

黑河湿地土壤盐分特征及其对 地下水埋深的响应规律

程建萍¹, 梁 谦¹, 孔东升²

(1. 河西学院 土木工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 河西学院 农业与绿洲研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 探讨张掖黑河湿地土壤盐分特征及其对地下水埋深响应的规律, 是开展黑河流域水文、土壤及生态研究的重要基础。根据 2014 年—2018 年研究区观测数据, 辅助 SPSS 24.0 软件, 应用描述统计、非参数检验、Spearman 等级相关分析、回归分析等方法开展研究。结果表明: (1) 随着地下水位埋深的增加, 土壤全盐含量有先增加后降低的趋势, 地下水位埋深小于 60 cm 时, 土壤全盐表聚性特征明显。 (2) 离子浓度呈现: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。 (3) 相关性分析表明, pH 值、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与地下水位埋深之间呈现极显著相关性, SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 与地下水位埋深之间不呈现相关性, 但相关系数差异较大。 (4) 全盐含量与各离子之间存在较好的多元线性回归关系, 判定系数 $R^2 = 0.987$, 回归方程 F 值 = 2135.9。

关键词: 黑河湿地; 土壤盐分; 地下水埋深; 响应

中图分类号: S273.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)03—0248—07

Soil Salinity Characteristics Analysis and Its Response to Groundwater Depth in Heihe Wetland

CHENG Jianping¹, LIANG Qian¹, KONG Dongsheng²

(1. Civil Engineering College, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Institute of Agriculture and Oasis, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: It is an important prerequisite to study the hydrology, soil and ecology of the Zhangye Heihe River Basin before exploring the characteristics of soil salinity and its response to groundwater depth. According to the observed data of the study area from 2014 to 2018, the SPSS 24.0 software was used to analyze the differences of total salt content and major salt ions in wetland soil in different soil layers by using descriptive statistics, non-parametric test, Spearman rank correlation analysis, regression analysis and other methods. The results are as follows. (1) With the increase of buried depth of groundwater level, soil total salt content increased first and then decreased. When the buried depth of groundwater level was within 60 cm, soil total salt content had obvious surface aggregation characteristics. (2) the ion concentration showed the characteristics of $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. (3) The correlation analysis shows that pH, HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} are highly significantly correlated with the buried depth of the groundwater level, while SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ are not correlated with the buried depth of the groundwater level, but the correlation coefficients differ greatly. (4) There was a good multiple linear regression relationship between total salt content and each ion, $R^2 = 0.987$, $F = 2135.9$.

Keywords: Heihe wetland; soil salinity; groundwater depth; response

湿地发育于水、陆环境过渡地带,具有独特的水文过程,创造了不同于陆地和水生生态系统的环境条件^[1]。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^[2-3],也被认为是影响湿地生态系统的关键因子^[4]。土壤是湿地生态水文过程的重要参与者和载体,湿地土壤盐渍化过程对地下水位埋深的响应,对认识干旱区沼泽湿地盐分与生态水文之间的响应机制具有重要意义^[5-8]。土壤盐渍化主要发生在干旱、半干旱地区,水中的可溶性盐是土壤盐分的主要来源。在干旱、半干旱地区,地下水是湿地最主要的补给来源,其分布与径流特征成为控制湿地形成、发育乃至消亡的主导因子^[9-11]。湿地水文、土壤和生态是湿地研究的三个主要方面,因此,探讨黑河湿地土壤盐分特征时空研究及其对地下水位埋深响应的规律,对黑河流域,乃至干旱区-半干旱区湿地的水文调控、生态恢复及湿地保护具有重要的作用。

张掖黑河湿地国家级自然保护区,是全球8条候鸟迁徙路线之中亚-印度通道的重要中转站,是河西走廊甚至西北地区重要的生态屏障,也是黑河下游-内蒙古额济纳旗重要的水源涵养地。目前,很多学者对黑河流域湿地开展了系列研究。肖生春等^[12]对黑河流域绿洲环境演变因素进行了研究;李启森等^[13-15]研究了黑河流域水资源动态变化与绿洲发育及发展演变的关系;巴建文等^[16]利用大量的野外资料,讨论了地下水位以及泉水溢出对湿地形成的滋养作用;周全民、刘宏军等^[17-18]对张掖黑河湿地资源及其分类做了研究,并提出对其的保护对策;杨丽萍等^[19-20]研究了张掖城市湿地形成及生态演化规律等。湿地水盐方面:冯小平、张天举等^[21-22]对滨海湿地土壤盐分空间演变规律的研究表明:滨海湿地在空间上表现出表层聚集特征。夏贵菊、崔乔等^[23-24]对草甸湿地及盐沼湿地、土壤盐分的空间累积特征研究表明:发生湿地土壤盐分累积的区域地下水埋深一般是小于2 m的。赵荣昌等^[25]对张掖北郊湿地土壤盐渍化的分布研究:估算确定了张掖湿地土壤发生盐渍化的临界水深为2.9 m。以上研究成果表明,浅埋的地下水位和强烈的蒸发作用是形成湿地土壤盐渍化的动力条件^[26-27]。张掖黑河湿地由于其特殊的地理位置,地下水渗出是主要的补给水源^[28],该区域地下水位较浅,蒸发量大,是土壤盐渍化易发生的区域,而土壤水溶性盐总量是判别土壤盐渍化程度的重要依据。因此,项目选取张掖黑河湿地,在自然条件下进行土壤盐

分与地下水埋深响应关系的研究,试图探索和揭示干旱区以地下水补给为主的沼泽湿地的土壤盐分规律及其与地下水埋深之间的关系,为进一步开展水盐对湿地植被影响的研究奠定基础。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区西大湖湿地位于甘肃省张掖市甘州区乌江镇境内,地理坐标处于100°21′51″E—100°22′59″E,39°01′21″N—39°02′03″N之间,是黑河湿地国家级自然保护区内典型的天然草本沼泽湿地,海拔1 439 m~1 496 m,总面积358.9 hm²,见图1。湿地气候类型属于典型的温带大陆性干旱气候,日照充足,昼夜温差大,年均太阳总辐射量133.36 kJ·cm²~148.42 kJ·cm²,年日照时数2 683 h~3 088 h;年均气温为7℃,极端最高气温达41℃,极端最低气温低至-31℃;降水稀少而集中,年均降水量仅129 mm;年均蒸发量为2 291 mm,蒸发强烈,干旱指数高达15.87,无霜期138 d^[29]。湿地水源主要来自于祁连山地下水侧渗溢出,区域内有泉眼10 000余处,天然溪流、河道、人工引水灌溉渠系纵横交错。湿地周边是重要的农业生产区域,附近及下游6个村庄约有2 227 hm²农田依赖研究区湿地水量进行灌溉。湿地土壤类型主要包括泥炭土、草甸土、盐碱土。湿地内常见植被有芦苇(*Phragmites australis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、三裂碱毛茛(*Halerpestes tricuspis*)、嵩草(*Kobresia myosuroides*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等多年生草本植物。

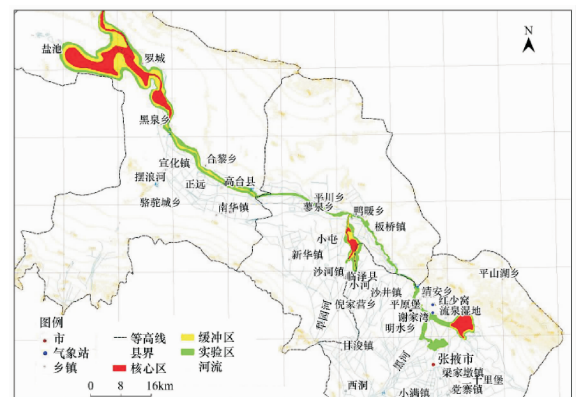


图1 研究区位置示意图

1.2 数据观测及土壤样品分析

1.2.1 数据观测

项目组于2014年11月,在研究区内沿水分梯

度变化方向,自南向北布设一条固定样带,样带长约 1.2 km,每间隔 100 m 确定一个固定样方,共计 12 个,样方内设置地下水埋深观测井,观测井用 GPS 定位并依次编号,共计 12 个,详见图 2。因该湿地在每年 12 月—次年 3 月处于冰冻期,无法取土,故研究区地下水位埋深的观测时间为每年 4 月 15 日—11 月 1 日,每月 1 日和 15 日观测地下水位埋深;同时考虑到 5 月—9 月份研究区周边及下游进入农作物夏灌时期,故项目于 2018 年 4 月 15 日、6 月 15 日、8 月 15 日、10 月 15 日分别测定了土壤盐分离离子,其中 4 月 15 日为夏灌前,6 月 15 日、8 月 15 日为夏灌中,10 月 15 日为夏灌后。

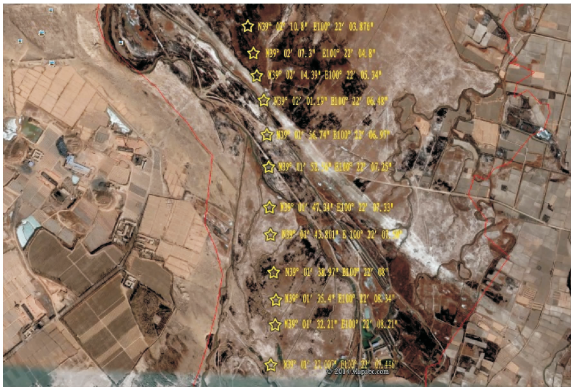


图 2 西大湖湿地地下水位观测点布置图

1.2.2 样品分析

地下水位由野外观测井观测,土壤全盐含量及主要盐分离子的测定,分别于 2018 年 4 月 15 日、6 月 15 日、8 月 15 日、10 月 15 日在湿地固定的 12 个样方内,分 3 层采集土样样品,每层深度 20 cm(与土壤含水量测定保持一致),每个观测点重复 3 次进行混合,共计样品 144 个,样品磨碎过 2.5 mm 筛后,委托甘肃省农业科学院农业资源环境重点实验室进行测定,其中土壤 pH 值参照《土壤检测方法及标准》(NY/T 1121.2—2006)测定,水溶性盐总量(水:土=5:1)采用电导率仪参照《土壤水溶性盐总量的测定标准》(NY/T 1121.16—2006)测定,土壤 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 参照《森林土壤水溶性盐分分析》(LY/T 1251—1999)测定。

1.3 研究方法与数据处理

(1) 描述统计:利用 SPSS24.0 进行参数描述统计,用均值对统计变量进行集中性描述,用标准差和变异系数 C_v 描述变量的离散程度,应用变异系数 C_v 的大小判定变异性的强弱, $C_v \leq 0.1$ 为弱变异

性; $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性; $C_v \geq 1$ 为强变异性。

(2) 差异性检验:本研究通过 K-S 拟合优度检验判断变量值的分布形态。由于大部分观测值都处于某一范围,不符合正太分布,故采用非参数检验技术进行差异显著性检验。

(3) 相关性分析:采用 Spearman 等级相关分析方法进行土壤盐分与土层深度、地下水位埋深之间的相关性分析。其计算原理为,同一组样本,从不同角度进行观测,对于两列不明分布形态的观测值,不能直接使用 Pearson 积差相关分析,故借助秩分计算相关系数。

$$r = 1 - \frac{6 \sum (X_i - X_j)^2}{n^3 - n} \tag{1}$$

(4) 回归分析:主要是建立土壤全盐含量与主要离子之间的多元线性回归方程,评价回归方程质量的几个指标计算如下:

$$\text{判定系数 } R^2: R^2 = \frac{\sum \text{回归值}_i^2}{\sum \text{回归值}_i^2 + \sum \text{残差}_i^2} \tag{2}$$

回归系数大于 0.6,表示回归方程的质量较好。

$$\text{回归方程的 } F \text{ 值: } F = \frac{\text{回归值均方差}}{\text{残差值均方差}} \tag{3}$$

F 值在 3.86 以上,表示回归方程有效。

$$\text{回归方程的 } T \text{ 值: } T = \frac{\text{本自变量的偏回归系数}}{\text{偏回归系数的标准误差}} \tag{4}$$

T 值绝对值在 1.96 以上,表示该自变量对方程的影响力较大,否则应在方程中剔除该自变量。

2 结果与分析

2.1 土壤水盐特征统计分析

对研究区湿地 2018 年分 4 次测定的 0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm,共计 144 个土壤样品全盐含量及八大离子含量进行统计分析,由表 1 可知:研究区湿地地下水为潜水,平均埋深 47.08 cm,极差 112.0 cm,变化幅度非常大,变异系数 0.65,属于中等变异。土壤 pH 值介于 7.34~9.12 之间,平均值 8.26,变异系数 $0.04 < 0.1$,呈现出弱变异新。离子浓度均值从大到小依次排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, CO_3^{2-} 未检出,土壤阴离子占比为 66.9%,阳离子占比为 33.1%;阴离子主要以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主,占有阴离子的 87.1%, CO_3^{2-} 未检出;阳离子主要以

Ca²⁺、Na⁺为主, 占有所有阳离子的 78.8%, 其次是 Mg²⁺, 占有所有阳离子的 17.9%, 占比最少的是 K⁺。离子浓度变异系数依次排序为: K⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > Ca²⁺ > SO₄²⁻ > Mg²⁺ > HCO₃⁻, Cl⁻ 变异系数 > 1.0, 属于强变异性, SO₄²⁻、HCO₃⁻ 变异系数 < 1.0, 属于中等变异性; K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 变异系数 > 1.0, 属于强变异性, Mg²⁺ 变异系数 < 1.0, 属于中等变异性, 各个阴、阳离子标准差和变异系数值都较大, 说明盐分离子离散程度大, 表现出了较强的时间和空间异质性。

表 1 研究区水盐变量的统计特征值

项目	极差	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	峰度	偏度
地下水位埋深/cm	112.00	2.67	114.67	47.075	30.439	0.65	0.573	-0.495
pH 值	1.78	7.34	9.12	8.26	0.337	0.04	-0.115	0.351
全盐量	0.580	0.050	0.630	0.1431	0.0879	0.61	2.265	7.592
HCO ₃ ⁻	0.580	0.177	0.757	0.3804	0.098	0.26	0.686	0.682
Cl ⁻	1.545	0.001	1.546	0.1288	0.247	1.92	4.143	18.615
SO ₄ ²⁻	2.975	0.001	2.976	0.4954	0.492	0.99	2.513	8.248
Ca ²⁺	2.400	0.040	2.440	0.2049	0.238	1.16	6.773	57.321
Mg ²⁺	0.414	0.001	0.415	0.0893	0.068	0.77	1.818	4.888
K ⁺	0.169	0.001	0.170	0.0096	0.024	2.47	4.499	23.463
Na ⁺	2.522	0.001	2.523	0.1931	0.385	1.99	4.213	19.907
CO ₃ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—

注:—表示 CO₃²⁻ 未检出。

根据土壤盐渍土分级标准, 将地下水位埋深与土壤含盐总量(干土重%) 建立交叉表如表 2, 可以看出研究区非盐渍化土壤点位的概率为 95.1%, 盐渍化土壤点位的概率为 4.9%。结合表 1, 可知研究区平均土壤全盐含量为 0.14, 故目前土壤状况良好, 但是有向盐渍化转变的趋势, 同时, 随着湿地地下水位埋深的增加, 土壤全盐含量有先增加后降低的趋势, 即地下水位埋深在 60 cm 以内时, 土壤全盐含量具有明显的表聚性特征。

表 2 地下水位埋深与土壤全盐量点位数目统计表

地下水位埋深/cm	非盐渍土 (S<0.3)	弱盐渍土 (S=0.3~0.5)	中盐渍土 (S=0.5~1.0)	强盐渍土 (S=1.0~2.0)	盐土 (S>2.0)	总计
<20	28	2	0	0	0	30
20~40	39	2	1	0	0	42
40~60	26	1	0	0	0	27
60~80	17	1	0	0	0	18
80~100	18	0	0	0	0	18
>100	9	0	0	0	0	9
总计	137	6	1	0	0	144

2.2 土壤盐分差异显著性分析

2.2.1 土壤盐分在年内随时间的变化

研究利用 2018 年分 4 月 15 日、6 月 15 日、8 月 15 日、10 月 15 日, 先后在 12 个观测样方内测定的 0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 土壤样品全盐含量及八大离子含量进行独立样本非参数检验分析, 结果见表 3。由表 3 可知: pH 值、全盐含量、SO₄²⁻、Mg²⁺、Na⁺ 在 4 次观测中, 与观测时间具有显著性差异(P<0.05), 而 HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、K⁺ 在 4 次观测中, 与时间不存在显著性差异(P≥0.05)。说明 pH 值、全盐含量、SO₄²⁻、Mg²⁺、Na⁺ 在年内随时间变化较快, 具有强烈的变异性, 而 HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、K⁺ 在年内变化较小, 或在年内变化不敏感, 相对稳定。同时, 还可以认为全盐含量、SO₄²⁻、Mg²⁺、Na⁺ 在年内变化可能具有较好的关联性。

2.2.2 土壤盐分与不同土层深度的差异性分析

研究利用 2018 年先后 4 次测定的 0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 土壤样品全盐含量及八大离子含量进行关联样本非参数检验分析。由表 4 可知: pH 值、全盐含量、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、K⁺ 在不同土层深度上具有显著的差异性(P<0.05), 说明 0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 深度土壤盐分具有显著性差异, 即湿地土层深度是影响土壤盐分变化的主要因素, 盐分在不同的土层深度上具有不同的集聚性。

2.2.3 土壤盐分与地下水位埋深间的差异性分析

由于研究区地下水位埋深介于 2.67 cm~114.67 cm(见表 1), 故以 20 cm 为单位, 对地下水位埋深进行分级, 共分为 6 级, 继续对盐分离子与不同地下水位埋深间的关系进行多个独立样本的非参数检验。由表 5 可知: pH 值、全盐含量、HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 与地下水位埋深之间存在显著性差异(Sig<0.05), SO₄²⁻、Na⁺、K⁺ 与地下水位埋深之间不存在显著性差异(P≥0.05), 说明土壤 pH 值、全盐含量及主要盐分离子与地下水位埋深之间关系复杂, 各盐分离子空间分布不均匀。

2.3 土壤盐分关联性分析

2.3.1 盐分与地下水位埋深相关性分析

利用 Spearman 等级相关分析方法研究地下水位埋深与土壤盐分之间的相关作用, 建立相关系数矩阵如表 6 所示。结果表明: pH 值、HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 与地下水位埋深之间呈现极显著相关性(P<0.01), 相关系数绝对值介于 0.239~0.554, 全

盐含量与地下水位埋深之间呈现显著相关性($P < 0.05$),相关系数为 -0.292 , SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 与地下水位埋深之间不呈现相关性($P \geq 0.05$),这一结论与土壤盐分与地下水位埋深的差异性分析结论基本一致。说明湿地土壤盐分中大部分离子受到地下水位埋深的显著影响,之间具有极显著的相关性,但是

相关系数差异较大,且 pH 值、 Cl^- 受地下水位埋深正相关影响,而含量相对较多的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 受地下水位埋深呈现负正相关影响,即随着湿地地下水位埋深的下降, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈现出增加的趋势。

表 3 盐分与不同观测时间的 H-W 检验

项目	pH	全盐含量	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
卡方	8.895	9.638	2.628	5.457	11.605	6.260	31.684	5.725	11.667
渐近显著性	0.031	0.022	0.453	0.141	0.009	0.100	0.000	0.126	0.009

表 4 盐分与土层深度的 Wilcoxon 符号秩检验

项目	土层深度								
	pH	全盐量	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+
Z	-10.410 ^b	-10.411 ^c	-10.081 ^c	-10.411 ^c	-10.403 ^c	-10.409 ^c	-10.193 ^c	-10.413 ^c	-10.471 ^c
渐近显著性(双尾)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:b.基于负秩;c.基于正秩。

表 5 盐分与地下水位埋深的 H-W 检验

项目	pH	全盐量	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
卡方	29.445	14.778	34.422	19.053	8.625	46.260	14.317	7.635	11.056
渐近显著性	0.000	0.011	0.000	0.002	0.125	0.000	0.014	0.178	0.050

注:分组变量:地下水位埋深范围。

表 6 地下水位与土壤盐分相关系数矩阵

项目	全盐含量	地下水位	土层深度	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
全盐含量	1.000	-0.292 *	-0.227 **	-0.059	0.447 **	0.676 **	0.891 **	0.361 **	0.645 **	0.583 **	0.649 **
地下水位		1.000	-0.006	0.474 **	-0.394 **	0.239 **	-0.112	-0.554 **	-0.263 **	-0.009	0.148
土层深度			1.000	-0.252 **	-0.421 **	-0.359 **	-0.028	0.011	-0.095	-0.496 **	-0.452 **
pH				1.000	-0.168 *	0.337 **	-0.101	-0.722 **	-0.259 **	0.089	0.414 **
HCO_3^-					1.000	0.305 **	0.142	0.378 **	0.398 **	0.384 **	0.353 **
Cl^-						1.000	0.475 **	-0.074	0.288 **	0.445 **	0.778 **
SO_4^{2-}							1.000	0.307 **	0.639 **	0.428 **	0.434 **
Ca^{2+}								1.000	0.427 **	0.159	-0.063
Mg^{2+}									1.000	0.278 **	0.263 **
K^+										1.000	0.493 **
Na^+											1.000

注: ** 表示在 0.01 水平上(双侧)极显著相关; * 表示在 0.05 水平上(双侧)显著相关。

2.3.2 土壤全盐含量回归分析

综合以上分析可知,土壤盐分离子受地下水位埋深影响关系复杂。有表 6 可知:全盐含量除与地下水位埋深之间存在显著相关关系外,与土层深度、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 之间均呈现出极显著正相关,相关系数介于 $0.361 \sim 0.891$,关联度较高。故进行全盐含量与各离子之间的多元线性回归分析,排除常数的影响,见表 7,建立回归

方程为:

$$Y = 0.114x_1 + 0.127x_2 + 0.074x_3 + 0.137x_4 + 0.092x_5$$

(5)

其中: Y 为全盐含量; x_1 为 SO_4^{2-} ; x_2 为 Cl^- ; x_3 为 Ca^{2+} ; x_4 为 HCO_3^- ; x_5 为 Mg^{2+} 。

本次回归分析中判定系数 $R^2 = 0.987$,回归方程 F 值 = 2135.9,相伴概率值为 0,说明回归方程有

效,变量间高度关联。其中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 对全盐含量的影响力较大, K^+ 、 Na^+ 对全盐含量的贡献不显著。同时,借助标准化系数可知,5 个离子对全盐含量的影响力水平依次为 0.637、0.357、0.201、0.153、0.071,即说明 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 对全盐含量的影响依次降低。

表 7 全盐含量回归分析系数

模型	未标准化系数		标准化系数 Beta	<i>t</i>	显著性
	<i>B</i>	标准误差			
常量	-0.005	0.003		-1.451	0.149
SO_4^{2-}	0.114	0.004	0.637	31.683	0.000
Cl^-	0.127	0.004	0.357	31.652	0.000
HCO_3^-	0.137	0.009	0.153	14.672	0.000
Ca^{2+}	0.074	0.006	0.201	13.043	0.000
Mg^{2+}	0.092	0.022	0.071	4.266	0.000

3 讨 论

湿地土壤盐分在时间和空间上都具有很大的不均匀性。分析原因,可能主要与该区域地下水补给来源有关,由于研究区地下水主要受祁连山地下水侧渗溢出补给,具有很强的季节性,而且由于该区域为周边村庄约 2 227 hm² 农田提供灌溉水源,也具有季节性用水的特点,因此湿地水盐循环复杂。另外,水盐运移受到气候、土壤类型、地上植被等多因素的影响,据前期研究发现该区域地下水位呈现多年逐渐下降的趋势,这里仅仅是对年内 4 个观测期进行了研究略显得不够全面,后续还需在不同年份间、多学科上进一步做地下水位埋深与土壤水盐和植被影响的深入研究。

4 结 论

(1) 研究区域地下水位埋深平均值 47.08 cm,埋深较浅,土壤 pH 值平均值为 8.26,偏碱性。按照全盐含量进行土壤盐渍化水平分级为弱盐渍化状态。随着地下水位埋深的增加,土壤全盐含量有先增加后降低的趋势,地下水位埋深在 60 cm 范围以内时,土壤全盐含量具有明显的表聚性特征。由于研究区域蒸发量大、降雨量少,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,这一结论符合“盐随水来,盐随水去”的规律^[30-31]。

(2) 对年内 4 次不同观测期的数据统计发现,总体上离子浓度呈现出 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} >$

$\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 的特点。土壤阴、阳离子占比分别为 66.9% 和 33.1%,阴离子主要以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主,阳离子主要以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 为主,但是阴、阳离子变异系数差异较大,说明盐分离子离散程度大,呈现出了较强的异质性。同时,pH 值、全盐含量、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 受年内观测时间影响显著, HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 受观测时间影响不显著。以 0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 土层深度作为空间变量研究表明,pH 值、全盐含量、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 在不同土层深度上具有显著的差异性。分析其原因,由于研究区位于张掖盆地,地下水动态处于径流补给、径流-开采利用、周边成片泉水溢出补给等多种形态,湿地水源年内复杂,另外由于年内地下水埋藏较浅,径流条件好,在强烈的蒸发作用下,水盐交替强烈,故造成盐分离子无论是时间上还是空间上都表现出了较强的异质性。

(3) 通过相关性分析表明,研究区 pH 值、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与地下水位埋深之间呈现极显著相关性, SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 与地下水位埋深之间不呈现相关性,但相关系数差异较大,其中 pH 值、 Cl^- 受地下水位埋深正相关影响,而含量相对较多的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 受地下水位埋深呈现负正相关影响,即随着湿地地下水位埋深的下降, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子呈现出增加的趋势。分析原因,一方面是由于该区域地下水水质较硬,在蒸发作用下, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 更容易沉淀、浓缩;另一方面可能是由于研究区存在多种盐生植物群落,主要以芦苇、冰草、碱毛茛为主,这些植物根系在 20 cm~60 cm 较为发达,在群落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,由于各观测点在不同观测时间上,植被覆盖度存在差异,而水是盐分运移及植物生长的载体,故导致盐分离子与地下水位间出现不一致的相关性。研究区表现出了干旱区沼泽湿地复杂的水盐运移过程,这一结论与康满萍关于苏干湖湿地的研究结论基本一致^[26]。

(4) 全盐含量与土层深度、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 之间均呈现出极显著正相关,相关系数介于 0.361~0.891,关联度较高。全盐含量与各离子之间存在较好的多元线性回归关系,判定系数 $R^2 = 0.987$,回归方程 F 值 = 2135.9,研究区全盐含量受 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 的影响依次降低。

参考文献:

- [1] 陆健健,何文珊,童春富,等. 湿地生态学[M]. 北京,高等教育出版社,2014.
- [2] Feng Jiuge, Liang Jinfeng, Li Qianwei, et al. Effect of hydrological connectivity on soil carbon storage in the Yellow River Delta Wetlands of China[J]. Chinese Geographical Science, 2021, 31(2): 197-208.
- [3] Integrated simulation of runoff and groundwater in forest wetland watersheds[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(3): 1-15.
- [4] 章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4254-4260.
- [5] 丁珊珊,于晓菲,王国平,等. 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[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 166-177.
- [6] 贺 怡,王雪宏,杨继松,等. 湿地水文连通影响因素及生态效应研究进展[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 218-224.
- [7] 刘 言. 湿地水文连通机理与模式分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2020.
- [8] 张 剑,齐璇璇,刘 冬,等. 干旱区湿地芦苇各器官生态化学计量对土壤因子的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 701-711.
- [9] 安乐生,赵全升,叶思源,等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 370-378.
- [10] 胡爱萍,刘万锋,李生永,等. 甘肃河西走廊西大河中游湿地成因与保护对策研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1157-1162.
- [11] 姜朋辉,赵锐锋,赵海莉,等. 黑河中游湿地景观破碎化与气候变化的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1661-1668.
- [12] 肖生春,肖洪浪. 黑河流域绿洲环境演变因素研究[J]. 中国沙漠, 2003(4): 51-56.
- [13] 李启森,赵文智,冯 起. 黑河流域水资源动态变化与绿洲发育及发展演变的关系[J]. 干旱区地理, 2006(1): 21-28.
- [14] 王 川,张勇勇,赵文智. 黑河下游额济纳绿洲近 20 年生态输水的生态水文恢复效应[J/OL]. 生态学杂志: 1-11. [2022-08-13].
- [15] 祁晓凡,李文鹏,崔虎群,等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 29-43.
- [16] 巴建文,马小全,刘振华,等. 张掖盆地地下水位上升成因探析[J]. 地下水, 2010, 32(1): 34-37.
- [17] 刘宏军,周全民,牛 赞. 张掖市黑河流域湿地资源调查与分类[J]. 湿地科学与管理, 2011, 7(1): 56-59.
- [18] 周全民,魏德胜. 实施黑河流域湿地保护工程要处理好六大关系[J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(1): 59-60.
- [19] 杨丽萍,巴建文. 张掖城市湿地的形成及其生态系统演化[J]. 地下水, 2010, 32(4): 20-22.
- [20] 赵 爱. 张掖市黑河湿地土壤盐渍化成因及综合防治[J]. 河西学院学报, 2012, 28(2): 10-13.
- [21] 冯小平,王义东,陈 清,等. 天津滨海湿地土壤盐分空间演变规律研究[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2014, 34(2): 41-48.
- [22] 张天举,陈永金,刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3322-3332.
- [23] 夏贵菊,何彤慧,于 骥,等. 银川平原草甸湿地表层土盐分累积特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 142-148.
- [24] 崔 乔,何彤慧,全晓塞,等. 鄂尔多斯盐沼湿地土壤盐分特征对植物群落的影响[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 25-32.
- [25] 赵荣昌,巴建文,秦晓燕,等. 防止张掖城市湿地周边地区土壤盐渍化的地下水临界深度确定[J]. 地下水, 2011, 33(1): 34-35, 122.
- [26] 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分析[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9026-9034.
- [27] 靳三玲,郑志荣,刁兆岩,等. 呼伦贝尔草原辉河湿地表层土壤盐分分布特征[J]. 草地学报, 2021, 29(4): 749-756.
- [28] 孔东升,张 灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 972-983.
- [29] 张 灏,孔东升. 张掖黑河湿地国家级自然保护区气候调节功能价值评估[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 177-181, 197.
- [30] 侯金鑫,王 德,肖鲁湘,等. 地下水埋深对土壤水盐、植被影响研究进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 150-156.
- [31] 张义强,白巧燕,王会永. 河套灌区地下水适宜埋深、节水阈值、水盐平衡探讨[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 83-86.