### DOI: 10.20103/j.stxb.202209012487

董苏君,马松梅,张丹,张云玲,陈雨婷,马佳正.新疆猪毛菜属植物多样性地理分布格局及其环境解释.生态学报,2023,43(19):8025-8034. Dong S J, Ma S M, Zhang D, Zhang Y L, Chen Y T, Ma J Z. Geography distribution pattern and the environmental interpretation of plant species of *Salsola* genus in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19):8025-8034.

# 新疆猪毛菜属植物多样性地理分布格局及其环境解释

董苏君1,马松梅2,\*,张 丹1,张云玲3,陈雨婷2,马佳正2

- 1 石河子大学生命科学学院, 兵团绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室, 石河子 832000
- 2 石河子大学理学院, 兵团绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室, 干旱区景观生态重点实验室, 石河子 832000
- 3 新疆维吾尔自治区草原总站,乌鲁木齐 830049

摘要: 猪毛菜属(Salsola) 是新疆干旱区分布最为丰富的被子植物属之一,是盐碱和荒漠区的先锋种和建群种,对西北干旱区植被恢复与建设具有巨大生态价值。基于新疆自然分布的 33 种猪毛菜属物种共 741 个分布数据,整合利用点格局法和物种分布模型法构建了物种丰富度(SR)、加权特有性指数(WE)和校正加权特有性指数(CWE)的分布格局。选取环境能量、水分可获得性、气候季节性、生境异质性、土壤条件和历史气候变化共 6 类 19 种生态因子,利用地理加权回归模型(GWR)探究了环境异质性对猪毛菜属物种丰富度的影响。结果显示:(1)基于现实点位模型和物种分布模型构建的物种丰富度具有一致性,均呈北高南低、西高东低的破碎化分布趋势,但物种分布模型的结果在空间上比点格局法更连续,物种丰富度的高值区主要分布于准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地、天山西端和天山南脉南缘;(2)加权特有性指数和校正加权特有性指数的分布格局与物种丰富度分布格局具有一定差异,其最大值集中分布于准噶尔盆地南缘、伊犁河谷和塔里木盆地西南缘;(3)GWR模型结果表明,海拔变幅、土壤酸碱度和最干月降水量是制约新疆分布的猪毛菜属丰富度和特有性分布的最重要因素。

关键词:猪毛菜属;物种丰富度;加权特有性;地理加权回归模型;环境异质性

# Geography distribution pattern and the environmental interpretation of plant species of *Salsola* genus in Xinjiang

DONG Sujun<sup>1</sup>, MA Songmei<sup>2,\*</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, ZHANG Yunling<sup>3</sup>, CHEN Yuting<sup>2</sup>, MA Jiazheng<sup>2</sup>

- 1 College of Life Sciences, Shihezi University, Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, Shihezi 832000, China
- 2 College of Science, Shihezi University, Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, Key Laboratory of Landscape Ecology in Arid Region, Shihezi 832000, China
- ${\it 3~General~Grassland~Station~of~Xinjiang~, Urumqi~830049~,~China}$

Abstract: Salsola is one of the most abundant angiosperm genera in the arid area of Xinjiang. Most species of Salsola are pioneer species and constructive species in saline-alkali and desert areas, and have great ecological values for vegetation construction and restoration in the arid area of Northwest China. In this study, we integrated the point grid method and species distribution model to construct the distribution patterns of species richness (SR), weighted endemism (WE), and corrected weighted endemism (CWE) based on 741 occurrence points of 33 species of Salsola in Xinjiang. By selecting 19 ecological factors including 6 types of environmental energy, water resource availability, climate seasonality, habitat heterogeneity, soil conditions and historical climate change, we explored the effects of heterogeneity of environment on Salsola genus species richness based on a geographically weighted regression (GWR) model. The results show that: (1)

基金项目:新疆维吾尔自治区林业和草原局自治区林业发展补助资金(XJLYKH-2022-07);新疆维吾尔自治区草原总站草原生态修复治理补助项目(XJLYKJ-2022-07);国家自然科学(41561007)

收稿日期:2022-09-01; 网络出版日期:2023-05-16

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shzmsm@ 126.com

the species richness constructed based on the actual points and species distribution models are consistent, showing a fragmented distribution trend of high in the north and low in the south, and high in the west and low in the east, but the modeled results are more continuous than the results of point pattern method. The high-value areas of species richness are mainly distributed in the southern margin of the Junggar Basin, the Junggar Xibu Shandi, the western end of the Tianshan Mountains, the southern edge of the Tianshan Mountains southern vein, and the southern margin of the Tarim Basin; (2) the distribution pattern of the weighted endemism index and the corrected weighted endemism index are differs from the distribution pattern of richness. The maximum value is concentrated in the southern margin of the Junggar Basin, the Ili River Valley and the southwestern margin of the Tarim Basin; (3) The results of the GWR model show that the altitude variation, soil pH and the driest month precipitation are the constraints of Salsola genus in Xinjiang.

**Key Words**: Salsola; species richness; weighted endemism; geographically weighted regression model; environmental heterogeneity

物种多样性是生物多样性的本质内容[1],物种多样性格局是物种进化、生境差异、环境因子选择等多个 生态过程的适应产物[2]。物种多样性空间分布格局,通常以所有种、特有种、稀有种和濒危种的丰富度呈 现[3]。其中,物种丰富度(species richness, SR)为基本测定指标,可以综合反映物种的生态适宜性、扩散能力 及进化史[4]。物种特有性格局是指植物物种特有现象的分布格局,主要基于加权特有性指数(weighted endemism, WE)和校正加权特有性指数(corrected weighted endemism, CWE)来进行体现。其中,加权特有性 指数,在物种丰富度的基础上结合了物种的空间分布范围,物种的分布区越狭窄,被赋予的权重越高[5];校正 加权特有性是加权特有性指数与物种丰富度的比值,可排除物种多样性自身的影响,有助于显示狭域、特有物 种地理分布的集中程度,体现某一地区物种的特有性[6]。物种特有性格局是对物种丰富度格局的进一步校 正与补充,二者整合研究可以较好地揭示某一物种的多样性分布格局。目前,基于物种丰富度和物种特有性 的概念衍生的指标,如物种加权特有性、矫正加权特有性指标已经被用于越来越多的生物多样性的空间研究 中。相关研究探索了生物多样性的一系列全球空间变化模式,确定了世界上25个生物多样性热点区[7]:基于 巴西植物当前与未来的空间格局变化,确定了优先采集区域[8];对西北荒漠区植物物种丰富度分布格局展开 研究,确定了该区植物物种丰富度分布格局及其驱动因子[9]。此外,相关研究也表示环境异质性或生态位的 分化常作为物种多样性格局形成的主要原因[10]。另有研究者将物种多样性形成机制的众多假说归总为环境 因子类与生物因子类,其中环境因子类为首要类别[11]。上述基于物种丰富度和物种特有性格局的研究为生 物类群进化历史的系统认知及生物多样性保护策略的制定提供了科学指导。

在中国,藜科猪毛菜属共 37 种 1 变种,新疆是藜科植物物种的分布中心,包含的猪毛菜属物种数高达 33 种,占全国猪毛菜属的 92%,主要分布于戈壁荒漠和沙漠,大多为旱生或旱中生的盐生植物<sup>[12]</sup>。同时,猪毛菜属是藜科最大的植物属之一,也是亚洲和非洲荒漠区最具有代表性的类群之一。作为新疆荒漠区植被的重要组成部分,猪毛菜属中大多数物种具有较强的抗旱耐盐的适应能力,大部分物种为荒漠植被的建群种与优势种<sup>[13]</sup>,在新疆荒漠植被恢复和荒漠生态系统平衡中发挥着重要的生态作用<sup>[14]</sup>。猪毛菜属物种的系统发生和地理分布的相关资料,对于论证亚非荒漠植物区系的起源、发生和发展及我国荒漠植物区系的形成和演化也是不可缺少的佐证之一<sup>[15]</sup>。但目前,新疆分布的猪毛菜属物种多样性格局并不明确(本文指物种的丰富度格局、物种的特有性格局),这在很大程度上限制了对猪毛菜属物种的分布、分化和演化的系统认知。

本研究以新疆分布的猪毛菜属物种为研究对象,基于现实点位模型和物种分布模型构建该属物种的多样性分布格局,利用地理加权回归模型探究猪毛菜属物种多样性格局形成的环境机制,旨在解决以下科学目标: (1)新疆分布的猪毛菜属的物种丰富度格局;(2)新疆分布的猪毛菜属的物种特有性分布格局;(3)新疆分布的猪毛菜属物种多样性分布格局相应的环境解释。

### 1 研究数据与研究方法

# 1.1 物种分布点位信息

通过检索中国数字植物标本馆(CVH; http://www.cvh.org.cn/)、中国国家标本资源平台(NSII; http://www.nsii.org.cn/)、全球生物多样性信息网络(GBIF; https://www.gbif.org/)、中国植物智平台(iPlant; http://www.iplant.cn/)以及相关文献资料,收集新疆分布的猪毛菜属物种的地理分布数据。通过 Google Earth 确定详细地理坐标,矫正分布点偏差。基于 R 软件 raster 程序包进一步剔除距离过近和重复的分布点,最终获得新疆分布的猪毛菜属植物 33 种,共计 741 条有效分布记录。

# 1.2 环境数据来源与处理

本研究利用环境能量、水分可获得性、生境异质性、气候季节性等 7 类共 25 个研究变量 (表 1),探究猪毛菜属物种多样性分布格局及其环境驱动因子。研究变量来源于 IPCC 生物气候数据集 Worldclim 库 (http://www.worldclim.org),CGIAR 空间信息联盟 (CGIAR-CSI) (https://cgiarcsi.community/)、地球环境 (EarthEnv) (http://www.earthenv.org/texture)、社会经济数据和应用中心 (SEDAC) (http://sedac.ciesin.columbia.edu/wildareas/)、全球网格化土壤信息 (SoilGrids) (https://soilgrids.org/)。环境数据和物种分布数据的空间分辨率,统一重采样为  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。为降低变量间的空间维度,运用 R 软件 Hmisc 程序包 cor 函数对 25 个研究变量 变量进行 Pearson 相关性分析,剔除相关性高 (>80%)的变量 [16],最终保留 6 类共 19 个研究变量 (表  $1 \text{ 中} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  等  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 

表 1 本研究选取的 17 类共 25 个研究变量

因子类别	描述	空间分辨率	
Category of factors	Description	Spatial resolution	
环境能量因子	年平均气温	30arc-second	
Environmental energy factor	最暖月最高温	30arc-second	
	最冷月最低气温* 30arc-second		
	潜在蒸散量	30arc-second	
水分可获得性因子	年平均降水量	30arc-second	
Water availability factor	最湿月降水量*	30arc-second	
	最干月降水量**	30arc-second	
	干旱指数*	30arc-second	
生境异质性因子	实际蒸散能*	30arc-second	
Habitat heterogeneity factor	海拔变幅**	30arc-second	
	增强型植被指数变异系数**	2.5arc-minute	
	增强型植被指数均一性**	2.5arc-minute	
	增强型植被指数幅度*	2.5arc-minute	
	增强型植被指数标准误差*	2.5arc-minute	
	增强型植被指数多样性指数*	2.5arc-minute	
气候季节性因子	温度季节性变化标准差*	30arc-second	
Climatic seasonality factor	温度年较差	30arc-second	
	降雨量季节性变异系数*	30arc-second	
人类活动因子	人类足迹指数**	30arc-second	
Human activity factor	人类影响因子	30arc-second	
土壤因子	土壤酸碱度**	30arc-second	
Edaphic factor	阳离子交换量**	30arc-second	
	土壤有机碳含量**	30arc-second	
历史气候因子	历史温度变化**	30arc-second	
Historical climatic factor	历史降雨变化*	30arc-second	

<sup>\*</sup>和\*\*表示 R 软件对 25 个研究变量进行 Pearson 相关性分析,筛选出 19 个变量作为环境变量; \*\*表示 Aregis 软件对 19 个变量进行空间 自相关分析,筛选出 9 个变量用于地理加权回归模型模拟

# 1.3 基于现实点位估算物种丰富度和特有性指数

利用猪毛菜属物种分布的点位计算物种丰富度(SR)、加权特有性指数(WE)和校正加权特有性指数(CWE)。SR 是每个分析单元内出现的物种数总和,WE 和 CWE 都是对一个地区物种特有性的测度。根据分布区的大小,赋予物种不同的权重大小(每一物种分布面积的倒数),计算每个栅格内不同物种的权重加和,即为该栅格的 WE。如,1 个物种仅分布于 1 个栅格单元内,则该栅格权重得分为 1,其余为 0;若 1 个物种仅分布于 2 个栅格内,则每个分布栅格权重得分 0.5,其余为零。CWE 是 WE 与 SR 的比值,在 WE 的基础上排除了物种多样性本身对特有现象分布的影响<sup>[3]</sup>。利用 AreGIS 10.5SDM Toolbox v2.2c 工具计算多样性指标,并进行可视化。

# 1.4 基于物种分布模型估算物种丰富度和特有性指数

利用 R3.5.3 的 sdm 包基于筛选的 19 个研究变量(表 1 中标注 \* 、\*\*)构建猪毛菜属的物种分布模型。为降低预测结果的不确定性,本研究采用集合模型(Ensemble)构建猪毛菜属物种分布格局,包括最大熵模型(MaxEnt)、广义加性模型(GAM)、广义线性模型(GLM)和随机森林模型(RF)。模型参数设置:25%的分布点作为随机测试组,75%作为训练组用于模型构建;参考相关研究采用 TSS 和 AUC 统计量对模型性能进行评估,值越大则拟合效果越优<sup>[3]</sup>(TSS:0.6—0.8,良好;0.8—1.0,优秀;AUC:0.7—0.8,一般;0.8—0.9,良好;0.9—1.0,优秀)。为量化物种丰富度和特有性指数等指标,本研究将连续型的物种适生区转为二进制,转化阈值是依据物种分布模型 TSS 最大化原则。利用 SDM Toolboox v2.2c 计算猪毛菜属植物的 SR、WE 和 CWE。

# 1.5 猪毛菜属物种丰富度与环境变量的空间异质性分析

空间自相关分析是空间回归分析的前提,用于检验某种地理要素属性值在空间上是否存在聚集现象<sup>[17]</sup>。本研究基于 Morans' I 指数与 Z 值大小判断猪毛菜属植物种丰富度的空间自相关性。利用方差膨胀因子(variance inflation factor,VIF)对 19 个自变量进行相关性分析,基于 VIF>5 剔除一个或多个因子的标准,最终保留 9 个因子用于地理加权回归模型模拟(见表 1 中\*\*变量)。Morans' I 值域为[-1,1],I>0,表示空间正相关;I<0,表示空间负相关;I=0,说明物种丰富度不存在空间相关性,呈随机分布,越接近+1(或-1),正(或负)空间相关性越高,且 Z 值分别大于 1.65、1.96 和 2.58,说明该研究在 0.1、0.05、0.01 显著水平下具有统计意义<sup>[17]</sup>。

# 2 研究结果与分析

#### 2.1 不同模型的模拟结果评价

对比分析 4 种单一模型(广义加性模型: GAM; 广义线性模型: GLM; 最大熵模型: MAXENT; 随机森林: RF) 和集合模型(Ensemble)的评估值,各模型的模拟精度差异较小,但集合模型的模拟精度相比 4 种单一模型均有所提升(图 1)。其中,集合模型的 AUC、TSS 中位数值均高于 0.9,模型评价优秀; RF 和 MAXENT 模型均大于 0.85,模型评价优秀; GAM 模型大于 0.8,模型精度良好; GLM 模型高于 0.75,模拟精度相对较低。

# 2.2 猪毛菜属的物种丰富度和特有性分布格局

基于现实点位模型和物种分布模型模拟的猪毛菜属物种丰富度格局具有较高的相似性:均呈北高南低、西高东低趋势(图2)。其中,物种丰富度的高值区主要集中于准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地、天山西端、天山南脉南缘、塔里木盆地西南缘;而塔里木盆地、吐鲁番

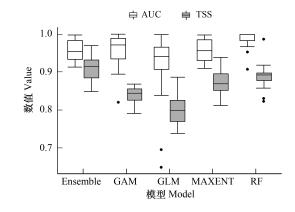


图 1 猪毛菜属不同物种分布模型的 AUC 和 TSS 值

Fig.1 AUC and TSS values of different species distribution models of Salsola

Ensemble:集合模型; GAM:广义加性模型; GLM:广义线性模型; MAXENT:最大熵模型; RF:随机森林; AUC (Area Under the Curve); AUC 值; TSS (True Skill Statistics); TSS 值

盆地的物种丰富度最低。准噶尔盆地南缘为物种丰富度的高度聚集区,具体包括、乌苏、奎屯、克拉玛依、沙湾、石河子、玛纳斯、呼图壁、昌吉、米泉、阜康、吉木萨尔、奇台等地。

加权特有性(WE)和校正加权特有(CWE)的分布格局与物种丰富度格局在总体上具有较高相似性,但高值聚集点的位置不同,特有性格局高度集中区域的分布范围更广(图 2)。加权特有性格局相比物种丰富度格局:在伊犁河谷具有新增的高值聚集点,且在塔里木盆地东南缘也出现较高聚集(图 2)。相比于物种丰富度,校正加权特有性格局的高度聚集点显著向西偏移:在伊宁县、于田县出现新增聚集点;在阿尔泰山南缘福海县、青河县、吐鲁番市、天山南脉博湖县、巴楚县、塔里木盆地东南缘若羌县也有较高特有性指数(图 2)。此外,两种特有性格局在天山南脉中段、塔里木盆地东南缘出现零星分布的热点区。

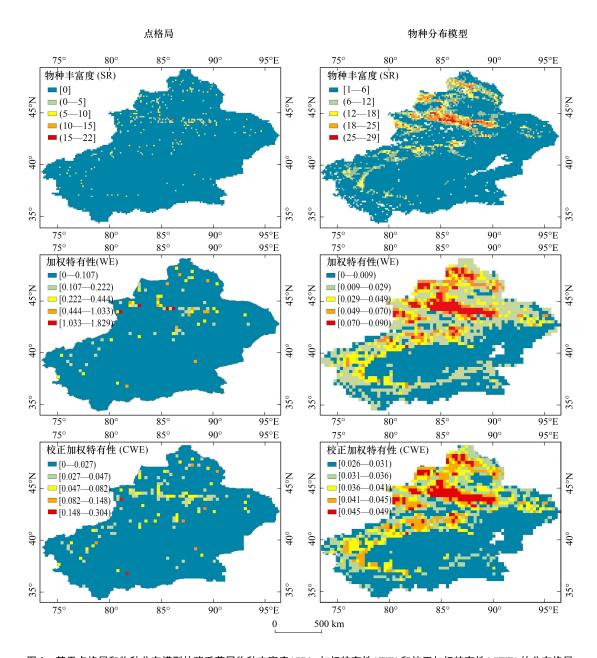


图 2 基于点格局和物种分布模型的猪毛菜属物种丰富度(SR)、加权特有性(WE)和校正加权特有性(CWE)的分布格局 Fig.2 Distribution patterns of species richness (SR), weighted endemism (WE), and corrected weighted endemism (CWE) of the genus

Salsola based on point pattern and species distribution model

# 2.3 猪毛菜属物种丰富度格局与环境因子的空间异质性关系

全局空间自相关分析的结果表明:点格局分析的 Moran's I 指数为 0.90, Z 值为 96.02 (P<0.01);物种分布模型的 Moran's I 指数为 0.79, Z 值为 141.46 (P<0.01)。Z 值均超过阈值,位于 99% 的置信区间内,且其它环境变量的自相关指数均大于 0(表 2),表明新疆分布的猪毛菜属其物种丰富度在空间上并非随机分布,呈显著的空间聚集,因而可构建地理加权回归模型。

表 2 基于点格局、各环境因子 GWR 回归参数的空间自相关指数 Moran's I 与 Z 值

Table 2 Moran's I and Z scores of regression coefficients for each factor in GWR model

因子	点格局 Point pattern		物种分布模型 Species distribution model	
Factor	Moran's I	Z	Moran's I	Z
温度季节性变化标准差 Temperature seasonality	0.828176	34.87383	0.945566	168.769096
最冷月最低温 Min temperature of coldest month	0.751113	31.66149	0.891946	159.200803
最湿月降雨量 Min temperature of coldest month	0.515383	21.80475	0.903782	161.327695
最干月降雨量 Precipitation of driest month	0.707758	29.85726	1.000969	170.879006
降水季节性变动系数 Precipitation seasonality	0.774591	32.66418	0.97122	173.345501
干旱指数 Drought index	0.350834	14.99303	0.775297	138.491659
实际蒸散量 Actual evapotranspiration energy	0.436649	18.495	0.897622	160.212653
人类足迹指数 Human Footprint Index	0.750027	31.61159	0.801575	143.079854
增强型植被指数多样性指数 Enhanced vegetation index diversity index	0.716609	30.19905	0.78793	140.632974
增强型植被指数变异系数 Coefficient of variation of enhanced vegetation index	0.786641	33.16824	0.35896	65.015263
增强型植被指数均一性 Homogeneity of enhanced vegetation index	0.827572	34.91083	0.523217	93.405428
增强型植被指数幅度 Enhanced vegetation index amplitude	0.712125	30.00588	0.699553	124.87177
增强型植被指数标准误差 Standard error of enhanced vegetation index	0.761885	32.10711	0.644094	114.986859
海拔变幅 Altitude variation	0.674437	28.47322	0.842787	150.438156
阳离子交换量 Cation exchange capacity	0.802058	33.8665	0.585914	104.60343
土壤酸碱度 Soil pH	0.842869	35.50201	0.624388	111.443153
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	0.792687	33.44114	0.598208	106.798942
历史温度变化 Historical temperature change	0.781018	32.88465	1.022539	182.50115
历史降雨变化 Historical rainfall change	0.425852	18.04798	0.926268	165.366945
丰富度 richness	0.8951631	96.024965	0.792336	141.461499

地理加权回归模型结果表明,点位模型和物种分布模型的 R<sup>2</sup>分别为 0.93、0.78,AICc 值分别为-1600.30、-17518.56,说明两模型均具有较高拟合度。海拔变幅、土壤酸碱度和最干月降水量对猪毛菜属物种分布格局具有显著影响,且在空间上具有显著差异性(图 3)。人类足迹指数、土壤有机碳含量对丰富度分布格局也具有一定影响(图 3、4)。

基于点位模型的地理加权回归模型结果显示,生境异质性、水分可获得性、土壤条件、历史气候变化、人类活动这5类因子对猪毛菜属物种丰富度格局具有较显著的影响,主要在准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地、天山西端、天山南脉南缘和塔里木盆地南缘等地区具有明显的空间差异性(图3)。其中,海拔变幅、土壤酸碱度、历史温度变化对物种丰富度的影响在准噶尔盆地南缘、天山南脉南缘主要为正向作用;最干月降水量和人类足迹指数在准噶尔盆地南缘、塔里木盆地南缘主要为负向作用(图3)。具体说,海拔变幅作用的热点区位于准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地和天山南脉南缘;最干月降水量在准噶尔西部山地、天山西端呈较高相关性,且在塔里木盆地南缘也表现出一定相关性;土壤酸碱度在准噶尔西部山地、天山西端、天山南脉南缘及里木盆地西南缘与物种丰富度呈较高相关性;历史温度变化热点区位于准噶尔盆地西南缘、天山南脉南缘及

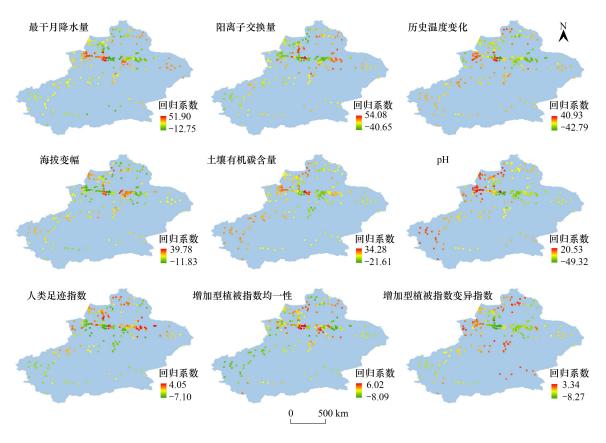


图 3 新疆猪毛菜属物种丰富度和点格局模型相关系数较高的变量的标准化回归系数

Fig.3 Standardized regression coefficient of variables with high correlation coefficient between species richness and point pattern model of Salsola in Xinjiang

塔里木盆地南缘;人类足迹在北疆呈正相关,在南疆呈负相关,总体呈负相关,均集中于准噶尔盆地南缘和塔里木盆地南缘。

与点格局相比,基于物种分布模型的地理加权回归模型结果也显示生境异质性、土壤条件、水分可获得性、人类活动这4类因子对猪毛菜属物种丰富度格局具有较显著的影响(图4)。具体说,海拔变幅在塔里木盆地东南缘具有显著正相关性;土壤酸碱度在准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地、塔里木盆地东南缘呈显著正相关,而土壤有机碳在准噶尔西北山地、天山西端、塔里木盆地东南部呈现较高负相关性;最干月降水量在准噶尔西部山地、天山西端、塔里木木盆地东南部具有较高负相关;人类足迹的影响总体以天山南脉为界呈自北向南递减,呈明显的北正南负的影响格局,但总体呈现负相关性(图4)。

#### 3 结论与讨论

## 3.1 新疆分布的猪毛菜属的物种丰富度与特有性分布格局

作为新疆荒漠原生和次生裸地的先锋物种和优势物种,猪毛菜属物种在防风固沙、盐碱地改良、保护沙漠绿洲、荒漠植被景观构建等方面均具有重大的生态价值<sup>[18]</sup>。本研究显示新疆猪毛菜属物种多样性格局具有显著的空间异质性,盆地边缘和山麓是物种丰富度和物种特有性的热点区域,具体集中在准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地、天山西端、天山南脉南缘和塔里木盆地南缘,且以准噶尔盆地南缘为中心(图 2)。相关研究也表明,准噶尔盆地南缘在末次盛冰期时期是众多植物物种的"避难所",天山山脉为植物提供了随冰川进退在河谷反复迁移的机会<sup>[19]</sup>,孕育了准噶尔盆地南缘较高的植物物种多样性。类似的,横断山脉地区也被证明具有显著的植物物种多样性和特有性<sup>[20]</sup>。

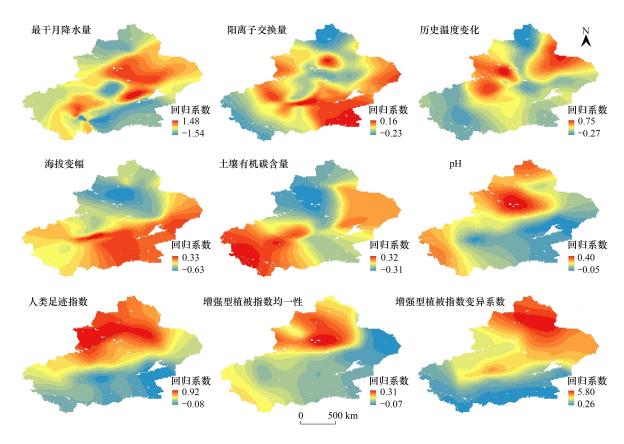


图 4 新疆猪毛菜属物种丰富度和 GWR 模型相关系数较高的变量的标准化回归系数

Fig.4 Standardized regression coefficient of variables with high correlation coefficient between species richness and GWR model of *Salsola* in Xinjiang

新疆分布的猪毛菜属物种丰富度总体由西北向东南递减,准噶尔盆地南缘为最主要的热点区域,塔里木盆地、吐鲁番盆地的物种丰富度相对较低(图 2)。相关研究也表明,新疆猪毛菜属的物种多样性均由西向东递减,中国猪毛菜属物种被推测是由中亚地区向东迁移而来的<sup>[21]</sup>。此外,依据形态与解剖特征的相关研究也判断准噶尔亚地区是新疆猪毛菜属物种的最主要分布区,其次为塔城伊犁亚地区<sup>[16]</sup>。

本研究揭示准噶尔盆地南缘、伊犁河谷、塔里木盆地南缘同样也是猪毛菜属物种的特有性中心,且塔里木盆地东南缘为特有物种潜在分布区,这对物种的丰富度格局进行了补充(图 2)。其中,密枝猪毛菜(Salsola implicata)、浆果猪毛菜(Salsola foliosa)、褐翅猪毛菜(Salsola korshinskyi)集中分布于准噶尔盆地南缘;延叶猪毛菜(Salsola pachyphylla)、白枝猪毛菜(Salsola arbusculiformis)集中分布于伊犁河谷;小药猪毛菜(Salsola micranthera)、天山猪毛菜(Salsola junatovii)集中分布于塔里木盆地南缘。上述物种均分布于新疆猪毛菜属特有性较高的区域,但这些区域并不与物种丰富度的热点区域完全重叠(图 2)。相关研究也表明物种的特有性格局中心与丰富度格局中心并不完全一致,但对丰富度格局具有补充作用。例如:中国罂粟科(Papaveraceae Juss.)的特有性中心位于西藏地区,而物种丰富度中心分布于川、滇、藏等地[22];中国兰科(Orchidaceae)的特有性中心在滇、藏、台等地,而物种丰富度中心在滇、黔、川等地[23]。

#### 3.2 新疆分布的猪毛菜属地理分布格局的环境驱动机制

生境异质性、土壤条件和水分可获得性是影响新疆猪毛菜属物种多样性分布格局的主要环境因子(图 3、图 4),且在空间上均存在较大差异,模拟结果较为准确(表 2)。相关研究也表明生境异质性显著影响植物分布格局<sup>[24]</sup>,干旱半干旱区土壤盐分与水分对荒漠盐生植物种群格局具有重要影响<sup>[25]</sup>。猪毛菜属植物物种随海拔变化采取不同的繁殖策略<sup>[26]</sup>,例如种子异型性<sup>[27]</sup>。本研究中,新疆猪毛菜属物种多样性格局的热点区

位于盆地边缘和山麓,这些区域具有地势起伏较大、生境高度破碎化的地形地貌<sup>[28]</sup>,海拔变幅、土壤酸碱度对该分布格局起正相关作用,最干月降水量起负相关作用(图3、图4)。塔里木盆地东南缘具有较高海拔变幅,同时也具备相对适宜的土壤与降水条件,推测可能是新疆猪毛菜属特有性分布的潜在区域(图4),与该区域海拔变化大,地表破碎,生境异质性较高的特点相符<sup>[29]</sup>。本研究判断的特有性分布格局中的潜在区域利于新疆猪毛菜属特有、稀有物种的保护与科学管理。

中国分布的猪毛菜属中,九成以上的物种分布于新疆干旱、高盐碱生境,依靠自身耐旱耐碱结构(如绒毛、气孔密度低、发达内分泌组织等)和多种萌发策略,表现出适应区域极端干旱盐渍荒漠环境的较强种群优势<sup>[14]</sup>。在学术界认可度较高的新疆未来气候整体偏"暖湿化"结论<sup>[30]</sup>背景下,多为盐生和旱生植物的猪毛菜属物种在种子萌发期和幼苗期受到温度、降水和土壤盐分胁迫,且温度胁迫和降水胁迫可通过蒸发作用部分转化为盐分胁迫而表现<sup>[31]</sup>。根据本研究,猪毛菜属物种多样性与土壤酸碱度成正比(准噶尔盆地南缘和天山南脉南缘),与最干月降水量成反比(准噶尔盆地南缘、准噶尔西部山地和塔里木盆地南缘),适宜的土壤酸碱度和降水量利于增强猪毛菜属物种的生存竞争力,提高该区猪毛菜属的物种多样性(图 3、图 4)。新疆区域内,猪毛菜属物种主要分布在盆地边缘和山麓,对应的山前洪积扇、洪积一冲积平原等地形均有不同程度的盐渍化<sup>[32]</sup>。猪毛菜属物种在不同生长期和水盐浓度下,会选择性保留地上、地下生长策略,以保证自身存活、生长、繁殖效益达到最高值<sup>[33]</sup>。猪毛菜属物种大多为旱生、中旱生的盐生植物,对荒漠、盐碱地的生态治理具有重大生态价值。

此外,人类足迹对新疆分布的猪毛菜属的物种分布格局呈北正南负、总体为负的相关性影响(图 4),这主要与猪毛菜属物种的伴人性有关。猪毛菜属中伴人物种主要分布于北疆,如紫翅猪毛菜(Salsola affinis)、散枝猪毛菜(Salsola brachiata)、粗枝猪毛菜(Salsola subcrassa)等,分布地与城市绿洲高度重叠,这与该区人为活动造成土壤次生盐碱化、干旱贫瘠化高度相关[34]。

# 参考文献(References):

- [1] 沈爱华,袁位高,张骏,江波,朱锦茹,黄丽霞. 浙江省生态公益林物种多样性时空格局研究. 浙江林业科技,2014,34(1):1-6.
- [2] 唐志尧,方精云.植物物种多样性的垂直分布格局.生物多样性,2004(1):20-28.
- [3] 张凤英,廖梓延,潘开文,张萌,赵玉林,张林.西南地区壳斗科物种丰富度和特有性分布格局模拟及其环境解释.应用生态学报,2021,32(7):2290-2300.
- [4] Orme C D, Davies R, Burgess M, Eigenbrod F, Pickup N, Olson V, Webster A, Ding T-S, Rasmussen P, Ridgely R, Stattersfield A, Bennett P, Blackburn T, Gaston K, Owens I F. Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. Nature, 2005, 436(7053): 1016-1019.
- [ 5 ] Vane-Wright R I, Humphries C J, Williams P H. What to protect? -Systematics and the agony of choice. Biological Conservation, 1991, 55(3):
- [6] Crisp M D, Laffan S, Linder H P, Monro A. Endemism in the Australian flora. Journal of Biogeography, 2001, 28(2): 183-198.
- [7] Myers N, Mittermeier R, Mittermeier C, da Fonseca G, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 2000, 403: 853-858.
- [8] Sousa-Baena M, Garcia L, Townsend Peterson A. Knowledge behind conservation status decisions: data basis for "Data Deficient" Brazilian plant species. Biological Conservation, 2014, 173: 80-89.
- [9] 王健铭,王文娟,李景文,冯益明,吴波,卢琦.中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释.生物多样性,2017,25(11): 1192-1201.
- [10] Wright J.S. Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of species coexistence. Oecologia, 2002, 130(1): 1-14.
- [11] 黄建辉. 物种多样性的空间格局及其形成机制初探. 生物多样性, 1994(2): 103-107.
- [12] 王梦茹,魏岩. 古尔班通古特沙漠钠猪毛菜种子异型性及其萌发行为研究. 草业学报,2019,28(3):85-92.
- [13] 闫紫烟. 猪毛菜属两种植物的种子异型性与萌发特性[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [14] 迪利夏提·哈斯木,阿马努拉·依明尼亚孜,依明·艾力,麦尔耶姆古丽·阿布都瓦力.准噶尔荒漠两种猪毛菜果实扩散特性研究.干旱区资源与环境,2017,31(7):151-155.
- [15] 闻志彬, 冯缨. 新疆猪毛菜属植物多样性及其地理分布特征. 干旱区研究, 2020, 37(1): 185-192.
- [16] Parolo G, Rossi G, Ferrarini A. Toward improved species niche modelling: Arnica montana in the Alps as a case study. Journal of Applied

- Ecology, 2008, 45(5): 1410-1418.
- [17] 陈彦光. 基于 Moran 统计量的空间自相关理论发展和方法改进. 地理研究, 2009, 28(6): 1449-1463.
- [18] 李宽亮, 刘彤, 李勇冠, 邵丽萍, 张荣, 宋占丽, 刘华峰. 褐翅猪毛菜种子异型性及其萌发特性研究. 石河子大学学报: 自然科学版, 2012, 30(3): 276-281.
- [19] 张展赫, 晏慧. 近 60 年来新疆准噶尔盆地气候变化特征. 现代农业科技, 2015(16): 233-234,236.
- [20] 应俊生. 中国种子植物物种多样性及其分布格局. 生物多样性, 20019(4): 393-398.
- [21] 黄俊华. 中国猪毛菜属(SalsolaL.)植物的地理分布特点. 干旱区地理, 2005(3): 325-329.
- [22] 李林,白娜,闫双喜,赵海沛,张静.中国罂粟科植物地理分布.东北林业大学学报,2013,41(5):75-80.
- [23] 闫双喜, 李永华, 位凤宇. 中国木兰科植物的地理分布. 武汉植物学研究, 2008(4): 379-384.
- [24] 彭闪江, 黄忠良, 徐国良, 欧阳学军, 张池. 生境异质性对鼎湖山植物群落多样性的影响. 广西植物, 2003(5): 391-398.
- [25] Gutterman Y. Seed Germination in Desert Plants. Springer Berlin Heidelberg, 1993.
- [26] 刘尊驰,刘华峰,赵丹,罗宁,孙园园,郝晓冉,刘彤.紫翅猪毛菜、钠猪毛菜不同个体大小繁殖分配差异及随海拔的变化.生态学报,2015,35(18):5957-5965.
- [27] Ungar I. Population ecology of halophyte seeds. Botanical Review, 1987, 53(3): 301-334.
- [28] 袁国映. 新疆山地垂直自然带的地区差异及经济意义. 新疆环境保护, 1993(3): 14-18.
- [29] 程维明, 柴慧霞, 周成虎, 陈曦. 新疆地貌空间分布格局分析. 地理研究, 2009, 28(5): 1157-1169.
- [30] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,樊自立. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响. 干旱区地理, 2002(3): 194-200.
- [31] 王娅, 张希明, 李利, 李红旭. 四种猪毛菜种子萌发对主要生态因子的响应. 种子, 2008(8): 58-63,67.
- [32] 胡明芳, 田长彦, 赵振勇, 王林霞. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(10): 111-117.
- [33] 周晓青, 魏岩. 两种猪毛菜地上和地下部分的生长动态. 新疆农业大学学报, 2009, 32(1): 35-38.
- [34] 蒋高明. 城市中的伴人植物. 植物学通报, 1989(2): 116-120.