

DOI: 10.5846/stxb201802040299

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): - .

SAYIT Hamit, NURBAY Abdushalih, Xu Z L, ARMAN Jiesisi, Shao H, VINIRA Yilihar. Simulation of potential distribution patterns of the invasive plant species *Xanthium spinosum* L. (Bathurst burr) in Xinjiang under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

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

塞依丁·海米提^{1,2}, 努尔巴依·阿布都沙力克^{1,2,*}, 许仲林^{1,2}, 阿尔曼·解思斯^{1,2}, 邵华³, 维尼拉·伊利哈尔⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

4 新疆大学生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046

摘要:明确区域尺度上外来入侵种的潜在分布格局及其对气候变化的响应对入侵种的预防和控制具有重要意义。以外来入侵植物刺苍耳(*Xanthium spinosum* L.)为研究对象,以其扩散蔓延的新疆地区为研究区域,结合中国国家气候中心开发的 BCC—CSM1—1 模式下的将来气候条件,应用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析技术构建了未来不同气候变化情景(RCP4.5, 8.5)下 2050s 和 2070s 的刺苍耳适宜生境预测模型,定量的展示了气候变化情景下刺苍耳在新疆的扩散趋势及其适宜生境的面积空间变化和分布区中心移动轨迹。结果表明:年降雨量、下层土壤有机碳含量、上层土壤 pH 值、年温度变化范围、降雨量的季节性变化和年平均温度是影响刺苍耳地理分布的主导环境因子;博州、塔城、阿勒泰西北部、哈密中部、巴州北部、克州中部、阿克苏北部、奎屯市、克拉玛依市、五家渠市、喀什市等地为高危入侵风险区;两种气候模式下刺苍耳的各级适生区面积和总适生面积均呈持续增加的变化趋势,且在 RCP8.5 情景(最高温室气体排放情景)下响应更为敏感;总体上看,刺苍耳在新疆的分布未达到饱和,呈现以塔城中部为中心,向天山北麓和塔克拉玛干北缘方向辐射状扩散,且两种气候变化情景下至 2070s 分布区中心均向伊犁州奎屯方向移动。

关键词:气候变化;外来植物入侵;刺苍耳;扩散

Simulation of potential distribution patterns of the invasive plant species *Xanthium spinosum* L. (Bathurst burr) in Xinjiang under climate change

SAYIT Hamit^{1,2}, NURBAY Abdushalih^{1,2,*}, XU Zhongling^{1,2}, ARMAN Jiesisi^{1,2}, SHAO Hua³, VINIRA Yilihar⁴

1 College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

4 College of Life Sciences and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Understanding the potential distribution patterns and responses to climate change of invasive plant species on a regional scale is of great significance for the prevention and control of invasive species. In the present study, the invasive plant species *Xanthium spinosum* L. (Bathurst burr) was studied in the Xinjiang region, where the species is widely distributed. Xinjiang was selected as the study region for constructing a BCC—CSM1—1 model developed by the China

基金项目:国家自然科学基金(41561013);国家林业局委托项目:(211-62210)

收稿日期:2018-02-04; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Nurbaye@sina.com

National Climate Center to simulate future climate conditions. A MaxEnt model and the ArcGIS spatial analyst tool were used to construct predictive models of suitable habitats for *X. spinosum* in the 2050s and 2070s under two future climate change scenarios (RCP 4.5 and 8.5). The ultimate aim was to quantitatively demonstrate the dispersal trends of *X. spinosum* in Xinjiang, variations in the area of suitable habitat, and the movement path of the center of distribution. The results indicated that annual precipitation, subsoil organic carbon content, topsoil pH, annual temperature range, seasonal variations in annual precipitation, and annual average temperature are dominant environmental factors that affect the geographical distribution of *X. spinosum*. Bortala, Tacheng, Northwest Altay, Central Hami, Northern Bayingol, Central Kizilsu, Northern Aksu, Kuytun City, Karamay City, Wujiaqu City, and Kashgar City were identified as areas with high invasion risk. Trends of a continuous increase in the area of suitable habitat at the respective levels and in the total area of suitable habitat for *X. spinosum* were predicted for both climate scenarios, with the responses being more sensitive in the RCP 8.5 scenario (high emissions). In general, the distribution of *X. spinosum* in Xinjiang has not reached saturation, with the species being radially dispersed towards the north piedmont of Tianshan Mountains and the northern margin of the Taklamakan Desert from the center of distribution in central Tacheng. The center of distribution is predicted to move towards Kuitun in Ili Prefecture by 2070 under both climate change scenarios.

Key Words: climate change; alien invasive plant; *Xanthium spinosum* L.; expansion

气候变化作为全球变化的一个重要方面,主要表现在温度的上升、降水格局的改变以及极端气候事件的增加^[1-2]。在区域尺度上,气候因素会对物种的生长繁殖、物候、地理分布范围等产生诸多影响^[3-5]。随着全球温室气体排放量的指数型增长,我国未来气候变暖趋势将进一步加剧,全国大部分地区的降水量会有所增加,但是西部地区降水量将会减少^[6]。新疆属于典型的干旱半干旱地区,生态系统极为脆弱,容易遭受外来生物的入侵,面临着极大的入侵风险。在全球气候变化的大背景下外来入侵植物的适宜生境有可能扩大,也有可能因为气候条件超过了入侵植物的适宜范围而缩小。如 Bourdot 等^[7]的模拟研究结果表明,入侵植物 *Nassella neesiana* 在未来气候情景下的适宜生境有不同程度的减小。刘金雪^[8]的研究结果表明,入侵植物互花米草的适宜生境在 RCP4.5 情景(中等温室气体排放情景)下呈扩大趋势,在 RCP8.5 情景(最高温室气体排放情景)下呈减小趋势。Roger 等^[9]的评估结果表明入侵植物的适宜生境在未来气候情景下的变化并无一致的规律。因此,制定长期有效的预防措施需要考虑外来入侵种在未来气候变化情景下的分布^[10]。

刺苍耳(*Xanthium spinosum* L.)是菊科苍耳属一年生草本植物,是一种入侵性极强的恶性杂草,已经在全球范围内广泛的扩散蔓延^[11]。中国境内的刺苍耳首先在河南邯郸县发现,现已扩散至河南、安徽、辽宁、北京、内蒙古、宁夏、新疆等多个省市,其在新疆主要分布在伊犁地区、昌吉市、石河子市、乌鲁木齐市等地^[12-13]。刺苍耳的竞争能力和适应能力很强^[14],很容易在新的环境中占据领地,与原有植物和农作物竞争光照、矿质营养、水分、空间等生存资源,严重影响了当地植物群落的结构和组成。致使入侵地的草场退化、农作物减产、原有物种灭绝和物种多样性降低^[15]。因此,研究气候变化对外来入侵植物刺苍耳潜在分布范围及空间格局的影响对保护新疆的生物多样性有重要的意义。

鉴于刺苍耳在新疆的分布现状、扩散趋势和潜在危害。本研究结合中国国家气候中心开发的 BCC—CSM1—1 模式下的将来气候条件,应用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析技术分别构建了未来不同气候变化情景下刺苍耳适宜生境预测模型,分析比较了刺苍耳适宜生境的面积空间变化及分布区中心移动轨迹,明确了影响其潜在地理分布的主导环境变量,旨在揭示全球气候变化背景下刺苍耳在新疆的扩散趋势,目的在于预防和控制外来入侵植物刺苍耳在新疆的进一步扩散蔓延,减小气候变化对新疆生物多样性的不利影响,给入侵预防和控制提供相应的决策支持。

1 数据与方法

1.1 物种分布数据来源

刺苍耳在新疆的地理分布数据来源于国家林业局委托项目第二次全国植物资源普查新疆片区的调查工作。划定刺苍耳的花果期 7—10 月为野外考察期^[16],于 2015—2017 年在新疆境内进行野外实地采样,调查点主要有伊宁市、伊宁县、巩留县、特克斯县、新源县、察布查尔县、霍城县、尼勒克县、博乐市、昌吉市、石河子市、乌鲁木齐市、塔城地区和阿勒泰地区,发现刺苍耳即记为“存在点(presence)”,用 GPS 记录经纬度和海拔,共获得 92 条不重复的的地理分布数据(图 1)。

1.2 环境变量的选择

本文共选取生物气候因子、地形因子、土壤因子等 31 个环境变量。其中,现代(1960—1990 年的均值)和未来气候情景 2050s(2041—2060 年的均值)和 2070s(2061—2080 年的均值)的 19 个生物气候变量均来源于 Worldclim 数据集(<http://www.worldclim.org/>)^[17],该数据集分辨率为 1 km,由 19 个降水量、温度的极值和变化范围的变量构成,根据新疆政区图对下载的全球气候数据进行影像配准、裁剪和叠加。海拔高程数据(DEM)从美国国家航空航天局发布的全球数字高程模型(SRTM v4.1,<http://datamirror.csdb.cn/>)下载,空间分辨率为 100 m^[18]。坡向和坡度利用 ArcToolbox 工具箱的表面分析工具根据 DEM 生成。土壤数据来源于南京土壤所制作的二调数据,选取了数据集中的 9 个土壤变量,其中以 T_开头的字段表示上层土壤属性(0—30 cm),以 S_开头的字段表示下层土壤属性(30—100 cm)。

2050s 和 2070s 两个未来时间段的生物气候变量来源于政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第 5 次气候评估报告发布的缩减全球气候模型数据。结合研究区域的地理位置,采用由中国国家气候中心基于缩减全球气候模型数据开发的 BCC—CSM1—1 模式下的 2 种不同气候变化情景(RCP4.5、RCP8.5)数据^[19]。RCPs(Representative Concentration Pathways)情景对温度和降水等各变量的模拟和预测具有较高的准确性,且更加详细的考虑了温室气体排放量受人类应对全球气候变化所采取的各种方针政策的影响^[6]。本文选取的 RCP4.5 气候情景代表未来气候变化情景下的中等温室气体排放情景,在 RCP4.5 情景下至 2100 年温室气体浓度稳定为 650×10^{-6} CO₂当量。RCP8.5 气候情景代表未来气候变化情景下的最高温室气体排放情景,在 RCP8.5 情景下至 2100 年温室气体浓度高于 1370×10^{-6} CO₂当量^[8]。假设未来气候条件下土壤因子不发现变化。

在建模过程中除了要考虑变量之间存在自相关和多重线性重复等问题外,还需要考虑模型的维度和复杂程度,这些因素均会对模型的转移能力产生影响。因此,本研究参考 Worthington^[20]、张天蛟^[21]等的方法对环境变量进行了筛选,具体方法为在 R 语言中加载 cor 函数包,分别计算生物气候因子和土壤因子的 spearman 相关系数^[22],并细致考虑变量的生态学意义,选用相关系数<0.75 的环境因子,对于相关系数>0.75 的环境因子进行单因子建模,运行刀割法测定其对模型预测的贡献率大小,以此剔除对物种分布贡献率较小的环境因子,最终筛选出 17 个环境变量参与建模(表 1)。

1.3 矢量图及模型来源

本文所用的新疆政区矢量图,来源于新疆维吾尔自治区测绘地理信息局的标准地图下载服务区,地址为 <http://www.xjch.gov.cn/wsfw/bzdt/bzdtzx/>。MaxEnt 模型是由 S.J.Phillips 于 2004 年构建的用于预测物种分

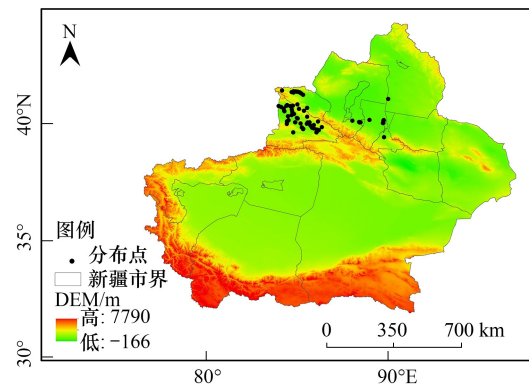


图 1 刺苍耳在新疆的地理分布

Fig.1 Distribution of *Xanthium spinosum* L. in Xinjiang

布的技术方法^[23],本研究所使用的 MaxEnt 软件为 3.3.3k 版^[24]。ArcGIS 空间技术平台是美国 Esri 公司研发的一套完整的 GIS 产品,本研究所使用的 ArcGIS 软件版本为 10.2.2 版^[25-26]。

表 1 17 个参与建模的环境变量及其贡献率

Table 1 17 environmental variables used for modeling and their contribution rates

变量名称 Code of variables	描述 Names of variables	贡献率 Percent contribution/%	重要性 Permutation importance
Bio1	年平均温度 Mean annual temperature	4.8	27
Bio3	等温线 Isotherm	0.7	2.8
Bio7	年温度变化范围 Annual temperature range	9.1	0.8
Bio12	年降雨量 Annual rainfall	49.1	59.9
Bio15	降雨量的季节性变化 Seasonal changes in rainfall	7.5	0.2
T_texture	土壤质地 Soil texture	0.5	0.1
S_cec_soil	下层土土壤的阳离子交换能力 CEC of undersoil	3.4	0
T_cec_soil	上层土土壤的阳离子交换能力 CEC of topsoil	0.2	0.5
S_sand	下层土沙含量 Lower soil sediment content	0.7	0.2
T_sand	上层土沙含量 Upper soil sediment content	0.1	0.1
S_ph_h2o	下层土 pH pH of undersoil	0	0
T_ph_h2o	上层土 pH pH of topsoil	9.9	3.3
S_oc	下层土有机碳含量 Organic carbon content of undersoil	10.4	0.4
T_oc	上层土有机碳含量 Organic carbon content of topsoil	2.1	2.2
Alt	海拔 Altitude	0.2	1.1
Aspect	坡向 Aspect	1.3	1
Slope	坡度 Slope	0.2	0.3

1.4 MaxEnt 模型构建及数据处理

将刺苍耳地理分布数据和 17 个环境变量导入 MaxEnt,随机选取 75%的刺苍耳分布点作为训练集,剩余 25%的刺苍耳分布点作为测试集^[27],运行刀割法测定各环境变量在影响刺苍耳生长适宜度中所占的权重,并创建各环境变量的单因子响应曲线,模型的其余参数均选择默认值。本研究用受试者操作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC 曲线) 下面积值,即 AUC 值 (Area Under Curve, AUC) 为判据评价模型的模拟结果^[28]。不同的 AUC 值代表不同预测效果 (表 2)^[29]。

将模型输出的栅格图层导入 ArcGIS,采用“10 percentile training persence logistic threshold”进行重分类,并根据专家经验法将刺苍耳的适宜生境划分成 4 个等级:0—0.40 为非适应区,0.40—0.60 为低适生区,0.60—0.80 为中适生区,0.80—1.00 为高适生区^[30]。再运用 ArcGIS 的 SDM 工具箱和统计工具 Zonal 计算 4 类分区的面积和面积空间变化,通过适宜区域几何面积化确定分布区中心移动轨迹,分析比较刺苍耳在不同气候变化情景下的潜在分布范围和格局。

表 2 AUC 值取值范围及其与模型准确性的关系

Table 2 Relationship between AUC and the accuracy of the model

AUC 取值范围 Range of AUC values	评价标准 Evaluation criterion	AUC 取值范围 Range of AUC values	评价标准 Evaluation criterion
$0.5 \leq AUC < 0.6$	失败	$0.8 \leq AUC < 0.9$	好
$0.6 \leq AUC < 0.7$	较差	$0.9 \leq AUC < 1.0$	优秀
$0.7 \leq AUC < 0.8$	一般		

AUC: 曲线下面积值, Area Under Curve

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测结果检测及贡献率评估

本研究的预测结果显示训练集的 AUC 值为 0.986,测试集的 AUC 值为 0.957(图 2),表明 MaxEnt 模型的预测结果可靠,刺苍耳的实际分布范围与模型预测的地理分布范围具有较高的一致性,预测结果可用于刺苍耳的适宜生境区划^[31]。在模型中运行刀割法(Jackknife test),运行结果显示出各环境变量对刺苍耳适宜生境预测的相对贡献率(表 1),Bio12 年降雨量的贡献率最高(49.1%),是影响刺苍耳分布的决定因子;S_oc 下层土有机碳含量的贡献率为 10.4%,仅次于年降雨量,是影响刺苍耳分布的次要因子;其次,T_ph_h2o 上层土 pH(9.9%)、Bio7 年温度变化范围(9.1%)、Bio15 降雨量的季节性变化(7.5%)和 Bio1 年平均温度(4.8%)的贡献率也均超过了 4%,以上 6 个因子的贡献率总和高达 90.8%,是影响刺苍耳地理分布的主导环境因子。

2.2 刺苍耳在现代及未来气候变化情景下的潜在分布预测

由预测结果(图 3)和统计分析可知(表 3),刺苍耳在现代气候及未来气候情景下的适生区主要分布在天山以北,且随着气候变化的加剧,刺苍耳的适宜生境会扩散至天山以南的区域。总体上看,刺苍耳在新疆的分布未达到饱和且即将进入指数型的增长和扩散阶段。现代气候情景下刺苍耳在新疆的适宜生境主要包括伊犁中部和西北部、博州中部、塔城西北部、昌吉中部、石河子市中部和乌鲁木齐市北部,总适生面积为 3.33×10^4 km²。RCP4.5 情景(中等温室气体排放情景)下刺苍耳的适宜生境主要包括伊犁州全境、博州全境、塔城全境、奎屯市、克拉玛依市、石河子市、五家渠市、乌鲁木齐市、昌吉州中部和西部、阿勒泰西北部、哈密中部、巴州北部、阿克苏北部、克州中部和喀什市,2050s 和 2070s 的总适生面积分别为 12.85×10^4 km² 和 16.18×10^4 km²。RCP8.5 情景(最高温室气体排放情景)下刺苍耳的适宜生境在 RCP4.5 气候情景下的适宜生境基础上进一步向四周扩张,且高适生区的扩增尤为显著,2050s 和 2070s 的总适生面积分别为 17.46×10^4 km² 和 21.50×10^4 km²。两种气候模式下各级适生区面积和总适生面积均呈持续增加的变化趋势,且在 RCP8.5 情景(最高温室气体排放情景)下响应更为敏感。

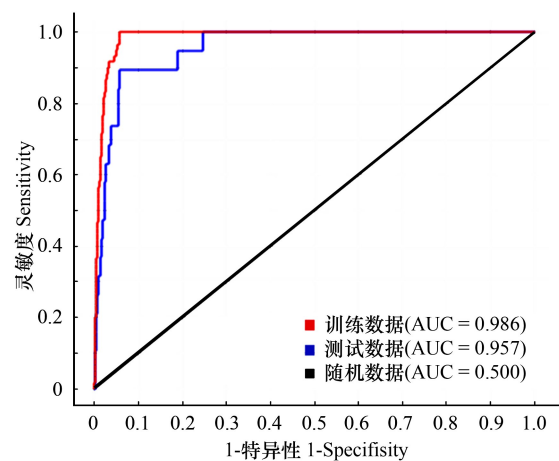


图 2 刺苍耳潜在分布预测结果的 ROC 曲线验证

Fig.2 ROC Curve and AUC values of the MaxEnt model

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

表 3 不同气候变化情景下刺苍耳在新疆的适生区面积

Table 3 Suitable area of *Xanthium spinosum* L. in Xinjiang under changing climate scenarios ($\times 10^4$ km²)

气候变化情景 Climate change scenario	高适生区面积 Highly suitable area	中适生区面积 Suitable area	低适生区面积 Low suitable area	非适生区面积 Unsuitable area	总适生面积(比例) Total suitable area (percentage)
现代 Current	1.17	2.16	8.51	151.58	3.33 (2.04%)
RCP4.5-2050s	8.11	4.74	15.37	135.2	12.85 (7.86%)
RCP4.5-2070s	10.09	6.09	15.69	131.55	16.18 (9.90%)
RCP8.5-2050s	11.04	6.42	13.54	132.42	17.46 (10.68%)
RCP8.5-2070s	15.16	6.34	14.26	127.65	21.50 (13.16%)

2.3 气候变化情景下刺苍耳适宜生境的面积空间变化及分布区中心移动轨迹

当前至 RCP4.5 中等温室气体排放情景下,至 2050s 刺苍耳在新疆的适宜生境增加 16.38×10^4 km²(图 4),

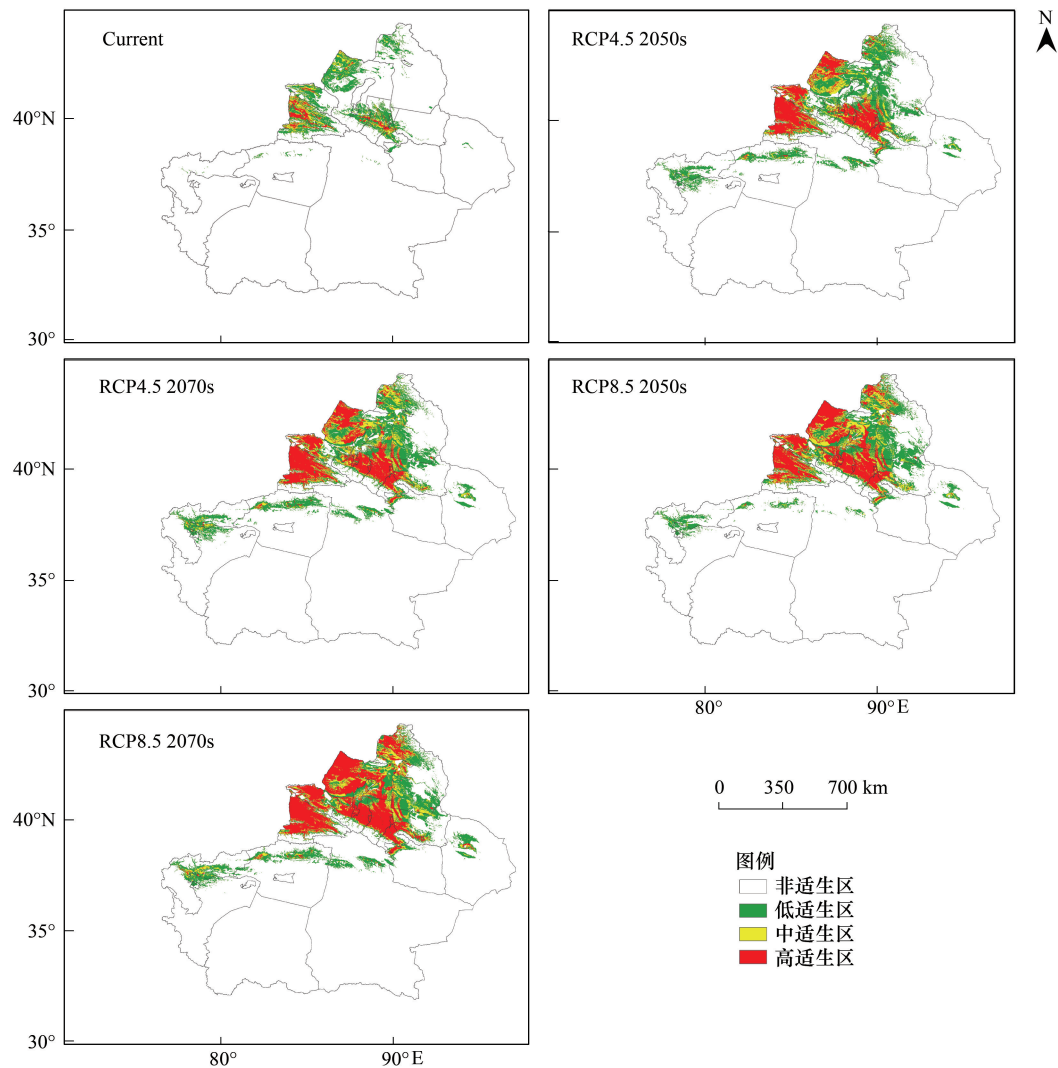


图3 不同气候变化情景下刺苍耳在新疆的适生区分布

Fig.3 Suitable distribution for *Xanthium spinosum* L. in Xinjiang under changing climate scenarios

增加面积是当前适生总面积的 4.92 倍,至 2070s 刺苍耳在新疆的适宜生境增加 $20.03 \times 10^4 \text{ km}^2$,增加面积是当前适生总面积的 6.02 倍。分布区中心由塔城中部(现代)经塔城南部(2050s)向伊犁州奎屯(2070s)方向移动(图 5)。当前至 RCP8.5 最高温室气体排放情景下,至 2050s 刺苍耳在新疆的适宜生境增加 $19.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,增加面积是当前适生总面积的 5.75 倍,至 2070s 刺苍耳在新疆的适宜生境增加 $23.92 \times 10^4 \text{ km}^2$,增加面积是当前适生总面积的 7.18 倍。分布区中心由塔城中部(现代)经克拉玛依市(2050s)向伊犁州奎屯(2070s)方向移动。说明在未来气候情景下,刺苍耳在新疆的适生分布区范围逐渐扩大,面积空间变化明显,呈现以塔城中部为中心,向天山北麓和塔克拉玛干北缘方向辐射状扩散,且两种气候变化情景下至 2070s 分布区中心均向伊犁州奎屯方向移动。

3 讨论与结论

制定长期有效的预防和控制措施需要考虑外来入侵种在未来气候变化情景下的分布,本研究结合中国国家气候中心开发的 BCC—CSM1—1 模式下的将来气候条件,利用最大熵模型 MaxEnt 和 ArcGIS 空间分析技术对刺苍耳的适宜生境进行了全疆范围的模拟预测,ROC 曲线测评结果可靠,预测结果与刺苍耳实际分布区域的相符度较高。原因在于本研究通过 spearman 相关系数对参与建模的环境因子进行了筛选,有效的降低了

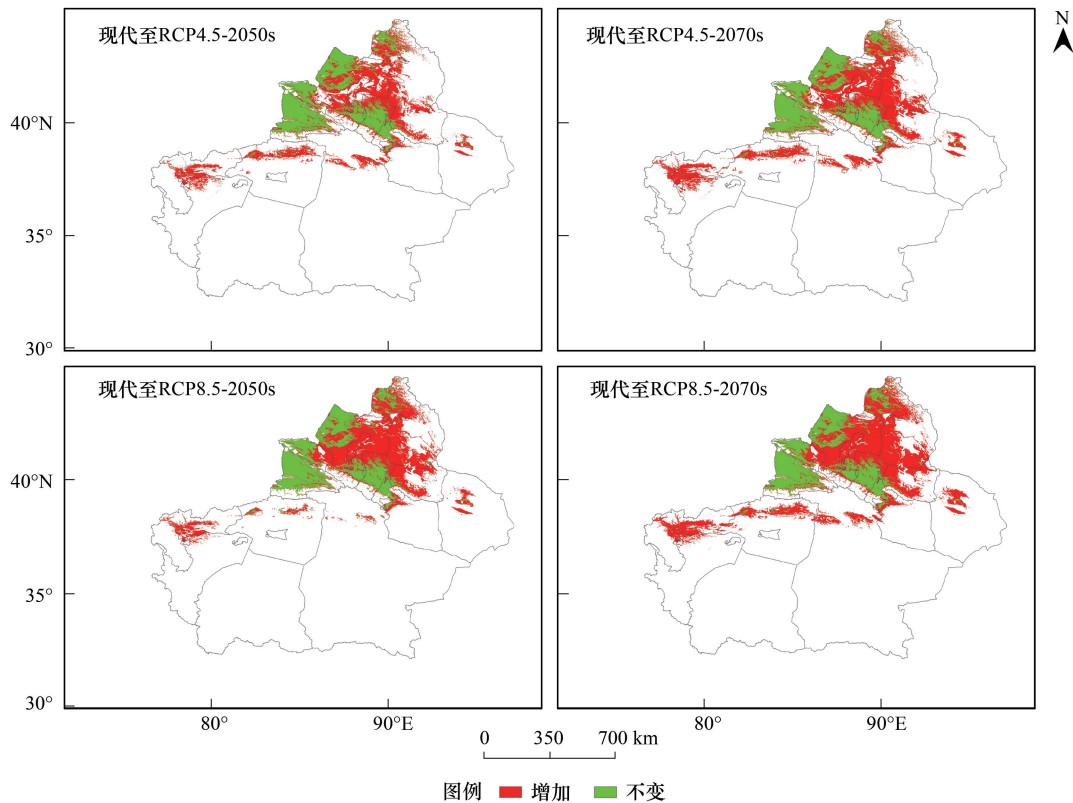


图4 未来气候情景对比现代气候情景下刺苍耳适宜生境的变化

Fig.4 Changes of suitable habitats of *Xanthium spinosum* L. under future climate scenarios versus modern climate scenarios

模型的维度和复杂程度。

当前气候情景下刺苍耳总适生面积比例为 2.04%，在 RCP4.5、RCP8.5 两种情景下至 2050s，预测的总适生面积比例为 7.86%、10.68%，适宜生境的增加面积分别是当前适生总面积的 4.92 和 5.75 倍。至 2070s，预测的总适生面积比例为 9.90%、13.16%，适宜生境的增加面积分别是当前适生总面积的 6.02 和 7.18 倍。说明在未来气候变化情景下，刺苍耳在新疆的种群数量和分布范围可能较当前会有一个指数型的增长和扩张，爆发成灾的可能性很大，入侵预防和控制任务更为艰巨。除已知分布区外，气候变化情景下博州、塔城、阿勒泰西北部、哈密中部、巴州北部、克州中部、阿克苏北部、奎屯市、克拉玛依市、五家渠市、喀什市等地的刺苍耳生境适宜度较高，具有极高的入侵风险。

总体上看，刺苍耳在新疆的分布未达到饱和，呈现以塔城中部为中心，向天山北麓和塔克拉玛干北缘方向辐射状扩散。本文参考 Yue 等^[32]的计算方法，确定刺苍耳在现代气候及未来气候情景下的适宜生境中心均位于北疆地区，原因可能有两点：(1) 天山北麓属于温带大陆性干旱半干旱气候，全年降雨量为 150—200 mm，塔克拉玛干南缘属于暖温带大陆性干旱气候，全年降雨量为 25—100 mm^[33]，而年降雨量是影响刺苍耳分布的决定因子，从单因子响应曲线看，年降雨量的范围在 13—607 mm 之间，且刺苍耳的生长适宜度随着年降雨量的增加而增大；(2) 土壤因子在影响刺苍耳生长适宜度中所占的权重较高 (27.1%)，且下层土有机碳含

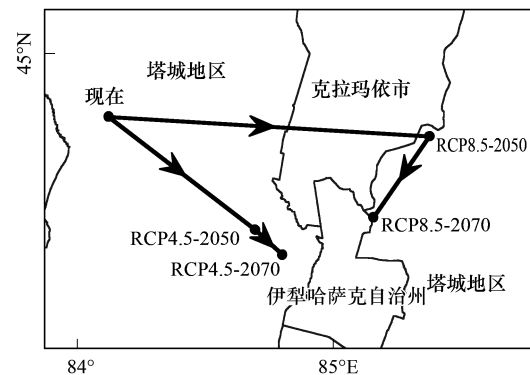


图5 不同气候情景下刺苍耳分布区中心与其移动轨迹变化

Fig.5 Changes in center of distribution area of *Xanthium spinosum* L. and its moving trajectory under different climate change scenarios

量是影响刺苍耳分布的次要因子,而朱敏等^[34]的研究结果表明天山北麓的土壤养分状况要优于塔克拉玛干北缘,由此可见降水量和土壤养分的差异使刺苍耳在北疆获得了更为广阔的适宜生境。但随着气候变化的加剧,刺苍耳的适宜生境会扩张至塔克拉玛干北缘,这可能是由于南疆的冬季气候相对温暖,更利于刺苍耳种子的越冬,这与李杰等^[35]得出的结论一致。而目前尚未在南疆地区出现刺苍耳的原因可能是天山山脉的阻隔作用,但随着气候变化的加剧,丝绸之路经济带战略的实施,南北疆交通道路建设和口岸贸易的发展,天山山脉的阻隔作用会有很大程度的减弱,因此在预防措施中不能只考虑北疆部分,南疆也需重点考虑。

在野外调查过程中发现,伊犁、博州等刺苍耳入侵区域的省道和县级公路的两侧已经基本被其占据,且同属菊科苍耳属的意大利苍耳(*Xanthium italicum* Moretti),菊科假苍耳属的假苍耳(*Iva xanthifolia* N.)等入侵物种也在北疆迅速的扩散蔓延,伊犁、昌吉等地还呈现刺苍耳和意大利苍耳交替分布的现象。此外,刺苍耳的果实具有刺,牛羊不食,很容易黏着在牛羊等牲畜的皮毛上,再由其携带进行远距离的传播扩散,牧民和地方管理部门对其危害程度的认识也不高,这些现象极大的威胁了入侵地的生物多样性和景观格局。全球入侵物种计划(Global Invasive Species Program, GISP)的主席 Waage 提出:对外来物种入侵,预防比控制其暴发更为可行,也更为经济^[36]。因此,鉴于刺苍耳的扩散趋势和野外调查的实际结果,作者提出以下几点防治措施:(1) 检疫部门应该将工作概念由过去局限在农产品检验扩大到所有的植物产品,并加强对口岸动物皮毛的检疫;(2) 应该针对刺苍耳的适生区建立两条隔离监测带,第一条建立在克拉玛依市,预警和控制刺苍耳继续向天山以北的方向扩散。第二条建立在巴州的和硕县和阿克苏的拜城县,预防刺苍耳扩散至天山以南的区域,并且对隔离监测带进行系统的监测和周期评估;(3) 从全疆的层面建立入侵物种数据库,为林业部门、环保部门和行政部门提供准确全面的生物入侵信息;(4) 加强在牧区和草场的宣传力度,出台相应的政策法规,让牧民和草场管理者能及时的发现刺苍耳并汇报上级部门。

本研究量化的展示了气候变化情景下外来入侵种刺苍耳在新疆扩散趋势,为全球气候变化对干旱区半干旱区生物多样性的影响,尤其是对入侵种刺苍耳的影响研究,提供了科学依据。然而,本研究也存在着一定的局限性和不足之处,原因在于研究中仅考虑了生物气候、地形、土壤等环境因子,而未考虑植物的生命周期、遗传特性、繁殖能力、人类活动、光照、河流等其他因素。且预测是以当前的刺苍耳分布点为基础进行的,未考虑未来分布点的实际变化,不可避免的造成了一定的误差。因此,在今后的研究中需要进一步考虑环境变量的选取,并着重追溯刺苍耳的入侵历史,分阶段的验证刺苍耳分布点的实际变化。

参考文献(References):

- [1] Edwards P N. A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming. Cambridge: The MIT Press, 2010.
- [2] 李丽鹤. 气候变化与人类活动对入侵植物潜在分布的影响及风险区识别——以云南省为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [3] Pounds J A, Bustamante M R, Coloma L A, Consuegra J A, Fogden M P L, Foster P N, La Marca E, Masters K L, Merino-Viteri A, Puschendorf R, Ron S R, Sánchez-Azofeifa G A, Still C J, Young B E. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 2006, 439(7073): 161-167.
- [4] Kozak K H, Graham C H, Wiens J J. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(3): 141-148.
- [5] 王茹琳, 李庆, 何仕松, 刘原. 中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究. *中国生态农业学报*, 2018, 26(1): 27-37.
- [6] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 张蕾, 江幸福. 基于 Maxent 模型的不同气候变化情景下我国草地蜩越冬区预测. *生态学报*, 2017, 37(14): 4852-4863.
- [7] Bourdôt G W, Lamoureaux S L, Watt M S, Manning L K, Kriticos D J. The potential global distribution of the invasive weed *Nassella neesiana* under current and future climates. *Biological Invasions*, 2012, 14(8): 1545-1556.
- [8] 刘金雪. 气候变化对外来入侵植物互花米草潜在分布区的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [9] Roger E, Duursma D E, Downey P O, Gallagher R V, Hughes L, Steel J, Johnson S B, Leishman M R. A tool to assess potential for alien plant establishment and expansion under climate change. *Journal of Environmental Management*, 2015, 159: 121-127.
- [10] 张颖. 基于 GIS 的生态位模型预测源自北美的菊科入侵物种的潜在适生区[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [11] 梁巧玲, 刘忠权, 陆平, 陈卫民. 刺苍耳在新疆伊犁河谷的分布及生长发育特性. *杂草学报*, 2017, 35(1): 25-29.

- [12] 宋珍珍, 谭敦炎, 周桂玲. 入侵植物刺苍耳在新疆的分布及其群落特征. 西北植物学报, 2012, 32(7): 1448-1453.
- [13] 杜珍珠, 徐文斌, 阎平, 王少山, 郭一敏. 新疆苍耳属 3 种外来入侵新植物. 新疆农业科学, 2012, 49(5): 879-886.
- [14] 袁着耕, 刘影, 邵华, 赵金雨, 赵玉, 胡云霞. 不同生长期入侵植物刺苍耳的化感作用. 生态科学, 2017, 36(6): 107-113.
- [15] 宋珍珍, 刘同业, 谭敦炎, 周桂玲. 两种入侵植物对新疆当地物种多样性的影响. 新疆农业科学, 2012, 49(11): 2120-2126.
- [16] 周明冬, 秦晓辉. 有害入侵生物刺苍耳的危害与控制. 新疆农业科技, 2014, (3): 47-48.
- [17] 张殷波, 高晨虹, 秦浩. 山西翅果油树的适生区预测及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1156-1162.
- [18] 刘艳, 阿提古丽·毛拉, 沙毕热木·斯热义力, 买买提明·苏来曼. 气候变化下耐旱藓类连轴藓属在新疆的分布模拟. 西北植物学报, 2017, 37(9): 1881-1887.
- [19] 应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, 24(4): 453-461.
- [20] Worthington T A, Zhang T J, Logue D R, Mittelstet A R, Brewer S K. Landscape and flow metrics affecting the distribution of a federally-threatened fish; improving management, model fit, and model transferability. Ecological Modelling, 2016, 342: 1-18.
- [21] 张天蛟, 刘刚. 提高生态位模型时间转移能力的方法研究. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 98-105.
- [22] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [23] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent; new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [24] Padalia H, Srivastava V, Kushwaha S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: comparison of MaxEnt and GARP. Ecological Informatics, 2014, 22: 36-43.
- [25] Vinod P N, Chandramouli P N, Koch M. Estimation of nitrate leaching in groundwater in an agriculturally used area in the state Karnataka, India, using existing Model and GIS. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1047-1053.
- [26] Anderson R P, Raza A. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution; preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. Journal of Biogeography, 2010, 37(7): 1378-1393.
- [27] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. 生态学报, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [28] 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.
- [29] 王亚领, 李浩, 杨旋, 郭彦龙, 李维德. 基于 MaxEnt 模型和不同气候变化情景的单叶蔓荆潜在地理分布预测. 草业学报, 2017, 26(7): 1-10.
- [30] 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.
- [31] 吴显坤, 南程慧, 汤庚国, 李垚, 毛丽君, 张志成. 气候变化对浙江楠潜在分布范围及空间格局的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(6): 85-91.
- [32] Yue T X, Fan Z M, Chen C F, Sun X F, Li B L. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2342-2361.
- [33] 王文静, 延军平, 刘永林. 新疆旱涝气候的南北差异性分析. 干旱区研究, 2016, 33(3): 609-618.
- [34] 朱敏, 梁智, 徐万里, 周勃, 丁峰. 新疆绿洲棉田土壤养分时空分布特点. 新疆农业科学, 2009, 46(5): 1076-1081.
- [35] 李杰, 马森. 新疆外来入侵植物意大利苍耳和刺苍耳种子的越冬性能. 生态学报, 2017, 37(21): 7181-7186.
- [36] Waage J K, Reaser J K. A global strategy to defeat invasive species. Science, 2001, 292(5521): 1486.