

淮南迪沟采煤沉陷区水体水质特征与评价

陈从磊¹, 谢毫², 陈业禹³, 牛玉亭¹, 范佳民³

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司 矿业分公司资源环保部, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南, 232001; 3. 安徽大学 资源与环境工程学院 安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了解淮南迪沟采煤沉陷区水体水质状况, 将该沉陷积水区水域划分为3个单元(济河、沉陷积水区、对照区), 采集不同单元样品, 测试分析其水质特征, 并利用单因子和综合水质标识指数法进行评价。结果表明: 济河和沉陷积水区均为弱碱性水体, 水质比较澄清, 透明度好。氮磷营养盐指标总体含量表现为济河最高, 这与济河周边的农业面源污染有关; 重金属 Cu、Zn、Pb 和 As 在沉陷积水区均出现一定程度的富集, 与沉陷区周边充填煤矸石中重金属淋溶释放、汽车尾气的排放以及地表扬尘有关; 通过对沉陷积水区距离济河由近及远每隔 15 m 采集水样的纵向采样点 C1、C2、C3 分析得出, 其 TN 和 NH_4^+ 分布表现出距离济河越近, 则含量越低, 而 TP、Cu、Zn、Pb 和 As 表现出相反的规律性; 单因子水质标识指数结果显示, Hg 和 COD_{Mn} 在济河和沉陷积水区污染相对严重; 综合水质标识指数法显示, 3个单元综合水质指标 P_i 均符合 III 级标准。在交汇水域, 济河采样点 J3、J4 与沉陷积水区采样点 C1、C2 的水质状况表现为 $J3(2.320) < J4(2.550) < C1(2.750) < C2(2.850)$, 说明随着沉陷积水区与济河间坝体的沉陷, 济河水体并未对沉陷积水区水体产生影响。

关键词: 采煤沉陷积水区; 水质特征; 水质评价; 综合水质标识指数; 淮南迪沟镇

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0058-08

Evaluation and characteristics of surface water quality of Digou coal mining subsidence area in Huainan

CHEN Conglei¹, XIE Hao², CHEN Yeyu³, NIU Yuting¹, FAN Jiamin³

(1. Resources and Environmental Protection Department, Coal Branch, Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China; 2. National Engineering Laboratory for Protection of Coal Mine Eco-environment, Huainan 232001, China; 3. Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to find out the water quality of Digou coal mining subsidence area in Huainan, water samples were collected and tested to analyze the characteristics of surface water. The test water area was divided into three zones, i. e., Jihe river (J), subsidence ponding area (C) and control area (D), then its surface water quality was assessed using single factor and comprehensive water quality identification index method based on the water samples from these different zones. The results show that both the Jihe river and subsidence ponding area are weakly alkaline water bodies with relatively clear water quality and good transparency. The highest concentrations of TN and NH_4^+ both occurred in Jihe, which is attributed to the agricultural pollution of non-point source in the periphery. Heavy metals of Cu, Zn, Pb and As were all enriched to some extent in the subsidence ponding area, which is related to the leaching and releasing of heavy metals from coal gangue, the emission of automobile exhaust and the fugitive dust on the surface. Samples from the sample points of C1, C2 and C3 in the the subsidence ponding area, which is 15 m apart from each other and further away from Jihe river, were collected and analyzed. It is found that the concentrations of TN and NH_4^+ decreased with the distance to Jihe River, whereas the heavy metals showed the opposite. The results of single factor water quality identification index show that the pollution

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702176); 济河-沉陷水域地表水环境监测与评价项目(PAY-KY-2019-03)

作者简介: 陈从磊(1986-), 男, 安徽淮南人, 硕士, 工程师, 从事地质环境治理工作。

通讯作者: 范佳民(1989-), 男, 安徽合肥人, 硕士, 助理实验师, 从事矿山生态环境与区域生态安全研究工作。

of Hg and COD_{Mn} are more severe in the subsidence ponding area and Jihe River than the other pollutants. However the water quality index P_i of the three zones all comply to the standard of Class III according to the comprehensive water quality identification index. In the intersection of water bodies, the water quality of sample points of J3, J4 in Jihe River and C1, C2 in the subsidence ponding area ranked as follows: $J3(2.320) < J4(2.550) < C1(2.750) < C2(2.850)$, which indicates that the water body in the subsidence ponding area has not been impacted by Jihe river with the subsidence of the dam between the subsidence ponding area and Jihe River.

Key words: coal mining subsidence area; characteristics of surface water quality; evaluation of surface water quality; comprehensive water quality identification index; Digou Town of Huainan

1 研究背景

煤炭作为我国主要的一次能源,在国民经济发展中起着举足轻重的作用^[1]。煤炭在开采利用过程中会出现一系列的生态环境问题^[2]。其中,采煤导致的地表沉陷是最重要的生态环境问题之一。采煤形成的地表沉陷区域在高潜水位的地质条件下,很容易使沉陷区域面积的 30%~50% 成为积水区,进而演变成湖泊、湿地等不同类型的景观水体^[3]。沉陷水域潜在的生态环境效应将对矿区社会经济和生态环境的可持续发展产生重要影响^[4]。因此,对采煤沉陷区水体水质进行分析与评价,可以有效识别水体水质状况,也可为沉陷区水污染控制和水环境修复方案的制定提供依据,具有重要意义^[5]。

以往大多数学者对水体水质的特征分析与评价研究主要集中在河流、湖泊、海洋等自然水体^[6-11]。近些年来随着煤炭开采导致的地表沉陷问题越发突出,一些研究者开始关注煤矿沉陷积水区水环境^[12-16]。同时,煤矿开采沉陷积水形成的封闭式水域很容易与周边的自然水体相连通,形成开放型水体,从而导致采煤沉陷区水系环境发生紊乱。本研究选择淮南高潜水位迪沟采煤沉陷区与周边济河连通水域为研究区域,将综合水质标识指数法应用于研究区的综合水质评价,研究结果可为研究区水体综合治理和开发利用提供依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

阜阳济河是 1958 年开挖的一条人工河。它源于阜阳市颍河干流,西起阜阳颍河左堤的永安闸,向东南流经颍东区和颍上县境最后进入西淝河,全长 116 km。西东走向与合阜铁路平行,在合阜铁路北侧。上游在颍东区,中游在颍上县,下游在凤台县。

迪沟采煤沉陷区位于安徽省颍上县迪沟镇谢桥矿,北靠西淝河,南临济河,主要由农田沉陷形成。

所研究的采煤沉陷区被公路隔开分为西部和东部两块沉陷水域,其中西部为封闭性水域,东部由于坝体的多年沉陷与济河相连通,其中靠近铁路桥的沉陷水域周边有煤矸石堆,堆积面积约 14 hm²。整个沉陷区域水体平均水深为 4 m,最深为 6.5 m,周边有小面积的挺水植物,未见有沉水植物。研究区沉陷水域分布见图 1。

2.2 样品采集与测试

为了客观并全面地分析迪沟采煤沉陷区地表水质特征,按照地表水质监测布点和采样原则,并结合实地情况,于 2019 年 11 月对迪沟沉陷水域进行了水样的现场调查与采集。根据研究目的和水域类型,将研究水域分为济河、沉陷积水区和对照区 3 个类别,共布设 12 个采样点,其中济河 4 个(J1~J4),沉陷积水区 5 个(C1~C5),对照区 3 个(D1~D3),完成了 36 个水样(每个采样点采集 3 个水样)的采集工作,采样点分布如图 1 所示。

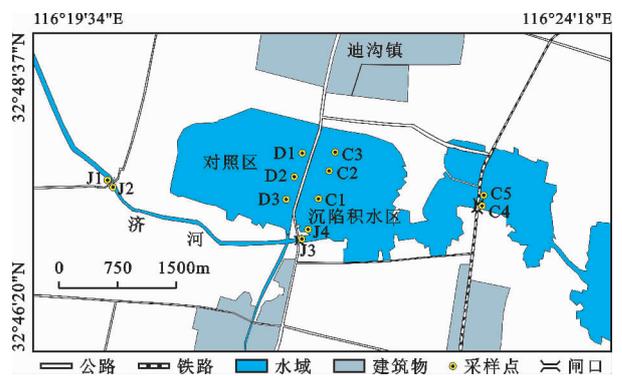


图 1 研究区沉陷水域及水质采样点分布

利用水样采集器(有机玻璃材质)进行水样采集后装入聚乙烯塑料瓶中。其中测试氮、磷指标水样添加硫酸酸化至 $pH < 2$;测试重金属指标水样每升水添加 10 mL(1+1)硝酸酸化;测试叶绿素 a 指标水样每升水加入 1 mL、1% 的碳酸镁悬浊液以防止酸化引起色素溶解,将水样运回实验室低温保存并及时检测。

参照国家地表水质量标准和行业标准,选取 19 项指标进行检测。现场测定水温(t)、pH、溶解氧(DO)、浊度(ZD)、电导率(EC)、透明度(TD)和氧化还原电位(ORP),样品中其他指标如化学需氧量(COD_{Mn})运用高锰酸钾法进行测定;总氮(TN)、氨氮(NH_4^+)和总磷(TP)使用分光光度法测定;叶绿素 a($Chl-a$)采样丙酮萃取分光光度法测定;重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国安捷伦)测试,砷(As)和汞(Hg)分别采用原子荧光(LC-AFS9800,北京海光)和 DMA-80 直接测汞仪完成测试。具体方法参见国家标准^[17]。

2.3 研究方法

关于水质综合评价方法有内梅罗指数法、模糊数学法、污染指数法、灰色系统评价法、层次分析法、水质标识指数法等^[18-20]。其中,综合水质标识指数法涵盖了综合水质类别、定量污染程度、水环境功能区达标等信息^[21],并能够使研究区不同因子化为同一量纲以便于在同一类别中进行比较,而且可以结合国家水质标准类别进行综合水质的定性评价和定量评价^[22-23]。本研究水质评价采用单因子水质标识指数法和综合水质标识指数法^[24-25]。

(1)单因子水质标识指数。单因子水质标识指数 P_i 由整数位 1 位、小数位两位或 3 位数字组成,可表示为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \quad (1)$$

式中: X_1 为第 i 项水质指标的水质类别; X_2 为指标数据在 X_1 类水质变化区间中所处的位置,按照四舍五入原则取 1 位有效数字; X_3 为水质类别与功能区目标水质类别的比较结果,为 1 位或两位有效数字。

(2)综合水质标识指数。综合水质标识指数 I_{wq} 表示形式类似于单因子水质标识指数,由整数位 1 位、小数位 3 位或 4 位数字组成,可表示为:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 X_5 \quad (2)$$

式中: X_1 为整体水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间所处位置; X_3 为参与评价水质指标中,劣于功能区目标水质的单因子个数; X_4 为综合水质类别与功能区目标水质类别的比较结果,为 1 位或两位有效数字。

本研究各点位数据标准差 S 和变异系数 C_v 的计算方法为:

$$\text{标准差: } S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$\text{变异系数: } C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中: x_i 为某指标第 i 个样点数值; \bar{x} 为某指标的算术平均值; n 为某指标的样点个数。

3 结果分析与讨论

3.1 水质指标浓度特征

3.1.1 常规理化指标浓度特征 研究区不同区域水样常规理化指标测试结果见表 1。由表 1 可知,济河平均水温为 17.6 °C,沉陷积水区水温为 16.6 °C。济河和沉陷积水区水质 pH 范围在 7.44 ~ 7.64,均为弱碱性水体,DO 浓度变化范围分别为 6.1 ~ 9.3 和 6.7 ~ 9.1 mg/L,均处在地表水 I 类和 II 类水浓度水平。结合 ZD 和 TD 来看,济河和沉陷积水区水体的 ZD 基本小于 10 TU, TD 在水下 40 cm 左右,水质比较澄清,透明度好。沉陷积水区水质平均 EC 略大于济河水体,两者分别为 850 和 735 $\mu\text{S}/\text{cm}$,济河和沉陷积水区 COD_{Mn} 平均浓度分别为 5.64 和 5.79 mg/L,处于地表 III 类水标准值范围。济河和沉陷积水区 $Chl-a$ 的平均浓度差异不大,在对照区的平均浓度最高,为 74.63 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

3.1.2 氮、磷等营养盐浓度特征 氮、磷元素通常与富营养化有着密不可分的关系。研究区不同区域水样氮、磷浓度测试结果见表 2。由表 2 可知,济河、沉陷积水区和对照区的 TN 浓度变化范围分别为 0.44 ~ 0.74、0.29 ~ 0.38 和 0.33 ~ 0.40 mg/L,平均浓度分别为 0.59、0.34 和 0.36 mg/L,表现为济河 > 对照区 > 沉陷积水区; NH_4^+ 浓度变化范围分别为 0.16 ~ 0.55、0.19 ~ 0.32 和 0.28 ~ 0.35 mg/L,平均浓度分别为 0.34、0.26 和 0.31 mg/L,表现为济河 > 对照区 > 沉陷积水区。从 TN 和 NH_4^+ 的平均浓度变化范围来看,济河水域均表现为最高,这是由于济河周边土地主要为农业用地,会通过地表径流带来大量的农业面源污染。从变异系数来看,济河水样氮、磷浓度的变异系数也是最大,表明其受人类活动的扰动最大。郑刘根等^[13]对淮南后湖采煤沉陷区的研究也发现,靠近农田的沉陷区水体表现为 TN、 NH_4^+ 浓度高于其他沉陷区域。TP 在济河、沉陷积水区和对照区的浓度变化范围分别为 0.04 ~ 0.09、0.05 ~ 0.10 和 0.15 ~ 0.17 mg/L,平均浓度分别为 0.07、0.07 和 0.16 mg/L,表现为对照区 > 济河 = 沉陷积水区。

从济河与沉陷积水区水体氮、磷的相互影响分析,二者 TP 平均浓度相差不大,虽然济河的 TN 和 NH_4^+ 平均浓度最高,但沉陷积水区与对照区相比差

异不大,且沉陷积水区浓度变异系数较小,说明沉陷积水区的水体并未受到济河水体的显著影响。

表 1 研究区不同区域水样常规理化指标测试结果

区域	特征值	<i>t</i> / ℃	pH	DO/ (mg · L ⁻¹)	ZD / TU	EC /(μS · cm ⁻¹)	TD / cm	ORP / mV	COD _{Mn} / (mg · L ⁻¹)	Chl - a / (μg · L ⁻¹)
济河	最大值	17.80	7.63	9.30	10.73	908	45	-65	5.85	52.99
	最小值	17.30	7.44	6.10	7.63	458	30	-75	5.43	47.38
	平均值	17.60	7.52	7.70	8.63	735	37.5	-69	5.64	51.22
	标准差	0.18	0.08	3.56	1.23	180.34	5.59	4.24	0.18	2.24
	变异系数/%	0.02	1.01	3.04	14.23	24.54	14.91	6.15	3.19	4.39
沉陷积水区	最大值	17.30	7.64	9.10	8.74	930	55	-67	6.47	65.71
	最小值	15.80	7.48	6.70	6.97	756	25	-79	5.37	46.28
	平均值	16.60	7.56	7.80	8.16	850	42	-72	5.79	52.88
	标准差	0.57	0.07	2.51	0.63	64.39	10.30	4.62	0.40	8.03
	变异系数/%	3.45	0.92	3.19	7.73	7.57	24.51	6.40	6.97	15.18
对照区	最大值	19.30	7.87	8.60	10.46	429	35	-85	6.54	77.00
	最小值	17.30	7.74	7.30	9.22	415	25	-89	6.21	70.83
	平均值	18.10	7.81	8.10	9.85	423	32	-87	6.40	74.63
	标准差	0.85	0.05	1.88	0.51	5.79	4.71	1.70	0.14	2.71
	变异系数/%	4.69	0.69	7.25	5.14	1.37	14.89	1.96	2.14	3.64

表 2 研究区不同区域水样氮、磷浓度测试结果 mg/L

区域	特征值	TN	NH ₄ ⁺	TP
济河	最小值	0.44	0.16	0.04
	最大值	0.74	0.55	0.09
	平均值	0.59	0.34	0.07
	标准差	0.11	0.14	0.01
	变异系数	0.18	0.42	0.28
沉陷积水区	最小值	0.29	0.19	0.05
	最大值	0.38	0.32	0.10
	平均值	0.34	0.26	0.07
	标准差	0.03	0.04	0.02
	变异系数	0.10	0.16	0.24
对照区	最小值	0.33	0.28	0.15
	最大值	0.40	0.35	0.17
	平均值	0.36	0.31	0.16
	标准差	0.03	0.03	0.01
	变异系数	0.09	0.09	0.07

3.1.3 重金属浓度特征 表 3 为研究区不同区域地表水水样重金属浓度测试结果。由表 3 可知, Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 的平均浓度在济河分别为 12.36、925.41、8.13、75.30、0.61、2.40 和 0.17 μg/L,沉陷积水区分别为 18.01、1057.68、23.80、

83.44、0.82、2.96 和 0.16 μg/L,在对照区分别为 15.11、987.25、12.94、100.84、1.05、2.64 和 0.30 μg/L。与对照区相比,济河各重金属的平均浓度均低于对照区,说明济河中重金属并没有出现明显的富集。沉陷积水区的 Cu、Zn、Pb 和 As 的平均浓度分别为对照区的 1.19、1.07、1.84 和 1.12 倍,说明这些重金属已经出现一定程度的富集,其原因是沉陷积水区东边坝体是由煤矸石回填,而煤矸石中的重金属在长期的雨水冲刷和沉陷区水体浸提过程中会释放到沉陷积水区水体中,造成重金属浓度升高。王国强等^[26]分析了两淮采煤沉陷区煤矸石充填的危害和污染途径,指出矸石淋溶液中的重金属 Pb、Cu、Zn 等会对周围接纳水体产生污染。

变异系数可用来判断重金属是来源于自然因素还是人为因素。变异系数越大,说明该地区受人为活动的干扰越强烈^[27]。由表 3 可看出,沉陷积水区中 Cu、Pb 和 Cd 浓度的变异系数均高于 30%,分别为 31%、63% 和 44%,表明这些重金属含量受人为活动的干扰严重。沉陷积水区和对照区均出现 Pb 和 Cd 浓度的变异系数超过 30% 的现象,说明沉陷积水区和对照区可能有相同的污染源。结合现场环境分析发现,沉陷积水区和对照区被 1 条主干公路隔开,来往车辆尾气的排放和地表扬尘是其另一个污染源^[28]。

表3 研究区不同区域地表水水样重金属浓度测试结果

区域	特征值	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg
济河	最大值	14.10	951.25	11.10	88.42	0.90	2.63	0.22
	最小值	11.40	869.50	5.44	69.02	0.41	2.17	0.11
	平均值	12.36	925.41	8.13	75.30	0.61	2.40	0.17
	标准差	1.06	32.67	2.06	7.88	0.19	0.23	0.04
	变异系数	0.08	0.03	0.25	0.10	0.31	0.09	0.26
沉陷积水区	最大值	25.72	1193	48.65	111.88	1.44	3.40	0.19
	最小值	10.80	904.12	8.62	70.50	0.45	2.26	0.12
	平均值	18.01	1057.68	23.80	83.44	0.82	2.96	0.16
	标准差	5.53	103.02	14.93	16.22	0.36	0.41	0.02
	变异系数	0.31	0.09	0.63	0.19	0.44	0.14	0.15
对照区	最大值	17.66	1005.50	18.94	123.10	1.58	2.73	0.49
	最小值	13.48	960	8.96	80.05	0.73	2.59	0.18
	平均值	15.11	987.25	12.94	100.84	1.05	2.64	0.30
	标准差	1.82	19.64	4.31	17.60	0.38	0.06	0.13
	变异系数	0.12	0.02	0.33	0.17	0.36	0.02	0.43

3.2 水质指标空间分布特征

3.2.1 氮、磷营养盐浓度空间分布特征 研究区不同区域各采样点水样的氮、磷浓度如图2所示。由图2可知,济河与沉陷积水区水体中的TN、TP和 NH_4^+ 浓度均满足地表水III类标准限值,其中TP的浓度可以达到地表水II类标准限值。从各采样点的氮、磷浓度对比分析,沉陷积水区与济河水体中的TP和 NH_4^+ 平均浓度均差异不大,济河水体中的TN浓度略高于沉陷积水区水体。从各采样点TN、TP和 NH_4^+ 的浓度变化分析,沉陷积水区各采样点营养盐含量分布更加均匀,水质较为稳定,受外来污染影响相对较小。沉陷积水区C1、C2、C3采样点的TN和 NH_4^+ 浓度均为 $C1 < C2 < C3$,表现为距离济河越近,则浓度越低,说明沉陷积水区TN和 NH_4^+ 并未受到济河水质的影响。沉陷积水区TP浓度表现为 $C1 > C2 > C3$,表现为距离济河越近,则含量越高。

3.2.2 重金属浓度空间分布特征 研究区不同区域各采样点水样的重金属浓度如图3所示。由图3可知,济河各采样点水样同种重金属浓度差异不大,水质比较均匀,而沉陷积水区各采样点重金属浓度除Hg外均存在一定差异。这是由于济河作为开放式的河流水体,在流动性和水力交换能力方面要明显优于半封闭式的沉陷区水体,水质混合更均匀。沉陷积水区C1、C2、C3各点Cu、Zn、Pb、As浓度均表现为 $C1 > C2 > C3$,表明距离济河越近,其浓度越高,而Cr、Cd和Hg没有表现出明显的规律性。从各采样点重金属浓度看,Cu、Zn、Pb和As的最高含

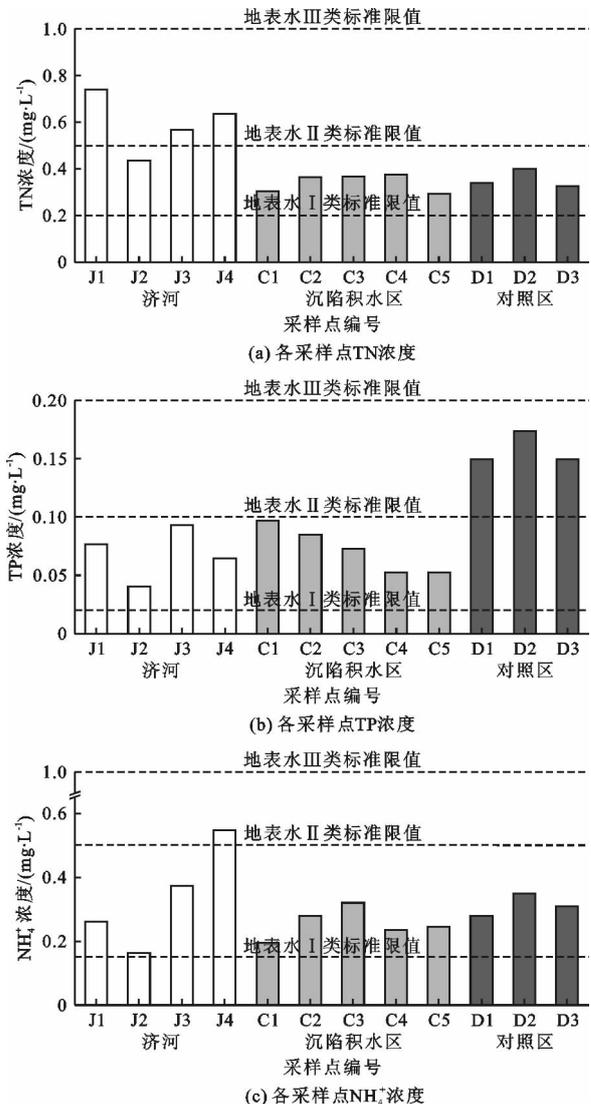


图2 研究区不同区域各采样点水样的氮、磷浓度

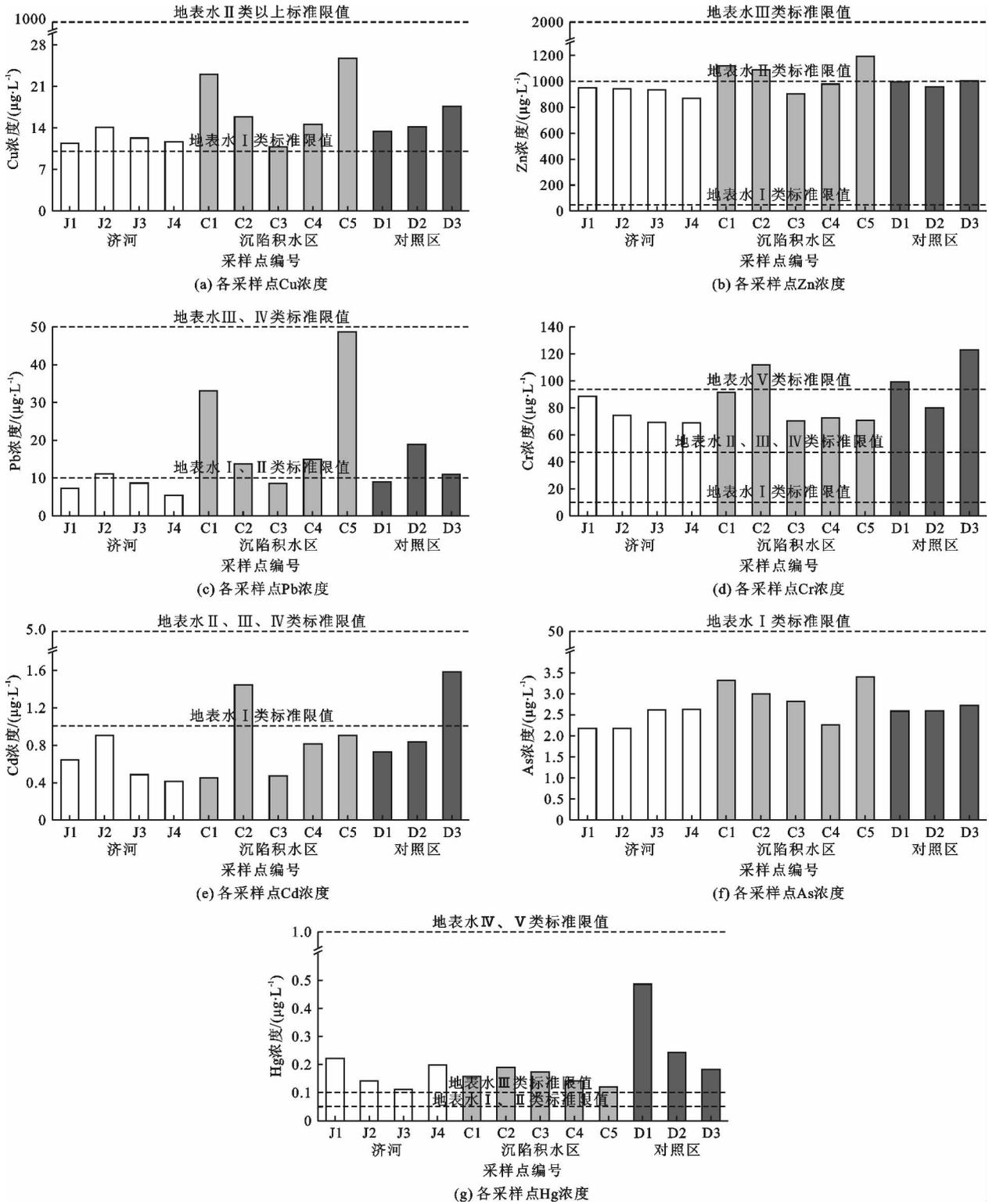


图 3 研究区不同区域各采样点水样的重金属浓度

量均出现在 C5 采样点,说明铁路的交通运输和矸石山堆放为水体重金属的污染来源。而距离沉陷积水区岸边最近的 C3 采样点各种重金属浓度均相对较低,说明水体中的重金属浓度受人类生活污染的影响较小。

3.3 水质评价

由于《地表水环境质量标准 GB 3838—2002》^[29]不包含 ZD、EC、TD、ORP、Chl - a 等指标, *t* 和 pH 在不同水质类别的数值都可相同,同时本研究中测试的 Cr 为总 Cr,所以剔除这些指标后剩余指标参

与水质评价。水环境功能区目标为 III 类。

3.3.1 单因子水质评价 研究区各采样点水质指标单因子评价结果见表 4。由表 4 可知,济河污染最严重的为 Hg,其次为 COD_{Mn} 。按 Hg 浓度评价济河各采样点水质均为 IV 类水,按 COD_{Mn} 浓度评价均为 III 类。根据 X_2 在 III 类水区间内的位置可以判断出该水体在 III 类水中的相对污染程度,数据中 COD_{Mn} 的 X_2 值均大于 7,说明有恶化为 IV 类水的趋

势,当地管理部门应当防控有机物对济河水质的输入影响。沉陷积水区污染最严重的仍然为 Hg,其次为 TP 和 COD_{Mn} 。沉陷积水区 C1、C2 和 C3 采样点水质按 TP 浓度评价均为 IV 类,按 TN 浓度评价均为 II 类,说明沉陷积水区水体富营养化表现为 N 相对 P 限制的特点。王菲菲等^[30]对淀山湖、小兴凯湖和洱海 3 个湖泊的研究发现,淀山湖和小兴凯湖均出现了明显的 N 限制。

表 4 研究区各采样点水质指标单因子评价结果

采样点	DO	TP	TN	NH_4^+	COD_{Mn}	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
J1	1.80	2.70	3.50	2.30	3.70	2.00	2.90	1.00	1.00	1.00	4.11
J2	1.00	2.30	2.80	2.00	3.70	2.00	2.90	3.00	1.00	1.00	4.02
J3	1.30	2.90	3.10	2.60	3.90	2.00	2.90	1.00	1.00	1.00	4.02
J4	1.20	4.31	3.30	3.10	3.90	2.00	2.90	1.00	1.00	1.00	4.11
C1	1.20	4.91	2.30	2.10	3.80	2.00	4.11	3.60	1.00	1.00	4.11
C2	1.00	4.71	2.50	2.40	4.11	2.00	4.11	3.10	2.10	1.00	4.11
C3	1.00	4.51	2.60	2.50	3.90	2.00	2.90	1.00	1.00	1.00	4.11
C4	1.40	2.40	2.60	2.40	3.70	2.00	2.90	3.10	1.00	1.00	4.02
C5	1.00	2.40	2.30	2.30	3.70	2.00	4.21	3.90	1.00	1.00	4.02
D1	1.00	5.52	2.50	2.40	4.11	2.00	2.90	1.00	1.00	1.00	4.41
D2	1.00	5.72	2.70	2.60	4.11	2.00	2.90	3.20	1.00	1.00	4.21
D3	1.00	5.52	2.40	2.50	4.11	2.00	4.01	3.00	2.10	1.00	4.11

3.3.2 综合水质评价 研究区各采样点综合水质标识指数 I_{wq} 见表 5。由表 5 总体来看,济河和沉陷积水区各采样点的 I_{wq} 值均满足地表水 III 类水质的要求,水质良好。济河、沉陷积水区和对照区的 I_{wq} 值表现为济河(2.230) < 沉陷积水区(2.540) < 对照区(2.640)。在济河与沉陷积水区交汇水域的采样点 I_{wq} 值表现为 J3(2.320) < J4(2.550) < C1(2.750) < C2(2.850),说明随着济河与沉陷积水区间坝体的沉陷,济河水体并未对沉陷区水体产生影响。

表 5 研究区各采样点综合水质标识指数 I_{wq}

采样点	综合水质标识指数	采样点	综合水质标识指数
J1	2.320	C5	2.540
J2	2.320	D1	2.530
J3	2.320	D2	2.730
J4	2.550	D3	2.840
C1	2.750	济河	2.230
C2	2.850	沉陷积水区	2.540
C3	2.430	对照区	2.640
C4	2.430		

4 结 论

(1) 济河和采煤沉陷积水区均为弱碱性水体,水质比较澄清,透明度好。济河水域氮含量偏高与济河周边农田的面源污染有关;沉陷积水区重金属含量普遍较高与周边矸石山的淋溶、车辆尾气的排放和地表扬尘沉降等因素有关。

(2) TN 和 NH_4^+ 在 C1、C2、C3 采样点分布表现为距离济河越近则浓度越低,重金属 Cu、Zn、Pb、As 表现为距离济河越近则浓度越高,而重金属 Cr、Cd 和 Hg 没有表现出明显的规律性。

(3) 单因子水质标识指数显示,济河污染最严重的为 Hg,其次为 COD_{Mn} ;沉陷积水区污染最严重的为 Hg,其次为 TP 和 COD_{Mn} 。

综合水质标识指数显示,济河和沉陷积水区水体均满足地表水 III 类水质的要求,水质良好。在济河与沉陷积水区交汇水域各采样点的综合水质标识指数表现为 J3 < J4 < C1 < C2,说明随着济河与沉陷积水区间坝体的沉陷,济河水体并未对沉陷积水区水体产生影响。

参考文献:

- [1] 李凤明. 我国采煤沉陷区治理技术现状及发展趋势[J]. 煤矿开采, 2011, 16(3):8-10.
- [2] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2144-2152.
- [3] 章磊, 易齐涛, 李慧, 等. 两淮矿区小型塌陷湖泊水质特征与水环境容量[J]. 生态学报, 2015, 34(4): 1121-1128.
- [4] 任梦溪. 临涣矿采煤沉陷区地表水环境特征及生态系统健康评价[D]. 合肥:安徽大学, 2016.
- [5] 李如忠, 陈慧, 刘超, 等. 合肥环城公园景观水体水质特征及环境质量评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3):1121-1129.
- [6] LIU Yeye, MAO Dehua. Integrated assessment of water quality characteristics and ecological compensation in the Xiangjiang River, south-central China[J]. Ecological Indicators, 2020, 110:105922.
- [7] HE Jia, WU Xue, ZHANG Ying, et al. Management of water quality targets based on river-lake water quality response relationships for lake basins: A case study of Dianchi Lake[J]. Environmental Research, 2020, 186:109479.
- [8] 胡光伟, 张明, 刘珍, 等. 洞庭湖水质变化及其形成机制分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3):39-45.
- [9] 王春晓, 卢毅敏. 闽江流域水质时间序列变化趋势识别及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 63-69.
- [10] 黄玥, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡水库水位调度对出库水质影响分析与水质预测[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4):78-85.
- [11] 文广超, 刘正疆, 谢洪波, 等. 基于 Landsat 的淮河干流水质监测的可行性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5):37-41.
- [12] 任梦溪, 郑刘根, 程桦, 等. 淮北临涣采煤沉陷区水域水体污染源解析[J]. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(8):680-688.
- [13] 郑刘根, 刘响响, 程桦, 等. 非稳沉采煤沉陷区沉积物-水体界面的氮、磷分布及迁移转化特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1):86-93.
- [14] 刘响响, 程桦, 郑刘根, 等. 淮南采煤沉陷水体中氮磷的分布特征及环境意义[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11):926-932.
- [15] 陈星, 郑刘根, 姜春露, 等. 安徽淮北临涣矿区地表水水化学及硫氢氧同位素组成特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(2):177-185.
- [16] ZHENG Liugen, CHEN Xing, DONG Xianglin, et al. Using $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{SO}_4$ to trace the sources of sulfate in different types of surface water from the Linhuan coal-mining subsidence area of Huaibei, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,181:231-240.
- [17] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 郭劲松, 龙腾锐, 霍国友, 等. 四种水质综合评价方法的比较[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(4):6-12.
- [19] 刘彩虹, 徐力刚, 高海鹰. 河流水质评价方法及其研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2):290-293.
- [20] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):186-192.
- [21] 君珊, 白凯, 李魁, 等. 综合水质标识指数法在海拉尔河水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4):171-176.
- [22] 陆卫军, 张涛. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6):174-176.
- [23] 张欢, 纪桂霞. 综合水质标识指数法在公园湖泊水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2):146-150.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 王国强, 赵华宏, 吴道祥, 等. 两淮矿区煤矸石的卫生填埋与生态恢复[J]. 煤炭学报, 2001, 26(4):428-431.
- [27] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳市区地表灰尘重金属污染分析与评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):169-174.
- [28] 范佳民, 郑刘根, 姜春露, 等. 淮南市城区地表灰尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10):1643-1649.
- [29] 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.
- [30] 王菲菲, 李小平, 程曦, 等. 基于 NEB 试验的不同湖泊夏季营养物投入与藻类响应关系的比较:以淀山湖、小兴凯湖和洱海为例[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1):51-58.