

青铜峡灌区春灌前土壤盐分与盐渍化特征及空间分布

赵志鹏, 方磊

(宁夏回族自治区水文环境地质调查院, 银川 750011)

摘要: 土壤盐分与盐渍化的特征和时空分布特征研究, 对土壤盐渍化防治和土壤开发利用十分重要。根据在青铜峡灌区布设的 80 个代表性土壤样点 0~60 cm 分层取样测定的土壤全盐量数据, 采用经典统计学、地质统计学, 结合 GIS 技术研究灌区春灌前土壤全盐量、主要化学组分特征与盐渍化空间分布格局。结果表明: ①青铜峡灌区不同深度土壤全盐量呈偏态分布且都属强变异强度; 土壤全盐量与主要盐离子均存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 阴阳离子间的强相关性反映出不同深度土壤盐分阴阳离子组合十分复杂。②不同深度土壤全盐量和 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量具有中等-较强烈的空间自相关性, 最大自相关距离均未超过灌区最大直线范围的 1/3。③灌区 0~20 cm 土壤属于非、轻度、中度、重度盐化土和盐土的面积分别是 437.68 km²、615.43 km²、650.00 km²、2 033.27 km²、2 419.70 km²; 随土壤深度增加重度盐化土和盐土面积明显减少。 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量的空间分布与土壤全盐量相似。总体来说, 青铜峡灌区春灌前土壤盐渍化现象依然严重且复杂, 应加强研究治理。

关键词: 青铜峡灌区; 土壤盐分; 盐渍化; 地质统计学; 空间分布

中图分类号: S156.4⁺1 **文献标识码:** A

CHARACTERISTICS AND SPATIAL PATTERN OF SOIL SALINITY AND SOIL SALINIZATION BEFORE SPRING IRRIGATION IN QINGTONGXIA IRRIGATION DISTRICT

ZHAO Zhi-peng, FANG Lei

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750011, China)

Abstract: The research into the characteristics and spatiotemporal distribution of soil salinity and salinization is crucial for soil salinization prevention and soil development and utilization. Based on the data collected from 80 representative soil sampling points within 0~60 cm depth intervals in the Qingtongxia irrigation district, this study employed classical statistics and geostatistics combined with GIS technology to investigate the soil's total salinity, its major chemical components, and the spatial distribution of salinization before spring irrigation. Key findings are as follows: 1. Different soil depths in the Qingtongxia irrigation district exhibited skewed distributions with a strong variability in total salt content. There's a pronounced positive correlation between the overall salt content and the primary soil ions ($P < 0.01$). The intricate relationships between anions and cations underscore the complexity of ion combinations at varied soil depths. 2. The spatial autocorrelation for total salt content and the concentrations of $K^+ + Na^+$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- across different depths ranged from moderate to intense. The maximum

收稿日期: 2022-10-25 改回日期: 2023-05-17

基金项目: 宁夏财政厅项目(6400201901273、NXCZ20220201), 宁夏回族自治区人才小高地建设项目、宁夏青年科技人才举工程项目联合资助

autocorrelation distance didn't surpass one-third of the district's furthest linear extent. 3. The area distribution of soils with varying salinity levels (non-salinity, light, medium, and heavy salinity, and saline) at 0~20 cm depth was 437.68 km², 615.43 km², 650.00 km², 2,033.27 km², and 2,419.70 km² respectively. With increased soil depth, there's a noticeable decline in heavily saline and saline areas. The spatial distributions of K⁺+Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, and HCO₃⁻ closely mirrored that of the total soil salt content. In conclusion, the Qingtongxia irrigation district's soil continues to exhibit significant and multifaceted salinization challenges before spring irrigation, highlighting the need for intensified research and remedial measures.

Key words: Qingtongxia Irrigation Area; soil salinity; salinization; geostatistics; spatial distribution

土壤盐渍化是一种严重的土地退化现象,广泛分布于世界 100 多个国家和地区^[1,2]。由于气候及人类活动因素的影响,中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题日趋严重^[3-5]。宁夏青铜峡灌区具有 2 000 多年的农业生产和灌溉历史,黄河水灌溉是区域农业生产的重要基础,但大量引黄灌溉形成的盐分积累、平坦的地势,浅埋的地下水、排水不畅等导致发生土壤盐渍化且盐分组成复杂,尤其每年冬季至次年 4 月的春灌前土壤反盐作用最强,形成积盐作用,影响了灌区生态、农业和社会经济发展^[6,7]。对土壤盐分空间变异的充分了解是土壤盐渍化防控和盐渍土资源利用的基础,对于指导灌区农业生产、提高农作物产量等具有十分重要的现实意义。

地统计学是研究土壤属性空间变异的有效方法^[8]。随着精准农业的兴起,土壤盐分空间变异性研究成为土壤科学研究的热点^[9],研究尺度涵盖区域性、完整灌区、重要灌域、典型地块等。周在明等通过土壤和地下水监测点数据,选用地质统计学和 GIS 相结合的方法,研究了面积达 9.6×10^4 km² 的环渤海低平原土壤全盐量及其盐渍化程度的空间分布格局^[10]。史海滨等采用区域土壤信息定点监测,结合经典统计学、空间插值、空间自相关分析方法研究了节水改造前后沈乌灌域土壤盐分空间变异、时空分布规律及不同改造年限区域土壤盐分变化差异^[11]。王瑞萍等采用经典统计学、地统计学和多指标综合评价方法对河套灌区乌拉特灌域土壤盐碱化指标的空间分布特征进行分析,发现土壤 pH、全盐量和碱化度的空间分布规律都是在东西方向上,各指标西部低,东部高;在南北方向上,中间低,南北两侧高^[12]。姚荣江等选择山东省垦利县永安镇东七村与东义和村东西长约 3.75 km、南北宽约 1.6 km 的长方形耕地作为黄河三角洲地区典型地块的研究,掌握了地块尺度不同深度土层盐分含量的空间变异特征,并绘制了各土层盐分的随机性和结构

性的半方差图以及空间分布图^[9,11]。相对其他土壤盐渍化发育地区,青铜峡灌区近年来研究集中于利用多源遥感、实测高光谱数据开展盐分反演、盐渍化评价、预测及动态监测等方面^[13-17],针对盐分特征的研究以草甸湿地等特殊土地利用类型为主^[18,19];盐渍土空间分布特征研究也多围绕灌区北部开展^[7,20,21],整个灌区尺度上的研究很少^[6]。为此,本文以青铜峡灌区为研究对象,利用野外调查和土壤样品采集测试数据,采用经典统计学和地统计学方法,结合 GIS 技术对整个灌区 0~60 cm 3 个深度的土壤盐分及全土壤盐量特点和空间分布格局进行分析,以期为青铜峡灌区土壤盐碱化治理、生态环境保护和水土资源合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青铜峡灌区是宁夏引黄灌区的重要组成部分,也是银川平原的主体,可划分为银北、银川和银南 3 个片区。2019 年实际灌溉面积 31.7×10^4 hm²,现状干渠总长 1 078.5 km,总引水能力 603 m³/s。每年的 4 月中旬~9 月下旬和 10 月下旬~11 月下旬集中引用黄河水,分别称主灌溉期和冬灌期。灌区干旱少雨,日照充足,蒸发强烈;多年平均气温 11℃,平均年降水量 178 mm,且 70%~80%集中于 7~9 月;平均年蒸发量 1 825 mm,日照时数 2 977.5 h。灌区分布的土壤以灌淤土、灰钙土为主;土地利用和覆被类型包括耕地、草地、林地、水域、建设用地及未利用地。种植的粮食作物以水稻、玉米、小麦为主,经济作物以蔬菜和瓜果类为主。

1.2 数据来源

土壤易溶盐样品来自于 2018 年 4 月和 2019 年 4 月主灌溉期前(春灌前)开展的 2 次野外采集。综合考虑农业种植结构、土地利用类型和地下水状况等条件,在灌区尽可能均匀的布设了 80 个采样点,

并在盐渍化问题较突出地区增加了采样点密度。使用 GPS 定位后,分别采集了 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 的土壤易溶盐样品(图 1)。采集的样品由宁夏回族自治区地质矿产中心实验室按照《土工试验方法标准(GB/T50123-1999)》测试,采用离子加和法计算土壤全盐量。

技术进行数据的分析处理。其中,采用 SPSS25.0 进行描述性统计、相关性分析,采用软件 JMP16.0 完成偏态数据的 Box-Cox 正态变换,采用 GS⁺ 9.0 进行变异函数模型的拟合,采用 ArcGIS10.6 完成图件编辑绘制及空间数据的插值、属性计算。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分及其组成

青铜峡灌区不同深度土壤全盐量的统计特征见表 1,土壤盐分组成特征见表 2。偏度、峰度系数说明 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土壤全盐量都呈现明显偏态分布。不同深度土壤全盐量变异系数均大于 1,属强变异,且随着土壤深度增加,其值变化不大,造成这种现象的原因与研究区范围较大,土壤全盐量受到地形地貌、耕种方式、灌溉方式等因素的影响。为避免偏态数据在计算变异函数时可能存在的比例效应,对偏态分布数据进行了正态化处理,并通过 95% 的置信度检验。 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 是灌区不同深度土壤盐分主要离子,含量的和占对应深度土壤全盐量的 94.51%~95.77%。 $K^+ + Na^+$ 在不同深度土壤阳离子中占绝对优势,占阳离子含量的 59.05%~65.27%; Cl^- 在不同深度土壤阴离子中占优势且在 0~20 cm 占比达到 31.29%;硫酸盐在各深度土壤中含量相对稳定; HCO_3^- 含量在 0~20 cm 为 29.28%,随深度增加而增高,与该区土壤 pH 平均值 8.49~8.77 相符合; CO_3^{2-} 检出率约 50%且平均含量为阴离子中最低。

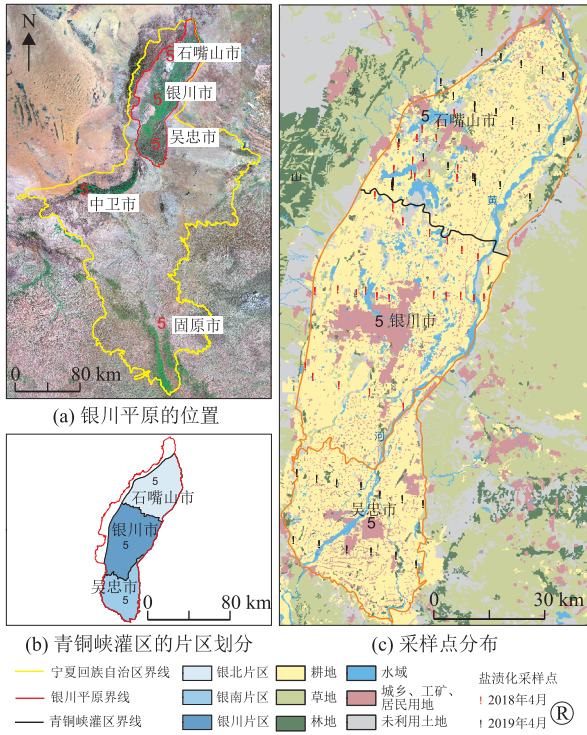


图 1 青铜峡灌区采样点分布

1.3 研究方法

采用经典统计方法、地质统计方法并借助 GIS

表 1 青铜峡灌区不同深度土壤全盐量的统计特征

深度/cm	样点数	分布类型	偏度系数*	峰度系数*	平均值/ $g \cdot kg^{-1}$	标准偏差	最小值/ $g \cdot kg^{-1}$	最大值/ $g \cdot kg^{-1}$	变异系数*
0~20	80	偏态	3.22(0.06)	11.82(0.57)	12.27	22.32	0.03	126.21	1.81(1.08)
20~40	80	偏态	4.18(0.14)	21.85(-0.85)	4.85	8.47	0.52	58.92	1.75(1.13)
40~60	80	偏态	4.91(0.18)	29.38(-0.93)	4.75	9.25	0.51	68.30	1.95(1.27)

* 括号内的数值表示正态化处理后的结果。

表 2 青铜峡灌区不同深度土壤盐分化学组成特征(%)

组分	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
$K^+ + Na^+$	21.25	18.15	18.21	19.20
Ca^{2+}	7.60	7.80	7.50	7.63
Mg^{2+}	2.82	3.56	3.72	3.37
Cl^-	20.84	16.58	16.22	17.88
SO_4^{2-}	25.40	20.54	20.37	22.10
HCO_3^-	20.69	31.50	32.21	28.13
CO_3^{2-}	1.41	1.87	1.77	1.68
小计	95.77	94.58	94.51	94.95

2.2 土壤盐分离子的相关性

青铜峡灌区土壤全盐量与离子含量相关性见

表 3。0~60 cm 内土壤全盐量与 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子含量显著相关($p < 0.01$),与 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 达到 0.989、0.967、0.964,可见氯化物和硫酸盐是土壤盐分的主要来源。分层统计的各深度土壤全盐量和离子含量的相关性与 0~60 cm 整体上基本相同,但 0~20 cm 土壤全盐量与 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的相关性更大,达到 0.991、0.973 和 0.965,与 0~20 cm 更容易受农业耕种等人为活动影响有关。有研究表明,若盐分阴阳离子间的相关系数为正且通过了 0.05 和 0.01 水平的显著性检验,说明阴离子随阳离子的增加而增

表3 青铜峡灌区土壤全盐量与离子含量相关性

组分	深度/cm	pH	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	全盐量
pH	0~20	1	0.250*	0.162	0.191	0.223*	0.243*	0.213	0.224*	0.253*
	20~40	1	0.200	0.159	0.306**	0.188	0.150	0.181	0.480**	0.227*
	40~60	1	0.104	0.145	0.337**	0.116	0.128	0.080	0.424**	0.147
	0~60	1	0.189**	0.128*	0.211**	0.169**	0.178**	0.129*	0.271**	0.198**
K ⁺ +Na ⁺	0~20		1	0.790**	0.371**	0.957**	0.952**	0.042	0.277*	0.991**
	20~40		1	0.546**	0.186	0.954**	0.919**	0.097	0.177	0.982**
	40~60		1	0.443**	0.268*	0.957**	0.952**	0.058	0.089	0.985**
	0~60		1	0.721**	0.347**	0.958**	0.951**	0.027	0.250**	0.989**
Ca ²⁺	0~20			1	0.574**	0.875**	0.799**	-0.029	-0.031	0.850**
	20~40			1	0.374**	0.496**	0.532**	0.644**	0.540**	0.657**
	40~60			1	0.625**	0.385**	0.429**	0.751**	0.706**	0.559**
	0~60			1	0.555**	0.774**	0.722**	0.319**	0.137*	0.794**
Mg ²⁺	0~20				1	0.514**	0.463**	-0.094	-0.051	0.480**
	20~40				1	0.180	0.371**	0.434**	0.375**	0.341**
	40~60				1	0.311**	0.364**	0.452**	0.529**	0.419**
	0~60				1	0.450**	0.449**	0.219**	0.096	0.465**
Cl ⁻	0~20					1	0.891**	-0.069	0.126	0.973**
	20~40					1	0.838**	-0.078	0.047	0.933**
	40~60					1	0.890**	-0.083	-0.009	0.946**
	0~60					1	0.890**	-0.073	0.114	0.967**
SO ₄ ²⁻	0~20						1	-0.015	0.170	0.965**
	20~40						1	0.096	0.118	0.942**
	40~60						1	0.003	0.055	0.960**
	0~60						1	-0.004	0.159*	0.964**
HCO ₃ ⁻	0~20							1	0.546**	0.015
	20~40							1	0.717**	0.207
	40~60							1	0.812**	0.153
	0~60							1	0.467**	0.065
CO ₃ ²⁻	0~20								1	0.221*
	20~40								1	0.255*
	40~60								1	0.190
	0~60								1	0.228**
全盐量	0~20									1
	20~40									1
	40~60									1
	0~60									1

注:①*. 在0.05级别(单尾),相关性显著。**,在0.01级别(单尾),相关性显著。

②0~60 cm相关性分析样本数量为240,0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm相关性分析样本数量为80。

加,两离子常相伴存在并易结合为土壤中的盐分物质^[22]。在0.01水平,青铜峡灌区不同深度土壤中Cl⁻与K⁺+Na⁺的相关系数都达到0.90以上,与Ca²⁺的相关系数也在0.853~0.875,与Mg²⁺除在20~40 cm无相关性外,其余层位相关性也达到显著水平;全部土层中SO₄²⁻与K⁺+Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的相关性强;HCO₃⁻与Ca²⁺、Mg²⁺,CO₃²⁻与K⁺+Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺均存在一定正相关关系。

2.3 典型盐分离子统计特征

对K⁺+Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻4种典型离子统计分析结果见表4,其不同深度呈偏态或对数正态分布,反映出不同的数值结构和变异规律。4种离子在不同深度均属强变异强度,说明不同深

度含量变化都很大。K⁺+Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻的平均值以0~20 cm最大,至20~40 cm平均值均大幅减少,减幅分别达到63.46%、66.80%和65.49%;40~60 cm与20~40 cm基本相同。HCO₃⁻在不同深度的含量变化较小,平均值为658.56~991.446 mg/kg,并表现出表层最小的特点。平均值和极值反映出不同深度4种离子含量变化十分明显,这与变异系数反映的结论一致。

2.4 土壤全盐量的空间分布格局

根据半方差函数理论计算的青铜峡灌区不同深度土壤全盐量的变异函数理论模型及相应参数见表5。青铜峡灌区0~20 cm和20~40 cm土壤全盐量可采用指数模型拟合,40~60 cm可采用球状模型

表 4 青铜峡灌区土壤离子统计特征值($K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)

离子	分布类型	深度 /cm	最小值 / $mg \cdot kg^{-1}$	最大值 / $mg \cdot kg^{-1}$	平均值 / $mg \cdot kg^{-1}$	标准偏差	偏度系数	峰度系数	变异系数
$K^+ + Na^+$	LgN	0~20	7.48	40 254.80	3 492.05	7 041.83	3.35	12.69	2.02
	偏态	20~40	4.30	19 529.31	1 275.87	2 710.48	4.59	26.55	2.12
	LgN	40~60	15.90	22 893.25	1 259.95	3 015.60	5.37	34.64	2.39
Cl^-	偏态	0~20	4.29	42 308.99	3 881.56	7 820.83	3.31	12.19	2.01
	偏态	20~40	60.30	18 367.40	1 288.76	2 985.55	3.93	17.19	2.32
	偏态	40~60	35.40	18 732.92	1 238.97	2 942.72	4.21	19.79	2.38
SO_4^{2-}	LgN	0~20	8.99	43 631.17	3 616.26	6 871.00	3.48	15.13	1.90
	LgN	20~40	20.56	19 391.63	1 248.10	2 545.25	5.09	33.01	2.04
	偏态	40~60	20.56	25 316.85	1 316.43	3 144.04	6.07	43.94	2.39
HCO_3^-	偏态	0~20	4.20	4 881.00	658.65	803.48	3.68	14.43	1.22
	偏态	20~40	214.00	15 255.00	991.46	1 793.49	6.67	51.75	1.81
	LgN	40~60	104.00	16 780.00	895.54	1 875.05	7.92	67.27	2.09

注:LgN 为对数正态分布,各深度样点个数为 80。

拟合。不同深度土壤全盐量的变程分别为 51.90 km、11.40 km 和 13.00 km,约为灌域最大直线范围的 7%到 30%,说明不同深度土壤全盐量自相关范围均不大;表层土变程最大的特点与康满萍等在苏干湖湿地的研究结论相似^[23]。0~20 cm 土壤全盐量的 C_0 和 Sill 值均偏大,说明该深度土壤全盐量的随机变异和系统总变异程度都较强;随深度增加 C_0 和 Sill 明显减小,表现为空间异质性相对较弱且空间变异趋于稳定。0~20 cm 和 40~60 cm 土壤全盐含量的 C_0 /Sill 值为 49.5%、36.1%,呈中等程度的空间自相关性,亦即其变异受结构性因素和随机性因素综合作用;而 20~40 cm 土壤全盐含量的 C_0 /Sill 值为 11.4%,表现出较强的空间自相关,这可能与灌区该深度范围多分布有粉质粘土、粉土、粘土等细颗粒物质有关^[24],但具体原因还需深入研究。

表 5 青铜峡灌区不同深度土壤全盐含量的变异函数模型

深度 /cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 Sill	C_0 /Sill /%	变程 /km	R^2
0~20	指数模型	20.74	41.94	49.5	51.90	0.564
20~40	指数模型	0.60	5.28	11.4	11.40	0.399
40~60	球状模型	1.71	4.74	36.1	13.00	0.514

根据盐渍化土壤划分标准^[2],将青铜峡灌区土壤盐渍化分为非、轻度、中度、重度盐化土和盐土 5 类,结合表 5 利用 ArcGIS10.6 绘制了不同深度土壤全盐量空间分布图(图 2)。平面上不同深度土壤盐分含量分布的整体格局基本相似,土壤全盐量大于 4 g/l 高值区域主要集中在银北片区和银川片区,并在银北灌区呈现自高值中心向周边扩展减小的态势;土壤全盐量小于 2 g/l 的区域主要集中在银南灌区。垂向上随着土壤深度增加全盐量明显减

小,其中银北片区表层与下部土壤全盐量分布格局相似,但高值区也渐趋减少,银川片区表层分布的大于 10 g/l 的区域在 20~40 cm 演变为以 2~4 g/l 为主,至 40~60 cm 演变为 1~2 g/l 和 2~4 g/l 为主;银南片区 20 cm 以下土壤全盐量则基本保持在 2 g/l 以下。

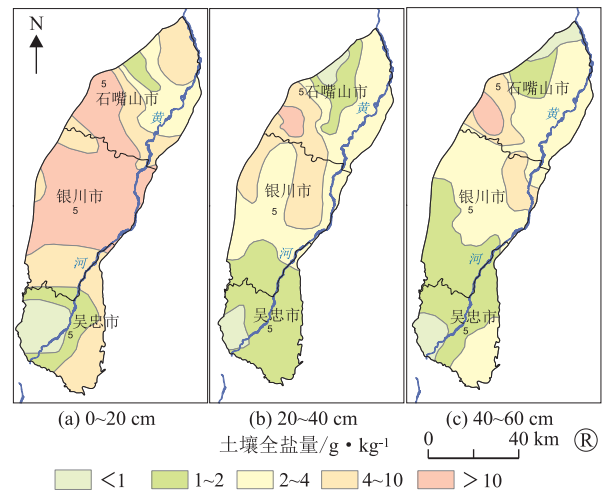


图 2 青铜峡灌区不同深度土壤全盐量空间分布格局

不同级别土壤盐渍化面积统计见表 6,青铜峡灌区 0~20 cm 土壤属于非、轻度、中度、重度盐渍化和盐土的面积分别占总面积的 7.11%、10.00%、10.56%、33.03%、39.31%。从不同片区看,银北片区轻度、中度、重度盐化土的分布较均匀,分别占该片区面积的 30.31%、37.68%、26.25%;银川片区表层以重度盐化土和盐土占绝对优势,分别占该片区面积的 25.97%和 71.95%;银南片区则以非盐化土和轻度盐化土为主。随着土壤深度的增加,重度盐化土和盐土面积减小十分明显,就整个灌区看,20~40 cm 面积分别减少至 1 180.97 km² 和 131.76

km²,而 40~60 cm 重度盐化土面积进一步减少至 600.60 km²。就不同片区看,银北片区 20~40 cm 和 40~60 cm 深度非、轻度和中度盐化区域在片区内的面积和占比也增加至 75.05%和 77.14%;银川

片区也演变为中度、轻度盐渍化占绝对优势;银南片区 20 cm 以下深度则以非盐化土和轻度盐化土为主。

表 6 青铜峡灌区不同深度土壤盐渍化等级统计表

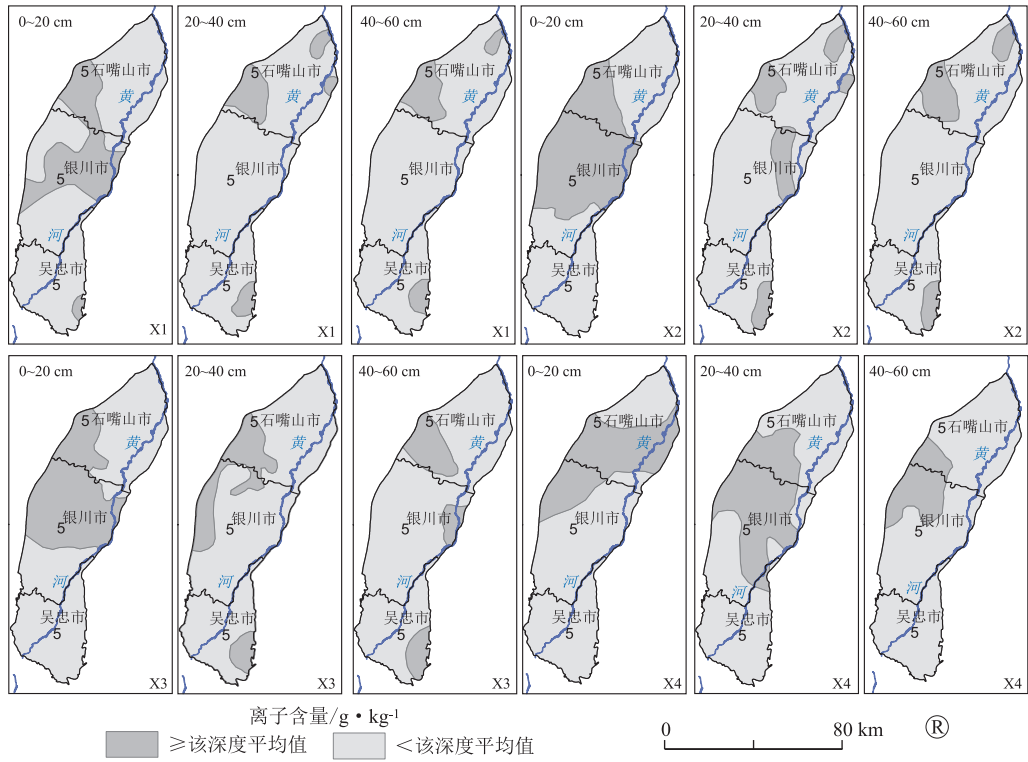
灌区	盐化程度	0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
银北片区	非盐化土	0.00	0.00	94.03	4.38	138.18	6.44
	轻度盐化土	123.56	5.76	380.21	17.73	279.86	13.05
	中度盐化土	650.00	30.31	1 135.20	52.94	1 236.18	57.65
	重度盐化土	807.96	37.68	403.23	18.80	315.85	14.73
	盐土	562.91	26.25	131.76	6.14	174.36	8.13
银川片区	非盐化土	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	轻度盐化土	53.41	2.08	436.28	16.99	917.21	35.73
	中度盐化土	0.00	0.00	1 353.13	52.71	1 365.19	53.18
	重度盐化土	666.78	25.97	777.74	30.30	284.75	11.09
	盐土	1 846.96	71.95	0.00	0.00	0.00	0.00
银南片区	非盐化土	437.68	30.30	201.66	13.96	218.29	15.11
	轻度盐化土	438.45	30.35	1 206.55	83.53	803.74	55.64
	中度盐化土	0.00	0.00	36.28	2.51	422.47	29.25
	重度盐化土	558.53	38.67	0.00	0.00	0.00	0.00
	盐土	9.83	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00
青铜峡灌区	非盐化土	437.68	7.11	295.69	4.80	356.47	5.79
	轻度盐化土	615.43	10.00	2 023.04	32.86	2 000.82	32.50
	中度盐化土	650.00	10.56	2 524.62	41.01	3 023.84	49.12
	重度盐化土	2 033.27	33.03	1 180.97	19.18	600.60	9.76
	盐土	2 419.70	39.31	131.76	2.14	174.36	2.83

注:银北片区、银川片区、银南片区中面积比是该片区相应盐化程度区面积与该片区面积的比;青铜峡灌区中面积比是相应盐化程度区与青铜峡灌区总面积的比。

2.5 典型土壤盐分离子的空间分布格局

采用 GS⁺9.0 对 SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、K⁺+Na⁺ 的空间变异性进行分析。各离子空间自相关距离变化范围为 3.80~47.00 km,最大自相关距离约为灌区直线范围的 1/3,说明自相关范围均不很大,尤其是 Cl⁻ 和 HCO₃⁻ 的自相关范围较小。各深度不同离子的 C₀ 较小,说明在本研究尺度上空间异质性相对较弱。C₀/Sill 表明土壤性质空间相关性的程度,可见 K⁺+Na⁺ 在 0~20 cm 和 20~40 cm 空间相关性中等,在 40~60 cm 较强;Cl⁻ 在 0~20 cm 和 40~60 cm 空间相关性中等,在 20~40 cm 较强;SO₄²⁻ 在 0~20 cm 空间相关性较强,在 20~40 cm 和 40~60 cm 空间相关性较弱;HCO₃⁻ 在 0~20 cm 和 20~40 cm 空间相关性均较强。这表明在研究尺度上土壤盐分含量均呈中等以上的空间自相关,但不同离子在不同土层由空间自相关引起的空间异质性所占的比例有所差异,同时也说明青铜峡灌区不同深度土壤盐分离子的空间分布不仅受结构性因素影响,同时还受随机性因素影响,这与土壤全盐量的研究相同。利用 ArcGIS10.6,以各层土壤相应离子含

量的平均值作为分级断点,绘制的区土壤盐离子含量的空间分布见图 3。总体上看 4 种典型离子的空间分布特征与土壤全盐量的空间分布规律相似。垂直分布上,K⁺+Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 离子含量的空间分布具有高度的连续性和方向性,即 0~20 cm 深度盐离子含量明显高于其它土层,随着土层厚度增加盐离子含量呈现减少的趋势,但是上层离子含量高的地区对应的下层含量也偏高,这与不同深度土壤全盐量的分析结论相同。具体特征是,K⁺+Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 离子在 0~20 cm 深度土壤中,均呈现出银北片区的西南部分、银川片区的大部分区域高于其平均值,其余小于其平均值的特点;在 20~40 cm,银北片区 4 种离子含量高于其平均值的区域与表层基本相同,Cl⁻ 和 K⁺+Na⁺ 含量在银川片区已基本小于其平均值,SO₄²⁻ 含量高于其平均值的区域也由基本覆盖该片区演变至仅覆盖西部小范围地区,HCO₃⁻ 相对特殊,在该深度高于其平均值的范围进一步扩大,而银南片区 K⁺+Na⁺、HCO₃⁻ 的含量特征与表层相同,Cl⁻、SO₄²⁻ 含量在该片区西南部分有增高趋势;在 40~



(X1. $K^+ + Na^+$, X2. Cl^- , X3. SO_4^{2-} , X4. HCO_3^- ; 其不同深度平均值见表 4)

图 3 青铜峡灌区不同深度典型离子含量空间分布

60 cm,除银北片区的西南部分和银南片区的东南部分的小区域外,4 种离子含量已基本降至该深度平均值以下。

3 讨论

本文主要探讨了青铜峡灌区春灌前 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土壤盐渍化及盐渍组成空间分布特征。0~20 cm 土壤全盐量的平均值、标准差和最大值均大于其他深度土壤,这与采样时段处在春灌前的旱季,强烈的蒸发作用容易产生表层盐分累积有一定关系;不同深度土壤盐渍化程度的评价结果也表明土壤盐分具有表聚趋势,这与张源沛等的研究结论一致^[6]。但表层土壤盐渍化程度与武丹等利用遥感数据反演结果差异较明显^[15],一方面可能与选择方法不同有关,也可能与本次部分采样点分布于城镇、河流、湖泊、排水沟等土地利用强度变化较大的区域或其附近,而土地利用强度的改变对土壤盐渍化有促进作用,容易导致土壤次生盐渍化有关^[25]。青铜峡灌区土壤盐分组成中 $K^+ + Na^+$ 在不同深度土壤阴阳离子中占优势,与 Na^+ 颗粒较小且相对活跃和易溶于水,在春灌前旱季较强的蒸发作用下容易被固定在土壤中有关,与吕真真等在黄河三角洲的相关研究结果基本一致^[26]; Cl^- 在阴离

子中含量最高,与采样期间降雨稀少和尚未灌溉使氯化物无法接受水分淋滤向下运移而积留在土壤中有关,这与王巧焕等对干旱区绿洲土壤盐分特征的研究结果基本一致^[27];硫酸盐、碳酸盐含量相对稳定且较低,与其溶解度较小不易在土壤水盐运移过程被淋洗和盐分难以水解为离子有关。土壤盐分阴阳离子间相关性不仅反映了盐分在土体中的存在状态和组合十分复杂,也在一定程度上揭示青铜峡灌区土壤盐分形成与长期以来的农业耕种等人类活动的强干扰有很大关系^[28]。空间异质性是土壤全盐量空间分布格局的本质属性,反映了空间系统的复杂性和变异程度,而青铜峡灌区土壤全盐含量及 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子含量的空间异质性受气象、地形地貌、成土母质、土壤类型、地下水埋深等结构性因素和耕作方式、施肥、种植、灌溉制度等随机性因素共同作用,故在青铜峡灌区开展土壤盐渍化治理一方面要注重降低土壤,尤其是表层土壤中的 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 的含量,也要加强 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等土壤盐分离子的控制;同时也必须加强盐渍化动态监测、预报和调控的综合研究。

研究尺度对土壤盐分空间变异性和时空分布研究十分重要^[29],由于本次采样点间距较大,使地统计学方法的应用受到影响,可能使本次灌区尺度的

研究不够精确。未来可以考虑在相同时间开展更加密集的土壤样品采集,并结合 DEM、土壤类型、土地利用方式和地下水状况等辅助信息,采用回归克里格等方法进行空间插值,获取更加精准的土壤盐渍化时空分布特征。另外4月份春灌前是灌区一年中土壤反盐最高期,也就是说本研究一定程度代表了当年土壤盐渍化的最高水平,随着年内灌溉活动进行和降雨的增多,洗盐作用将十分明显,土壤盐渍化程度也会明显减轻^[30]。总体上看,青铜峡灌区不同深度土壤在春灌前的盐渍化现象依然严重且复杂,有必要在加强研究同时做好预防工作。

4 结论

(1) 青铜峡灌区不同深度土壤全盐量呈偏态分布且都属强变异强度;土壤全盐量与主要盐分离子均存在极显著正相关关系($P < 0.01$);阴阳离子间的强相关性反映出不同深度土壤盐分阴阳离子组合十分复杂。

(2) 不同深度土壤全盐量和 $K^+ + Na^+ + Cl^- + SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 含量具有中等-较强烈的空间自相关性,最大自相关距离均未超过灌区最大直线范围的1/3。

(3) 灌区0~20 cm 表层土壤属于非、轻度、中度、重度盐化土和盐土的面积分别是 437.68 km²、615.43 km²、650.00 km²、2 033.27 km²、2 419.70 km²;随土壤深度增加重度盐化土和盐土面积明显减少。 $K^+ + Na^+ + Cl^- + SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 含量的空间分布与土壤全盐量相似。

参考文献

[1] 杨奇超,高昂,袁广祥,等. 红崖山灌区土壤盐渍化灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(2): 102-107.

[2] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[3] 缙倩倩,韩致文,王国华. 中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 246-250.

[4] 任仓钰. 农业灌溉引起的环境地质问题[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, (4): 14-15.

[5] 李平,赵鸿斌,田原,等. 塔里木河流域土地盐渍化改良与竖井排灌工程[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, (2): 48-50+62.

[6] 张源沛,胡克林,李保国,等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24.

[7] 李重阳,宋豫秦. 宁夏银北灌区土壤盐渍化时空分布特征[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 134-136+140.

[8] 张慧文,马剑英,张自文,等. 地统计学在土壤科学中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 14-20+27.

[9] 姚荣江,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, (6): 61-66.

[10] 周在明. 环渤海低平原土壤盐分空间变异性及影响机制研究[D];中国地质科学院, 2012.

[11] 史海滨,吴迪,闫建文,等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 318-331.

[12] 王瑞萍,万核洋,陈帅,等. 河套灌区乌拉特灌域春季土壤盐碱化空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 105-113.

[13] 吴霞,王长军,樊丽琴,等. 基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 124-133.

[14] 毛鸿欣,贾科利,张旭. 基于实测高光谱和 Sentinel-2B 影像的银川平原土壤盐分反演[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 929-941.

[15] 武丹,贾科利,张晓东,等. 基于异质 SVM 神经网络的土壤盐渍化灾害预测模型[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 143-149+157.

[16] 贾萍萍,尚天浩,张俊华,等. 利用多源光谱信息反演宁夏银北地区干季土壤含盐量[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 125-134.

[17] 陈睿华,尚天浩,张俊华,等. 不同光谱类型对银川平原土壤含盐量反演精度的影响与校正[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 922-930.

[18] 吴春燕,夏贵菊,何彤慧,等. 银川平原草甸湿地土壤盐分组成特征研究[J]. 北方园艺, 2016, (13): 168-172.

[19] 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.

[20] 郭军成,王明国,耿荣,等. 宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(5): 38-42.

[21] 方媛,吕新胜,方璐. 基于 WET 的银北地区盐渍土分布特征研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 57-61+66.

[22] 王宁,熊黑钢,叶红云,等. 准格尔盆地不同程度人类干扰下土壤盐分及离子组成特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 71-77+189.

[23] 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[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2282-2291.

[24] 余世鹏,杨劲松,刘广明. 易盐渍区粘土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 495-501.

[25] 张荣群,乔月霞,薛佳妮. 银川平原土壤盐渍化与土地利用强度的空间关联分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(5): 598-606.

[26] 吕真真,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377-1385.

[27] 王巧焕,卢玉东,赛佳美,等. 干旱区绿洲土壤盐分特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 503-509.

[28] 李新国,樊自立,李志志,等. 开都河下游灌区土壤盐渍化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 147-151+158.

[29] 徐英,陈亚新,史海滨,等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004, (2): 1-5.

[30] 卢慧蛟. 银川平原地下水水盐均衡分析及土壤盐渍化防治[D];长安大学, 2010.