

蒙陕接壤区矿井水中典型污染组分特征及来源

杨建¹, 王皓¹, 王强民^{1,2}, 张溪或¹, 王甜甜¹

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要: 蒙陕接壤区是我国能源兜底保障的核心区域, 但是煤炭开采过程中产生的大量矿井水, 常常含有多种污染组分, 只有查清污染组分来源及特征, 才能更加科学合理地处利用矿井水资源。本研究在查清蒙陕接壤区地质、水文地质和煤炭开采扰动等条件的基础上, 对煤层顶板含水层水文地球化学特征、矿井水中典型污染组分特征开展了研究, 并分析了这些典型污染组分的来源。结果表明: 蒙陕接壤区根据煤层埋深条件可分为浅埋区、中深埋区和深埋区, 浅埋区矿井水来源为煤层顶板所有含水层水, 中深埋区矿井水来源为煤层顶板延安组、直罗组风化基岩和完整基岩含水层水, 浅埋区和中深埋区第四系和侏罗系地下水中 TDS 质量浓度均低于 1 000 mg/L; 深埋区矿井水来源于煤层顶板侏罗系延安组、直罗组含水层, 封闭条件下长期水岩作用, 导致地下水中 TDS 质量浓度 > 1 000 mg/L, 主要超标组分为 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 。矿井水中污染组分包括 2 类来源: 一类来自顶板含水层, 长期水岩相互作用导致离子组分进入水体中; 另一类来自煤矿井下生产活动, 煤岩屑、粉尘、机油等释放, 导致悬浮物、氮、有机物等污染溶入水体中。浅埋区和中深埋区矿井水中 TDS 质量浓度低于 1 000 mg/L, 主要为弱碱性 HCO_3^- -Ca 型水; 深埋区矿井水中 TDS 质量浓度为 1 824.00~3 684.00 mg/L, Na^+ 和 SO_4^{2-} 离子浓度增加占比最大; 地下水进入采空区后, 均会进一步发生水岩相互作用, 导致 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等离子浓度出现一定程度升高。大部分煤矿矿井水中 COD 出现了超标, 但是 TOC 浓度和 UV_{254} 均较低, 矿井水中有有机物以悬浮态为主; 3DEEM 光谱检测结果发现溶解态有机物主要为天然的氨基酸类和腐植质类, 各类有机物荧光强度偏低, 矿井水中有机污染物含量较少。

关键词: 典型污染组分; 矿井水; 蒙陕接壤区; 地下水; 水岩作用

中图分类号: X752

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)04-1687-10

Characteristics and sources of typical pollution components in mine water in the border area of Inner Mongolia and Shaanxi

YANG Jian¹, WANG Hao¹, WANG Qiangmin^{1,2}, ZHANG Xiyu¹, WANG Tiantian¹

(1. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The border area between Mongolia and Shaanxi is the core area for China's energy security. However, a large number of mine water produced in the process of coal mining contains a variety of pollution components. Only by finding out the sources and characteristics of pollution components can we deal with and utilize mine water resources more scientifically and reasonably, which is also in line with the requirements of high-quality development of the Yellow River re-

收稿日期: 2022-04-19 修回日期: 2022-06-14 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0536

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42007179); 陕西省重点研发计划资助项目 (2022SF-046)

作者简介: 杨建 (1979—), 男, 江苏盐城人, 研究员, 博士。E-mail: yangjian@cctegxian.com

通讯作者: 王强民 (1989—), 男, 河南长垣人, 助理研究员, 博士研究生。E-mail: wangqiangmin@cctegxian.com

引用格式: 杨建, 王皓, 王强民, 等. 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, 2023, 48(4): 1687-1696.

YANG Jian, WANG Hao, WANG Qiangmin, et al. 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, 2023, 48(4): 1687-1696.



移动阅读

gion. Based on the investigation of the geological, hydrogeological and coal mining disturbance conditions in the border area between Mongolia and Shaanxi, the hydrogeochemical characteristics of coal seam roof aquifer and the characteristics of typical pollution components in mine water were studied, and the sources of these typical pollution components were analyzed. The results showed that the border area between Mongolia and Shaanxi was located in the Yishan slope. According to the coal seam buried depth conditions, it could be divided into shallow buried area, medium deep buried area and deep buried area. The mine water in the shallow buried area came from all aquifer water of the coal seam roof, and the mine water in the medium deep buried area came from aquifer water of the Yan'an formation and the Zhiluo Formation (divided into complete bedrock section and weathered bedrock section) of the coal seam roof. The concentration of TDS in the Quaternary and Jurassic groundwater in the shallow buried area and the medium deep buried area was lower than 1 000 mg/L. The mine water in the deep buried area came from the aquifer water of the Jurassic Yan'an Formation and Zhiluo Formation in the roof of the coal seam. The Jurassic aquifer was relatively closed and stagnant. The long-term water rock interaction led to the concentration of TDS in groundwater upper than 1 000 mg/L, and the main exceeding standard components were Na^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} . The pollution components in mine water included two categories: one was from the roof aquifer water, and the long-term water rock interaction led to the entry of ion components into mine water. The other came from the underground production activities of coal mines. The release of coal cuttings, dust and oil led to the dissolution of suspended solids, nitrogen, organic matter and other pollution into mine water. The concentration of TDS in mine water in the shallow and medium deep buried areas was lower than 1 000 mg/L, which is mainly weakly alkaline $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ water, and the main cation and anion (including Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) basically did not exceed the standard. The TDS concentration in the mine water in the deep buried area (including the Xiaojihan coal mine) was 1 824.00–3 684.00 mg/L, which was slightly higher than that in the roof water. The increase of Na^+ and SO_4^{2-} ion concentration accounted for the largest proportion, which was mainly due to the further water rock interaction in the goaf. The concentration of COD in mine water of most coal mines exceeded the standard, but the TOC concentration and UV_{254} value were low, it showed that the organic matter in the mine water was mainly suspended. The 3DEEM spectrum detection results showed that the dissolved organic matter was mainly natural amino acids and humus, the fluorescence intensity of all kinds of organic matter was low, and there were few organic pollutants in mine water.

Key words: typical pollution components; mine water; the border area of Inner Mongolia and Shaanxi; groundwater; water rock interaction

在我国的一次能源结构中,煤炭是长期的主体能源^[1-2]。西部地区优异的煤炭资源禀赋,已成为煤炭生产的主产区,对于我国能源安全战略具有兜底保障作用。鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田(蒙陕接壤区)又是西部煤炭资源最好、开发强度最高的地区,高强度煤炭资源开采导致大量矿井水产生^[3-4],矿井水的年排放量超过 7.0 亿 m^3 ;同时,鄂尔多斯盆地是我国重要的能源重化工基地,能源重化工的特点是耗水量大^[5-6],单个大型能源重化工项目年用水量高达数千万 m^3 ;蒙陕接壤区属于干旱和半干旱区,既存在水资源短缺、生态环境脆弱问题,又面临矿井水资源无效浪费与能源化工巨大需水之间的突出矛盾。另外,矿井水中普遍含有高悬浮物、重金属、氟化物、有机污染物和病原体等污染物^[7-11],且由于煤炭赋存条件、含水层富水性、水文地球化学演化过程、煤炭开采工艺等差异,不同矿井产生的矿井水中,污染组分种类和浓度差异巨大,导致矿井水处理工艺不适用、处理效果欠佳,大大限制了矿井水资源的可持续利用,且存在矿井水无序

排放与水环境污染之间的矛盾,特别是地下水污染^[12-13],具有隐蔽性、延时性和不可逆性,一旦受到污染将很难治理和修复。但是目前主要针对单个矿井开展了相关研究,缺少区域性的系统研究,难以为该地区矿井水资源保护和配置、生态回用等提供科学依据。为了弄清区域性矿井水中典型污染组分来源及特征,以黄河流域中段的鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田的蒙陕接壤区为研究对象,从区域地质水文地质条件、水文地球化学特征、矿井水水质特征等方面开展了相关研究。

1 研究区概况

蒙陕接壤区位于黄河流域中段的鄂尔多斯盆地北部(图 1),属于毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带,研究区范围内以风沙地貌和黄土地貌为主^[14-15],其中风沙地貌区地势平坦,降雨入渗系数大,第四系风积沙和萨拉乌苏组共同构成了富水性较强的含水层系统^[16-17];黄土地貌区以黄土梁为主,坡面发育有细沟和

浅沟,降雨多以地表径流形式汇入地表河流,降雨入渗系数小,第四系含水层富水性较弱^[18]。研究区属于黄河水系,主要发育窟野河(乌兰木伦河)、秃尾河、榆溪河和无定河;在神木市和伊金霍洛旗交界位置,由于降水增多,风蚀洼地形成内陆封闭湖盆(红碱淖),围绕红碱淖发育的7条季节性河流构成了一个内陆水系。

在中侏罗世延安组,研究区属于滨浅相环境,地势平坦湖沼广布,植物丛生,聚煤作用形成了大型的

侏罗纪煤田。中生代后期,由于吕梁复背斜构造的大规模隆起褶皱,使研究区东部抬升,底层遭受剥蚀,造成由老到新,大致呈北北东走向的带状分布(图2),形成伊陕斜坡构造。在沉积和构造双重作用下,蒙陕接壤区内各个矿区的煤层埋深差异极大,其中神府矿区属于浅埋区,榆神矿区属于浅埋—中深埋区,榆横北区属于中深埋—深埋区,新街、呼吉尔特和纳林河矿区属于深埋区。

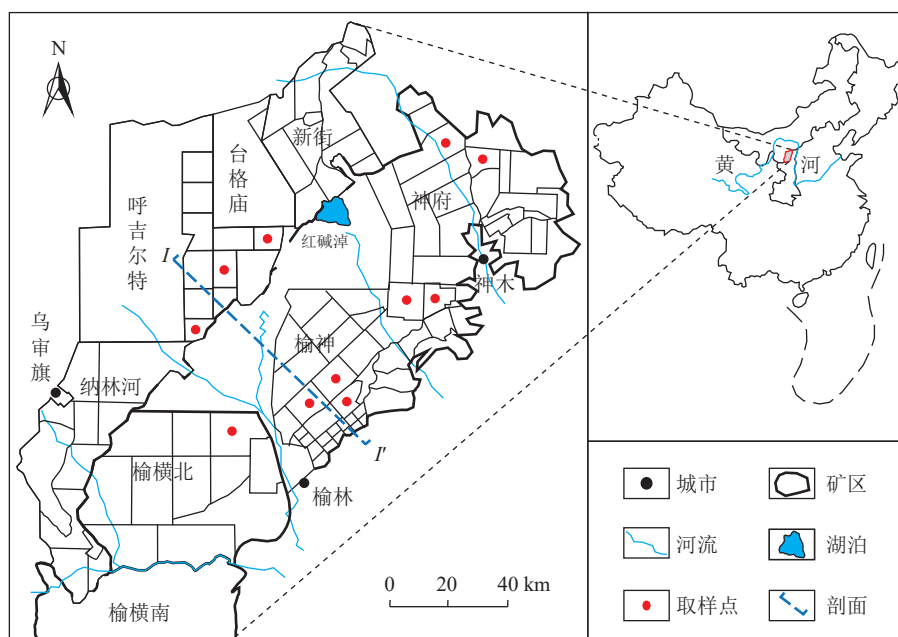


图1 研究区位置示意

Fig.1 Schematic map of research area location

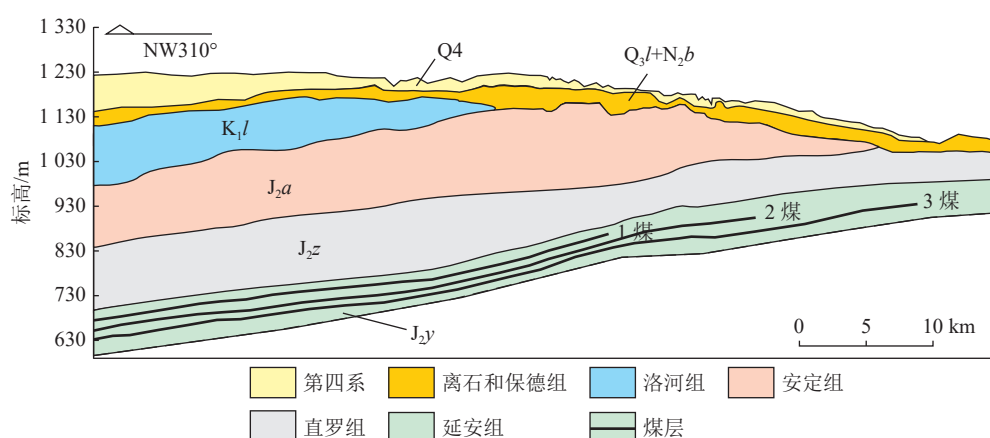


图2 煤层覆岩地层剖面(I—I')

Fig.2 Stratigraphic profile of coal roof(I—I')

2 导水裂隙带发育规律

煤炭开采过程中,煤层顶板覆岩破坏发育的导水裂隙带,沟通不同含水层,会导致矿井水水质特征出

现显著差异。蒙陕接壤区侏罗系煤层顶板覆岩主要由中细砂岩和砂质泥岩组成,属于中硬岩层,工作面采取大跨度综采/综放开采条件下,根据导水裂隙带实测值/计算值可以看出,实测裂采比一般为

20~30 倍,且导水裂隙带发育高度随采高的增加而增大^[19]。结合煤层顶板地层结构和厚度,浅埋区导水裂隙带可发育至第四系(甚至地表),导致煤层顶板所有含水层水都进入井下(表 1 和图 3);尽管中深埋区煤层顶板地层结构特征可分为 2 类(中深埋Ⅰ和中深埋Ⅱ),导水裂隙带均主要发育至直罗组,中深埋

Ⅰ区域局部可能沟通保德红土层,煤层顶板延安组、直罗组(分为完整基岩段和风化基岩段)含水层水可以进入井下;深埋区地层结构煤层顶板一定范围内地层结构与中深埋Ⅱ区相似,其导水裂隙带也主要发育至直罗组,导致煤层顶板延安组、直罗组含水层水进入井下。

表 1 蒙陕接壤区各矿井导水裂隙带发育高度
Table 1 Height of water conducting fracture zone in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

编号	矿名	埋深类型	工作面	埋深/m	采高/m	导高/m	裂采比	沟通层位
No.1	大柳塔	浅埋	22201	89	4.0	76.10	19.00	第四系
No.2	郭家湾	浅埋	51103	60	5.0	75.50*	15.10	第四系
No.3	锦界	浅埋	93104	110	3.4	43.60*	13.00	第四系
No.4	凉水井	浅埋	—	—	3.5	69.60*	20.00	第四系
No.5	榆树湾	中深埋	20104	264	5.0	138.90	27.80	直罗组
No.6	曹家滩	中深埋	122106	300	6.0	139.20	23.20	直罗组
No.7	金鸡滩	中深埋	12-2上108	260	5.5	136.10	24.70	直罗组
No.8	小纪汗	中深埋	11203	365	2.7	50.00*	18.73	直罗组
No.9	巴彦高勒	深埋	311101	620	5.7	126.00	22.00	直罗组
No.10	门克庆	深埋	113103	680	4.4	108.00	24.80	直罗组
No.11	石拉乌素	深埋	—	650	10.0	240.00*	24.00	直罗组

注: *为导水裂隙带计算值。

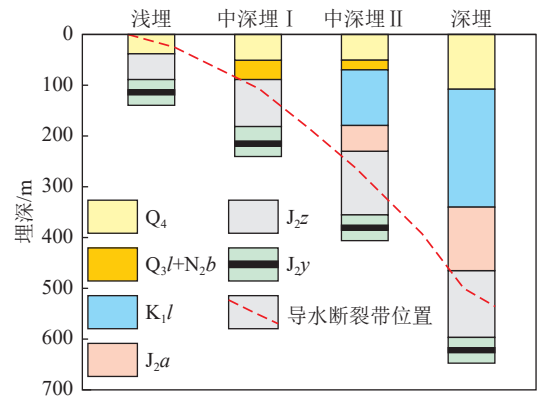


图 3 不同埋深导水裂隙带发育位置示意

Fig.3 Schematic diagram of height of water conducting fracture zone with different buried depths

3 样品采集和检测分析

基于地形地貌、煤层埋深、覆岩结构等条件,选择大柳塔、曹家滩、巴彦高勒等 11 个煤矿的矿井水为研究对象,结合各井田水文地质和水文地球化学特征,开展蒙陕接壤矿区矿井水中典型污染组分来源及特征研究(表 2)。11 个煤矿中,郭家湾、大柳塔、锦界、凉水井位于浅埋煤田区,煤炭开采过程中导水裂隙带可沟通第四系或直接发育至地表,导致第四系含水层水和侏罗系直罗组含水层水进入井下;榆树湾、曹家

滩、金鸡滩位于中深埋煤田区,导水裂隙带可发育至风化基岩(侏罗系),局部能够进入保德红土层下部,导致风化基岩含水层水和直罗组延安组完整基岩含水层水进入井下;小纪汗位于中深埋煤田区,但覆岩地质结构有一定差异,存在白垩系洛河组地层,且煤层埋深相对较大(>300 m),导水裂隙带存在发育至白垩系洛河组的可能性;巴彦高勒、门克庆、石拉乌素位于深埋煤田区,导水裂隙带可发育至直罗组底部含水层(七里镇砂岩),导致直罗组和延安组基岩含水层水进入井下。

在收集研究区各矿井地质勘探阶段水化学数据基础上,利用各矿井水文补勘工程,采集各含水层水样,查清不同煤层埋深和覆岩地层结构条件下的矿井水文地球化学特征;在此基础上,采集各矿井中央水仓出水样品 11 组。

根据 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》和 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》^[1],检测水质指标共 35 项,依据 GB/T 5750—2006《生活饮用水卫生标准 检验方法》,委托陕西工程勘察研究院水土检测中心开展检测工作。另外,委托清华大学核能与新能源研究院检测了 TOC 质量浓度、UV₂₅₄ 和三维荧光光谱(Three dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy, 3DEEM)。

表 2 蒙陕接壤区各矿井基本情况

Table 2 Basic situation of each mine in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

编号	矿名	煤层埋深/m	埋深类型	覆岩结构	主采煤层	煤层厚度/m	开采波及含水层
No.1	大柳塔	<150	浅埋	黄土+侏罗系基岩	2-2、5-2	1.4~7.8	第四系、侏罗系
No.2	郭家湾	<150	浅埋	黄土+侏罗系基岩	5-1	5.4~6.1	第四系、侏罗系
No.3	锦界	108~124	浅埋	松散层+侏罗系基岩	3-1	1.5~3.6	第四系、侏罗系
No.4	凉水井	<150	浅埋	松散层+侏罗系基岩	4-2	0.3~4.6	第四系、侏罗系
No.5	榆树湾	284~291	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	2-2	10.8~12.4	侏罗系
No.6	曹家滩	255~300	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	2-2	8.08~12.70	侏罗系
No.7	金鸡滩	230~262	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	2-2	11.1~13.1	侏罗系
No.8	小纪汗	350~420	中深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	2-2	1.6~3.0	侏罗系
No.9	巴彦高勒	610~626	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	3-1	3.1~5.8	侏罗系
No.10	门克庆	677~707	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	3-1	4.2~6.3	侏罗系
No.11	石拉乌素	660~680	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	2-2上	4.8~6.3	侏罗系

4 结果与讨论

4.1 研究区水文地球化学特征

尽管根据煤层埋深,将研究区范围内细分为浅埋区、中深埋区和深埋区,但是煤层顶板含水层水文地球化学特征主要分为 2 类(图 4): ① 浅埋区和中深埋区(除了小纪汗煤矿)的第四系含水层和侏罗系含水层地下水中 TDS 质量浓度均 < 1 000 mg/L, 而且绝大部分水样 TDS 质量浓度甚至 < 500 mg/L, 主要阴阳离子(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)浓度也未出现超标(依据 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》),只有少部分侏罗系含水层水样出现了 F 超标现象,浓度在 1.0~2.4 mg/L,为弱碱性的 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,属于水质良好的淡水资源。② 深埋区(包括小纪汗煤矿)由于构造运动形成的单斜构造,蒙陕接壤区向西煤层埋深逐渐增加,出现了白垩系含水层和安定组隔水层,该区域第四系含水层和白垩系含水层地下水中 TDS 质

量浓度均 < 500 mg/L, 主要阴阳离子浓度也低于 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》标准限值,为水质较好的弱碱性 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水;由于安定组隔水性较好,侏罗系含水层比较封闭环境下的长期水岩作用,导致该层地下水中 TDS 质量浓度显著升高,基本均 > 1 000 mg/L, 主要超标组分为 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,属于弱碱性 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型水。

4.2 矿井水水质特征

4.2.1 主要离子组分

蒙陕接壤区各煤矿矿井水水质特征差异交大,但是部分指标与煤层埋深、覆岩结构有一定相关性,在此以图 3 中各煤矿顶板含水层地下水(简称顶板水)中 TDS 和主要离子浓度最大值与矿井水进行比较(图 5),具体有如下特征:

(1) 浅埋区和中深埋区(除了小纪汗煤矿)各煤矿矿井水中 TDS 质量浓度均 < 1 000 mg/L(图 5(a)),主要为弱碱性的 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,主要阴阳离子(Na^+ 、

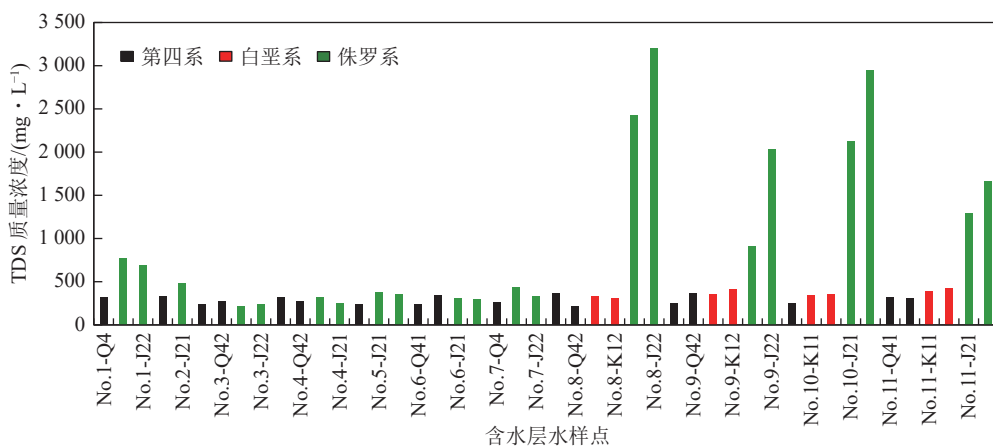


图 4 各矿井主要含水层 TDS 质量浓度特征

Fig.4 TDS concentration of main aquifers of each mine

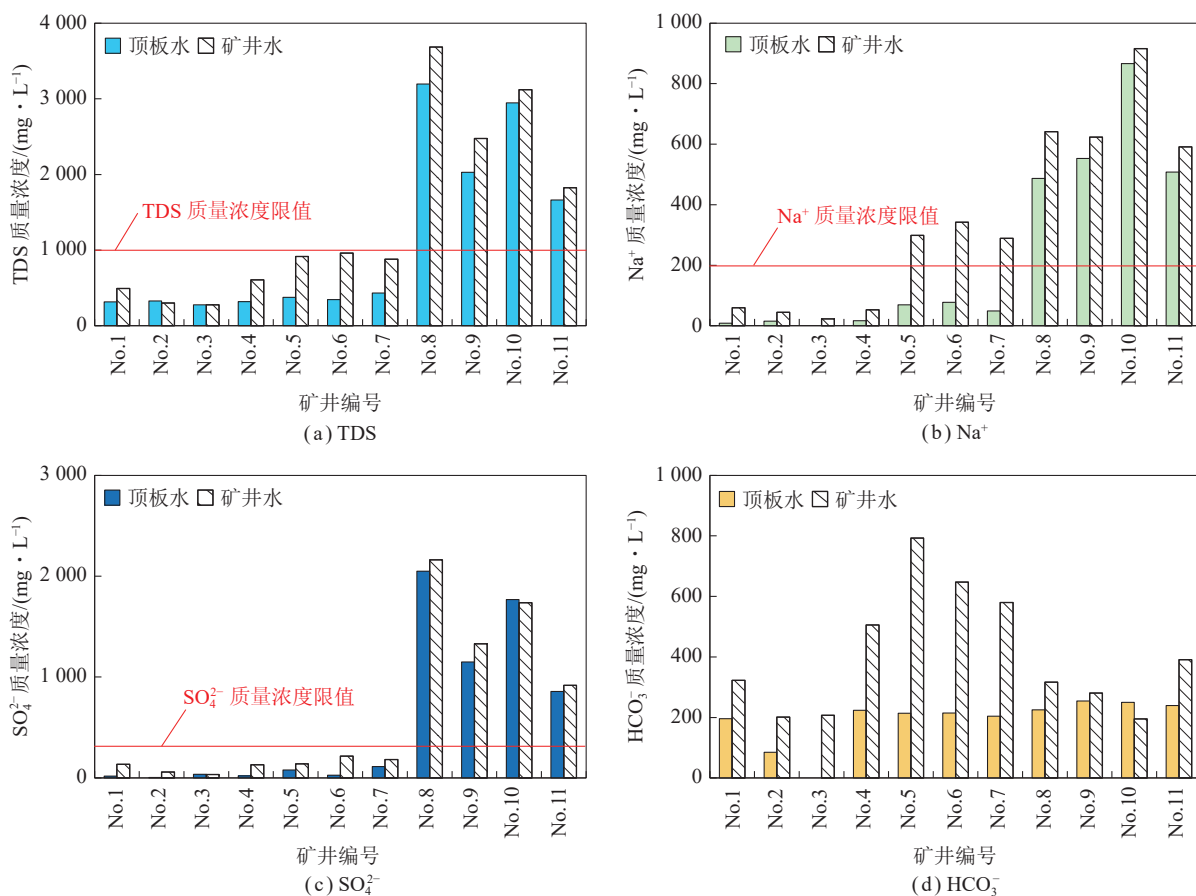


图5 矿井水中主要阴阳离子质量浓度

Fig.5 Concentration of main cation and anion in mine water

Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)基本不超标,只有中深埋区矿井水中 Na^+ 出现了超标 (289.0~342.0 mg/L, 图 5(b)), 而且矿井水中 TDS 及主要阴阳离子浓度基本上都高于顶板水,这是由于浅埋区和中深埋区矿井水尽管来源于不同顶板含水层,但是顶板含水层水进入采空区后,在采空区内与顶板垮落岩体将发生水岩相互作用,导致矿井水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等离子质量浓度普遍高于顶板水中离子浓度 (图 5(a)~(c))。

(2) 深埋区 (包括小纪汗煤矿) 矿井水中 TDS 质量浓度为 1 824.00~3 684.00 mg/L, 均略高于顶板水中 TDS 质量浓度, Na^+ 和 SO_4^{2-} 等离子质量浓度增加占比最大,进一步证明顶板水进入采空区后,发生的水岩相互作用是导致 TDS 及主要阴阳离子质量浓度升高的重要原因。

(3) 对比顶板水中 HCO_3^- 质量浓度为 84.79~254.64 mg/L, 绝大部分煤矿矿井水中 HCO_3^- 质量浓度都出现了较明显增加 (图 5(d)), 特别是中深埋区 3 座煤矿 (榆树湾、曹家滩、金鸡滩) 的矿井水中增加了 375.60~579.40 mg/L, 这主要是由于煤炭开采后,原先处于封闭环境的地下水进入采空区,与空气中 CO_2 发生溶解反应^[20]:



HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 之间是动态平衡关系,当 $6.4 < \text{pH} < 10.3$ 时, HCO_3^- 占优势; $\text{pH}=8.34$ 时, HCO_3^- 质量浓度达到最高点,占比达 98%。本研究所有煤矿矿井水的 pH 值在 7.28~8.41,因此碳酸组分主要为 HCO_3^- 。

(4) 随着煤层埋深的增大,矿井水中总硬度也有较明显增加 (特别是 Ca^{2+}), 小纪汗和巴彦高勒矿井水中总硬度分别为 1 251.00 和 460.00 mg/L, 均已超过 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》中Ⅲ类水总硬度的限值 (450 mg/L); 另外,中深埋区 3 座煤矿 (榆树湾、曹家滩、金鸡滩) 的矿井水中 F^- 质量浓度为 1.20~2.24 mg/L, 也已经超过 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》中Ⅲ类水 F^- 的限值 (1.0 mg/L), 而且随着煤炭开采向深部和下组煤衍生,由于煤系含水层中高浓度含氟地下水越来越多地进入井下,导致矿井水中 F^- 离子浓度会越来越高。

4.2.2 其他污染组分

由于受到井下采掘等生产活动的影响,相对于含水层地下水,矿井水中增加了浑浊度、氮素、有机组分等污染组分。

(1) 浑浊度。所有煤矿的矿井水中 SS 浓度都显著超标 (>3.0 NTU, 图 6), 其中 9 座煤矿矿井水 SS 浓度 >30.0 NTU, 表明煤矿生产过程中产生的大量煤粉、岩粉等, 会通过降尘等进入矿井水中, 导致矿井水浑浊度升高。



图 6 矿井水中 SS 浓度特征

Fig.6 SS concentration in mine water

(2) 氮素。几乎所有煤矿矿井水中都出现了氮素污染组分 (图 7), 其中凉水井 (No.4) 等少数煤矿的矿井水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 出现了超标, 大概超标 1.0~2.0 倍; 尽管未出现 NO_3^- 超标的煤矿, 但是郭家湾 (No.2) 和锦界 (No.3) 煤矿矿井水中 NO_3^- 质量浓度已经 >10.0 mg/L, 其中锦界 (No.3) 矿井水中 NO_3^- 浓度高达 16.0 mg/L, 表明井下生产过程中人类活动释放的氮素污染组分会进入矿井水, 而且在部分矿井 (或部分时段) 会出现氮含量较高的情况。

(3) 有机物。矿井水中有机成分包括颗粒态和溶解态, COD 是标志水体中含有可被氧化的“还原性物质”含量的一项指标, 往往又是衡量水中有机物质总含量多少的指标, 研究区大部分煤矿矿井水出现了超标 (3.0 mg/L, 图 8(a)), 最高超标将近 6.0 倍 (金鸡滩, 浓度 17.0 mg/L), 表明在采掘活动影响下, 矿井水中普遍存在有机污染物。TOC 是以碳的含量表示水中溶解性有机物的总量, 检测结果发现, 各矿矿井水中 TOC 质量浓度较低 (0.6~1.6 mg/L, 图 8(b)), 而且大分子有机物以及含 $\text{C}=\text{C}$ 双键和 $\text{C}=\text{O}$ 双键的芳香族化合物含量也较低 (UV_{254} 指标), UV_{254} 普遍小于 0.02 cm^{-1} (图 8(c)), 总体上反映出蒙陕接壤区煤矿矿井水中溶解性有机污染物含量较低。

矿井水中有机物种类繁多, 对其进行逐一分析和鉴定是不现实的, 利用不同有机物结构中官能团的不同荧光特性, 三维荧光光谱是表征水体中各类有机组分的有效手段^[21]。分别选择浅埋区 (No.1 大柳塔矿)、

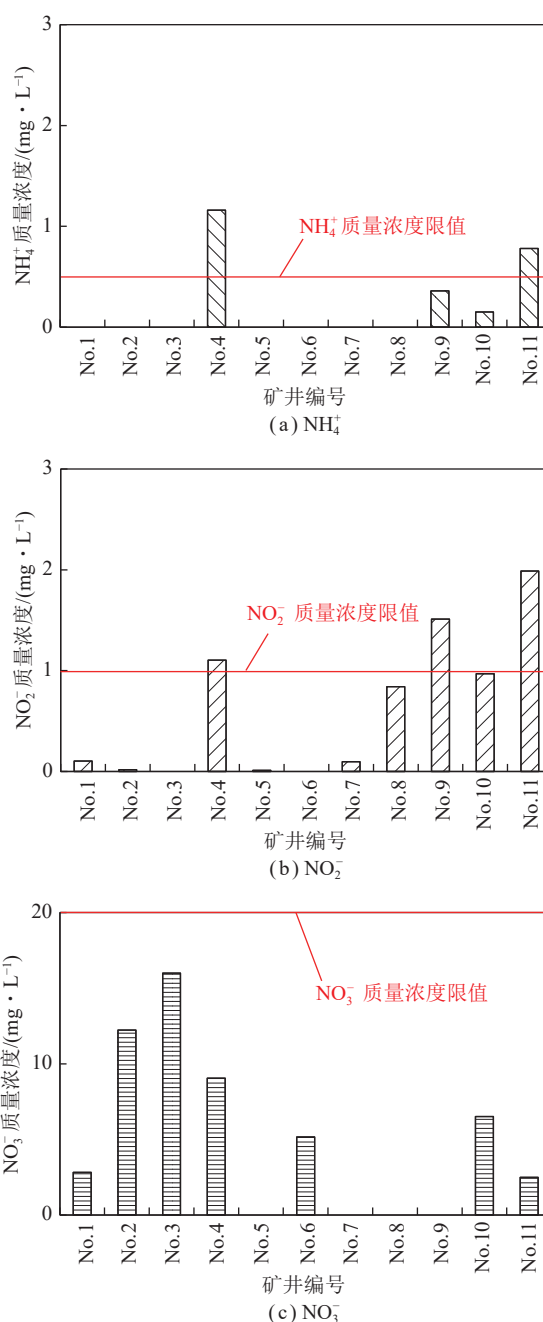


图 7 矿井水中氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐质量浓度

Fig.7 Concentration of ammonia nitrogen, nitrite and nitrate in mine water

中深埋区 (No.5 榆树湾矿) 和深埋区 (No.11 石拉乌素矿) 的典型 3DEEM 光谱 (图 9) 进行分析, 从图 9 可以看出, 与矿井水中溶解性有机物浓度较低相一致, 蒙陕接壤区各煤矿矿井水中有机物的 3DEEM 光谱强度也较弱, 主要为氨基酸类 (Region I 和 Region II) 有机物, 其次是腐植质类有机物 (Region III 和 Region V)。

地下水中溶解态氨基酸是天然有机物的重要组成部分, 也是多种污染源的标志物质, 蒙陕接壤区矿井水中氨基酸主要包括 2 类 (图 10): 类酪氨酸 (Re-

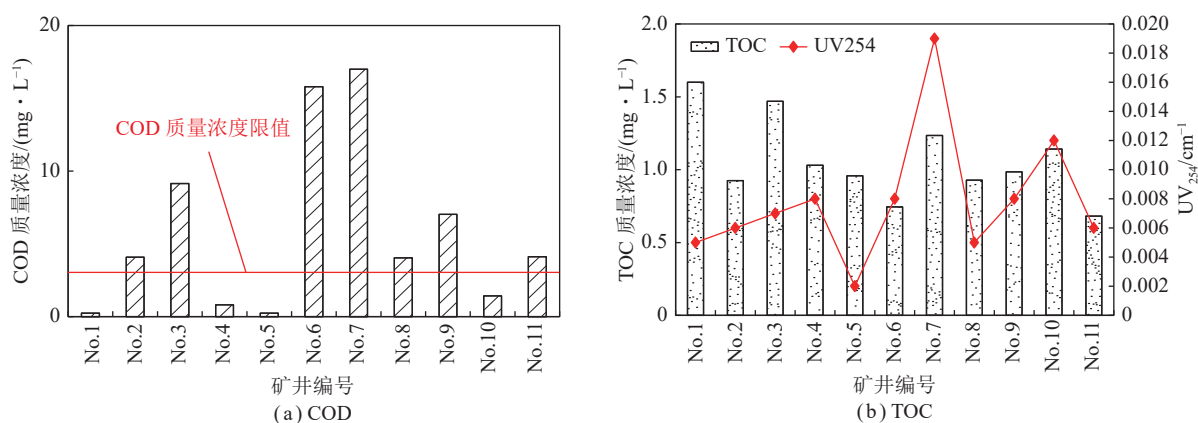
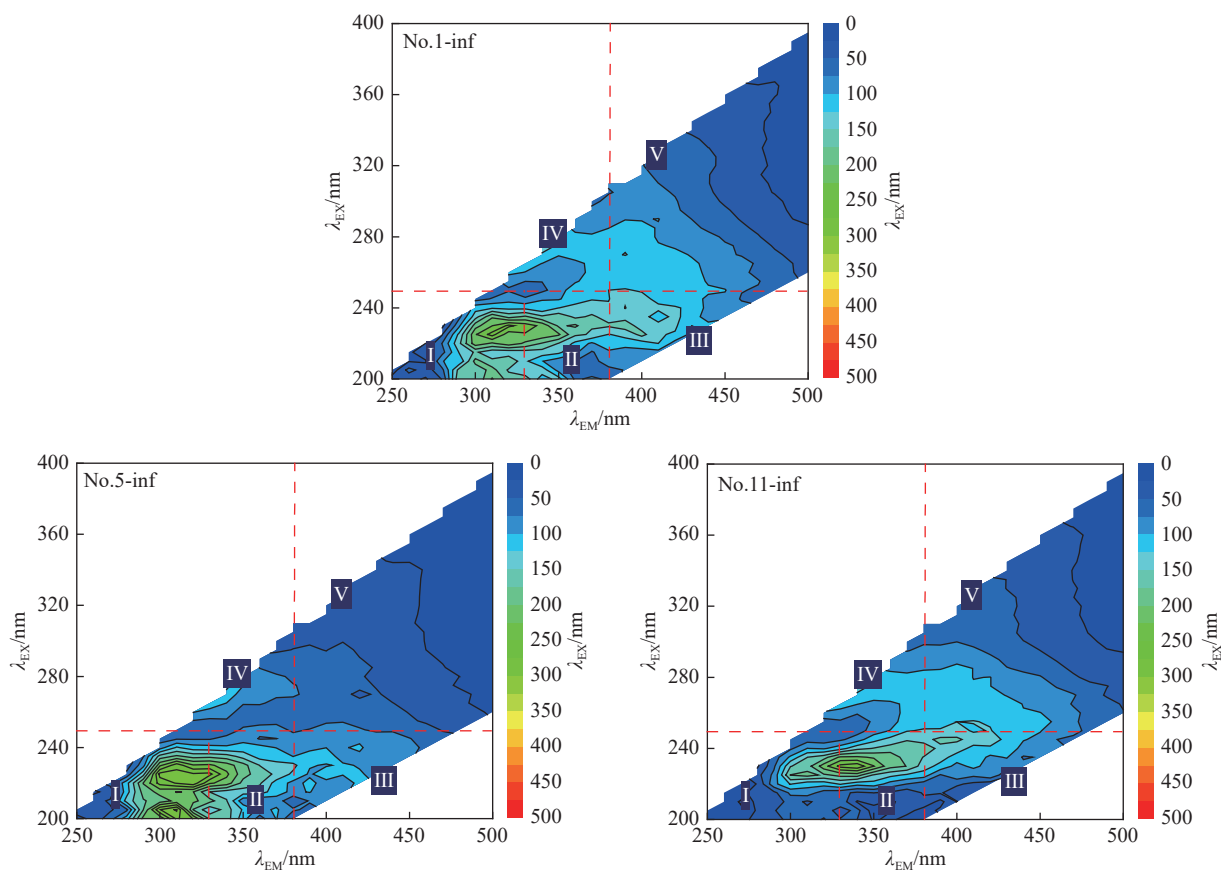
图8 矿井水中 COD、TOC 质量浓度和 UV₂₅₄Fig.8 Concentration of COD and TOC, value of UV₂₅₄ in mine water

图9 矿井水中溶解性有机物 3DEEM 光谱图

Fig.9 3DEEM of dissolved organic matter in mine water

gion I) 和类色氨酸 (Region II)。类酪氨酸有机物位于 $\lambda_{EX}=225.0\sim 230.0$ nm、 $\lambda_{EM}=302.0\sim 312.0$ nm 区域, 荧光峰强度 (Fluorescence Intensity, FI) 为 124.8~420.0, 其中中深埋区的矿井水中类酪氨酸有机物 FI 较高 (>300.0); 类色氨酸有机物位于 $\lambda_{EX}=230.0$ nm、 $\lambda_{EM}=332.0\sim 340.0$ nm 区域, FI=124.8~420.0, 其中浅埋区矿井水中大部分未出现该类有机物的荧光峰 (除了凉水井), 中深埋区和深埋区则普遍出现了该类有机

物荧光峰。蒙陕接壤区矿井水中还存在腐植质类有机物, 是一类大分子难降解有机物, 主要包括: 类富里酸 (Region III) 和类腐植酸 (Region V)。类富里酸有机物位于 $\lambda_{EX}=230.0\sim 245.0$ nm、 $\lambda_{EM}=382.0\sim 408.0$ nm 区域, FI=134.7~398.7, 主要出现在中深埋区和深埋区矿井水中; 类腐植酸位于 $\lambda_{EX}=250.0\sim 280.0$ nm、 $\lambda_{EM}=384.0\sim 408.0$ nm 区域, FI=74.9~218.9, 主要出现在浅埋区矿井水中, 所有矿井水中, 类富里酸和类腐

植酸均未重合出现。总体上,蒙陕接壤区中深埋区矿井水中有机物荧光峰强度偏高,可能与该地区为风沙

地貌区、侏罗系含水层与浅部地下水水力联系密切等因素有关。

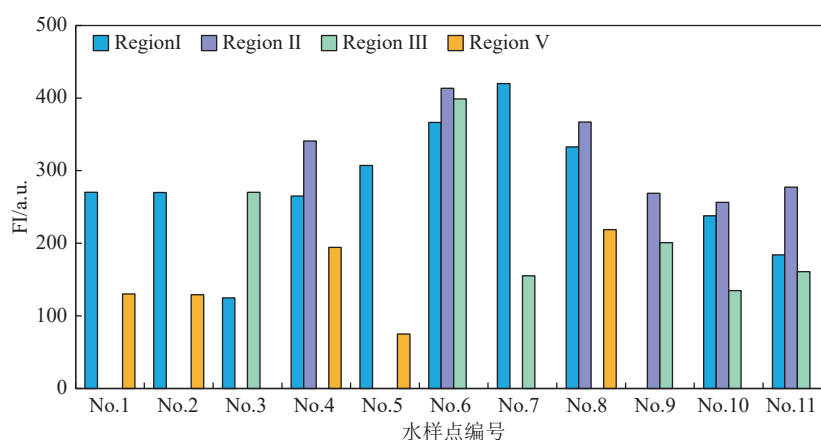


图10 矿井水中溶解性有机物荧光强度

Fig.10 FI of dissolved organic matter in mine water

5 结 论

(1) 蒙陕接壤区的浅埋区矿井水来源为煤层顶板所有含水层水,中深埋区矿井水来源为煤层顶板延安组、直罗组(分为完整基岩段和风化基岩段)含水层水,深埋区矿井水来源于煤层顶板延安组、直罗组含水层水,其中深埋区(包括小纪汗煤矿)侏罗系地层比较封闭环境下的长期水岩相互作用,导致地下水中TDS质量浓度 $>1\ 000\ \text{mg/L}$,主要超标组分为 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 。

(2) 矿井水中污染组分包括2类:一类来自顶板含水层水,长期水岩相互作用导致离子组分进入水体中;另一类来自煤矿井下生产活动,煤岩屑、粉尘、机油等释放,导致悬浮物、氮、有机物等污染溶入水体中。

(3) 浅埋区和中深埋区(除了小纪汗煤矿)矿井水中TDS质量浓度均低于 $1\ 000\ \text{mg/L}$,主要为弱碱性 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,主要阴阳离子(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)基本不超标;深埋区(包括小纪汗煤矿)矿井水中TDS质量浓度为 $1\ 824.00\sim 3\ 684.00\ \text{mg/L}$,均略高于顶板水中TDS质量浓度, Na^+ 和 SO_4^{2-} 质量浓度增加占比最大,主要是由于地下水进入采空区,进一步发生水岩相互作用。

(4) 研究区大部分煤矿矿井水出现了超标,但是TOC质量浓度和 UV_{254} 均较低,表明矿井水中有机物以悬浮态为主;3DEEM光谱检测结果发现溶解态有机物主要为天然的氨基酸类和腐植质类,各类有机物荧光强度偏低,表明矿井水中有机污染物较少。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7): 2197–2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [2] 陈浮,于昊辰,卞正富,等.碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J].煤炭学报,2021,46(6): 1808–1820.
CHEN Fu, YU Haochen, BIAN Zhengfu, et al. How to handles the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808–1820.
- [3] 顾大钊,李井峰,曹志国,等.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,2021,46(10): 3079–3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079–3089.
- [4] 杨建,王皓,梁向阳,等.鄂尔多斯盆地北部深埋煤层工作面涌水量预测方法[J].煤田地质与勘探,2021,49(4): 185–191.
YANG Jian, WANG Hao, LIANG Xiangyang, et al. Water inflow forecasting method of deep buried coal working face in northern Ordos Basin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 185–191.
- [5] 谢克昌.“十四五”期间现代煤化工发展的几点思考[J].煤炭经济研究,2020,40(5): 1–2.
XIE Kechang. Thoughts on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five Year Plan Period[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 1–2.
- [6] 王强,徐向阳.黄河流域现代煤化工产业资源和环境承载力分析[J].洁净煤技术,2021,27(S2): 328–332.
WANG Qiang, XU Xiangyang. Analysis on resources and environmental carrying capacity of modern coal chemical industry in the Yellow River Area[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(S2):

- 328–332.
- [7] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11–18.
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11–18.
- [8] 赵丽, 孙艳芳, 杨志斌, 等. 煤矸石去除矿井水中水溶性有机物及氨氮的实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 236–241.
ZHAO Li, SUN Yanfang, YANG Zhibin, et al. Removal efficiencies of dissolved organic matter and ammonium in coal mine water by coal gangue through column experiments[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 236–241.
- [9] 杨建, 王强民, 王甜甜, 等. 神府矿区井下综采设备检修过程中矿井水水质变化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3710–3718.
YANG Jian, WANG Qiangmin, WANG Tiantian, et al. Mine water quality variation during the overhaul of fully mechanized mining equipment in Shenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3710–3718.
- [10] 蒋斌斌, 高昊, 杜坤, 等. 煤基复合絮凝剂对高浊度高矿化度矿井水的絮凝效果研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(6): 681–686.
JIANG Binbin, GAO Hao, DU Kun, et al. Research on flocculation effect of fly ash composite on high turbidity and high salinity mine water[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(6): 681–686.
- [11] 杨建, 王皓, 王甜甜, 等. 矿井水地下储存过程中典型污染组分去除规律——以内蒙古敏东一矿为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2918–2925.
YANG Jian, WANG Hao, WANG Tiantian, et al. Removal law of typical pollution components during underground storage of mine water: Taking Mindong No. 1 Mine Inner Mongolia as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2918–2925.
- [12] 孙亚军, 徐智敏, 李鑫, 等. 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 1–16.
SUN Yajun, XU Zhimin, LI Xin, et al. Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 1–16.
- [13] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423–437.
SUN Yajun, ZHANG LI, XU Zhimin, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423–437.
- [14] 杨建, 刘基, 黄浩, 等. 鄂尔多斯盆地北部深埋区“地貌–沉积”控水关键要素研究[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 523–530.
YANG Jian, LIU Ji, HUANG Hao, et al. Key groundwater control factors of deep buried coalfield by landform and sedimentation in the Northern Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(5): 523–530.
- [15] 张恒利. 鄂尔多斯盆地煤炭资源聚积规律及勘查开发利用分析[J]. 地质论评, 2013, 59(S0): 803–808.
ZHANG Hengli. Analysis of coal resources accumulation law and exploration, development and utilization in Ordos Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(S0): 803–808.
- [16] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702–718.
WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 702–718.
- [17] 王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 6–14.
WANG Deqian, LIU Zuzhi, YIN Lihe. Hydro-geological characteristics and groundwater systems of the Erdos Basin[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 6–14.
- [18] 王强民, 靳德武, 王文科, 等. 榆神矿区地下水和干旱指数对植被耗水的联合影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 840–846.
WANG Qiangmin, JIN Dewu, WANG Wenke, et al. Joint effects of groundwater and aridity index on the transpiration of vegetation: A case study in the Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 840–846.
- [19] 薛建坤, 王皓, 赵春虎, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田导水裂隙带高度预测及顶板充水模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1222–1230.
XUE Jiankun, WANG Hao, ZHAO Chunhu, et al. Prediction of the height of water-conducting fracture zone and water-filling model of roof aquifer in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1222–1230.
- [20] 任加国, 武倩倩. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [21] 温馨, 张淑荣, 白乙娟, 等. 荧光光谱技术在废水溶解有机物研究中的应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 29–37.
WEN Xin, ZHANG Shurong, BAI Yijuan, et al. Research progress on the application of fluorescence spectroscopy in studying dissolved organic matter in wastewaters[J]. South-to-North water transfers and water Science & Technology, 2018, 16(2): 29–37.