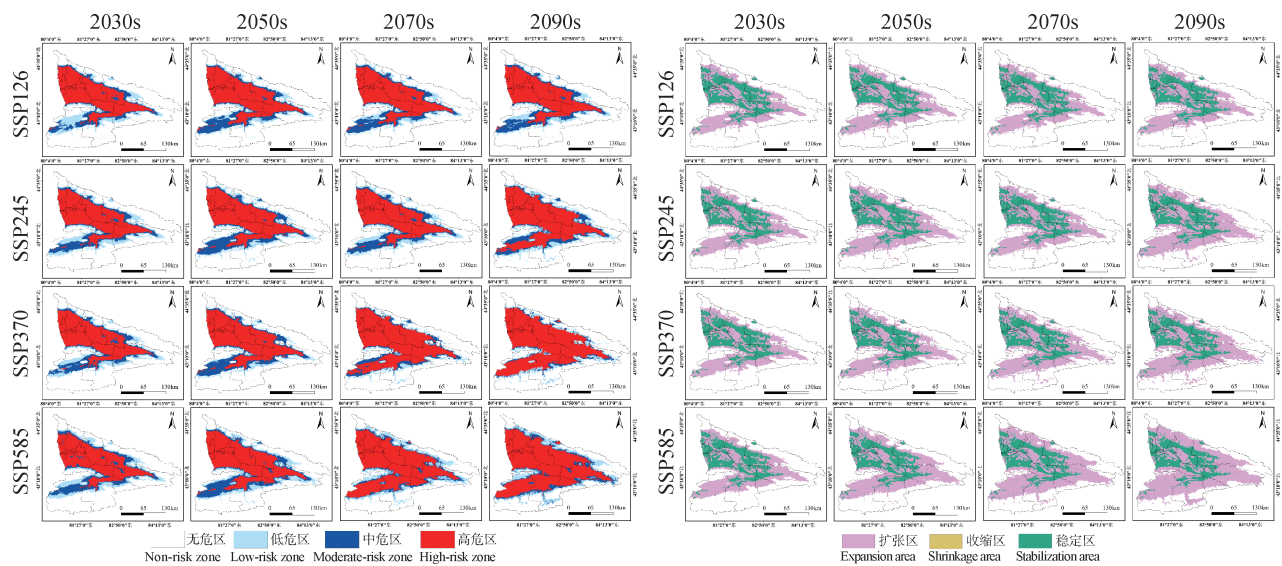


图 8 未来不同气候情景下骆驼蓬潜在发生区

Fig. 8 Potential occurrence areas of *Peganum harmala* under different future climate scenarios

表 9 未来不同气候情景下骆驼蓬潜在发生区

Table 9 Potential occurrence areas of *Peganum harmala* under different future climate scenarios

气候情景 Climate scenario	年份 Year	发生区面积(×10 ⁴ km ²) Occurrence area				各情景发生区 面积均值 Average occurrence area per scenario/ (×10 ⁴ km ²)	发生区空间格局变化 Spatial pattern change of occurrence areas									各情景变化面积占比均值 Average proportion of areal change per scenario		
		低危区 Low-risk zone	中危区 Moderate-risk zone	高危区 High-risk zone	总发生区 Total occurrence zone		变化面积(×10 ⁴ km ²) Area change			变化面积占比 Area change percentage								
							扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone	扩张区 Expansion zone	收缩区 Shrinkage zone	稳定区 Stabilization zone						
/	当前	0.42	0.38	0.36	1.16	1.16	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
SSP126	2030s	0.66	0.51	1.76	2.93	3.01	1.77	0.00	1.17	60.20	0.15	39.65	61.12	0.12	38.77			
	2050s	0.50	0.70	1.86	3.05		1.88	0.00	1.17	61.70	0.10	38.20						
	2070s	0.51	0.68	1.83	3.03		1.86	0.00	1.17	61.39	0.10	38.51						
	2090s	0.53	0.66	1.82	3.01		1.84	0.00	1.17	61.18	0.11	38.70						
SSP245	2030s	0.68	0.60	1.73	3.01	3.20	1.84	0.00	1.17	61.16	0.14	38.70	63.39	0.09	36.51			
	2050s	0.58	0.74	1.92	3.25		2.08	0.00	1.17	63.99	0.08	35.93						
	2070s	0.65	0.65	1.76	3.06		1.90	0.00	1.17	61.85	0.12	38.03						
	2090s	0.65	0.55	2.31	3.50		2.33	0.00	1.17	66.57	0.03	33.39						
SSP370	2030s	0.62	0.61	1.73	2.97	3.22	1.80	0.00	1.17	60.61	0.15	39.23	63.60	0.10	36.30			
	2050s	0.42	0.72	1.94	3.08		1.92	0.00	1.17	62.14	0.14	37.72						
	2070s	0.43	0.47	2.41	3.31		2.14	0.00	1.17	64.68	0.08	35.24						
	2090s	0.53	0.29	2.71	3.54		2.37	0.00	1.17	66.96	0.03	33.01						
SSP585	2030s	0.74	0.65	1.66	3.05	3.58	1.89	0.00	1.17	61.73	0.11	38.16	66.97	0.04	32.99			
	2050s	0.67	0.74	2.00	3.41		2.24	0.00	1.17	65.68	0.03	34.30						
	2070s	0.75	0.42	2.63	3.79		2.62	0.00	1.17	69.15	0.01	30.84						
	2090s	0.72	0.50	2.86	4.08		2.91	0.00	1.17	71.32	0.00	28.67						

2.4 毒害草分布中心及变化趋势

苦豆子当前时期发生区分布中心位于巩留县北部(81.91° E, 43.55° N), 未来气候变化下除 SSP245 情景下分布中心出现向东北方向明显迁移外, 其余情景基本呈水平向东迁移趋势。白喉乌头当前时期发生区分布中心位于特克斯县北部(坐标 82.04° E, 43.22° N), 未来除 SSP245 情景下分布中

心出现向东北方向明显迁移外, 其余情景基本呈向西南方向低纬度地区迁移趋势。刺苍耳发生区分布中心位于巩留县西部(81.90° E, 43.37° N), 未来 4 个气候情景下均表现为先向南部低纬度地区迁移, 再向北部高纬度地区迁移的趋势。天山酸模发生区分布中心位于伊宁县南部(81.66° E, 43.70° N), 未来 4 个气候情景下, 天山酸模分布中心主要向南

部及西南部低纬度方向迁移。骆驼蓬发生区分布中心位于察布查尔锡伯自治县东部(81.51° E,

43.58° N),未来4个气候情景下,骆驼蓬分布中心主要向东南部低纬度地区迁移(图9)。

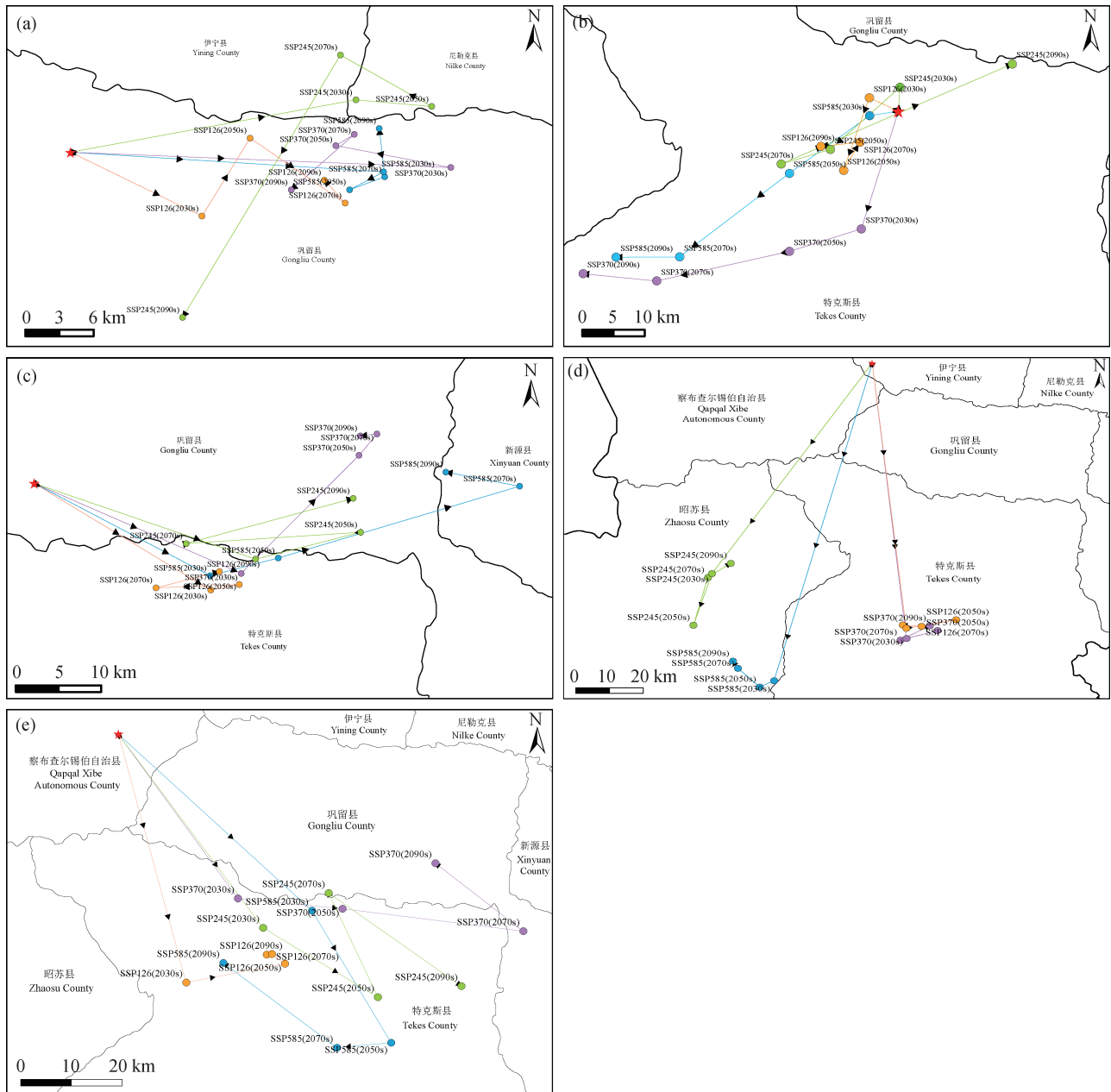


图9 未来不同气候情景下毒害草分布中心迁移

Fig. 9 Migration of distribution centers for poisonous and harmful weeds under different future climate scenarios

2.5 未来时期多物种生态位重叠分析

图10与表10是与当前时期相比,未来不同气候情景下多物种重叠区的面积变化。结果显示,各情景下多物种重叠区面积均有所增加,其中SSP585情景的增幅最大,均值为 $0.66 \times 10^4 \text{ km}^2$,而SSP245情景的增幅最小,为 $0.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从

不同时期的增幅变化趋势来看,SSP126和SSP245情景下增幅呈波动式下降,SSP370情景下波动式增加,SSP585情景则持续增加。此外,随着时间推移,各情景整体表现为任意两物种、五物种重叠区面积减少,而任意三物种、四物种重叠区面积增加。

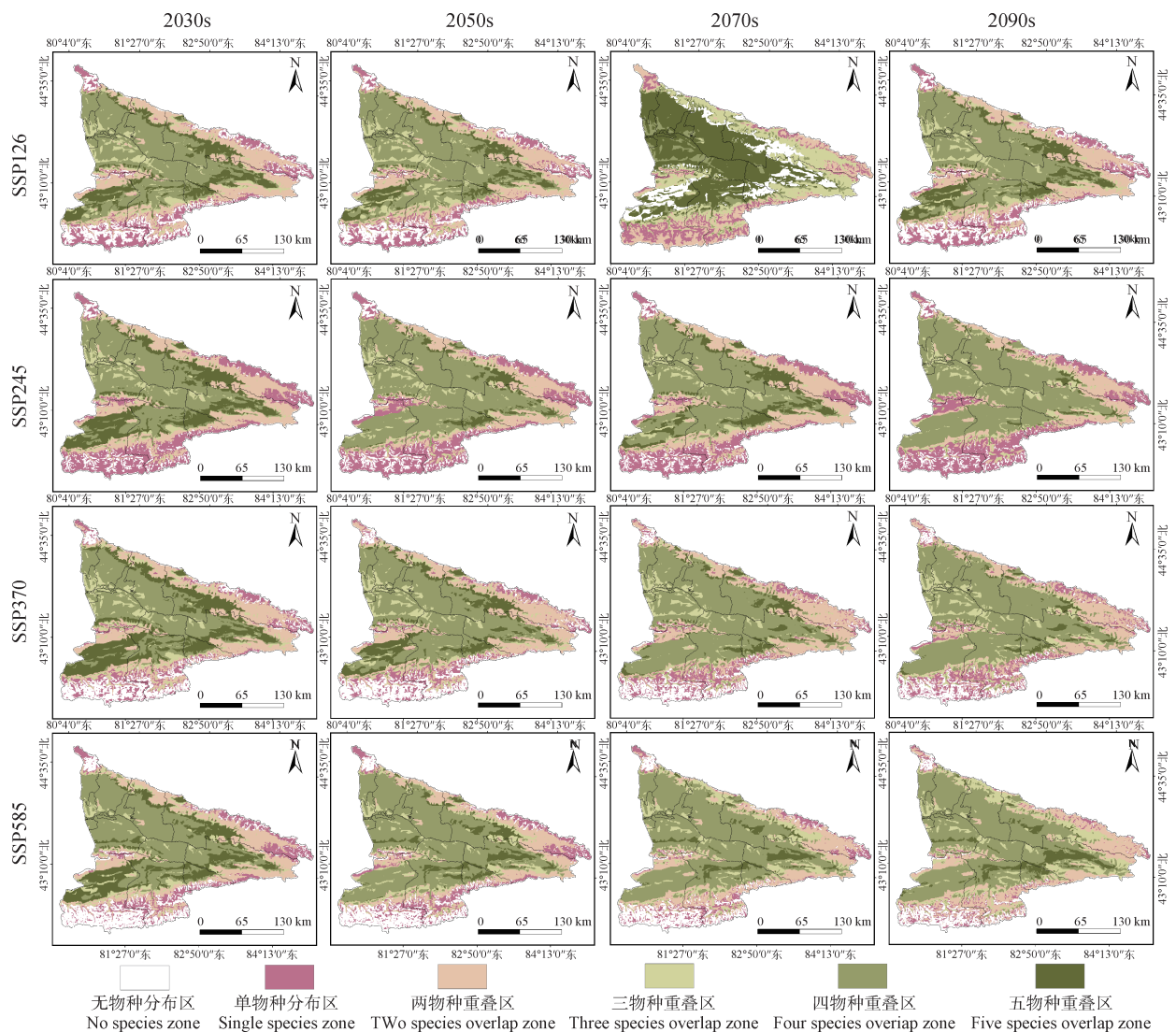


图 10 未来时期多物种生态位重叠分析

Fig. 10 Analysis of multi-species niche overlap in future periods

表 10 未来不同气候情景下多物种重叠区面积变化

Table 10 Future area change of overlapping regions for multiple species under different future climate scenarios $\times 10^4 \text{ km}^2$

气候情景 Climate scenario	年份 Year				均值 Mean
	2030s	2050s	2070s	2090s	
SSP126	0.48	0.52	0.43	0.47	0.47
SSP245	0.47	0.37	0.53	0.37	0.43
SSP370	0.54	0.55	0.65	0.62	0.59
SSP585	0.43	0.49	0.75	0.97	0.66

3 讨论

3.1 气候变化对草原毒害草分布区的影响

大量研究表明,未来的气候变化会对物种分布产生一定影响^[40-42],从未来时期草原毒害草高危区占比与发生区扩张占比来看,苦豆子在 SSP245 与 SSP370 情景下、白喉乌头和刺苍耳在 SSP370 情景

下、天山酸模在 SSP245 及 SSP370 情景下、骆驼蓬在 SSP585 情景下更易扩散危害。综合 5 种草原毒害草来看,在中高排放的 SSP370 情景下,草原毒害草更易扩散造成危害。赵啟军等^[43]基于 MaxEnt 模型对青海省露蕊乌头(*Aconitum gymnantrum*)的预测表明,中高排放的 SSP370 情景下其高危区面积显著增加,与本研究结论一致。可能是由于 CMIP6 情景模式中 SSP126、SSP245、SSP370、SSP585 这 4 个情景的温室气体排放量越来越高,全球平均地表气温也随之升高^[44],适当增加温度可以促进植物的扩张,而持续升温则会带来一定负面影响^[45]。有研究表明,未来 SSP126 情景下,我国西北地区干旱趋势较轻,但其余 3 种情景下,西北地区干旱趋势会加剧,SSP585 情景下,干旱趋势最为明显^[46]。因此,虽然多数草原毒害草较可食牧草而言,对高温及干

旱的气候具有更强的抵抗性,在中高排放情景下,可占据主要优势,但随着气候环境极端现象的加剧,其抵抗力也会随之减弱,最终减少分布。塞依丁·海米提等^[47]关于刺苍耳的研究则指出,高排放的RCP8.5情景下刺苍耳响应更为敏感,与本研究结论不一致。造成以上差异可能是因为所选用的气候情景和影响因子不同,相较于CMIP5的RCP情景,CMIP6的SSP情景参与的模式数量更多、科学试验设计更为完善、所提供的模拟数据更为庞大,能够更好地预估气候变化趋势^[48-49]。同时,本研究在选择常规生物气候因子、土壤因子、地形因子的基础上,补充了与草原毒害草生长相关的草地类型因子、植被指数因子、距河流距离因子,预测结果可以较好体现草原毒害草的发生趋势。但由于本研究的核心是探讨气候变化对草原毒害草的影响,因此未纳入人类活动、物种间相互关系等其他因素的作用分析。未来研究可进一步整合上述因素,更全面地揭示草原毒害草的发生趋势与驱动机制。

3.2 草原毒害草分布中心迁移分析

本研究表明,未来不同气候条件下,苦豆子分布中心主要呈水平向东迁移的趋势,纬度变化差异较小,整体稍向低纬度地区偏移;白喉乌头、天山酸模及骆驼蓬分布中心整体呈向低纬度地区迁移趋势;刺苍耳分布中心呈先向低纬度方向迁移再向高纬度方向迁移趋势。整体来看,未来各情景下,草原毒害草分布中心偏向低纬度地区迁移。这与部分研究结果一致,如Xu等^[50]研究发现随气候变化,白喉乌头呈向东南方向迁移趋势,He等^[51]研究发现沙棘(*Hippophae rhamnoides*)植物在未来气候情景下有向低纬度地区扩张和迁移的趋势,李文华等^[52]研究发现未来不同气候情景下,荒漠植物准噶尔沙蒿(*Artemisia songarica*)在新疆的分布呈现逐渐向低纬度地区迁移趋势,指出强适应性的准噶尔沙蒿在低纬度地区更易找到适宜生境。同时,本研究也与部分学者得出气候变化会使物种倾向高纬度地区迁移的研究结果存在差异,如乔爽等^[53]得出气候变化下木姜子属植物山鸡椒(*Litsea cubeba*)、红叶木姜子(*Litsea rubescens*)在全国的分布呈现向高纬度地区迁移趋势,刘恬等^[40]发现未来气候情景下,狗牙根在全国的分布呈现向西北迁移趋势,造成差异可能是因为一方面多数学者的研究对象主要为濒危植物或优良牧草,物种本身抗性与草原毒

害草存在差异,因而适应性策略与草原毒害草也有所不同;另一方面,有研究指出,在未来气候变化下,虽然多数物种将会向北迁移,但是本来就分布于北部的物种却并不完全遵循这一趋势^[54]。综合来看,未来气候情景下,抗逆性强的草原毒害草在低纬度地区更易造成危害。

4 结论

未来不同气候变化情景下,苦豆子、刺苍耳、天山酸模和骆驼蓬的发生区以稳定为主,同时会进一步扩张,而白喉乌头的发生区以稳定为主,同时会出现缩减。其中白喉乌头、天山酸模、骆驼蓬未来均偏向南部低纬度地区迁移。同时研究发现,中高排放的SSP370情景下草原毒害草更易造成危害,在此情景下苦豆子、白喉乌头、刺苍耳扩散区占比达到最高,白喉乌头、刺苍耳、天山酸模的高危区面积增幅达到最大。未来多物种重叠区面积随碳排放增加整体呈增加趋势,在高排放的SSP585情景下重叠区面积最大。可见,碳排放的持续增加会加剧草原毒害草的扩散和危害,未来仍需坚持碳减排与生态防控并重,以避免草原毒害草扩张蔓延。

参考文献

- [1] 刘明蕊,刘世婷,马春燕,等. 草地植物和土壤对温度和降水变化的响应研究进展[J]. 生态学报,2024,43(12):3787-3796
LIU M R, LIU S T, MA C Y, et al. Research progress of the responses of grassland plants and soil to the variation of temperature and precipitation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12): 3787-3796
- [2] 余志巍,刘强,张宇阳,等. 内蒙古不同草地 NDVI 变化及其驱动要素[J]. 生态学报,2024,44(22):10068-10082
YU Z W, LIU Q, ZHANG Y Y, et al. Changes of NDVI and driving factors in different grasslands in the inner mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10068-10082
- [3] 王生菊,刘文昊,靳瑰丽,等. 新疆草地上生物量时空变化及对气候因子的响应[J]. 草地学报,2025,33(7):2320-2332
WANG S J, LIU W H, JIN G L, et al. Temporal and spatial changes of grassland aboveground bio-mass and its response to climate factors in Xinjiang [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2320-2332
- [4] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021, 50-144
- [5] 冯波,孟宪红,杨显玉,等. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中青藏高原气温和降水的适用性评估及极端气候事件变化预估[J]. 高原气象,2025,44(2):265-278
FENG B, MENG X H, YANG X Y, et al. Temperature and

- precipitation assessment and extreme climate events prediction based on the coupled model intercomparison project phase 6 over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(2): 265-278
- [6] 陈思思. 气候增暖和植被变化背景下中国区域季节尺度土壤干旱未来预估[D]. 南京:南京信息工程大学, 2024, 1-97
CHEN S S. Future Projection of seasonal-scale soil drought in china under the context of climate warming and vegetation change [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024; 1-97
- [7] 王清政. 石羊河流域生态水文过程对农业水资源短缺的影响评估[D]. 兰州:兰州大学, 2024; 1-99
WANG Q Z. Assessment of the impact of ecological and hydrological processes on agricultural water scarcity in the Shiyang River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024; 1-99
- [8] 何静. 新疆阿勒泰地区毒害草的种群与分布[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2015; 1-2
HE J. The population and distribution of poisonous weed in altay region of xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015, 1-2
- [9] 刘智彪. 基于无人机遥感的白喉乌头防效监测方法的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022; 1-53
LIU Z B. Study on monitoring method of *Aconitum leucostomum* prevention effect based on unmanned aerial vehicle remote sensing [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022; 1-53
- [10] 岳方正, 高书晶, 程通通, 等. 中国草原有害生物防治工作现状及展望[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1615-1620
YUE F Z, GAO S J, CHENG T T, et al. Current situation and prospect of pest control in grassland of China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1615-1620
- [11] 姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测, 生态学报[J], 2023, 43(12): 5096-5109
YAO Z Y, HAN Q F, LIN B, et al. Prediction of distribution area of main noxious and miscellaneous weeds in Xinjiang based on MaxEnt model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5096-5109
- [12] 韩兴国, 李凌浩. 内蒙古草地生态系统维持机理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012, 83-102
HAN X G, LI L H. Mechanisms of grassland ecosystem maintenance in inner mongolia [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2012, 83-102
- [13] 俞慧云, 俞联平, 杨林平, 等. 玛曲县高寒草地可食牧草产量和养分含量变化及草地承载力分析[J]. 中国草食动物科学, 2020, 40(3): 40-46
YU H Y, YU L P, YANG L P, et al. Analysis on the change of the yield and nutrient content of the edible forage and the grassland grazing capacity in the alpine grassland of maqu county [J]. China Herbivore Science, 2020, 40(3): 40-46
- [14] DYDERSKI M K, PAŹ S, FRELICH L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? [J]. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1150-1163
- [15] HU Z J, GUO K, JIN S L, et al. The influence of climatic changes on distribution pattern of six typical *Kobresia* species in Tibetan Plateau based on MaxEnt model and geographic information system [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135: 375-390
- [16] LIU L, GUAN L L, ZHAO H X, et al. Modeling habitat suitability of *Houttuynia cordata* Thunb (Ceerciao) using MaxEnt under climate change in China [J]. Ecological Informatics, 2021, 63(4): 101324
- [17] 董瑞, 楚彬, 花蕊, 等. 未来气候情景下青藏高原瑞香狼毒 (*Stellera chamaejasme*) 的地理分布预测 [J]. 中国草地学报, 2022, 44(4): 10-20
DONG C B, CHU B, HUA T, et al. Prediction of the geographic distribution of *stellera chamaejasme* on the Tibetan Plateau under future climate scenarios [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(4): 10-20
- [18] HUANG R J, DU H M, WEN Y T, et al. Predicting the distribution of suitable habitat of the poisonous weed *Astragalus variabilis* in China under current and future climate conditions [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 921310
- [19] 黄睿杰, 张春艳, 温雨婷, 等. 当前(1970-2000)与未来气候变化情境下中国醉马苣草潜在分布预测 [J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2712-2720
HUANG R J, ZHANG C Y, WEN Y T, et al. Predicting the Habitats of *Achnatherum inebrians* in China under current (1970-2000) and future climate conditions [J]. ACTA AGRESTIA SINICA, 2022, 30(10): 2712-2720
- [20] 李宏, 陈卫民, 陈翔, 等. 新疆伊犁草原毒害草种类及其发生与危害 [J]. 草业科学, 2010, 27(11): 171-173
LI H, CHEN W M, CHEN X, et al. Poisonous weed species and their harmfulness in the grassland of Yili regions, Xinjiang Uygur Autonomous Region of China [J]. Pratacultural Science, 2010, 27(11): 171-173
- [21] 谈旭, 王承武. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2747-2756
TAN X, WANG C W. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2747-2756
- [22] 高格, 巴雅尔塔, 孟根. 伊犁河谷土地资源类型与利用现状分析 [J]. 甘肃农业, 2007, (9): 47-48
GAO G, BAYAERTA, MENG G. Analysis of land resource types and current utilization in the Ili River Valley [J]. Gansu Agriculture, 2007, (9): 47-48
- [23] 杨非凡, 何浩. 基于“EVI-ESV”伊犁河谷生态环境评估及生态分区构建 [J]. 生态环境学报, 2024, 33(4): 655-664
YANG F F, HE H. Ecological environment assessment and ecological zoning construction in the Ili River Valley based on EVI-ESV [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(4): 655-664
- [24] 张发, 祝小梅, 张红, 等. 伊犁河谷草地水分利用效率时空变化及其对气候因子的响应 [J]. 环境生态学, 2024, 6(4): 57-64
ZHANG F, ZHU X M, ZHANG H, et al. Spatial-temporal

- variation of water use efficiency and its response with climate factors in Ili River Valley[J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(4):57-64
- [25] 刘芳,张红旗,董光龙. 伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J]. *资源科学*, 2014, 36(8):1724-1731
LIU F, ZHNAG H Q, DONG G L. Vegetation dynamics and precipitation sensitivity in Yili Valley grassland[J]. *Resources Science*, 2014, 36(8):1724-1731
- [26] 王晓帆,段雨萱,金露露,等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. *生态学报*, 2023, 43(16):6590-6604
WANG X F, DUAN Y X, JIN L L, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. based on the optimized MaxEnt model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16):6590-6604
- [27] HOSSEINI N, GHORBANPOUR M, MOSTAFAVI H. The influence of climate change on the future distribution of two *Thymus* species in Iran: MaxEnt model-based prediction[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 269
- [28] 苏灿霞,初雯雯,撒力扎提·巴哈提别克,等. 气候变化下新疆乌伦古河上游蒙新河狸的潜在分布变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(3):509-520
SU C X, CHU W W, Bahatibieke PIELIZHATI, et al. Potential distribution changes of Castor fiber birulai under climate changes in the upper reaches of the Ulungur River, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(3):509-520
- [29] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519-525
ZHANG L X, CHEN X L, XIN X G. Short commentary on CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5):519-525
- [30] 李春晖,汪建军,蔡哲,等. 基于MaxEnt模型的薄壳山核桃在江西的潜在适生区预测[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(5):1644-1652
LI C H, WANG J J, CAI Z, et al. Prediction of potential suitable distribution area for pecan (*Carya illinoensis*) in Jiangxi based on MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(5):1644-1652
- [31] 罗才红,汪皖渝,黄金夏,等. 基于MaxEnt模型预测气候变化对黑颈鹤栖息地分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(4): 1251-1260
LUO C H, WANG W Y, HUNAG J X, et al. Predicting the impact of climate change on the habitat distribution of *Grus nigricollis* based on the MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, [31]2025, 36(4):1251-1260
- [32] 李发毅,段国珍,樊光辉,等. 基于MaxEnt模型预测枸杞负泥虫潜在适生区[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(6):2096-2104
LI F Y, DUAN G Z, FAN G H, et al. Predicting geographical distribution of *Lema decempunctata* with MaxEnt modeling[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(6):2096-2104
- [33] 李莹,刘文昊,靳瑰丽,等. 乌鲁木齐市草地面积时空变化特征及驱动力[J]. *草业科学*, 2024, 41(3):561-573
LI Y, LIU W H, JIN G L, et al. Analysis on spatial and temporal changes and driving forces of grassland area in Urumqi City[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(3):561-573
- [34] 张伟,周松林,尹仑. 基于优化MaxEnt模型的高山峡谷区地质灾害易发性评价——以云南省德钦县为例[J]. *灾害学*, 2023, 38(2):185-190
ZHAGN W, ZHOU S L, YIN L. Evaluation of Susceptibility to Geological Hazard in Alpine Canyon Area Based on Optimized MaxEnt Model-A Case Study in Deqin County, Yunnan Province[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(2):185-190
- [35] 李秀玉,唐继敏,殷晓洁,等. 应用优化最大熵模型的珍稀濒危玉兰属物种适生区预测[J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(1):64-72
LIU X Y, TANG J M, YIN X J, et al. Predicting the suitable habitat of rare and endangered *Yulania spach* Species Using Optimization MaxEnt Modeling[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(1):64-72
- [36] 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[J]. *生物多样性*, 2016, 24(10):1189-1196
ZHU G P, QIAO H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10):1189-1196
- [37] 郑晓毅,王钦召,田语卿,等. 基于MaxEnt模型预测茶方胸小蠹在中国的潜在适生区[J]. *植物保护学报*, 2024, 51(6): 1518-1530
ZHENG X Y, WANG Q T, TIAN Y J, et al. Prediction of potential suitable of tea shot-hole borer *Euvallancea fornicatus* in China based on MaxEnt model[J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51(6):1518-1530
- [38] FREITAS G H, COSTA L M, SILVA P H, et al. Spatial ecology and conservation of the microendemic ovenbird *Cincludes* (*Cincludes espinhacensis*) from the Brazilian highlands [J]. *Journal of Field Ornithology*, 2019, 90(2): 128-142.
- [39] 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
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
- [40] 刘恬,徐京亚,郑轶琦. 基于MaxEnt和ArcGIS的狗牙根在中国的适宜性区划研究[J]. *草业科学*, 2025, 42(9):2230-2243
LIU T, XU J Y, ZHENG Y Q. Study on suitability zoning of *Cynodon dactylon* in China based on MaxEnt and ArcGIS[J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(9):2230-2243
- [41] AKYOL A, ÖRÜCÜ Ö K, ARSLAN E S, et al. Predicting of the current and future geographical distribution of *Laurus nobilis* L. under the effects of climate change[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(4): 459
- [42] WANG Y J, XIE L Y, ZHOU X Y, et al. Prediction of the

- potentially suitable areas of *Leonurus japonicus* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model [J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(10): e10597
- [43] 赵啟军,牟丹,拉巴才仁,等. 青海省露蕊乌头的分布与危害区预测[J]. *草原与草坪*, 2025, 45(1): 161-172
- ZHAO Q J, MOU D, Labacairen, et al. Distribution and prediction of hazard area of *Aconitum gymnantrum* in Qinghai Province[J]. *Grassland and Turf*, 2025, 45(1): 161-172
- [44] 乔年,卢楚翰,管兆勇,等. CMIP6模式未来情景下模拟的大气质量季节循环:非线性变化[J]. *大气科学学报*, 2024, 47(6): 867-880
- QIAO N, LU C H, GUAN Z Y, et al. Simulated seasonal cycle of atmospheric mass in four future scenarios of the CMIP6 models: a nonlinear response to increasing greenhouse gases[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2024, 47(6): 867-880
- [45] 鲁客,贺一鸣,毛伟,等. 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3758-3766
- LU K, HE Y M, MAO W, et al. Potential geographical distribution and changes of *Artemisia ordosica* in China under future climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3758-3766
- [46] 山建安,朱睿,尹振良,等. 基于CMIP6模式的中国西北地区干旱时空变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(5): 717-729
- SHAN J A, ZHU R, YIN Z L, et al. Spatial and temporal variation of drought in Northwest China based on CMIP6 model[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(5): 717-729
- [47] 塞依丁·海米提,努尔巴依·阿布都沙力克,许仲林,等. 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[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1551-1559
- SAYIT HAMIT, NURBAY ABDUSHALIH, XU Z L, et al. Simulation of potential distribution patterns of the invasive plant species *Xanthium spinosum* L. (Bathurst burr) in Xinjiang under climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1551-1559
- [48] 周天军,邹立维,陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456
- ZHOU T J, ZHOU L W, CHEN X L. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456
- [49] 王予,李惠心,王会军,等. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较[J]. *气象学报*, 2021, 79(3): 369-386
- WANG Y, LI H X, WANG H J, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(3): 369-386
- [50] XU L, FAN Y, ZHENG J H, et al. Impacts of climate change and human activity on the potential distribution of *Aconitum leucostomum* in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168829
- [51] He X H, Si J H, Zhu L, et al. Modeling habitat suitability of *Hippophae rhamnoides* L. using MaxEnt under climate change in China: A case study of *H. r. sinensis* and *H. r. turkestanica* [J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, 5: 1095784
- [52] 李文华,李生宇,徐新文,等. 基于MaxEnt模型预测气候变化下准噶尔沙蒿(*Artemisia songarica*)在新疆的潜在分布[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(9): 1578-1588
- LI W H, LI S Y, XU X W, et al. Predicting the potential distribution of *Artemisia songarica* in Xinjiang under climate change based on the MaxEnt model [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(9): 1578-1588
- [53] 乔爽,汪阳东,陈益存,等. 气候变化对木姜子属五种植物分布的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(7): 3401-3420
- QIAO S, WANG Y D, CHEN Y C, et al. Study on the influence of climate change on the distribution and future change of five *Litsea* species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(7): 1-20
- [54] 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
- (责任编辑 付 宸)