

石嘴山典型入黄排水沟水质时空变化特征及驱动因素

李永春¹, 张越^{2,3}, 丁伟^{2,3}, 尤国祥^{2,3}, 侯俊^{2,3}

(1. 石嘴山市水利工程建设管理中心, 宁夏 石嘴山 753099; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为确保入黄排水沟水质稳定达标, 实现黄河流域生态保护及高质量发展, 应用 WQI-DET 指数和水质主成分分析指数 (PCAI) 两项综合水质指标分析了宁夏入黄第三与第五排水沟石嘴山段 2020—2022 年水质时空变化特征, 并结合曼特尔检验和事后多重比较法从自然因素与人类因素两方面探究了排水沟水质变化驱动因素。结果表明: 排水沟贺兰段断面水质达标率最低 (第三排水沟 57.6%, 第五排水沟 69.4%), 第三排水沟污染源多, 治理难度大, 第五排水沟污染源少, 水质稳定; 农田退水污染主要发生在灌溉前期, 灌溉中期与冬灌期的农田退水可对河道起净化作用; 第五排水沟灌溉前期多项指标与其他时期存在显著差异 ($p < 0.05$); 自然因素对排水沟水质无显著影响, 当地污染源以生活污水和工业废水为主。

关键词: 入黄排水沟; 综合水质指标; 曼特尔检验; 石嘴山

中图分类号: X824

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)06-0079-07

Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of water quality in Shizuishan section of typical drainage ditches flowing into the Yellow River//LI Yongchun¹, ZHANG Yue^{2,3}, DING Wei^{2,3}, YOU Guoxiang^{2,3}, HOU Jun^{2,3} (1. Shizuishan Water Conservancy Project Construction Management Center, Shizuishan 753099, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to ensure the water quality of drainage ditches flowing into the Yellow River to reach the standard and achieve ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, the water quality index-development (WQI-DET) and principal component analysis index (PCAI) of water quality were used to analyze the spatiotemporal change characteristics of water quality from 2020 to 2022 in the Shizuishan section of the Third and Fifth Drainage Ditches flowing into the Yellow River. Mantel tests and multiple comparisons were employed to explore the driving factors influencing water quality in the drainage ditches, considering both natural and human factors. The results show that the compliance rate for water quality in the Helan section of the drainage ditches is the lowest (57.6% in the Third Drainage Ditch and 69.4% in the Fifth Drainage Ditch). Pollution sources are numerous in the Third Drainage Ditch, making it difficult to manage, while pollution sources are fewer in the Fifth Drainage Ditch, leading to more stable water quality. Irrigation water pollution mainly occurs in the early period of irrigation, while agricultural runoff during the mid-irrigation and winter irrigation periods can have a purifying effect on the river. Many indexes of the Fifth Drainage Ditch vary significantly between the early period of irrigation and other periods ($p < 0.05$). Natural factors have no significant effect on the overall water quality of the drainage ditches, and the local pollution sources are mainly domestic sewage and industrial discharge.

Key words: drainage ditch flowing into the Yellow River; comprehensive water quality index; Mantel test; Shizuishan

河流水质受水文、气象等自然因素及农田灌溉、工业生产等人类活动影响, 在不同地区呈现不同的时空变化特征^[1]。黄河是我国北方重要的水源之一, 宁夏地区引黄河干流水进行农业灌溉, 农田退水

经入黄排水沟后重新回到黄河, 形成循环交错的灌排体系^[2]。入黄第三排水沟与第五排水沟 (以下简称“三排”“五排”) 石嘴山段是宁夏重点入黄通道, 其水质变化特征直接影响黄河干流宁夏段水质, 研

基金项目: 石嘴山市重点入黄排水沟典农河下段 (第三排水沟) 水环境治理示范项目 (2301-640221-19-01-359813); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目 (U23A2058); 中国黄河流域生态保护和高质量发展研究项目 (2022-YRUC-01-0101)

作者简介: 李永春 (1968—), 女, 高级工程师, 主要从事水利规划与设计工作。E-mail: 393872529@qq.com

究三排、五排水质时空变化特征,分析水质变化驱动因素,对当地排水沟水环境治理及践行黄河流域生态环境保护具有现实意义。

近年来针对引黄灌区排水沟水质特征及变化的研究逐渐增多^[3-5],但仍存在以下问题需要探讨:①传统的单因子评价法以单项指标最差等级代表断面水质类别,无法真实反映排水沟各项水质综合情况;②三排、五排承担不同的排水任务,两排水沟之间缺少对比分析;③已有对农田退水污染的研究将农业灌溉周期简单分为灌溉期与非灌溉期,未对造成主要污染的施肥期进行细化研究,同时自然因素对入黄排水沟水质的影响研究较少。为此,本文以三排和五排石嘴山段为研究区域,基于当地水质监测数据计算水质主成分分析指数(principal component analysis index, PCAI)和 WQI-DET (water quality index-development) 指数,研究三排、五排水质因子与降雨、蒸发、气温、流量等自然因素及农业灌溉、工业生产、居民生活等人类因素的关系,并采用事后多重比较分析方法探讨石嘴山典型入黄排水沟水质时空变化特征及驱动因素,以期为当地入黄排水沟治理提供科学参考。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于宁夏北部,如图 1 所示。三排地处宁夏银川平原青铜峡河西灌区,南起银川市永宁县,北至石嘴山市惠农区入黄河口。三排石嘴山段

全长 71.9 km,排水沟水质监测断面由南至北分别为贺兰段断面、平罗段断面与惠农段断面。五排南起贺兰县,经平罗县、惠农区后与三排合流排入黄河。五排石嘴山段全长 68.7 km,排水沟水质监测断面由南至北分别为入平罗姚伏小店村断面、平罗段断面与惠农段断面。根据《石嘴山市再生水利用配置试点实施方案(2022—2025 年)》资料确定出水直接排入三排或五排的污水处理厂,具体信息如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 综合水质指标计算

为体现三排、五排整体水质情况,避免单因子评价法在水质分析应用中存在的偏差,采用主成分分析法计算三排、五排水质的 PCAI^[6],同时采用已有研究对水质指数(water quality index, WQI)的改进方法计算两排水沟 WQI-DET^[7],将两项指数作为综合水质指标用于分析三排、五排综合水质变化情况。

a. 采用主成分分析法计算三排、五排 PCAI^[6]:采用 IBM SPSS Statistics 24 软件对水质数据进行主成分分析,获得累计方差解释率为 87%的结果,根据此方差解释率计算权重,应用主成分分析方法得到两排水沟 PCAI。PCAI 具体计算步骤可参考文献[8]。

b. WQI-DET 指数是根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 5 个水质等级对 WQI 进行改进得到的水质指数。与原始指标 0~100 的评分标准相比,WQI-DET 的范围更宽(从-∞(极差水质)到 100(优水质)),可以清晰区分水质的情况^[7]。WQI-

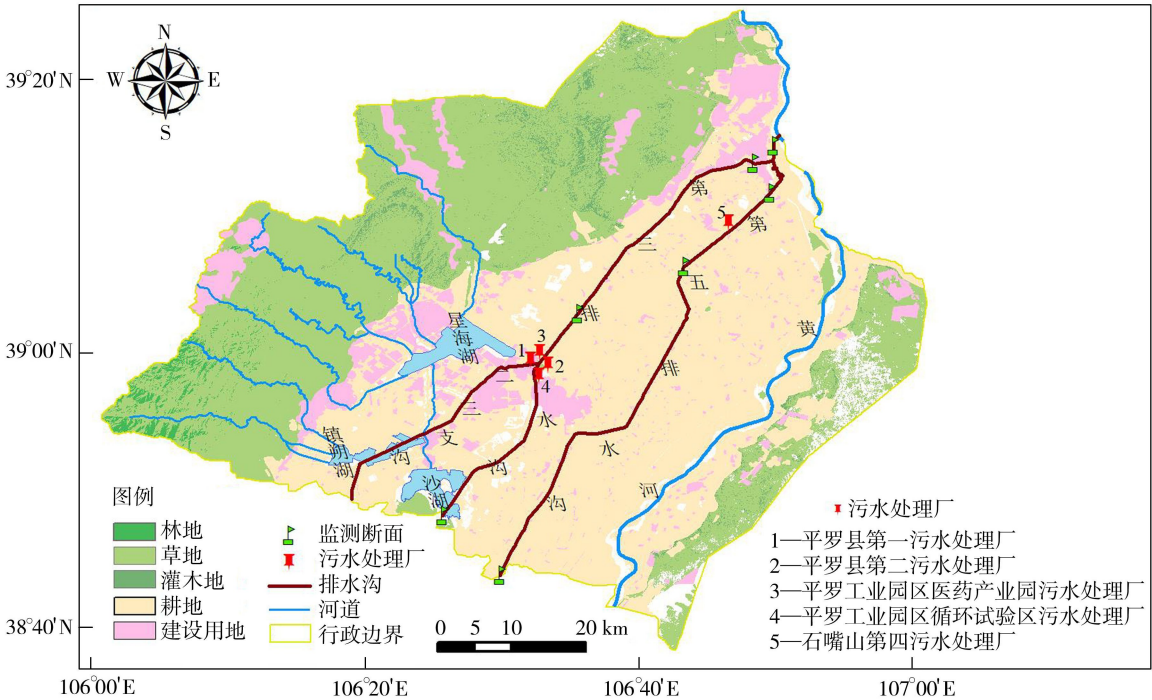


图 1 研究区域概况

DET 具体计算方法可参考文献[7]。本文通过调整指标参数设定 PCAI 与 WQI-DET 两项指数均为数值越大水质越好。

1.2.2 事后多重比较分析

为研究三排、五排水质在季节与灌溉期两个不同时间尺度上的变化情况,将季节划分为春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月至次年2月),灌溉期根据当地作物生长时期及施肥规律划分为:①灌溉前期(4月),对应作物分蘖期,该阶段是施肥期;②灌溉中期(5—9月),对应作物拔节、成熟期,该阶段以补充水量为主,施肥较少;③冬灌期(10—11月),该阶段以洗盐保墒为主;④非灌溉期(12月至次年3月)。应用 IBM SPSS Statistics 24 软件中的事后多重比较功能进行季节、灌溉期以及季节与灌溉期组合中各项水质因子与综合水质指标(PCAI、WQI-DET)平均值的多重比较分析,根据各个时期自然因素(降雨、蒸发、气温等)和人类因素(农业灌溉、工业生产、居民生活)的变化情况具体分析影响排水沟水质的主要因素。

事后多重比较分析需先根据显著性指标 p 值判断各时期水质因子和综合水质指标是否存在显著性差异,然后求得相应时期水质因子和综合水质指标各自的平均值并进行比较,最后统计平均值最高及最低的时期,对比各时期水质因子与综合水质指标变化情况,分析影响三排、五排水质变化的主要原因。

1.2.3 水质因子与环境因子相关性分析

为分析各项水质因子、综合水质指标与环境因子的相关性,以降水量、气温、蒸发量 3 项环境因子表征自然因素,选择监测断面存在超标情况的水质

因子高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH_3-N)、化学需氧量(COD)、总磷(TP)等表征人类因素,结合实测水质数据与计算得到的两项综合水质指标(PCAI与WQI-DET),应用曼特尔检验(Mantel test)方法^[9]分析综合水质指标与水质因子、环境因子的相关性,研究自然因素与人类因素对排水沟水质变化的影响。应用皮尔逊相关系数法计算各因子之间的相关系数。

1.3 数据来源

石嘴山市人民政府办公室印发的《入黄第三排水沟石嘴山段综合治理分工方案》确定入黄排水沟石嘴山段水质需稳定达到地表水Ⅳ类标准。三排、五排水质和流量监测数据由石嘴山市环境保护局提供,包括三排、五排 2020—2022 年各监测断面逐月 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、COD、TP 质量浓度以及逐日流量数据。环境因子数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 NetCDF(network common data format)文件,时间为 2020—2022 年,采用 ArcMap10.3 软件提取月均降水量、气温和蒸发量数据。

2 结果与分析

2.1 断面水质空间差异性

图 2 为三排、五排各监测断面水质数据箱线图(图中 SH、SP、SN、RH、WH、WP、WY 分别表示三排贺兰段断面、平罗段断面、惠农段断面、入黄河口断面和五排入平罗姚伏小店村断面、平罗段断面与惠农段断面)。三排贺兰段断面与五排入平罗姚伏小店村断面位于贺兰县与石嘴山交界处,断面水质因子质量浓度反映了上游贺兰县排水沟水质情况(即三排、五排入石嘴山水质情况),三排、五排的平罗

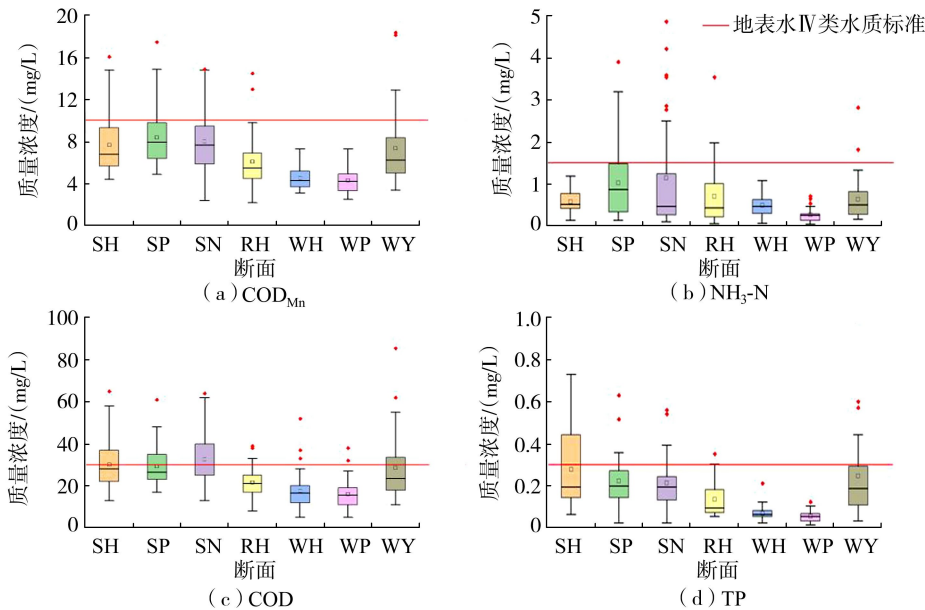


图 2 三排、五排断面水质空间差异性

段断面与惠农段断面水质因子质量浓度则分别代表三排、五排石嘴山段水质情况。由图 2 可知石嘴山排水沟整体水质优劣程度排序为:五排平罗段断面、五排惠农段断面、入黄河口断面、五排入平罗姚伏小店村断面、三排惠农段断面、三排平罗段断面、三排贺兰段断面。由图 2 可得, COD_{Mn}、NH₃-N 与 TP 3 项水质因子在三排、五排各断面(除贺兰段断面 TP)质量浓度基本达到Ⅳ类水质标准, COD 在多个断面存在超标情况。三排石嘴山段各项水质因子质量浓度高, 变化范围大, 五排石嘴山段各项水质因子质量浓度低, 变化范围小。

如图 2 所示, 单项水质因子方面, COD_{Mn} 与 COD 在各断面的质量浓度变化情况类似: 三排 3 个断面平均值、中位数及变化范围相似, 五排断面呈现出上游质量浓度较高、中下游质量浓度较低的规律, 与三排合流后至入黄河口断面水质因子质量浓度有所回升。NH₃-N 在三排贺兰段断面平均质量浓度低(0.57 mg/L), 变化范围小, 至三排平罗段断面和惠农段断面平均质量浓度上升(1.02、1.14 mg/L), 变化范围增大; 而在五排平罗段质量浓度最低(0.26 mg/L), 至惠农段断面后质量浓度(0.48 mg/L)及变化范围有所增大。TP 在三排贺兰段断面与五排入平罗姚伏小店村断面质量浓度均较高, 至平罗段断面与惠农段段面后质量浓度有所降低。

2.2 水质季节性及灌溉期变化特征

表 1 为三排、五排水质因子与综合水质指标的季节、灌溉期以及季节与灌溉期组合的事后多重比较分析结果。由表 1 可知, 三排与五排 COD_{Mn}、COD、TP 3 项水质因子均为灌溉前期和春季质量浓度最高, NH₃-N 冬季和非灌溉期质量浓度最高, 其中三排与五排 COD_{Mn}、TP 及三排 COD 的最低值均出现在冬季与非灌溉期, 而五排 COD 的最低值则出现在夏季与灌溉中期。组合时期情况下, 两排水沟 COD_{Mn}、COD、TP 3 项水质因子春季灌溉前期质量浓度最高, 三排 NH₃-N 春季非灌溉期质量浓度最高(1.47 mg/L), 五排 NH₃-N 冬季非灌溉期质量浓度最高(0.57 mg/L)。综合水质指标方面, PCAI 反映出三排整体水质秋季最好, 春季最差, 灌溉中期最好, 灌期前期最差。WQI-DET 指数反映出三排整体水质秋季最好, 春季最差, 冬灌期最好, 灌期前期最差; 五排两项综合水质指标变化情况相似, 均反映出五排整体水质情况夏季最好, 春季最差, 灌溉中期最好, 灌期前期最差。显著性差异方面, 三排 COD_{Mn}、COD、TP 3 项水质因子在季节变化上存在显著差异, 在灌溉期变化上不存在显著差异, NH₃-N 在各时

期均无显著差异。五排 COD_{Mn} 在季节变化上无显著差异, 在灌溉期变化上存在显著差异, NH₃-N 在季节变化上存在显著差异, 在灌溉期变化上无显著差异, COD 在各时期均存在显著差异, TP 在各时期均无显著差异。

表 1 三排、五排季节、灌溉期及各组合时期事后多重比较分析结果

指标	三排				五排			
	时间段	季节与灌溉期差异性	组合时期	组合时期差异性	时间段	季节与灌溉期差异性	组合时期	组合时期差异性
COD _{Mn}	A	a	A:T1	a	A	c	A:T1	a
	D	b	D:T4	a	D	c	D:T4	a
	T1	c			T1	a		
	T4	c			T4	b		
NH ₃ -N	D	c	A:T4	a	D	a	D:T4	a
	B	c	C:T2	d	A	b	A:T2	b
	T4	c			T4	a		
	T2	c			T2	a		
COD	A	a	A:T1	a	A	a	A:T1	d
	D	b	D:T4	a	B	b	B:T2	d
	T1	a			T1	a		
	T4	a			T2	b		
TP	A	a	A:T1	a	A	a	A:T1	a
	D	b	D:T4	b	D	a	D:T4	a
	T1	a			T1	a		
	T4	a			T4	a		
PCAI	C	c	C:T2	d	B	a	B:T2	a,c
	A	c	A:T4	d	A	b	A:T1	d
	T2	a			T2	a		
	T1	b			T1	b		
WQI-DET	C	a	C:T2	a	B	a	B:T2	a
	A	b	A:T1	b	A	b	A:T1	b
	T3	a			T2	a		
	T1	a			T1	b		

注: A、B、C、D 分别表示春、夏、秋、冬季; T1、T2、T3、T4 分别表示灌溉前期、灌溉中期、冬灌期与非灌溉期; 时间段和组合时期按指标平均值从大到小排列, 如三排 COD_{Mn} 平均质量浓度春季最高, 冬季最低, 灌溉前期最高, 非灌溉期最低; 差异性一列为 $p \leq 0.05$ 水平上的显著性差异检验, a、b、c、d 为多重比较分析的结果, 相同字母表示因素或组合间不存在显著性差异, 不同字母表示存在显著性差异。

2.3 水质与环境因子相关性分析

采用曼特尔检验求得两项综合水质指标与水质因子、环境因子的相关性, 结果见图 3(图中 2 种颜色的线条代表不同的显著性 p 值, 线条的粗细代表曼特尔相关系数的大小)。三排 PCAI 与 COD_{Mn}(皮尔逊相关系数为-0.69, 曼特尔相关系数为 0.42)、NH₃-N(-0.7, 0.46)、TP(-0.81, 0.61) 3 项水质因子呈极显著负相关关系, WQI-DET 与 NH₃-N(-0.61, 0.43) 呈极显著负相关关系; 水质因子之间, TP 与 COD_{Mn}(皮尔逊相关系数为 0.6) 呈极显著正相关关系; 环境因子上, 仅 NH₃-N 与蒸发量(-0.6)、气温(-0.66) 呈极显著负相关关系, 与降水量(-0.42) 呈显著负相关关系($p \leq 0.01$), 其他水

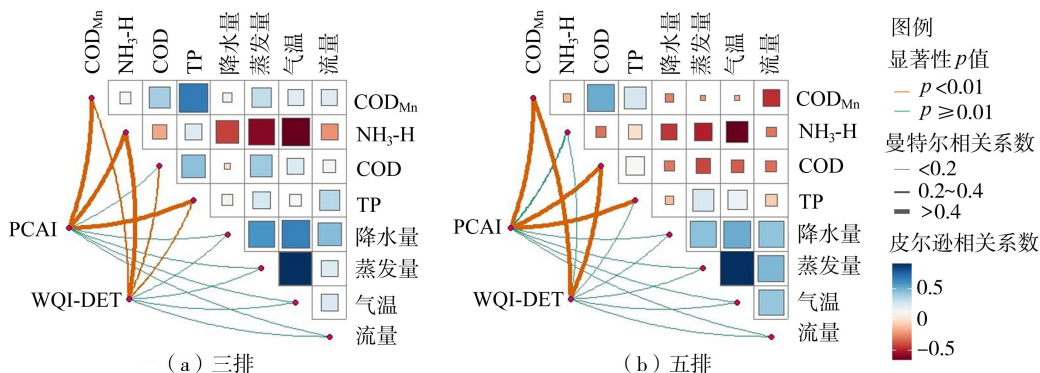


图3 曼特尔相关性检验结果

质因子及综合水质指标与环境因子均无显著相关性。五排 PCAI 与 COD_{Mn} ($-0.8, 0.65$)、 COD ($-0.7, 0.44$)、 TP ($-0.69, 0.49$) 3 项水质因子呈极显著负相关关系, WQI-DET 与 COD_{Mn} ($-0.66, 0.41$)、 COD ($-0.82, 0.72$) 呈极显著负相关关系; 水质因子之间, COD 与 COD_{Mn} (0.62) 呈极显著正相关关系; 环境因子上, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 气温 (-0.4) 呈负相关关系 ($p \leq 0.05$), 其他水质因子及综合水质指标与环境因子均无相关性。

3 讨 论

3.1 水质沿程变化规律及超标原因

对比三排与五排之间的水质差异可知, 五排各断面水质明显优于三排, 且从箱线图面积可得出三排各断面水质变化幅度较大, 水质不稳定, 治理难度较高; 相比之下, 五排的平罗段断面和惠农段断面水质变化较小, 更易于治理。由图 1 可知, 三排周边分布农田、人工用地及多座污水处理厂, 沿途接纳工业废水、生活污水和农田退水, 水量大、跨度长、污染点源多, 治理难度大; 五排周边以农田为主, 主要接纳农田退水与部分生活污水, 相较于三排水量小、污染源少, 因此水质更稳定。对比三排与五排各自监测断面的水质差异可知, COD_{Mn} 在五排从石嘴山市到下游有下降趋势, 表明五排主要接纳的农田退水 COD_{Mn} 含量小, 退水增大了河道水质扩散及自净能力, 使污染物部分衰减。而三排 COD_{Mn} 从贺兰段断面至平罗段断面平均质量浓度有所增大, 结合两排水沟接纳水源的区别可知石嘴山排水沟 COD_{Mn} 主要来源于平罗工业园区污水处理厂所排放的工业废水。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在五排的空间变化情况与 COD_{Mn} 类似, 但其质量浓度在三排从石嘴山市到下游有上升趋势, 通过调查平罗县污水处理厂排污效能情况可得出直排入三排的 4 座污水处理厂均出现部分月份 COD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放超标的情况, 这是三排平罗段断面与惠农段断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度上升、 COD 质量浓度

居高不下的主要原因。 TP 在三排、五排各断面变化情况类似, 以往研究表明, 宁夏灌区排水沟 TP 来源主要为农田退水, 参考石嘴山市排水沟治理政策与 2020—2022 年各断面 TP 质量浓度变化情况可知农田退水水质得到了有效提高^[10], 同时土壤本身具有较高的固磷能力^[11], 因此石嘴山地区农田退水不会引起排水沟 TP 质量浓度增大。

3.2 水质时间尺度变化规律及超标原因

由事后多重比较分析可知, 三排与五排 COD_{Mn} 、 COD 、 TP 3 项水质因子灌溉前期、春季以及相应组合时期质量浓度均最高, 证明了研究区域排水沟以农田退水为主要补充水源, 相比于灌溉中期与冬灌期, 排水沟水质优劣受灌溉前期施肥影响更大, 两排水沟水质主要区别在于三排这 3 项水质因子灌溉前期与非灌溉期质量浓度变化无显著差异, 五排 COD_{Mn} 与 COD 质量浓度在这两个时期呈显著差异, 反映了三排与五排的接纳水源不同, 三排除农田退水外, 还接纳工业废水、生活污水等多项污染源, 因此各时期污染物质量浓度无显著差异, 五排以接纳农田退水为主, 灌溉期与非灌溉期水质存在显著差异, 这与已有研究结论^[12] 相似。由图 2 可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 在五排平罗段断面与惠农段断面质量浓度变化范围小, 水质稳定, 各时间段无显著差异。

值得一提的是, 已有研究中大多将灌溉周期简单划分为灌溉期与非灌溉期, 推断排水沟灌溉期水质低于非灌溉期, 此类结论失之偏颇且与现场调研结果有所不同。本文研究细化了灌溉期时段, 研究结果表明, 灌溉前期施肥较多导致水质较差, 灌溉中期以补水为主, 农田退水水质良好, 对排水沟水质反而起到净化作用; 从表 1 可知, 三排 PCAI 与五排 PCAI、WQI-DET 均反映出排水沟灌溉中期整体水质最好且与灌溉前期存在显著差异, 这也证明了细分灌溉期的合理性。对于 $\text{NH}_3\text{-N}$, 两排水沟均为冬季与非灌溉期质量浓度最高, 且通过比较断面质量浓度可知五排惠农段断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度远高于平

罗段断面,结合各污水处理厂全年处理效能情况推断,在冬季非灌溉期,由于缺少农耕任务,因此大部分居民在此期间返回城区居住,导致城区污水处理厂的负荷增加,由此可知 $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要来源于污水处理厂。通过对比两项综合水质指标可知排水沟整体水质在灌溉中期最好,该时期降水量大,河道流量大,排水沟自净能力强,同时农田退水水质较好;冬季和春季由于河道流量低,居民生活污水量大,污水处理厂处理效能低,加之灌溉前期施肥量大,导致冬季与春季之间的过渡期水质最差。

3.3 水质驱动因子

三排与五排水质相关性分析显示 PCAI 与 WQI-DET 呈极显著相关关系,表明两者在代表水质整体情况上具有高度的统一性,主成分分析法可为每项水质因子设置权重,反映了整体水质情况,WQI-DET 指数选取的是各项水质因子计算结果的最低值,可以用于反映严重超标的水质情况。三排 PCAI 与 TP 相关系数绝对值最大,由空间差异性分析可知污染主要来源于上游贺兰县造成的排水沟 TP 污染;WQI-DET 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相关系数绝对值最大,分析原因为平罗段断面多座污水处理厂超标排放造成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染。五排各项水质因子除入平罗姚伏小店村断面及部分异常值(特殊污染事件引起)外基本达到目标水质要求。

环境因子方面,三排 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度变化与区域内气温变化极显著相关($p \leq 0.001$),而五排 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度变化与区域内气温变化的相关性明显减弱($p \leq 0.05$)。一方面气温较低时期水温较低,排水沟水体氨氧化菌活性降低,结合现场调研可知冬季低温时期排水沟存在多处结冰现象,隔绝了自然复氧过程,阻碍了好氧氨氧化过程,导致该时期氨氮含量较高^[13];另一方面,结合污水处理厂运行情况推断冬季污水处理厂运行效能低,导致冬季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量较高,与冬季降水少、蒸发量小、气温低相呼应,符合实际情况。而五排区域内污水处理厂仅有石嘴山第四污水处理厂,因此受污水处理厂运行效能的影响,各项水质因子与环境因子无显著相关性。两项综合水质指标与环境因子无显著相关性,表明排水沟整体水质受天然因素影响较小,推断水质状况主要受人类活动影响。

已有研究表明,降水变化会通过影响流域水文条件及河道侵蚀能力间接改变水质因子的迁移扩散过程^[14],但该研究结论在三排、五排水质因子变化中并未得到充分体现,推测原因为石嘴山地区处于半干旱地区,降水量小,且三排与五排主要依靠引黄灌区农田退水补充水源,与部分以降水作为主要水源补给的河流情况不同^[15],因此三排与五排河道水

质变化与降水无显著相关性。张馨月等^[16]研究三峡大坝上下游时空变化特征结果表明,流量大小对河道自净及扩散能力会产生影响,且流量与多项水质因子呈显著相关关系^[16]。本文流量与水质因子无显著相关性,推测原因为三排与五排河道水体主要为农田退水、污水处理厂出水及工业废水,补充水源本身水质较差,因此对河道水质无法起到显著的净化作用。已有研究表明,三排有机污染物受沟道流量影响较小,其含量大小主要受排放源强度控制^[4],这也间接验证了本文水质因子与流量无显著相关性的结论。

4 结 论

- a. 三排沿途污染源以工业废水、农田退水、生活污水为主,水质变化范围大,治理难度高;五排沿途污染源以农田退水为主,水质稳定。
- b. 三排与五排整体水质情况与自然因素无显著相关性,但自然因素可通过影响人类活动及污水处理厂效能间接影响排水沟水质。
- c. 灌溉前期 3—5 月施肥量大,农田退水对三排与五排河道水体造成污染,灌溉中期和冬灌期以补水为主,农田退水对河道水体起净化作用。
- d. 未来对三排与五排污染源治理应加强农田退水利用,同时提高污水处理厂效能及控制偷排漏排情况。春季控制农田施肥污染,冬季控制供暖及工业废水污染。

参考文献:

[1] WANG Xueping, LIU Xiaojie, WANG Lingqing, et al. A holistic assessment of spatiotemporal variation, driving factors, and risks influencing river water quality in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science of The Total Environment, 2022, 851: 157942.

[2] 王建伟,王琳,严登华,等. 宁夏引黄灌区末端区域农业水资源配置研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48 (3): 65-70. (WANG Jianwei, WANG Lin, YAN Denghua, et al. Study on water resources allocation of agriculture in the end piece of Yellow River irrigation region in Ningxia [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (3): 65-70. (in Chinese))

[3] 俞淞,马巍,王红瑞,等. 引黄灌区典型排水沟排水特性分析 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (增刊 1): 92-95. (YU Song, MA Wei, WANG Hongrui, et al. Yellow River irrigation and drainage characteristics analysis of Ningxia [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (Sup1): 92-95. (in Chinese))

[4] 郑兰香,杨桂钦,高晓波,等. 2019 年宁夏第三排水沟水体的主要化学指标分析 [J]. 湿地科学, 2022, 20 (1): 119-124. (ZHENG Lanxiang, YANG Guiqin, GAO

Xiaobo, et al. Analysis of main chemical indexes of water of the third drainage ditch in Ningxia in 2019[J]. Wetland Science, 2022, 20(1): 119-124. (in Chinese))

[5] 田林锋, 罗桂林, 姜文娟, 等. 基于多元统计的宁夏典农河水质演替特征探究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(1): 128-136. (TIAN Linfeng, LUO Guilin, JIANG Wenjuan, et al. Water quality succession of Diannong River in Ningxia based on multiple statistics [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(1): 128-136. (in Chinese))

[6] 张翔, 李榛. 基于主成分分析的北洛河水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 153-160. (ZHANG Xiang, LI Su. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Beiluo River and pollution sources based on principal component analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 153-160. (in Chinese))

[7] HUANG Jiacong, ZHANG Yinjun, ARHONDITSIS G B, et al. How successful are the restoration efforts of China's lakes and reservoirs? [J]. Environment International, 2019, 123: 96-103.

[8] 杨盼, 卢路, 王继保, 等. 基于主成分分析的 spearman 秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 76-80. (YANG Pan, LU Lu, WANG Jibao, et al. Analysis of water quality trend in the main stream of the Yangtze River based on principal component analysis [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 76-80. (in Chinese))

[9] MANTEL N. The detection of disease clustering and a generalized regression approach [J]. Cancer Research, 1967, 27(2): 209-220.

[10] 宁忠瑞, 李虹彬. 基于水质标识指数的黄河宁夏段水质评价与分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(增刊 1): 56-61. (NING Zhongrui, LI Hongbin. Assessment and analysis of water quality in Ningxia Section of the Yellow River based on comprehensive water quality identification index [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(Sup1): 56-61. (in Chinese))

[11] 闫莉, 黄锦辉, 张建军, 等. 宁夏农灌退水对黄河水质的影响研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(3): 35-36. (YAN Li, HUANG Jinhui, ZHANG Jianjun, et al. Study on the influence of irrigated water on the water quality of the Yellow River in Ningxia [J]. Yellow River, 2007, 29(3): 35-36. (in Chinese))

[12] 杨丽慧, 王少丽, 阮本清, 等. 基于排水沟的宁夏银北灌区农田退水污染演变研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1580-1587. (YANG Lihui, WANG Shaoli, RUAN Benqing, et al. Evolution of drain-based research of irrigation return flow pollution in Yinbei Irrigation Area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1580-1587. (in Chinese))

[13] 李仰征, 任金铜, 杨延丽, 等. 岩溶区域水体无机氮分布及影响氮素矿化的生境[J]. 地球与环境, 2019, 47(3): 246-253. (LI Yangzheng, REN Jintong, YANG Yanli, et al. Distribution of inorganic nitrogen and environmental factors of nitrogen mineralization in waters of the karst area [J]. Earth and Environment, 2019, 47(3): 246-253. (in Chinese))

[14] XIONG Qinli, XIAO Yang, LIANG Pinghan, et al. Trends in climate change and human interventions indicate grassland productivity on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2015 [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 108010.

[15] LI Zongjie, LI Zongxing, FENG Qi, et al. Hydrological effects of multiphase water transformation in Three-River Headwaters Region, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126662.

[16] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 633-645. (ZHANG Xinyue, MA Peiming, GAO Qianhong, et al. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3): 633-645. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-11-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 55 页)

[14] XUE J, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.

[15] AGUSHAKA J O, EZUGWU A E, ABUALIGAH L. Dwarf mongoose optimization algorithm [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 391: 114570.

[16] AGUSHAKA J O, EZUGWU A E, OLAIDE O N, et al. Improved dwarf mongoose optimization for constrained engineering design problems [J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(3): 1263-1295.

[17] 吴忠强, 尚梦瑶, 申丹丹, 等. 基于 BSA-RELM 的纯电动汽车锂离子电池 SOC 估计[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 693-699. (WU Zhongqiang, SHANG Mengyao, SHEN Dandan, et al. SOC estimation of pure electric vehicle lithium-ion battery based on BSA-RELM [J]. Journal of Metrology, 2019, 40(4): 693-699. (in Chinese))

[18] 杨琼波, 崔东文. WPD-RSO-ESN 和 SSA-RSO-ESN 模型在径流时间序列预测中应用比较[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 61-67. (YANG Qiongbao, CUI Dongwen. Comparison of WPD-RSO-ESN and SSA-RSO-ESN models in predicting runoff time series [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2022(2): 61-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-10-11 编辑: 骆超)