

DOI: 10.5846/stxb201912112690

刘星宏,张青青,徐海量,张鹏,张广鹏,李宏. 北疆盐碱地植物群落空间分布及物种多样性. 生态学报, 2021, 41(4): 1501-1513.

Liu X H, Zhang Q Q, Xu H L, Zhang P, Zhang G P, Li H. Spatial distribution and species diversity of saline-alkali plant communities in northern Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1501-1513.

北疆盐碱地植物群落空间分布及物种多样性

刘星宏¹, 张青青^{1,*}, 徐海量², 张 鹏², 张广鹏², 李 宏¹

¹ 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830054

² 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘要:为探究盐碱地植物群落空间分布特征及群落间物种多样性的关系,根据对北疆盐碱地植物群落 84 个样点调查的数据,以各物种多度为指标,采用双向指示种分析方法(TWINSPAN)、除趋势对应分析法(DCA)、典范对应分析法(CCA)进行数量分类并分析群落分布与环境因子间关系和群落物种多样性及相似性变化特征。结果表明,TWINSPAN 数量等级分类将 84 个样点的植物划分为 11 种类型。各群丛类型的物种多样性特征表现为群丛 III 的多样性最大,群丛 X 多样性最小,且群丛 III 多样性显著高于群丛 X ($P < 0.05$),群丛 VII 均匀度最大,群丛 X 均匀度最小,且群丛 III 均匀度显著高于群丛 X ($P < 0.05$),群丛 I 的丰富度最大,群丛 X 丰富度最小,且群丛 I 丰富度显著高于群丛 X ($P < 0.05$),在所有群丛中群丛 III 所含有的植物种类最多,有 26 种;相似性特征为群丛 V 和群丛 VII 的相似性最大,群丛 V 和群丛 VII 物种间的竞争较小,群丛稳定性高;CCA 排序结果表明,北疆盐碱地植物群落分布与海拔高度、多年平均温度、土壤酸碱度等因素有关,其中影响最大的是海拔高度,其次为多年平均温度、降水量、蒸发量和土壤电导率,地形因子坡度对各群丛分布影响不大;北疆盐碱地植物群落数量分类及物种多样性变化的分析对于揭示北疆盐碱地植物群落空间分布特征和新疆盐碱地植物种质资源调查及其保护具有重要的意义。

关键词:北疆;盐碱地植物;数量分类;空间分布

Spatial distribution and species diversity of saline-alkali plant communities in northern Xinjiang

LIU Xinghong¹, ZHANG Qingqing^{1,*}, XU Hailiang², ZHANG Peng², ZHANG Guangpeng², LI Hong¹

¹ College of Grass and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830054, China

² Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Urumqi 830011, China

Abstract: In order to explore the relationship between the spatial distribution characteristics of plant communities in saline-alkali soils and the species diversity between communities, based on the data from 84 sample surveys of saline plant communities in saline-alkali land in northern Xinjiang, using the abundance of each species as an indicator, a two-way indicator species analysis method (TWINSPAN). In addition to trend correspondence analysis (DCA) and canonical correspondence analysis (CCA), the quantitative classification and analysis of the relationship between community distribution and environmental factors, community species diversity and similarity change characteristics. The results showed that TWINSPAN quantitative classification can divide 84 plants into 11 types. The species diversity characteristics of each cluster type showed that cluster III had the largest diversity, cluster X had the smallest diversity, and cluster III had a significantly higher diversity than cluster X ($P < 0.05$), cluster VII had the highest uniformity, and the uniformity of cluster X was the smallest, and the uniformity of cluster III was significantly higher than that of cluster cluster X ($P < 0.05$), the richness of cluster cluster I was the largest, the richness of cluster cluster X was the smallest, and the richness of cluster

基金项目:国家科技基础性工作专项(2015FY110500-16)

收稿日期:2019-12-11; 修订日期:2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: greener2010@sina.com

cluster I was significantly higher than that of cluster cluster X ($P < 0.05$), among all clusters, cluster III contains the most species of halophytes, with 26 species; the similarity feature was that cluster V and cluster VII are the most similar, and the competition between cluster V and cluster VII species was relatively high small, high cluster stability. The CCA ranking results showed that the distribution of halophyte clusters in saline-alkali land in northern Xinjiang was related to altitude, average temperature, soil pH, etc. Among them, the highest impact was altitude, followed by average temperature, precipitation, evaporation, soil conductivity, and terrain factor slope has little effect on the distribution of each group. The analysis of the number classification and species diversity changes of saline-alkali soil plant communities in northern Xinjiang reveals the spatial distribution characteristics of plant communities in saline-alkali soil in northern Xinjiang: It was of great significance for the investigation and protection of plant germplasm resources in the saline-alkali soils in Xinjiang.

Key Words: North Xinjiang; saline-alkali land plants; numerical classification; spatial distribution

土壤盐渍化是荒漠化的主要类型之一,我国盐碱地总面积约为 1 亿 hm^2 ,主要分布在东北松嫩平原、华北黄淮海平原、西北半干旱-半荒漠地区、西北干旱荒漠地区及滨海地区^[1]。其中,内陆盐碱地面积占全国盐碱地总面积的 95.00%。新疆地处欧亚大陆腹地,据统计新疆盐碱土面积占全国盐碱土总面积的 22.01%,是我国最为干旱,降水量稀少、蒸发量强烈、土壤盐碱化分布范围最广、盐碱化类型最多、土壤积盐最重的地区^[2]。由于新疆北疆大部分地区盐碱土多以石膏棕漠土和石膏盐盘棕漠土这两种土壤类型存在,土壤表面含盐量较高,受到环境影响易形成盐壳,影响植物幼苗萌发,还会对新疆北疆工业、农业发展产生极大不便。然而,随着全球气候变化、不合理开垦荒地、大面积毁林以及过渡放牧等自然和人为因素干扰下,盐碱地植物生态环境已遭受不同程度的影响和破坏,地表植被退化、生物多样性下降、水土流失等,导致部分珍贵、稀有的物种已濒临灭绝或被逐渐被其他物种所替代^[3]。因此,人们对盐碱地植物资源的保护引起了极大的重视。许多学者从盐碱地植物群落类型和组成^[4]、群落物种多样性和分布^[5]、土壤理化性质^[3,6-7]等方面对北疆盐碱地植物展开大量调查和研究。学者们的研究区域多集中于北疆准噶尔盆地南缘的古尔班通古特沙漠^[8-9]和玛纳斯河流域^[11],在准噶尔盆地西部的伊犁河谷和准噶尔盆地北部的乌伦古湖^[10-11]也有研究,由于研究区域较为分散且为小尺度区域研究,其环境和群落结构差异较大,因此对群落自身的特征和认识也各有偏重。

数量分类和排序分析方法能够系统研究植物群落分类及其内部特征^[12-14]。植物群落数量分类和排序应用最普遍的方法有双向指示种分析(TWINSPAN, Two-way indicators species analysis)法、除趋势对应分析(DCA, Detrended correspondence analysis)法、除趋势典范对应分析(DCCA, Detrended canonical correspondence analysis)法、典范对应分析(CCA, Canonical correspondence analysis)法等,这些方法不仅能够客观反映植物群落的生态关系,还能准确的反映群落分布与环境之间的生态关系,已被广泛应用于森林、草地、荒漠、干旱河谷、湿地等植被研究^[15-18]。目前有关盐碱地植物群落特征已有较多的研究,但都集中于研究盐碱地植物区系组成^[5-6,9]、盐碱地植物的耐盐性^[10-11]、盐碱地植物开发利用^[19],有关大尺度区域下盐碱地植物群落数量分类和多样性特征的报道较少。因此,本研究应用 TWINSPAN、DCA、CCA 和方差分析,对北疆盐碱地植物群落进行数量分类与排序,探讨盐碱地植物群落分布与环境因子间的关系及群落物种多样性变化,以期对绿洲-荒漠复合生态系统的平衡和维持提供数据。

1 研究区概况

新疆地形特点是山脉与盆地相间排列,盆地被高山环抱,北为阿尔泰山,南为昆仑山,天山横亘中部^[20]。研究区位于阿尔泰山与天山之间(图 1),是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700 km,南北宽 370 km,面积为 $13.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆地腹部是中国第二大沙漠-古尔班通古特沙漠,盆地南部为冲积扇平原,盆地边缘为山麓绿洲^[21]。研究区地属温带气候,东部为寒潮通道,冬季为我国同纬度最冷之地,南部年均温为 6—10℃,无霜期 150—190 d;北部、西部年均温 3—5℃,无霜期 140 d。

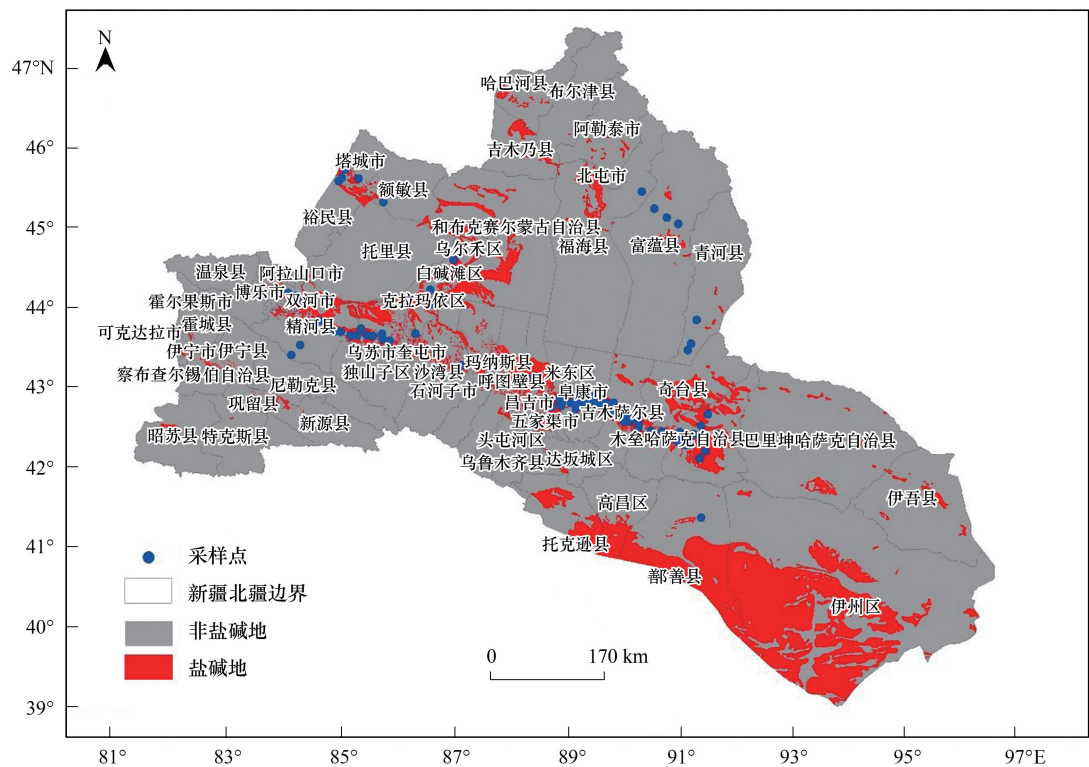


图 1 研究区及调查样点分布

Fig.1 Study area and survey sample distribution

沿古尔班通古特沙漠边缘的荒漠-绿洲交错带进行采样且采样区域均为盐碱地,主要调查区域(表 1)包括克拉玛依市、2 个自治州(昌吉回族自治州,博尔塔拉蒙古自治州)、2 个地区(阿勒泰地区,塔城地区)总共 27 个县市。

表 1 调查样点描述

Table 1 Survey sample description

序号 Number	调查区域 Survey area	经纬度范围 Latitude and longitude range	海拔范围/m Altitude range	植被类型 Vegetation types	所在行政区 Administrative district	样点数量 Number of samples
1	新疆阜康市	N44°15'48.1"E87°52'24.3"—N44°20'25.1"E88°43'34.3"	441—574	荒漠	昌吉州	22
2	新疆吉木萨尔县	N44°21'40.8"E88°51'46"—N44°09'22.7"E89°12'25.5"	532—612	荒漠	昌吉州	6
3	新疆奇台县	N44°13'02.4"E89°19'20.7"—N44°05'43.3"E89°51'26.9"	597—765	荒漠	昌吉州	5
4	新疆木垒县	N44°07'17.6"E90°11'22.6"—N44°10'14.4"E90°53'54.5"	801—1280	荒漠	昌吉州	12
5	新疆昌吉市	N44°10'12.9"E87°42'39.4"—N44°27'30.4"E87°05'19.1"	406—429	荒漠	昌吉州	4
6	新疆沙湾县	N44°28'55"E85°52'34.8"	375	荒漠	塔城地区	1
7	新疆博乐市	N44°53'28.6"E82°07'52.6"—N44°08'21.3"E82°39'50.7"	194—496	荒漠	博尔塔拉州	5
8	新疆精河县	N44°17'34.5"E82°47'22"—N44°34'51.7"E83°48'41.5"	200—369	荒漠	塔城地区	7
9	新疆乌苏县	N44°40'35.5"E83°51'46.2"—N44°45'44.9"E84°54'06.3"	314—400	荒漠	塔城地区	7
10	新疆青河县	N45°11'50.7"E90°06'50.7"—N45°36'20.6"E90°12'07.8"	1139—1222	荒漠	阿勒泰地区	3
11	新疆富蕴县	N46°48'35.5"E89°34'07"—N47°09'04.3"E88°45'26"	729—1001	荒漠	阿勒泰地区	4
12	新疆塔城市	N46°39'41.1"E82°54'22.4"—N46°21'40.1"E83°46'39.9"	394—562	荒漠	塔城地区	5
13	新疆克拉玛依市	N45°48'40.6"E85°20'49.7"—N45°11'01"E85°05'13.1"	247—269	荒漠	克拉玛依市	3

2 材料与方法

2.1 野外调查取样

分别在每个调查样点设置一个 10 m×10 m 的样方,进行乔木、灌木植物的调查,在每个 10 m×10 m 样方内按梅花点采样法设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,用于草本植物的调查,记录所有样方内的物种组成,测定每种植物的高度、盖度、频度等指标,再调查每个样点的同时用 GPS 记录样点的经纬度。测定植被的同时,在样地采用“S”形五点法采集土样。采集时除去凋落物,用土钻按 0—20 cm 土层取样,3 次重复,将采集到的土样装在自封袋带回实验室分析。

2.2 土壤、气象、地形因子数据获取

将采集的土壤样品用 1:2.5 土水比悬液酸度计测定土壤酸碱度(pH),用 1:5 土水比浸提液测定土壤电导率,获得土壤因子数据;通过国家气象数据中心(<http://data.cma.cn/>)下载新疆各个站点的气象数据,根据采样点坐标,从中筛选出 54 个站点近 20 年的年均降水量、年均气温、年均蒸发量数据,利用 Microsoft excel 2013 软件进行加权平均得到多年平均降水量、多年平均温度、多年平均蒸发量,再利用 ArcGIS 10.4.1 软件空间插值分析中的克里金法(Kriging)对气象数据进行插值提取各个采样点的气象因子数据;地形因子中的海拔高度通过 GPS 测定获取,坡度和坡向利用 ArcGIS 10.4.1 中的 3D Analyst—slope/aspect 工具对新疆 DEM 影像进行处理并获取各个采样点的数据。

2.3 物种多样性测度与方法

群落的物种多样性可反映群落中植物种类的丰富程度,而群落物种多样性研究的测度常采用 α -多样性和 β -多样性体现^[22]。 α -多样性不仅能反映群落中物种丰富度和群落内物种组成还可反映物种在群落中分布的均匀程度。 β -多样性反映 2 个群落或样地中共有种与总物种数之间的比例关系,比值越大,则说明 2 个群落或样地物种间的竞争越小,群落越稳定。本研究采用 α -多样性测度中的 Margalef 丰富度指数(D_{Ma})、Simpson 多样性指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)^[23-26],比较各群落多样性的变化特征,采用 Sorenson's 相似性指数(S_o)和 Jaccard's 相似性指数(J_a)测度群落或生境的 β -多样性^[27, 28],比较各群落间相似性特点,其计算公式如下:

Margalef 丰富度指数(D_{Ma}):

$$D_{Ma} = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (1)$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener 指数(H'):

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (4)$$

$$P_i = N_i / N \quad (5)$$

式中, S 为样方中的总物种数; N 为样方中的总个体数; N_i 为第 i 种植物的个体数; P_i 为 i 种植物个体数占总个体数比例。

Sorenson's 相似性指数(S_o):

$$S_o = \frac{2S_{12}}{2S_{12} + S_1 + S_2} \quad (6)$$

Jaccard's 相似性指数(J_a):

$$J_a = \frac{S_{12}}{S_1 + S_2 - S_{12}} \tag{7}$$

式中, S_{12} 为2个群落都出现的物种数; S_1 和 S_2 分别为群落1和群落2中的物种数。

2.4 数据分析

北疆盐碱地植物群落数量分类和排序采用物种多度与样地组成的矩阵^[29]作为基础数据进行计算,利用 Microsoft excel 2016 软件对野外调查数据进行处理,得到 84 个样点的物种×样地_{50×84}和 8 个环境因素的环境×样地_{8×84}矩阵数据,采用 WinTWINS 2.3 软件^[30]对物种-样地矩阵进行双向指示种分析(TWINSPAN)法,对北疆盐碱地植物群落进行划分,在划分过程中,先将所有样地和种类分成 0 和 1 两大类,然后这两大类再各自划分成两类,以此类推,直至达到所要求的划分水平为止。物种选用的假种 5 级分别为:0—2、2—5、5—10、10—20 和 >20,选择最多划分水平为 6,每次划分最多分类数为 2^[31];采用 CANOCO 5.0 软件^[32]中的除趋势对应分析(DCA)法和典范对应分析(CCA)法分析植物群落分布于环境因素间关系;群落多样性变化特征采用 SPSS 20.0 软件对其进行单因素方差分析(One-way ANOVA)^[33]。

3 结果

3.1 群落数量分类

利用 TWINSPAN 等级分类,将 84 个样点划分为 12 个组分,结合野外调查的实际情况和群落生境特征,采用第 4 级群丛水平的划分标准^[34],最终将其归并为 11 个群丛类型(图 2)。

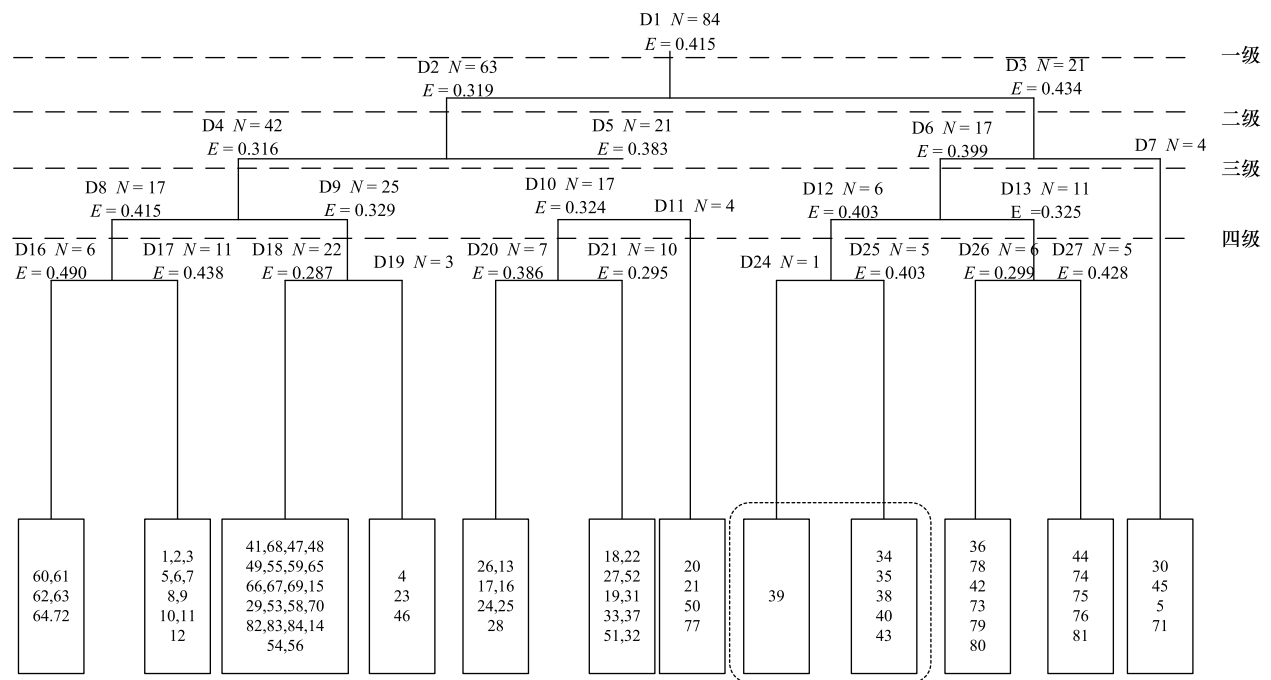


图 2 盐碱地植物群落 84 个样点的 TWINSPAN 树状分类图

Fig. 2 TWINSPAN tree classification diagram of 84 sample points of saline-alkali plant communities

E 代表特征值, E stands for feature value; N 代表样点数量, N stands for the number of samples; D 代表分类次数, D stands for the number of classifications; “级数”表示分类水平数, “level” indicates the number of classification levels; 罗马数字代表群丛类型, Roman numerals indicate the type of cluster

通过综合优势比大小确定各层优势种,依据《中国植被》^[34]的分类原则和系统,对所划分的群丛进行命名,各群丛类型主要特征及分布情况(表 2)如下:

类型 I: 胡杨-盐生白刺-刺毛碱蓬群丛。含样点 60—64、72, 分布于精河县、乌苏县、青河县, 海拔高度 332.70—368.80 m, 土壤呈碱性 ($\text{pH} > 8.5$), 具有灰漠土和棕钙土两种类型土壤, 土壤电导率为 0.17—10.23 ms/cm, 多年平均降水量为 220.47—221.84 mm, 多年平均蒸发量为 1341.94—1827.95 mm。乔木层优势种为胡杨 (*Populus euphratica*), 平均高度为 560.00 cm; 灌木层优势种为盐生白刺 (*Nitraria sphaerocarpa*), 平均高度为 38.75 cm; 草本层优势种为刺毛碱蓬 (*Suaeda acuminata*), 平均高度为 5.93 cm。群丛总盖度相差较大, 范围为 20%—90%, 平均盖度 61%。

类型 II: 梭梭+囊果碱蓬+红砂群丛。含样点 1—3、5—12, 分布于阜康市, 海拔高度 441.00—546.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 具有灰漠土和风沙土两种类型土壤, 土壤电导率为 1.48—5.19 ms/cm, 多年平均降水量为 209.01—254.08 mm, 多年平均蒸发量为 1542.41—1735.26 mm。灌木层优势种较多, 有梭梭、囊果碱蓬 (*S. physophora*)、红砂 (*Reaumuria songarica*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*), 平均高度分别为 164.00、38.50、27.66、40.66 cm。群丛总盖度相差较大, 范围为 30%—90%, 平均盖度 65%。

类型 III: 梭梭+红砂-散枝猪毛菜群丛。含样点 14、15、29、41、47—49、53—56、58、59、65—70、82—84, 分布于克拉玛依市、昌吉市、阜康市、博乐市及精河县、奇台县、木垒县、乌苏县, 海拔高度 193.60—1222.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 具有灰漠土、灰棕漠土、风沙土、棕钙土 4 种类型土壤, 土壤电导率为 0.17—10.68 ms/cm, 多年平均降水量为 134.87—223.73 mm, 多年平均蒸发量为 1055.24—5733.24 mm。灌木层的优势种为梭梭和红砂, 平均高度分别为 89.65、30.44 cm; 草本层优势种为散枝猪毛菜 (*Salsola brachiata*) 和粗枝猪毛菜 (*S. subcrassa*), 平均高度分别为 27.33、8.56 cm。群丛总盖度相差较大, 范围为 10%—90%, 平均盖度 43%。

类型 IV: 多枝怪柳-粗枝猪毛菜+叉毛蓬群丛。含样点 4、23、46, 分布于昌吉市、阜康市、吉木萨尔县, 海拔高度 429.00—532.00 m, 土壤呈极强碱性 ($\text{pH} > 9.5$), 具有灰漠土一种类型土壤, 土壤电导率为 3.48—6.80 ms/cm, 多年平均降水量为 205.51—237.04 mm, 多年平均蒸发量为 1699.44—1806.49 mm。灌木层的优势种为多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*), 平均高度为 126.00 cm; 草本层优势种为粗枝猪毛菜和叉毛蓬 (*Petrosimonia sibirica*), 平均高度分别为 8.26 cm、6.53 cm。群丛总盖度较大, 为 60%—80%, 平均盖度 70%。

类型 V: 囊果碱蓬+红砂-散枝猪毛菜群丛。含样点 13、16、17、24—26、28, 分布于阜康市和吉木萨尔县, 海拔高度 526.00—604.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 其土壤类型为灰漠土, 土壤电导率为 1.08—4.75 ms/cm, 多年平均降水量为 192.64—241.69 mm, 多年平均蒸发量为 1733.13—6342.27 mm。灌木层的优势种为囊果碱蓬和红砂, 平均高度分别为 55.50、25.66 cm; 草本层优势种为散枝猪毛菜, 平均高度为 6.50 cm。群丛总盖度, 为 30%—70%, 平均盖度 47%。

类型 VI: 红砂+高枝假木贼-叉毛蓬群丛。含样点 18、19、22、27、31—33、37、51、52, 分布于阜康市、博乐市、吉木萨尔县、木垒县、奇台县, 海拔高度 374.00—942.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 具有灰漠土和灰棕漠土两种类型土壤, 土壤电导率为 0.20—8.03 ms/cm, 多年平均降水量为 130.45—279.55 mm, 多年平均蒸发量为 1382.13—6547.47 mm。灌木层的优势种为红砂、高枝假木贼 (*Anabasis elatior*)、梭梭, 平均高度分别为 33.00、16.00、220.00 cm; 草本层优势种为叉毛蓬, 平均高度为 6.94 cm。群丛总盖度较大, 为 50%—90%, 平均盖度 71%。

类型 VII: 盐穗木+里海盐爪爪-刺毛碱蓬群丛。含样点 20、21、50、77, 分布于阜康市、塔城市、沙湾县, 海拔高度 375.00—468.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 具有灰漠土和棕钙土两种类型土壤, 土壤电导率为 3.21—5.35 ms/cm, 多年平均降水量为 188.78—266.95 mm, 多年平均蒸发量为 1080.08—5100.59 mm。灌木层的优势种为盐穗木 (*Halostachys caspica*)、里海盐爪爪 (*K. caspicum*), 平均高度分别为 80.00、70.00 cm; 草本层优势种为刺毛碱蓬和狗牙根 (*Cynodon dactylon*), 平均高度分别为 51.46、13.20 cm。群丛总盖度相差较大, 为 30%—90%, 平均盖度 65%。

类型 VIII: 高枝假木贼-草原绢蒿+叉毛蓬群丛。含样点 34、35、38—40、43, 分布于木垒县, 海拔高度 801.00—1112.00 m, 土壤呈强碱性 ($8.5 < \text{pH} < 9.5$), 其土壤类型为灰漠土, 土壤电导率为 0.50—2.18 ms/cm,

多年平均降水量为 235.88—275.74 mm,多年平均蒸发量为 1893.37—1941.13 mm。灌木层的优势种为高枝假木贼,平均高度为 19.33 cm;草本层优势种为草原绢蒿(*Seriphidium schrenkianum*)和叉毛蓬,平均高度分别为 6.00、2.64 cm。群丛总盖度较大,为 60%—80%,平均盖度 70%。

类型 IX:草原绢蒿群丛。含样点 36、42、73、78—80,分布于塔城市、木垒县、富蕴县,海拔高度 393.50—1280 m,土壤呈碱性($7.5 < \text{pH} < 8.5$),具有灰漠土和棕钙土两种类型土壤,土壤电导率为 0.43—5.13 ms/cm,多年平均降水量为 188.99—278.37 mm,多年平均蒸发量为 1117.62—1945.43 mm。优势种为草本层的草原绢蒿,平均高度为 30.83 cm。群丛总盖度相差较大,为 30%—90%,平均盖度 58%。

类型 X:同齿樟味藜-草原绢蒿+角果藜群丛。该群丛含样点 44、74—76、81,分布于塔城市、木垒县、富蕴县,海拔高度 562.20—1037.00 m,土壤呈强碱性($8.5 < \text{pH} < 9.5$),具有灰漠土和棕钙土两种类型土壤,土壤电导率为 0.51—2.53 ms/cm,多年平均降水量为 142.92—207.21 mm,多年平均蒸发量为 544.37—8099.05 mm。灌木层优势种为同齿樟味藜(*Camphorosma monspeliaca*),平均高度为 4.40 cm;草本层的优势种为草原绢蒿和角果藜(*Ceratocarpus arenarius*),平均高度分别为 22.60 cm、3.20 cm。群丛总盖度较大,为 40%—70%,平均盖度 56%。

类型 XI:盐节木+高枝假木贼群丛。含样点 30、45、57、71,分布于精河县、木垒县、奇台县、青河县,海拔高度 204.00—1197.00 m,土壤呈强碱性($8.5 < \text{pH} < 9.5$),土壤电导率为 0.20—1.38 ms/cm,具有灰漠土、灰棕漠土和棕钙土三种类型土壤,多年平均降水量为 187.99—215.42 mm,多年平均蒸发量为 1353.54—6151.62 mm。优势种为灌木层的盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)和高枝假木贼,平均高度分别为 18.66、16.33 cm。群丛总盖度相差较大,为 13%—60%,平均盖度 43%。

表 2 各群丛分布区域及所含样点数

Table 2 Distribution area of each cluster and the number of samples included

群丛类型 Cluster type	群丛名称 Cluster name	所含样点 Included samples	分布区域 Distribution area
I	胡杨-盐生白刺-刺毛碱蓬群丛	60—64, 72	精河县、乌苏县、青河县
II	梭梭+囊果碱蓬+红砂群丛	1—3, 5—12	阜康市
III	梭梭+红砂-散枝猪毛菜群丛	14, 15, 29, 41, 47—49, 53—56, 58, 59, 65—70, 82—84	克拉玛依市、昌吉市、阜康市、博乐市、精河县、奇台县、木垒县、乌苏县
IV	多枝怪柳-粗枝猪毛菜+叉毛蓬群丛	4, 23, 46	昌吉市、阜康市、吉木萨尔县
V	囊果碱蓬+红砂-散枝猪毛菜群丛	13, 16, 17, 24—26, 28	阜康市和吉木萨尔县
VI	红砂+高枝假木贼-叉毛蓬群丛	18, 19, 22, 27, 31—33, 37, 51, 52	阜康市、博乐市、吉木萨尔县、木垒县、奇台县
VII	盐穗木+里海盐爪爪-刺毛碱蓬群丛	20, 21, 50, 77	阜康市、塔城市、沙湾县
VIII	高枝假木贼-草原绢蒿+叉毛蓬群丛	34, 35, 38—40, 43	木垒县
IX	草原绢蒿群丛	36, 42, 73, 78—80	塔城市、木垒县、富蕴县
X	同齿樟味藜-草原绢蒿+角果藜群丛	44, 74—76, 81	塔城市、木垒县、富蕴县
XI	盐节木+高枝假木贼群丛	30, 45, 57, 71	精河县、木垒县、奇台县、青河县

3.2 群落多样性变化特征

通过 TWINSpan 聚类所划分 11 个植物群丛的 α -物种多样性变化分析结果见图 3。由图可知,各群丛类型 Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数整体变化一致,均表现为下降趋势。各群丛 Simpson 多样性指数变化表现为,群丛 VII>群丛 I>群丛 V>群丛 III>群丛 II>群丛 IV>群丛 VIII>群丛 XI>群丛 VI>群丛 IX>群丛 X,而 Shannon-Wiener 多样性指数变化则表现为群丛 VII>群丛 I>群丛 V>群丛 VIII>群丛 III>群丛 II>群丛 IV>群丛 VI>群丛 IX>群丛 XI>群丛 X,其中群丛 VII 的多样性最大,Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数分别为 0.595、1.182;其次是群丛 I,指数分别为 0.582、1.159;群丛 X 的多样性最小,指数分别为 0.213、0.375,群丛 VII 的 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多

样性指数比群丛 X 分别高出 47.27% 和 51.81%, 群丛 VII 和群丛 I 多样性显著高于群丛 X ($P < 0.05$); 各群丛 Pielou 均匀度指数变化表现为, 群丛 VII > 群丛 I > 群丛 V > 群丛 III > 群丛 IV > 群丛 II > 群丛 VIII > 群丛 IX > 群丛 VI > 群丛 XI > 群丛 X, 物种在群丛 VII 和群丛 I 的分布比较均匀, 指数分别为 0.686、0.681, 群丛 VII 和群丛 I 均匀度显著高于群丛 X ($P < 0.05$); 各群丛类型的 Margalef 丰富度指数变化表现为, 群丛 I > 群丛 V > 群丛 VII > 群丛 III > 群丛 IV > 群丛 VIII > 群丛 II > 群丛 VI > 群丛 XI > 群丛 IX > 群丛 X, 群丛 I 丰富度显著高于群丛 X ($P < 0.05$)。

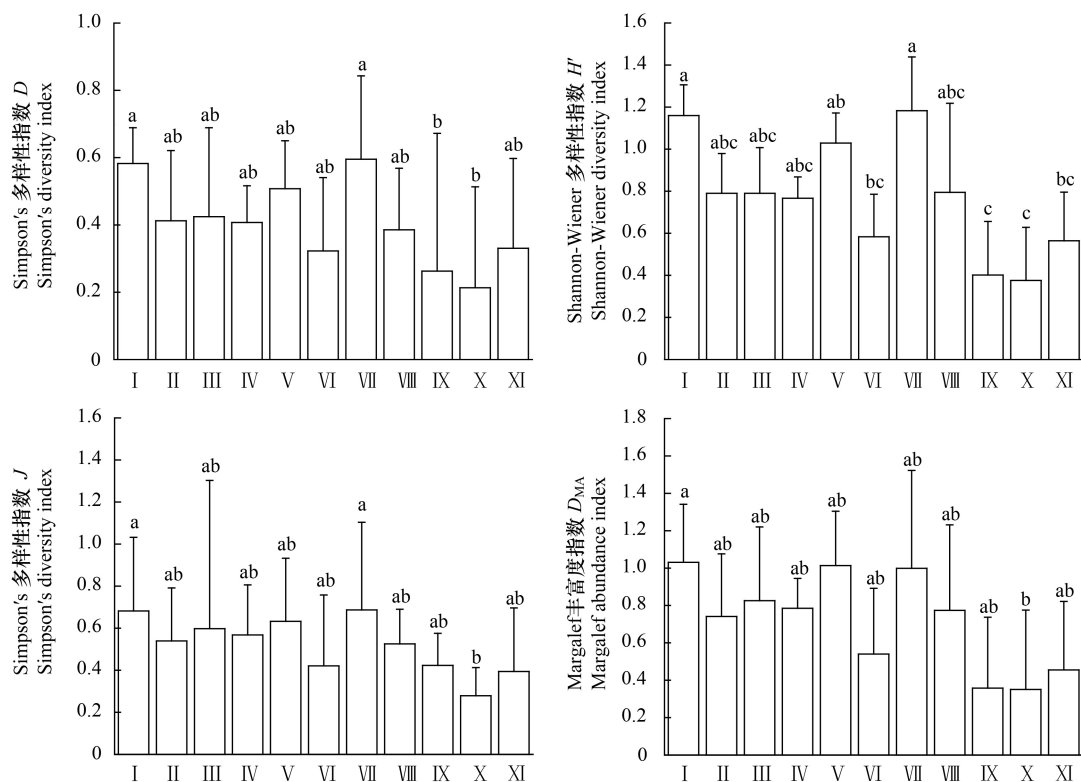


图 3 11 个盐碱地植物群丛 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数的变化特征

Fig. 3 Sampson index, Shannon-Wiener index, Pielou evenness index, Margalef richness of 11 saline-alkali flora Index change characteristics

类型 I: 胡杨-盐生白刺-刺毛碱蓬群丛; 类型 II: 梭梭+囊果碱蓬+琵琶柴群丛; 类型 III: 梭梭+琵琶柴-散枝猪毛菜群丛; 类型 IV: 多枝怪柳-粗枝猪毛菜+叉毛蓬群丛; 类型 V: 囊果碱蓬+琵琶柴-散枝猪毛菜群丛; 类型 VI: 琵琶柴+高枝假木贼-叉毛蓬群丛; 类型 VII: 盐穗木+里海盐爪爪-刺毛碱蓬群丛; 类型 VIII: 高枝假木贼-草原娟蒿+叉毛蓬群丛; 类型 IX: 草原娟蒿群丛; 类型 X: 同齿樟味藜-草原娟蒿+角果藜群丛; 类型 XI: 盐节木+高枝假木贼群丛

各群丛类型 β -多样性分析结果(表 3 和表 4), 由表可知, 群丛 V 和群丛 VII 的相似性最高, Sorenson's 指数和 Jaccard's 指数分别为 0.368、0.412, 其次为群丛 V 和群丛 VI, 指数分别为 0.364、0.400, 其原因为群丛 V 与群丛 VII 中共有植物种类较多, 两个群丛中分布的植物种类比较相似, 海拔高度、土壤酸碱度、多年平均降水量之间差异不大, 说明群丛 V 与群丛 VII 物种间的竞争较小, 群丛稳定性高于其他群丛。群丛 VII 和群丛 X 的相似性最低, 指数均为 0, 主要原因为群丛 VII 与群丛 X 中没有出现共有物种, 海拔高度、土壤酸碱度、多年平均降水量、多年平均温度、多年平均蒸发量之间差异较大, 说明两群丛物种间存在较大竞争, 群丛稳定性低且与其他群丛之间不具有相似性。

3.3 群落分布格局与环境因子间的关系

采用物种-样地矩阵数据对 TWINSpan 所划分的 11 种群丛进行 DCA 排序, 发现第 1 轴的梯度长度为 3.85 < 4.0 (当第 1 轴长度的值 > 4.0 时, 应选单峰模型; 在 3.0—4.0 之间, 选单峰和线性模型均可; 若小于 3.0, 则选线性模型) 满足单峰模型, 故本研究选用单峰模型对 84 个样点及 50 种盐碱地植物进行 DCA 排序分析。

结果显示,4 个排序轴的特征值分别为 0.5475、0.5157、0.3816、0.2967,其中第 1 排序轴特征值最大,第 2 排序轴次之,因此采用前两个排序轴做二维排序图。由图 4 可知,DCA 排序结果与 TWINSpan 分类所产生的各群丛类型基本吻合且在二维排序图中能较好地显示出来,排序结果与植物群丛分类结果有很大的相似性,说明 DCA 排序能较好的反映出实际观测情况。

表 3 11 个盐碱地植物群丛 Sorensen's 相似性比较

Table 3 Comparison of Sorensen's Similarity in Eleven Saline Alpine Flora

Sorensen's 相似性 Sorensen's similarity	群丛 I Assoc. I	群丛 II Assoc. II	群丛 III Assoc. III	群丛 IV Assoc. IV	群丛 V Assoc. V	群丛 VI Assoc. VI	群丛 VII Assoc. VII	群丛 VIII Assoc. VIII	群丛 IX Assoc. IX	群丛 X Assoc. X
群丛 II Assoc. II	0.350									
群丛 III Assoc. III	0.291	0.235								
群丛 IV Assoc. IV	0.240	0.345	0.238							
群丛 V Assoc. V	0.316	0.316	0.291	0.296						
群丛 VI Assoc. VI	0.300	0.300	0.349	0.276	0.364					
群丛 VII Assoc. VII	0.333	0.333	0.245	0.261	0.368	0.316				
群丛 VIII Assoc. VIII	0.125	0.176	0.255	0.222	0.263	0.286	0.133			
群丛 IX Assoc. IX	0.154	0.214	0.186	0.211	0.267	0.294	0.167	0.294		
群丛 X Assoc. X	0.091	0.167	0.154	0.133	0.231	0.154	0.000	0.214	0.333	
群丛 XI Assoc. XI	0.154	0.083	0.255	0.118	0.214	0.143	0.091	0.200	0.182	0.200

表 4 11 个盐碱地植物群丛 Jaccard's 相似性比较

Table 4 Comparison of Jaccard's Similarity in Eleven Saline Alpine Flora

Jaccard's 相似性 Jaccard's similarity	群丛 I Assoc. I	群丛 II Assoc. II	群丛 III Assoc. III	群丛 IV Assoc. IV	群丛 V Assoc. V	群丛 VI Assoc. VI	群丛 VII Assoc. VII	群丛 VIII Assoc. VIII	群丛 IX Assoc. IX
群丛 II Assoc. II	0.368								
群丛 III Assoc. III	0.258	0.182							
群丛 IV Assoc. IV	0.188	0.357	0.185						
群丛 V Assoc. V	0.300	0.300	0.258	0.267					
群丛 VI Assoc. VI	0.273	0.273	0.367	0.235	0.400				
群丛 VII Assoc. VII	0.333	0.333	0.194	0.214	0.412	0.300			
群丛 VIII Assoc. VIII	0.077	0.120	0.206	0.167	0.217	0.250	0.083		
群丛 IX Assoc. IX	0.100	0.158	0.129	0.154	0.222	0.263	0.111	0.263	
群丛 X Assoc. X	0.053	0.111	0.100	0.083	0.176	0.100	0.000	0.158	0.333
群丛 XI Assoc. XI	0.100	0.048	0.207	0.071	0.158	0.091	0.053	0.143	0.125

利用环-样地矩阵数据对北疆盐碱地 84 个采样点进行 CCA 排序,分析多年平均温度和多年平均降水量、多年平均蒸发量、土壤酸碱度、土壤电导率、海拔高度、坡度、坡向等 8 个环境因子与 11 个盐碱地植物群丛分布相关关系。CCA 排序分析中,箭头代表各个环境因子,箭头所处象限代表环境因子与排序轴间的正负相关性,可根据箭头连线长短判别群丛分布与该环境因子相关性的大小,具体表现为连线越长,其相关性越大,连线越短,其相关性越小;此外,两个箭头之间的夹角大小也反映出两个环境因子间相关性的大小,表现为夹角越小,相关性越大^[35]。

由图 4 和表 5 可以看出,蒙特卡洛 (Monte Carlo) 检验结果显示所有典范轴的显著性均达到显著水平 ($P=0.0020$)。海拔高度与 CCA 第一排序轴呈极显著正相关 ($P<0.001$),相关系数为 0.4513,土壤电导率和多年平均温度、多年平均蒸发量与第一排序轴呈极显著负相关 ($P<0.001$),相关系数分别为 -0.3868、-0.4659、-0.7632,第一排序轴主要反映了多年平均蒸发量、海拔高度、土壤电导率、多年平均温度的变化,其中多年平均蒸发量对各群丛分布具有较高的相关性;海拔高度和多年平均降水量与 CCA 第二排序轴呈极显著正相关 ($P<0.001$),相关系数分别为 0.5826、0.3785,多年平均蒸发量与 CCA 第二排序轴呈显著正相关 ($P<0.05$),相关系数为 0.2127,多年平均温度与 CCA 第二排序轴呈显著负相关 ($P<0.01$),相关系数为 -0.3679,第二排序轴反映了海拔高度、多年平均降水量、多年平均蒸发量、多年平均温度的变化,其中海拔高度与各群丛分布的相关性较大;土壤酸碱度与 CCA 第三排序轴呈显著正相关 ($P<0.001$),相关系数为 0.5012,坡向与第三排序轴呈

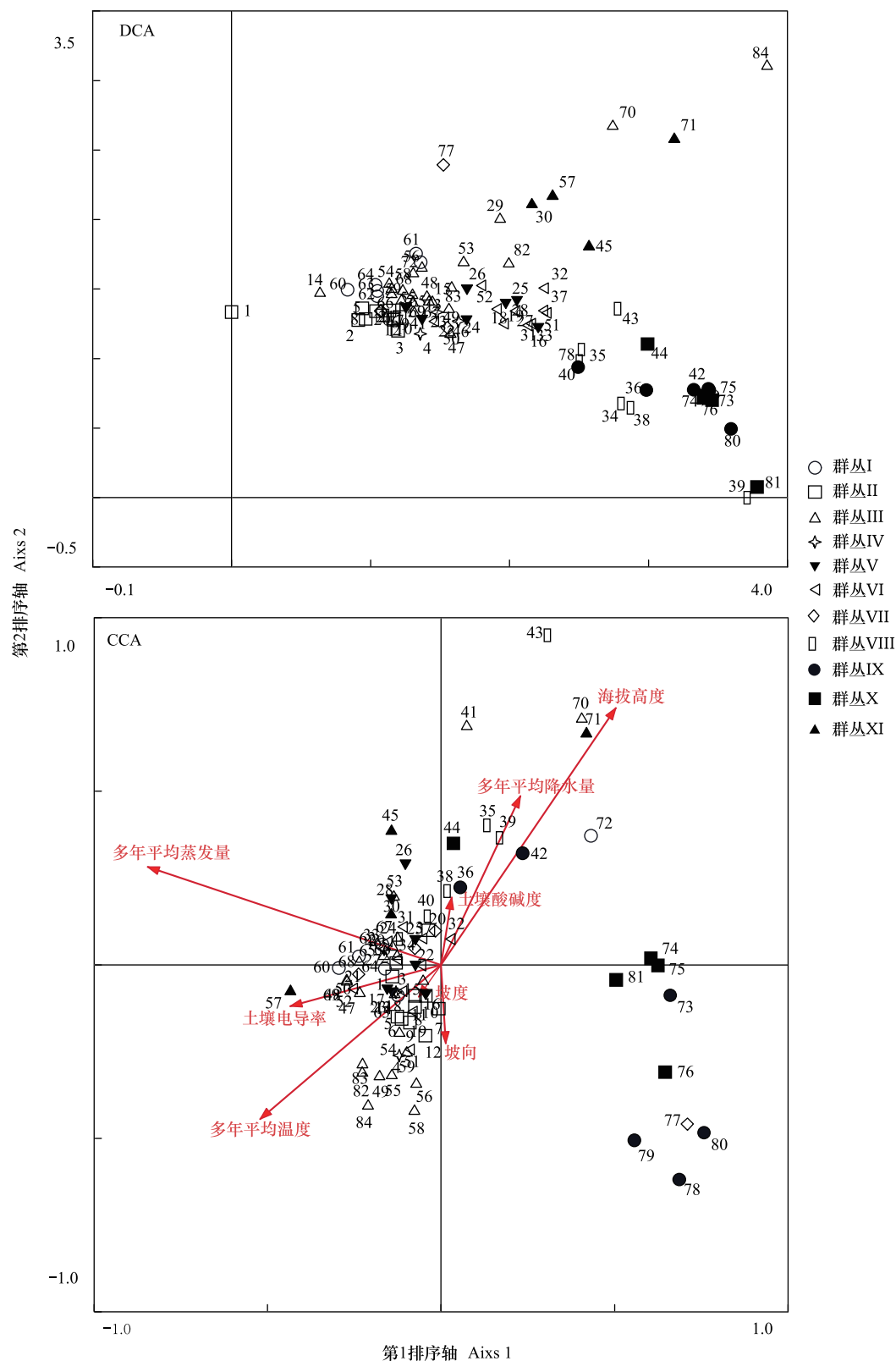


图4 84个样点 DCA 和 CCA 的二维排序图

Fig.4 Two-dimensional sorting map of 84 samples DCA and CCA

DCA: 除趋势对应分析; CCA 典范对应分析

显著正相关($P<0.05$),相关系数为 0.2209,与第三排序轴相关性较大的环境因子是土壤酸碱度;土壤电导率与 CCA 第四排序轴呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为 0.2638,多年平均温度与第四排序轴呈显著负相关($P<0.01$),相关系数为-0.2992,多年平均蒸发量也与第四排序轴呈显著负相关($P<0.05$),相关系数为-0.2562,与第四排序轴相关性较大的环境因子是多年平均温度。根据前 4 个排序轴的相关系数和各个环境因子在图上显示的结果,可知,各环境因子影响群丛分布大小依次为海拔高度>多年平均蒸发量>多年平均温度>多年平均降水量>土壤电导率>土壤酸碱度>坡向>坡度,其中主要影响各群丛分布的环境因子是海拔高度、多年平均温度、多年平均降水量和蒸发量、土壤电导率,8 个环境因子中坡度与前 4 个排序轴无显著关系,对群丛分布的影响不大。

4 结果与讨论

本研究利用数量生态学方法对北疆盐碱地植物群落进行数量分析。通过 TWINSpan 等级分类和 DCA 排序,可以看出,二者结合能客观准确的划分群落类型,两种方法可互相对比验证;TWINSpan 分类与 DCA 排序二者结果的一致性也说明了这两种方法对北疆盐碱地 84 个样点的盐碱地植物群落数量分类的可靠性。CCA 排序分析的前 2 个排序轴中,物种与环境因子的相关系数分别为 0.8970 和 0.7670,说明前 2 个排序轴能更好的说明环境因子与群落分布间的关系。一般的,前 3 个排序轴的物种与环境关系方差累积贡献率在 40% 以上,则说明排序效果较好^[36],本研究得出前 3 个轴的方差累积贡献率达到 62.6%,由此说明 CCA 排序能较好的反映所选环境因子与群落分布间的关系且排序结果是可靠的。

表 5 环境因子与前 4 个排序轴的相关系数、特征值、解释方差排序结果比较

Table 5 Comparison of correlation coefficient, eigenvalue and interpretation variance of environmental factors and the first four sorting axes

环境因子 Environmental Factors	第一轴 Aixs 1	第二轴 Aixs 2	第三轴 Aixs 3	第四轴 Aixs 4
酸碱度 pH	0.0436	0.1463	0.5012 ***	0.0450
土壤电导率 Soil electrical conductivity	-0.3868 ***	-0.0838	0.0705	0.2638 *
海拔高度 Altitude	0.4513 ***	0.5826 ***	-0.1127	0.1102
坡度 Slope	-0.0594	-0.0768	0.0154	-0.0850
坡向 Aspect	0.0179	-0.1678	0.2209 *	0.0433
多年平均温度 Annual average temperature	-0.4659 ***	-0.3679 ***	0.1712	-0.2992 **
多年平均降水量 Annual average precipitation	0.2175 *	0.3785 ***	-0.1280	-0.1709
多年平均蒸发量 Annual average evaporation	-0.7632 ***	0.2127 *	-0.0740	-0.2562 *
特征值 Eigenvalues	0.7000	0.4530	0.3590	0.2860
物种与环境相关系数 Species-environment correlations	0.8970	0.7670	0.7340	0.6160
物种与环境关系方差解释的累计比例 /%				
Cumulative proportion of variance interpretation of species-environment relationship	29.0	47.7	62.6	74.4
所有典范轴的显著性检验 Test of significance of all canonical axes	0.0020			

*、** 和 *** 分别表示相关性在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平具有统计学意义

通过研究结果发现,影响北疆盐碱地植物群落分布的主要环境因素是海拔高度,其次是多年平均温度、降水量、蒸发量和土壤电导率,在所选环境因子中地形因子坡度对盐碱地植物群落的分布影响不大,其原因是研究区域内某些调查样点存在特殊生境所导致的。根据 TWINSpan 分类结果可以看出,各个群丛在空间上表现为不连续性,一些在地理上相距较远的样点被分成了相同的群丛(例如群丛 X 所含样点包含新疆塔城地区、阿勒泰地区、昌吉回族自治州),由此可知,群丛分布与研究区域内复杂的地形条件和气候有关。研究区位于新疆北疆地区,海拔和气象因子在很大程度上影响着植物群落的分布^[37]。大部分学者认为,植物群落的形成是地形、气候和土壤因子的综合作用,但在不同尺度区域下,影响植物群落分布的主要环境因素是不同的^[38]。在大尺度区域内,影响植物群落分布的主要环境因子为气候因子,而在小区域尺度内,则是地形和土

壤因子影响着植物群落的分布^[39-40]。桂东伟等^[41]研究中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响时发现,群落分布主要受海拔的影响,其次是受土壤因子的影响;包小婷等^[42]对拉萨河流域植物群落的数量分类与排序的研究中得出,影响植物群落分布的主要因素是年均温度和海拔,其次是年均降水量。上述研究结果与本研究得出环境因子对群丛分布的结果基本一致。姚帅臣等^[14]对拉萨河谷草地群落的研究表明,影响草地群落分布格局的主要环境因子是海拔和坡向;范得芳等^[43]对秦岭锐齿栎群落分布的研究中得出坡度和土壤全磷对群落分布影响最大,而本研究结果发现地形因子对植物群落分布的影响不显著,其原因是研究对象和研究尺度的不同,本研究区域尺度较大且地形、气候较为复杂,环境条件存在较大差异。从 CCA 排序轴结果上看,前两个排序轴仅解释了 47.7%,这可能与研究区某一小尺度区域内土壤理化因子和地理隔离^[44]等因素有关。

参考文献 (References):

- [1] 郝金标, 张福锁, 毛达如, 田长彦, 宋玉民, 刘德玺. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源. 土壤通报, 2005, 36(3): 299-303.
- [2] 张添佑, 王玲, 罗冲, 彭丽. 玛纳斯河流域土壤盐渍化时空动态变化. 水土保持研究, 2016, 23(1): 228-233.
- [3] 胡文杰, 李跃进, 刘洪波, 张昊, 蒙荣, 芦永兴. 土默川平原土壤盐渍化与盐生植物分布及盐分离子特征的研究. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 127-131.
- [4] 张玲. 河北滨海地区白刺及碱蓬属盐生植物营养成分分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [5] 傅德平, 吕光辉, 杨建军. 克拉玛依植物群落结构和物种多样性研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(6): 152-155.
- [6] 王荷生. 新疆主要盐生植物群落的分布及其与土壤、地下水的关系. 植物生态学与地植物学丛刊, 1964, 2(1): 57-69.
- [7] 麦尔哈巴·尼加提, 戴岳, 师庆东, 肖合来提·巴义, 彭丽萍, 尼加提·卡斯木. 准噶尔盆地东南缘荒漠灌丛盐生假木贼周围土壤理化性质研究. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 38-44.
- [8] 陈莎莎, 姚世响, 袁军文, 谷丽丽, 油天钰, 兰海燕, 张富春. 新疆荒漠地区盐生植物灰绿藜种子的萌发特性及其对生境的适应性. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 75-79.
- [9] 张立运. 准噶尔盆地南缘盐生植被的类型和组成. 干旱区研究, 1985, 2(1): 44-50.
- [10] 尹传华, 田长彦, 张锁福, 郝金标. 新疆部分盐生植物元素特征与土壤环境关系//西部地区第二届植物科学与开发学术讨论会论文摘要集. 乌鲁木齐: 中国植物学会, 2001: 139-139.
- [11] 郝金标, 张福锁, 毛达如, 田长彦, 董振成, 王开芳. 新疆盐生植物群落物种多样性及其分布规律的初步研究. 林业科学, 2006, 42(10): 6-12.
- [12] 姚帅臣, 王景升, 丁陆彬, 包小婷, 李超, 王彤, 刘文婧, 李妍妍. 拉萨河谷草地群落的数量分类与排序. 生态学报, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [13] 陈宝瑞, 朱玉霞, 张宏斌, 周磊, 辛晓平. 呼伦贝尔草甸草原植被的数量分类和排序研究. 武汉植物学研究, 2008, 26(5): 476-481.
- [14] 王静娅, 王明亮, 张凤华. 干旱区典型盐生植物群落下土壤微生物群落特征. 生态学报, 2016, 36(8): 2363-2372.
- [15] 张峰, 张金屯. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释. 生态学报, 2003, 23(3): 421-427.
- [16] 潘晓玲, 张远东, 初雨, 韦如意. 塔里木河流域荒漠河岸林群落的多元分析与环境解释. 西北植物学报, 2001, 21(2): 245-251.
- [17] 鲁为华, 于磊, 蒋惠. 新疆昭苏县沙尔套山天然草地植物群落数量分类与排序(简报). 草业学报, 2008, 17(1): 135-139.
- [18] 贾希洋, 马红彬, 周瑶, 张蕊, 宿婷婷, 张双乔, 张俊. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落数量分类和演替. 草业学报, 2018, 27(2): 15-25.
- [19] 胡文象, 张立运, 陈昌笃, 等. 准噶尔盆地南部植被类型、结构、生产力和开发利用考察研究. 中国科学院新疆生态与地理研究所: 2010 年以前数据, 1989.
- [20] 李小明. 新疆植被分布规律与水热关系初探. 干旱区研究, 1988, 5(2): 41-46.
- [21] 王敏芳, 焦养泉, 任建业, 佟殿君, 徐志诚. 准噶尔盆地侏罗纪沉降特征及其与构造演化的关系. 石油学报, 2007, 28(1): 27-32.
- [22] 李军玲, 张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系. 应用与环境生物学报, 2006, 12(6): 766-771.
- [23] Magurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [24] 方炜, 彭少麟. 鼎湖山马尾松群落演替过程物种变化之研究. 热带亚热带植物学报, 1995, 3(4): 30-37.
- [25] 彭少麟, 周厚诚, 陈天杏, 郭少聪. 广东森林群落的组成结构数量特征. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(1): 10-17.
- [26] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [27] 赵志模, 郭依泉. 群落生态学原理与方法. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1990.

- [28] 阳含熙, 卢泽愚. 植物生态学的数量分类方法. 北京: 科学出版社, 1981.
- [29] 王忠欣, 栾兆擎, 刘贵花. 洪河国家级自然保护区浓江河滨湿地植物对土壤环境因子的响应. 湿地科学, 2013, 11(1): 54-59.
- [30] van Kleef H H, Verberk W C E P, Leuven R S E W, Esselink H, van der Velde G, van Duinen G A. Biological traits successfully predict the effects of restoration management on macroinvertebrates in shallow softwater lakes. *Hydrobiologia*, 2006, 565(1): 210-216.
- [31] 张元明, 陈亚宁, 张道远. 塔里木河中游植物群落与环境因子的关系. 地理学报, 2003, 58(1): 109-118.
- [32] El-Bana M, Khedr A H, van Hecke P, Bogaert J. Vegetation composition of a threatened hypersaline lake (Lake Bardawil), North Sinai. *Plant Ecology*, 2002, 163(1): 63-75.
- [33] 钟韩珊, 李元哲, 张晓雨, 赵美玉, 赵丽娅. 不同类型沙地植物群落特征及多样性研究. 湖北大学学报: 自然科学版, 2019, 41(4): 349-355.
- [34] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [35] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [36] Fernández-Aláez C, Fernández-Aláez M, García-Criado F. Spatial distribution pattern of the riparian vegetation in a basin in the NW Spain. *Plant Ecology*, 2005, 179(1): 31-42.
- [37] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 准噶尔盆地典型地段植物群落及其与环境因子的关系. 生态学报, 2011, 31(10): 2669-2677.
- [38] Siefert A, Ravenscroft C, Althoff D, Alvarez-Yépiz J C, Carter B E, Glennon K L, Heberling J M, Jo I S, Pontes A, Sauer A, Willis A, Fridley J D. Scale dependence of vegetation - environment relationships: a meta-analysis of multivariate data. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(5): 942-951.
- [39] van Couwenberghe R, Collet C, Lacombe E, Pierrat J C, Gégout J C. Gap partitioning among temperate tree species across a regional soil gradient in windstorm-disturbed forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(1): 146-154.
- [40] 段后浪, 赵安, 姚忠. 排序法在植物群落与环境关系研究中的应用述评. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(2): 202-208.
- [41] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 江源, 穆桂金, 杨发相. 中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响. 草业学报, 2010, 19(3): 38-46.
- [42] 包小婷, 丁陆彬, 姚帅臣, 王景升, 石培礼, 王彤, 李超, 刘文婧. 拉萨河流域植物群落的数量分类与排序. 生态学报, 2019, 39(3): 779-786.
- [43] 范得芳, 王得祥, 柴宗政, 胡有宁, 保积存, 王涛. 环境因子对秦岭锐齿栎群落物种分布及多样性的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(10): 59-67.
- [44] 沈泽昊, 张新时. 中国亚热带地区植物区系地理成分及其空间析局的数量分析. 植物分类学报, 2000, 38(4): 366-368.