

盘锦市地表灌溉水质评价及灌溉适用性分析

申 祺, 展广军, 李蔚然, 于小彭, 王康健, 于艳青, 李振宇*

(辽宁省盐碱地利用研究所, 辽宁 盘锦 124010)

摘 要:【目的】系统评价盘锦市地表灌溉水的水质状况, 为盘锦市灌溉水质安全和农业高质量发展提供数据支撑。

【方法】分别于平水期、丰水期和枯水期对盘锦市内 6 个监测点位进行调查分析, 利用综合污染指数(CPI)、内梅罗综合污染指数($P_{\text{内}}$)、钠量法(SC)和残余碳酸钠法(RSC), 对地表灌溉水进行水质评价。【结果】地表灌溉水的水质指标存在明显的时空变异性, 主要污染指标为氨态氮、氯化物和粪大肠菌群。基于综合污染指数法的评价结果显示, 地表灌溉水的水质总体较好, 水质由平水期至枯水期从清洁状态向尚清洁状态发生转变, 东风监测点存在季节性污染; 基于内梅罗综合污染指数($P_{\text{内}}$)的评价结果表明, 灌溉水水质总体较好, 丰水期水质优于平水期和枯水期, 田庄台、西绕和双绕监测点位存在季节性污染; 灌溉适用性评价结果显示, 地表水总体可适用于灌溉, 丰水期灌溉适用性优于平水期和枯水期。【结论】盘锦市地表灌溉水水质较好且适用于灌溉。

关 键 词: 盘锦市; 地表灌溉用水; 水质评价; 灌溉适用性

中图分类号: X522; X824

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022232

OSID:



申祺, 展广军, 李蔚然, 等. 盘锦市地表灌溉水质评价及灌溉适用性分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 165-171.

SHEN Qi, ZHAN Guangjun, LI Weiran, et al. Quality and Suitability of Surface Irrigation Water in Panjin City[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 165-171.

0 引 言

【研究意义】地表水作为生活污水、工业废水和地表径流排放的主要载体, 易遭受水质污染^[1]。盘锦市地处辽河下游, 是辽宁省水稻的主产区之一, 农业灌溉用水量高达区域水资源利用总量的 80%^[2]。随着人类活动强度的提高, 地表水污染愈加普遍。污水灌溉可能导致水中的污染物迁移到土壤和农作物中, 从而影响土壤质量和作物品质, 进而危害人体健康^[3]。因此, 有必要对盘锦市地表水水质进行综合评价, 以保障灌溉水质安全和农业高质量发展。【研究进展】国内外对地表水水质评价的方法主要有单因子评价法、主成分分析法、内梅罗综合污染指数法、层次分析法和模糊综合评价法等^[4]。王康健等^[5]利用单因子评价法对盘锦市稻区灌溉水质进行了分析, 发现氯化物、悬浮物的单因子评价指数较高, 导致水质欠佳; 林巧^[6]利用单因子评价法对盘锦市县域地表水水质进行了评价。李步东等^[7]利用主成分分析法对辽河流域水质状况进行了评价。田诗阳等^[8]采用单因子评价

法和内梅罗综合污染指数法对盘锦市各渠道断面水质进行了评价, 发现曙光大桥断面及万金滩断面存在轻度水质污染。【切入点】以往研究在水质评价方面多是对某一种方法的简单应用, 评价结果容易产生较大的误差。为了提高水质评价结果的科学性、准确性及客观性, 需综合采用多种水质评价方法对灌溉水水质进行评价。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究首先采用单项污染指数法判别污染指标; 在此基础上, 基于综合污染指数法和内梅罗综合污染指数法对水质进行定性、定量评价; 最后结合离子指标, 进一步采用钠量法和残余碳酸钠法对灌溉水质进行评价。本研究结果对于排查盘锦市地表灌溉水质污染风险^[9]及保障农产品安全具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

盘锦市位于辽河三角洲中心区域, 属暖温带大陆性半湿润季风气候区, 平均气温偏高, 降水量偏少, 日照时间较长。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设

以盘锦市为研究对象, 参照《NY/Y396—2000 农用水源环境质量监测技术规范》^[10]设置地表灌溉水取样点, 取样点位分别为盘锦市内的双绕、西绕、新开、东风、杨家和田庄台。

收稿日期: 2022-04-26

修回日期: 2023-08-01

基金项目: 耐盐碱水稻遗传育种与耕作栽培(2022DD185931); 抗逆优良食味直播水稻新品种选育及配套栽培技术研究与示范(2021JH/10200028); 国家重点研发计划资助(2017YFD0300700)

作者简介: 申祺(1993-), 女。研究实习生, 主要从事生态学和农田生态水利方面研究。E-mail: 2867749935@qq.com

通信作者: 李振宇(1966-), 男。研究员, 主要从事水稻育种研究。

E-mail: 399597147@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1.2.2 采样与分析方法

分别于 2021 年 5 月 19 日（平水期）、2021 年 7 月 21 日（丰水期）和 2021 年 11 月 17 日（枯水期）对各监测点进行地表水取样检测。使用 5 L 取样器对地表水进行取样，样品采集后立即用 0.45 μm 滤膜过滤杂质后放入 4 $^{\circ}\text{C}$ 保温箱中避光冷藏保存，送入实验室检测。于盘锦市检验检测中心实验室测定水体的溶解氧(DO)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、氨态氮($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$)、五日生化需氧量(BOD_5)和粪大肠菌群数量；于辽宁省盐碱地利用研究所实验室测定水体 pH 值、全盐量、 $\text{K}^{+}\text{+Na}^{+}$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 量和 HCO_3^{-} 量。参照《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）^[11] 和《农田灌溉水质标准》（GB 5084-2021）^[12]，共选取 11 个指标进行水质评价。

1.3 评价方法

1.3.1 污染评价法

1) 单项污染指数法 (P_i)

单项污染指数法是最直接的水质评价方法，可以明确水体主要污染物，计算式为：

$$P_i = \frac{C_i}{W_i}, \quad (1)$$

式中： P_i 为水中污染物 i 的单项污染指数，可直接反映污染物是否超标； C_i 为水中污染物 i 的实际观测量，其值小于检出限则取其检出限的 50% 进行计算； W_i 为污染物 i 的评价标准，选取适用于农业用水区的 V 类水质标准和农田灌溉水质标准作为地表水污染评价标准值。

在单项污染指数中，DO 量和 pH 值与其他指标相比较为特殊。DO 属于清洁指标，浓度与污染水平呈负相关性，计算式为：

$$\text{单项污染指数} = \frac{\text{实际最大值} - \text{实测值}}{\text{实际最大值} - \text{标准限值}}, \quad (2)$$

pH 值的特殊性在于存在幅度限制（幅度限制为 5.5~8.5），计算式为：

$$\text{单项污染指数} = \frac{\text{实测值} - \text{允许幅度平均值}}{\text{允许幅度最高值} - \text{允许幅度平均值}}, \quad \text{pH 值} > 7.0 \quad (3)$$

$$\text{单项污染指数} = \frac{\text{允许幅度平均值} - \text{实测值}}{\text{允许幅度最高值} - \text{允许幅度平均值}}, \quad \text{pH 值} \leq 7.0 \quad (4)$$

2) 综合污染指数法 (CPI)

选取等权重 CPI 评价盘锦水质的相对污染程度，即采用各水质指标的实测值与其评价标准限值（V 类水）之比作为单项污染指数，然后通过等权重平均得出综合污染指数^[13]。该方法可以反映整体水质变化情况，但多指标混合后削弱了有毒有害指标对水体的影响。计算式为^[14]：

$$CPI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CPI_i, \quad (5)$$

式中： CPI 为综合污染指数； CPI_i 为第 i 项指标的单项污染指数； n 为检测指标个数。依据综合污染指数的水质评价分级标准，可将地表水污染级别划分为清洁、尚清洁、轻污染、中污染和重污染几个等级（表 1）。

3) 内梅罗综合污染指数法 ($P_{\text{综}}$)

$P_{\text{综}}$ ^[15] 综合考虑了各项指标对水体污染的影响程度，突出了浓度最大因子的作用。计算式为：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{平均}})^2 + (P_{\text{最大}})^2}{2}}, \quad (6)$$

式中： $P_{\text{综}}$ 为水综合污染指数； $P_{\text{平均}}$ 为平均单项污染指数； $P_{\text{最大}}$ 为最大单项污染指数。根据 $P_{\text{综}}$ 分级^[10]，可将地表水污染级别划分为清洁、尚清洁和污染 3 个等级（表 1）。

表 1 水质评价分级标准

Table 1 Water quality classification standard

水质类别	综合污染指数取值范围	级别	水质现状
CPI	I 类水 $CPI \leq 0.25$	清洁	水质标准能达到相应的功能标准
	II 类水 $0.25 < CPI \leq 0.4$	尚清洁	多数水质指标能达到相应的功能标准，个别指标超标也在标准内
	III 类水 $0.4 < CPI \leq 0.5$	轻污染	个别项目检出值超标
	IV 类水 $0.5 < CPI \leq 0.99$	中污染	一部分项目检出值超过标准
	V 类水 $CPI \geq 1.0$	重污染	很多项目检出值超过标准
$P_{\text{综}}$	1 类水 ≤ 0.5	清洁	清洁
	2 类水 $0.5 \sim 1.0$	尚清洁	标准限量内
	3 类水 ≥ 1.0	污染	超出警戒水平

1.3.2 灌溉适用性评价

综合污染指数法和内梅罗综合污染指数法仅考虑了常规指标的影响，并未考虑离子量的影响，存在一定的局限性。因此，本研究进一步考虑离子量的影响，并结合灌溉适用性评价体系，系统分析盘锦市灌溉水质对农产品安全质量的保障情况。

当水中的 Na^{+} 量过高时， Na^{+} 会与土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生置换，降低土壤渗透性，导致土壤缺钙、反絮凝和土壤质量降低，进而影响植物生长。利用钠量法（SC）和残余碳酸钠法（RSC）评价地表水的灌溉适用性^[3,16]，该方法可以反映地表水是否可适用于灌溉。2 种评价体系的评价等级划分标准见表 2。SC 和

RSC 计算方法如式（7）一式（8）所示，式中的离子浓度单位为 meq/L。

SC=100×(K⁺+Na⁺)/(K⁺+Na⁺+Ca²⁺+Mg²⁺), (7)

RSC=HCO₃⁻-(Ca²⁺+Mg²⁺)。 (8)

表 2 灌溉水适用性评价等级

Table 2 Irrigation applicability index grade

评价参数	分类参考值	适用等级
SC/%	<20	非常适用
	20~40	较适用
	40~60	适用
	60~80	不确定
	>80	不适用
RSC/(meq L ⁻¹)	<1.25	非常适用
	1.25~2.50	适用
	>2.50	不适用

1.4 数理统计方法

利用 Excel 软件对灌溉水质测定数据进行整理和分析，主成分分析（PCA）和离子浓度相关性分析基于 SPSS 软件运行。

表 3 地表水水质指标统计

Table 3 Statistics of the indicators in surface water

监测点	时期	DO 量/ (mg L ⁻¹)	COD _{Mn} 量/ (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N 量/ (mg L ⁻¹)	BOD ₅ 量/ (mg L ⁻¹)	粪大肠菌群 数量/(MPN L ⁻¹)	pH 值	氯化物量 /(mg L ⁻¹)	全盐量/ (mg L ⁻¹)
双绕	平水期	6.40	1.90	0.088	4.50	35 000	7.36	53.00	282.20
	丰水期	4.80	4.80	0.390	3.10	2 200	7.28	103.20	555.30
	枯水期	6.37	3.54	1.010	4.60	5 400	8.14	494.50	916.90
西绕	平水期	6.30	1.90	0.050	4.40	54 000	7.35	53.00	356.80
	丰水期	5.00	3.50	0.480	3.40	4 300	7.42	56.60	409.00
	枯水期	5.72	2.82	0.810	3.80	5 400	7.62	123.80	763.20
新开	平水期	5.00	2.00	0.027	3.30	17 000	7.91	88.00	575.80
	丰水期	6.00	3.39	0.200	4.30	<20	7.35	106.10	552.50
	枯水期	6.11	2.34	0.470	4.20	<20	7.79	300.50	898.10
东风	平水期	6.20	2.00	0.030	4.30	28 000	7.93	88.00	465.70
	丰水期	5.90	3.55	0.460	4.00	<20	7.47	141.40	1 020.20
	枯水期	6.45	4.34	2.170	4.80	28 000	6.95	176.80	1 274.10
杨家	平水期	4.70	1.90	0.068	2.80	22 000	8.23	57.00	458.90
	丰水期	6.30	3.80	0.350	4.40	<20	7.54	53.00	377.30
	枯水期	6.26	4.10	0.820	4.50	1 100	7.73	353.6	1 096.50
田庄台	平水期	6.30	1.80	0.027	4.50	54 000	7.68	55.00	401.40
	丰水期	6.50	0.55	0.190	4.60	<20	7.53	229.80	841.70
	枯水期	6.10	3.74	1.040	4.20	<20	8.24	212.10	750.50
地表水环境质量标准	V 类	2	15	2	10				
农田灌溉水质标准	I 类				60	40 000	5.5~8.5	350	2 000
	II 类				100	40 000	5.5~8.5	350	2 000
	III ^a 类				40	20 000	5.5~8.5	350	2 000
	III ^b 类				15	10 000	5.5~8.5	350	2 000

注 黑体加粗数字表示此浓度超标。此外根据《农田灌溉水质标准》，农田灌溉水质分为 I 类（水田作物）、II 类（旱地作物）和 III 类（蔬菜，III^a 代表加工、烹调及去皮蔬菜，III^b 代表生食类蔬菜、瓜类和草本水果）。

2.2 污染源解析

为识别影响盘锦市不同时期灌溉水水质差异的关键因子，选取 8 项水质指标进行主成分分析。由表 4 可知，在平水期，第一、二、三主成分的方差贡献率分别为 60.93%、22.06%和 13.16%，累计贡献率为

2 结果与分析

2.1 指标监测结果

由表 3 可知，NH₄⁺-N 浓度超出了地表水环境质量标准 V 类水的限值，氯化物和粪大肠菌群数量超出了农田灌溉水质标准限值。针对单项污染指数，盘锦市地表水灌溉水质的主要污染指标为氨氮、氯化物和粪大肠菌群。盘锦市各监测点位 NH₄⁺-N 浓度呈枯水期>丰水期>平水期。其中，东风监测点枯水期 NH₄⁺-N 浓度最高，为 2.17 mg/L，新开和田庄台监测点平水期 NH₄⁺-N 浓度最低，为 0.027 mg/L。各监测断面氯化物浓度呈枯水期>丰水期>平水期。其中，双绕监测点枯水期氯化物浓度最高，为 494.5 mg/L，双绕和西绕监测点平水期氯化物浓度最低，为 53.0 mg/L。各监测断面粪大肠菌群数量呈平水期>枯水期>丰水期。其中，西绕和田庄台监测点平水期粪大肠菌群数最高为 54 000 MPN/L，新开、东风、杨家和田庄台监测点丰水期粪大肠菌群数量均低于 20 MPN/L。

96.15%，其中 pH 值和全盐量与 PC1 呈显著正相关，因子载荷值均超过了 0.8，说明水质主要受到 pH 值和全盐量的影响；氯化物与 PC2 呈正相关，因子载荷值为 0.614，说明水质在一定程度上受氯化物浓度的影响；COD_{Mn} 与 PC3 呈正相关，因子载荷值为 0.601，

表明水体存在有机物污染。在丰水期,第一主成分贡献率为 51.21%,其中 BOD_5 、DO 与 PC1 呈显著正相关,因子载荷值分别为 0.879 和 0.920,说明水质主要受 BOD_5 和 DO 的影响;第二主成分贡献率为 25.07%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、氯化物与 PC2 呈正相关,因子载荷值分别为 0.720 和 0.747,说明水质一定程度上受到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和氯化物浓度的影响。在枯水期,第一、二主成分的方差贡献率分别为 59.95%和 27.52%,累计贡献率为 87.47%,其中 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 量、粪

大肠菌群数量、全盐量与 PC1 呈显著正相关,因子载荷值分别为 0.862、0.935、0.875 和 0.913,说明水质主要受到 COD_{Mn} 量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 量、粪大肠菌群数量、全盐量的影响;氯化物与 PC2 呈正相关,因子载荷值为 0.867,说明水质一定程度上受到氯化物浓度的影响。由以上 3 个时期的水体指标主导因子分析结果可知,不同时期间的主要影响因子存在一定差异,该结果可为不同时期水污染精准治理提供依据。

表 4 盘锦市不同时期灌溉水质指标主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of irrigation water quality indicators in different periods of Panjin City

时期	主成分载荷矩阵										
	主成分	BOD ₅	DO	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	粪大肠菌群数	pH 值	氯化物	全盐量	方差贡献率/%	累计贡献率/%
平水期	PC1	-0.816	-0.837	0.689	-0.354	-0.875	0.852	0.754	0.920	60.93	60.93
	PC2	0.544	0.490	0.353	-0.761	0.193	-0.219	0.614	0.254	22.06	82.99
	PC3	0.131	0.164	0.601	0.542	-0.397	-0.284	0.213	-0.266	13.16	96.15
丰水期	PC1	0.879	0.920	-0.543	0.466	-0.821	0.772	0.615	0.558	51.21	51.21
	PC2	-0.448	-0.355	0.449	0.720	0.100	-0.116	0.747	0.595	25.07	76.28
枯水期	PC1	0.757	0.722	0.862	0.935	0.875	-0.696	-0.015	0.913	59.95	59.95
	PC2	0.578	0.644	0.198	-0.256	-0.398	0.561	0.867	-0.015	27.52	87.47

2.3 水质评价

各监测点位不同时期水质综合污染指数法的评价结果如表 5 和图 1 (a) 所示。平水期、丰水期、枯水期 3 个时期的平均 CPI 为 0.245,水质级别为清洁。平水期、丰水期和枯水期各时期的平均 CPI 分别为 0.171、0.256 和 0.306。东风监测点在枯水期的 CPI 最大,进一步分析水质数据发现其氨氮浓度高于其他监测点位,原因可能是该点位于河流下游,水流滞缓,河流汇集了工农业废水和生活污水中大量的氮^[5-8]。

由表 5 可知,平水期、丰水期、枯水期 3 个时期的平均 $P_{\text{综}}$ 为 0.611,水质级别为尚清洁。依据不同时期 CPI 水质评价结果,丰水期水质优于平水期和枯水期,这与丰水期降水增强了河流的自净能力有关^[17]。从图 1 (b) 可以看出,田庄台和西绕监测点平水期、双绕监测点枯水期的 $P_{\text{综}} > 1$,表明部分点位存在季节

性污染。在平水期,田庄台和西绕 2 个监测点的粪大肠菌群数量高于其他监测点位,上游畜牧养殖的粪便排放是导致粪大肠菌群数量增加的主要原因^[6,18];在枯水期,双绕监测点氯化物浓度高于其他监测点,主要原因是监测点位于河流下游,地表水汇集且水流滞缓,导致氯化物超出警戒水平。

表 5 水质评价结果

Table 5 Results of water quality assessment

时期	CPI			$P_{\text{综}}$		
	平均值	级别	水质类别	平均值	级别	水质类别
平水期	0.171	清洁	I 类水	0.795	尚清洁	2 类水
丰水期	0.256	尚清洁	II 类水	0.318	清洁	1 类水
枯水期	0.306	尚清洁	II 类水	0.718	尚清洁	2 类水
三期综合	0.245	清洁	I 类水	0.611	尚清洁	2 类水

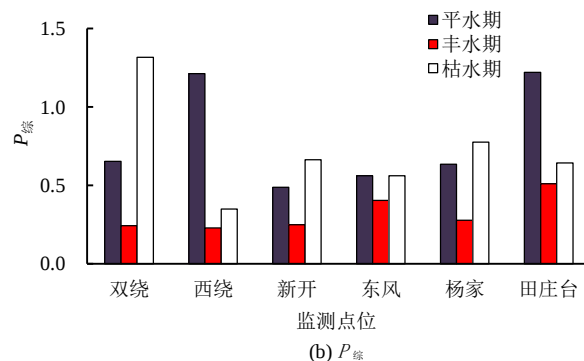
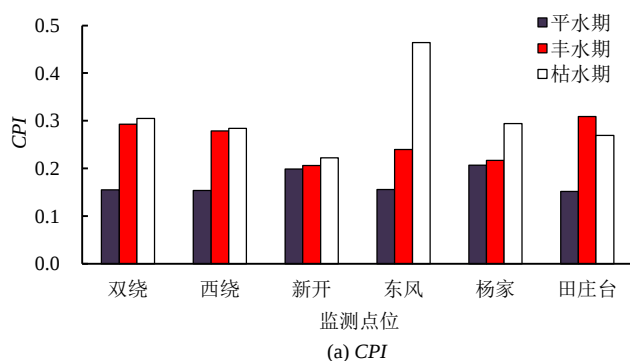


图 1 各监测点水质评价结果

Fig.1 Evaluation results in sampling locations

2.4 离子组分特征及其相关性分析

地表水的化学组分变化受到大气降水、岩石风化、阳离子交替吸附、地下水补给和人类活动的影响^[19-22]。

HCO_3^- 主要来自碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化作用^[20], Cl^- 来源于大气降水、土壤中 Cl^- 运移和人为输入; SO_4^{2-} 来源于石膏风化溶解、矿业活动中硫化物氧化和大量

含硫农药化肥的施用， Na^+ 来源于蒸发岩和硅酸盐岩的风化溶解以及生活污水， K^+ 来源于蒸发岩和硅酸盐岩的风化溶解， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐岩的风化溶解^[21]。

对盘锦市地表灌溉水中离子平均浓度进行统计分析，结果如表 6 所示。主要阳离子浓度由大到小排序为 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ，主要阴离子浓度由大到小排序为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。离子浓度时空分布情况如表 6 和表 7 所示。 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度基本呈枯水期>丰水期>平水期的变化趋势，这几种

离子在东风监测点的平均浓度最高，分别为 143.30、92.70、33.80 mg/L 和 313.60 mg/L； Cl^- 和 HCO_3^- 浓度基本呈枯水期>丰水期>平水期的变化趋势，这 2 种离子在双绕监测点的平均浓度最高，分别为 216.90 mg/L 和 216.70 mg/L。变异系数可以判断离子浓度在地表水中的分布稳定状况。 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 浓度的变异系数低于 50%，说明上述离子浓度在地表水中分布较为稳定， Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的变异系数介于 50%~100%，说明离子浓度在地表水中分布不稳定，这可能与离子组分的来源有关。

表 6 离子指标统计特征

Table 6 Statistics of the conventional indicators								mg/L
时期	统计量	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}
平水期	最大值	85.90	73.00	21.30	205.00	88.00	168.00	nd
	最小值	35.20	37.00	6.10	115.90	53.00	31.20	nd
	平均值	54.10	55.67	11.85	148.55	65.67	87.60	
	变异系数/%	34.23	27.26	54.90	21.85	26.44	51.25	
丰水期	最大值	176.40	80.00	54.70	234.20	229.80	355.20	nd
	最小值	44.89	45.00	12.20	145.20	53.00	67.20	nd
	平均值	95.37	61.33	24.22	191.88	115.02	140.00	
	变异系数/%	59.01	19.88	65.78	19.72	56.81	76.39	
枯水期	最大值	216.90	125.00	60.80	327.90	494.50	499.20	nd
	最小值	112.70	60.00	24.30	187.40	123.80	79.20	nd
	平均值	162.08	85.83	36.45	246.93	276.88	187.20	
	变异系数/%	23.06	26.16	35.82	19.97	48.84	82.89	
三期综合	平均值	103.85	67.61	24.17	195.79	152.52	138.27	nd
	变异系数/%	38.77	24.43	52.17	20.51	44.03	70.18	

注 nd 表示指标未检测出数值。

表 7 各监测点离子指标统计特征

Table 7 Statistics of the major ion indicators in sampling locations								mg/L
监测点	统计量	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}
双绕	平均值	86.80	62.30	19.80	216.70	216.90	87.20	0.00
	变异系数/%	62.43	42.64	64.68	48.87	111.44	57.29	0
西绕	平均值	70.90	54.70	16.40	178.80	77.80	100.80	0.00
	变异系数/%	51.57	28.36	58.06	47.43	51.26	22.96	0
新开	平均值	104.10	73.30	25.30	175.70	164.90	132.00	0.00
	变异系数/%	47.02	20.83	27.58	11.53	71.46	25.65	0
东风	平均值	143.30	92.70	33.80	201.10	135.40	313.60	0.00
	变异系数/%	55.77	30.45	71.54	21.45	33.02	66.81	0
杨家	平均值	98.60	65.00	26.40	200.70	154.50	99.2	0.00
	变异系数/%	82.90	27.74	113.69	23.71	111.57	55.87	0
田庄台	平均值	119.40	57.70	23.30	201.80	165.60	96.80	0.00
	变异系数/%	62.34	4.36	17.41	22.80	58.09	23.43	0

地表水组分间的相关分析可以揭示离子的来源关系，相关性显著的离子一般具有相同的来源或相似的地表化学过程^[3]。离子之间的相关性如表 8 所示。 Mg^{2+} 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 呈显著正相关； SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 呈极显著正相关，且与 Mg^{2+} 呈显著正相关，但与 Cl^- 呈负相关。

2.5 灌溉适用性分析

基于 2 种灌溉适用性评价体系对地表水进行评价，结果见表 9。*RSC* 的灌溉适用性评价结果整体较好，而 *SC* 灌溉适用性评价结果为适用和较适用。2 种灌溉适用性评价结果表明，盘锦市地表水适合农作

物灌溉。

表 8 各离子指标之间的相关性

Table 8 Correlation coefficients between ions						
	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	1.000					
Ca^{2+}	0.779	1.000				
Mg^{2+}	0.905*	0.902*	1.000			
HCO_3^-	0.241	0.051	0.160	1.000		
Cl^-	0.154	0.041	0.104	0.066	1.000	
SO_4^{2-}	0.777	0.931**	0.821*	0.027	-0.211	1.000

注 表中**表示在 0.01 水平（双侧）上极显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

表 9 地表水灌溉适用性评价结果

Table 9 Assessment results of the irrigation applicability of

surface water				
指标		SC	RSC	综合
平水期	平均级别	较适用	非常适用	适合灌溉
	最大级别	较适用	非常适用	
丰水期	平均级别	较适用	非常适用	适合灌溉
	最大级别	适用	非常适用	
枯水期	平均级别	适用	非常适用	适合灌溉
	最大级别	适用	非常适用	

综合地表水环境 V 类水标准限值、农田灌溉水质标准限值和灌溉适用性评价体系结果, 在枯水期, NH_4^+-N 最大浓度为 2.17 mg/L (表 3), 是地表水环境质量标准 V 类水限值的 1.085 倍, 已不适用于灌溉; 氯化物最大浓度为 494.5 mg/L, 是我国农田灌溉水质标准 I 类、II 类和 III 类限值的 1.36 倍, 已不适用于灌溉。在平水期, 粪大肠菌群数量的最大值为 54 000 MPN/L, 是我国农田灌溉水质标准 I 类和 II 类的 1.35 倍, 不可用于水田作物和旱地作物的灌溉。总体而言, 丰水期灌溉适用性优于平水期和枯水期。

3 讨论

工业、农业和生活污水排放是造成盘锦市地表水水质污染的主要原因^[5-7]。几种评价方法中, 单项污染指数法判别出了盘锦市地表灌溉水的主要污染指标, 但无法实现连续化定量分析, 易造成误差^[13]。综合污染指数法实现了对地表灌溉水整体状态的定性、定量评价, 能客观地反映水体综合污染程度, 但多指标混合后削弱了有毒有害指标对水体的影响。内梅罗污染指数法会过分突出最大污染因子对水质的影响, 从而导致其评价分值偏高^[22-23]。灌溉适用性评价判断出了水质是否满足农业灌溉要求。上述评价方法得出的评价结果不完全相同, 但可从不同方面反映水质特征。将多种水质评价方法相结合有利于实现地表灌溉水质评价的全面性和科学性。林巧^[6]、李步东等^[7]和田诗阳等^[8]研究均指出盘锦市地表水水质较差, 而本研究评价结果为良好, 原因可能由于评价方法和标准限值的差异。此外, 不同时期水质评价结果为丰水期优于平水期和枯水期, 这与朱丹尼等^[3]研究结果也存在差异。这可能由调查区域的不同所导致, 不同区域的水文气候条件都会对地表灌溉水质产生影响。与以往研究相比, 本研究实现了多种方法的相互整合, 克服了单一方法下评价结果片面性的缺陷^[13]。然而, 水质评价还存在尚待改进之处, 一方面, 后续可以增加监测指标, 并加大水质监测频次^[3,9,13]; 另一方面, 本研究中灌溉适用性分析相对简单, 未来可进一步增加钠吸附比、渗透指数、电导率和结构稳定性阳离子比等方法, 以进一步提高结果的普适性。

4 结论

1) 盘锦市地表灌溉水水质指标具有明显的时空差异性, 主要污染指标为氨氮、氯化物和粪大肠菌群。

2) 单项污染指数法明确了地表水质的主要污染物; 综合污染指数法和内梅罗综合污染指数实现了对地表水整体状态的定性定量评价; 灌溉适用性法对水质是否满足灌溉要求进行了判断。

3) 多种评价方法一致证实盘锦市地表灌溉水质较优, 可适用于农业灌溉。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] SINGH K P, MALIK A, SINHA S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques—a case study[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 538(1/2): 355-374.
- [2] 王迪. 基于水足迹理论的盘锦市农业用水评价[J]. *黑龙江水利科技*, 2020, 48(4): 196-199, 215.
WANG Di. Evaluation of agricultural water in Panjin city based on water footprint theory[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2020, 48(4): 196-199, 215.
- [3] 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 等. 会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2 240-2 250.
ZHU Danni, ZOU Shengzhang, LI Jun, et al. Pollution and irrigation applicability of surface water from wet, normal, and dry periods in the Huixian Karst wetland, China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2 240-2 250.
- [4] 裴晓龙, 丁强, 杨玉珍, 等. 地表水环境质量指数的定量分级及其适用性[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 146-151.
PEI Xiaolong, DING Qiang, YANG Yuzhen, et al. Quantitative classification and applicability of surface water environmental quality index[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 146-151.
- [5] 王康健, 荆华, 展广军, 等. 盘锦稻区灌溉水质监测分析报告[J]. *北方水稻*, 2021, 51(3): 37-39.
WANG Kangjian, JING Hua, ZHAN Guangjun, et al. Monitoring and analysis report of irrigation water quality in Panjin rice area[J]. *North Rice*, 2021, 51(3): 37-39.
- [6] 林巧. 盘锦市县域地表水水质要素承载力研究[J]. *东北水利水电*, 2020, 38(3): 39-41.
- [7] 李步东, 朱长军, 杨少波, 等. 辽河水环境质量评价及其污染源解析[J]. *四川环境*, 2019, 38(2): 31-36.
LI Budong, ZHU Changjun, YANG Shaobo, et al. Water environmental quality assessment and source apportionment of Liao River[J]. *Sichuan Environment*, 2019, 38(2): 31-36.
- [8] 田诗阳, 晁雷, 周修坤, 等. 辽河盘锦段控制单元水质分析与评价[J]. *环境保护与循环经济*, 2021, 41(1): 56-61.
- [9] 李玖颖, 彭翌豪, 柳真杨, 等. 黑龙江省地表水灌溉水质评价分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(12): 115-120.
LI Jiuying, PENG Yihao, LIU Zhenyang, et al. Analysis and evaluation of surface water quality in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(12): 115-120.
- [10] 中华人民共和国农业部. 农用水源环境质量监测技术规范: NY/T 396—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [11] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- [13] 逯林方, 王辉辉, 胡亚伟, 等. 赵口引黄灌区二期工程区域地表水质评价[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 117-124.
LU Linfang, WANG Huihui, HU Yawei, et al. Surface water quality in second-phase Zhaokou Yellow River Irrigation District project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 117-124.
- [14] 刘园园, 阿依巧丽, 张森瑞, 等. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3 833-3 843.
LIU Yuanyuan, AYI Qiaoli, ZHANG Senrui, et al. Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3 833-3 843.
- [15] 陈尚洪, 张晴雯, 陈红琳, 等. 四川丘陵农区地表水水质时空变化与污染现状评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 52-59.
CHEN Shanghong, ZHANG Qingwen, CHEN Honglin, et al. Variation of surface water quality based on crop-livestock structure change and its pollution assessment in Sichuan Hilly Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 52-59.
- [16] SEN Zekā. Practical and applied hydrogeology[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [17] 张彦, 梁志杰, 邹磊, 等. 黄河干流及主要支流水质时空差异性及其变化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 125-133.
ZHANG Yan, LIANG Zhijie, ZOU Lei, et al. Spatiotemporal variation in water quality in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 125-133.
- [18] 郝守宁, 董飞. 尼洋河水质沿程变化特征多元统计分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 109-114.
HAO Shouning, DONG Fei. Changing characteristics of the water quality along the Niyang River based on multivariate analysis method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 109-114.
- [19] 刘祖汀, 王丽萍, 屈忠义, 等. 引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 101-108.
LIU Zuting, WANG Liping, QU Zhongyi, et al. The changes in depth and physicochemical properties of groundwater in response to spring irrigation in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 101-108.
- [20] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1 873-1 884.
LEI Mi, ZHOU Jinlong, ZHANG Jie, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1 873-1 884.
- [21] 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 等. 珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1 885-1 897.
TU Chunlin, YIN Linhu, HE Chengzhong, et al. Hydrochemical composition characteristics and control factors of Xiaohuangni River basin in the Upper Pearl River[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1 885-1 897.
- [22] 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 等. 近年全国地表水水质变化特征[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4 419-4 429.
JI Xiaoyan, HOU Huanhuan, WANG Shanshan, et al. Variation characteristics of surface water quality in China in recent years[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4 419-4 429.
- [23] 宁阳明, 尹发能, 李香波. 几种水质评价方法在长江干流中的应用[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(12): 126-133.
NING Yangming, YIN Faneng, LI Xiangbo. Application of several evaluation methods for river water quality in the Yangtze River mainstream[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(12): 126-133.

Quality and Suitability of Surface Irrigation Water in Panjin City

SHEN Qi, ZHAN Guangjun, LI Weiran, YU Xiaopeng, WANG Kangjian, YU Yanqing, LI Zhenyu*

(Liaoning Institute of Saline-Alkali Land Utilization, Panjin 124010, China)

Abstract: 【Objective】 This paper presents the results of a comprehensive and rigorous assessment of the environmental quality of surface irrigation water in Panjin City, aimed to provide essential data to help water ecological protection and developing high-quality agriculture. 【Method】 Water samples were taken at normal, wet and dry seasons at different locations across the region to analyze their chemical compositions. Water quality was evaluated using the comprehensive pollution index method, Nemerow comprehensive pollution index method, sodium concentration method (SC), and the residual sodium carbonate method (SRC). 【Result】 Water quality indicators varied spatiotemporally. The ammonia nitrogen, chloride and fecal coliform in the water exceeded the values set in the standard. Results calculated from the comprehensive pollution index method showed that the overall quality of the surface irrigation water was good. From normal to dry seasons, water quality changed from clean to relatively clean. There was a seasonal pollution at the sampling points at Dongfeng. The results calculated from the Nemerow comprehensive pollution index method showed that the water quality was relatively good, and that it was better in the wet season than in the normal and dry seasons. There was a seasonal pollution at the sampling points at Tianzhuangtai, Xirao and Shuangrao. As well as the evaluation results of the SC and RSC, the surface water in Panjin City was generally suitable for irrigation, and the water quality in the wet season was better than that in the normal and dry season. 【Conclusion】 The overall surface water quality in Panjin City is relatively good and deemed suitable for irrigation. It can sustain potential development of the region for high-quality agriculture.

Key words: Panjin; surface irrigation water; water quality evaluation; irrigation applicability

责任编辑: 韩 洋