

doi: 10.12029/gc20230217001

焦华喆, 陈曦, 张铁岗, 杨柳华, 陈新明, Honaker Rick, 马俊伟, 余洋. 2024. 黄河流域煤炭开发区地下水污染成因分析及防治建议[J]. 中国地质, 51(1): 143-156.

Jiao Huazhe, Chen Xi, Zhang Tiegang, Yang Liuhua, Chen Xinming, Honaker Rick, Ma Junwei, Yu Yang. 2024. Cause analysis of groundwater pollution in coal development zone of Yellow River Basin and prevention suggestions[J]. Geology in China, 51(1): 143-156(in Chinese with English abstract).

## 黄河流域煤炭开发区地下水污染成因分析及防治建议

焦华喆<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 张铁岗<sup>2</sup>, 杨柳华<sup>1,3</sup>, 陈新明<sup>3</sup>,

HONAKER Rick<sup>4</sup>, 马俊伟<sup>5</sup>, 余洋<sup>6,7</sup>

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 4. Mining Engineering Faculty, University of Kentucky, Massachusetts Lexington 40506, America; 5. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041; 6. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 7. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**【研究目的】黄河流域内由于煤炭资源开发导致地下水污染严重, 从整体角度对流域内重点煤炭开发区地下水进行归纳总结, 为其可持续健康发展和地下水资源改善提供防治建议。【研究方法】从黄河流域战略地位出发, 对地下水污染成因和污染模式进行归纳总结。采用改进后的综合水质指数法对流域内九大煤炭基地的地下水进行水质评价。选用主成分分析法赋权指标, 并引入改进的内梅罗污染指数法, 按照 WPI 分级法进行评价。

【研究结果】通过对黄河流域各重点断面水质评价, 得到目前流域内煤炭基地水质结果中Ⅲ、Ⅳ类占比较多, 水质较差。分析成因当前流域内存在高矿化度矿井水、酸性矿井水和含特殊组分矿井水污染, 同时阐述污染地下水形成的浅层和深层两种污染模式。【结论】对 3 种矿井水采用相应防治方法, 并提出膏体充填技术和微生物修复技术 2 种防治技术建议, 通过应用实际矿山为例, 印证污染防治技术能够改善由煤炭开采引发的流域内地下水污染严重的问题, 以期研究结果能够对成功推动中国绿色矿山的快速发展具有参考意义。

**关键词:** 地下水; 煤炭开采; 水质评价; 水文地质调查工程; 矿产勘查工程; 黄河流域

**创新点:** (1)整体梳理黄河流域内因煤矿开采而引起的地下水污染现状; (2)改进综合水质指数法对流域内煤炭基地地下水进行评价; (3)结合煤炭基地分析地下水污染成因和污染模式, 并提出相应技术建议。

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0143-14

## Cause analysis of groundwater pollution in coal development zone of Yellow River Basin and prevention suggestions

JIAO Huazhe<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, ZHANG Tiegang<sup>2</sup>, YANG Liuhua<sup>1,3</sup>, CHEN Xinming<sup>3</sup>,

收稿日期: 2023-02-17; 改回日期: 2023-04-02

基金项目: 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室开放基金(MEER-2022-09)与中国博士后科学基金(2022T150195)联合资助。

作者简介: 焦华喆, 男, 1985 年生, 副教授, 主要从事矿山固废利用及其环境效应方面的教学和研究工作; E-mail: jiaohuazhe@126.com。

通讯作者: 陈曦, 女, 1999 年生, 硕士生, 主要从事矿山固废资源化利用及其环境效应方面的研究; E-mail: chenxi19991107@163.com。

HONAKER Rick<sup>4</sup>, MA Junwei<sup>5</sup>, YU Yang<sup>6,7</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-Efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, Henan, China; 4. Mining Engineering Faculty, University of Kentucky, Lexington 40506, Massachusetts, America; 5. Zhengzhou Nonferrous Metals Research Institute Limited Company of CHINALCO, Zhengzhou 450041, Henan, China; 6. China Academy of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 7. Key Laboratory of Mine Ecological Effect and System Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

**[Objective]** The development of coal resources in the Yellow River Basin has led to serious groundwater pollution. This paper summarizes the situation from the overall perspective of the basin, providing prevention and control suggestions for its sustainable and healthy development and reasonable protection of groundwater resources. **[Methods]** Starting from the strategic position of the Yellow River basin, the causes and patterns of pollution are summarized. The improved comprehensive water quality index method was used to evaluate the groundwater quality of nine major coal bases in the basin. The weighted indicators were selected using principal component analysis, and the improved Nemer pollution index method was introduced. The evaluation was conducted according to the WPI classification method. **[Results]** The research shows that through the water quality evaluation of various key sections of the Yellow River basin, it is found that the water quality results of coal bases in the basin currently account for more Class III and Class IV, with poor water quality. Currently, the pollution of highly mineralized mine water, acidic mine water, and mine water containing special components in the drainage basin is relatively large. The causes of pollution are analyzed, and the shallow and deep pollution modes of polluted groundwater are described. **[Conclusions]** We adopt corresponding prevention and control methods for three types of mine water, and propose two prevention and control technologies, paste filling technology and microbial remediation technology. Through the application of actual mines as examples, it is confirmed that pollution prevention and control technology can improve the serious problem of groundwater pollution in river basins caused by coal mining, with the hope that the research results can have reference significance for successfully promoting the rapid development of green mines in China.

**Key words:** groundwater; coal mining; water quality assessment; hydrogeological survey engineering; mineral exploration engineering; Yellow River Basin

**Highlights:** (1) The current situation of groundwater pollution caused by coal mining in the Yellow River basin was overall sorted out; (2) The comprehensive water quality index method to evaluate groundwater of coal bases in the basin was improved; (3) The causes and patterns of groundwater pollution combined with coal bases, and propose corresponding technical recommendations was analyzed.

**About the first author:** JIAO Huazhe, male, born in 1985, associate professor, mainly engaged in teaching and research on the utilization of solid waste and its environmental effects in mines; E-mail: [jiaohuazhe@126.com](mailto:jiaohuazhe@126.com).

**About the corresponding author:** CHEN Xi, female, born in 1999, master candidate, mainly engaged in research on the resource utilization of solid waste and its environmental effects in mines; E-mail: [chenxi19991107@163.com](mailto:chenxi19991107@163.com).

**Fund support:** Supported by the projects of Open Fund of the Key Laboratory of Mine Ecological Effects and System Restoration of the Ministry of Natural Resources (No.MEER-2022-09), China Postdoctoral Science Foundation (No.2022T150195).

## 1 引 言

黄河是中华民族的母亲河,黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略。新中国成立之后,党和国家都把治理黄河这项工作列为一项治国兴邦的大事来抓,毛泽东同志在视察黄河时便发出“要把黄河的事情办好”的伟大号召。党的十八大以来,习近平同志多次对黄河流域生态环境和发展

情况进行实地考察,明确了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路,开展了一系列的黄河流域治理工作(习近平,2019)。黄河流域内40%以上的流域面积都蕴藏着煤炭资源,流域内煤炭资源储量占全国六成以上,是中国最大的富煤区(卞正富等,2021)。全国14个大型煤炭基地中,有9个位于黄河流域(图1),流域内煤炭生产能力居全国首位,是重要的煤生产加工区和煤产品转换区(张



图 1 黄河流域煤炭基地分布图

Fig.1 Distribution map of coal bases in the Yellow River Basin

会军, 2021; 顾晋怡等, 2022; 金凤君等, 2022)。

为确保国家能源供给充足和推动沿线产煤省区发展, 多年来流域依靠过度开采的高强度经济发展模式, 流域内生态环境问题突出, 治理存在许多不足, 煤矿开采对生态环境造成了严重影响如水资源短缺(彭苏萍和毕银丽, 2020; 刘秀丽等, 2022)、气候整体暖干化(王尧等, 2021)、原生地貌和地表植被破坏(田惠文等, 2020)等, 特别是地下水方面如破坏地下水系统(顾大钊, 2015; 田华等, 2021)、地下水分布差异大(马涛等, 2023)、形成地下水降落漏斗(柳宁等, 2019)等。针对煤炭开采后引起的地下水污染组分及成因问题, 现有研究学者已经开展了大量的工作。韩双宝等(2021)调查发现现今黄河流域地下水质量以 I—IV 类为主; 张亚宁等(2023)以陕北矿区为研究对象、申豪勇等(2022)对黄河支流汾河流域研究均得出重金属污染离子浓度超标; 赵晓光等(2021)采集黄河中游榆神府矿区矿井水样进行检测、范立民等(2023)对地下水水化学特征分析得到水质中总硬度和硫酸盐严重超标; 在黄河中游陕北榆林地区, 董震雨和王双明(2017)定量识别和定性分析煤炭开采对地下水资源的破坏影响、冯立等(2023)剖析了榆林煤矿区生态问题现状及生态修复工作面临问题及原因并提出了创新治理模式、张海琴等(2023)以神东矿区为对象研究了矿井水浸出规律都表明了煤炭开采导致地下水中氟化物超标等等。这些污染组分及成因导致煤炭开采而引起的地下水污染愈发严重。

关于黄河流域煤炭开采导致地下水污染严重的问题, 许多专家学者都做了丰富且深入的工作。本文以整个黄河流域煤矿开采所产生的水污染问题作为研究对象, 将现有研究学者对流域内各煤

地下水污染原因进行归纳总结。采用改进后的综合水质指数法对流域内 9 大煤炭基地的地下水进行水质评价。选用主成分分析法赋权指标, 并引入改进的内梅罗污染指数法, 按照 WPI 分级法进行评价。深入分析当前流域内重点煤炭基地的地下水污染成因及污染模式, 提出相应防治技术及建议, 以为黄河流域可持续健康发展和实现水资源持续利用提供科学依据。

## 2 研究区概况

黄河是中华民族的母亲河, 起源于青藏高原, 经过青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东 9 个省份, 穿越黄土高原和华北平原, 最终经过山东省垦利县后汇入渤海。由北向南黄河流域可分为 3 个气候区, 分别为干旱、半干旱和半湿润, 且流域内大部分地区位于干旱和半干旱地区。年平均气温 9.5℃, 流域降水量 466.5 mm, 蒸散量 653.6 mm。黄河流域地域广阔, 流域面积大, 不同地理特征对于流域内气候、自然景观和水资源的形成和演变起着关键作用, 使得流域内水文地质条件十分复杂(图 2)。划分地下水系统能够对黄河流域地下水资源做出精准评价, 根据水文地质条件按照黄河上、中、下游地区做出条理化阐述。

黄河上游从河源到内蒙古托克托县河口镇, 以山地为主和少数丘陵区。青藏高原主要类型为松散岩类的孔隙水、碎屑岩类的裂隙水和山地基岩的裂隙水, 并含有多年冻结层地下水; 兰州—石嘴山地下水以第四系孔隙水类型为主, 地下水通过侧向径流补给, 排泄量很少, 通常以蒸发作用为主, 部分地区土壤盐渍化程度高, 地下水矿化程度高, 地区缺水严重。上游受新构造运动控制, 干流阶地多呈基座性质, 不利于地下水赋存。

中上游流经鄂尔多斯高原和河套平原。高原地区砂岩中地下水赋存丰富, 裂隙水、孔隙水含量较多; 平原赋存大量基岩裂隙水, 整个地区发育有广泛的第四系孔隙水, 地下水类型由山前  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型逐渐过渡到平原区的  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Mg 型和  $\text{SO}_4^-$ -Ca-Mg 型, 矿化度逐渐升高, 土壤盐渍化严重。

中游流经吕梁山西麓、汾河流域、沁河、黄土高原和山西岩溶丘陵, 从河口镇到河南郑州桃花峪。吕梁山西麓含水层以寒武系和奥陶系石灰岩

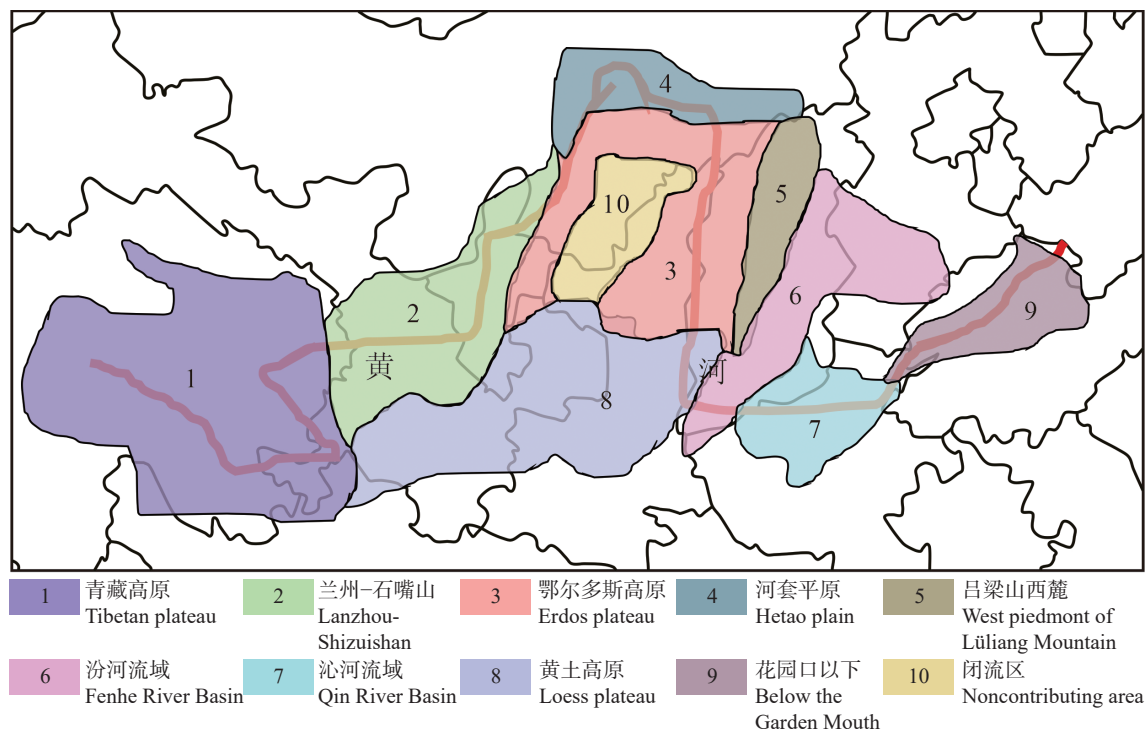


图2 黄河流域水文地质图

Fig.2 Hydrogeological map of the Yellow River Basin

以及白云质灰岩为主,赋存大量裂隙岩溶水,主要以泉的形式向河谷排泄,是黄河的主要补给来源。汾河流域赋存大量下古生界碳酸盐岩类的岩溶水,以及中生界和上古生界的基岩裂隙水,并且含有丰富的冲洪积扇孔隙水,两处地下水化学类型主要是 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化程度低。沁河含水层岩性是古生代碳酸盐岩和碎屑岩,赋存大量松散岩类孔隙水、冲红积平原孔隙水、构造裂隙水。高原主要含水层岩性是第四系松散沉积物,赋存大量松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水以及碳酸盐岩类岩溶裂隙水。中游黄土分布区是流域内地下水最贫乏地区,

水量少,水质较差不利于饮用。

下游为平原区从桃花峪到渤海湾入海口。赋存丰富的孔隙水和岩溶裂隙水,河漫滩地区地下水补给量大,水质较好,有利于开采利用,而黄河三角洲地区由于黄河多次改道,沉积物颗粒较细且结构复杂,地下水通常以蒸发作用为主进行排泄。下游分布区由大气降水和地表水补给,以孔隙潜水形式存在,含水层厚度大,水位埋藏浅,水量丰富。

总的来说,黄河流域地下水分布不均衡(地下水类型如表1所示),水质变化较大,特别是煤炭资源的肆意开采更局部恶化了流域内水文地质条件,大

表1 黄河流域主要地下水类型及基本信息

Table 1 Main groundwater types and basic information in the Yellow River Basin

地下水分区名称	主要地下水类型	地下水分布面积/ $\text{km}^2$	地下水资源量/ $\text{亿m}^3$	地下水中心水位埋深/m	地下水位变化
上游					
青藏高原	孔隙水、多年冻结层水、裂隙水	219572.5	58.00	12.59	上升
兰州—石嘴山	第四系孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙水	72915.1	12.72	118.2	上升
鄂尔多斯高原(中上游)	砂岩裂隙水、孔隙水	161315.7	27.30	67.05	基本稳定
河套平原(中上游)	第四系孔隙水	58277.9	25.84	14.30	上升
中游					
吕梁山西麓	裂隙岩溶水	38759.6	8.90	9.80	基本稳定
汾河流域	岩溶水、基岩裂隙水	45606.3	33.59	16.45	下降
沁河流域	冲洪积扇孔隙水、风化裂隙水、构造裂隙水	46868.6	13.14	4.40	下降
黄土高原	松散层孔隙水、碎屑岩裂隙水、岩溶裂隙水	136976.3	47.82	139.50	下降
下游					
花园口以下	冲积平原孔隙水、岩溶裂隙水	39666.6	24.32	4.25	下降

面积地下水位下降形成漏斗和区域水位抬高同时存在,加重了水资源的供需矛盾和恶化严重,并使部分含水层降低或失去供水价值。但总体来看,含水层潜力尚未完全发挥。

### 3 研究区地下水污染分析

#### 3.1 研究区矿井水污染

##### 3.1.1 高矿化度矿井水

高矿化度矿井水是指水中矿化度达到 1000~4000 mg/L,甚至 40000 mg/L;呈中性或弱碱性,以阳离子  $\text{Ca}^{2+}$ 和阴离子  $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,易结垢、硬度高。黄河流域内的宁东基地、神东基地、黄陇基地和河南基地等均分布有高矿化度矿井水,以神东矿区活鸡兔矿矿井水为例(寇雅芳等,2011)对高矿化度矿井水进行成因分析。神东矿区降水为具有超强溶蚀性的重碳酸水,碳酸盐类含量较高,水质类型为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型,含有丰富的氧气和二氧化碳。在砂层中,降水会溶蚀碳酸盐类矿物;在基岩中,水中  $\text{Ca}^{2+}$ 会吸附在岩石裂隙面从而置换其中的  $\text{Na}^+$ 。由于流动性差使得降水会长期溶蚀,最终导致裂隙水溶解盐类含量明显增高,水中矿化度增高。水质分析结果见表 2。

##### 3.1.2 酸性矿井水

酸性矿井水是指 pH 值小于 6 的矿井水,范围在 2~4,含有  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 和  $\text{Mn}^{2+}$ 等离子。其中高硫是指水中含有的  $\text{SO}_4^{2-}$ 离子浓度过高,从而导致矿化度和硬度也随之增高。酸性矿井水在黄河流域神东基地、晋北基地、晋中基地和晋东基地普遍存在,选择山西阳泉市娘子关(孙红福等,2007;唐春雷等,2022)作为研究区域分析矿井水酸性成因,其水质

分析结果见表 3。研究区集露天矿、现采矿和闭坑矿,矿井正常生产时矿井水被抽排到地表,关停后矿井水停止抽排导致采空区积水严重。强降雨后会造采空区水位持续上升,进而沿导水管与上覆含水层水力沟通,最终导致地下水被污染。

##### 3.1.3 含特殊组分矿井水

如高氟矿井水、重金属矿井水等,此类含有微量元素或放射性元素等毒害类污染物的矿井水称为含特殊组分矿井水。《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)规定当氟浓度超过 1.0 mg/L 时成为高氟水,目前高氟矿井水主要分布在黄河流域神东基地(表 4)的内蒙古河套平原和黄陇基地的陕西榆林等地(王甜甜等,2022;杨思敏等,2023)。以神东矿区萨拉乌苏为例(郝春明等,2021),研究区地下水动力低,径流条件差,流动进程缓慢,导致  $\text{F}^-$ 不断浓缩富集。研究区内水样 pH 范围为 7.55~10.87 均属于弱碱性水,离子浓度以阳离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和阴离子  $\text{HCO}_3^-$ 为主,其中水化学类型包括  $\text{Cl-Na}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl-Na}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ -Na、 $\text{HCO}_3^-$ · $\text{SO}_4$ -Na 和  $\text{HCO}_3^-$ -Na-Ca 五种。重金属矿井水(陈森和吴永贵,2012)同时也常伴有酸性矿井水,因为大多数重金属元素如 Mn、Cd、Cu 和 Pb 等溶于酸性条件,从而导致重金属浓度超标。黄河流域内重金属矿井水常分布在神东基地(王甜甜等,2021),以神东基地大柳塔煤矿区为例(蒋斌斌等,2020),区域内重金属质量浓度 Sb 为 0.20 mg/L,Fe 为 5.67 mg/L,Cr 为 0.01 mg/L,Cu 为 0.01 mg/L,Mn 为 0.24 mg/L,Zn 为 0.01 mg/L。矿区内重金属元素通过水、煤和岩体三者之间相互作用进入到地下水中,从而形成含重金属矿井水。

表 2 神东矿区活鸡兔矿矿井水质分析结果 (mg/L)

Table 2 Water quality analysis results of Huojitutu Mine in Shendong Mining Area (mg/L)

煤炭基地名称	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$ + $\text{Na}^+$	矿化度
神东矿区活鸡兔矿	57	162	287	651	164	37	295	1653

表 3 山西阳泉市娘子关矿井水质分析结果 (mg/L)

Table 3 Water quality analysis results of Niangziguan Mine in Yangquan City, Shanxi Province (mg/L)

煤炭基地名称	pH	Fe	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$ + $\text{Na}^+$
山西阳泉市娘子关	2.99	0.815	362.9	187.6	931.8	164	77.2	410.8

表 4 含特殊组分矿井水质分析结果 (mg/L)

Table 4 Water quality analysis results of mine water quality with special components (mg/L)

煤炭基地名称	pH	$\text{F}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$ + $\text{Na}^+$
神东基地萨拉乌苏	7.97	5.01	798.21	199.06	284.52	16.64	7.13	535.25
神东基地大柳塔煤矿区	8.22	0.13	1.68	310	310	85	78	301

### 3.2 研究区污染模式

#### 3.2.1 浅层地下水污染模式

##### (1) 地表塌陷形成污染

黄河中下游地区如汾河流域、沁河流域等地, 地下水位很低, 煤矿开采后会形成部分采空区, 导致地表下沉形成较大滞水面。受外部污染源影响, 沉降水水质会发生恶化, 对周围浅层地下水造成污染, 同时污染物也会通过地表下沉后产生的裂缝渗流到含水层, 对地下水产生污染。

##### (2) 地表堆积物淋溶形成污染

矿山关闭后, 矿区内残留的垃圾填埋场和粉煤灰堆放场在降雨淋溶作用下渗出, 随着降雨后地下水水位变化, 各种污染物进入浅层地下水形成污染(图3)。

#### 3.2.2 深层地下水污染模式

深层地下水污染是指在开采过程中初始含水层收到污染后, 从而形成串联污染模式(图4, 杜明泽等, 2020)。矿山开采过程中会破坏上覆岩体, 从而导致导水裂隙带的产生。开采过程中地下水排泄时, 会产生矿井进水口。当煤矿关闭停止排水后, 水位发生反弹回到初始水平面。此时矿井内的污染物会随着地下水运动造成上覆含水层的级联污染, 甚至污染第四系松散含水层; 煤矿开采时会导致底板内的岩体破坏从而产生裂隙, 当底板含水层水位低于回弹水位时, 矿井水会污染底板含水层。黄河中下游河南、山东两矿区的煤层下存在着岩溶含水层, 对矿区起到重要的充水作用。煤矿关闭后, 水位反弹到含水层之上造成污染, 如黄河流

域鲁西煤炭基地的山东省淄博市红山寨里煤矿; 在煤矿勘察、开采和生产阶段, 都需要进行大量钻探工作。其中有一些钻孔的密封性较差, 会使不同的含水层之间可以相互联系, 采矿过程中产生的污染物便可通过这些密封性较差的钻孔进入含水层, 对矿井地下水产生污染和破坏; 在煤矿开采过程中, 形成断层或陷落柱是一条十分重要的通道, 当煤矿关闭后会导致矿井中地下水位回弹, 这些开采过程中产生的污染物便会通过水位回弹, 导致地下水遭到严重破坏。

## 4 研究区地下水污染评价

### 4.1 地下水化学特征

依据《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020)、《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)和《煤矿矿井水分类标准》(GB/T 19223-2015)等, 在4项标准规范中, pH范围在6~9、 $TDS \leq 1000$ 、 $SO_4^{2-} \leq 250$ 、 $F \leq 1.0$ 、 $Fe \leq 0.3$ 、 $Mn \leq 0.1$ 。需对黄河流域研究区采样时选取采样密度为1.3眼井/100 km<sup>2</sup>, 选定9个煤炭基地中的地下水水样, 主要超标因子为pH、TDS、 $SO_4^{2-}$ 、F、Fe、Mn等, 结果见表5。

对目前黄河流域9大煤炭基地地下水化学特征现状进行收集整理, 发现宁东煤炭基地TDS、 $SO_4^{2-}$ 、Fe和Mn存在严重超标; 神东煤炭基地地下水超标相对较少, TDS、F、Fe和Mn存在少量超标; 晋北、晋中和晋东煤炭基地地下水超标情况不严重, 但TDS、 $SO_4^{2-}$ 、F、Fe和Mn等5项因子均存在超标现

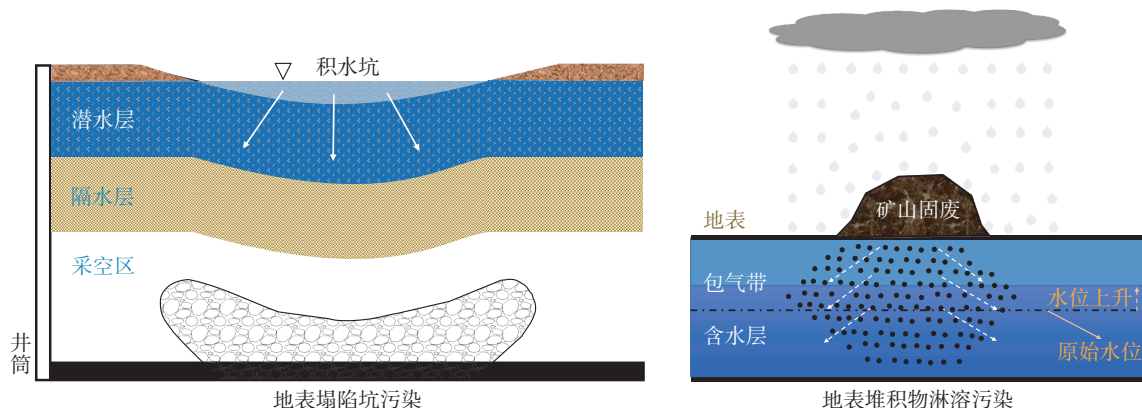


图3 浅层地下水污染模式示意图

Fig.3 Schematic of shallow groundwater pollution patterns

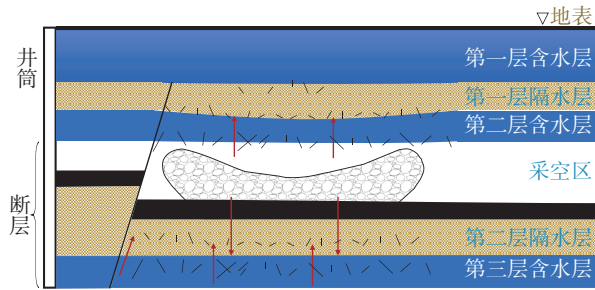


图 4 深层地下水污染模式示意图

Fig.4 Schematic of deep groundwater pollution patterns

象; 陕北和河南煤炭基地地下水中均为 F、Fe 和 Mn 轻微超标; 黄陇煤炭基地地下水超标最少, 仅 F 和 Mn 轻微超标; 鲁西煤炭基地中 6 项因子全部超标, 且除 F 因子之外全部超标严重。收集样本数据时, 汞、镉、铅、砷等少量重金属含量也存在超标情况, 但因为该类矿井水样本所占比例较小, 缺乏代表性, 因此不作为此次收集数据的重点对象。

流域区域地下水 pH 为 5.86~8.69, 整体呈中偏弱碱性; TDS 浓度为 607.88~5401.35 mg/L (张帆等 (2023) 调查了区域内高 TDS 和贫化的氢氧同位素特征的污染水), 流域内水均属于咸水和微咸水; 离子以阴离子  $\text{SO}_4^{2-}$  为主。分析流域内地下水化学类型一般为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水, 出现有  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型以及  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型等 9 种水化学类型。其中, 松散岩类孔隙水的水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型和  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$  型水, 部分分布有  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$  型和  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Ca}$  型水; 碎屑岩类孔隙裂隙水的水化学类型一般为  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$  型水; 裂隙岩溶水的地下水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$  型水, 局部裂隙水为  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$  型水。

#### 4.2 地下水污染评价

通过水质评价可以了解到水体污染程度和水质变化趋势 (张行洲等, 2023), 以便做好相应水体治

理措施。目前评价水质方法有很多, 国内外常用的水质评价方法有单因子评价法、内梅罗污染指数法 (韩雪萌等, 2023) 和综合水质法等。单因子评价法是对各个污染因子进行单独评价, 仅仅通过单项水质中最差的指标类别来确定综合水质类别, 确定评价结果时只要有一项污染因子不合格, 就判定为此片水域不合格; 内梅罗污染指数法是将最大单项污染指数项引入评价指标, 在评价分析时污染因子极大值所占比重较大, 而其他污染因子未被充分考虑, 如果某片水域污染因子相差较大则导致结果不够准确; 综合水质法将多种污染因子相对指数都归结为单一污染指数, 综合考虑各个污染因子对水质的影响因素, 克服了以上两种方法的缺点。

但是传统的综合水质法也存在许多不足之处, 如确定分项指数时将各个污染因子都作为选取对象, 只能反映水质总体情况而无法对类别进行评定; 用层次分析法等主观方法赋权, 并没有一个统一判定标准; 确定水质类别时未选择最差指标, 但同时也减弱了对水质判别的影响。基于此本文在查阅大量文献后决定采用孙艺珂等 (2018) 团队的改进综合水质指数法评价黄河流域地下水水质状况。改进方法中分项指数定为水污染指数 WPI, 选用主成分分析法赋权单个指标, 最后再借助改进的内梅罗污染指数法改进得到改进后的综合水质法, 评价过程如下。

##### 4.2.1 确定 WPI 指数值

将黄河流域 9 大煤炭基地水质指标值转化为水污染指数 WPI, 计算公式为

$$\text{WPI}(i) = \text{WPI}_1(i) + \frac{\text{WPI}_h(i) - \text{WPI}_1(i)}{C_h(i) - C_1(i)} \times [C(i) - C_1(i)] \quad (1)$$

式中:  $\text{WPI}(i)$  为第  $i$  个水质污染指数值;  $\text{WPI}_1(i)$  为第  $i$  个水质污染指数下限值;  $\text{WPI}_h(i)$  为第  $i$  个水

表 5 黄河流域九大煤炭基地地下水数据统计 (mg/L, pH 值除外)

Table 5 Statistics of groundwater data of nine coal bases in the Yellow River Basin (mg/L, except for pH)

煤炭基地	含量分布	pH	TDS	$\text{SO}_4^{2-}$	F	Fe	Mn
宁东 (靳德武等, 2022)	平均值	6.90	5401.35	1503.66	0.80	15.21	10.00
神东 (李果等, 2022)	平均值	8.00	1392.10	233.50	4.13	3.35	0.16
晋北、晋中、晋东 (李向全等, 2021)	平均值	6.12	1142.60	501.03	1.38	7.92	2.54
陕北 (陶虹等, 2016)	平均值	8.69	700.28	101.50	1.08	1.06	0.40
黄陇 (靳德武等, 2023)	平均值	7.69	607.88	192.06	1.60	0.10	0.89
河南 (张记飞等, 2023)	平均值	7.98	783.08	202.62	1.06	5.33	0.57
鲁西 (王怀文等, 2013)	平均值	5.86	1997.29	1245.89	1.03	93.49	10.72

质污染指数上限值;  $C(i)$  为第  $i$  个水质污染浓度, mg/L;  $C_l(i)$  为第  $i$  个水质污染浓度下限值, mg/L;  $C_u(i)$  为第  $i$  个水质污染浓度上限值, mg/L。

#### 4.2.2 主成分分析法赋权单个指标

首先确定主成分数量, 对污染因子的 WPI 进行主成分分析后求协方差矩阵, 得到矩阵的特征值、贡献率等相关参数, 主成分最终确定为累计贡献率超过 85% 的污染因子; 然后计算各个污染因子的特征向量, 确定各个污染因子的权重为特征向量和贡献率乘积。

$$\omega_k^* = \sum_{i=1}^m |U_i| A_i (k = 1, 2, 3 \dots), \text{其中 } U_i = \frac{C_i}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (2)$$

式中,  $C_i$  为成分矩阵;  $\lambda_i$  为特征值;  $U_i$  为特征向量;  $A_i$  为相应贡献率。

#### 4.2.3 改进后的综合水质法

引入改进的内梅罗污染指数法计算改进后的综合水质指数, 计算公式为

$$\text{WPCNI} = \sqrt{\frac{W_1^2 - \text{WPI}_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

式中,  $W_1$  为平均污染指数;  $\text{WPI}_{\max}$  为最大 WPI; WPCNI 为改进后的综合水质指数。

#### 4.2.4 水质评价结果

改进后的综合水质指数仍可按照 WPI 分级方法, 进行 I、II、III、IV、V 和劣 V 六类水质分级, 确定 6 种污染因子的权重值, 得到水质评价结果如表 6 所示。

选取黄河流域 9 大煤炭基地作为研究对象, 收集同一时间段内黄河流域重点断面水质自动检测周报数据为评价数据集(李海华等, 2015), 其中包括宁东煤炭基地的宁夏区石嘴山断面、神东煤炭基地

的内蒙古区包头市昭君坟断面、晋北晋中晋东 3 大煤炭基地的山西忻州万家寨断面、陕北煤炭基地的延安宜川断面、黄陇煤炭基地的陕西铜川石川河断面、河南煤炭基地的郑州市花园口断面、鲁西煤炭基地的山东省东明县高村断面。

对各个研究对象的 pH 值、TDS、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、F、Fe 和 Mn 等 6 种污染因子进行数据分析, 共得到 4000 多组监测数据。利用主成分分析法得到 9 大煤炭基地 6 种污染因子的权重, 从表 6 可以看出, 对水质影响最小的为 pH 值, 可以忽略不计, 对水质影响最大的污染因素为 TDS 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。得到水质评价结果为黄河流域 9 大煤炭基地中, 只有 4 个水样的水质评价结果为 II 类水, 其余水质评价结果为 III 类水的水样占 3 个, 水质评价结果为 IV 类水的水样占 2 个。9 个研究区内 II 类水占比 44.44%, III 类水占比 33.33%, IV 类水占比 22.23%。

## 5 研究区地下水污染防治

### 5.1 研究区矿井水污染防治方法

#### 5.1.1 高矿化度矿井水污染防治

高矿化度矿井水(孙亚军等, 2020; 顾大钊等, 2021)直排会使生态环境遭受严重破坏, 包括水体含盐量增加、浅层地下水污染等。目前处理的关键是进行除盐(卞伟等, 2021), 现阶段常用方法为蒸馏法、离子交换法、膜分离法等。

蒸馏法是通过消耗热能降低高矿化度矿井水中含盐浓度, 适用于含盐量超过 4000 mg/L 的矿井水。蒸馏法常采用多效多级闪蒸法可以避免出现严重的结垢现象, 同时具有要求低、可操作性强、回收率高等优点, 但缺点是设备重、能耗高; 离子交换法是通过化学方法进行除盐, 利用溶液中离子之间

表 6 黄河流域九大煤炭基地水质评价结果

Table 6 Water quality evaluation results of nine coal bases in the Yellow River Basin

煤炭基地	pH值	TDS	$\text{SO}_4^{2-}$	F	Fe	Mn	评价结果
宁东	0	0.28	0.33	0.19	0.03	0.17	III
神东	0	0.39	0.25	0.11	0.08	0.17	II
晋北	0.10	0.40	0.50	0	0	0	III
晋中	0	0.13	0.17	0.34	0.3	0.06	IV
晋东	0	0.47	0.16	0.16	0	0.21	II
陕北	0	0.27	0.49	0.10	0.02	0.12	III
黄陇	0.02	0.44	0.35	0.13	0.02	0.04	II
河南	0.06	0.31	0.18	0.15	0.08	0.22	II
鲁西	0.02	0.20	0.26	0.28	0.11	0.13	IV



的化学反应进行分离,适用于含盐量为 100~300 mg/L 的矿井水。浓水池中的浓水通过阴阳离子交换膜变成淡水,从而实现矿井水中的含盐浓度降低;膜分离法是选取天然或人工合成的薄膜,通过利用矿井水中各组分透过薄膜的差异性进行分析提纯,目前常采用脱盐、浓缩和结晶 3 步,具有效率高、能耗低、易操作等优点,但存在使用成本高、存水率低等缺点。

目前黄河流域内的山西汾西曙光煤矿和平朔井工一矿、神华宁夏灵新煤矿等存在的高矿化度矿井水回收率能够达到 95% 且处理成本低,处理后的水能够达到饮用标准,被广泛使用。

### 5.1.2 酸性矿井水污染防治

煤层中可溶性物质极易溶解于酸性矿井水,产生各种毒害元素从而加重地下水污染(杨建等, 2023)。处理方法为物理化学生物 3 种方法包括离子交换法、电渗析法和膜过滤技术等等,其中最常用的主动方法为添加碳酸盐类或者碱类物质中和酸性矿井水,这种方法可以同时去除水中的毒害离子和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。被动方法为修建排水渠;有氧人工湿地法,是指利用土壤和微生物之间的关系通过复合作用对酸性矿井水进行处理;构建硫酸盐生物反应器是指,利用硫酸盐产物中和酸性矿井水。但都存在成本高、工艺复杂等缺点,仍需改进。

目前而言,吸附法能够改善上述方法中处理周期长和工艺复杂等缺点,成为研究学者们的首要选择和研究对象。研究学者们一般选择生物炭和黏土等各种低成本吸附材料,能够利用这些材料吸附性和碱性对酸性矿井水进行中和,同时能够除去水中的重金属元素。吸附法实施步骤简单、可持续性强、来源广泛、成本低,同时能够保护环境实现绿色矿山发展。

### 5.1.3 含特殊组分矿井水污染防治

含特殊矿井水包括含氟矿井水和重金属矿井水等各种毒害污染物矿井水。处理特殊组分矿井水时因其所含成分污染性和毒性相对较大,所以处理困难,仍在进一步探索更多更有效的处理方法。含氟矿井水对应处理方法有化学沉淀法、吸附法和反渗透法等;重金属矿井水对应处理方法有离子交换法和絮凝沉淀法等。

## 5.2 研究区地下水污染防治技术和建议

### 5.2.1 膏体充填技术

矿产资源的开发利用不可避免地产生大量尾

砂和空区,尾矿是造成矿山环境污染的主要污染源之一,矿山开发产生的采空区是造成地表塌陷、地表水体破坏和水污染严重的主因。膏体充填技术作为“绿色采矿技术”(杨科等, 2021),是保障煤炭正常开采和保护生态环境的重要措施,同时减少煤矿开采对于水资源的污染。随着绿色矿山的提出,应用膏体充填技术的比重逐渐加大(图 5),研究学者们对于膏体充填的研究也愈发深入。

以流域内河南煤炭基地矿山为例(图 6),实施膏体充填技术后监测前后水样数据结果显示总硬度降低为 0.123 mmol/L;  $\text{K}^+$  浓度降低为 58.9 mg/L;  $\text{Na}^+$  浓度降低为 5.50 mg/L;  $\text{Mg}^{2+}$  浓度降低为 0.016 mg/L;  $\text{Ca}^{2+}$  浓度降低为 1.35 mg/L; 硫酸盐浓度降低为 11.3 mg/L; 铜、铅、铬浓度均降低为 0.01 mg/L

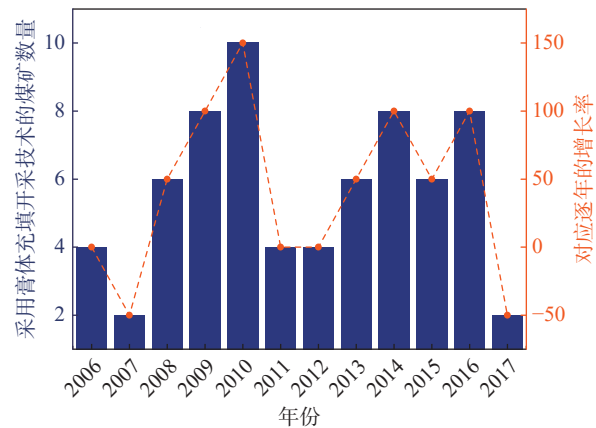


图 5 2006—2017 年间膏体充填开采技术的煤矿数量  
Fig.5 Number of coal mines with paste filling mining technology from 2006 to 2017

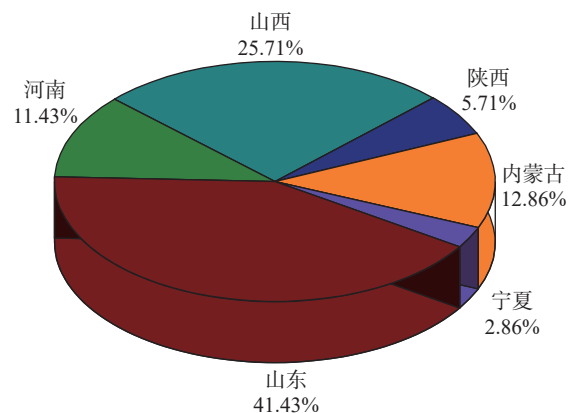


图 6 黄河流域各省煤矿充填矿井数量  
Fig.6 Number of coal mines filled in the provinces of the Yellow River Basin

以下。膏体材料封存内部的重金属离子,到达采场后膏体迅速固化,重金属离子渗滤无通道,重金属离子被永久封存于充填体内部,室内试块水样及地下涌水检测均达到 I、II 类水质标准;实现尾砂浓密底流浓度稳定在  $75\% \pm 2\%$ ,且稳定时间长( $>24$  h)。应用膏体技术承担了矿山 100% 尾矿处置量,年均减排量达 34.6 万 t,溢流澄清度高实现 100% 回收利用,为该矿山年节约淡水资源 150 万  $m^3$ ;将底流浓度稳定在  $75\% \pm 2\%$ ,且溢流水澄清( $<200 \times 10^{-6}$ ),可以实现溢流水厂内 100% 循环回收利用。

### 5.2.2 微生物修复技术

微生物修复技术(杨会峰等, 2021; 滕彦国等, 2022)是指通过天然或人工的微生物通过吸附代谢作用等处理地下水污染,包括吸附重金属离子、生成难溶性物质等。微生物修复技术环境适应性好、操作简单、经济实惠,能够简便有效地对煤炭开采引发的大片污染地下水进行治理(曹文庚等, 2022)。

通过微生物还原技术能够还原地下水污染中常见的  $Fe^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $Mn^{2+}$  最终能够生成  $CO_2$  并且还原,在该过程中能够还原地下水中富含的重金属离子和盐类,并且能够通过微生物将溶解性物质变为难溶甚至不溶性物质,从而分离提纯;微生物矿化修复技术是通过各种盐类和氢氧化合物将溶液中处于碱性条件,然后进行沉淀提纯,相比于微生物还原技术,微生物矿化修复技术所用到的盐类能够迅速与污染物生成沉淀,但成本略高;微生物吸附与累积修复技术是指将污染物离子吸附到微生物表面,此方法适用于处理金属离子浓度较低的污染源,在最佳条件下吸附率能够达到 86.86%,生物吸附剂具有来源广泛和经济性好的优点。

## 6 结 论

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济区,是打赢污染防治攻坚战、脱贫攻坚战的重要区域。矿山开采对黄河流域地下水造成了严重的干扰。黄河流域煤炭基地生态环境的修复应坚持“绿水青山就是金山银山”的理念,以水而定、量水而行,因地制宜,实现黄河流域生态保护和煤矿资源高质量发展。

(1)归纳总结流域内九大煤炭基地矿井地下水污染成因及污染模式,收集流域内代表性煤炭基地

的地下水特征数据。

(2)采用改进后的综合水质指数法,将水污染指数 WPI 定位分项指数,选用主成分分析法赋权。得到结果中对水质影响最小的为 pH 值,影响最大的污染因素为 TDS 和  $SO_4^{2-}$ ,流域内 III、IV 类占比较多,污染严重。

(3)针对 3 种污染矿井水采用相应的防治方法,并提出膏体充填法和微生物修复法,以流域内具体矿山为例表明应用前景,以期为改善地下水污染实现绿色矿山提供参考。

## References

- Bian Wei, Li Jingfeng, Liu Shuqin, Li Ting, Guo Qiang. 2021. Study on the technical route of highly mineralized mine water treatment in Ningdong Energy Base[J]. *Technology of Water Treatment*, 47(8): 120–123,127 (in Chinese with English abstract).
- Bian Zhengfu, Yu Haochen, Lei Shaogang, Yin Dengyu, Zhu Guoqing, Mu Shouguo, Yang Dejun. 2021. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(5): 1378–1391 (in Chinese with English abstract).
- Cao Wengeng, Wang Yanyan, Ren Yu, Fei Yuhong, Li Jincheng, Li Zeyan, Zhang Dong, Shuai Guanyin. 2022. Status and progress of treatment technologies for arsenic-bearing groundwater[J]. *Geology in China*, 49(5): 1408–1426 (in Chinese with English abstract).
- Chen Miao, Wu Yonggui. 2012. Monitoring on heavy metals pollution and fuzzy synthetic evaluation of water samples in Dajing abandoned lead-zinc mining areas of Shuicheng, Guizhou[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 32(2): 208–211 (in Chinese with English abstract).
- Dong Zhenyu, Wang Shuangming. 2017. Influence of coal exploitation on groundwater resources in Yuxi river valley of northern Shaanxi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(3): 185–190 (in Chinese with English abstract).
- Du Mingze, Li Hongjie, Li Wen, Qiu Hao, Jiang Peng, Wang Donghao. 2020. Study progress and development directions of the prevention and control technology of ground water pollution in coal mine sites[J]. *Metal Mine*, (9): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Fan Limin, Ma Wanchao, Chang Bofeng, Sun Kui, Miao Yanping, Lu Bo, Tian Shuibao, Yang Lei. 2023. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 51(1): 383–394 (in Chinese with English abstract).
- Feng Li, Zhang Pengfei, Zhang Maosheng, Liu Hao, Wang Yao. 2023. Strategies and practical paths for ecological restoration and comprehensive management in Yulin coal mining area in the new

- era[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 19–29 (in Chinese with English abstract).
- Gu Dazhao. 2015. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 40(2): 239–246 (in Chinese with English abstract).
- Gu Dazhao, Li Jingfeng, Cao Zhiguo, Wu Baoyang, Jiang Binbin, Yang Yi, Yang Jian, Chen Yaoping. 2021. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(10): 3079–3089 (in Chinese with English abstract).
- Gu Jinyi, Tian Shimin, Liang Shuai. 2022. The resource elements and legal guarantee of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 44(S1): 1–4 (in Chinese).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1001–1019 (in Chinese with English abstract).
- Han Xuemeng, Cai Wenqian, Wang Junqiang, Li Huiying, Xu Xiangqin, Tian Shengyan. 2023. Groundwater quality characteristics and pollution causes in typical hilly areas of North China: the case of Longan District, Anyang City, Henan Province[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 13(3): 992–1000 (in Chinese with English abstract).
- Hao Chunming, Zhang Wei, He Ruimin, Li Ting, Bao Yixiang, Li Jingfeng. 2021. Formation mechanisms for elevated fluoride in the mine water in Shandong coal-mining district[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(6): 1966–1977 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Binbin, Liu Shuyu, Ren Jie, Zheng Ranfeng, Chen Mengyuan, Yu Yan, Zhang Kai. 2020. Purification effect of coal mine groundwater reservoir on mine water containing organic compounds and heavy metals in different occurrence forms[J]. *Coal Engineering*, 52(1): 122–127 (in Chinese with English abstract).
- Jin Dewu, Wang Tiantian, Zhao Baofeng, Li Debin, Zhou Zhenfang, Shang Hongbo. 2022. Distribution characteristics and formation mechanism of high salinity groundwater in northeast Ningdong Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(7): 118–127 (in Chinese with English abstract).
- Jin Dewu, Li Chaofeng, Liu Yingfeng, Cao Haitao, Ren Dengjun, Wang Hongliang, Zhang Jinkui, Huang Yang, Yang Guodong, Guo Kang, Fan Min, Liu Chenkai. 2023. Characteristics of roof water hazard of coal seam in Huanglong Coalfield and key technologies for prevention and control[J]. *Coal Geology & Exploration*, 51(1): 205–213 (in Chinese with English abstract).
- Jin Fengjun, Lin Yinghua, Ma Li, Chen Zhuo. 2022. Evolution of the strategic position and high-quality development direction of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Social Sciences)*, 50(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Kou Yafang, Zhu Zhongyuan, Xiu Haifeng, Bai Lifang. 2011. Research on ecological use technology of highly mineralized mine water in Shendong Mining Area[J]. *China Water & Wastewater*, 27(22): 86–89 (in Chinese with English abstract).
- Li Guo, Lü Qingxu, Xu Feng. 2022. Hydrochemistry characteristics and its influencing factors of surface water and groundwater in the Shandong mining area[J]. *Coal engineering*, 54(4): 145–150 (in Chinese with English abstract).
- Li Haihua, Xing Jing, Sun Yangshuai, Zhou Dawei, Ma Tao, Zhang Jingwen. 2015. Water quality assessment of drinking water sources of the Yellow River main stem based on combination weighting fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Journal of Hydroecology*, 36(5): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiangquan, Zhang Chunchao, Hou Xinwei. 2021. Characteristics of groundwater circulation and evolution in Jindong large coal base driven by coal mining: An example of Xin'an spring area[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(9): 3015–3026 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ning, Zhao Xiaoguang, Xie Haijun, Li Yu. 2019. Influence of coal mining on groundwater resources in Yushenfu area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 39(1): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiuli, Wang Xin, Guo Pibin, Xiong Rui, Nie Lei, Shen Jun, Zhang Jing. 2022. Evolution and driving effect of coal-water footprint in coal rich areas of the Yellow River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 42(2): 293–302 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tao, Li Wenli, Han Shuangbao, Zhang Hongqiang, Wang Wenke, Li Fucheng, Li Haixue, He Xubo, Zhao Meimei. 2023. Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 50(5): 1432–1445 (in Chinese with English abstract).
- Peng Suping, Bi Yinli. 2020. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(4): 1211–1221 (in Chinese with English abstract).
- Shen Haoyong, Li Jia, Wang Zhiheng, Xie Hao, Liang Yongping, Yongxin Xu, Han Shuangbao, Ren Jianhui, Pan Yaoyun, Zhao Chunhong, Zhao Yi. 2022. Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow River[J]. *Geology in China*, 49(4): 1127–1138 (in Chinese with English abstract).
- Sun Hongfu, Zhao Fenghua, Li Wensheng, Li Rongjie, Ge Xiangkun. 2007. Geochemical characteristics of acid mine drainage and sediments from coal mines[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36(2): 221–226 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yajun, Chen Ge, Xu Zhimin, Yuan Huiqing, Zhang Yuzhuo, Zhou Lijie, Wang Xin, Zhang Chenghang, Zheng Jieming. 2020. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. *Journal of China Coal Society*,

- 45(1): 304–316 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yike, Wang Lin, Qi Feng. 2018. Analysis of water quality evolution of the main stream of the Yellow River based on improved integrated water quality index[J]. *Yellow River*, 40(7): 78–81, 87 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chunlei, Liang Yongping, Jin Hua, Zhao Chunhong, Shen Haoyong, Wang Zhiheng, Zhao Yi, Xie Hao, Liang Chen. 2022. Overview of field monitoring for acid mine water system of the coal mine in Shandi river basin[J]. *Carsologica Sinica*, 41(4): 522–531 (in Chinese with English abstract).
- Tao Hong, Ning Kuibin, Tao Fuping, Yang Zeyuan, Chai Xiaobing, Zhang Chaofeng, Li Wenli. 2016. Shallow groundwater dynamic characteristics and response to coal mining in the typical blownsand region of the Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(9): 2319–2325 (in Chinese with English abstract).
- Teng Yanguo, Hu Jingdan, Zheng Fuxin, Dou Junfeng. 2022. Advances in groundwater pollution treatment and remediation technologies in uranium mining areas[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 20(5): 886–901 (in Chinese with English abstract).
- Tian Hua, Yang Jiayi, Han Qiangqiang, Li Jinfang, Xin Tuo. 2021. Prediction of Impact of Coal Mining on Groundwater[J]. *Coal Technology*, 40(12): 110–114 (in Chinese with English abstract).
- Tian Huiwen, Zhang Xinxin, Bi Rutian, Zhu Hongfen, Xi Xi. 2020. An assessment of the carbon sequestration loss of farmland ecosystems caused by coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(4): 1499–1509 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huaiwen, Bi Haimin, Jia Bo. 2013. Study prediction of dewatering quantity from aquifer in Ordovician limestone during No. 17 Seam Mining in Luxi Mine[J]. *Coal Engineering*, 45(S2): 146–148 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tiantian, Jin Dewu, Yang Jian. 2021. Heavy metal pollution characteristics and source analysis of water drainage from a mine in Inner Mongolia[J]. *Coal Geology & Exploration*, 49(5): 45–51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tiantian, Xue Jiankun, Shang Hongbo, Zhou Zhenfang, Yang Jian, Liu Ji, Cao Yu. 2022. Fluorine pollution characteristics and formation mechanism of mine water in Shaanxi and Inner Mongolia contiguous area[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(11): 4127–4138 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, Xia Zilong. 2021. Study on the pattern change and regional differentiation of resources and environment in the Yellow River Basin and suggestions on eco-geological survey[J]. *Geology in China*, 48(1): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Xi Jinping. 2019. Speech at the symposium on ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin[J]. *China Water Resources*, (20): 1–3 (in Chinese).
- Yang Hui Feng, Cao Wengeng, Zhi Chuanshun, Li Zeyan, Bao Xilin, Ren Yu, Liu Futian, Fan Cunliang, Wang Shufang, Wang Yabin. 2021. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. *Geology in China*, 48(4): 1142–1155 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jian, Wang Hao, Wang Qiangmin, Zhang Xiyu, Wang Tiantian. 2023. Characteristics and sources of typical pollution components in mine water in the border area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. *Journal of China Coal Society*, 48(4): 1687–1696 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ke, Wei Zhen, Zhao Xinyuan, He Xiang, Zhang Jiqiang, Ji Jianshuai. 2021. Theory and technology of green filling of solid waste in underground mine at coal power base of Yellow River Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(S2): 925–935 (in Chinese with English abstract).
- Yang Simin, Li Jingfeng, Bai Lu. 2023. Spatial and temporal distribution characteristics and formation mechanism of fluoride in mine water of Typical Shendong mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 51(6): 246–256 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fan, Wang Guangcai, Zhang Maosheng, Sun Pingping, Han Xu, Guo Jiangbo. 2023. Identification of produced water and characteristics of hydrochemistry and stable hydrogen-oxygen isotopes of contaminated groundwater[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 98–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haiqin, Bao Yixiang, Tang Jiawei, Cao Zhiguo, Jiang Binbin, Li Jie, Li Jingfeng, Liu Zhaofeng. 2023. Study on fluoride leaching regularity of natural minerals in Shendong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 51(2): 436–448 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huijun. 2021. Preliminary study on ecological mining mode in the coal-rich area of the Yellow River Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 49(12): 233–242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jifei, Wang Hailiang, Lei Huayou, Fu Tiantian, Xi Tong, Wang Chenyu. 2023. Characteristics and utilization analysis of groundwater quality in goaf areas of typical mining areas in Henan Province[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 45(3): 199–203, 269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingzhou, Yin Leyi, Chen Jian, Zhou Xiaoxiao, Yang Lihu, Wu Jichun, Xie Yueqing. 2023. A study of the multi-tiered risk assessment method of site groundwater contamination considering transport-induced risk[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(2): 160–170 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaning, Wu Xiju, Dong Ying, Zhao Jian, Liu Jing. 2023. Quantitative analysis of ecological risk sources of heavy metals in river sediments of northern Shaanxi Mining area, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 43(6): 238–246 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaoguang, Wen Na, Yao Jing, Wang Zhuoran. 2021. Research on zonal characteristics of mine water quality and quantity in Yushenfu Mining Area[J]. *Coal Technology*, 40(11): 101–105 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 卞伟, 李井峰, 刘淑琴, 李庭, 郭强. 2021. 宁东基地高矿化度矿井水处理工程实践与发展方向[J]. 水处理技术, 47(8): 120-123, 127.
- 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 尹登玉, 朱国庆, 牟守国, 杨德军. 2021. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. 煤炭学报, 46(5): 1378-1391.
- 曹文庚, 王妍妍, 任宇, 费宇红, 李谨丞, 李泽岩, 张栋, 帅官印. 2022. 含砷地下水的治理技术现状与进展[J]. 中国地质, 49(5): 1408-1426.
- 陈森, 吴永贵. 2012. 贵州水城大井铅锌矿废矿区矿井水重金属污染监测及模糊综合评价[J]. 桂林理工大学学报, 32(2): 208-211.
- 董震雨, 王双明. 2017. 采煤对陕北榆溪河流域地下水资源的影响分析——以杭来湾煤矿开采区为例[J]. 干旱区资源与环境, 31(3): 185-190.
- 杜明泽, 李宏杰, 李文, 邱浩, 姜鹏, 王东昊. 2020. 煤矿区场地地下水污染防治技术研究进展及发展方向[J]. 金属矿山, (9): 1-14.
- 范立民, 马万超, 常波峰, 孙魁, 苗彦平, 路波, 田水豹, 杨磊. 2023. 榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理[J]. 煤炭科学技术, 51(1): 383-394.
- 冯立, 张鹏飞, 张茂省, 刘颖, 王耀. 2023. 新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J]. 西北地质, 56(3): 19-29.
- 顾大钊. 2015. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 40(2): 239-246.
- 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 吴宝杨, 蒋斌斌, 杨毅, 杨建, 陈要平. 2021. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 46(10): 3079-3089.
- 顾晋怡, 田世民, 梁帅. 2022. 黄河流域生态保护和高质量发展的资源要素及其法制保障[J]. 人民黄河, 44(S1): 1-4.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 48(4): 1001-1019.
- 韩雪萌, 蔡文倩, 王军强, 李慧颖, 徐香勤, 田胜艳. 2023. 华北典型丘陵地区地下水水质特征及污染成因分析——以河南省安阳市龙安区为例[J]. 环境工程技术学报, 13(3): 992-1000.
- 郝春明, 张伟, 何瑞敏, 李庭, 包一翔, 李井峰. 2021. 神东矿区高氟矿井水分布特征及形成机制[J]. 煤炭学报, 46(6): 1966-1977.
- 蒋斌斌, 刘舒予, 任洁, 郑然峰, 陈梦圆, 于妍, 张凯. 2020. 煤矿地下水对含不同赋存形态有机物及重金属矿井水净化效果研究[J]. 煤炭工程, 52(1): 122-127.
- 靳德武, 王甜甜, 赵宝峰, 李德彬, 周振方, 尚宏波. 2022. 宁东煤田东北部高矿化度地下水分布特征及形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 50(7): 118-127.
- 靳德武, 李超峰, 刘英锋, 曹海涛, 任邓君, 王红亮, 张金魁, 黄阳, 杨国栋, 郭康, 樊敏, 刘宸铠. 2023. 黄陵煤田煤层顶板水害特征及其防控技术[J]. 煤田地质与勘探, 51(1): 205-213.
- 金凤君, 林英华, 马丽, 陈卓. 2022. 黄河流域战略地位演变与高质量发展方向[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 50(1): 1-12.
- 寇雅芳, 朱仲元, 修海峰, 白利芳. 2011. 神东矿区高矿化度矿井水生态利用处理技术[J]. 中国给水排水, 27(22): 86-89.
- 李果, 吕情绪, 许峰. 2022. 神东矿区地表水和地下水水化学特征及其影响因素研究[J]. 煤炭工程, 54(4): 145-150.
- 李海华, 邢静, 孙杨帅, 周大伟, 马涛, 张静雯. 2015. 基于组合赋权模糊综合评价的黄河干流水源地水质评价[J]. 水生态学杂志, 36(5): 44-50.
- 李向全, 张春潮, 侯新伟. 2021. 采煤驱动下晋东大型煤炭基地地下水循环演变特征——以辛安泉域为例[J]. 煤炭学报, 46(9): 3015-3026.
- 柳宁, 赵晓光, 解海军, 李瑜. 2019. 榆神府地区煤炭开采对地下水资源的影响[J]. 西安科技大学学报, 39(1): 71-78.
- 刘秀丽, 王昕, 郭丕斌, 熊睿, 聂雷, 申俊, 张静. 2022. 黄河流域煤炭富集区煤炭水足迹演变及驱动效应研究[J]. 地理科学, 42(2): 293-302.
- 马涛, 李文莉, 韩双宝, 张红强, 王文科, 李甫成, 李海学, 贺旭波, 赵梅梅. 2023. 黄河流域陕西省地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力[J]. 中国地质, 50(5): 1432-1445.
- 彭苏萍, 毕银丽. 2020. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 45(4): 1211-1221.
- 申豪勇, 李佳, 王志恒, 谢浩, 梁永平, Xu Yongxin, 韩双宝, 任建会, 潘尧云, 赵春红, 赵一. 2022. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J]. 中国地质, 49(4): 1127-1138.
- 孙红福, 赵峰华, 李文生, 李荣杰, 葛祥坤. 2007. 煤矿酸性矿井水及其沉积物的地球化学性质[J]. 中国矿业大学学报, 36(2): 221-226.
- 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 袁慧卿, 张玉卓, 周丽洁, 王鑫, 张成行, 郑洁铭. 2020. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 45(1): 304-316.
- 孙艺珂, 王琳, 祁峰. 2018. 改进综合水质指数法分析黄河水质演变特征[J]. 人民黄河, 40(7): 78-81, 87.
- 唐春雷, 梁永平, 晋华, 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 赵一, 谢浩, 梁琛. 2022. 山底河流域煤矿酸性矿井水野外监测[J]. 中国岩溶, 41(4): 522-531.
- 陶虹, 宁奎斌, 陶福平, 杨泽元, 柴小兵, 张朝逢, 李文莉. 2016. 陕北典型风沙滩地区浅层地下水动态特征及对煤炭开采响应分析[J]. 煤炭学报, 41(9): 2319-2325.
- 滕彦国, 胡竟丹, 郑富新, 豆俊峰. 2022. 铀矿区地下水污染治理与修复技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 20(5): 886-901.
- 田华, 杨嘉懿, 韩强强, 李金芳, 辛拓. 2021. 煤炭开采对地下水的影响预测[J]. 煤炭技术, 40(12): 110-114.
- 田惠文, 张欣欣, 毕如田, 朱洪芬, 席茜. 2020. 煤炭开采导致的农田生态系统固碳损失评估[J]. 煤炭学报, 45(4): 1499-1509.
- 王怀文, 毕海民, 贾波. 2013. 鲁西煤矿开采 17~#煤奥灰含水层疏降水量预测研究[J]. 煤炭工程, 45(S2): 146-148.
- 王甜甜, 靳德武, 杨建. 2021. 内蒙古某矿矿井水重金属污染特征及来源分析[J]. 煤田地质与勘探, 49(5): 45-51.
- 王甜甜, 薛建坤, 尚宏波, 周振方, 杨建, 刘基, 曹煜. 2022. 蒙陕接壤区矿井水中氟的污染特征及形成机制[J]. 煤炭学报, 47(11): 4127-4138.
- 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 2021. 近 40 年黄河流域资源环境格

- 局变化分析与地质工作建议[J]. 中国地质, 48(1): 1-20.
- 习近平. 2019. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, (20): 1-3.
- 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 李泽岩, 包锡麟, 任宇, 柳富田, 范存良, 王树芳, 王亚斌. 2021. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 48(4): 1142-1155.
- 杨建, 王皓, 王强民, 张溪彧, 王甜甜. 2023. 蒙陕接壤区矿井水中典型污染组分特征及来源[J]. 煤炭学报, 48(4): 1687-1696.
- 杨科, 魏祯, 赵新元, 何祥, 张继强, 姬健帅. 2021. 黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 46(S2): 925-935.
- 杨思敏, 李井峰, 白璐. 2023. 神东矿区典型矿井水中氟的分布特征及形成机制[J]. 煤炭科学技术, 51(6): 246-256.
- 张帆, 王广才, 张茂省, 孙萍萍, 韩绪, 郭江波. 2023. 受污染地下水水化学和氢氧稳定同位素特征[J]. 西北地质, 56(3): 98-108.
- 张海琴, 包一翔, 唐佳伟, 曹志国, 蒋斌斌, 李杰, 李井峰, 刘兆峰. 2023. 神东矿区天然矿物中的氟化物浸出规律研究[J]. 煤炭科学技术, 51(2): 436-448.
- 张会军. 2021. 河流域煤炭富集区生态开采模式初探[J]. 煤炭科学技术, 49(12): 233-242.
- 张记飞, 王海亮, 雷华友, 傅甜甜, 习通, 王晨昱. 2023. 河南省典型矿区采空区地下水水质特征及利用分析[J]. 能源与环保, 45(3): 199-203, 269.
- 张行洲, 殷乐宜, 陈坚, 周笑笑, 杨丽虎, 吴吉春, 谢月清. 2023. 考虑污染物扩散风险的场地地下水污染多层次风险评估方法[J]. 水文地质工程地质, 50(2): 160-170.
- 张亚宁, 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静. 2023. 陕北矿区河流沉积物重金属的生态风险源定量解析[J]. 环境科学学报, 43(6): 238-246.
- 赵晓光, 温娜, 姚静, 王卓然. 2021. 榆神府煤矿区矿井水水质水量地带性特征研究[J]. 煤炭技术, 40(11): 101-105.