矿井水影响下杨柳街河污染特征及水质评价

常亚婷,张华湘,向 刚,曾壮丹,付明宏

(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队,贵州 都匀 558000)

[摘 要]以都匀市杨柳街河为研究对象,采用取样分析以及水质指数(WQI)与重金属污染评价指数(HEI)等方法对杨柳街河矿井水污染特征进行分析,并对其水质进行评价。研究结果显示,矿井水汇入杨柳街河流后,水体以呈淡黄色、铁锈色等及 PH 值低、SO_4^{2-}、总硬度及 TFe 含量高为主要标志;研究区水质指数(WQI)与重金属污染评价指数(HEI)变化趋势相似,河流源头处水质级别为优、好,矿井水汇入后,水质变为差、不宜饮用,经过一系列治理措施后,水质级别变为好,但是整体水质仍劣于源头处。

[关键词]杨柳街河;矿井水;生态环境;污染特征;水质评价

[中图分类号]P641.4+61;TD12 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2025)03-381-05

0 引 言

煤矿闭坑后产生的矿井水具有呈酸性、重金属含量高等特点,当其汇入河流后,会对生态环境产生较大影响,甚至威胁到人类健康(李小飞,2013;王飞,2025)。杨柳街河发源于麻江县谷硐镇乐埠村一带,全长 21.94 km,水质较好,养育着沿岸世世代代居民。矿井水流入地表河流后,会导致水体 PH 值降低,铁、锰、镉等重金属含量增大(耿雅妮,2012;黄锦勇等,2016;陈彩蝶等,2025),其中,硫酸根变为水体中优势阴离子。闭坑后的矿井水污染具有持续时间长、污染面积广等特点,河流生态系统遭受破坏后,较难修复(王春光等,2021;邢钧策,2024;徐子佳等,2024)。对当地居民生活及生产造成极大困难。因此,研究杨柳街河污染特征,对其水质进行评价,对杨柳街河水质治理有着重要意义。

本次以杨柳街河为研究对象,采用资料收集及现场取样对杨柳街河中污染组分 pH 值、TFe、Mn、SO_4^{2-}、总硬度等进行综合分析,并选取 PH 值、总硬度、SO_4^{2-}、Al^{3+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NO_3^-、Zn^{2+}、K^+ 11 个水体参数进行水质综合评价(孙艳玲 等,2024;朱俊,2025;马京久,2025),再利用重金属污染评价指数(HEI)对杨柳街河矿井水污染特征进行分析,评价结果符合杨柳街河实际情况,可为杨柳街河污染防治提供依据。

1 研究区概况

杨柳街河,位于都匀市北部,属沅江水系支流,为亚热带湿润季风气候区,冬无严寒,夏无酷暑,历年平均降水量 1 445 mm,年平均气温 15.9℃,雨季为 5-9 月份,地形起伏较大,总地势西高东低,北高南低。杨柳街河为研究区内最大地表河流,流经靖道关(高桥)、新寨、杨柳街、马坡、大龙井、至陆家寨与茶园河、摆楠河汇合,汇合后称剑江河,出都匀境内称清水江,至湖南黔城汇

[收稿日期]2024-12-11 [修回日期]2025-07-16

[基金项目]贵州省地矿局地质科学研究项目,贵州省岩溶小流域废弃煤矿污水综合治理方法研究—以都匀市三江堰上游为例(黔地矿科合〔2020〕5 号)资助”

[作者简介]常亚婷(1993—),女,工程师,硕士,长期从事水工环地质勘查工作。E-mail:1713701826@qq.com。

[通讯作者]张华湘(1983—),男,高级工程师,学士,长期从事水工环、项目管理等工作。E-mail:244698969@qq.com。

入灉阳河后称沅江，于洞庭湖汇入长江。杨柳街河主河长 21.94 km，集雨流域面积约 78.29 km^2，多年平均流量 7 056 m^3/h；杨柳街流域矿山开采历史中，主要以煤矿为主，煤矿开采主要分为两个矿区，一是杨柳街井田，包括菠萝冲和张家山煤矿，二是铁冲井田，均位于研究区中下游；虽然煤矿已关停，但是矿井废水直接流入菠萝冲以下的杨柳街河中下游，多年来矿井水对杨柳街河造成严重污染，闭坑矿井水受降雨影响流量波动较大，其中丰水期主井涌水量达 244.08 m^3/h。目前杨柳街河中下游已经进行工程治理，措施主要包括污水处理厂、多级曝气沉淀以及三江堰生态修复等，耗资巨大，治理效果较好。

2 研究方法

2.1 数据采集

对杨柳街河进行河段划分，高桥村以北为上游区域，以南至三江堰为中下游区域。本次采集

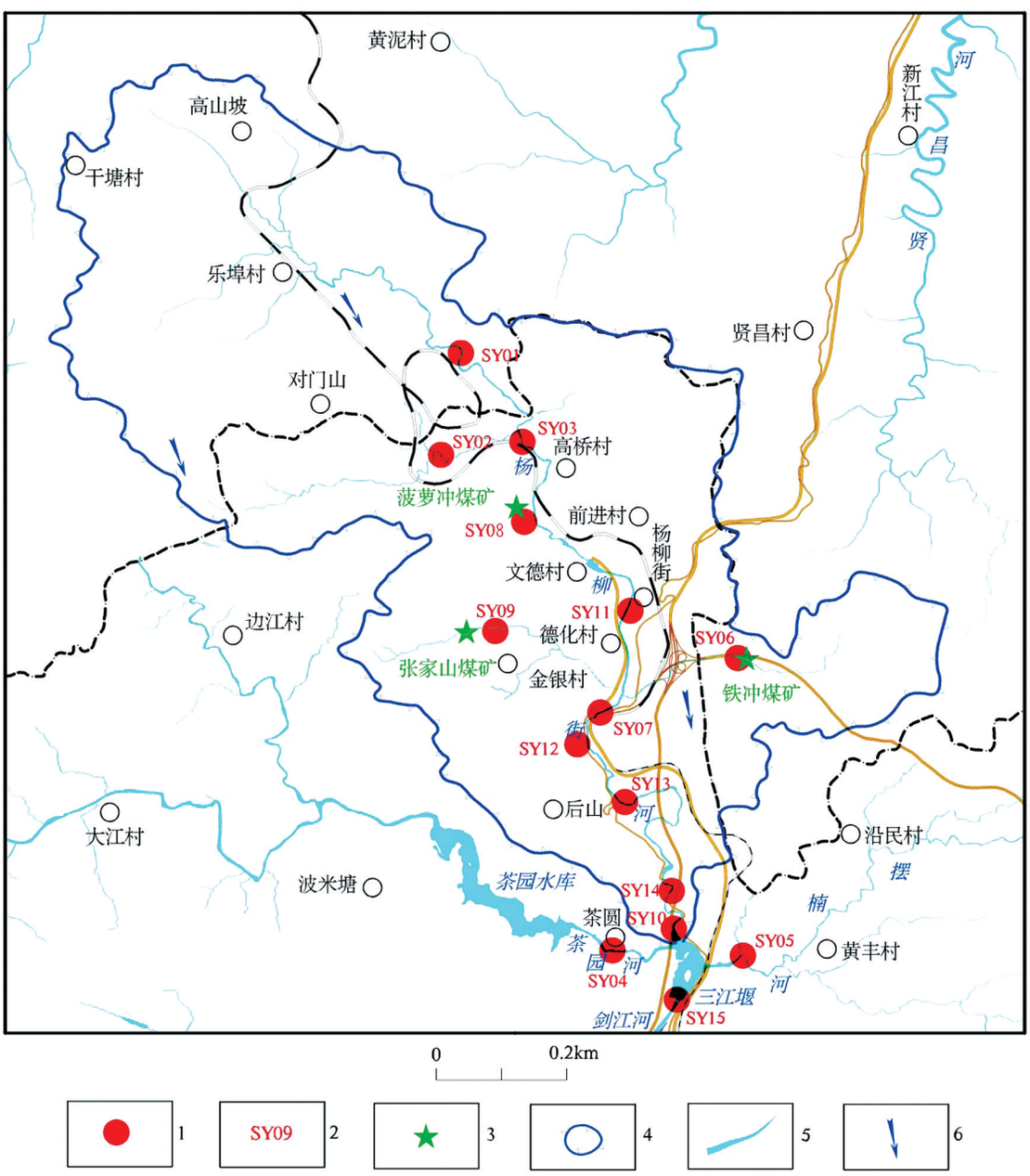

图 1 水样分布图

Fig.1 Distribution map of water sample

1—本次研究水样点；2—水样点编号；3—闭坑煤矿山；4—分水岭；5—河流；6—地下水流向

水样 18 件,收集水样资料 115 件,其中全分析 37 件,简分析 28 件,专项分析 68 件,涵盖年份从 2021 至 2023 年。所有水样均送至有专业资质的检测单位检测,均符合相关要求。对所有水样进行整理分析,共分为 3 个取样地点,①河流源头取样点(SY01-SY05);②污染河段取样点(SY06-SY10);③治理后取样点(SY11-SY15),对三个取样地点各选取 5 个代表性水样数据进行分析(具体采样位置见图 1)。源头处取样点包括上游杨柳街河及下游茶园河与摆楠河;污染河段取样点位于中下游,包括三处井口位置、三个井口汇合处及三江堰前;治理后取样点位于中下游,包括文德坝后、三个井口汇合处及三江堰后。重点分析水体 pH 值、TFe、Mn、SO_4^{2-}、总硬度等组分特征。

2.2　水质指数(WQI)

水质指数(WQI)用以反映水体水质情况(路豪 等,2024)。可将水质情况分为优、好、较差、差、不宜饮用水源五个级别(吴来奇,2025),具体参数见表 1。研究选取 PH 值、总硬度、SO_4^{2-}、Al^{3+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NO_3^-、Zn^{2+}、K^{+11} 个水体参数含量计算水质指数。由于取样点为受矿井水污染水体,因此将 SO_4^{2-}、Fe^{2+}、PH 值权重值赋最大值 5;总硬度、Mn^{2+}、Al^{3+}、含量权重赋值 4;Ca^{2+}、Mg^{2+}含量权重赋值 3;NO_3^-、K^+含量权重赋值 2;Zn^{2+}含量较少,权重赋值为 1,计算公式如下:

表 1　水质指数(WQI)级别

Table 1　Grade of water quality index (WQI)

WQI	WQI≤50	50<WQI≤100	100<WQI≤200	200<WQI≤300	WQI>300
级别	优	好	较差	差	不宜饮用

$$WQI=\sum_{i=1}^{n}W'_i q_i \tag{1}$$

$$W'_i=\frac{W_i}{\sum_{i=1}^{n}W_i} \tag{2}$$

$$q_i=\frac{C_i}{S_i}\times 100 \tag{3}$$

其中,W'_i 为第 i 个水质参数的相对权重,W_i 为第 i 个水质参数的赋值权重,C_i 为第 i 个水质参数的检测值,S_i 为第 i 个水质参数的平均值。各参数值见表 2。

表 2　水质指数计算各参数值

Table 2　Values of each parameters for water quality index calculation

参　数	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差
PH 值	2.87	8.3	7.6	6.91	1.71
总硬度	107	3175.7	250.9	561.37	776.19
SO_4^{2-}(mg/L)	13.49	3000	44.63	448.48	817
Al^{3+}](mg/L)	0.005	104	0.005	11.87	0.005
Mn^{2+}(mg/L)	0.01	7.07	0.04	0.77	1.8
Fe^{2+}(mg/L)	0	340	0	36.88	87.35
Ca^{2+}(mg/L)	20	465.52	83	99.3	86.58
Mg^{2+}(mg/L)	13.2	165.4	46.5	57.44	35.41
NO_3^-(mg/L)	0.36	5.14	1.95	2.07	0.98
Zn^{2+}(mg/L)	0	0.544	0.004	0.06	0.15
K^+(mg/L)	0.55	19.3	2.4	3.2	3.4

2.3　重金属污染评价指数(HEI)

重金属污染评价指数(HEI)用以评价水体重金属污染程度(姜燕松 等,2013),主要是通过重金属理想浓度与实测浓度比值计算而得,可将其分为低等、中等及高等三种污染程度(范丽萍,2025),具体见表 3。本文选取 Fe、Mn、Al、Cd 进行重金属污染评价,重金属理想浓度以河流上游背景值为准(背景值取其平均值)。

$$HEI=\sum_{j=1}^{m}\frac{P_j}{M_j} \tag{4}$$

式中:M_j 为重金属 j 在水体中的理想浓度,P_j 为重金属 j 在水体中的实测浓度。

表 3　重金属污染评价指数(HEI)污染程度分级

Table 3　Pollution degree classification of heavy metal pollution assessment index (HEI)

HEI	HEI<40	40≤HEI≤80	HEI>80
污染程度	低等	中等	高等

3　数据分析

3.1　水体物理化学特征

本次通过对 3 处取样点检测结果进行整理归纳,河流源头及三江堰后水体清澈透明,PH 值 7.21～8.3;TFe 和 Mn^{2-} 的含量均为最低标准,SO_4^{2-}含量 13.69～154.67mg/L,总硬度 144.13～295.99;由表 4 可以看出,虽然治理后水体总硬度及 SO_4^{2-} 含量总体高于源头处,但均达到饮用水标准。

表 4 各取样点重金属污染指数

Table 4 Heavy metal pollution index of each sampling point

重金属	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	HEI
SY01	0. 03	0. 004	0. 008	0. 001	0. 06
SY02	0. 03	0. 004	0. 008	0. 001	0. 06
SY03	0. 03	0. 004	0. 008	0. 001	0. 06
SY04	0. 03	0. 004	0. 008	0. 001	0. 06
SY05	0. 03	0. 004	0. 008	0. 001	0. 06
SY06	117. 1	7. 07	2. 1	0. 019	1830
SY07	8	0. 211	72	0. 001	1162
SY08	72. 3	1. 565	171	0. 002	3548
SY09	340	2. 239	104	0. 002	6467
SY10	15. 2	0. 12	28. 6	0. 001	636
SY11	0. 03	0. 004	1. 6	0. 001	23
SY12	0. 03	0. 004	0. 54	0. 001	8. 3
SY13	0. 03	0. 004	0. 102	0. 001	1. 9
SY14	0. 03	0. 004	0. 086	0. 001	1. 7
SY15	0. 03	0. 004	0. 036	0. 001	0. 7
背景值	0. 03	0. 004	0. 034	0. 001	0. 06

表 5 各取样点特征污染组分值

Table 5 Characteristic pollutant component values of each sampling point

特征组分	PH 值	TFe (mg/L)	Mn^{2-} (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	总硬度 (mg/L)
SY01	7. 21	0. 03	0. 004	13. 65	144. 13
SY02	7. 64	0. 03	0. 004	13. 49	151. 25
SY03	8. 26	0. 03	0. 004	15. 86	222. 43
SY04	8. 30	0. 03	0. 004	13. 82	231. 33
SY05	8. 13	0. 03	0. 004	26. 52	185. 06
SY06	5. 58	117. 1	7. 07	1 619. 85	1 167. 15
SY07	7. 26	8	0. 211	300	377. 26
SY08	2. 87	72. 3	1. 565	1 100	1256. 15
SY09	2. 94	340	2. 239	3 000	3175. 67
SY10	6. 76	15. 2	0. 12	240	360. 55
SY11	7. 26	0. 03	0. 004	32. 03	224. 66
SY12	7. 68	0. 03	0. 004	154. 67	295. 99
SY13	8. 21	0. 03	0. 004	14. 17	106. 98
SY14	7. 92	0. 03	0. 004	138. 53	271. 06
SY15	7. 60	0. 03	0. 004	44. 63	250. 90

污染河段样品检测结果显示水体以呈淡黄色、铁锈色等及 PH 值低、SO_4^{2-}、总硬度及 TFe 含量高为主要标志。PH 值 2. 87 ～ 7. 26，有 4 个水样 PH 呈酸性，越接近污染源头 PH 值越低；TFe 值高达 340 mg/L，Mn^{2-} 的含量可达 7. 07 mg/L，SO_4^{2-}和总硬度均有质的增长，均达到 3000 mg/L 以上，各污染组分以闭坑煤矿井口处为最大，向外逐渐降低。

3. 2 水质综合评价

本次采用水质评价指数(WQI)与重金属污染评价指数(HEI)对杨柳街河水体水质进行评价分析。结果见图 2。

WQI 变化与水质呈正比关系，杨柳街河流源头取样点的 WQI 值在 38. 54 ～ 75. 87 之间，平均值为 51. 58，水质级别为优-好；污染河段取样点 WQI 在 422. 65 ～ 678. 14 之间，平均值为 570. 51，水质级别为不宜饮用，其中 SY06、SY08、SY09 取样位置为闭坑煤矿井口，因此 WQI 值较高。从 SY11 开始 WQI 值明显下降，治理后河段取样 WQI 值 84. 25 ～ 257. 84 之间，平均值 143. 62，水质级别为较差-好，SY11 和 SY12 取样点靠近井口因此水质较差。从 WQI 的整个变化曲线来看，矿井水汇入后水质明显恶化，经过相关治理措施及水体自净后，水质逐渐恢复。WQI 也经历了从优、好-不适宜饮用-较差、好这个过程，但是整体水质仍劣于源头处。

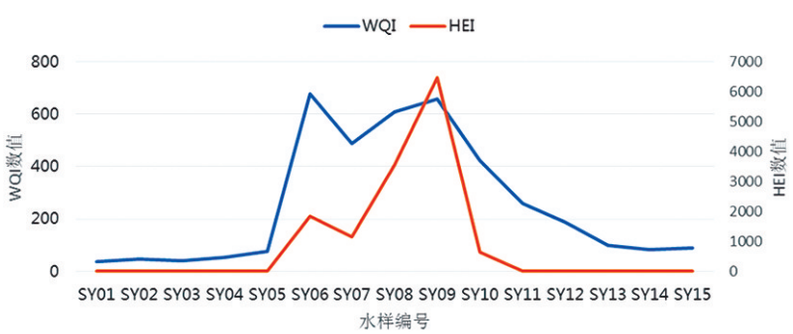

图 2 杨柳街河 WQI、HEI 变化曲线

Fig. 2 WQI and HEI variation curves of Yangliujie river

HEI 变化与 WQI 变化趋势相似。矿井水汇入后，河流的 HEI 值升高，也就是说，闭坑矿井水汇入杨柳街河后，水质变差，重金属污染程度远高

于源头处,经过一系列治理措施以及其他河流汇入后地表水体污染程度减轻,但整体水质仍劣于源头处。

4　结果与讨论

杨柳街河从中下游段起遭受废弃矿井废水污染。通过对其进行水样分析,水体呈现 PH 值低、水质浑浊、SO_4^{2-}、TFe、Mn、总硬度、SO_4^{2-}含量有质的提高,在经过一系列治理措施后,河流污染状态明显改善;此外,利用水质指数(WQI)及重金属污染评价指数(HEI)对杨柳街河水质情况进行分析评价,源头处水质级别为优、好,矿井水汇入后杨柳街河水质整体恶化,水质级别为差,经过治理后水质变为较好、好,但是整体水质劣于源头处。

本研究采用数据采集、水质评价(WQI)及重金属污染评价指数(HEI)对杨柳街河污染特征进行了综合分析,分析结果与实际情况相符合,但是评价方法的精度仍有提升的空间,对此,可结合其他评价方法,例如重金属污染评价指数(HEI)与重金属污染指数(HPI)相结合等。

[参考文献]

陈彩蝶,王宇,卞建民,等. 2025. 灌排洗盐条件下吉林西部灌区地下水水质演变特征分析[J]. 人民黄河,47(04):112-119.

范丽萍. 2025. 某工业区地下水重金属污染监测和评估[J]. 山西化工,45(01):259-261.

耿雅妮. 2012. 河流重金属污染研究进展[J]. 中国农学通报,28(11):262-265.

黄锦勇,覃铭,马文英,等. 2013. 受酸性矿山废水影响河流悬浮物中重金属污染特征分析与生态风险评价[J]. 环境化学,25(11):2315-2326.

姜燕松,李忠武,黄金权,等. 2013. 基于标识指数与敏感性分析的洞庭湖滨湖区地下水重金属污染评价[J]. 环境科学研究,26(7):736-742.

李小飞,陈志彪,张永贺,等. 2013. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报,33(3):835-843.

路豪,刘埔,王靖怡,等. 2024. 闭坑矿井水影响下喀斯特河流污染特征演化及水质评价[J]. 人民黄河,46(06):90-95+102.

马京久. 2025 基于不同水质评价方法的长江安庆段水质评价[J]. 陕西水利,(04):86-88.

孙艳玲,高博,马力,等. 2024. 基于主成分分析的多种水质评价方法综合研究——以伊通河中游浅层地下水为例[J]. 地质与资源,33(06):813-821.

王春光,刘军省,耿浩,等. 2021. 铜陵矿区主要河流水质分析与污染评价[J]. 地学前缘,28(4):175-183.

吴来奇. 2025. CCME WQI 在石门水库(陕)水质评价中的应用[J]. 陕西水利,(04):83-85.

王飞. 2025. 凤凰山矿关井后矿井水对周边矿井影响研究[J]. 陕西煤炭,44(01):99-103.

徐子佳,周峰,曾强,等. 2024. 湖北长江新螺段水化学特征及水质评价[J]. 资源环境与工程,38(06):681-690.

邢钧策. 2024. 基于标识指数方法的辽河流域水质综合评价及污染源解析[J]. 水利技术监督,(12):172-175.

朱俊,魏兴. 2025. 三峡库区典型地区浅层地下水特征及水质评价[J]. 地下水,47(01):1-5+76.

Pollution Characteristics and Water Quality Evaluation of Yangliujie River under the Influence of Mine Water

CHANG Ya-ting, ZHANG Hua-xiang, XIANG Gang, ZENG Mu-dan, FU Ming-hong

(*No.* 104 *Geological Party*, *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources Development*, *Duyun* 558000, *Guizhou*, *China*)

[**Abstract**] In this paper, Taking the Yangliujie river in Duyun city is taken as an example, it uses sampling analysis and water quality index (WQI) along with heavy metal pollution assessment index (HEI) to analyze the characteristics of mine water pollution in the Yangliujie river and evaluate its water quality. The results show that after mine water enters the Yangliujie river, the water body is primarily marked by its light yellow or rust color, low pH, high SO_4^{2-}, total hardness, and TFe content; the changing tendency of the water quality index (WQI) and the heavy metal pollution evaluation index (HEI) is similar, the water quality at the river source is excellent and good. After the mine water inflow, the water quality becomes poor and unsuitable for drinking. After a series of treatment measures, the water quality level becomes good, but the overall water quality is still inferior to the source.

[**Key Words**] Yangliujie river; Mine water; Ecological environment; Pollution characteristics; Water quality evaluation