

DOI: 10.5846/stxb201806231386

赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 周远刚. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子关系. 生态学报, 2019, 39(11): - .

Zhao M, Zhao R F, Zhang L H, Zhao H L, Zhou Y G. Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子关系

赵 敏, 赵锐锋*, 张丽华, 赵海莉, 周远刚

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 湿地植物多样性的研究对维持湿地生态系统完整性和稳定性有着重要意义。以黑河中游湿地为研究对象, 基于野外采样数据和不同盐分梯度植物群落多样性指数, 重点分析不同盐分梯度植物多样性变化及其与土壤因子关系。结果表明: 黑河中游湿地植物组成比较丰富, 共出现植物 30 科 71 属 102 种; 随土壤盐分梯度增加, 植物群落组成发生显著变化, Margalef 丰富度指数 (R) 和 Shannon-Weiner 多样性指数 (H) 均减小, 说明研究区植物多样性随盐分增加而减少; 不同盐分梯度影响植物多样性的土壤因子存在差异, 低盐梯度是 pH、速效钾和全氮, 中盐梯度是 pH、速效磷和速效钾, 高盐梯度是有机质、全磷、速效钾和速效氮。该研究结果对于认识不同盐分梯度下影响植物多样性的主要土壤因子具有重要意义, 同时对黑河中游湿地植物多样性的有效管理和维持具有一定的参考价值。

关键词: 湿地; 盐分梯度; 植物多样性; 土壤因子; 黑河中游

Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient

ZHAO Min, ZHAO Ruifeng*, ZHANG Lihua, ZHAO Haili, ZHOU Yuangang

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Wetlands are a unique ecosystem formed by the interaction of water and land, and have the function of maintaining different plant community types, and greatly promote species richness of the region. Thus, wetlands have become a hot research area for biodiversity conservation. Wetlands are important for water and carbon cycle regulation, wildlife survival, biological diversity, and economic value; however, human activities along with severe environment changes have led to critical loss and degradation of wetland ecosystems. In particular, soil salinity accumulation exerts a significant impact on wetland plant diversity. In previous studies, soil salinity has been considered an important factor affecting plant diversity in arid and semiarid areas. This study aimed to characterize the relationship between plant diversity and other soil factors along the soil salinity gradient in the middle reaches of the Heihe River. There were 27 sites along the middle reaches of the Heihe River and a total of 87 sampling plots were investigated from July to August 2017. These included 9 sampling plots for trees and shrubs (30 m × 30 m) and 78 sampling plots for herbs (1 m × 1 m). Soil characteristics were analyzed, including soil salinity (SA), soil pH (pH), water content (WC), bulk density (BD), soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK). The sampling plots were divided into three salinity gradients by cluster analysis and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761043, 41261047); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划团队项目 (NWNU\LKQN-17-7)

收稿日期: 2018-06-23; **网络出版日期:** 2018-00-00

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

included low salinity (S1), middle salinity (S2), and high salinity (S3) gradients. The results showed that a total of 102 plant species occurred in the plots, belonging to 30 families and 71 genera, indicating that the plant composition was relatively rich. Along the increasing soil salinity gradient, the community composition changed significantly, and the number of families, genera, and species decreased. The Margalef richness index (R) decreased from 1.03 to 0.55 and the Shannon-Weiner diversity index (H) decreased from 1.45 to 1.08, indicating that plant diversity decreased with the increasing gradient in the study area. The effects of other soil factors on plant diversity under different salinity gradients were studied using a redundancy analysis (RDA). The results showed that there were differences in soil factors affecting plant diversity under different salinity gradients. In low salinity pH, AK, and TN, in middle salinity pH, AP, and AK, and in high salinity SOM, TP, AK, and AN affected plant diversity. These findings are of great significance to the maintenance and management of plant diversity in the middle reaches of the Heihe River.

Key Words: wetland; salinity gradient; plant diversity; soil factor; middle reaches of the Heihe River

湿地是水陆相互作用下形成的独特生态系统^[1],具有维持不同植物群落类型、促进区域物种丰富度的作用^[2],是世界生物多样性重要的储存库^[3-4]。植物多样性作为生物多样性的的重要组成部分,在群落生态系统功能和服务的维持中起着至关重要的作用^[2]。湿地植物多样性受气候^[5]、土壤^[6-8]和水环境^[9]等环境因子的强烈影响,其中土壤作为植物生长的物质基础,对植物分布格局和物种多样性都有重要影响^[5,10]。在土壤诸多因子中,土壤盐分是影响湿地植物多样性最主要的因素之一^[11]。近年来,随着全球气候暖化问题的日益加剧,加上人为不合理的利用水土资源,引起土壤表层盐分累积过程加剧,造成湿地生态功能明显下降,生物多样性降低^[7-8,12],因此,探索不同盐分梯度湿地植物多样性差异及影响湿地植物多样性的主要土壤因子,将有利于湿地植物多样性的保护和恢复,对保障区域的生态平衡和可持续发展具有重要作用。

植物多样性和土壤盐分的关系一直是群落生态学研究的重要问题^[7-8]。近年来,不同类型湿地植物特征随土壤盐分含量变化的问题受到广泛关注,国内外学者对河流湿地、盐地沼泽、潮汐湿地、湖泊湿地等不同湿地类型进行了研究并取得大量研究成果,研究发现湿地植物物种组成、分布格局、盖度及多样性特征等均随土壤盐分含量改变而变化^[6-7,13-15]。干旱内陆湿地受特殊地理环境影响,生态环境十分脆弱,一旦破坏很难恢复^[16]。对于该类型湿地,部分学者在塔里木河湿地、艾比湖湿地等针对植物群落多样性与土壤因子关系进行初步研究,认为干旱区湿地植物多样性主要受土壤含水率和盐分影响,随土壤盐分含量增加植物多样性下降,群落联接性转变^[15,17]。黑河中游湿地是典型的干旱内陆河流湿地,对河西走廊生物多样性保护和绿洲发展具有重要意义^[18]。关于黑河中游湿地的研究主要集中在土壤化学性质的空间分布^[16]、植物群落特征^[19]、动物多样性^[20]等单一资源的特征描述,对于植物与土壤间关系的研究较少提及。

由此可见,关于干旱内陆河流湿地不同盐分梯度植物多样性与土壤间关系的内在机制还不是完全清楚。因此,为更好地认识不同土壤盐分梯度下影响湿地植物多样性的土壤因子,探索湿地植物多样性的维持机制,有必要进一步开展相关研究。为此,本文以黑河中游湿地为研究对象,立足于解决以下几个问题:(1)不同盐分梯度的植物群落科属种组成;(2)不同盐分梯度下植物多样性的变化;(3)不同盐分梯度下影响植物多样性的主要土壤因子有哪些?以期加深对该地区植物多样性特征的认识,为黑河中游湿地植物多样性的修复、管理和保护等提供理论依据,同时也为充分发挥干旱区湿地在植物多样性保护和生态系统稳定性维持中的作用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河中游是指莺落峡到正义峡间约 185 km 长的河段(98°57'—100°52'E,38°39'—39°59'N),行政区划上包括张掖市所属的甘州区、高台县、临泽县(图 1)。该区属于典型的温带大陆性气候,干旱少雨且蒸发强烈,

年平均温度 6—8℃, 年均降水量 50—250 mm, 年均蒸发量 2000—3500 mm, 日照充足, 年日照时数 3000—4000 h。该区典型地带性土壤为灰棕漠土和灰漠土, 此外还有灌淤土、盐土、潮土、风沙土等非地带性土壤。主要植被类型为温带荒漠植被, 以菊科 (*Compositae*)、豆科 (*Leguminosae*)、禾本科 (*Gramineae*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、蓼科 (*Polygonaceae*) 等为主^[16]。

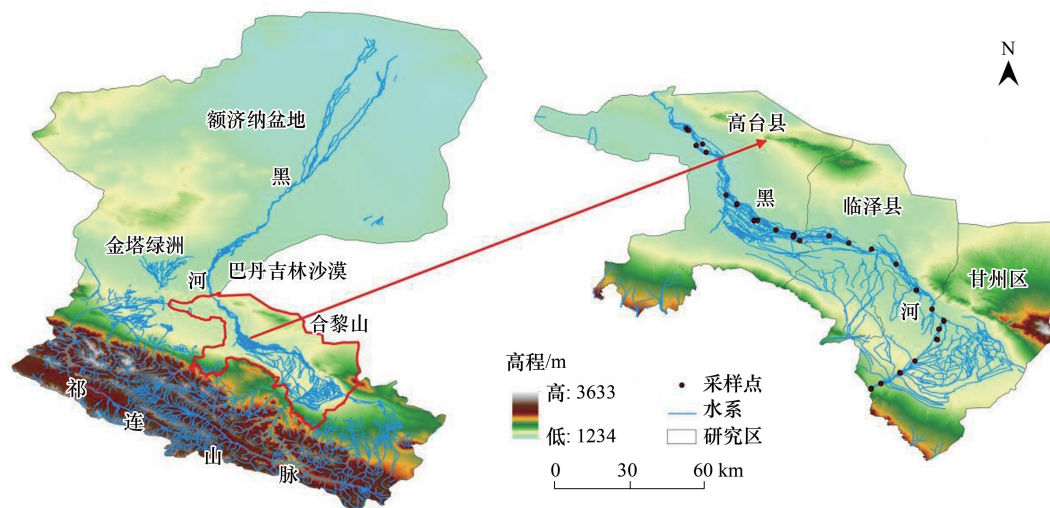


图1 研究区位置及样方分布示意图

Fig.1 Location of the study area and the investigated plots

1.2 植被调查、采样与样品分析

2017 年 7—8 月对黑河中游湿地进行植物调查与土壤采样。采用线路踏查法设置调查样地 27 个, 根据群落特征在各样地设置乔灌木样方 1—2 个或草本样方 1—6 个 (乔灌木 30 m×30 m, 草本 1 m×1 m), 共计调查样方 87 个, 每个样方均用 GPS 定位。

现场鉴定样方中的植物物种, 并将个别现场无法识别的物种采集标本带回实验室鉴定, 记录个体数、胸径、高度、冠幅等指标以及各样方经纬度、海拔及周边环境特征。同时沿样方对角线设置土壤剖面, 采用环刀法均匀采集 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 的土壤样品各 3 个装入铝盒并称鲜重, 另取一份均匀混合好的土样每层各约 1 kg 装袋带回实验室分析。

将装袋的混合土壤样品带回实验室风干、剔除异物, 研磨过筛至 1、0.25 mm 和 0.15 mm 粒径后进行土壤理化性质测定。利用四分法取各层土壤样品, 采用重量法测定土壤盐分 (Soil salinity, SA); 采用 pH S-3C 型酸度计测定 pH 值; 采用重铬酸钾容量法-消煮法测定有机质含量 (Soil organic matter, SOM); 采用开式消煮法测定全氮含量 (Total nitrogen, TN); 采用硫酸-高氯酸消煮法测定全磷含量 (Total phosphorus, TP); 采用乙酸铵提取-火焰光度法测定速效钾含量 (Available potassium, AK); 采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量 (Available phosphorus, AP); 使用流动分析仪 (SKALAR 8505) 测定速效氮含量 (Available nitrogen, AN)^[16,21]。土壤含水率 (Water content, WC) 和容重 (Bulk density, BD) 测定采用烘干法。其中, 全氮全磷在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成, 其他实验都在西北师范大学土壤地理实验室完成。

1.3 植物多样性的测定

基于重要值计算以下 3 种指数测度植物多样性^[22]:

重要值 = (相对高度 + 相对盖度 + 相对多度) / 3

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H / \ln S$$

Margalef 丰富度指数: $R = (S - 1) / \ln N$

式中, S 为群落中的物种数, P_i 为相对重要值, N 为总多度。

1.4 数据分析方法

通过对数据进行除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 确定植物多样性与生态梯度的适用模型, 若分析结果 4 个轴中梯度最大值 <3 , 则选择线性模型 (RDA; 冗余分析, Redundancy Analysis); 值 >4 则选择单峰模型 (CCA; 典范对应分析, Canonical Correspondence Analysis); 值在 3—4 之间选择线性或单峰模型 (RDA 或 CCA)。

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计分析, 采用 Origin 2017 进行绘图, 使用 SPSS 20.0 软件进行聚类分析和单因素方差分析, 使用 CANOCO 4.5 进行 DCA 等植物排序分析。

2 结果

2.1 黑河中游盐分梯度及土壤因子特征

在箱型图剔除 4 个逸散点的基础上通过聚类分析将 83 个样方划分成 3 种盐分梯度 (表 1), 分别为低盐梯度 (S1)、中盐梯度 (S2) 和高盐梯度 (S3), 3 种盐分梯度间土壤盐分含量差异显著 ($P < 0.05$), 并符合全国土壤普查办公室给出的盐渍土盐化分级标准^[23]。

表 1 各盐分梯度的土壤盐分含量基本统计值

Table 1 Basic statistical values of soil salinity content in different salinity gradients

盐分梯度 Salinity gradient	样方数 Number of plot	均值 Mean/ (g/kg)	标准差 Stand deviation	极小值 Min/ (g/kg)	极大值 Max/ (g/kg)	中值 Median/ (g/kg)	变异系数 Coefficient of variation/%
S1	60	1.11A	0.66	0.37	3.14	0.92	59.46
S2	15	7.48B	3.15	3.93	13.47	6.81	42.11
S3	8	22.35C	8.16	15.58	40.54	19.36	36.51

S1、S2 和 S3 分别代表文中的低、中、高土壤盐分梯度, 第三列数据后英文字母不同者表示数据间差异显著 ($P < 0.05$)

不同盐分梯度间, 土壤全氮、含水率、速效氮、速效钾、速效磷、有机质含量、容重的差异显著 ($P < 0.05$) (图 2)。土壤全氮、含水率、速效磷和有机质在低盐梯度 (S1) 显著低于中盐 (S2)、高盐梯度 (S3), 土壤全氮含量的变化范围在 0.16—5.72 g/kg 之间, 速效磷含量的变化范围为 0.77—69.27 mg/kg, 土壤含水率、有机质含量的变化范围较大, 分别为 1.16%—185.85%、3.18—107.64 g/kg; 速效氮和速效钾在 3 种盐分梯度间差异均显著, 且均随盐分梯度的增加呈增加趋势, 两者的变化范围分别为 5.88—121.37 mg/kg 和 62.21—654.73 mg/kg; 土壤容重在低盐梯度 (S1) 与高盐梯度 (S3) 间差异显著, 变化范围为 0.25—1.50 g/cm³; 土壤全磷和 pH 在 3 种盐分梯度间均无显著差异, 全磷含量变化范围较小, 在 0.31—1.02 g/kg 之间浮动, pH 在 8.00—9.43 之间变化。

2.2 不同盐分梯度下植物群落科属种组成

样方调查统计结果显示, 研究区 87 个样方中共出现植物 30 科 71 属 102 种, 其中禾本科 (*Gramineae*) 最多, 占物种总数的 15.69%, 其次是菊科 (*Compositae*) 和藜科 (*Chenopodiaceae*), 分别占物种总数的 14.71% 和 10.78%, 各科植物中有 14 科为 1 科 1 属 1 种, 占物种总数的 13.73%。其中低盐梯度 (S1) 出现物种 91 种, 隶属于 29 科 65 属, 占总物种数的 89.22%, 中盐梯度 (S2) 出现物种 36 种, 隶属于 14 科 30 属, 占总物种数的 35.29%, 高盐梯度 (S3) 出现物种 16 种, 隶属于 8 科 14 属, 占总物种数的 15.69%, 可以看出, 随土壤盐分梯度的增加各科植物属数、物种数均呈减小趋势 (图 3)。不同物种对不同的生境有选择倾向, 随着盐分梯度的增加刺毛碱蓬 (*Suaeda acuminata*)、苦马豆 (*Sphaerophysa salsula*)、盐角草 (*Salicornia europaea*) 等物种的出现, 伴随着假苇拂子茅 (*Calamagrostis pseudaphragmites*)、水葱 (*Scirpus validus*)、长苞香蒲 (*Typha angustata*) 等物种的消失。

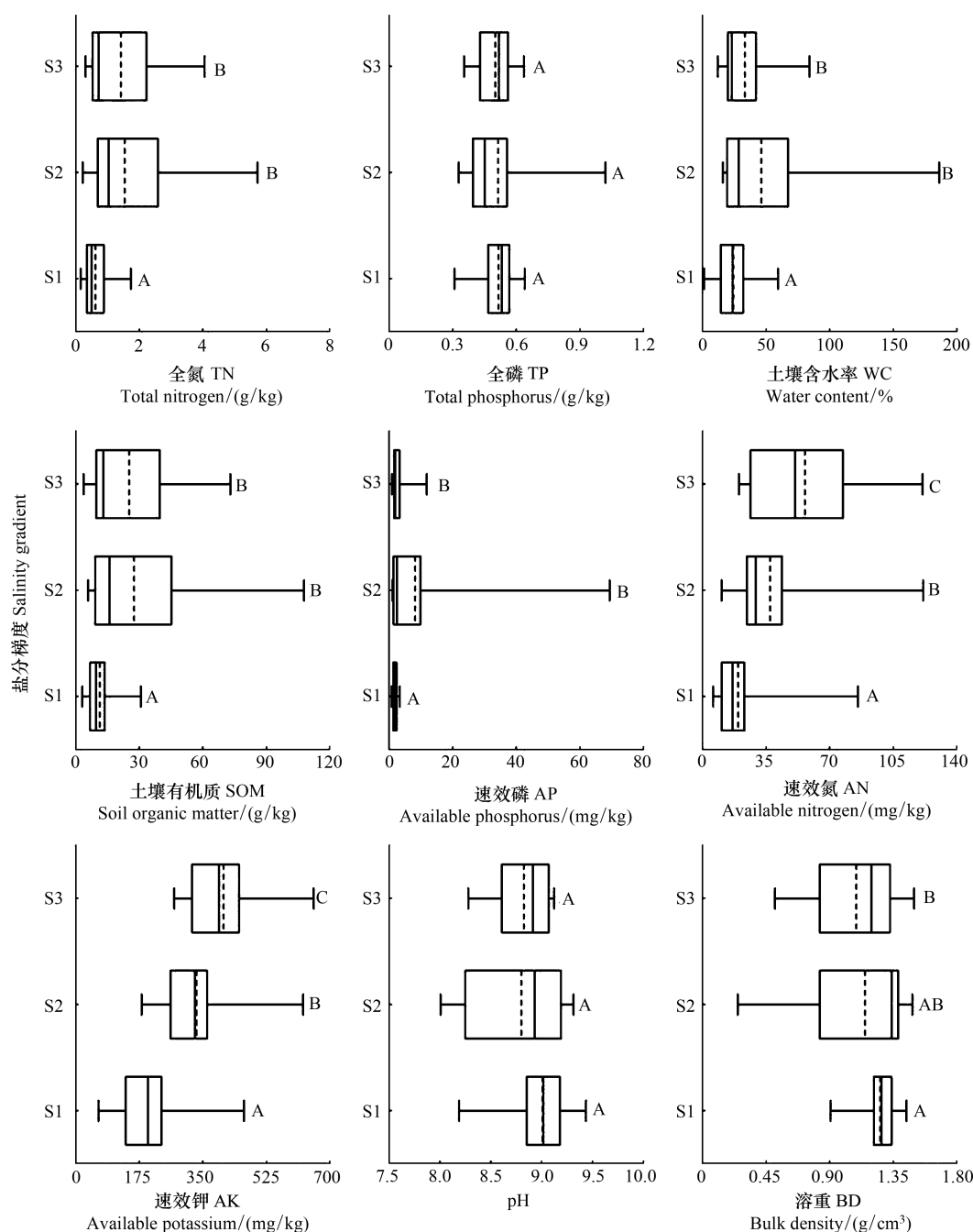


图2 黑河中游湿地各盐分梯度的土壤因子特征

Fig.2 Characteristics of soil factors under different salinity gradients in the middle reaches of the Heihe River

S1、S2 和 S3 分别代表文中的低、中、高土壤盐分梯度;相同土壤因子后大写英文字母不同者表示数据间差异显著 ($P < 0.05$);箱体代表上四分位数到下四分位数,两端须线代表最值,箱体内部实线代表中位数,虚线代表平均值;土壤因子:SOM:土壤有机质,soil organic matter;WC:土壤含水率,water content;TN:全氮,total nitrogen;TP:全磷,total phosphorus;pH:酸碱度;AN:速效氮,available nitrogen;AP:速效磷,available phosphorus;AK:速效钾,available potassium;BD:容重,bulk density

2.3 不同盐分梯度下植物多样性

研究结果表明,黑河中游湿地植物多样性相对较高(图4),同时,不同盐分梯度的植物多样性3种指数均具有较为明显差异。植物群落丰富度指数和多样性指数变化规律基本一致,即随土壤盐分梯度的增加,Margalef 丰富度指数(R)和 Shannon-Weiner 多样性指数(H)呈减小趋势,分别为 1.03、0.81、0.55 和 1.45、1.29、

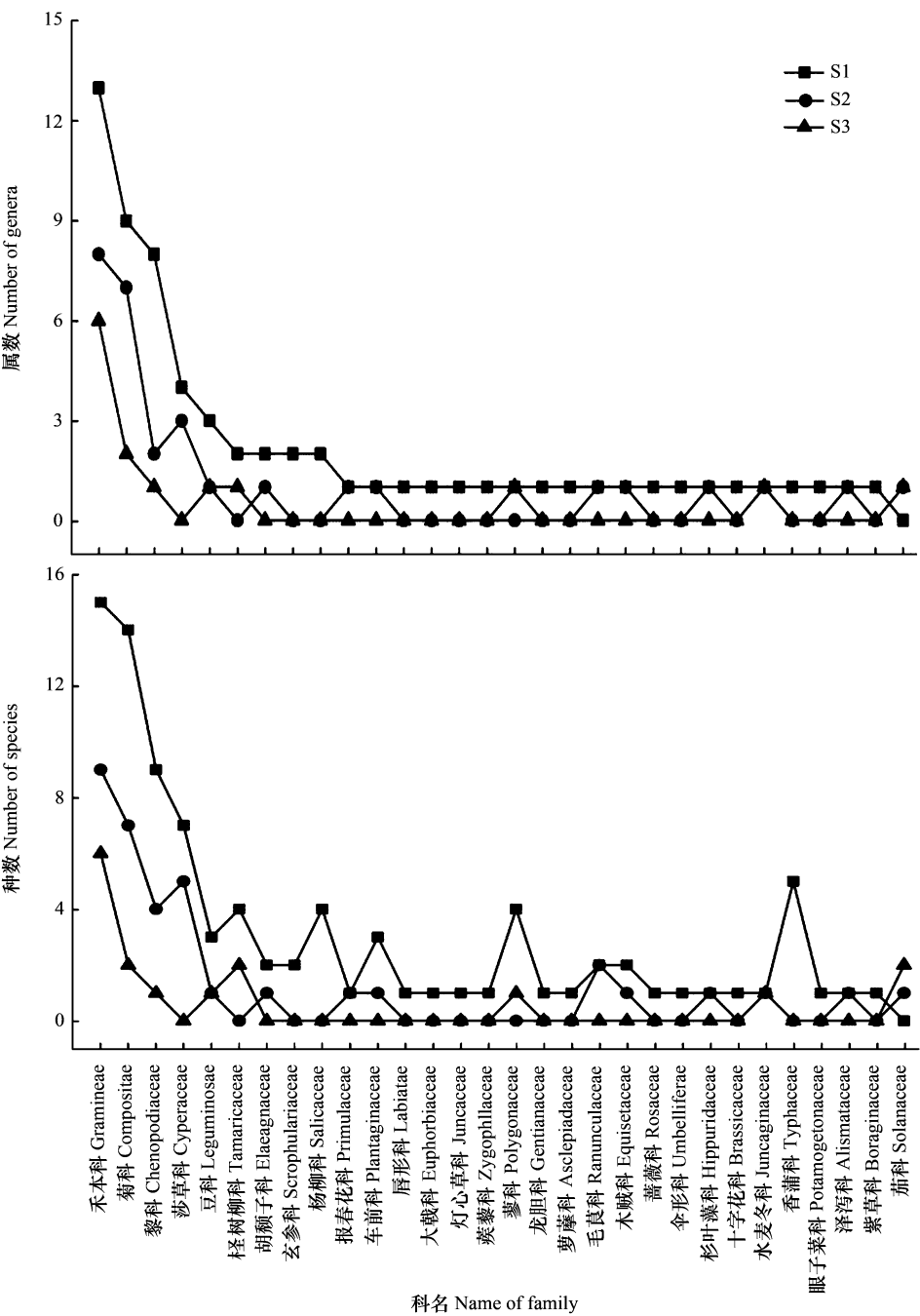


图3 黑河中游湿地各盐分梯度的植物科属种组成

Fig.3 Plant composition of salinity gradients in the middle reaches of Heihe river

1.08,表明研究区内物种的多样性随土壤盐分梯度的增加呈减少态势,整体植物群落结构有明显变化。Pielou 均匀度指数(J)随土壤盐分梯度的增加呈波动变化,分别为 0.82、0.79、0.86,没有显示出一定的变化规律。

2.4 土壤因子与植物群落多样性关系

DCA 分析结果表明,本研究低、中、高盐梯度四个轴中梯度最大值分别为 0.621、1.658、1.529,均小于 3,符合线性模型,因此选用 RDA 方法探究植物多样性与土壤因子间关系。RDA 分析结果显示(表 2),在低、中、高盐梯度中排序轴 1 和 2 分别解释了植物与环境间关系的 89.5%和 9.5%、94.9%和 3.3%及 97.4%和 2.1%,表明排序轴 1 和 2 均包含了大部分排序信息,因此利用前两轴的数据能够充分解释土壤因子与植物多样性间

关系。

低盐梯度(S1)植物多样性与土壤 RDA 分析结果中(表 3,图 5),第一排序轴基本上反映了土壤 pH 的变化情况,该因子与第一排序轴的相关系数为 0.2053,从左到右呈减少趋势;第二排序轴主要反映了速效钾(0.2572)与全氮(0.2509)的变化情况,从上到下均呈减少趋势。中盐梯度(S2)植物多样性与土壤 RDA 分析中,第一排序轴反映了土壤 pH(0.2613)、速效磷(0.2423)和速效钾(0.1945)的变化情况,从左到右土壤 pH 呈增加趋势,速效磷和速效钾呈减少趋势;第二排序轴主要反映了 pH(0.2606)的变化情况,从上到下 pH 呈增加趋势。高盐梯度(S3)植物多样性与土壤 RDA 分析中,第一排序轴反映了全磷(0.6240)、有机质(0.3596)和速效氮(0.3442)的变化情况,从左到右均呈减少趋势;第二排序轴基本反映了速效钾(0.3483)的变化情况,从上到下呈减少趋势。由此可以看出,不同盐分梯度下影响植物多样性的土壤因子存在差异,低盐梯度是 pH、速效钾和全氮,中盐梯度是 pH、速效磷和速效钾,高盐梯度是有机质、全磷、速效钾和速效氮。

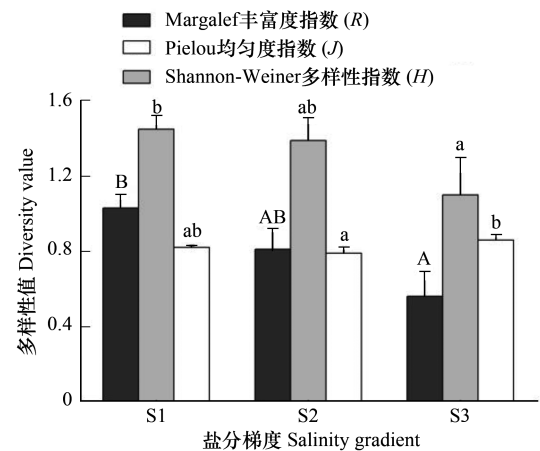


图 4 各土壤盐分梯度的植物多样性指数
Fig. 4 Plant species diversity indices of different soil salinity gradients (Mean±SE)

误差线为标准误差;误差线上同一个多样性指数后大写英文字母不同表示数据间差异显著($P<0.05$),小写英文字母不同表示近乎显著($P<0.1$)

表 2 各盐分梯度下植物与土壤因子的 RDA 分析结果

Table 2 RDA analysis results of plant and soil factors under different salinity gradients							
盐分梯度 Salinity gradient		S1		S2		S3	
项目 Item		轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2
特征值 Eigenvalues		0.130	0.014	0.610	0.021	0.974	0.020
物种-环境相关性 Species-environment correlations		0.380	0.434	0.819	0.672	1.000	1.000
累计百分比方差	物种数据	13.0	14.4	60.8	62.9	97.4	99.5
Cumulative percentage variance	物种-环境关系	89.5	99.0	94.9	98.2	97.4	99.5
总特征值 Sum of all eigenvalues		1		1		1	
总典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues		0.15		0.64		1	

表 3 RDA 前两轴与土壤因子的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of redundancy analysis ordination first two axes and environmental factors						
盐分梯度 Salinity gradient	S1		S2		S3	
项目 Item	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2
全氮 TN	-0.0013	0.2509	-0.0580	0.2007	-0.2896	0.0244
全磷 TP	0.0986	0.1097	-0.0495	-0.1263	-0.6240	0.2360
含水率 WC	-0.0695	0.1107	0.0179	0.1325	-0.2727	0.0547
有机质 SOM	0.0340	0.1377	-0.0644	0.1760	-0.3596	0.0383
速效磷 AP	0.1141	-0.1448	-0.2423	0.0343	-0.0997	-0.1626
速效氮 AN	-0.0584	0.1063	-0.0435	0.0822	-0.3442	0.1148
速效钾 AK	0.0882	0.2572	-0.1945	0.1199	-0.2498	0.3483
酸碱度 pH	-0.2053	-0.1236	0.2613	-0.2606	0.2770	-0.1403
容重 BD	-0.0297	0.0158	0.0785	-0.1458	0.1380	-0.0818

土壤因子:SOM:土壤有机质,soil organic matter;WC:土壤含水率,water content;TN:全氮,total nitrogen;TP:全磷,total phosphorus;pH:酸碱度;AN:速效氮,available nitrogen;AP:速效磷,available phosphorus;AK:速效钾,available potassium;BD:容重,bulk density

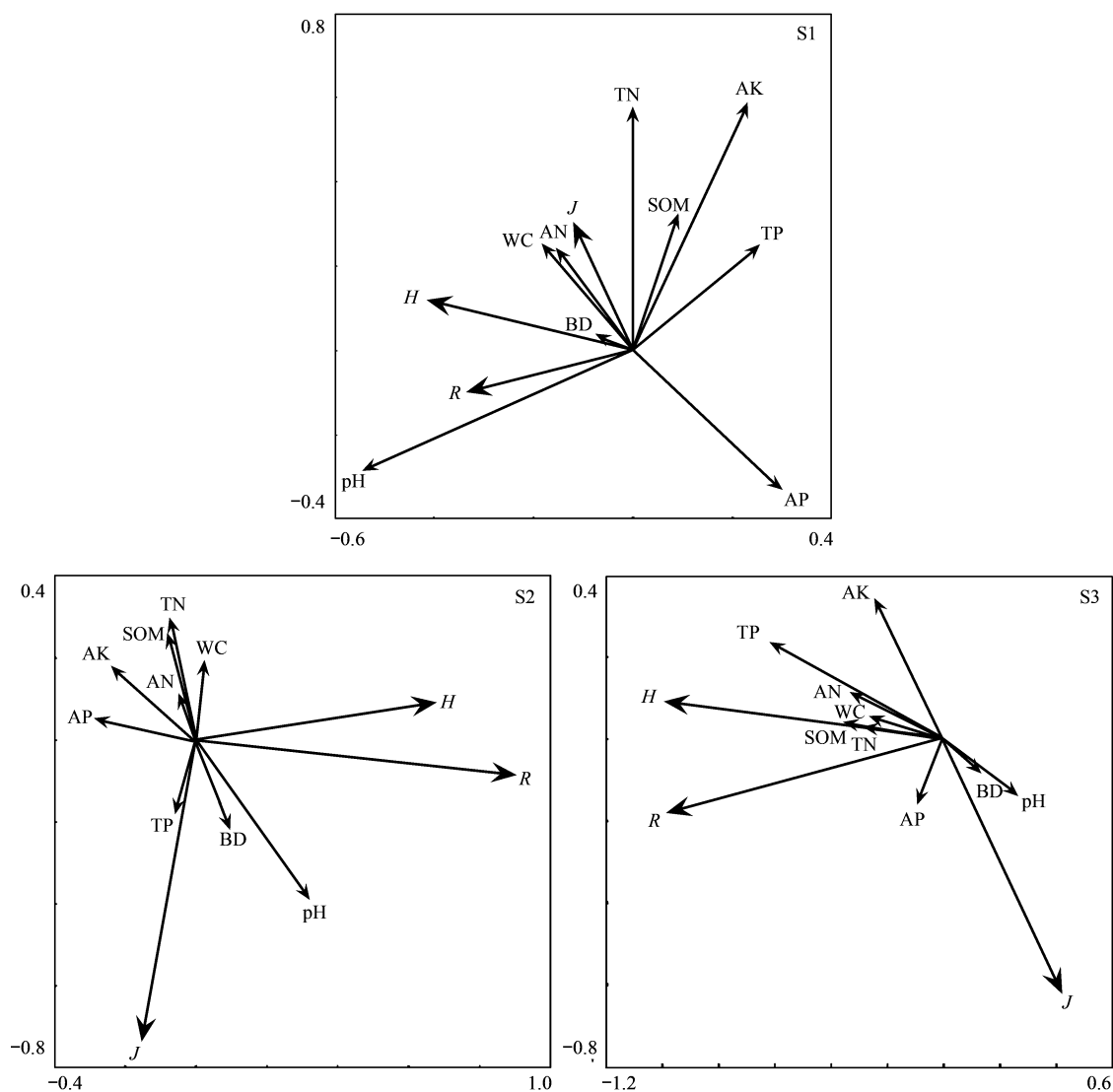


图 5 各盐分梯度植物多样性与土壤因子的 RDA 排序

Fig.5 RDA ordination of plant diversity and soil factors in different salinity gradients

RDA: 冗余分析, Redundancy Analysis; 加粗箭头表示植物多样性指数, 常规箭头表示土壤因子

3 讨论

3.1 不同盐分梯度下植物群落科属种组成变化

植物群落的物种组成作为反映其结构变化的重要指示因子, 是了解群落的基础和群落性质的关键^[24]。本研究中黑河中游湿地 87 个样方中共出现植物 102 种, 隶属于 30 科 71 属, 可见黑河中游湿地植物组成比较丰富。相较于平陆黄河湿地^[25]等湿润、半湿润地区, 该湿地的植物种类组成较少; 但略高于塔里木河中下游湿地^[26]、黑河下游额济纳绿洲^[22]、艾比湖湿地^[15], 土壤类型与湿地类型决定了该区植物群落组成^[19]。禾本科、菊科和藜科为该区物种数最多的 3 个科, 与塔里木河湿地、艾比湖湿地等地区的主要植物组成相似, 证明了其作为世界广布科对环境高度的适应性^[15, 22]。

本研究结果表明, 黑河中游湿地各科植物的属数、物种数均随土壤盐分的增加而减少, 表明高盐梯度生境对植物具有显著的胁迫, 同时不同盐分梯度下, 植物群落结构有较大差异, 这与王盼盼等在艾比湖湿地研究的结果一致^[27]。可能是由于随土壤盐分梯度的增加, 植物对土壤资源的有效性利用程度降低, 某些对盐分耐受

性较小的物种生长发育受到限制,导致植物种数随盐分的增加而减少^[27-29]。此外,土壤盐分梯度的变化引起植物物种更替,表明植物物种对不同土壤盐分梯度生境的适应性具有差异,可能是物种的生物学特性导致物种对土壤盐分响应不同^[28]。本研究结果中,香蒲等生态位宽度较小的植物和假苇拂子茅等生态位宽度适中的植物,抗盐性较弱,随土壤盐分增加逐渐消失;刺毛碱蓬、盐角草等为聚盐植物,对土壤盐分的耐受性强,在高盐梯度生境中更易存活。

3.2 不同盐分梯度下植物多样性指数变化

植物生长发育受土壤环境条件制约,土壤盐分是干旱区植物多样性的主要影响因子^[13,15]。本研究发现,Margalef 丰富度指数(R)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)均随土壤盐分梯度的增加逐渐减小,表明随土壤盐分增加湿地植物物种数减少,此规律已被其他研究者证实^[7,30-31]。这是由于土壤中高浓度的盐会抑制植物生长,耐盐性较小的物种在高盐梯度中被淘汰,最终导致随盐分增加丰富度指数减小^[6,29]。此外,土壤盐分增加也是生物多样性丧失的原因^[4,8]。

Shannon-Wiener 多样性指数(H)是多度和均匀度的度量,较高的值表示多度和均匀度更大^[32]。本研究区中,该指数随土壤盐分的增加逐渐减小,而均匀度指数随盐分梯度无明显变化,表明研究区内植物多度随土壤盐分增加而减小,有研究者也发现从淡水湿地到盐沼植物多度总体减小^[7]。土壤中可溶性盐含量改变土壤性质和组成,间接影响土壤生物的生存与繁殖,从而导致生物多样性变化^[33]。本研究结果中不同盐分梯度间植物多样性指数差异近乎显著($P<0.1$),而其他研究者发现不同盐分梯度植物多样性指数显著下降($P<0.05$)^[15],是由于在中等至极端环境条件下,物种间正相互作用非常重要,其改善生境条件促进物种存活,进而增强物种多样性^[7,34]。

Pielou 均匀度指数(J)即物种间丰富度的相似程度。张雪妮等^[15]发现均匀度指数随土壤盐分梯度的增加而减小,Crain 等^[35]发现低盐梯度中的均匀度指数较高,Engels 和 Jensen^[7]研究发现湿地植被均匀度随盐分梯度变化呈波动变化,可以看出湿地植物均匀度随盐分的变化未表现出确定的变化规律。本文的研究结果显示,盐分与均匀度之间无明显的变化规律。尽管如此,我们仍然发现高盐梯度中植物均匀度最高,这与 Engels 和 Jensen^[7]的结果近似。这可能是由于低的均匀度值表明一个物种比其他物种占优势^[36],而高盐梯度下植物物种数少,较低盐梯度植物组成单一,没有明显的优势物种,故在该梯度下均匀度指数较高^[15]。

3.3 植物群落多样性与土壤因子关系

植物群落多样性与土壤因子之间关系密切。与土壤水分相关的土壤因子和植物分布显著相关,其中段后浪等^[37]认为 pH 对植物分布影响最为显著,Hájek 等^[38]得出土壤含水率也可以通过影响养分的可利用性来影响植物分布,进而影响物种多样性^[7,38-39]。本文的研究结果表明,中、低盐分梯度影响植物多样性的土壤因子较为相似,土壤含水率在各盐分梯度中均与植物多样性无显著相关关系,而 pH 与其相关性更为明显,这与大多数研究认为的土壤含水率是影响干旱区湿地植物多样性主要因子的结论有所不同^[40-41]。这是因为土壤含水率并不直接影响植物的物种丰富度和多度,但它会通过土壤 pH 值对土壤变量产生间接影响^[42]。此外,部分学者对中低盐湿地的研究发现,土壤养分决定着植物的生态特征(如优势种高度等)^[43],速效磷与湿地植物多样性的变化显著相关^[44-45],证实了本文的研究结果。土壤磷、钾、有机质等含量较低的生境植物物种丰富度较高,植物生长过程受土壤养分制约,土壤养分含量之间的差异导致植物多样性发生变化,这也与 Merunková 和 Chytrý 得出的结论吻合^[46]。

土壤有机质作为土壤养分的主要指标,其含量直接影响土壤肥力状况,进而影响植物生长发育水平及多样性^[47]。本研究中高盐梯度有机质、含水率显著高于低盐梯度,且高盐梯度下土壤含水率与土壤有机质含量存在显著相关性($r=0.9014, P<0.01$),干旱气候条件下有机质能提高土壤持水能力^[13],因此高盐梯度,土壤有机质是影响植物群落多样性的主要土壤因子。此外,土壤全磷、速效钾和速效氮也对高盐梯度植物多样性产生影响,其对植物群落多样性的影响在同类型湿地的研究中得到强调^[31,48]。

4 结论

综上所述,黑河中游湿地植物组成比较丰富,植物群落多样性随土壤盐分增加逐渐减少。低、中盐梯度影响植物多样性的土壤因子较为相似,低盐梯度是 pH、速效钾和全氮,中盐梯度是 pH、速效磷和速效钾,有机质、全磷、速效钾和速效氮对高盐梯度植物多样性影响较大。干旱区土壤盐分积累较强已成为严重的环境问题^[12],文章结果表明,这可能导致植物组成改变,湿地植物群落多样性下降。在干旱区湿地生态系统中,植被结构的改变可能导致生态系统功能的变化。因此,适当的盐分条件管理对黑河中游湿地的保护和恢复具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Laurance S G W, Baider C, Florens F B V, Ramrekha S, Sevathian J C, Hammond D S. Drivers of wetland disturbance and biodiversity impacts on a tropical oceanic island. *Biological Conservation*, 2012, 149(1): 136-142.
- [2] Lukács B A, Sramkó G, Molnár V A. Plant diversity and conservation value of continental temporary pools. *Biological Conservation*, 2013, 158: 393-400.
- [3] Hu S J, Niu Z G, Chen Y F, Li L F, Zhang H Y. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 319-327.
- [4] Gerdol R, Brancaloni L, Lastrucci L, Nobili G, Pellizzari M, Ravaglioli M, Viciani D. Wetland plant diversity in a coastal nature reserve in Italy: relationships with salinization and eutrophication and implications for nature conservation. *Estuaries and Coasts*, 2018, 41(7): 2079-2091.
- [5] 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.
- [6] Janousek C N, Folger C L. Variation in tidal wetland plant diversity and composition within and among coastal estuaries: assessing the relative importance of environmental gradients. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(2): 534-545.
- [7] Engels J G, Jensen K. Patterns of wetland plant diversity along estuarine stress gradients of the Elbe (Germany) and Connecticut (USA) Rivers. *Plant Ecology & Diversity*, 2009, 2(3): 301-311.
- [8] Brock M A, Nielsen D L, Crosslé K. Changes in biotic communities developing from freshwater wetland sediments under experimental salinity and water regimes. *Freshwater Biology*, 2005, 50(8): 1376-1390.
- [9] Siles G, Voirin Y, Béné G B. Open-source based geo-platform to support management of wetlands and biodiversity in Quebec. *Ecological Informatics*, 2018, 43: 84-95.
- [10] Crawford J T, Stone A G. Relationships between soil composition and *Spartina alterniflora* dieback in an Atlantic salt marsh. *Wetlands*, 2015, 35(1): 13-20.
- [11] Bui E N. Soil salinity: a neglected factor in plant ecology and biogeography. *Journal of Arid Environments*, 2013, 92: 14-25.
- [12] Wang Y G, Deng C Y, Liu Y, Niu Z R, Li Y. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 177-185.
- [13] Chenchouni H. Edaphic factors controlling the distribution of inland halophytes in an ephemeral salt lake "Sabkha ecosystem" at North African semi-arid lands. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 660-671.
- [14] González-Alcaraz M N, Jiménez-Cárceles F J, Álvarez Y, Álvarez-Rogel J. Gradients of soil salinity and moisture, and plant distribution, in a Mediterranean semiarid saline watershed: a model of soil-plant relationships for contributing to the management. *CATENA*, 2014, 115: 150-158.
- [15] 张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 贡璐, 秦璐, 何学敏, 刘昊奇. 基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应. *生态学报*, 2013, 33(18): 5714-5722.
- [16] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 姜朋辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *地理科学*, 2013, 33(3): 363-370.
- [17] 赵锐锋, 周华荣, 钱亦兵, 张建军. 塔里木河中下游湿地及周边植物群落与环境因子的关系初探. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 955-960.
- [18] Zhao R F, Xie Z L, Zhang L H, Zhu W, Li J, Liang D. Assessment of wetland fragmentation in the middle reaches of the Heihe River by the type change tracker model. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 177-188.
- [19] 赵海莉, 赵锐锋, 张丽华, 姜朋辉, 金建玲. 黑河中游湿地典型植物群落特征与物种多样性. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 813-820.
- [20] 冯威, 赵成章, 岳冉, 张翔, 金建鑫. 张掖国家湿地公园冬春季鸟类群落多样性和相似性分析. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2224-2231.
- [21] 田国成, 王钰, 孙路, 施明新, 吴发启. 秸秆焚烧对土壤有机质和氮磷钾含量的影响. *生态学报*, 2016, 36(2): 387-393.

- [22] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 席海洋. 黑河下游额济纳绿洲植物群落特征与物种多样性研究. 西北植物学报, 2011, 31(5): 1032-1038.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [24] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 梁宗锁. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系. 草地学报, 2012, 20(4): 609-615.
- [25] 秦晓娟, 董刚, 邓永利, 毛空, 李旭华, 张峰. 山西平陆黄河湿地植物分类学多样性. 生态学报, 2015, 35(2): 409-415.
- [26] 李玉霞, 周华荣. 干旱区湿地景观植物群落与环境因子的关系. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6): 43-49.
- [27] 王盼盼, 李艳红, 张小萌. 艾比湖湿地植物群落变化对盐分环境梯度的响应. 生态环境学报, 2015, 24(1): 29-33.
- [28] 王鑫, 胡玉昆, 热合木都拉·阿迪拉, 柳妍妍, 李凯辉, 王吉云. 土壤盐分对高寒草甸主要植物生态位的影响. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1448-1454.
- [29] Iqbal T. Rice straw amendment ameliorates harmful effect of salinity and increases nitrogen availability in a saline paddy soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2016, doi: 10.1016/j.jssas.2016.11.002.
- [30] Guo H Y, Pennings S C. Mechanisms mediating plant distributions across estuarine landscapes in a low-latitude tidal estuary. Ecology, 2012, 93(1): 90-100.
- [31] Youcef H, Lamine B M, Hocine B, Rabah M, Ali L, Mohamed B. Diversity of halophyte desert vegetation of the different saline habitats in the valley of Oued Righ, Low Sahara Basin, Algeria. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 2012, 4(3): 308-315.
- [32] Millar C I, Westfall R D, Evenden A, Holmquist J G, Schmidt-Gengenbach J, Franklin R S, Nachlinger J, Delany D L. Potential climatic refugia in semi-arid, temperate mountains: Plant and arthropod assemblages associated with rock glaciers, talus slopes, and their forefield wetlands, Sierra Nevada, California, USA. Quaternary International, 2015, 387: 106-121.
- [33] Yin X Q, Ma C, He H S, Wang Z H, Li X Q, Fu G Q, Liu J, Zheng Y M. Distribution and diversity patterns of soil fauna in different salinization habitats of Songnen Grasslands, China. Applied Soil Ecology, 2018, 123: 375-383.
- [34] Michalet R, Brooker R W, Cavieres L A, Kikvidze Z, Lortie C J, Pugnaire F I, Valiente-Banuet A, Callaway R M. Do biotic interactions shape both sides of the humped-back model of species richness in plant communities? Ecology Letters, 2006, 9(7): 767-773.
- [35] Crain C M, Silliman B R, Bertness S L, Bertness M D. Physical and biotic drivers of plant distribution across estuarine salinity gradients. Ecology, 2004, 85(9): 2539-2549.
- [36] Scrosati R, Heaven C. Spatial trends in community richness, diversity, and evenness across rocky intertidal environmental stress gradients in eastern Canada. Marine Ecology Progress Series, 2007, 342: 1-14.
- [37] 段后浪, 赵安, 姚忠. 恒湖农场茶叶港草洲枯水期湿地植物与土壤关系及种群生态位分析. 生态学报, 2017, 37(11): 3744-3754.
- [38] Hájek M, Hájková P, Kočí M, Jiroušek M, Mikulášková E, Kintrová K. Do we need soil moisture measurements in the vegetation-environment studies in wetlands? Journal of Vegetation Science, 2013, 24(1): 127-137.
- [39] Chen X S, Li X, Xie Y H, Li F, Hou Z Y, Zeng J. Combined influence of hydrological gradient and edaphic factors on the distribution of macrophyte communities in Dongting Lake wetlands, China. Wetlands Ecology and Management, 2015, 23(3): 481-490.
- [40] 许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 龚雪平, 郝媛媛, 张立勋. 黑河河岸植被与环境因子间的相互作用. 生态学报, 2011, 31(9): 2421-2429.
- [41] Wu G L, Zhang Z N, Wang D, Shi Z H, Zhu Y J. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1362-1367.
- [42] Ma M J, Baskin C C, Yu K L, Ma Z, Du G Z. Wetland drying indirectly influences plant community and seed bank diversity through soil pH. Ecological Indicators, 2017, 80: 186-195.
- [43] Fan H X, Xu L G, Wang X L, Jiang J H, Feng W J, You H L. Relationship between vegetation community distribution patterns and environmental factors in typical wetlands of Poyang Lake, China. Wetlands, 2017, doi: 10.1007/s13157-017-0903-7.
- [44] 李旭, 李峰, 谢永宏, 邓武军, 曾静, 侯志勇, 陈心胜, 邓正苗. 洞庭湖荻-苔草群落交错带植被动态及影响因子——以北洲子洲滩为例. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1020-1026.
- [45] 罗琰, 苏德荣, 纪宝明, 吕世海, 韩立亮, 李兴福. 辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系. 草业学报, 2018, 27(3): 33-43.
- [46] Merunková K, Chytrý M. Environmental control of species richness and composition in upland grasslands of the southern Czech Republic. Plant Ecology, 2012, 213(4): 591-602.
- [47] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 赵发珠, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. 草地学报, 2014, 22(2): 291-298.
- [48] 李艳红, 李发东, 马雯. 艾比湖湿地植物多样性特征及其影响因素研究. 生态科学, 2016, 35(3): 78-84.