

石羊河尾间人工湿地植被分布与土壤因子关系研究

赵 鹏^{1,2,3}, 安富博^{3*}, 赵赫然³, 张裕年³, 段晓峰³

(1. 甘肃省治沙研究所 干旱区生态和荒漠化防治博士后工作站, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州大学 大气科学博士后流动站, 甘肃 兰州 730010; 3. 甘肃临泽荒漠生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 临泽 734200)

摘 要:根据野外样地调查资料,结合室内分析,采用典范对应分析 CCA 方法,研究荒漠植被分布与土壤因子的关系,以期对石羊河下游人工湿地植被恢复与重建提供理论支撑。结果表明,人工湿地荒漠植被群落以耐盐碱的湿生物种为主,包括 24 个植物种,其中灌木 8 种,多年生草本 8 种,1 年生草本 8 种,草本植物占总物种数的 66.67%。白刺、芦苇、梭梭、黑果枸杞、盐爪爪、猪毛菜、盐生草生态位宽度较大,对生态输水后青土湖人工湿地生境的适应能力较强。湖区土壤水分均值为 9.85%,黏粒含量均值 5.25%,粉粒含量均值为 21.22%,砂粒含量均值为 73.52%。有机质含量均值为 11.8 g/kg。TN 含量均值为 5.8 g/kg、速效磷含量均值为 0.2 mg/kg, pH 均值为 7.39,电导率均值 578.31 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 。表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主。CCA 排序表明土壤水分、速效磷、电导率是人工湿地植被群落空间分布的关键驱动因子。

关键词:人工湿地;荒漠植被;土壤因子;生态位;空间分布

中图分类号:S718.53

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0095-08

Relationship Between Soil Factors and Spatial Distribution of Desert Vegetation in Artificial Wetland of the Low Reaches of Shiyang River

ZHAO Peng^{1,2,3}, AN Fu-bo^{3*}, ZHAO He-ran³, ZHANG Yu-nian³, DUAN Xiao-feng³

(1. Arid Zone Ecology and Desertification Control Postdoctoral Research Workstation, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Atmospheric Sciences Postdoctoral Station, Lanzhou University, Lanzhou 730010, Gansu, China;

3. Gansu Linze National Positioning Observation and Research Station for Desert Ecosystem, Linze 734200, Gansu, China)

Abstract:Based on field survey data and laboratory analysis, CCA canonical correspondence analysis was used to study the relationship between desert vegetation distribution and soil factors to provide theoretical support for vegetation restoration and reconstruction in artificial wetland in the lower reaches of the Shiyang River. The results showed that the desert vegetation community of artificial wetland was dominated by saline-alkali tolerant wet species, including 24 plant species (8 shrubs, 8 perennial herbs and 8 annual herbs), and herbs accounted for 66.67% of the total. The ecological niche widths of *Nitraria tangutorum*, *Phragmites australis*, *Haloxyylon ammodendron*, *Lycium ruthenicum*, *Kalidium foliatum*, *Kali collinum*, and *Halogeton glomeratus* were larger, and they had strong adaptability to the artificial wetland habitat after ecological water transport. The mean soil moisture content, clay content, silt content and sand content in the lake area were 9.85%, 5.25%, 21.22% and 73.52%, respectively. The mean soil organic matter content was 11.8 g/kg, total nitrogen content: 5.8 g/kg, available phosphorus content: 0.2 mg/kg, pH: 7.39, and electrical conductivity: 578.31 $\mu\text{m}/\text{cm}$. The particle size composition of surface soil was mainly fine

收稿日期:2022-08-22 修回日期:2022-10-11

基金项目:甘肃省自然科学基金(20JR5RA095, 20JR5RA091);甘肃省重点研发计划(20YF3FA008);2020 年甘肃省青年科技人才托举工程项目。

第一作者:赵 鹏,博士,副研究员。研究方向:荒漠植被生态。E-mail:zhpg1987@sina.com

* 通信作者:安富博,硕士,研究员。研究方向:荒漠化防治。E-mail:313961565@qq.com

sand, silt and very fine sand. CCA analysis showed that soil moisture, available phosphorus, and electrical conductivity were the key driving factors of the spatial distribution pattern of desert vegetation communities in the artificial wetland.

Key words: artificial wetland; desert vegetation; soil factors; niche; spatial distribution

植被群落是植物长期适应一定气候、土壤、水分等自然环境的综合体现。植被群落与土壤二者的分布特征及相互关系是生态学研究的重要内容^[1]。土壤理化性质是植被演替的重要驱动力之一, 植被群落的演替过程实质是植物对土壤环境的适应过程^[2]。土壤为植被提供必要的物质基础, 决定了全球干旱半干旱生态系统植被群落物种组成与初级生产力之间的关系。土壤理化性质的变异是造成植物种群空间分布差异主要原因之一^[3]。因此, 研究干旱区土壤特征与植被群落之间的关系, 有助于认识植被生态系统的结构与功能^[4]。

石羊河尾间人工湿地是阻挡腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠合拢的重要生态屏障。随着石羊河流域综合治理工程的实施, 青土湖地下水位回升明显。连续多年生态补水形成一定面积的人工湿地, 湿地蒸发成为夏季降水水汽来源之一, 对改善湖区生态环境具有重要的意义^[5]。已有研究集中在物种多样性及其土壤养分特征^[6]、不同土地利用类型土壤盐渍化特征^[7]、水分来源^[8]、典型植物群落土壤粒度的分布特征^[9]和植被特征与地表输沙量关系^[10], 针对荒漠植被-土壤关系的量化研究相对匮乏。因此, 本文基于野外样方调查与室内分析数据, 运用数量生态学方法, 开展荒漠植被分布与土壤因子相互作用关系研究, 以期为人工湿地的植被恢复与重建提供理论依据。

1 研究区概况

民勤县地处石羊河流域下游, 东、北、西三面被腾格里和巴丹吉林沙漠包围, 生态环境十分脆弱, 属典型温带大陆性荒漠气候。据甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站观测资料(1959—2020), 多年日平均气温 7.6 °C, 年均日较差 15.2 °C, ≥ 10 °C 积温为 3 036.4 °C, 多年平均水面蒸发量为 2 664.00 mm, 无霜期 189 d; 降水稀少且分布不均, 年平均降水量为 115.41 mm, 主要集中在每年的 7—9 月, 占年均总降水量的 60%。主导风向为西北风, 年平均风速 2.5 m/s, 年平均大风日数 25.1 d, 年平均沙尘暴日数 25.6 d。石羊河进入民勤县境后分流为东大河、大西河、小西河、外河等支流汇入青土湖。青土湖是石羊河的尾间湖, 1959 年完全干涸, 湖盆植物逐渐死亡, 湖泊沙化、盐化。

2010 年, 石羊河流域综合治理工程通过总干渠向青土湖跨流域生态补水。2012 年, 青土湖形成 15 km² 的人工湿地。石羊河下游位于干草原向荒漠过渡区域, 有天然种子植物 23 个科, 73 个属, 123 个种^[11]。典型植物种有白刺、梭梭、多枝怪柳、黑果枸杞、盐爪爪、沙蒿(*Artemisia arenaria*)、芦苇、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜、碟果虫实(*Corispermum pattenii*)等。

2 材料与方法

2.1 野外调查

2018 年 9 月, 按照青土湖人工湿地的生境水分梯度, 结合典型植被-土壤特征及人工输水影响区的空间位置, 在湖盆外围和人工水面附近共设置 3 条植被群落调查样带。每条样带上间隔 500 m 设置 1 个 100 m×100 m 样地, 每个样地平行设置间隔 30 m 的 10 m×10 m 灌木样地 3 个, 同时每个灌木样方内沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方, 共调查灌木样方 27 个, 草本样方 81 个。统计记录样方内植物种类、个体数、盖度、高度。用 GPS 记录样地经纬度、海拔。采用直径 5 cm 土钻钻取土壤样品, 深度 100 cm, 分层采样。即 0~5、5~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共 6 层, 每个样地随机取 3 个重复, 将每层样品混合均匀后带回实验室, 风干、过 2 mm 的筛去除砾石和其他杂物。

2.2 土壤理化性质分析

参照中华人民共和国农业行业标准 NY/T 1121.7—2014 土壤检测标准, 用电子天平(1/1 000 g)称取鲜重, 置于电热恒温鼓风干燥箱, 在 105 °C 高温烘干 12 h 至恒重, 待冷却后称其干重。土壤含水量计算公式: 土壤含水量(%)=(土壤鲜重-土壤干重)/土壤干重×100。土壤有机质, 重铬酸钾容量法; 全氮, 凯氏法; 速效磷, 0.5 mol/L 碳酸氢钠熔融-钼锑抗比色法; 土壤机械组成, 用马尔文激光粒度仪测定; 土壤 pH: 采用 pH 计(PHS-3C, 雷磁)测定, 水土比为 5:1; 电导率采用 DDSJ-308 电导率仪测定电导率值, 水土比为 5:1。将 0~100 cm 土层范围内的每一层土壤样品理化性质分析测定值取平均值代表灌木样方的土壤理化性质。

2.3 数据处理

2.3.1 重要值 在统计各样地植物高度、盖度、密

度及频度的基础上,采用日本学者沼田真(1979)的计测方法计算物种重要值^[12]。具体计算公式如下

重要值 IV=(相对密度+相对频率+相对盖度+相对高度)/4 (1)

2.3.2 生态位宽度 采用 Levins 提出经修正的公式计算生态位宽度(B_i)^[13]。其公式如下

$$B_i = \frac{1}{r \times \sum_{k=1}^r (P_{ij})^2}$$
 (2)

式中: B_i 为第 i 物种的生态位宽度。

采用 R 4.0.3 软件程序包 spaa 中函数 niche.width 计算生态位宽度。

2.3.3 排序分析 群落排序软件采用国际标准生态学软件 CANOCO5.0,排序分析方法如下:先对物种重要值-样方数据进行采用除趋势对应分析(detrend correspondence analysis, DCA),根据 DCA 排序轴的梯度长度选择适宜的排序方法。一般排序轴梯度长度<3 时,宜采用线性模型排序;梯度长度>4 时,宜采用单峰模型排序;梯度长度介于 3 和 4,2 种模型都适合。排序前对所环境因子进行 RDA 筛选,若某环境因子的变异膨胀因子(inflation factor)>20,表明与其他环境因子有多重共线性,对

模型的贡献很小可以舍去。

3 结果与分析

3.1 植被群落特征

根据野外调查结果(表 1),石羊河尾间青土湖人工湿地植物群落共有植物种 24 种,其中:灌木共 8 种,优势植物种有白刺、梭梭、盐爪爪、黑果枸杞。多年生草本植物 8 种,优势种有芦苇、黄花补血草、戈壁霸王;1 年生草本优势种植物有 8 种,优势种有猪毛菜、沙蓬、盐生草。参考植物种累计重要值,荒漠植物群落可命名为白刺+芦苇+猪毛菜,以湿生耐盐碱植物种为主。群落层片结构简单,1 年生和多年生草本植物占总物种数的 66.67%。生境多为盐碱滩地、半固定沙丘。人工湿地荒漠植物群落中生态位宽度较高的灌木有白刺(21.728)、梭梭(10.321)、黑果枸杞(5.711)、盐爪爪(5.139);多年生草本有芦苇(12.556)、黄花补血草(4.874)、沙蒿(3.549);1 年生草本有猪毛菜(9.340)、盐生草(7.822)、虫实(2.330)。红砂(1.991)、画眉草(1.994)、虫实(1.471)的生态位宽度相对较小,对青土湖人工湿地生态环境条件的适应性较差,种间竞争优势小。

表 1 石羊河下游人工湿地植被群落物种重要值和生态位宽度

Table 1 Species importance value and niche width of desert plant communities in artificial wetland in low reaches of the Shiyang River

植物种	生活型	重要值	生态位宽度
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge	灌木	359.70	10.321
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> Spreng.	半灌木	25.62	3.549
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i> Bobr.	灌木	881.51	21.728
多枝怪柳 <i>Tamarix chinensis</i> Lour.	灌木	118.02	5.124
红砂 <i>Reaumuria soongarica</i> (Pallas) Maximowicz	灌木	25.45	1.991
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> Kom.	灌木	9.96	1.023
黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i> Murray	灌木	101.27	5.711
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i> (Pall.) Moq.	灌木	175.42	5.139
沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i> (Trin.) Bor	多年生草本	19.11	1.014
芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	多年生草本	542.09	12.556
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i> L.	多年生草本	4.68	1.234
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i> L.	多年生草本	6.82	1.003
黄花补血草 <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill.	多年生草本	93.07	4.874
荒漠黄耆 <i>Astragalus grubovii</i> Sanchir	多年生草本	34.66	4.248
戈壁霸王 <i>Zygophyllum gobicum</i> Maxim.	多年生草本	72.91	2.781
花花柴 <i>Karelinia caspia</i> (Pall.) Less.	多年生草本	6.35	2.028
盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i> (Bieb.) C. A. Mey.	1 年生草本	144.97	7.822
猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	1 年生草本	164.13	9.340
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i> (L.) Beauv.	1 年生草本	6.27	1.994
碟果虫实 <i>Corispermum patelliforme</i> Iljin	1 年生草本	67.14	2.330
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i> (Fisch. et Mey.) O. Kuntze	1 年生草本	83.73	6.237
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i> (L.) Moq.	1 年生草本	149.52	5.776
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i> L.	1 年生草本	3.06	1.212
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i> Turcz.	1 年生草本	4.54	1.326

3.2 土壤理化性质

由表 2 可知,石羊河尾间人工湿地植被群落的土壤水分含量为 2.42%~16.46%,均值为 9.85%,变异系数为 39.16%,水分条件较优;土壤粒度组成,黏粒含量介于 1.18%~16%,均值 5.25%,变异系数为 72.27%;粉粒含量变化范围为 3.25%~54.26%,均值为 21.22%,变异系数最大为 72.20%;土壤砂粒变化范围为 34.89%~95.57%,均值为 73.52%,变异系数为 25.74%。土壤养分指标中,有机质含量介于 5.3~15.8 g/kg,均值为

11.8 g/kg,变异系数 22.98%。TN 介于 1.0~15.3 g/kg,均值为 5.8 g/kg,变异系数 68.22%。速效磷变化范围为 0.1~0.5 mg/kg,均值为 0.2 mg/kg,变异系数 61.44%,属于中等变异。土壤 pH 的变化范围为 6.72~8.10,均值为 7.39,变异系数 4.93%,属于弱变异。电导率介于 90.6~1 290.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$,均值为 578.31 $\mu\text{S}/\text{cm}$,变异系数 67.06%(表 2)。表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主,分别占 36.66%、27.98%、22.83%。细砂为优势粒级,细砂、极细砂和粉粒含量占 87.47%(表 3)。

表 2 石羊河尾间人工湿地土壤因子描述统计

Table 2 Descriptive statistics of soil factors of artificial wetland in the low reaches of the Shiyang River

土壤理化性质	最小值	最大值	平均	标准差	峰度	偏度	变异系数(%)
土壤水分 SW (%)	2.42	16.46	9.85	3.86	-0.84	-0.30	39.16
黏粒 Clay (%)	1.18	16.00	5.25	3.80	0.85	1.05	72.27
粉粒 Silt (%)	3.25	54.26	21.22	15.33	-0.81	0.55	72.20
砂粒 Sand (%)	34.89	95.57	73.52	18.93	-0.76	-0.59	25.74
全氮 TN (%)	0.10	1.53	0.58	0.39	0.35	1.03	68.22
速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	0.1	0.5	0.2	0.1	0.19	1.06	61.44
有机质 SOM(%)	0.53	1.58	1.18	0.27	-0.12	-0.69	22.98
pH	6.72	8.10	7.39	0.36	-0.48	-0.41	4.93
电导率 EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	90.60	1290.10	578.31	387.82	-1.21	0.44	67.06

3.3 植被分布与土壤因子的关系

石羊河尾间人工湿地植被群落的除趋势对应分析(DCA)排序表明,所有轴的梯度长度最大为 3.4 (>3),故选择单峰排序模型典范对应分析(CCA)。CCA 排序结果表明,所有典范排序轴通过统计检验($P=0.001$),总变异方差为 2.51,环境因子解释了 39.90%的总变异。CCA 排序前 2 个轴特征值占总特征值的 56.41%,包含了绝大部分信息,故采用前两轴的数据分析人工湿地植被群落与环境因子的关系(表 4)。

CCA 排序图反映了石羊河尾间青土湖人工湿地植被分布与环境因子间的关系(图 1)。CCA 第Ⅰ轴与

土壤含水率、电导率呈正相关关系,与土壤速效磷呈负相关关系,主要代表了土壤水分的生境变化梯度。CCA 第Ⅱ轴与土壤粉粒、TN、黏粒、有机质呈正相关关系,与 pH 呈负相关关系,主要代表了土壤养分的梯度变化。盐爪爪、黑果枸杞、驼蹄瓣等耐盐碱植物种分布在土壤水分和养分条件较好的第Ⅰ象限。沙蓬、梭梭、碟果虫实等沙生、耐旱植物种分布在排序图的第Ⅱ象限,代表水分、盐分低的土壤生境。花花柴、苦豆子、五星蒿等植物种分布在排序图第Ⅲ象限,代表盐碱较轻的干旱沙丘。白刺、沙蒿、芦苇、盐生草等植物种对水分的要求高,但对养分的要求较低,集中分布在盐分较高的排序图第Ⅳ象限。

表 3 石羊河尾间人工湿地表层土壤粒度组成

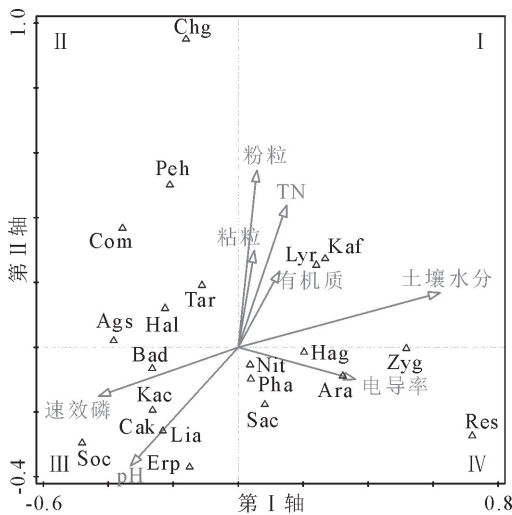
Table 3 Grain size components of soil surface of artificial wetland in the low reaches of the Shiyang River

粒径分级/mm	黏粒 <0.002	粉粒 0.002~0.05	极细砂 0.05~0.1	细砂 0.1~0.25	中砂 0.25~0.5	粗砂 0.5~1.0	极粗砂 1.0~2.0
最大值	17.24	79.95	45.67	65.12	23.27	0.87	0.00
最小值	0.95	3.76	8.25	1.18	0.01	0.00	0.00
平均值	4.16±3.89	27.98±25.08	22.83±8.93	36.66±21.01	8.30±7.33	0.07±0.22	0±0

表 4 石羊河尾间人工湿地荒漠植被群落的 CCA 排序分析

Table 4 The CCA analysis of the species variance of desert vegetation at artificial wetland in the low reaches of the Shiyang River

排序轴	第Ⅰ轴	第Ⅱ轴	第Ⅲ轴	第Ⅳ轴
特征值	0.35	0.21	0.17	0.11
物种-环境因子相关性	0.88	0.83	0.79	0.77
物种数据方差解释累计百分比(%)	14.10	22.50	29.26	33.81
物种-环境因子关系数据累计百分比方差(%)	35.35	56.41	73.34	84.77



△表示植物种,梭梭-Hal,沙蒿-Ara,白刺-Nit,怪柳-Tar,红砂-Res,柠条-Cak,沙米-Ags,黄花矾松-Lia,五星蒿-Bad,盐生草-Hag,猪毛菜-Sac,画眉草-Erp,芦苇-Pha,苦豆子-Soc,虫实-Com,骆驼蓬-Peh,黑果枸杞-Lyr,盐爪爪-Kaf,戈壁驴蹄瓣-Zyg,灰绿藜-Chg,花花柴-Kac。

图 1 石羊河尾间人工湿地植被群落物种分布与土壤因子的 CCA 排序

Fig.1 CCA two-dimensional ordination diagram for species and soil variables of vegetation at artificial wetland in the low reaches of the Shiyang River

不同土壤环境因子对青土湖人工湿地植被群落物种空间分布的影响存在差异(表 5)。边际影响条件下,土壤环境因子的重要性排序为土壤水分(8.3%)>速效磷(6.2%)>pH(4.9%)>电导率(4.7%)>TN(4.4%)>粉粒(4.2%)>有机质(4.1%)>砂粒(4%)>粘粒(2.9%)。土壤水分、速效磷对人工湿地植被群落分布的影响分别达到极显著、显著水平。条件影响下,土壤环境因子的重要性排序为土壤水分(8.3%)>速效磷(6.8%)>电导率(5.2%)>粉粒(5.1%)>pH(4.9%)>黏粒(4.7%)>有机质(2.9%)>TN(2.6%)。土壤水分、速效磷对人工湿地植被群落分布的影响分别达到极显著水平($P<0.01$),电导率的影响达显著水平($P<0.05$)。

4 结论与讨论

4.1 结论

石羊河尾间人工湿地植被群落包括 24 个植物种,其中灌木 8 种,多年生草本 8 种,1 年生草本 8 种,以湿生耐盐碱的草本植物种为主,群落层片结构简单。

表 5 环境因子的蒙特卡洛检验

Table 5 Monte Carlo test of environmental factors

环境因子	边际影响			条件影响		
	解释率(%)	pseudo-F	P	解释率(%)	pseudo-F	P
土壤水分 SW	8.3	2.4	0.004**	8.3	2.4	0.006**
速效磷 AP	6.2	1.7	0.05*	6.8	2	0.01**
pH	4.9	1.3	0.154	4.2	1.3	0.164
电导率 EC	4.7	1.3	0.206	5.2	1.6	0.05*
全氮 TN	4.4	1.2	0.272	2.6	0.8	0.62
粉粒 Silt	4.2	1.2	0.292	5.1	1.5	0.096
有机质 SOM	4.1	1.1	0.342	2.9	0.9	0.49
砂粒 Sand	4	1.1	0.376	—	—	—
黏粒 Clay	2.9	0.8	0.694	4.7	1.5	0.112

注: ** 表示环境因子对群落物种组成的影响极显著($P<0.01$); * 表示环境因子对群落物种组成的影响显著($P<0.05$)。

生态位宽度较大的灌木有白刺(21.728)、梭梭(10.321)、黑果枸杞(5.711);多年生草本有芦苇(12.556)、黄花补血草(4.874)、荒漠黄耆(4.248);1 年生草本猪毛菜(9.340)、盐生草(7.822)、虫实(2.330)。

石羊河尾间人工湿地土壤水分和养分条件较好,表层土壤以细砂、粉粒和极细砂为主。土壤水分、速效磷、电导率是青土湖人工湿地植被空间分布的关键驱动因子。

4.2 讨论

生态位特征的量化有利于进行群落中物种间占据空间的范围和利用资源的能力的比较,因而引

起生态学家的普遍重视^[14]。狗尾草和炆台虫实在科尔沁沙地锦鸡儿群落整个演替过程中生态位宽度值都较大,是区域可利用资源最为丰富且具有最强、资源利用能力的最广生态幅物种^[15]。民勤沙区同一种植物在不同群落中的生态位宽度变幅较大,群落中的优势种植物的生态位最宽,当优势种生态位减小时,1 年生短命植物往往会进入群落^[16]。在石羊河下游裸果木群落中,裸果木的重要值和生态位宽度都明显高于群落中其他物种,为群落优势种,但裸果木群落极不稳定^[17]。宁夏中北部荒漠植被演替过程中每一群落类型优势种的作用非常明显,具有最大的生态位宽度。生态位宽度与演替序列的变

化较好地对应了种群动态^[18]。柴达木盆地 13 种荒漠植物在 6 个土壤因子上平均生态位宽度从大到小依次是: 驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides*、红砂、芨芨草 *Neotrinia splendens*、芦苇、合头草 *Sympagma regelii*、蒿叶猪毛菜 *Oreosalsola abrotanoides*、白刺、盐爪爪、小蒿草 *Kobresia*、麻黄 *Ephedra sinica*、沙拐枣 *Calligonum kozlovi*、怪柳和梭梭。其中, 驼绒藜在土壤含水量、容重和有机质上占据最高值, 红砂在土壤 pH、全盐、全氮值上占据最高值^[19]。由此可见, 土壤理化因子决定着荒漠植物生态位宽度。通过灌溉、排水等措施可以改变土壤水盐条件, 调整劣势羊草种群的生态位宽度, 进而提高羊草生物量和生产力^[20]。土壤水盐的协同效应影响着物种在群落的地位, 并在一定程度上决定了群落向正负两极演替的方向^[21]。生态输水促进了青土湖人工湿地芦苇群落依水蔓延, 镶嵌于水域成片分布; 距水面 50 m 范围的白刺群落由连续成片成点状。输水促进了湿生植物生长, 导致荒漠植物种退化^[22]。本研究中白刺、芦苇、梭梭、黑果枸杞、盐爪爪、猪毛菜、盐生草生态位宽度较高, 具有较强的资源利用能力, 同时能适应对生态补水后青土湖人工湿地的生境条件。青土湖人工湿地植被覆盖度时空演变特征明显, 可分为快速增长阶段和波动稳定阶段。生态输水抬高了当地地下水水位, 是促进植被恢复的关键因素。目前的输水形势下, 绿洲的生态水文过程达到动态平衡, 植被覆盖度变化会保持波动稳定^[23]。

植被分布格局与特定生境条件下土壤理化性质密切相关。敦煌盆地植被特征与土壤特性之间的空间自相关性关系较强^[24]。不同水深梯度引起植被生长环境中土壤水分、盐碱化程度的改变, 对黄河三角洲国家级自然保护区芦苇湿地植被空间分布及生态特征产生影响^[25]。盐地碱蓬和中华怪柳分布主要取决于土壤含盐量、Na⁺ 含量及距离海洋距离, 而各种植被类型的分布与土壤 TP、TN、有机质、Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 含量存在一定的关系^[26]。土壤的有机质含量、全盐含量、含水量和 pH 值等微生境使古尔班通古特沙漠植被沿其变化梯度以不甚耐盐碱的短命、类短命草本和小半灌木、半灌木为主的群落逐渐向耐盐碱的灌木、小乔木类群落转变^[27]。土壤对浑善达克沙地榆树疏林草本植物空间分布的影响较大, 而对本木植物(包括乔木和灌木)空间分布的影响较弱^[28]。土壤化学性质空间分布异质性与沙垄植被的分布格局密切相关, 相互影响^[29]。土壤水盐是塔里木河中游许多荒漠植物物种的限制因子^[30]。P 循环在维持荒漠生态系统的生物多样性水平、结

构和功能的稳定性、元素的动态平衡, 以及荒漠自然资源的可持续利用方面有重要作用。P 元素是构成细胞膜、DNA、RNA 和 RNA 的关键元素, 因其来源有限和有效性低磷也是荒漠生态系统的重要限制因子^[31]。P 元素通过参与荒漠植物光合和呼吸等过程维持正常的生理活动, 改变荒漠植物生理功能、生活策略和种群密度, 进而影响整个植被系统^[32]。土壤理化因子对荒漠湿地植物群落的演替具有重要的调节作用。与上述结论基本一致, 本研究 CCA 分析表明土壤水分、速效磷、电导率是石羊河尾间人工湿地植被群落空间分布的关键驱动因子。青土湖人工湿地为石羊河的尾间湖, 该区气候受季风、西风带和局域环境共同影响。2010 年开始的生态输水, 使地下水位的逐年抬升, 从 2006 年的 -4.1 m 回升到 2019 年的 -3.0 m, 具有明显的年代变化规律^[6]。同时干涸的青土湖形成一定面积的水域, 区域土壤水分条件得到改善。水面形成区影响白刺沙堆土壤水分, 增强细砂粒在近水面区域的沉降, 土壤养分含量总体偏低, 且含量不均, “表聚”现象明显^[33]。同时加剧了距水面边缘 0~150 m 处的土壤理化性质变化, 土壤细粒及养分出现富集, 分别在距水面边缘 100~150 m 和 300 m 处达到最大值^[34]。由于蒸发强烈, 生态输水也造成局部区域的土壤次生盐渍化过程加剧。生态输水起到了增加植物种的作用, 同时改变了种群结构和长势, 如加速了建群种白刺的衰退, 促进盐爪爪和芦苇大量发育, 植被和土壤特征有朝着盐生草甸演替的趋势^[35]。

参考文献:

- [1] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 265-269.
CHEN Y F, DONG M. Spatial pattern and correlation of vegetation characteristics and soil properties in the MU US sandy desert[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(3): 265-269. (in Chinese)
- [2] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 三江源地区不同建群期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
WANG C T, CAO G M, WANG Q L, et al. Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and their relationships with soil properties in the source region of Three River in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2426-2431. (in Chinese)
- [3] 张永智, 张强, 康晓珊, 等. 中国特有种艾比湖沙拐枣(*Calligonum ebinuricum*)不同生境的土壤特征分析[J]. 植物研究, 2011, 31(3): 347-353.
ZHANG Y Z, ZHANG Q, KANG X S, et al. Soil characteristics of the different habitats of Chinese endemic species *Calligonum ebinuricum*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31

- (3):347-353. (in Chinese)
- [4] 赵鹏,屈建军,韩庆杰,等. 敦煌绿洲边缘植物群落与土壤养分互馈关系[J]. 中国沙漠,2018,38(4):791-799.
ZHAO P, QU J J, HAN Q J, *et al.* Mutual feedback relationship between vegetation communities and soil nutrient in the edge of Dunhuang oasis[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4):791-799. (in Chinese)
- [5] 赵鹏,徐先英,屈建军,等. 石羊河下游青土湖大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3):80-85.
ZHAO P, XU X X, QU J J, *et al.* Characteristics of D and 18O in precipitation in Qingtu lake area, at lower reaches of Shiyanghe river and its water vapor sources[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3):80-85. (in Chinese)
- [6] 韩福贵,满多清,郑庆钟,等. 青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1):36-45.
HAN F G, MAN D Q, ZHENG Q Z, *et al.* Species diversity and soil nutrient changes of a *Nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake wetland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1):36-45. (in Chinese)
- [7] 顾梦鹤,李明红,刘调平,等. 民勤青土湖区不同土地利用类型土壤盐渍化特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2021, 57(1):117-21, 28.
GU M H, LI M H, LIU D P, *et al.* Soil salinization characteristics of different land-use types in the Qingtu lake area of Minqin county[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2021, 57(1):117-21, 28. (in Chinese)
- [8] 姜生秀,安富博,马剑平,等. 石羊河下游青土湖白刺灌丛水分来源及其对生态输水的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9):176-182.
JIANG S X, AN F B, MA J P, *et al.* Water source of *Nitraria tangutorum* nebkhas and its response to ecological water transfer in Qingtu Lake in lower reaches of Shiyang River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9):176-182. (in Chinese)
- [9] 李易珺,杨自辉,郭树江,等. 青土湖干涸湖底2种典型固沙植物群落土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5):62-67.
LI Y J, YANG Z H, GUO S J, *et al.* The relationship between fractal characteristics of soil particle size and soil nutrients of the soils of two typical sand-fixing plant communities at the bottom of the Qingtu Lake[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5):62-67. (in Chinese)
- [10] 郭树江,杨自辉,王强强,等. 青土湖干涸湖底风沙区植被特征与地表输沙量关系[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1):19-24.
GUO S J, YANG Z H, WANG Q Q, *et al.* Relationship between vegetation characteristics and sediment discharge transported by surface wind-sand flow in dry lake bottom sandstorm area of Qingtu lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1):19-24. (in Chinese)
- [11] 刘虎俊,王继和,常兆丰. 石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征[J]. 生态学报, 2006, 25(2):113-8.
LIU H J, WANG J H, CHANG Z F. Characteristics of desert flora and vegetation in lower reach of Shiyang River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2):113-118. (in Chinese)
- [12] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京:科学出版社, 2000:156-157.
- [13] COLWELL R, FUTUYMA D. On the Measurement of Niche Breadth and Overlap[J]. Ecology, 1971, 52(567-76).
- [14] 林开敏,郭玉硕. 生态位理论及其应用研究进展[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(3):283-287.
LIN K M, GUO Y S. The research advances on niche theory and its application[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2001, 21(3):283-287. (in Chinese)
- [15] 贺山峰,蒋德明,李晓兰,等. 小叶锦鸡儿固沙群落草本种群重要值与生态位的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10):150-155.
HE S F, JIANG D M, LI X L, *et al.* Important value and niche of herbages in *Caragana microphylla* sand-fixing communities[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(10):150-155. (in Chinese)
- [16] 常兆丰,赵明,韩福贵,等. 民勤沙区几种荒漠植物群落的现实生态位研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1):165-173.
CHANG Z F, ZHAO M, HAN F G, *et al.* Realized niches of several eremophytes in desert communities of Minqin desert area[J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2006, 26(1):165-173. (in Chinese)
- [17] 同好原,许明,曾新德,等. 石羊河下游裸果木群落生态位特征研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6):89-95.
YAN H Y, XU M, ZENG X D, *et al.* Niche characteristics of *Gymnocarpus przewalskii* community in the lower reaches of Shiyang River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6):89-95. (in Chinese)
- [18] 刘锦霞,武高林,马涛,毛乌素沙漠边缘荒漠植物群落生态位特征研究[J]. 草业科学, 2007, 24(12):9-14.
LIU J X, WU G L, MA T. Study on niche characteristics of desert plant community in marginal zone of Muus desert[J]. Pratacultural Science, 2007, 24(12):9-14. (in Chinese)
- [19] 牛慧慧,陈辉,付阳,等. 柴达木盆地东部荒漠植物生态位特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2862-71.
NIU H H, CHEN H, FU Y, *et al.* Ecological niche characteristics of desert plants in eastern Qaidam basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8):2862-2871. (in Chinese)
- [20] 颜廷芬,丛沛桐,刘兴华,等. 环境因子对植物生态位宽度影响程度分析[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(1):36-39.
YAN T F, CONG P T, LIU X H, *et al.* Effect analysis of environment factors on plant niche breadth[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1999, 27(1):36-39. (in Chinese)
- [21] 鄯亚栋,滕德雄,吕光辉. 干旱荒漠区植物生态位对水盐的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2899-910.
QIE Y D, TENG D X, LV G H. Response of plant niche to soil moisture and salinity in an arid desert area of Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8):2899-2910. (in Chinese)
- [22] 陈政融,刘世增,刘淑娟,等. 芦苇和白刺空间格局对青土湖生态输水的响应[J]. 草业科学, 2015, 32(12):1960-1968.
CH Z R, LIU S Z, LIU S J, *et al.* Response of form *Phragmites australis* and Form. *Nitraria tangutorum* after ecological water delivery to Qingtu lake[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(12):1961-1968. (in Chinese)

- [23] 任光瑞,黄峰,淳于训洲,等.生态输水后青土湖绿洲植被覆盖度时空演变规律[J].水电能源科学,2022,40(3):67-70,104.
REN G R, HUANG F, CHUNYU X Z, *et al.* Spatial-Temporal evolution of vegetation coverage in Qingtu lake oasis after ecological water conveyance [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 67-70, 104. (in Chinese)
- [24] 陈文业,赵明,张继强,等.敦煌西湖荒漠-湿地生态系统植被与土壤水分空间异质性研究[J].冰川冻土,2015,37(6):1670-1679.
CHEN W Y, ZHAO M, ZHANG J Q, *et al.* Spatial heterogeneity of vegetation and soil moisture in the desert-wetland ecosystem in Dunhuang Xihu, Gansu Province, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1670-1679. (in Chinese)
- [25] 谭学界,赵欣胜.水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应[J].生态学报,2006,25(12):1460-1464.
TAN X J, ZHAO X S. Spatial distribution and ecological adaptability of wetland vegetation in Yellow river delta along a water table depth gradient [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(12): 1460-1464. (in Chinese)
- [26] 赵欣胜,崔保山,孙涛,等.黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J].生态环境学报,2010,19(8):1855-1861.
ZHAO X S, CUI B S, SUN T, *et al.* The relationship between the spatial distribution of vegetation and soil environmental factors in the tidal creek areas of the Yellow river delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1855-1861. (in Chinese)
- [27] 钱亦兵,吴兆宁,张立运,等.古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J].生态学报,2007,27(7):2802-2811.
QIAN Y B, WU ZH N, ZHANG L Y, *et al.* Vegetation-environment relationship in Gurbantunggut desert [J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(7): 2802-2811. (in Chinese)
- [28] 张志永,朱媛君,时忠杰,等.浑善达克沙地榆树疏林植被和土壤的空间分异特征[J].生态环境学报,2019,28(10):1936-1944.
ZHANG Z Y, ZHU Y J, SHI Z J, *et al.* Spatial distribution of vegetation and soil in *Ulmus pumila*-dominated savanna in the Otindag sandy land [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 1936-1944. (in Chinese)
- [29] 李浙华,李生字,李丙文,等.不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异[J].干旱区研究,2020,37(1):160-167.
LI Z H, LI S Y, LI B W, *et al.* Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 160-167. (in Chinese)
- [30] 刘加珍,陈亚宁,张元明.塔里木河中游植物种群在四种环境梯度上的生态位特征[J].应用生态学报,2004,15(4):549-555.
LIU J Z, CHEN Y N, ZHANG Y M. Niche characteristics of plants on four environment gradients in middle reaches of Tarim River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 549-555. (in Chinese)
- [31] 李承义,何明珠,唐亮.荒漠生态系统磷循环及其驱动机制研究进展[J].生态学报,2022,42(12):5115-24.
LI B Y, HE M Z, TANG L. Advances on phosphorus cycle and their driving mechanism in desert ecosystems: a review [J]. Acta Ecological Sinica, 2022, 42(12): 5115-5124. (in Chinese)
- [32] JAMES J J, TILLER R L, RICHARDS J H. Multiple resources limit plant growth and function in a saline-alkaline desert community [J]. Journal of Ecology, 2005, 93(1): 113-126.
- [33] 郭春秀,安富博,刘虎俊,等.青土湖人工输水区白刺群落结构及土壤特性研究[J].水土保持通报,2019,39(6):44-51.
GUO C X, AN F B, LIU H J, *et al.* Community structure and soil characteristics of *Nitraria tangutorum* in artificial water transfer area of Qingtu Lake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 44-51. (in Chinese)
- [34] 刘淑娟,袁宏波,李发明,等.青土湖水面形成区土壤颗粒组成与化学特性变化[J].草业科学,2015,32(12):1953-1959.
LIU S J, YUAN H B, LI F M, *et al.* Changes on its chemical characteristics and soil particle composition after water formation in Qingtu Lake [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(12): 1953-1959. (in Chinese)
- [35] 董志玲,徐先英,金红喜,等.生态输水对石羊河尾间湖区植被的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):101-106.
DONG Z H, XU X Y, JIN H X, *et al.* The impact of eco-water transportation to the vegetation in tail lake of Shiyang River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 101-106. (in Chinese)