

赵口引黄灌区二期工程区域地表水水质评价

逯林方¹, 王辉辉^{2,3*}, 胡亚伟^{2,3}, 靳晓辉^{2,3}

(1.河南省赵口引黄灌区二期工程建设管理局, 河南 开封 475000; 2.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3.河南省农村水环境治理工程技术研究中心, 郑州 450003)

摘要:【目的】研究赵口引黄灌区二期工程建设期间区域地表水环境质量状况。【方法】分别于2020年11月和2021年1、3、5月对灌区内涡河、惠济河河段21个监测点位进行调查分析, 并采用单因子评价法、综合污染指数法和综合水质标识指数法3种方法相结合, 对灌区地表水水质进行全面评价。【结果】灌区地表水总氮和总磷超标严重, 是最主要的2种污染物, 导致单因子评价法的评价结果较差。2020年11月一次年3月V类及劣V类水质占比均超过95%, 只有在5月整体达到IV类水质; 综合污染指数法评价结果显示, 2020年11月一次年5月水质从轻度污染向清洁状态改善, 且存在一定的空间分布规律; 综合水质标识指数法评价结果中, 4个月水质整体满足IV类水质标准。【结论】当前赵口引黄灌区二期工程区域地表水水质不容乐观, 特别是枯水期水质较差, 总氮和总磷是主要的污染指标, 开展农业面源污染治理是改善灌区地表水水质的重要途径。

关键词: 灌区; 水质评价; 单因子评价法; 综合污染指数法; 综合水质标识指数法

中图分类号: X824; TV882.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022067

OSID:



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.

0 引言

【研究意义】水资源是经济社会发展的重要支撑, 环境质量的好坏直接关系到人类的生存环境^[1]。当前日趋剧烈的人类活动不断对地表水造成破坏, 河流生态系统趋于退化, 服务功能逐渐丧失^[2]。2012年1月, 国务院发布了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》, 确定了水功能区限制纳污红线^[3-4]。水利部提出至2030年我国水功能区达标率要达到95%以上^[5]。赵口引黄灌区作为我国的特大型灌区, 二期工程范围内河流长期无地表水补充, 大部分水质较差, 部分河流已成为排污渠道, 无法满足生产生活的需要。二期工程的实施将向涡河、惠济河等输水河道补充黄河水, 同时提高水系连通性, 对改善灌区地表水环境具有积极作用。水环境质量评价是水资源综合管理和水生态环境保护的基础^[6], 开展赵口引黄灌区二期主体工程期间的区域地表水环境质量评价, 既是对习近平总书记“生态文明”思想的贯彻, 又是“十四五”期间保障灌区高质量发展的必然要求, 有利于持续跟踪水质变化, 为赵口生态型灌区建设与水量调度

提供技术支撑。【研究进展】目前, 国内外水质评价方法主要有单因子评价法、综合污染指数法、模糊评价法、灰色系统评价法和水质标识指数法^[7-8]。侯蕾等^[9]利用单因子评价法对牟汶河流域水质状况进行评价, 发现总氮的单因子评价指数较高, 导致多年水质评价结果为严重污染, 忽略了其他水质指标的影响; 丘冬琳^[10]利用单因子评价法对某水库水质进行评价, 也得出了相同的结论。但是乔倩倩等^[3]指出, 单因子评价法虽然呈过保护, 但从保障水生态环境安全的角度, 此方法较为合理。游如玥等^[11]利用综合污染指数法对小安溪流域的水质进行评价, 研究表明, 针对小流域水质评价, 综合污染指数法有其独特的优势。相比单因子评价法, 综合污染指数法可以消除单个严重污染指标产生的影响^[12]。综合污染指数法虽然不适用于有明确水质类别要求的流域, 但可以作为整体水质变化分析的方法^[13]。徐祖信^[14]以单因子水质标识指数法为基础, 进一步提出了综合水质标识指数法, 并对上海市河流的水质进行评价, 认为综合水质标识指数法计算简单、结论合理, 实现了定性定量评价相结合。李永军等^[15]运用综合水质标识指数法对黄河河口三角洲的湿地水质状况进行了分析与评价, 明确了主要的污染物种类, 并提出针对性的治理措施。关于模糊评价法和灰色系统评价法的研究也有报道, 如唐贺^[16]以大连市复州河流域为研究对象, 利用改

收稿日期: 2022-02-04

基金项目: 2020年度水利科技攻关项目(GG202063)

作者简介: 逯林方(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事工程建设和灌区水资源管理研究。E-mail: 1752755805@qq.com

通信作者: 王辉辉(1992-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事高浓度有机废水的处理与利用研究。E-mail: whh1320@126.com

进的灰色关联分析法对水环境质量进行了评价。刘雯雯^[17]利用模糊综合评价法对辽宁省地表水环境质量状况进行评价。这2种方法都是基于矩阵运算,其科学合理性也已经被证实,但计算相对复杂^[18]。近年来,人工神经网络和集对分析等新型研究方法开始应用于河流水质的综合评价当中,但研究尚不成熟,仍然存在结果易受影响、偏差大等缺点^[19]。【切入点】单因子评价法、综合污染指数法和综合水质标识指数法具有特点鲜明、应用广泛的优点,已有学者对这3种方法进行了研究,但是大多是对某一种或几种方法的简单应用分析,这3种方法在实际应用中的差异性与互补性的系统研究相对匮乏。因此,本研究采用此3种方法对赵口引黄灌区二期主体工程建设期间区域地表水水质进行评价。以《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中规定的单因子评价法来判别灌区河流水质类别,在此基础上,以综合污染指数法对灌区河流的整体水质状况及变化趋势进行评价和分析,实现灌区地表水评价的点面结合;最后为了弥补单因子评价法缺乏连续性,以及评价结果过保护的缺点,进一步采用综合水质标识指数法判定水质类别,与标准方法形成对比,以保证评价结果的准确性。

【拟解决的关键问题】本研究对赵口引黄灌区二期工程区域内地表水水质进行综合评价,分析地表水体的主要污染指标以及时空变化特点。研究结果将为赵口引黄灌区二期工程区域水环境管理与水污染防治提供科学的理论依据^[20-21],对于进一步改善灌区水生态环境状况具有重要意义^[22]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赵口引黄灌区位于黄河南岸豫东平原,介于北纬33°40′—34°54′,东经113°58′—115°48′之间,面积约6341 km²。灌区属大陆性季风气候,多年平均降雨量为729 mm。灌区水资源供需矛盾突出,灌区内河流多为季节性河流,补给来源主要为降水。其中涡河和惠济河作为赵口引黄灌区二期工程区域的边界河流,是灌区地表水的主要构成,也是灌区的主要输排水通道。灌区范围内农药化肥过量施用,生活污水肆意排放,加之地下水严重超采,造成水质恶化,威胁灌区水生态环境安全^[23]。

赵口引黄灌区二期工程是建设赵口引黄灌区的关键,工程涉及郑州、开封、周口、商丘等4个市^[24],设计灌溉面积为14.7万hm²,建成后赵口灌区设计灌溉面积将达到39.1万hm²,成为河南省第1、全国第4大灌区。主要建设内容包括新建渠道425 km,治理沟道414.7 km,布置建筑物及田间工程1181座。

建成后可实现年新增引黄水量2.37亿m³,将有效提高灌区内涡河、惠济河等输排水通道的连通性,改善灌区范围内的水生态环境。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设

涡河和惠济河作为淮北平原区主要河道,同时又是赵口引黄灌区二期工程区域最大的边界河流,与灌区范围内的河沟渠交错纵横,担任着灌区输排水的重要角色。考虑到涡河和惠济河的重要地位,以及灌区范围内的其他河经常出现断流现象,无法保证取样监测。本研究选取涡河和惠济河为研究对象,沿2条河流在与灌区重要排水沟渠的交汇点处设置取样点进行水质监测。分别在赵口灌区引水口、惠济河与上惠贾渠交汇点、涡河与涡河故道交汇点、…、涡河与惠济河交汇点等处设置21个取样点,涵盖了灌区范围内通许邸阁、鹿邑付桥、毕桥、柘城砖桥、太平岗、东孙营等国控和省控断面。具体监测点位名称及编号如表1所示。监测点位具体分布如图1所示。

表1 监测点位名称及编号

序号	取样点名称	取样点编号	序号	取样点名称	取样点编号
1	赵口灌区引水口取样点	A1	12	下惠贾渠取样点	G5
2	惠济河取样点1	H1	13	涡河取样点4	G6
3	惠济河取样点2	H2	14	涡河故道与涡河交汇点取样点	G7
4	惠济河取样点3	H3	15	涡河取样点5	G8
5	罗寨闸取样点	H4	16	团结干渠取样点	G9
6	惠济河取样点4	H5	17	涡河取样点6	G10
7	东孙营闸取样点	H6	18	涡河取样点7	G11
8	涡河取样点1	G1	19	玄武闸取样点	G12
9	孙城河取样点	G2	20	付桥闸取样点	G13
10	涡河取样点2	G3	21	涡河惠济河交汇点取样点	A2
11	涡河取样点3	G4			

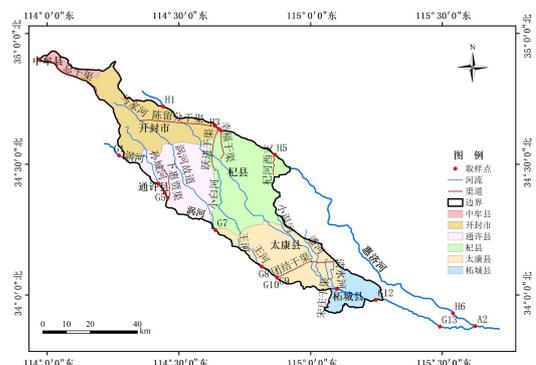


图1 监测点位分布

Fig.1 Distribution map of monitoring points

1.2.2 数据采集与分析

本研究分别于2020年11月、2021年1月(枯水

期)、3月(平水期)和5月(丰水期)对各测点共进行了4次取样检测,取样时间覆盖了冬小麦苗期、越冬、拔节、抽穗和灌浆等灌溉需水期。取样时使用取样器采集5L水样,水样采集后立即用0.45 μm滤膜过滤杂质,放入保温箱中4℃左右避光冷藏保存,进入实验室后立即进行水质指标的检测。参照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002和GHZB1—1999)^[25]对水质评价基本指标的要求,并结合相关文献分析,选取了水温、pH值、溶解氧(DO)、氨态氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和硝态氮(NO₃⁻-N)7个代表性的指标进行测定。选取氨态氮、总氮、总磷和硝态氮共4项反映灌区水体面源污染的水质指标,及衡量水体自净能力的溶解氧指标进行水质评价。水质检测方法依据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)以及《水和废水监测分析方法》(第四版)的要求^[26]。

1.2.3 水质评价方法

1) 单因子评价法

单因子评价法是最直接的水质评价方法,依据《地表水环境质量标准》中的规定,综合水质类别由计算结果最差的指标所属类别决定^[27]。依据地表水水域环境功能和保护目标,灌区范围内涡河和惠济河以地表水IV类水质限值为标准,将达到或优于限值的水质认定为清洁状态,将劣于限值的水质认定为污染状态。超标倍数排名前3项的指标即为该水体主要污染物。

超标倍数=(监测浓度值-IV类水质标准限值)/IV类水质标准限值)。

地表水水质分类标准如表2所示。

表2 地表水水质分类标准

Table 2 Classification standard of surface water quality

指标/(mg·L ⁻¹)	I类水	II类水	III类水	IV类水	V类水
溶解氧≥	7.5	6	5	3	2
氨态氮≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
总氮≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
总磷≤	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
硝态氮≤	15	15	20	30	40

2) 综合污染指数法

综合污染指数法以单因子污染指数法为基础,通过对各指标的单项污染指数进行加权平均等数学计算,得到一个用于评价水质的综合指数。该方法可以直接判断某个测点或断面的综合污染程度,但多指标混合后,会削弱有毒有害指标对水体的影响。

水质综合污染指数的计算式为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

$$P_i = \frac{C_i}{C_{i0}}, \quad (2)$$

式中: P 为平均综合污染指数; P_i 为第 i 项污染物的

单因子污染指数; C_i 为第 i 项污染物的污染质量浓度; C_{i0} 为第 i 项污染物的IV类水质标准限值; n 为参与评价的污染项目数。

由于溶解氧特殊性,采用倒数计算,计算式为:

$$P_i = \frac{C_{i0}}{C_i}. \quad (3)$$

综合污染指数法的水质评价分级标准,见表3。

表3 综合污染指数法水质评价分级标准

Table 3 Water quality evaluation grading standard of comprehensive pollution index method

P	水质状况	分级依据
≤0.7	清洁	各指标均未超标,或个别指标超标倍数较小
(0.7, 1]	尚清洁	少数指标超标,超标倍数较小,不影响水体功能
(1, 2]	轻度污染	多项指标超标,但超标倍数较小,水体功能受到影响
(2, 3]	中度污染	多项指标超标,个别指标超标严重
>3	重度污染	多项指标超标,且超标严重

3) 综合水质标识指数法

综合水质标识指数法是一种既能定量污染程度,又能定性水质类别的方法。它可以使不同的因子标准化从而进行比较,也可以对劣V类水质做更细的划分,得出水质是否出现恶臭现象。

综合水质标识指数 I_{wq} 由整数位1位、小数位3位或4位数字组成,可表示为:

$$I_{wq} = X_1.X_2.X_3.X_4, \quad (4)$$

式中: X_1 为参考《地表水环境质量标准》所得的综合水质类别; X_2 为综合水质在相应的标准限值区间内所处位置,便于与相近水质进行优劣比较; X_3 为水质指标中劣于水功能区目标的单项指标个数; X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果。

水体的综合水质级别由 X_1, X_2 的值可以判定,判断关系见表4。

表4 综合水质标识指数法水质评价分级标准^[28]

Table 4 Water quality evaluation grading standard of comprehensive water quality labeling index method

分级依据	综合水质级别
$1.0 \leq X_1.X_2 \leq 2.0$	I类
$2.0 \leq X_1.X_2 \leq 3.0$	II类
$3.0 \leq X_1.X_2 \leq 4.0$	III类
$4.0 \leq X_1.X_2 \leq 5.0$	IV类
$5.0 \leq X_1.X_2 \leq 6.0$	V类
$6.0 \leq X_1.X_2 \leq 7.0$	劣V类但不黑臭
$7.0 \leq X_1.X_2$	劣V类并黑臭

2 结果与分析

2.1 水质

灌区21个地表水监测点位的各项水质指标的统计结果详见表5。表5中最大值反映了水质最大污染程度;平均值表征水质指标的整体水平。

由表5可知,灌区地表水的溶解氧质量浓度范围

为 2.24~19.06 mg/L, 其中大于 3 mg/L 的占 97.6%, 能够满足 IV 类水质标准; 2020 年 11 月一次年 5 月, 溶解氧质量浓度平均值呈先升高后降低的趋势。所有监测点位的溶解氧质量浓度平均值为 9.89 mg/L, 表明水体自净能力较好^[29]。

表 5 水质指标统计结果

时间	项目	溶解氧	氨态氮	总氮	总磷	硝态氮
202011	最大值	10.50	4.01	13.40	2.17	6.52
	最小值	2.24	0.02	0.70	0.35	0.07
	平均值	7.54	0.94	4.78	0.86	1.85
202101	最大值	19.06	1.32	9.60	0.97	7.04
	最小值	9.15	0.01	1.10	0.20	0.28
	平均值	12.92	0.42	5.40	0.43	4.01
202103	最大值	13.18	1.01	9.20	2.99	8.88
	最小值	6.85	0.05	0.30	0.15	0.01
	平均值	10.55	0.28	3.90	0.56	3.19
202105	最大值	12.91	3.64	5.00	1.13	5.22
	最小值	5.80	0.00	0.10	0.24	0.03
	平均值	8.54	0.45	2.38	0.50	1.91

氨态氮质量浓度范围为 0~4.01 mg/L, 满足 IV 类水质标准的比例占 90.5%。2020 年 11 月一次年 5 月, 氨态氮平均质量浓度先下降后上升, 与溶解氧质量浓度变化趋势相反, 也从侧面反映了溶解氧质量浓度上升和下降带来的水体自净能力的变化。氨态氮平均质量浓度为 0.52 mg/L, 接近地表水 II 类标准, 说明总体上氨态氮并未对水质造成影响。此外, 氨态氮质量浓度超出 V 类水质标准的点位主要分布于惠济河上游, 说明此段河流的污染情况较为严重, 这与靠近开封城区存在一定的关系。硝态氮的质量浓度范围为 0.01~8.88 mg/L, 均满足 I 类水质标准, 与较低的氨态氮质量浓度有直接的关系。

总氮质量浓度范围为 0.1~13.4 mg/L, 优于 IV 类水质标准的比例仅占 19%, 劣于 V 类水质标准的比例占 76.2%。总氮平均质量浓度为 4.11 mg/L, 超出水环境功能区标准限值 1.7 倍, 远高于 V 类水质标准, 说明灌区范围内的地表水总氮污染严重超标。2020 年 11 月一次年 1 月, 总氮平均质量浓度有所上升, 1 月以后, 总氮质量浓度逐步下降。此外, 惠济河的总氮平均质量浓度为 5.8 mg/L, 而涡河的总氮平均质量浓度为 3.41 mg/L, 这也是惠济河水质劣于涡河的重要原因。

总磷的质量浓度范围为 0.15~2.99 mg/L, 其中优于 IV 水质标准的仅占 15.5%, 劣于 V 类水质标准的占 65.5%。总磷的平均质量浓度为 0.59 mg/L, 超出水环境功能区标准限制 0.9 倍, 高于 V 类水质标准 0.4 mg/L 的限制, 说明总磷同样是灌区地表水污染的重要指标。2020 年 11 月一次年 1 月, 总磷的平均质量浓度下降明显, 此后又有所升高。

故总氮和总磷是影响灌区地表水水质最重要的 2

种污染物。主要是因为灌区以农业为主, 不合理的氮肥、磷肥施用, 随地表径流进入水体, 造成氮、磷量超标, 水体富营养化加剧^[26]。控制氮、磷排放是灌区今后治理面源污染和保障水生态环境安全的重要方向。

2.2 水质评价

2.2.1 单因子评价法

利用单因子评价法对各监测点位进行水质评价的结果如表 6 所示。2020 年 11 月、2021 年 1、3、5 月, 每个测点的水质类别占比如图 2 所示。可以看出, 2020 年 11 月一次年 3 月, 灌区范围内涡河和惠济河总体水质较差, 劣 V 类水质占比均超过 71%。根据《水功能区划分标准》(GB/T50594—2010), 涡河和惠济河水质整体无法满足灌溉用水标准, 总氮和总磷是影响水质的主要污染指标。5 月涡河和惠济河 IV 类水占比 71.4%, 水质基本能够满足水质功能区要求; V 类水及更优水质类别占比 90.5%, 整体能够满足灌溉水质标准。说明随着丰水期的到来, 河流水环境容量也有所增加, 水质呈逐渐转好的趋势。另外, 根据《河南省水资源公报》以及《河南统计年鉴》数据, 2021 年赵口引黄灌区二期工程区域所涉及 4 个市的农田亩均灌溉用水量、亩均化肥和农药使用量, 相比 2020 年均有所下降, 农田退水量和进入河流污染物的量也相应降低, 这是水质随时间好转的另一因素。空间分布方面可以看出, 灌区范围内涡河和惠济河整体水质变化程度不大, 只有涡河流出灌区范围后的玄武闸和付桥闸水质改善明显。主要是因为灌区范围内农业面源污染分布较为均匀, 而灌区外面源污染有较大幅度的减轻, 依靠水体的自净能力, 水质有所改善。

表 6 单因子评价法水质类别

监测点位	202011	202101	202103	202105
A1	劣V	劣V	劣V	IV
H1	劣V	劣V	劣V	V
H2	劣V	劣V	劣V	V
H3	劣V	劣V	劣V	劣V
H4	劣V	劣V	劣V	劣V
H5	劣V	劣V	劣V	V
H6	劣V	劣V	劣V	V
G1	劣V	劣V	劣V	IV
G2	劣V	劣V	劣V	IV
G3	劣V	劣V	V	IV
G4	劣V	劣V	劣V	IV
G5	劣V	劣V	V	IV
G6	劣V	劣V	V	IV
G7	劣V	劣V	V	IV
G8	劣V	IV	V	IV
G9	劣V	劣V	劣V	IV
G10	劣V	劣V	劣V	IV
G11	V	V	劣V	IV
G12	IV	V	V	IV
G13	V	V	劣V	IV
A2	劣V	劣V	劣V	IV

2.2.2 综合污染指数法

各监测点位不同时间水质综合污染指数法的评价结果如图3和表7所示。2020年11月、2021年1、3、5月，21个取样断面中水质状态为尚清洁及清洁的比例分别为33.3%、42.9%、80.1%和95.2%，综合污染指数平均值分别为1.29、1.05、0.92和0.71，灌区地表水质呈逐渐转好状态。2020年11月和2021年1月，惠济河和涡河水水质空间变化较为明显，2021年3月和5月变化较小，各监测点位水质整体相差不大。除与枯水期到丰水期的改变密切相关外，赵口引黄灌区二期工程主体工程的建设也是一个不可忽视的原因。

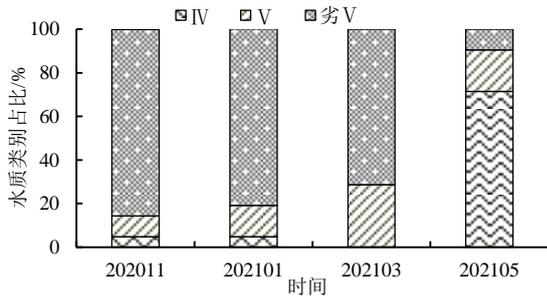


图2 水质类别占比

Fig.2 Proportion of water quality categories

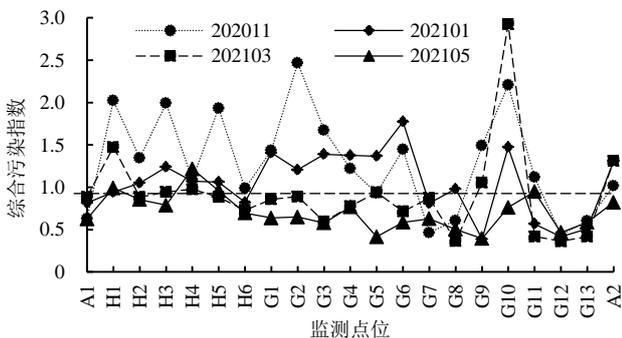


图3 各监测点位不同时间的综合污染指数

Fig.3 Comprehensive pollution index of each monitoring site at different times

从空间分布来看，灌区引水经过干渠进入惠济河和涡河后，水质没有明显的变化。灌区范围内沿惠济河流向，除与杞河西支交汇处水质有所改善外，其余监测点位变化不大。分析水质数据可以发现，2020年11月和2021年1月，惠济河与杞河西支交汇处水体中氨态氮质量浓度明显低于其他监测点位，可能是由于氨态氮较为活跃，在多重因素的作用下发生了转化。2020年11月和2021年1月，灌区范围内沿涡河方向水质呈阶段性变化。涡河流入灌区内的水质为轻度污染状态，至涡河与涡河故道交汇处水质才有所改善，主要是由于此监测点位的总氮、氨态氮和硝态氮质量浓度较低，原因可能是氮的迁移转化较为活跃，水体中的氮污染物转化为氮气逸散到空气当中。此后受王河和团结干渠污染的影响，涡河水水质变差。与清

水河交汇处以及玄武闸和付桥闸处的水质又恢复较好的状态，这与涡河接纳农田排水面积的减少密切相关。涡河出灌区与惠济河交汇后受惠济河污染的影响，水质有所降低。

表7 综合污染指数法评价结果

Table 7 Evaluation results of comprehensive pollution index method

监测点位	202011	202101	202103	202105
A1	中度污染	尚清洁	轻度污染	尚清洁
H1	轻度污染	轻度污染	尚清洁	尚清洁
H2	轻度污染	轻度污染	尚清洁	尚清洁
H3	轻度污染	轻度污染	尚清洁	轻度污染
H4	轻度污染	轻度污染	尚清洁	尚清洁
H5	尚清洁	尚清洁	尚清洁	清洁
H6	轻度污染	轻度污染	尚清洁	清洁
G1	中度污染	轻度污染	尚清洁	清洁
G2	轻度污染	轻度污染	清洁	清洁
G3	轻度污染	轻度污染	尚清洁	尚清洁
G4	尚清洁	轻度污染	尚清洁	清洁
G5	轻度污染	轻度污染	尚清洁	清洁
G6	清洁	尚清洁	尚清洁	清洁
G7	清洁	尚清洁	清洁	清洁
G8	轻度污染	清洁	轻度污染	清洁
G9	中度污染	轻度污染	中度污染	尚清洁
G10	轻度污染	清洁	清洁	尚清洁
G11	清洁	清洁	清洁	清洁
G12	清洁	清洁	清洁	清洁
G13	清洁	尚清洁	尚清洁	清洁
A2	轻度污染	轻度污染	轻度污染	尚清洁

2.2.3 综合水质标识指数法

各监测点位不同时期的综合水质标识指数法计算结果和水质评价类别如表8所示。由表8可知，综合水质标识指数的范围在2.410~6.231之间，水质类别从II类至劣V类不等。从图4可以看出，2020年11月（枯水期）一次年5月（丰水期）IV类水及更优的水质占比逐步提高，由81%提高至100%，V类和劣V类水的比例明显降低，由19%降低为0，水质提升明显，整体上满足涡河惠济河的水环境功能区要求，这在很大程度上优于单因子评价法所得的评价结果，也进一步验证了单因子评价法的过保护性。从空间分布来看，涡河的水质整体上优于惠济河，原因是涡河和惠济河虽然都是灌排合一的河流，但是受地势影响，惠济河承担更多的农田排水功能，且惠济河距离开封市区较近，更多的产业和人口可能会对河流水生态环境造成更大的压力。灌区范围内沿2条河流流向的水质变化情况与综合污染指数法评价结果相似。

2.3 3种方法对比分析

采用单因子评价法、综合污染指数法和综合水质标识指数法对赵口引黄灌区二期工程区域内的代表性河流涡河和惠济河进行水质评价可以发现，单因子评价法所得水质结果中，2020年11月（枯水期）—2021年3月（平水期）3个月基本均为V类及劣V类水质，

无法满足惠济河和涡河的水质功能区标准, 只有在5月(丰水期)IV类水质占比达到71.4%, 且均分布在涡河。总氮和总磷超标严重, 是影响单因子评价法评价结果的主要指标。综合污染指数法评价结果显示, 2020年11月—2021年5月, 灌区地表水质整体逐渐改善, 分别属于轻微污染、轻微污染、尚清洁和尚清洁的状态。此外, 灌区范围内沿河流方向水质变化也呈一定的空间变化。综合水质标识指数法对灌区地表水质进行了更加细致的划分和评价, 所得水质评价结果较单因子评价法也有很大的改善。2020年11月—2021年5月, 优于IV类水质的监测点位占比由81%提高至100%, 整体上满足水质功能区标准。

3种方法的评价结果有所差异, 但同时反映一些共同点, 例如从2020年11月—2021年5月, 水质逐渐改善, 这与枯水期至丰水期水质逐渐改善的趋势相符。此外, 灌区范围内沿着河流流向, 水质变化呈相似的空间分布。

表8 综合水质标识指数及评价结果
Table 8 Comprehensive water quality labeling index and evaluation results

监测点位	综合水质标识指数/水质类别			
	202011	202101	202103	202105
A1	6.131/劣V	3.910/III	4.520/IV	3.620/III
H1	5.220/V	4.120/IV	3.720/III	4.120/IV
H2	6.231/劣V	4.420/IV	3.820/III	4.630/IV
H3	4.830/IV	4.120/IV	3.820/III	4.930/IV
H4	5.020 V	3.820/III	3.720/III	3.920/III
H5	4.220/IV	3.920/III	3.610/III	3.720/III
H6	3.820/III	3.720/III	3.320/III	3.020/III
G1	4.820/IV	3.620/III	3.520/III	3.010/III
G2	4.020/IV	3.820/III	2.910/III	3.110/III
G3	3.720/III	3.820/III	3.520/III	3.310/III
G4	3.710/III	3.720/III	3.520/III	2.610/II
G5	4.120/IV	4.120/IV	3.010/III	3.120/III
G6	2.510/II	3.210/III	3.210/III	3.220/III
G7	2.910/II	3.620/III	2.40/II	2.710/II
G8	4.730/IV	2.600/II	3.620/III	2.310/II
G9	4.820/IV	4.120/IV	5.321/V	3.320/III
G10	3.520/III	2.920/II	2.210/II	3.210/III
G11	2.710/II	2.600/II	2.410/II	2.710/II
G12	2.610/II	2.600/II	2.610/II	2.910/II
G13	3.120/III	3.010/III	3.320/III	2.810/II
A2	4.020/IV	4.120/IV	3.820/III	3.620/III

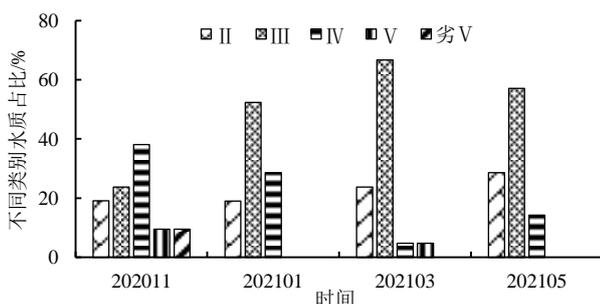


图4 不同时间的水质类别占比

Fig.4 Proportion of water quality categories at different times

3 讨论

通过对赵口引黄灌区二期范围内涡河和惠济河的水质分析可以发现, 溶解氧、氨态氮和硝态氮的质量浓度较低, 而总氮和总磷 2 项指标严重超标, 是影响灌区地表水质的主要污染物, 这与灌区范围内过量的化肥使用密切相关^[30]。李玖颖等^[31]也指出, 化肥中氮、磷元素流失是造成灌区地表水质污染的重要因素。

3 种评价方法中, 单因子评价法无法很好地实现连续定量的分析, 容易出现跳跃性而造成误差^[10], 且受总氮和总磷的影响, 导致水质评价结果较差, 基本为 V 类和劣 V 类水质。但单因子评价法明确了地表水体的主要污染物总氮和总磷, 也为严格的水环境保护与治理提供了依据^[3]。综合污染指数法实现了对灌区地表水整体状态和变化趋势的评价分析, 更能呈现水质的空间变化规律, 对于整体把控区域水质, 统筹采取保护措施具有重要作用^[12], 也被认为是最适合小流域水质评价的方法^[11]。综合水质标识指数法克服了单因子评价法过保护的缺点, 能够对水质类别做出更加客观和细致的判断^[32-33], 可以作为单因子评价法的补充, 为水环境保护与治理提供更加科学的参考。

本研究结合单因子评价法、综合污染指数法和综合水质标识指数法, 对赵口引黄灌区二期工程区域内涡河和惠济河进行了水质评价, 实现了多种方法的相互借鉴, 克服了单一方法造成评价结果片面性的问题。但是对灌区水质进行评价还存在尚待改进之处, 如本次研究的监测数据有限, 无法满足长序列研究要求。因此, 应当进一步开展相关研究, 持续为赵口灌区水质改善提供理论支撑的同时, 也为其他灌区水质评价提供参考。

4 结论与建议

1) 涡河和惠济河氨态氮、硝态氮未超出水质标准限值, 但总氮和总磷超标严重, 这与灌区氮肥、磷肥的过量施用密切相关, 表明农业面源污染是影响灌区地表水水质的主要因素。应当减少化肥使用量, 增大有机肥施用比例, 加大对农业废弃物和畜禽粪便的资源化利用力度, 禁止生活污水未经处理排入水体。

2) 单因子评价法明确了灌区地表水质的主要污染物, 确定了水质类别; 综合污染指数法揭示了地表水质的整体状态和变化趋势; 综合水质标识指数法结合以上 2 种方法的优点, 对水质类别进行了更为客观的判断。3 种方法相结合, 实现了地表水评价的全面性和科学性。

3) 3 种评价方法均展现出灌区地表水质的共性: 2020 年 11 月(枯水期)—2021 年 5 月(丰水期),

水质逐渐改善；灌区范围内水质较差，流出灌区后水质有所改善。灌区水环境保护与治理应当充分考虑时间和空间的变化，针对性采取措施。另外，应当加快推进引黄工程建设，对灌区内的河、沟、渠展开系统治理，提高水系连通性。

参考文献：

[1] 丁刚益, 毛小云, 陈柯瑾, 等. 昭通市地表水水质评价与变化趋势分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(4): 75-78, 82.
DING Gangyi, MAO Xiaoyun, CHEN Kejin, et al. Evaluation and trend analysis of surface water quality in Zhaotong City[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(4):75-78, 82.

[2] 涂敏. 基于水功能区水质达标率的河流健康评价方法[J]. 人民长江, 2008, 39(23): 130-133.
TU Min. The river health assessment method based on the water quality compliance rate of water function zones[J]. Yangtze River, 2008, 39(23): 130-133.

[3] 乔倩倩, 许鑫, 骆素娜. 水功能区水质达标评价方法分析[J]. 东北水利水电, 2013, 31(8): 5-7.
QIAO Qianqian, XU Xin, LUO Suna. Analysis on the evaluation methods of water quality compliance in water function zones[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2013, 31(8): 5-7.

[4] 韩艳利, 靳会姣, 高天立, 等. 黄河流域重要水功能区水质达标及趋势分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 68-71.
HAN Yanli, JIN Huijiao, GAO Tianli, et al. Water quality evaluation and trend analysis in the key water function zones of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2018, 40(3): 68-71.

[5] 冯堂武. 基于频次法与均值法的水质评价方法比较研究[J]. 河北地质大学学报, 2020, 43(3): 72-76.
FENG Tangwu. Comparative study on water quality evaluation methods based on frequency method and mean value method[J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2020, 43(3): 72-76.

[6] 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(S1): 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(S1): 56-61.

[7] 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.

[8] 陈攀, 韩丽娟. 不同模糊组合模型在水质评价中的应用比较[J]. 人民黄河, 2018, 40(12): 100-105.
CHEN Pan, HAN Lijuan. Comparison of application of different fuzzy combination models in water quality assessment[J]. Yellow River, 2018, 40(12): 100-105.

[9] 侯蕾, 于新雨, 燕振华, 等. 牟汶河钢城区河段地表水水质评价与变化趋势分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 670-674.
HOU Lei, YU Xinyu, YAN Zhenhua, et al. Evaluation and variation trend analysis on surface water quality in gangcheng district of Muwen river[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2021, 52(4): 670-674.

[10] 丘冬琳. 不同水质评价方法对水库水质趋势分析的影响比较[J]. 广东水利水电, 2018(7): 13-15.
QIU Donglin. Comparison on influence of various water quality assessment methods in reservoir water quality tendency analysis[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(7): 13-15.

[11] 游如玥, 敖天其, 朱虹, 等. 小流域水质评价方法对比研究[J]. 四川环境, 2021, 40(2): 73-81.
YOU Ruyue, AO Tianqi, ZHU Hong, et al. Comparative study on water quality evaluation methods of small watersheds[J]. Sichuan Environment, 2021, 40(2): 73-81.

[12] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 185-190.
SUN Tao, ZHANG Miaoxian, LI Miaomiao, et al. River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. Environmental Science &Technology, 2014, 37(4): 185-190.

[13] 费卓越, 葫芦岛市沿海地区地表水评价[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(9): 195-200.
FEI Zhuoyue. Evaluation of surface water in coastal area of Huludao city[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(9): 195-200.

[14] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 482-488.
XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4): 482-488.

[15] 李永军, 宋颖, 李华栋. 综合水质标识指数法在黄河口湿地水质评价中的应用[C]//2020(第八届)中国水生态大会论文集, 中国学术期刊电子出版社, 2020: 158-163.
LI Yongjun, SONG Ying, LI Huadong. Application of comprehensive water quality identification index in water quality evaluation of the Yellow River estuary wetland[C]//Proceedings of the 2020 (8th) China Water Ecology Conference, China Academic Journal Electronic Publishing House, 2020: 158-163.

[16] 唐贺. 基于改进的灰色关联分析法在地表水环境评价中的应用[J]. 海河水利, 2020(4): 36-39.
TANG He. Application of improved grey relational analysis method in environmental quality assessment of surface water[J]. Haihe Water Resources, 2020(4): 36-39.

[17] 刘雯雯. 辽宁省地表水水环境质量评价[J]. 水利技术监督, 2019(3): 146-148, 152.
LIU Wenwen. Evaluation of surface water environment quality in Liaoning Province[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2019(3): 146-148, 152.

[18] 杜娟娟, 李荣峰, 胡炎. 不同方法在沁河水质评价中的应用与分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 125-127.
DU Juanjuan, LI Rongfeng, HU Yan. Application and analysis of different methods in Qinhe water quality evaluation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S2): 125-127.

[19] 黄瑞, 韩龙喜, 张防修, 等. 模糊区间型综合决策方法在水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 104-109.
HUANG Rui, HAN Longxi, ZHANG Fangxiu, et al. Application of the fuzzy interval multi-attribute assessment in the analysis of water quality[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 104-109.

[20] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 利用模糊综合评判法评价潮白河流域水质[J]. 农业环境科学学报, 2006, 2(25): 471-476.
LI Lianfang, ZENG Xibo, LI Guoxue, et al. Water quality assessment in chaobai river by fuzzy synthetic evaluation method[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 2(25): 471-476.

[21] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321-325.
XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3): 321-325.

[22] 马莉. “四水共治”推进赵口引黄灌区二期工程建设[J]. 河南水利与南水北调, 2019(3): 93-94.

- MA Li. "Same treatment of four waters" promotes the construction of the second phase of the Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District[J]. *Water Resources & South to North Water Diversion*, 2019(3): 93-94.
- [23] 侯君, 王汴歌, 孙国恩, 等. 赵口引黄灌区建设与管理的思考[J]. *河南水利与南水北调*, 2018, 47(8): 25-26.
- HOU Jun, WANG Biange, SUN Guoen, et al. Reflections on the construction and management of Zhaokou Yellow River irrigation district[J]. *Water Resources & South to North Water Diversion*, 2018, 47(8): 25-26.
- [24] 崔宏艳. 赵口引黄灌区二期工程进度控制措施[J]. *河南水利与南水北调*, 2021, 50(4): 49-50.
- CUI Hongyan. Progress control measures of the second phase project of Zhaokou Yellow River diversion irrigation district[J]. *Water Resources & South to North Water Diversion*, 2021, 50(4): 49-50.
- [25] 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: GB3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Surface water environmental quality standard: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [26] 申洪鑫, 牛蓓蓓, 李富强, 等. 大汶河水质状况评价和污染源分析[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(5):176-185, 195.
- SHEN Hongxin, NIU Beibei, LI Fuqiang, et al. Water quality assessment and pollution source analysis of the Dawen River[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(5): 176-185, 195.
- [27] 胡海翔. 吕梁市三川河水质分析评价[J]. *山西水土保持科技*, 2021(2): 11-13.
- HU Haixiang. Analysis and evaluation of water quality of Sanchuan River in Luliang City[J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2021(2): 11-13.
- [28] 李雪. 鞍山市重要水质站水质分析与评价[J]. *水资源开发与管理*, 2021(1): 11-16, 27.
- LI Xue. Analysis and evaluation of water quality of important water quality stations in Anshan City[J]. *The Global Seabuckthorn Research and Development*, 2021(1): 11-16, 27.
- [29] 张凯奇, 夏飞, 王海波. 盐城市第III防洪区典型河流水质分析[J]. *江苏水利*, 2021(3): 31-34.
- ZHANG Kaiqi, XIA Fei, WANG Haibo. Analysis of water quality of typical rivers in the third flood control area of Yancheng City[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2021(3): 31-34.
- [30] 高福, 冯棣, 孙池涛, 等. 农业面源污染指标与地表水质量的相关性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(6): 119-124.
- GAO Fu, FENG Di, SUN Chitao, et al. Research on the correlation between agricultural non-point source pollution indicators and surface water quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6): 119-124.
- [31] 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. Evaluation and analysis of surface water irrigation quality in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(12): 115-120.
- [32] 张洁, 焦树林, 赵梦, 等. 贵州百花湖流域主要地表河流水质评价分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(6): 13-19.
- ZHANG Jie, JIAO Shulin, ZHAO Meng, et al. Evaluation and analysis of water quality of main surface rivers in Baihua Lake Basin in Guizhou[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(6): 13-19.
- [33] 邓建明. 水质级别指数法在水质评价和预警方面的应用: 以桂南沿海地区地表水评价为例[J]. *人民长江*, 2021, 52(2): 18-24.
- DENG Jianming. Application of water quality grade index method in water quality evaluation and early warning: Taking the evaluation of surface water in the coastal areas of southern Guangxi as an example[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(2): 18-24.

Surface Water Quality in Second-phase Zhaokou Yellow River Irrigation District Project

LU Linfang¹, WANG Huihui^{2,3*}, HU Yawei^{2,3}, JIN Xiaohui^{2,3}

(1. Construction Administration of the Second Phase Project of Zhaokou Yellow River Irrigation District in Henan Province, Kaifeng 475000, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

3. Henan Province Rural Water Environment Management Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: 【Objective】 The irrigation district at Zhaokou in east Henan province is a project to provide the Yellow River water for irrigation and industrial usage in this region. It is constructed in several phases. The purpose of this paper is to analyze the quality of the water after the second-phase of the project was completed. **【Method】** Water samples were taken from the sections of Guo River and Huiji River in November 2020, January, March, and May 2021 at 21 locations. Their chemical components were analyzed. The pollution index used to evaluate the water quality was calculated using single factor evaluation method, comprehensive pollution index method, and comprehensive water quality labeling index method. **【Result】** The total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the water exceeded the standard substantially. From November 2020 to March 2021, water with quality at the Grade V or lower accounted for more than 95%, while in May 2021, the quality of all water reached Grade IV. The results calculated from the comprehensive pollution index method showed that from November 2020 to May 2021, water quality improved from moderate pollution to least or no pollution. It was also found the water quality varied spatially. The results calculated from the comprehensive water quality labeling index method showed that water quality from November 2020 to May 2021 reached Grade IV, the demand for irrigation water quality. **【Conclusion】** The quality of surface water in the second-phase Zhaokou Yellow River Irrigation District project is not optimistic, especially in the dry season. Its TN and TP are the main pollutants. Alleviating non-point source pollution from cropping fields is an important way to improve the water quality.

Key words: irrigation area; water quality evaluation; single factor evaluation method; comprehensive pollution index method; comprehensive water quality labeling index method

责任编辑: 白芳芳