DOI: 10.5846/stxb202105231339

康满萍,赵成章,李群.苏干湖湿地土壤全盐含量特征及其与地下水的关联.生态学报,2022,42(22):9026-9034. Kang M P, Zhao C Z, Li Q.Characteristics of soil total salt content and its correlation with groundwater in Sugan Lake wetland. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22):9026-9034.

苏干湖湿地土壤全盐含量特征及其与地下水的关联

康满萍,赵成章*,李 群

西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心,兰州 730070

摘要:地下水是内陆盐沼湿地生态水文过程及演变的关键因素,地下水位埋深和水质特征交互作用影响水盐运移过程和表层 土壤盐渍化程度。根据 2018 年 8 月土壤盐分与地下水特征的监测数据,运用经典统计学、皮尔逊相关性和主成分分析等方法 对苏干湖湿地(93°47′53″—94°04′26″E,38°50′07″—38°56′27″N)不同水位下表层 0—10 cm 土壤全盐含量、地下水水质特征及其 间的关系进行定量分析。结果表明:(1)研究区 0—10 cm 土壤全盐含量的均值为 204.41 g/kg,随地下水埋深的增加,土壤全盐 含量的均值、变化幅度和变异系数呈先增加后降低的趋势。(2)地下水埋深介于 0.17—6 m,pH 在 7.06—9.56 范围,阳离子以 Na⁺为主,阴离子以 SO²⁻₄和 Cl⁻为主,离子浓度变异系数从强到弱依次为 Na⁺> Mg²⁺> Ca²⁺> Cl⁻> SO²⁻₄> HCO⁻₃> K⁺> CO²⁻₃。 (3)关联分析表明,在水埋深<1 m、1—2 m 的区域表层全盐含量与地下水埋深呈正相关,地下水埋深介于 2—3 m 和>3 m 的区 域两者间呈负相关;土壤全盐含量与地下水水质离子 Na⁺、Mg²⁺、SO²⁻₄、Cl⁻间呈极显著正相关,与 K⁺、CO²⁻₃、HCO⁻₃间的相关系数 较低且不显著。内陆盐沼湿地表层土壤全盐含量与地下水埋深、地下水水质特征的关联分析,体现了内陆盐沼湿地土壤水盐运 移过程的复杂性。

关键词:内陆盐沼湿地;土壤全盐量;地下水埋深;水质特征;主成分分析

Characteristics of soil total salt content and its correlation with groundwater in Sugan Lake wetland

KANG Manping, ZHAO Chengzhang*, LI Qun

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: Groundwater is a key factor in the ecological and hydrological process and evolution of inland salt marsh wetlands. The interaction between the depth of groundwater level and the characteristics of water quality affects the process of water and salt migration and the degree of surface soil salinization. Based on the monitoring data of soil salinity and groundwater characteristics in August 2018, classical statistics, Pearson correlation and principal component analysis were used to analyze the total soil salt content of 0—10 cm soil, groundwater quality characteristics of surface soil at different water levels in Sugan Lake wetland ($93^{\circ}47'53''-94^{\circ}04'26''E$, $38^{\circ}50'07''-38^{\circ}56'27''N$) and they are interrelationships between the total salt content of surface soil 0-10 cm and groundwater quality were quantified and analyzed. The results showed that: (1) The mean value of soil total salt content in 0-10 cm surface layer of Sugan Lake wetland was 204.41 g/kg, and its variation range and variation coefficient were large, and the variation coefficient $\geq 100\%$ belonged to strong variability. The mean value, magnitude of change and coefficient of variation of the total salt content of soil showed a trend of increasing and then decreasing with the increase of groundwater burial depth. (2) The depth of groundwater was between 0.17-6 m, the pH was in the range of 7.06-9.56, the cations were mainly Na⁺, while the anions were mainly SO²⁻₄ and

收稿日期:2021-05-23; 网络出版日期:2022-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41461013,41861009)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaocz@ nwnu.edu, cn

Cl⁻, and the variation of ion concentration from strong to weak was $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > K^+ > CO_3^{2-}$. (3) Correlation analysis showed that the surface total salt content was positively correlated with groundwater depth in areas with water depth <1 m and 1—2 m, and negatively correlated with water depth between 2—3 m and >3 m. The variation of groundwater depth increases the spatial heterogeneity of topsoil total salt content. Under the action of their physical and chemical properties, evaporation and concentration, leaching and cation adsorption, the correlation between ions and soil salt content were different, The total salt content was significantly positively correlated with Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} and Cl^- , while the correlation coefficient with K⁺, CO_3^{2-} and HCO_3^- were low and not significant. The correlation analysis of surface soil salt content with groundwater depth and groundwater quality characteristics reflects the complexity of soil water and salt transport process in inland salt marsh wetlands.

Key Words: inland salt marsh wetland; total soil salinity; groundwater level; water quality characteristics; principal component analysis

常年积水、季节性积水或过湿是湿地的基本特征,水文是湿地生态系统的重要组成部分^[1-2],土壤是湿地 生态水文过程的重要参与者和载体,表层土壤盐渍化过程对地下水位埋深及其水质特征的响应,对认识盐沼 湿地土壤理化属性与生态水文之间的响应机制具有重要意义^[3-4]。内陆盐沼湿地是干旱、半干旱荒漠区生态 环境高度异质的湿地生态系统^[5],其特殊的水文过程对盐沼湿地土壤理化属性、植被群落的分布格局及湿地 生态系统的结构、功能稳定性起决定性作用^[6-7];土壤全盐含量能够反映耕作层土壤盐渍化的程度和状态,控 制着土壤的性状和发育方向^[8];地下水是决定湿地生态系统稳定性的主要因子,其水质特征是水文循环过程 中与周围环境长期作用的结果,水中的可溶性盐是土壤盐分积累的来源^[9],在一定程度上决定着土壤的盐渍 化程度;地下水位的变化直接关系到土壤水带和毛管水带的连接状态,影响土壤中盐基离子随地下水带运移 积累至土壤表层的过程^[10-11]。复杂的水文情势与土壤理化属性是构成湿地生态水文系统的核心元素^[12],地 下水质特征及水位变化影响水盐的运移过程和盐分的聚集程度,影响土壤理化属性空间系统的复杂性,进而 影响湿地的植物生长、分布及物种的多样性^[13-14],是湿地形成、发育、演替直至消亡的最重要的驱动机制^[15]。 因此,探讨内陆盐沼湿地地下水埋深及其化学特征对表层土壤盐渍化的影响,对于深入理解湿地特殊的水文 过程与土壤理化属性间的作用机制对湿地植物群落的分布格局及湿地的演替规律研究具有十分重要意义。

苏干湖湿地位于柴达木盆地西北部阿尔金山和祁连山系交会处的内陆盆地,是我国典型盐渍土分布且湿地生态序列基本保持原始状态的盐沼湿地生态系统,具有特殊的生态水文过程、土壤理化空间系统的非均质性特征和湿地植被呈斑块化分布,体现了苏干湖盐沼湿地的复杂性。目前,许多学者对盐沼湿地植物的群落生理特征、功能性状和分布格局对环境的适应^[16-17]等方面开展了一系列研究,对苏干湖湿地的盐生植被生理特征^[18]、植被盖度空间格局^[19]、水系水质评价^[20]等方面做了研究。地下水埋深是影响土壤水盐运动的关键因素,是反映土壤水盐平衡的重要指标,在地下水浅的地区,可溶性盐基离子在强烈的蒸发作用下通过土壤水带和毛管水带运移至地表,增加表层土壤盐渍化程度^[21-22],目前围绕地下水位与土壤盐分关系的探讨主要是在室内或试验区在人为控制地下水埋深的情况下,通过建立经验模型和模拟实验定量分析地下水埋深、矿化度与土壤盐分含量间的关系^[23-25],在自然条件下针对内陆盐沼湿地土壤盐分和地下水特征关系研究鲜有报道,特别是对苏干湖湿地地下水特征与表层土壤盐分间的交互效应的认识尚不清晰。鉴于此,本研究采用经典统计学、皮尔逊相关性和主成分分析法研究了苏干湖湿地不同水位下表层 0—10 cm 土壤全盐含量特征及其与地下水间的关系,试图明晰表层土壤全盐含量的变化特征与地下水位、水质间的关系,旨在揭示内陆盐沼湿地表层土壤盐分积累过程及其与地下水特征间相互作用机制,对研究盐沼湿地植物群落的空间分布格局、资源配置模式及其对生境依赖规律等方面的研究提供理论依据。

9028

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

苏干湖湿地位于甘肃省酒泉市阿克塞哈萨克族自治县阿勒腾乡境内(93°47′53″—94°04′26″E,38°50′07″— 38°56′27″N),处于阿尔金山、党河南山与赛什腾山之间的花海子-苏干湖盆地的西北端,海拔 2795—2808 m, 属内陆高寒半干旱气候,年平均气温 3—6℃,年均降水量 35.5—70.6 mm,蒸发量 1228—2495 mm,大风天气盛 行,沙尘暴发生频率高。湿地面积约 100500 hm²,其水系属于柴达木内流水系中西北端的一个独立水系,发源 于党河南山的大、小哈尔腾河出山口潜流于地下,在海子盆地成泉涌露,汇成河网,流入大、小苏干湖,消耗于 泉水溢出带和湖面的蒸发蒸腾,地下水位埋深在 0—6 m 间。土壤以草甸土、草甸沼泽土、盐土、草甸盐土和沙 土等为主,受地理环境因素的影响,土壤盐渍化严重,表层 0—10 cm 土壤全盐含量值较高(15.81—485.83 g/ kg),土壤盐分具有表聚性特征,空间分布复杂^[26]。植被为应对寒冷、干旱和土壤盐渍化等生境条件,形成了 独特的区域性生态特征,如植株矮小、多丛生长且有泌盐功能,主要植物有赖草(Leymus secalinus)、芦苇 (*pHragmites australis*)、碱地风毛菊(Saussurea runcinata)、盐角草(Salicornia europaea)、西伯利亚蓼(Polygonum sibiricum)、苦豆子(SopHora alopecuroides)、水麦冬(Triglochin maritimum)等。

1.2 地下水埋深数据及土壤样品采集与分析

鉴于干旱区春、秋两季的聚盐高峰及盐分的表聚性特点,综合考虑研究区的地质地貌、湿地、植被类型和 难到达区域等自然地理因素于 2018 年 8 月下旬至 9 月上旬(群落生物量达到最大时)进行湿地群落学调查; 为获取土壤盐分含量和地下水水质等资料,甘肃省地质环境研究院于 2016—2018 年在苏干湖湿地布设的共 98 眼探坑、探井(图 1),用铁铲挖至地下水流出,待水位稳定后测量地下水埋深并采集地下水样品,获得全区 共 101 个地下水位点及地下水水样,并在水质监测井原点及周边取得表层 0—10 cm 的土壤样品 101 处(图 1),对采样点进行编号,并用 GPS 定位,记录样点周围的植被、作物生长状况、土壤质地等信息,并采集表层 0—10 cm 土壤样品装入铝盒,带回实验室内自然风干、磨碎、过 2 mm 筛后备用,所有土壤样品均制备 1:5 土 水质量比浸提液,参照《土壤农业化学分析方法》^[27]测定土壤 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、CO²⁻₃、Cl⁻、SO²⁻₄ 含 量,离子加和法计算土壤盐分含量,土壤全盐含量、地下水位埋深、水质监测数据均来源于甘肃省地质环境研 究院。

1.3 研究方法与数据处理

(1) 经典统计学是求取土壤属性的统计特征值,通过 SPSS 22.0 进行参数的描述性统计分析,其中均值 能反映变量总体水平的高低,方差的开方是标准差,反应土壤变量间的分散水平和绝对变异,变异系数 (Coefficient of Variation, CV)可以反映一组变量的离散程度,运用变异系数(CV)的大小判定变异的强弱,CV ≤10%为弱变异性;10%<CV<100%为中等变异性;CV≥100%为强变异性^[28]。

(2) 皮尔逊相关性:本研究基于 Pearson 相关系数来分析表层 0—10 cm 全盐含量与地下水位埋深间的相关性。其计算原理为,若随机变量 X、Y 的联合分布是二维正态分布,(x₁,y₁),(x₂,y₂),…,(x_n,y_n)为 n 次独 立观测值,r 代表 Pearson 相关系数,其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$; 相关系数 *r* 的取值范围为[1,-1], *r* 越大表明变量间的相关程度 越强^[14]。

(3) 主成分分析(Principal Component Analysis, PCA) 主要通过对协方差矩阵进行特征分析,达到在减少数据维数的同时保持数据集对方差贡献最大的目的^[29]。具体计算过程为

1) 求出标准化数据指标的矩阵 X, 设相关指标个数为 n, 采样站点个数为 m, 则计算矩阵为:



图 1 苏干湖湿地野外调查数据采样点 Fig.1 Sampling site of sugan Lake wetland field survey data

$$X = \begin{vmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{vmatrix}$$

2) 求相关系数矩阵,得到主成分:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} |(x_{ki} - \overline{x_{i}})||(x_{kj} - \overline{x_{j}})|}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - \overline{x_{i}})^{2} \sum_{k=1}^{n} (x_{kj} - \overline{x_{j}})^{2}}}$$

式中,r_{ii}为标准化数据的第*i*个指标与第*j*个指标间的相关系数,由此可得相关系数矩阵。

3)取特征值大于1且提取累积方差贡献率大于85%的主成分。

2 结果分析

2.1 不同水位埋深下表层土壤全盐含量特征

根据苏干湖湿地不同水位埋深下表层 0—10 cm 土壤全盐含量的统计参数可知(表 1),研究区 0—10 cm 土壤全盐含量的均值为 204.41 g/kg,随着水位埋深的增加,土壤全盐含量呈先增加后减少的趋势,地下水埋 深小于 1 m 的区域,土壤全盐含量的均值最低为 128.83 g/kg;在地下水埋深介于 1—2 m 的区域,土壤全盐含 量的均值最高为 248.64 g/kg,表层土壤全盐含量变异系数≥100%属于强变异性,说明表层全盐含量的离散程 度较大,空间分布变化复杂。

2.2 地下水水质

苏干湖湿地地下水 pH 值介于 7.06—9.56,均值为 8.04±0.47c,变异系数小于 10%,呈现弱变异性(表 2)。 从离子浓度均值:SO₄²⁻>Cl⁻>Na⁺>HCO₃⁻>Mg²⁺>Ca²⁺>K⁺>CO₃²⁻,地下水阳离子以 Na⁺为主,约占阳离子总量比例 的 69.5%,其次是 Mg²⁺和 Ca²⁺,约占阳离子总量比例为 18.7%和 7.6%,占比最少的是 K⁺;地下水阴离子以 SO₄²⁻和 Cl⁻为主,占阴离子总量的比例约为 45.59%和 44.5%,其次为 HCO₃⁻,约占阴离子总量的 9.57%, CO₃²⁻ 浓度最低;离子浓度变异系数: $Na^+>Mg^{2+}>Ca^{2+}>Cl^->SO_4^2>HCO_3^->K^+>CO_3^2$,地下水阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的 变异系数≥100%,属于强变异性,K⁺属于中等变异性,各个阳离子的标准差和变异系数值较大,说明其离散程 度较大;地下水阴离子 CO_3^{2-} 的变异系数为 2.99,属于弱变异性,HCO₃、Cl⁻的变异系数介于 10%—100%间,呈 现中等变异性特征。

表 1 不同水位埋深下土壤表层 0—10 cm 全盐含量的统计特征值 Table 1 Statistical characteristic value of 0—10 cm total salt content of soil surface under different water levels

地下水位埋深 Groundwater depth/m	变化幅度 Range of change	平均数 Average/(g/kg)	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of Variation/%
≤1	180.27	128.83	51.54	136.07
1—2	296.84	248.64	78.08	169.85
2—3	283.52	226.16	81.88	104.12
≥3	265.14	145.85	87.17	98.95
全区 Whole region	470.83	204.41	118.75	122.72

表 2 地下水水质描述统计特征 Table 2 Statistical characteristics of groundwater description

项目 Item	最小值 Minimum value/ (mg/kg)	最大值 Maximum value/ (mg/kg)	平均数 Average/ (mg/kg)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of Variation/%	偏斜度 Skewness	峰度 Kurtosis
pН	7.06	9.56	$8.04 \pm 0.47 \mathrm{c}$	0.47	0.22	0.20	1.00
Ca ²⁺	8.80	715.40	$104.55{\pm}1.29{\rm c}$	129.17	166.86	3.14	10.71
Mg^{2+}	1.50	2310.00	$257.81{\pm}7.9\mathrm{b}$	139.18	192.88	2.60	7.97
Na ⁺	19.90	6412.00	$957.87 \pm 15.7 \mathrm{b}$	157.05	249.02	1.98	3.12
K^+	0.90	528.80	$58.88{\pm}10.3{\rm b}$	103.18	10.65	2.38	6.51
CO_{3}^{2-}	0.00	423.70	9.98±0.54c	54.77	2.99	7.44	56.84
HCO_3^-	19.50	1257.00	282.82±2.1c	210.25	44.20	2.15	6.63
Cl ⁻	18.40	11114.00	1315.13±22.8a	2285.25	52.22	2.39	6.07
SO_4^{2-}	0.00	10749.00	1347.70±21.6a	2164.63	46.85	2.33	5.98

2.3 土壤表层全盐含量与地下水间关联度分析

2.3.1 土壤表层全盐含量与地下水位埋深间的相关性分析

苏干湖湿地表层 0—10 cm 土壤全盐含量与地下水位埋深间的相关性存在差异性(图 2),当地下水埋深 小于 1 m,表层土壤全盐含量与地下水埋深间呈极显著正相关,相关系数为 0.91(*P*<0.01);当地下水埋深介于 1—2 m 间,土壤全盐含量与地下水埋深间呈正相关,相关系数较低且不显著;当地下水埋深介于 2—3 m 间, 土壤全盐含量与地下水位埋深间呈负相关,相关系数较低且不显著;当地下水位埋深大于 3 m 间,土壤全盐含 量随地下水位埋深的增加呈减少趋势,两者间呈极显著负相关,相关系数为-0.91(*P*<0.01),不同水位埋深对 土壤全盐含量的影响存在差异性,增加了表层土壤全盐含量的空间异质性和复杂性。

2.3.2 表层全盐含量与地下水水质间综合关联度分析

利用皮尔逊相关分析法研究表层土壤盐渍化与地下水环境间的交互作用,发现研究区土壤全盐含量与 pH、地下水中离子间均存在着不同程度的相关性(表3),土壤全盐含量与地下水中的 Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻离 子间呈极显著正相关(*P*<0.01),相关系数介于0.44—0.58,与 pH 及 Ca²⁺间呈显著正相关(*P*<0.05),相关系数 分别为0.29和0.35,与 K⁺、CO₃²⁻、HCO₃间的相关性系数较低且不显著。pH 值与 Ca²⁺间呈极显著负相关,与 CO₃²⁻ 呈极显著正相关,各离子间存在极显著正相关,且相关系数存在差异性。





Fig.2 Correlation between 0-10 cm total salt content and depth of buried groundwater in the surface layer of Sugan Lake wetland

表 3 表层土壤全盐含量与地下水条件相关关系矩阵

	Table 3	Table 3 The correlation matrix of soil surface salinity and groundwater conditions							
项目 Item	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K^+	CO ₃ ²⁻	HCO ₃	Cl-	SO_4^{2-}
全盐含量 Total soil salinity	0.29*	0.35 *	0.55 **	0.48 **	0.15	-0.23	0.3	0.58 **	0.44 **
pH	1.00	-0.37 **	-0.08	-0.05	-0.06	0.35 **	-0.29 *	-0.10	-0.07
Ca ²⁺		1.00	0.40 **	0.33 **	0.40 **	-0.07	0.33 *	0.41 **	0.46 **
Mg^{2+}			1.00	0.97 **	0.90 **	0.40 **	0.79 **	0.99 **	0.98 **
Na ⁺				1.00	0.89 **	0.43 **	0.72 **	0.98 **	0.98 **
K ⁺					1.00	0.14	0.74 **	0.90 **	0.89 **
CO_{3}^{2-}						1.00	0.03	0.39 **	0.40 **
HCO ₃							1.00	0.76 **	0.74 **
Cl ⁻								1.00	0.97 **
SO_4^{2-}									1.00

* *: 在 0.01 水平上(双侧)极显著相关; *: 在 0.05 水平上(双侧)显著相关

采用主成分分析方法进一步综合分析 pH 和水质特征(Mg²⁺、Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻)对表层 土壤全盐含量的贡献,结果表明:第一、二、三主成分的方差贡献率分别为 65.14%、19.23%和 6.59%,其累计贡 献率达到了 84.53%,说明它们对大多数指标已给出充分的概括。其中,第一主成分中的各指标均为正向负 荷,能较全面地反映了各项指标,对土壤含盐量影响最大,与第一主成分密切相关的是 Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻,它 们与第一主成分的相关系数绝对值都超过了 0.80,说明土壤含盐量主要受到 Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻的影响;在 第二主成分中,pH 和地下水位的载荷较高,其值为 0.71 和 0.54,呈正相关,说明该主成分是在第一主成分的 基础上进一步反映了土壤含盐量一定程度上受到地下水位和 pH 的影响;在第三主成分中,地下水位埋深的 载荷最高,为 0.74,说明该主成分是在第一、二主成分的基础上进一步反映了土壤含盐量一定程度上受到地下 水位的影响。

表 4 二个主风分的因于贝何矩阵										
Table 4 The factor load matrix of three principal components										
主成分分析 Principal component	地下水位 Groundwater depth/m	рН	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na^+	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃	Cl-	SO_{4}^{2-}
1	0.08	-0.13	0.47	0.99	0.97	0.72	0.36	0.71	0.99	0.98
2	0.54	0.71	-0.44	0.05	0.11	-0.09	0.74	-0.25	0.05	0.04
3	0.74	-0.45	0.41	-0.04	-0.07	-0.22	0.20	-0.03	-0.03	-0.01

表 5 主成分特征值及贡献率

Table 5 The eigenvalues and contribution rate of the principal component								
主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%					
Principal component	Characteristic value	Contribution rate	Cumulative contribution rate					
1	7.56	65.14	65.042					
2	1.33	19.23	74.432					
3	1.026	6.59	84.526					

3 讨论

土壤作为时间和空间上的连续体,其自然属性的空间异质性是受气候、生物、母质、地形、成土时间等多因素相互作用的结果^[30]。苏干湖湿地表层 0—10 cm 土壤全盐含量随着地下水埋深的增加呈先增加后降低的趋势,均值在 128.83—248.64 g/kg,且 CV≥100%为强变异性。主要原因有:(1)苏干湖湿地低洼封闭的地势、地形条件是水盐的汇集中心,盐分随季节性洪水、河流和地下径流汇集到盆地中心无法移出,在强烈蒸发作用下,土壤包气带及地下水中的可溶性盐在土壤毛细管作用下随上升水流蒸发、浓缩、积累于地表,呈现出土壤盐分"表聚"现象,长期积累在地表形成厚约 3—5 cm 的盐壳和大小各异的盐坑,表层 0—10 cm 土壤全盐含量大,这与我们采样调查时所观察到的现象相一致,土壤盐分受多重因素的影响具有表聚性和非均质性特征;(2)该区域干旱少雨,蒸发量大于降水量,土壤母质含盐重,土壤盐渍化特点显著,表层土壤类型以沙土、风沙土为主,土质疏松,透水透气性好,保水保肥能力差,盐生植物根系发达,且受植株泌盐性的作用,在生长过程中吸取水分的同时伴随大量的水溶性盐类进入到植物体内,盐分分泌出来就地积累在植株附近,盐生植被植株矮小,覆盖度相对较低,地表裸露面积大,在强烈的蒸发作用下可溶性盐随土壤毛细管水向上运动,在表层积聚盐分含量增加。(3)采样时正值秋季(枯水期),持续的蒸发作用增强了表层土壤盐分的聚积,这可能也是导致表层积盐现象比较重要的因素之一,这与张海威^[3]的研究结论相一致。

水分是土壤盐分运移的载体,地下水位的动态变化通过土层中毛细管作用,进而对土壤中盐基离子在土层中的运移、积累产生影响^[32]。研究发现苏干湖湿地地下水位埋深对土壤全盐含量影响存在阈值,地下水位 埋深小于1m和1—2m的区域,表层全盐含量与地下水位埋深间呈正相关(P<0.01);水位埋深2—3m和大于3m的区域,两者间呈负相关。主要原因是:(1)在地下水位介于0—1m的区域,多以露头地下泉水和泉 眼分布,地势低洼,是水盐的汇集中心,表层土壤受水淹或河流的稀释、淋溶和携带作用的影响,且土壤水带和 毛管水带长期处于连接状态,土壤经常性处于水饱和而经历物质还原反应,脱盐作用和土壤微生物的活动降 低了土壤含盐量,0—10 cm积盐相对较轻,盐分以盐基离子的形式存在土层包气带中;随着水位埋深的增加, 土壤水带与毛管水带连接,水盐运移路径畅通,在强烈的蒸发作用下,土壤中的基盐离子和可溶性盐随地下水 运移至地表积聚,导致0—10 cm盐分较高,在地下水位埋深小于1m和1—2m的区域全盐含量随着水位埋 深的增加呈增加趋势(图2)。(2)水位介于2—3m的区域,在丰水期受淡水河流的水淹和季节性洪水稀释作 用的区域盐随水走,且土壤水带处于连接状态,部分盐分随水运移至土层包气带,表层盐分含量相对较低;在 地势低洼的区水携带盐分汇集滞留,枯水期,水去盐留,在强烈的蒸发作用下水分蒸发可溶性盐留在表层,且 浅层剖面的基盐离子随地下水运移至地表积聚,土壤全盐含量较高;水位埋深大于3m的区域,土壤水带和毛 管水带处于断裂状态,通过土壤空隙间的毛管力输送的水分逐渐减少,水盐运移相对困难,表层土壤盐分较低(表1),随水位埋深的增加,全盐含量呈减少趋势(图2),这与Wang等人的研究结果相一致,土壤含盐量与地下水埋深呈线性相关(P<0.05),土壤盐分与地下水埋深呈负相关,地下水位越深,土壤盐分越低^[33]。总体而言,苏干湖盐沼湿地地下水位埋深对土壤全盐含量的影响存在阈值,其变化增加了表层土壤全盐含量空间的非均质性,这与管孝艳的研究结果相一致^[34]。

地下水中的化学组分是水循环过程中与周围岩土体环境发生着溶滤、蒸发浓缩、离子交换等作用而产生 的,直接关系到土壤盐分来源,决定着土壤表层的积盐程度^[35-36]。相关研究发现盐分在土体中上下运动以氯 化物最为活跃,硫酸盐次之,碳酸盐较稳定,氯化物通过溶滤作用最容易进入地下水中,并向下游汇集,随着溶 滤作用的延续,相对易溶的硫酸盐进入地下水中,含水层中主要为以钙镁离子为主的碳酸盐,随着地下水流程 的增加,溶滤作用长期持续,使进入地下水中的各离子增多[37]。苏干湖湿地受季节性洪水及大小哈尔腾河流 的补给的影响下,通过混合、蒸发浓缩、溶滤、阳离子交替吸附作用下,苏干湖湿地地下水中阳离子 Na*和阴离 子 SO₄⁻ 和 Cl⁻的平均浓度较高,这与 Zhou 研究的结论相一致^[38],总体水化学类型为 Na⁺-SO₄²⁻-Cl⁻型,不同水 位埋深的地下水化学性质不同,且对表层盐分的积累的贡献率存在差异性。其中地下水中的 Na⁺、Mg²⁺、 SO⁴、CI⁻等主控离子与表层全盐含量间呈极显著正相关(P<0.01),对表层盐分的贡献率最大;土壤全盐含量 与 pH、Ca²⁺间呈显著正相关(P<0.05), 与 K⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻间的性关系数较低且不显著; 这与 Cui 等人的研究 观点相一致^[39],Na⁺和 Cl⁻在土体中上下运动最为活跃,水化半径小,不易被土壤胶体吸附,随水分的移动能力 强,故 Cl⁻和 Na⁺对土壤盐分含量的贡献一般较 Ca²⁺和 Mg²⁺大,故 Cl⁻和 Na⁺与土壤表层盐分含量的相关性较 强(表4);阳离子 Mg²⁺是二价阳离子,水化半径小于 Na⁺, Mg²⁺随水移动性较好, SO₄²⁻ 次之,水化半径大, 土壤 胶体吸附的能力强,土壤胶体由于同晶替代等原因一般带正电荷,且对阴离子 CI-吸附较弱,易水毛管水带运 移至表层积累;在强烈的蒸发作用下地下水中的 Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻离子随毛管水带的运移速率较快,且其含 量较大,与表层全盐含量间呈极显著正相关;而阳离子 Ca²⁺是二价阳离子,水化半径小于 Na⁺,Ca²⁺随水移动性 比 Mg²⁺较差, Ca²⁺对表层盐分的贡献小于 Mg²⁺。CO₃²⁻、HCO₃ 较稳定, K⁺离子能较好的为土壤和岩石吸附, 又 是植被必须的营养物,地下水中的 CO²⁻、HCO₃和 K⁺离子含量较低,对表层土壤盐分的积累贡献较低,相关性 不显著(表3)。pH的相关性排序相对较为靠后,说明与土壤表层盐分含量的关系密切程度较弱,地下水 pH 较为稳定,且空间变异性弱,对表层土壤全盐含量未构成影响,这与吕真真的研究结果相一致[29]

4 结论

苏干湖湿地低洼封闭的地势、地形条件是水盐的汇集中心,在强烈蒸发作用下受土壤包气带及地下水中 的可溶性盐在土壤毛细管作用下随水上升积累于地表,土壤盐渍化严重,表层 0—10 cm 全盐含量随着地下水 埋深的增加呈先增加后降低的趋势,地下水位埋深对土壤全盐含量影响存在阈值,在水埋深<1 m、1—2 m 的 区域,两者间呈正相关,水埋深介于 2—3 m 和>3 m 的区域,两者间呈负相关,水埋深增加了表层全盐含量的 非均质性特征;地下水以阳离子 Na⁺为主,阴离子以 SO²⁻ 和 Cl⁻为主控离子,各离子受自身的理化特性及蒸发 浓缩、溶滤、阳离子交替吸附作用下,与表层土壤盐分含量相关性存在差异性,其中全盐含量与 Na⁺、Mg²⁺、 SO²⁻和 Cl⁻间呈极显著正相关(P<0.01),与 K⁺、CO²⁻、HCO³间的性关系数较低且不显著。不同水位埋深下表 层全盐含量变化的差异性及其与地下水埋深、水质特征间的相关性,体现了内陆盐沼湿地复杂的土壤水盐运 移过程。今后的研究将进一步考虑研究区地表水、地下水的水质特征分布格局及其与包气带盐分的关系等方 面,进一步认识内陆盐沼湿地土壤盐分的主要来源和地表、地下水环境变化过程对湿地植被群落的生长、分布 格局影响具有重要意义。

参考文献(References):

^[1] Walton C R, Zak D, Audet J, Petersen R J, Lange J, Oehmke C, Wichtmann W, Kreyling J, Grygoruk M, Jabłońska E, Kotowski W,

Wiśniewska M M, Ziegler R, Hoffmann C C. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: impacts of soil type, hydrology and vegetation. Science of the Total Environment, 2020, 727; 138709.

- Minden V, Kleyer M. Ecosystem multifunctionality of coastal marshes is determined by key plant traits. Journal of Vegetation Science, 2015, 26 (4): 651-662.
- [3] 王平, 刘京涛, 朱金方, 付战勇, 孙景宽. 黄河三角洲海岸带湿地柽柳在干旱年份的水分利用策略. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1801-1807.
- [4] Lin H J, Huang C H, Hwang G W, Hsu C B, Chen C P, Hsieh H L. Hydrology drives vegetation succession in a tidal freshwater wetland of subtropical Taiwan. Wetlands, 2016, 36(6): 1109-1117.
- [5] 丁珊珊,于晓菲,王国平,郑思嘉,华璐,王啟光,孟彩红,闫磊.水盐条件变化对盐沼湿地植物生理生态特性及土壤环境的影响.土壤 与作物,2019,8(2):166-177.
- [6] Minden V, Kleyer M. Ecosystem multifunctionality of coastal marshes is determined by key plant traits. Journal of Vegetation Science, 2015, 26 (4): 651-662.
- [7] Rogers E D, Benfey P N. Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. Current Opinion in Biotechnology, 2015, 32; 93-98.
- [8] 张雪妮,李岩,何学敏,杨晓东,吕光辉.荒漠植物功能性状及其多样性对土壤水盐变化的响应.生态学报,2019,39(5):1541-1550.
- [9] 安乐生,赵全升,叶思源,刘贯群,丁喜桂.黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用.环境科学,2012,33(2):370-378.
- [10] 卢龙辉, 瓦哈甫・哈力克, 彭菲, 张琴琴, 袁玉芸. 新疆克里雅绿洲地下水与表层土壤特征的最优插值. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1304-1312.
- [11] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 田峰, 于丹丹, 周利颖, 梁志航. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响. 水土保持 学报, 2019, 33(3): 246-253.
- [12] 孙若钧,陈为峰,宋希亮,罗延峰,刘立军.黄河三角洲林草复合系统土壤水盐分布特征及其边界效应.应用生态学报,2019,30(8): 2549-2557.
- [13] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 温小虎, 高猛, 邵宏波. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423-2430.
- [14] 赵清贺,刘倩,马丽娇,丁圣彦,卢训令,汤茜,徐珊珊.黄河中下游典型河岸带土壤性质空间变异及其对环境的响应.应用生态学报, 2015,26(12):3795-3802.
- [15] 白娜, 王立, 孔东升. 黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究. 草业学报, 2017, 26(5): 15-28.
- [16] 赵连春,秦爱忠,赵成章,段凯祥,王继伟,文军.嘉峪关草湖湿地植物功能群组成及其性状对不同生境的响应.生态学报,2020,40 (3):822-833.
- [17] 王小鹏,赵成章,王继伟,赵连春,文军.秦王川盐沼湿地角果碱蓬种群聚集分布格局与特征.生态学报,2018,38(11):3943-3951.
- [18] 李群,赵成章,王继伟,文军,李子琴,马俊逸.甘肃小苏干湖盐沼湿地盐地风毛菊叶形态-光合生理特征对淹水的响应.植物生态学报, 2019,43(8):685-696.
- [19] 康满萍,赵成章,白雪,杨俊仓.苏干湖湿地植被覆盖度时空变化格局. 生态学报, 2020, 40(9): 2975-2984.
- [20] 宋天琪,张百祖.指数评价法在苏干湖水系水质评价中的运用研究.地下水,2019,41(6):58-59,108.
- [21] Haj-Amor Z, Hashemi H, Bouri S. Soil salinization and critical shallow groundwater depth under saline irrigation condition in a Saharan irrigated land. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(14): 1-13.
- [22] 李文昊, 王振华, 王凯飞. 蒸发条件下地下水埋深对土壤水盐含量的影响. 石河子大学学报: 自然科学版, 2020, 38(4): 443-448.
- [23] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 田长彦, 尹传华. 新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系. 土壤学报, 2014, 51(1): 75-81.
- [24] 宋战超,夏江宝,赵西梅,张国典,李常准,毕玉青.不同地下水矿化度条件下柽柳土柱的水盐分布特征.中国水土保持科学,2016,14 (2):41-48.
- [25] 张骜, 王振华, 王久龙, 李文昊. 蒸发条件下地下水对土壤水盐分布的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 229-233, 253.
- [26] 康满萍,赵成章,白雪.苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素.生态学报,2021,41(6):2282-2291.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 张仁铎. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社, 2005.
- [29] 吕真真,杨劲松,刘广明,李金彪,刘洪强,李兵.黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究.土壤学报,2017,54(6):1377-1385.
- [30] 罗由林,李启权,王昌全,张维,张浩,李林鲜,陈俊伟,马煜.川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素.应用生态学报, 2015,26(1):177-185.
- [31] 张海威,张飞,李哲.不同环境背景下的艾比湖区域土壤水盐差异性特征研究.干旱区地理,2017,40(3):606-613.
- [32] Xu X, Huang G H, Sun C, Pereira L S, Ramos T B, Huang Q Z, Hao Y Y. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River Basin. Agricultural Water Management, 2013, 125: 46-60.
- [33] Wang D D, Zhao C Y, Zheng J Q, Zhu J T, Gui Z F, Yu Z T. Evolution of soil salinity and the critical ratio of drainage to irrigation (CRDI) in the Weigan Oasis in the Tarim Basin. CATENA, 2021, 201: 105210.
- [34] 管孝艳,王少丽,高占义,吕烨,付小军.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系.生态学报,2012,32(4): 198-206.
- [35] 王大纯. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1995.
- [36] 王姝,高宗军,王贞岩,吴玺,安永会,刘久潭.河西走廊浅层地下水主离子特征及水质评价.人民长江,2020,51(4):35-41.
- [37] 李婧玮, 迪世靖, 胡伟伟. 山西省山阴县地下水特征及其土壤盐渍化现状研究. 地下水, 2016, 38(5): 6-7, 36.
- [38] Zhou J J, Xiang J, Wang L Y, Zhong G S, Zhu G F, Liu C F, Huang M H, Feng W, Li Q Q, Xue D X, Zhao Y R, Lei L. The impacts of groundwater chemistry on wetland vegetation distribution in the northern Qinghai-Tibet plateau. Sustainability, 2019, 11(18): 5022.
- [39] Cui G Q, Lu Y D, Zheng C, Liu Z H, Sai J M. Relationship between soil salinization and groundwater hydration in yaoba oasis, northwest China. Water, 2019, 11(1): 175.