

DOI: 10.5846/stxb202110152910

董苏君, 马松梅, 张丹, 何大俊, 张林, 闫涵. 新疆三种独尾草的适宜分布及其对未来气候变化的响应. 生态学报, 2022, 42(21): 8809-8817.

Dong S J, Ma S M, Zhang D, He D J, Zhang L, Yan H. Suitable distributions of three species of *Eremurus* in Xinjiang and their responses to future climatic changes. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8809-8817.

新疆三种独尾草的适宜分布及其对未来气候变化的响应

董苏君¹, 马松梅^{2,*}, 张 丹¹, 何大俊¹, 张 林², 闫 涵²

1 石河子大学生命科学学院, 绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 石河子 832000

2 石河子大学理学院, 干旱区景观生态重点实验室, 绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 石河子 832000

摘要:研究国内仅分布于新疆的 3 种短命植物阿尔泰独尾草(*Eremurus altaicus*)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)和异翅独尾草(*Eremurus anisopterus*)的适宜分布及其对未来气候的可能响应,对新疆短命植物资源的分布、利用与科学保护具有重要意义。共收集了 64 个自然分布点,筛选了 6 个气候因子和 2 个地形因子数据,利用 MaxEnt 模型和地理信息系统 ArcGIS 软件模拟了当前气候情景下 3 种独尾草的生态适宜性,探讨影响 3 种植物分布的主导因子及其数值范围,预测 3 种独尾草的适宜分布对未来气候变化(2001—2040 年、2041—2080 年,基于温室气体中等排放情景:SSP2-4.5 共享社会经济路径)的可能响应。结果表明:(1)基准气候下,3 种独尾草在新疆的适宜分布存在较大差异:阿尔泰独尾草主要分布于伊犁河谷、天山北麓、阿尔泰山中段和准噶尔西部山地;两种沙生独尾草均分布于天山中段的绿洲-荒漠区过渡带,古尔班通古特沙漠西南部沙地;(2)最干月降水量(1—25mm)主要限制了阿尔泰独尾草的适宜分布;温度季节性变动指数(1150—1672)主要限制了两种沙生独尾草的适宜分布;(3)2001—2040 年和 2041—2080 年,3 种独尾草的适宜分布整体均呈缩减趋势:阿尔泰独尾草向天山北麓和准噶尔西部山地略微缩减;粗柄独尾草和异翅独尾草向古尔班通古特沙漠南缘略微缩减。

关键词:独尾草属;新疆;适宜分布;未来气候变化;驱动因子

Suitable distributions of three species of *Eremurus* in Xinjiang and their responses to future climatic changes

DONG Sujun¹, MA Songmei^{2,*}, ZHANG Dan¹, HE Dajun¹, ZHANG Lin², YAN Han²

1 Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2 Key Laboratory of Arid Land Landscape Ecology, Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract: In China, *Eremurus altaicus*, *Eremurus inderiensis* and *Eremurus anisopterus* are only distributed in Xinjiang. It is of great significance to the distribution, utilization and scientific protection of ephemeral plant resources in Xinjiang to study the suitable distributions of *Eremurus altaicus*, *Eremurus inderiensis* and *Eremurus anisopterus* and their possible responses to future climatic changes. A total of 64 natural distribution sites, 6 climate factors and 2 topographic factors were collected in this study. MaxEnt model and ArcGIS software were used to simulate the ecological suitability of the three species of *Eremurus* under current climate scenario. To investigate the dominant factors influencing the distribution of the three species and their numerical ranges, and to predict the possible responses of the suitable distribution of the three species to future climatic changes (2001—2040, 2041—2080, the society is a medium greenhouse gas emission scenario; based on SSP2-4.5

基金项目:国家自然科学基金项目(41561007, 41261011);新疆维吾尔自治区草原总站草原生态修复治理补助项目(XJCYZZ202007)

收稿日期:2021-10-15; **网络出版日期:**2022-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shzmsm@126.com

shard socio-economic path). The research results show that: (1) Under the basic climate, there is great differences in the suitable distribution of the three species in Xinjiang: *Eremurus altaicus* is mainly distributed in Ili River Valley, northern foot of the Tianshan Mountain, middle of the Altai Mountain and the Western Junggar Mountains. Both of psammophytes are distributed in the oasis-desert transition zone in the central Tianshan Mountains and the sandy land in the southwest of Gurbantunggut Desert; (2) The maximum monthly precipitation (1—25mm) mainly limited the suitable distribution of *Eremurus altaicus*, the temperature seasonal variation index (1150—1672) mainly limited the suitable distribution of *Eremurus inderiensis* and *Eremurus anisopterus*; (3) During 2001—2040 and 2041—2080, the suitable distribution of the three species of *Eremurus* show a decreasing trend as a whole: the *Eremurus altaicus* is reduced slightly towards the northern foot of the Tianshan Mountain and the Western Junggar Mountains; *Eremurus inderiensis* and *Eremurus anisopterus* shrink slightly towards the southern edge of the Gurbantunggut Desert.

Key Words: *Eremurus*; Xinjiang; suitable distribution; future climate change; driving factors

物种地理分布格局(空间分布特征)的变化是对气候变化最清楚、最直接的反映^[1]。预测气候变化对植物多样性的影响一直是植物地理学和植物生态研究的热点和重点之一。气候变化对分布范围较窄的植物来说更具有抑制性和选择性,因为这类植物对环境气候的特定性相对较高^[2]。大尺度气候变化会对植被分布造成一定影响,局部环境的差异也影响植物产生局部环境适应,造成很多植物类群分布特征相似但环境生态位产生一定分化^[3]。相关研究利用遗传变异分析和生态位分析表明温度变化和较低冬季均温以及高度特异性的生境可能是造成昌都韭(*Allium changduense* J.M. Xu.)与梭沙韭(*Allium forrestii* Diels)分化的重要原因^[4];温度和降水的显著差异造成不同倍性的猕猴桃(中华猕猴桃(*Actinidia chinensis* var. *chinensis*)、美味猕猴桃(*Actinidia chinensis* var. *deliciosa*))、3种云杉(沙地云杉(*Picea mongolica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、白扦(*Picea meyeri*))产生明显的生态位差异^[5-6]。新疆独特的山脉-盆地-绿洲-沙漠景观,孕育了丰富的中国新疆仅分布属,如角果藜属(*Ceratocarpus* Linn.)、新疆藜属(*Aellenia* Ulbr)、盐蓬属(*Halimocnemis*)等,以及中国新疆仅分布种,如沙生怪柳(*Tamarix taklamakanensis*)、天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)等,以及国内仅分布于新疆的类短命植物阿尔泰独尾草(*Eremurus altaicus*)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)和异翅独尾草(*Eremurus anisopterus*)。

独尾草属(*Eremurus* M.Bieb.)隶属百合科(*Liliaceae*),在我国共有4种,阿尔泰独尾草(*Eremurus altaicus* (Pall.) Stev)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis* (M.Bieb) Regel)、异翅独尾草(*Eremurus anisopterus* (Kar.et Kir) Regel)和独尾草(*Eremurus chinensis* Fedtsch),前3种仅分布于新疆^[7]。其中,阿尔泰独尾草为典型山地植物,主要分布于伊犁河谷地带和准噶尔盆地西北缘,多生长于山地草原和草甸草原;粗柄独尾草和异翅独尾草为典型的沙生植物,均分布于准噶尔盆地西南部,常见于平原固定沙丘、半固定沙丘和沙地^[8]。新疆3种独尾草均为早春多年生类短命植物,利用早春季相对充足的水分在2个月左右迅速完成生活史,随后地上部分枯萎、而地下部分进入休眠期以躲避炎热夏季^[9]。目前,对于3种独尾草已开展的研究主要体现在解剖学^[10]、繁育生物学^[11]、化学成分分析^[12]等方面。但是,3种独尾草在新疆的生态适宜性如何?适宜的分布范围与空间格局如何?哪些环境因子主要影响了3种植物的适宜分布?以及3种植物对未来气候变化的可能响应,这一系列科学问题都并不清楚,成为限制新疆独尾草资源利用和科学保护的瓶颈。

物种分布模型(SDMs)是评估气候变化对物种分布影响的主要方法,通常用于物种的潜在地理分布研究。常见的物种分布模型主要有最大熵模型(MaxEnt)、广义加性模型、广义线性模型、分类回归树等^[13]。其中,最大熵模型基于熵最大原理,利用不完整的物种分布信息,反映物种潜在分布区与环境因子的关系,并构建其地理尺度上的空间分布模型^[14]。由于机理清晰、建模简单、模拟结果连续、预测效果较好等特点,成为预测物种潜在地理分布的常用模型之一^[15],已被广泛运用于典型荒漠植物的历史分布格局模拟^[16]、外来物种的入侵风险模拟^[17]、种下谱系分组模拟^[18]等研究领域。因此,本研究基于3种独尾草的地理分布信息和环境数据,利用MaxEnt模型结合地理信息系统ArcGIS模拟不同时段3种植物在新疆的适宜分布,利用R程序包、统

计学和空间统计学方法分析不同气候因子对 3 种独尾草适宜分布的影响。旨在解决以下科学目标:(1) 基准气候情景下,3 种独尾草在新疆的适宜分布范围与空间分布特征;(2) 限制独尾草分布的关键环境驱动因子及其适宜的数值范围;(3) 3 种独尾草的适宜分布对未来气候变化的可能响应。

1 研究数据与研究方法

1.1 分布数据和环境数据的来源与处理

本研究通过检索中国数字植物标本馆 (CVH; <http://www.cvh.org.cn/>)、全球生物多样性信息网络 (<https://www.gbif.org/>) 结合已发表文献,共获得 114 个独尾草属的自然分布点,对有经纬度记载的数据直接使用,对仅有位置记录的分布点则通过 BIGMAP 地图下载器和中国地名录确定详细地理坐标,并基于 R 中的 raster 和 biomod2 程序包进一步剔除重复和模糊的分布点,矫正分布点偏差。最终,获得 64 条准确有效的分布记录(阿尔泰独尾草 29 条、粗柄独尾草 18 条、异翅独尾草 17 条)用于模型的模拟,覆盖了 3 种独尾草属植物在新疆的自然分布范围(图 1)。

本研究中,19 个气候变量来源于 IPCC 生物气候数据集 (<http://www.worldclim.org>),选取 2001—2040 年、2041—2080 年 SSP2-4.5 共享社会经济路径联合国政府间气候变化专门委员会(SSPs)下 CMIP6 模型的气候数据。共享社会经济路径是 IPCC 描述未来不同气候政策不同社会发展状况下的排放情景。其中包括

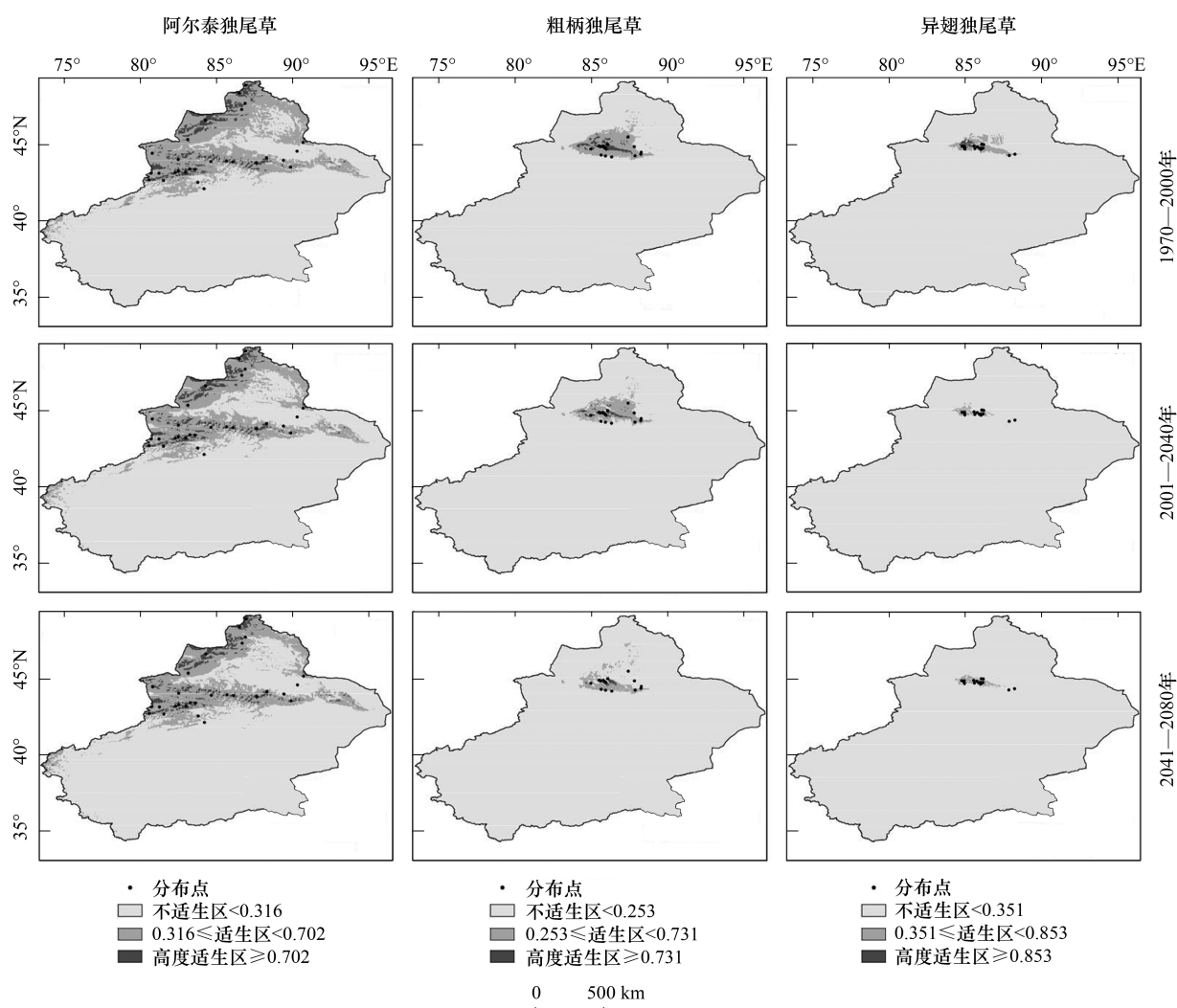


图 1 MaxEnt 模型预测的 3 种独尾草基准、未来气候情景下的适宜分布

Fig.1 Suitable distribution area of the three *Eremurus* under current and future climate predicted by MaxEnt model

SSP1—SSP5 共 5 种不同路径。本研究选择代表温室气体排放中等路径 SSP2-4.5。坡度、坡向数据利用 ArcGIS10.5 空间分析工具从中国科学院地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的数字高程模型 (DEM) 中提取。模型模拟使用的中国省级行政区划底图来源于国家基础地理信息系统网站 (<http://www.ngcc.cn/>)。考虑空间环境变量对物种的限制作用,降低变量的空间纬度避免过拟合现象,运用 R 软件的 Hmisc 程序包对 22 个环境因子进行 Pearson 相关性分析,剔除相关性高(>80%)的变量,最终筛选获得 8 个环境变量(表 1)。

表 1 8 个环境变量及其相关信息

Table 1 Eight environment variables and the relative information

变量缩写 Variable abb.	描述 Description	单位 Unit
Bio2	平均气温日较差 Temperature daily range	℃
Bio4	温度季节性变化标准差 Standard deviation of seasonal variation of temperature	标准差
Bio6	最冷月最低气温 Coldest month lowest temperature	℃
Bio13	最湿月降水量 Wettest monthly precipitation	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	mm
Bio15	降水量季节性变化 Seasonal variation of precipitation	变异系数
Slope	坡度 Slope	(°)
Aspect	坡向 Aspect	(°)

1.2 最大熵模型构建

利用 MaxEnt 模型构建,随机选择 75% 的分布数据作为训练集,剩余 25% 数据作为测试集,用于检验模型的准确性,重复运算 10 次。采用受试者工作特征曲线 (ROC) 下方面积 (AUC) 值对模型模拟的准确性进行评价^[19]。AUC 的取值范围为 0—1, 值为 0.8—0.9, 表示模型模拟精度较高, 为 0.9—1.0, 表示模型模拟精度极高^[20]。为了方便模型模拟结果的可视化表达,参照已发表文献^[21],利用 ArcGIS 空间分析工具计算所有已知分布点在潜在分布图上的适宜性,并计算这些值的标准差 σ 和平均值 μ ,选择 $p = \sigma - \mu$ 作为阈值,区分“适生区”和“不适生区”;选择 $p = \sigma + \mu$ 作为阈值,区分“适生区”和“高度适生区”。

1.3 多元环境相似度面和最不相似变量分析

利用多元环境相似度面和最不相似变量分析基准时段与未来时段研究区的气候变化及其主要变化因子。利用 MaxEnt.jar 文件中的 density.tools.Novel 工具分别计算 2001—2040 年和 2041—2080 年研究区内 6 个气候因子 (2 个地形因子变化太小而忽略不计) 的相似度 (S) 得到多元环境相似度面。当 S 值为正值时, S 值越小表示该区域气候因子的差异越大, S 值为 100.00 时, 表示无差异; 当 S 值为负值时, 表示该区域至少有 1 个气候因子的不相似度超出了参考范围, 该区域的环境差异极大^[22]。同时, 提取相似度最低的气候因子, 得到最不相似变量, 利用 ArcGIS 10.5 进行可视化处理。利用 MaxEnt 模型生成的环境变量贡献率和置换重要值分析各环境因子对模型模拟的贡献以及模型对各环境因子的依赖^[23]。

1.4 8 个环境因子的主成分分析

为了进一步评价 3 种植物分布区的环境变量差异以及造成环境差异的主要驱动因子, 本研究基于 3 种独尾草的 64 个自然分布点和筛选后的 8 个环境变量进行主成分 (PCA) 分析, PCA 分析利用 R4.0.2 的 ggplot2 包完成。

2 研究结果与分析

2.1 3 种独尾草的适宜分布及其对未来气候变化的响应

基准及未来气候情境下, 3 种独尾草模拟的 MaxEnt 模型的平均 AUC 值均大于 0.935, 表明模型模拟结果较准确。沙生植物粗柄独尾草与异翅独尾草适宜分布范围有较大部分的重叠, 阿尔泰独尾草与两种沙生独尾草的分布区具有明显差异 (图 1)。基准气候下, 阿尔泰独尾草的适宜分布占研究区总面积的 19.46%, 集中于

北疆伊犁河谷、天山北麓、阿尔泰山中段和准噶尔西部山地(图 1)。其中,高度适生区为小面积的破碎斑块,集中于准噶尔西部山地、伊犁河谷,占研究区总面积的 2.97%。沙生植物粗柄独尾草与异翅独尾草的适宜分布主要集中于天山北坡古尔班通古特沙漠西南部沙地,适生区面积占比分别为 3.06%、1.16%(表 2)。具体说,粗柄独尾草的适生区,西起准噶尔盆地西端婆罗科努山的山前沙丘,东至天山中段的古尔班通古特沙漠南缘,其中高度适生区主要呈带状分布于天山北坡中段的绿洲-荒漠过渡带,占研究区总面积的 0.60%。异翅独尾草的适生区较小且破碎程度更高,高度适生区呈块状分布于婆罗科努山中段的沙漠南缘,占研究区总面积的 0.19%(图 1,表 2)。

2001—2040 年和 2041—2080 年气候情景下,3 种独尾草植物的适生范围整体均呈缩减趋势(图 1)。2001—2040 年,阿尔泰独尾草以山地适宜分布区边缘及沙漠边缘斑块缩减或消失为主,适宜分布区占比将缩减 9.925%,分布整体呈向天山北麓和准噶尔西部山地缩减趋势;2041—2080 年的适宜分布将进一步破碎化。粗柄独尾草的适生区在 2001—2040 年将缩减 20.984%,主要表现为适宜分布区内部及边缘破碎化;2041—2080 年适生区将向古尔班通古特沙漠南缘显著缩减 58.112%。异翅独尾草的适生区 2001—2040 年将缩减 71.607%,整体向沙漠西端婆罗科努山的山前沙丘北坡缩减,且高度适生区基本消失;2041—2080 年适生面积将略微增加(图 1,表 2)。

表 2 基准、未来气候情景下 3 种独尾草不同等级适生区面积的变化

Table 2 Changes in area of suitable areas of the three <i>Eremurus</i> at different classes under current and future climate conditions				
物种 Species	时间 Time	不适生区面积占比/% Area ratio of unsuitable area	适生区面积占比/% Suitable area	高度适生区面积比/% High suitable area
阿尔泰独尾草 <i>Eremurus altaicus</i>	基准时间(1970—2000 年)	77.57	19.46	2.97
	2040s(2001—2040 年)	79.80	17.46	2.74
	2080s(2041—2080 年)	80.36	16.98	2.66
粗柄独尾草 <i>Eremurus inderiensis</i>	基准时间(1970—2000 年)	96.34	3.06	0.60
	2040s(2001—2040 年)	97.11	2.63	0.26
	2080s(2041—2080 年)	98.47	1.44	0.09
异翅独尾草 <i>Eremurus inderiensis</i>	基准时间(1970—2000 年)	98.65	1.16	0.19
	2040s(2001—2040 年)	99.62	0.38	0
	2080s(2041—2080 年)	99.46	0.54	0

2.2 影响 3 种独尾草适宜分布的环境因子分析

(1) MaxEnt 模型模拟的驱动因子及其累积贡献率

最大熵模拟的环境因子分析表明,极端降水因子主要影响了阿尔泰独尾草的适宜分布,最干月降水量和最湿月降水量的累积贡献率达 74.8%,另外坡向也对该山地植物的分布具有一定影响,贡献率为 10.9%。粗柄独尾草的生态适宜性主要受温度季节性变动指数和最干月降水量的影响,异翅独尾草主要受温度季节性变动指数和坡度的影响,累积贡献率分别为 84.7%、83.5%(表 3)。

表 3 影响 3 种独尾草分布的主要环境变量及其贡献率

Table 3 Main environmental variables affecting the distribution of three <i>Eremurus</i> and their contribution rates					
物种 Species	环境变量 Environmental variables	贡献率/% Contribution	物种 Species	环境变量 Environmental variables	贡献率/% Contribution
阿尔泰独尾草 <i>Eremurus altaicus</i>	最干月降水量	63.3	异翅独尾草 <i>Eremurus inderiensis</i>	温度季节性变动指数	65.6
	最湿月降水量	11.5		坡度	17.9
	坡向	10.9		最干月降水量	8.7
粗柄独尾草 <i>Eremurus inderiensis</i>	温度季节性变动指数	70.9			
	最干月降水量	13.8			
	坡度	7.7			

(2) 研究区未来气候相对基准气候的波动及其主导因子

多元环境相似度面预测结果表明,2001—2040 年和 2041—2080 年,研究区大部分区域将发生明显的气候波动(图 2)。2001—2040 年,研究区内气候因子相似度低于 20 的区域占比为 84.03%,相比于基准气候,伊犁河谷、准噶尔盆地南部、塔里木盆地西南部和吐鲁番盆地等均表现出强烈的气候波动(图 2)。阿尔泰独尾草、粗柄独尾草和异翅独尾草在基准气候下的绝大部分适宜分布区均将发生明显的气候波动,适生区内气候因子的平均相似度分别为 10.00、1.23、0.77(图 2)。2041—2080 年研究区的气候波动与 2001—2040 年较相似,但波动范围和程度略微增加,气候因子相似度低于 20 的区域占比达 87.41%,3 种植物适生区内气候因子的平均相似度分别为 2.87、5.75、6.00(图 2)。最不相似变量显示,2001—2040 年最冷月最低温(Bio6)、降水量季节性变化(Bio15)、平均日较差(Bio2)、温度季节性变动指数(Bio4)均将发生显著变化,是造成研究区内 81.91%的区域发生气候波动的主要因子(图 2)。最干月降水量、降水量的季节性和最湿月降水量,也是影响阿尔泰独尾草 62.07%的分布点发生气候变化的主导因子。温度季节性变动指数是影响粗柄独尾 83.33%和异翅独尾草 88.24%的分布点气候发生变化的主要因子(图 2)。

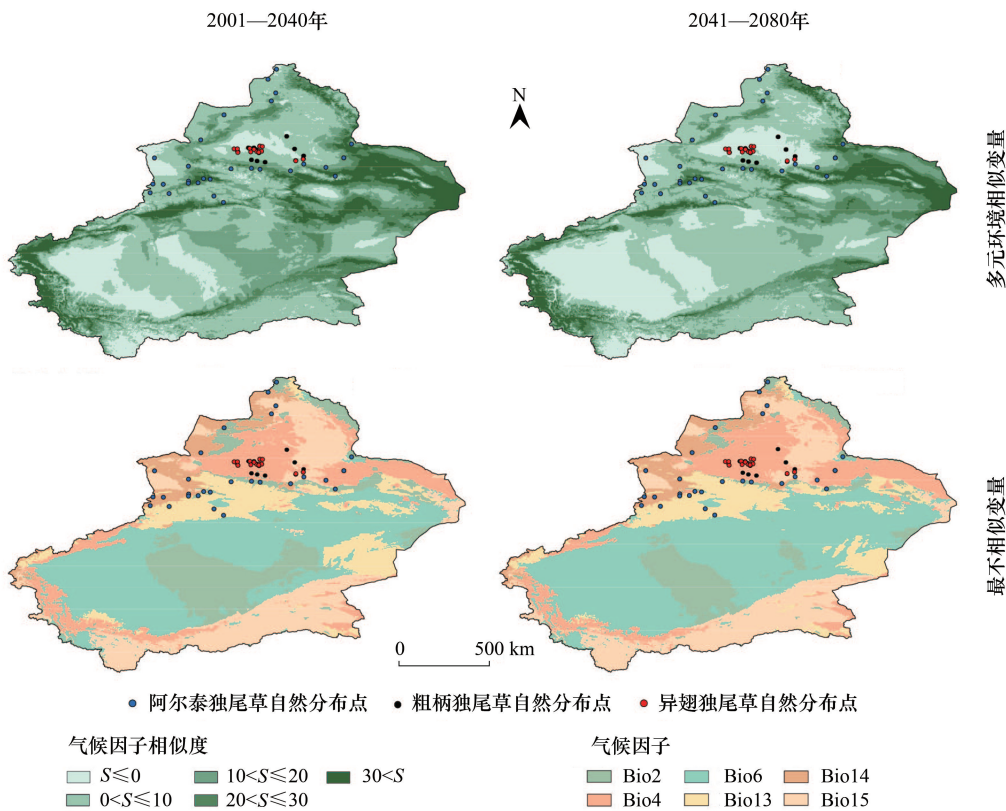


图 2 2001—2040 年、2041—2080 年气候情景下影响 3 种独尾草分布的 6 个驱动因子的多元环境相似度面和最不相似变量

Fig.2 Analysis on multivariate environmental similarity surface and most dissimilar variable of the study area of six driver factors in 2001—2040 and 2041—2080 climate

Bio2:平均气温日较差;Bio4:温度季节性变动指数;Bio6:最冷月最低温;Bio13:最湿月降水量;Bio14:最干月降水量;Bio15:降水量季节性变化

2.3 3 种独尾草的环境生态位差异及其驱动因子分析

PCA 分析结果显示,基准气候下,3 种独尾草植物各适生区内 8 个环境驱动因子的数值范围存在明显差异,尤其是山地独尾草和沙生独尾草显著分化为两组(图 3)。最干月降水量(Bio14)、温度季节性变动指数(Bio4)、最湿月降水量(Bio13)和降水量季节性变化(Bio15)主要导致了 3 种植物环境生态位的显著差异(图 3)。

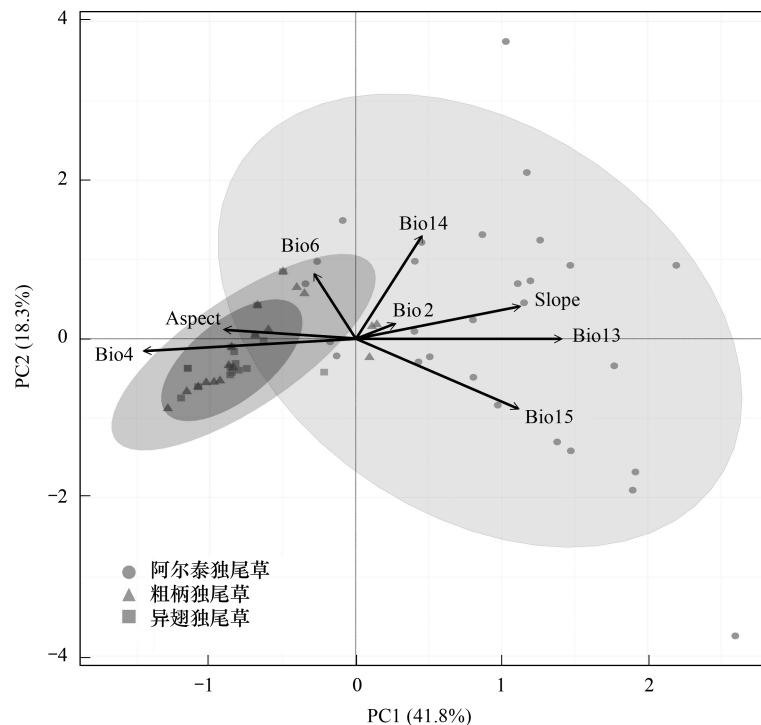


图3 影响3种独尾草分布的8个环境因子的PCA分析

Fig.3 PCA analysis of eight climatic and environmental factors of three *Eremurus*

3 结论与讨论

3.1 3种独尾草的适宜分布及其环境驱动机制

基准与未来时段,本研究模型模拟的阿尔泰独尾草和两种沙生独尾草的分布范围均存在明显差异(图1),阿尔泰独尾草的适宜分布集中于天山北麓的山地草甸,两种沙生独尾草主要分布于古尔班通古特沙漠南缘,这与文献记载一致^[24]。而且,根据本研究,阿尔泰独尾草与两种沙生独尾草的环境生态位存在较显著的差异(图3)。基准气候下,除在新疆天山和阿尔泰山的适宜分布外^[10-11],模型还识别出阿尔泰独尾草在伊犁河谷和准噶尔西部山地具有高度适宜性(图1),相关研究也表明早春类短命植物从最北部的阿尔泰山到最南部的伊犁河谷均有分布^[25],这些区域均属新疆重要的水源涵养区,常年植被茂盛,适合山地植物、短命植物等生长^[26]。两种沙生植物粗柄独尾草和异翅独尾草的适宜分布有较大范围的重叠,主要集中于准噶尔盆地西南部沙区婆罗科努山的山前沙丘(图1)。准噶尔盆地西南部荒漠拥有丰富的热量资源、相对均匀的降水条件,能够为沙生植物提供较适宜的生长环境,梭梭(*H. ammodendron*)^[27]和白梭梭(*H. persicum*)^[28]等荒漠植物物种均在该区域具有较适宜的分布。两种沙生类短命植物长期适应沙漠恶劣生存环境,进化出了一系列生活史对策,如:花期仅重叠1—2天、阴雨天显著延长散粉期、花药雨天不开裂且已裂花药因复水作用闭合^[8,29]。两种沙生独尾草的适宜分布范围相比,粗柄独尾草适生区较大且集中,这可能是因为粗柄独尾草在破碎化生境中形成了较好的局部环境适应性,其种子变轻、种翅增大,以增强种子的散布能力从而在不利生境中扩大其生存范围^[30]。

新疆3种独尾草适宜分布区内的降水和温度均存在显著差异,阿尔泰独尾草受降水因素影响较大;而两种沙生独尾草则受气温因素影响较大(图2,图3)。其中,最干月降水量(Bio14)主要影响了阿尔泰独尾草的分布基准气候下该植物适生区内最干月降水的适宜范围是1—25mm,2001—2040年和2041—2080年的降水范围将略有增加。适宜的降水区间是植物对外界环境变化的缓冲应对,过多降水可能超出植物降水需求量的

缓冲区间,降低植物生长的适宜性,从而将造成分布范围缩减。未来时段,阿尔泰独尾草适宜分布区减少的区域,如天山北麓和准噶尔盆地西部山地等,最干月降水量(Bio14)均有所增加,说明该因子的波动对其适宜分布具有主导性的限制(图2)。温度季节性变动指数(Bio4)主要影响了两种沙生独尾草的分布,基准气候下该因子的平均适宜范围为1150—1672,2001—2040年和2041—2080年分别为1490—1712和1524—1751。两种沙生类短命植物应对夏季高温,存在夏眠,未来气候情景下温度变动区间升高将导致两种植物适宜的生境缩减。相关研究也表明古尔班通古特沙漠短命植物的种子发芽受温度和光线的强调节作用^[31]。因而,荒漠夏季酷热、冬季严寒的温度波动对两种沙生独尾草的生长、分布存在较大限制。2001—2040年和2041—2080年古特沙漠南缘的温度季节性变动指数(Bio14)显著增加(图2),两种独尾草的适宜分布也在这些区域呈破碎化减少趋势,尤其是异翅独尾草的高度适宜分布区将基本消失(图1)。温度季节性变动指数(Bio4)和最干月降水量(Bio14)也在一定程度上主导了山地植物阿尔泰独尾草与两种沙生独尾草环境生态位的分化(图3)。此外,本研究选取的地形因子坡度和坡向对新疆3种独尾草的适宜分布也有一定影响(表3)。阿尔泰独尾草多分布于天山北麓的阳坡(生长于南坡),常伴随天山云杉(生长于北坡)^[11];异翅独尾草生态适应幅较宽不仅可与粗柄独尾草同生长于沙丘北坡或坡底丘间平地,也可生于坡顶^[24]。

3.2 3种独尾草的适宜分布对未来气候变化的可能响应

气候变化将引起气温和降水量空间分布格局的改变,若超过了植物生态幅可能会使植物适生区面积减少^[32]。例如,极端降水可能导致植物种子储存在土壤中或已经死亡^[33],过量光热会对植株产生光破坏或光抑制,进而限制植物的生长^[34]。在全球气候变化背景下,降水的波动变化和极端干旱事件也将对沙漠植被,特别是对短命草本种群产生较大的影响^[35]。

未来气候变化情景下,3种独尾草的适宜分布面积均呈缩减趋势,阿尔泰独尾草为经度方向上的缩减,两种沙生独尾草为纬度方向上的缩减(图1)。2001—2040年和2041—2080年相比,气候变动较相似,均以准噶尔西部山地降水量增加、古尔班通古特沙漠南部温度变动加剧为主(图2)。以2001—2040年分析,阿尔泰独尾草62.07%的分布点发生气候波动,将造成适生区主要向天山北麓和准噶尔西部山地缩减;粗柄独尾草83.33%的分布点发生气候波动,将造成适生区向古尔班通古特沙漠南缘缩减;异翅独尾草88.24%的分布点发生气候波动,将造成适生区整体向沙漠南缘西端婆罗科努山的山前沙丘北坡缩减(图1)。相关研究也表明其它山地、荒漠植物未来气候变化情景下也呈现分布范围缩减趋势,如山地植物天山花楸在西北地区的适宜分布将向高海拔地区缩减^[36];荒漠植物裸果木在我国西北荒漠区的适宜分布范围和最适宜分布区都将明显减少^[37]。本研究3种植物适生分布区的变化与水温条件的变化紧密相关:2001—2040年和2041—2080年,研究区气候波动较大的区域,如准噶尔盆地中南部,将造成山地植物阿尔泰独尾草在古尔班通古特沙漠边缘的斑块适宜分布区消失,阿尔泰山中段区域边缘也呈现破碎化,而天山北麓、准噶尔西部山地未来时段气候波动较小,为该植物提供了较稳定、较集中的适宜生境,可作为资源管理和保护的重点区域(图1);古尔班通古特沙漠南缘,婆罗科努山中段区域,为沙生植物粗柄独尾草和异翅独尾草植物提供了连续、稳定的适宜生境(图1,图2)。

本研究模拟的新疆3种独尾草植物是新疆山地、荒漠区域的生态平衡与修复的先锋物种,3种植物分布的生态适宜性变化及其环境驱动机制研究具有重要的理论与现实意义。根据本研究,未来气候情境下,由于研究区气候波动,新疆3种独尾草的适宜分布总体均将呈缩减趋势,以适生区边缘及沙漠边缘斑块破碎化或消失为主,本研究的结果可为国内仅在新疆分布的3种独尾草植物资源的科学保护提供科学数据。

参考文献(References):

- [1] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [2] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [3] 陈丝露. 柏木低效林不同改造模式植物多样性及优势种生态位研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.

- [4] 钟燕, 余岩, 谢登峰, 谢川, 何兴金. 梭沙韭和昌都韭的遗传变异和生态位分化. 生态学杂志, 2018, 37(4): 994-1002.
- [5] 刘彩艳, 李大卫, 杨石建, 潘志立, 金若涵, 陈芳, 郭雯. 不同倍性猕猴桃的适生区预测及生态位分化. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3167-3176.
- [6] 段国珍. 沙地云杉及其近缘种的生态位分化与群体遗传学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [7] 王恒, 张丽, 朱瑞罡, 田丽萍, 谭勇. 新疆3种独尾草总蒽醌和芦荟大黄素含量的比较. 中国医院药学杂志, 2016, 36(6): 437-440.
- [8] 陆婷. 独尾草属两个同域种的繁殖对策[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
- [9] 王爱霞, 马婧婧, 龚会蝶, 范国安, 王茂, 赵红梅, 程军回. 北疆一年生早春短命植物物种丰富度分布格局及其影响因素. 生物多样性, 2021, 29(6): 735-745.
- [10] 田丽丽, 马森. 类短命植物阿尔泰独尾草的解剖学研究. 植物研究, 2013, 33(2): 134-138.
- [11] 范俊峰. 基于种群尺度三种独尾草属植物繁育系统的比较[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- [12] Smirnova N I, Mestechkina N M, Shcherbukhin V D. Localization of acetyl groups in macromolecules of glucomannan from *Eremurus zangezuricus* roots. *Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiia*, 2002, 38(5): 548-551.
- [13] 胡彪. 基于 MaxEnt 的气候变化对无翼坡垒潜在生境影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [14] Banavar J R, Maritan M A, Volkov Igor. Applications of the principle of maximum entropy: from physics to ecology. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, 22(6): 063101.
- [15] 马松梅, 聂迎彬, 段霞, 余存生, 王荣学. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性. 生态学报, 2015, 35(9): 2960-2966.
- [16] 张丹, 马松梅, 魏博, 王春成, 张林, 闫涵. 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制. 生物多样性, 2022, 30(1): 21192 1-10.
- [17] 马倩倩, 刘彤, 董合干, 王寒月, 赵文轩, 王瑞丽, 刘延, 陈乐. 气候变化下三裂叶豚草在新疆的潜在地理分布. 草业学报, 2020, 29(12): 73-85.
- [18] 孙芳芳, 聂迎彬, 马松梅, 魏博, 吉万全. 基于 ITS 和 cpDNA 序列的梭梭和白梭梭物种分化. 林业科学, 2019, 55(3): 43-53.
- [19] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 李同艳, 余岚. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9033-9043.
- [20] 王华辰, 朱弘, 李涌福, 伊贤贵, 李蒙, 南程慧, 王贤荣. 中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(2): 136-144.
- [21] 魏博, 马松梅, 宋佳, 贺凌云, 李晓辰. 新疆贝母潜在分布区域及生态适宜性预测. 生态学报, 2019, 39(1): 228-234.
- [22] 张兴旺, 李垚, 谢艳萍, 包先明, 方炎明. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 31-41.
- [23] 李宁宁, 张爱平, 张林, 王克清, 罗红燕, 潘开文. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测. 植物研究, 2019, 39(3): 395-406.
- [24] 陈蓓雷. 新疆三种独尾草属植物光合特性的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- [25] 毛祖美, 张佃民. 新疆北部早春短命植物区系纲要. 干旱区研究, 1994, (3): 1-26.
- [26] 夏鑫鑫, 朱磊, 杨爱民, 靳含, 张青青. 基于山地-绿洲-荒漠系统的生态系统服务正负价值测算——以新疆玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(12): 3921-3934.
- [27] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. 生态学杂志, 2017, 36(05): 1243-1250.
- [28] 田起隆, 刘彤. 极端干旱环境下白梭梭细根分布与土壤水分关系. 石河子大学学报: 自然科学版, 2020, 38(1): 75-82.
- [29] Venable D L, Brown J S. The selective interactions of dispersal, dormancy, and seed size as adaptations for reducing risk in variable environments. *The American Naturalist*, 1988, 131(3): 360-384.
- [30] 安静, 刘鸯, 王海娟, 王丹丹, 张霞, 吴玲. 破碎化生境中粗柄独尾草种群大小对繁殖特性的影响. 生态学报, 2018, 38(6): 2074-2081.
- [31] Chen Y F, Cao Q M, Li D X, Liu H L, Zhang D Y. Effects of temperature and light on seed germination of ephemeral plants in the Gurbantunggut Desert, China: implications for vegetation restoration. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(6): 916-927.
- [32] Wang T, Zhang Q B, Ma K P. Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 15(4): 406-415.
- [33] Chen Y F, Zhang H, Zhang L W, Zhang L, Cao Q M, Liu H L, Zhang D Y. Is plant life-history of biseasonal germination consistent in response to extreme precipitation?. *Plants*, 2021, 10(8): 1642.
- [34] Adams W W, Demmig-Adams B. Operation of the xanthophyll cycle in higher plants in response to diurnal changes in incident sunlight. *Planta*, 1992, 186(3): 390-398.
- [35] Mu X H, Huang G, Li Y, Zheng X J, Xu G Q, Wu X, Wang Y G, Liu Y. Population dynamics and life history response to precipitation changes for a desert ephemeral plant with biseasonal germination. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 625475.
- [36] 张丹, 刘凯军, 马松梅, 魏博, 王春成, 闫涵. 高山植物天山花楸的适宜分布及其环境驱动因子研究. 生态学报, 2022, (2): 1-10 (2021-09-10) [2021-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210909.1610.012.html>.
- [37] 魏博, 孙芳芳, 马新, 黄婷婷, 马松梅. 荒漠濒危植物裸果木适宜分布区对未来气候变化情景的可能响应. 石河子大学学报: 自然科学版, 2019, 37(4): 490-497.