

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.22

典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究

冯海波^{1,2},董少刚¹,张涛³,李 轶¹,刘晓波¹,李政葵¹,王 超¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院,内蒙古呼和浩特 010021;2. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北武汉 430074;3. 呼和浩特市环境科学研究所,内蒙古呼和浩特 010000)

摘要: 伊敏露天煤矿位于中国东北部呼伦贝尔草原上,多年来的矿业活动对区域地下水环境造成严重影响,同时也给原本脆弱的草原生态环境带来威胁。文章以伊敏煤矿区地下水为研究对象,对比煤矿开采前(1973年)后(2016年)地下水系统的变化特征,运用流场对比、数理统计、Piper三线图、库尔洛夫式等对矿区地下水流场和水化学场的时空演化规律进行研究,以揭示强烈人工干预下草原矿区地下水与环境的相互作用机制。结果表明:露天煤矿开采活动使矿区地下水原生的还原环境变为氧化环境,煤层中的黄铁矿(FeS_2)被氧化、产酸并引发后续一系列反应,其结果导致矿区地下水pH值降低,总硬度(TH)、 SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度升高;水化学类型由以 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主演化为以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主;煤矿开采强烈疏排地下水加速了区域地下水循环速度,使地下水向着淡化方向发展,TDS、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 等均呈降低趋势。

关键词: 地下水;水文地球化学;氧化条件;水岩相互作用;生态环境;伊敏煤矿

中图分类号: P641.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0163-10

Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie

FENG Haibo^{1,2}, DONG Shaogang¹, ZHANG Tao³, LI Yi¹, LIU Xiaobo¹, LI Zhengkui¹, WANG Chao¹

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010021, China;
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
3. Institute of Environmental Science of Huhhot, Huhhot, Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: The Yimin coal mine is located in the Hulunbuir Prairie in northeastern China. The development of the mineral exploration of many years has caused tremendous influence on the regional groundwater environment and also threatened the vulnerable prairie ecological system. In this paper, the groundwater system in the Yimin coal mine area is taken as the research object. Characteristics of the groundwater system before and after the mining are compared in order to reveal the interaction mechanism of groundwater and environment under the intensive manual intervention in a prairie mining area. A comprehensive study of the temporal and spatial evolution of groundwater flow system and geo-chemical characteristics in the coal mining area is carried out by means of groundwater flow field comparison, mathematical statistics, comparison of contour map and Piper diagrams. The results show that the open pit coal mining increases access of O_2 to the subsurface and changes the original reduction environment into an oxidation environment, which facilitates sustained pyrite oxidation, acid production, and subsequent reactions. As a result, the pH value decreases, total hardness (TH) and concentrations of SO_4^{2-} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} and Mg^{2+} increase significantly. In

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2018-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501002); 国家自然科学基金项目(41572302;41877524)

第一作者: 冯海波(1990-),女,博士研究生,水文地质学专业,主要从事地下水污染与防治研究。E-mail: groundwater111@163.com

通讯作者: 董少刚(1975-),男,副教授,水文地质学专业,主要从事地下水污染与防治研究。E-mail: groundwater@163.com

addition, the hydrochemical type of groundwater changes from $\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type to $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type. Under the influence of groundwater drainage of the opencast coal mining, the groundwater circulation is accelerated, which leads to an evolution of desalination of groundwater, and the chemical indicators such as TDS, COD and $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ show a decreasing trend in the coal mine area.

Keywords: groundwater; hydrogeochemistry; oxidation conditions; water-rock interaction; ecological system; Yimin coal mine

从20世纪80年代开始,随着全球经济的快速发展,世界各国对煤炭资源的需求不断增加,煤矿开采对地下水环境造成的影响越来越受到国内外学者的关注^[1-3]。一方面,露天开采活动破坏矿体围岩,改变地下水赋存环境;为了确保矿坑干燥和工作环境的安全大量抽排含水层中的地下水,使矿区形成大面积降落漏斗^[4-6],改变地下水循环条件和补排关系。另一方面,受地下水循环模式变化以及水-岩相互作用的影响,矿区水文地球化学环境发生巨大改变^[7-8]。此外,由于煤矿坑废水和煤矸石淋滤液一般呈酸性,并含有大量的硫化物及多种重金属,无序排放或管理不善会使接纳水体(地表水或者地下水)的水质严重恶化^[9-11];同时也会造成土壤环境污染,进而引发一系列生态环境问题^[12]。Pinetown等^[13]对南非普马兰加省多个煤田的研究显示,该区所有的煤炭及煤炭单元,都具有产酸的潜力。Utom等^[14]、Gomo等^[15]、Equeenuddin等^[16]及Sun等^[17]对世界多处煤矿的研究均发现,煤矿井废水一般都具有高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和重金属离子,而低pH值的特征。

呼伦贝尔草原是我国目前保存最为完整的高纬度草原,是世界著名的三大天然草原之一,其拥有的野生禾本科牧草是引种和育种的珍贵遗传资源,为世界草地领域的研究提供了重要基地^[18-19]。同时,呼伦贝尔草原对调节区域生态环境发挥着极其重要的作用,更为我国华北和东北地区构建了一个重要的生态屏障。然而,近年来迅猛发展的矿业给呼伦贝尔市经济带来强劲活力的同时也使当地环境质量不断下降。据初步调查,仅伊敏、宝日希勒、大雁、扎赉诺尔等大型煤炭企业采煤造成的地面塌陷面积高达 36 km^2 ,废石场占地面积累计 10.3 km^2 ,土地污染面积 10 km^2 ^[20]。随着近年来露天开采强度和规模的逐年增大,矿区浅层地下水乃至深层地下水逐渐被疏干^[21]。由此引发的地下水位降落漏斗,地面沉降、泉水断流、土地沙化、植被面积减少、湖水面退缩、湿地面积萎缩等环境问题越来越严重,人类生存环境不断恶化^[22]。因此,对于呼伦贝尔草原露天煤矿区地下水环境演化及由此引发的生态

环境问题的研究已迫在眉睫。

本文以伊敏露天煤矿为例,通过水文地质调查、野外采样分析并结合矿区水文地球化学历史资料,通过大时间跨度的对比研究,以期揭示强烈人工干预下草原矿区地下水流场和水化学特征的时空演变规律。该研究不仅可以为草原矿区水资源管理及生态环境重建提供科学依据,而且可为煤矿闭矿后的环境影响研究与修复奠定基础。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗,面积约 100 km^2 。伊敏煤田地貌呈半封闭型的盆地,东西两侧为丘陵,南部为台地,盆地内为冲积平原,海拔在 $651\sim 673\text{ m}$,南高北低,东西两侧稍高,中心低洼。属中温带大陆性季风气候,年均气温 $-1.9\text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 354.73 mm ,年均蒸发量 $1\,341.0\text{ mm}$ 。区内主要河流为伊敏河,由南向北从研究区东部穿过,河床宽约 60 m ,河水深 $0.50\sim 2.50\text{ m}$,流速 $1.48\sim 2.05\text{ m/s}$,流量 $1.5\sim 47.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。该区在煤矿开采前分布有大小湖泊11个,较大者有伊和诺尔、巴嘎诺尔、泉流湖、哈尔呼吉诺尔和柴达敏诺尔等。除泉流湖为淡水外,其余皆为碱水湖。但近年来由于地下水抽排严重,除柴达敏诺尔外,其余湖泊已全部干涸,盐碱地分布甚广。

伊敏煤田露天区位于海拉尔盆地区域水文地质单元的径流区,区内分布有7条较大的断层,除F10为隔水断层外其余都为导水断层(图1)。在构造作用下,由东南向西北方向形成以F10、F9、F8和F5断层控制的四个单向阶梯式断块。含水层分布从上向下依次为第四系砂砾石含水层、白垩系上统伊敏组和侏罗纪上统大磨拐组煤系含水层,其中伊敏组15号、16号煤系地层在全区广泛分布,为煤系地层的主要含水层,也是该区煤矿开采的主要煤层;区域范围内起隔水作用的黏土、亚黏土层及煤系地层中的泥岩、粉砂质泥岩层等分布并不连续,因而严格地说没有完整隔水层的存在(图1)。

本区地下水的补给来源主要是大气降水,其次是地表水体(伊敏河与季节性湖泊)的补给。伊敏河切

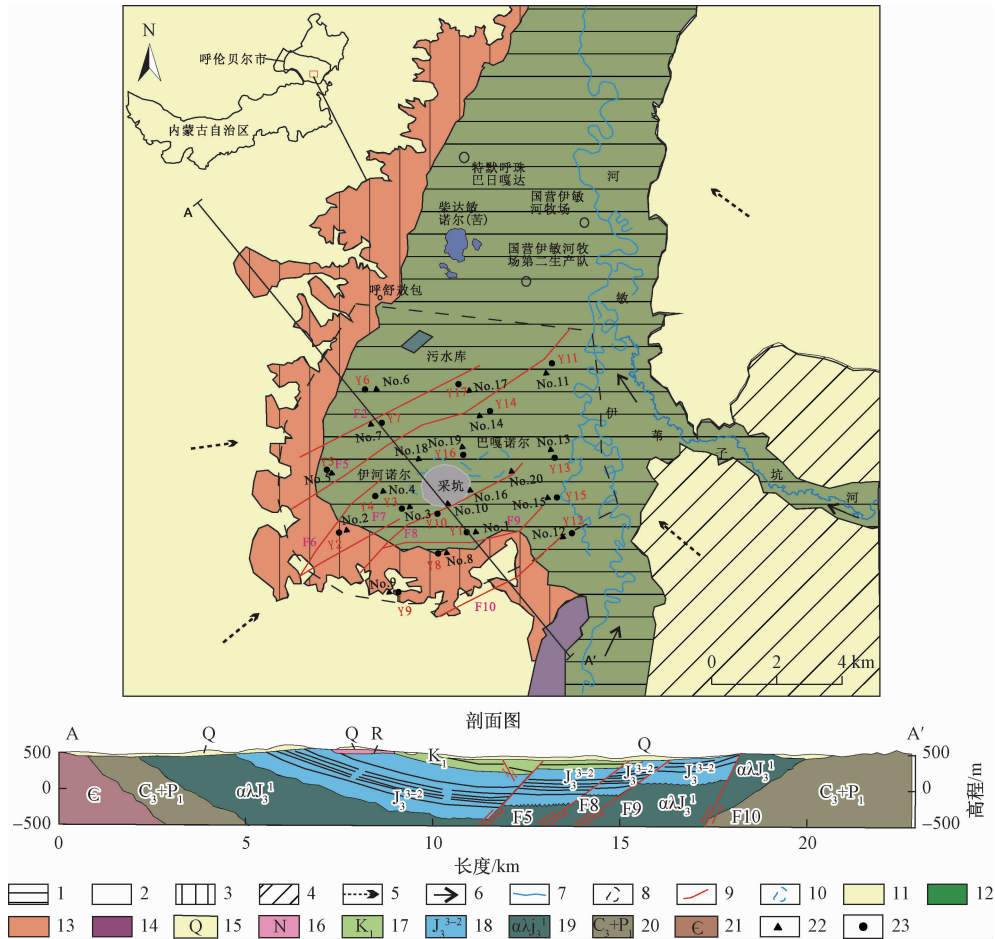


图 1 研究区地形地貌,水文地质及采样点分布图

Fig. 1 Geomorphological and hydrological conditions of the study area and location of the sampling sites

- 1—冲积地形;2—风积地形;3—坡-洪积地形;4—山区;5—地下水流向;6—河流流向;7—河流;8—研究区边界;9—断层;
 10—消失的湖泊;11—第四纪风积孔隙水水文地质区;12—第四纪冲积孔隙水水文地质区;13—第四纪坡-洪积孔隙水水文地质区;
 14—基岩裂隙水水文地质区;15—第四系;16—新近系;17—白垩系上统伊敏组;18—侏罗纪上统大磨拐组含煤段;
 19—中酸性熔岩碎屑岩;20—石炭二叠系新南沟组;21—寒武系;22—1973年采样点位置;23—2016年采样点位置

穿第四系地层和煤系地层,可直接补给第四系地层和煤系含水层。天然状况下,伊敏河水与地下水的关系为:丰水季节伊敏河水补给地下水,枯水季节地下水补给伊敏河水。在煤矿开采的影响下,伊敏河受影响河段与地下水的关系是伊敏河水补给地下水。由于各地层渗透性存在差异,地下水径流以在各地层中顺层流动为主,汇集于盆地内各含水层中,在矿区疏排水的影响下,向露天矿疏干区排泄。地表水则以地表径流的方式,汇集于盆地低洼处,或渗透于第四系地层中或以蒸发的形式排泄。

伊敏煤矿是中国五大露天煤矿之一,于 1973 年开展初步勘察工作,正式建设始于 1982 年 10 月,已经有 35 年的开发历史。矿区位于伊敏盆地南部,北起 F10 断层,南部以 F2 断层为界(图 1),面积约 42.4 km²,目

前采坑面积约有 7 km²。煤矿疏干工程于 1984 年投运,主要在采坑外围布设降水孔截流地下水,在采坑内部采用超前坑、沟等疏排剩余水。近几年平均日疏排水量约 4 × 10⁴ ~ 6 × 10⁴ m³,导致矿区地下水位大幅下降。从 1984 年开始疏排地下水至 2016 年末,采坑处疏干水位标高从 672 m 降至 558 m,总降幅达 114 m,周围第四系含水层已基本疏干。

2 材料与方法

通过资料搜集,获取 1973 年伊敏煤矿初步勘察时地下水钻孔(井)资料 20 个(包括水位、水质等资料);本项目组于 2016 年 8 月在矿区进行地下水位调查及水样采集,共对应布设 17 个地下水采样点(图 1)。水样均对以下 16 项指标进行测定:现场监测指标 4 项,

包括水温、pH值、电导率(EC)和Eh值;室内分析指标包括TDS、COD、TH、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 等。

2.1 样品采集

地下水采样井选取与1973年采样井位置及采样深度相应的具有代表性的居民水井、集中供水水源井和矿区疏排水井(图1)。样品的采集和分析方法采用中国环境保护部制定的地下水环境监测技术规范(2004年)中的具体方法。使用GPS全球定位系统对研究区采样点的位置进行精确定位;井深通过对水井拥有者的咨询调查获得。水样的温度、pH值、Eh值和EC值分别运用便携式双参数测量仪PH/ORP(SX721,上海三信)、电导率仪(SX813,上海三信)在现场监测,经过不断抽水直到各参数的读数稳定后进行记录。取样后用真空泵通过0.45 μm 的滤膜对水样进行抽滤,分别装入预清洗并灭菌的5 L、2.5 L和250 mL的聚乙烯瓶。其中5 L聚乙烯瓶装原水样;2.5 L聚乙烯瓶中加入25 mL浓硝酸酸化,用以测定重金属离子;250 mL聚乙烯瓶中加入体积比为1%的HCl酸化至pH值为1~2,用以测定 Fe^{2+} ^[23]。所有样品密封并在24 h内运回实验室,在0~4 $^{\circ}C$ 的环境下保存,进行样品测定。

2.2 分析方法

水样中可溶性金属如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 运用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Agilent 7500a, Santa Clara, CA, USA)进行分析。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 用过滤后但未经酸化的原水样通过离子色谱仪(Metrohm 761/813, Switzerland)进行测定。总硬度(TH)的测定使用乙二胺四乙酸二钠滴定法, HCO_3^- 使用酸碱指示剂滴定法进行分析,TDS用重量法进行测量,COD运用碱性高锰酸盐氧化法测定(DZ/T0064.69—1993), Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 运用火焰原子吸收分光光度法测定(DZ/T0064.25—1993)。

3 结果与讨论

3.1 矿区地下水流场演化特征

运用surfer8.0绘制矿区1973年(代表矿山开发前)以及2016年的地下水等水位线图(图2),分析矿区开发前后地下水流场变化。对比结果显示:1973年研究区地下水流场主要由地形地貌、地质构造以及区域断层控制,伊河诺尔、巴嘎诺尔为区域地下水的主要排泄区;而长期的煤矿开采活动(1982—2016年)使矿区地下水流动系统发生剧烈变化,受露天采坑和疏干

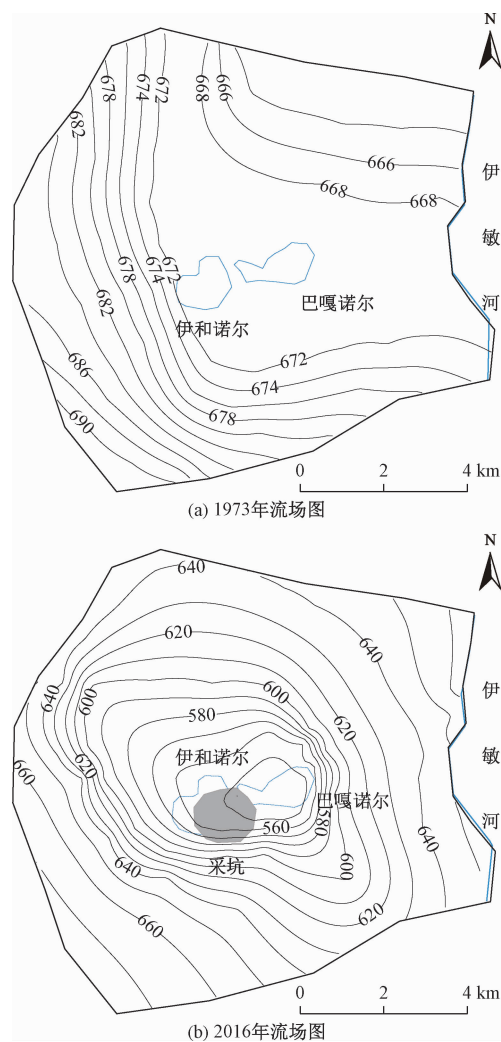


图2 1973年与2016年地下水流场对比图
Fig. 2 Distribution of groundwater flow field in 1973 and 2016

井的影响,在矿区形成巨大的降落漏斗,其面积达100 km^2 ,矿坑处地下水位降落114 m。降落漏斗强烈影响范围内,地下水由之前的水平流动为主变为以垂向流动为主,水力坡度增大,地下水流速明显加快,据计算其平均流速达到天然状态下的8倍左右^[24]。区域地下水流动系统的补给、径流和排泄条件发生明显变化,矿区东部伊敏河由采矿前的季节性补排地下水转化为向矿区方向大量补给地下水,这给伊敏河的水资源开发和矿区安全生产带来影响。

3.2 矿区地下水化学特征演化及其成因分析

3.2.1 煤矿开采前后水化学特征演化

在露天煤矿开采活动的影响下,煤矿开采前后矿区水化学成分演化特征主要表现在以下三个方面(表1):

(1) pH 值明显降低, Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 浓度升高:研究区煤矿开采前地下水 pH 值在 7.1 ~ 9.9 之间,均值为 7.91;到 2016 年,地下水 pH 值降低,均值为 7.46。 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 质量浓度较开矿前明显升高,地下水中 SO_4^{2-} 质量浓度较煤矿开采前也明显升高。

(2) Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度以及 TH 升高:矿区 TH 值与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的演化趋势相同,在煤矿开采活动的影响下均呈明显升高趋势。

(3) TDS、COD、 Na^+ + K^+ 、 HCO_3^- 等均呈降低趋势。

表 1 1973 年与 2016 年地下水样各指标统计分析

Table 1 Basic chemical and physical parameters of the groundwater samples collected in 1973 and 2016

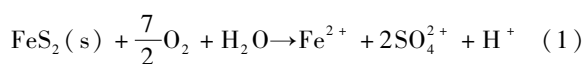
化学指标	pH	TDS	COD	TH	K^+ + Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Fe^{2+}	Fe^{3+}	
		/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)											
1973 年	极小值	7.10	102.00	BDL	16.90	7.58	4.81	1.17	163.39	2.06	4.88	BDL	BDL
	极大值	9.90	1891.00	50.88	383.54	768.77	101.70	31.03	1190.85	213.37	126.31	0.30	0.40
	均值	7.91	485.00	5.14	148.79	136.99	37.38	16.55	416.78	30.44	27.43	0.03	0.06
	标准差	0.81	455.76	12.21	76.68	196.22	22.35	7.56	261.97	50.45	33.41	0.08	0.11
2016 年	极小值	7.14	243.00	0.50	31.86	26.69	8.30	2.64	208.01	5.76	8.89	BDL	BDL
	极大值	8.04	875.00	5.72	325.55	250.81	84.63	38.87	606.53	268.56	127.95	3.90	13.50
	均值	7.46	443.82	1.97	187.46	86.97	45.08	18.06	325.88	60.26	34.05	0.63	3.31
	标准差	0.23	181.21	1.59	73.44	65.22	16.97	7.62	109.10	67.06	29.15	0.17	0.82

注:BDL 表示未检出

3.2.2 影响矿区水化学成分演化的主要因素

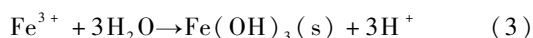
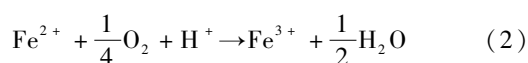
煤炭大规模开采造成矿体围岩以及含水层破坏,地表渗流条件发生变化,产生人为导水通道,增大了含水层之间的水力联系,使矿区水文地球化学环境由封闭变得相对开启,由原生的还原状态变为开放的氧化状态,促使煤层中大量的硫化物以及伴生的黄铁矿结核发生氧化作用^[14, 25]。煤矿区地下水化学成分的变化,就是 FeS_2 被氧化以及其后续一系列反应的结果^[26-27]。伊敏露天煤矿区主要煤层硫含量为 0.03% ~ 0.87%,平均 0.37%,硫主要以有机硫和黄铁矿硫的形式存在^[28-29]。

在煤矿开采过程中,矿区地下水中首先发生黄铁矿的氧化产酸过程。煤炭开采疏排地下水导致煤层及其顶板以上含水层被疏干,煤层从饱水的还原状态变为非饱水的氧化状态,其中的 FeS_2 被氧化为易溶的 FeSO_4 ,其反应方程如下:

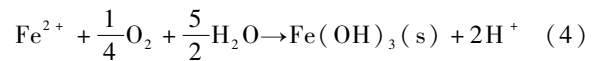


由此可见 1 mol $\text{FeS}_2(\text{s})$ 被氧化会产生 1 mol H^+ 、1 mol Fe^{2+} 和 2 mol SO_4^{2-} ,从而使地下水 pH 值降低, SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 升高。

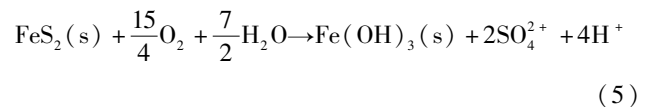
其次是 Fe^{2+} 被进入含水层中的 O_2 氧化为 Fe^{3+} 并使水中 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 处于过饱和状态产生沉淀的过程,其反应方程如下:



联合方程(2)和(3),则得:

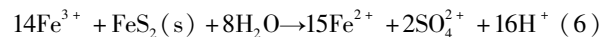


联合方程(1)和(4),则得:

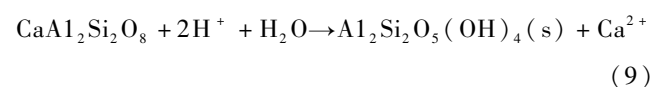
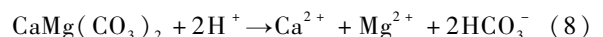
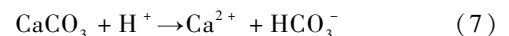


方程(5)表示:1 mol $\text{FeS}_2(\text{s})$ 全部氧化为 Fe^{3+} 且全部形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的情况,反应结果表现为水中分别产生 2 mol SO_4^{2-} 和 4 mol H^+ ,而 Fe^{3+} 离子浓度不变。而统计分析结果显示矿区地下水中 Fe^{3+} 浓度在煤矿开采过程中呈增加趋势,表明研究区地下水环境中 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 的氧化以及 Fe^{3+} 的沉淀作用反应并没有完全进行。

同时,地下水中也发生 Fe^{3+} 氧化黄铁矿的反应,其方程式为:

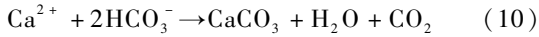


最后,由于地下水 pH 值降低,加速了钙镁碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物的溶解,反应方程式如下:



这一阶段的反应消耗 H^+ ,使 pH 值相对升高,从而使研究区地下水 pH 值在几十年的开采过程中不至于大幅下降,保持在 7.14 ~ 8.04 之间;水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度增加,硬度随之升高,同时导致 HCO_3^-

离子浓度升高。然而,由于煤矿开采疏排地下水,矿区潜水位以及深层承压水水压大幅下降,地下水中有显著的脱碳酸作用发生^[30],反应方程式为:

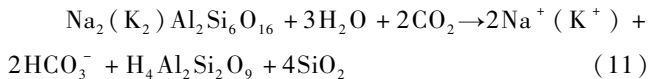


脱碳酸作用使矿区地下水 HCO_3^- 离子浓度降低。由此可见脱碳酸作用对于研究区 HCO_3^- 离子浓度演化的影响大于碳酸盐岩的溶解作用,使矿区地下水中 HCO_3^- 离子浓度总体呈降低趋势。

矿区水文地球化学环境由还原状态转化为氧化状态的过程,使原本赋存于地下水及含水地层中的有机物等还原性物质被氧化,COD 浓度不断降低。

3.3 矿区地下水化学类型演化及其成因分析

通过 Piper 三线图法(图3)和库尔洛夫式的计算(表2)发现,在研究区未开矿之前,地下水水化学类型以 $HCO_3-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型为主,其中阴离子主要以 HCO_3^- 为主,阳离子主要以 Na^+ 为主,其次为 Ca^{2+} 。这是矿区碳酸岩盐(方程(7)、(8))和长石类矿物(方程(11))等风化溶解作用的结果。



2016年地下水采样分析结果显示,矿区水化学类型以 $HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型为主,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主。从 Piper 三线图(图3)中可以看出,开矿前采样点 SO_4^{2-} 毫克当量百分数大部分在 0~10% 之间,只有伊河诺尔和巴嘎诺尔两个浅层地下水水样在 30% 左右;而开矿后采样点 SO_4^{2-} 毫克当量百分数均在 10%~45% 之间。开矿前 HCO_3^- 毫克当量百分数大部分在 80%~99% 之间,只有伊河诺尔和巴嘎诺尔两个浅层地下水水样在 70% 左右;而开矿后采样点 HCO_3^- 毫克当量百分数主要分布在 40%~90% 之间。相比于开矿前 SO_4^{2-} 含量明显增多,而 HCO_3^- 减少,采矿区地下水化学类型正由重碳酸型向重碳酸—硫酸型过渡,水化学类型由单一趋向多元,由简单向着复杂化的方向发展。这主要是煤矿开采活动引发的黄铁矿氧化以及脱碳酸作用共同影响的结果。

3.4 矿区地下水部分化学指标空间分布特征及成因分析

煤矿开采前后各指标空间分布(图4)显示,1973年 pH 值最高区域主要分布在伊和诺尔与巴嘎诺尔两个咸水湖地区,均达到 9.0 以上;煤矿开采使湖泊消失,湖泊所在位置变为露天开采区,pH 值明显降低,在 7.4 左右,成为全区 pH 值最低的区域。这与矿区煤层中含硫化合物以及黄铁矿等的氧化产酸作用密切相

关^[31-33],如反应(1)。

表2 地下水样库尔洛夫式计算结果统计

Table 2 Kurllov's formula for the groundwater samples

1973年库尔洛夫式 计算水化学类型	个数	2016年库尔洛夫式 计算水化学类型	个数
$HCO_3-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型	11	$HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型	7
$HCO_3-Ca \cdot Na \cdot Mg$ 型	3	$HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型	2
$HCO_3-Na \cdot Mg \cdot Ca$ 型	1	$HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl-Ca \cdot Na \cdot Mg$ 型	2
$HCO_3 \cdot CO_3-Na$ 型	3	$HCO_3-Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型	3
HCO_3-Na 型	1	$HCO_3-Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型	1
		$HCO_3 \cdot Cl-Na$ 型	1
		$HCO_3 \cdot Cl-Ca \cdot Na \cdot Mg$ 型	1

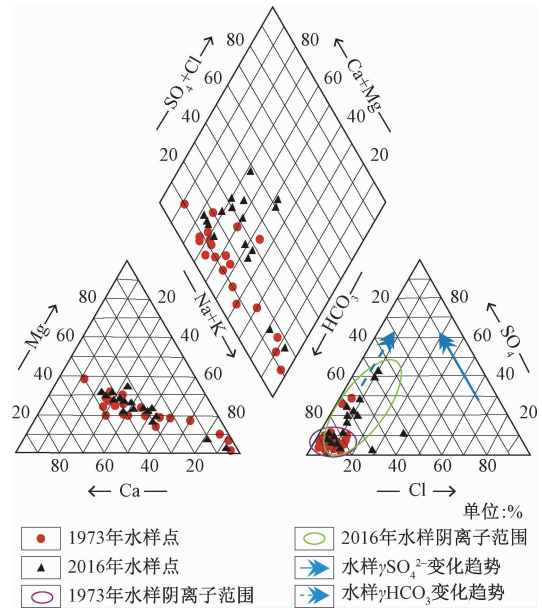


图3 1973年与2016年地下水Piper三线图

Fig. 3 Piper diagram showing the groundwater samples collected in 1973 and 2016

SO_4^{2-} 离子浓度空间分布图显示,煤矿开采前, SO_4^{2-} 离子高浓度区主要分布在研究区南侧地下水的径流区,最高值为 170 mg/L 左右;而在煤矿开采活动的影响下,全区 SO_4^{2-} 离子浓度普遍升高,由东南向西北逐渐降低,其中采坑的东南部均为煤矿的采空区,露天煤矿开采活动破坏了地下水天然的封闭环境,黄铁矿及煤炭等含硫化合物发生氧化反应,使 SO_4^{2-} 离子浓度在全区大幅升高,如反应(1)(图4)。

TH 值、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的空间分布特征相似,煤矿开采前矿区总硬度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子由南侧丘陵区沿地下水流动,向北逐渐降低,在伊敏煤矿井采样点处最高。据资料记载,1973年该处有较小规模的煤矿开采活动,地下水一定程度受到黄铁矿氧化产酸的影响,加速了方解石白云石等碳酸盐岩的溶解作用,使该处

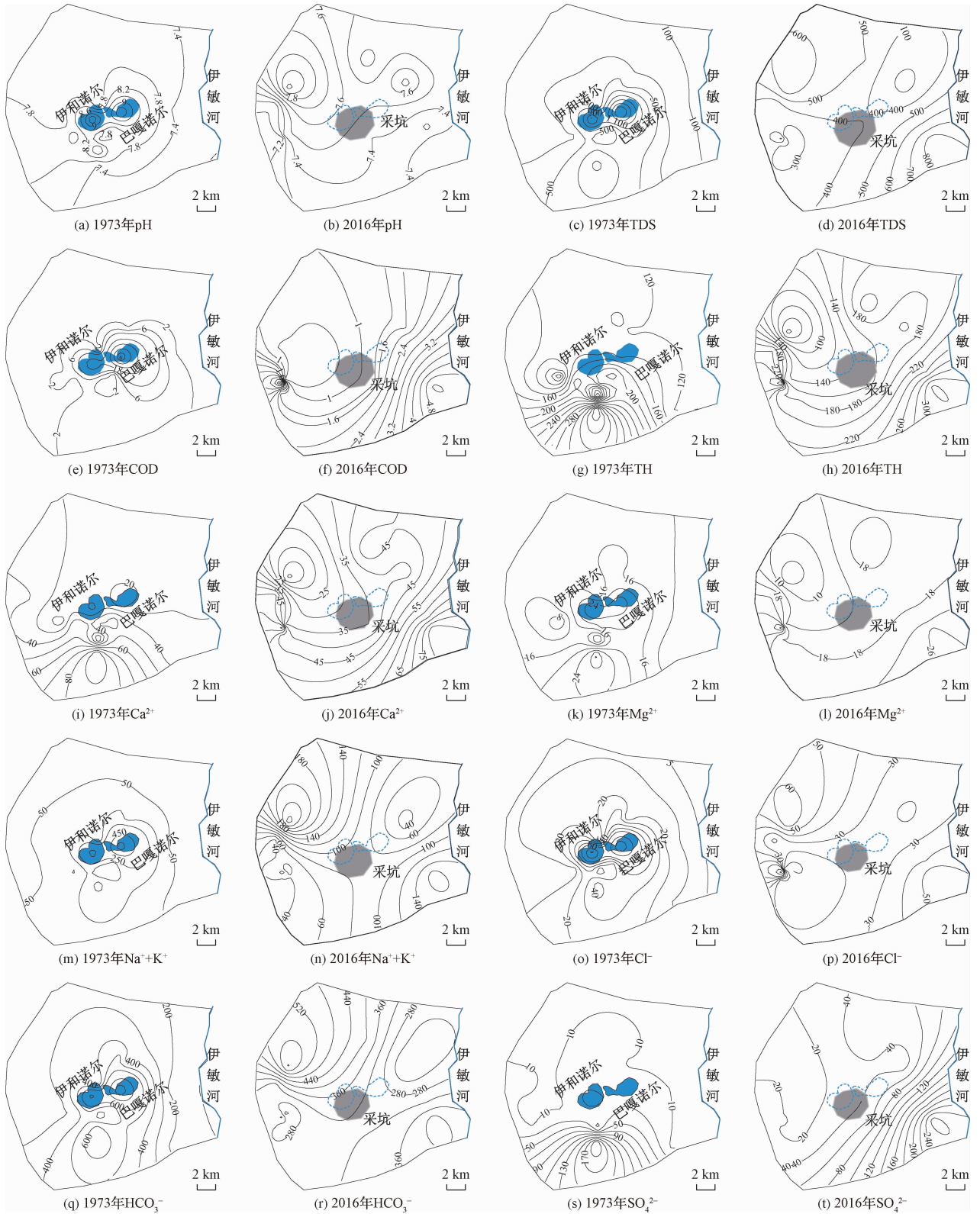


图 4 1973 年与 2016 年研究区重要指标空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of concentrations of the hydro-chemical indicators in 1973 and 2016

Ca²⁺、Mg²⁺ 离子升高,总硬度随之增加;到 2016 年,矿区 TH 值、Ca²⁺、Mg²⁺ 离子浓度在东南部最高,向西北

方向逐渐降低(图 4)。

从 1982 年伊敏露天煤矿投运至今,研究区地下水

流场经历了剧烈变化。在1973年煤矿开采前的天然状况下,伊河诺尔与巴嘎诺尔两个湖淖作为研究区地下水的主要排泄区,强烈的蒸发浓缩作用使地下水以及地表水含盐量不断增加,有机物累积。从图4可以看出,研究区地下水TDS、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等化学指标浓度在1973年煤矿开采前的最高值均分布于伊河诺尔与巴嘎诺尔处,其中TDS浓度在1000 mg/L以上;COD值在20 mg/L以上; $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 与 Cl^- 离子质量浓度分别在450 mg/L及60 mg/L以上; HCO_3^- 在600 mg/L以上(图4)。而在煤矿开采活动的影响下,两个湖淖消失,取而代之的是矿井强烈疏排地下水,以矿坑为中心形成巨大的降落漏斗,地下水循环更新速度大幅增加,不断的溶滤作用和稀释作用使地下水向着淡化的方向发展,形成以矿坑为中心的离子低浓度区。其中TDS与COD浓度分别在400 mg/L及1 mg/L左右; $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 离子质量浓度降低为40 mg/L左右; Cl^- 离子浓度在30 mg/L以下; HCO_3^- 离子浓度降低为300 mg/L左右(图4)。最终导致矿坑处由采矿前的离子高浓度区转换为采矿后的离子低浓度区。

4 结论

(1) 煤矿开采活动使矿区原生的还原环境转化为氧化环境,促使煤层中的黄铁矿发生氧化。研究区水化学成分及水化学类型的演化均是黄铁矿氧化、产酸以及后续一系列反应的结果。

(2) 煤矿开采前后矿区水化学成分演化特征主要表现在pH值明显降低,而 SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、TH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等浓度升高;TDS、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 等呈降低趋势。矿区地下水水化学类型由煤矿开采前的 $\text{HCO}_3^- - \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主演化为以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主,由简单向着复杂化的方向发展。

(3) 伊敏露天煤矿投运至今,研究区地下水流场经历了剧烈变化。煤矿开采前天然状况下,伊河诺尔与巴嘎诺尔两个湖淖是研究区地下水的主要排泄区,强烈的蒸发浓缩作用使地表水以及地下水含盐量不断增加,有机物累积,地下水TDS、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等化学指标浓度最高值均分布于此。而在煤矿开采强烈疏排地下水的影响下,地下水循环更新速度大幅增加,不断的溶滤和稀释作用使地下水向着淡化的方向发展,形成以矿坑为中心的离子低浓度区。

参考文献:

- [1] SUN W, WU Q, LIU H, *et al.* Prediction and

assessment of the disturbances of the coal mining in Kailuan to karst groundwater system [J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c*, 2015, s 89 - 90 (1):36 - 44.

[2] HUISAMEN A, WOLKERSDORFER C. Modelling the hydrogeochemical evolution of mine water in a decommissioned opencast coal mine[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 164:3 - 12.

[3] 宋晓猛, 杨森, 刘勇, 等. 矿区地下水环境演化的模拟试验研究[J]. *金属矿山*, 2010(9):159 - 161. [SONG X M, YANG M, LIU Y, *et al.* Simulation experiment on groundwater environment evolution of coal mining district [J]. *Metal Mine*, 2010(9):159 - 161. (in Chinese)]

[4] 许多涛. 都江堰白依庵泥岩矿山开采的地下水环境效应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2006. [XU D T. Study of groundwater environmental effect caused by the exploitation of Baiyi'an Mudstone Mine in Dujiangyan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese)]

[5] 尹国勋. 矿山环境保护[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 2010:15 - 16. [YIN G X. Mine environment protection[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2010:15 - 16. (in Chinese)]

[6] 朱君, 张永波, 安瑞瑞. 露天煤矿开采后地下水疏干范围研究[J]. *人民黄河*, 2012, 34(12): 91 - 93. [ZHU J, ZHANG Y B, AN R R. Opencast coal mine drainage of the groundwater exploitation research scope [J]. *Yellow River*, 2012, 34(12): 91 - 93. (in Chinese)]

[7] ZAKIR H M, ISLAM M M, ARAFAT M Y, *et al.* Hydrogeochemistry and quality assessment of waters of an open coal mine area in a developing country: A case study from Barapukuria, Bangladesh [J]. *International Journal of Geosciences Research*, 2013, 1(1):20 - 44.

[8] NORDSTROM D K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(11): 1777 - 1791.

[9] GIBERT O, RÖTTING T, CORTINA J L, *et al.* In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1): 287 - 295.

[10] 施南迪, 董少刚. 采用离石黄土原位修复煤矸石渗

- 滤液污染地下水[J]. 环境科学研究, 2013, 26(10): 1110 - 1117. [SHI N D, DONG S G. The study on repairing groundwater contamination polluted by coal gangue leachate by means of Lishi Loess[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(10): 1110 - 1117. (in Chinese)]
- [11] NORDSTROM D K, BLOWES D W, PTACEK C J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update[J]. Applied Geochemistry, 2015, 57:3 - 16.
- [12] KARAN S K, SAMADDER S R, MAITI S K. Assessment of the capability of remote sensing and GIS techniques for monitoring reclamation success in coal mine degraded lands[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182(1):272 - 283.
- [13] PINETOWN K L, WARD C R, WESTHUIZEN W A V D. Quantitative evaluation of minerals in coal deposits in the Witbank and Highveld Coalfields, and the potential impact on acid mine drainage [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/2/3): 166 - 183.
- [14] UTOM A U, ODOH B I, EGBOKA B C E. Assessment of hydrogeochemical characteristics of groundwater quality in the vicinity of Okpara coal and Obwetti fireclay mines, near Enugu town, Nigeria [J]. Applied Water Science, 2013, 3(1): 271 - 283.
- [15] GOMO M, VERMEULEN D. Hydrogeochemical characteristics of a flooded underground coal mine groundwater system [J]. Journal of African Earth Sciences, 2014, 92(4): 68 - 75.
- [16] EQUENUDDIN S M, TRIPATHY S, SAHOO P K, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of acid mine drainage and water pollution at Makum Coalfield, India[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 105(3): 75 - 82.
- [17] SUN J, TANG C, WU P, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of streams with and without acid mine drainage impacts: A paired catchment study in karst geology, SW China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 504(22): 115 - 124.
- [18] 黄学文, 王明莹, 李杰, 等. 呼伦贝尔草地野生禾本科牧草生态地理区系研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2013, 45(2): 107 - 111. [HUANG X W, WANG M Y, LI J, *et al.* Study on the ecological and geographical flora of wild gramineous grass in Hulunber steppe [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 107 - 111. (in Chinese)]
- [19] 朱立博, 王世新, 王宇, 等. 呼伦贝尔草原保护的对策思考[J]. 草业与畜牧, 2008(5): 27 - 31. [ZHU L B, WANG S X, WANG Y, *et al.* Countermeasures for Hulun Buir grassland's protection [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2008(5): 27 - 31. (in Chinese)]
- [20] 马永茂, 鞠兴军. 呼伦贝尔市矿山地质环境问题及防治措施[J]. 露天采矿技术, 2012(1): 85 - 88. [MA Y M, JU X J. Mining geological environment problems and prevention measures in Hulun Buir[J]. Opencast Mining Technology, 2012(1): 85 - 88. (in Chinese)]
- [21] 姬广青. 露天煤矿开采对地下水环境的影响研究 - 以伊敏一号露天矿为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013. [JI G Q. Study of the impacts of strip mining on the groundwater environment - take YIMIN NO.1 open pit as an example [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2013. (in Chinese)]
- [22] 卓义, 于凤鸣, 包玉海. 内蒙古伊敏露天煤矿生态环境遥感监测[J]. 内蒙古师大学报(自然汉文版), 2007, 36(3): 358 - 362. [ZHUO Y, YU F M, BAO Y H. Remote sensing monitor of the ecological environment of the Yimin open coal Mine in Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2007, 36(3): 358 - 362. (in Chinese)]
- [23] HU S, LUO T, JING C. Principal component analysis of fluoride geochemistry of groundwater in Shanxi and Inner Mongolia, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 135: 124 - 129.
- [24] 冯海波. 内蒙古呼伦贝尔草原露天煤矿区地下水系统演化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017. [FENG H B. Groundwater system evolution of the opencast coalmine area in Hulun Buir ptairie, Inner Mongolia, north China [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2017. (in Chinese)]
- [25] MEANS B, BEAM P G R, MERCER J. Analysis of hydrated lime consumption in circumneutral underground coal mine drainage treatment[J]. Mine Water & the Environment, 2015, 34(1): 10 - 19.
- [26] GAMMONS C H, DUAIME T E, PARKER S R, *et al.* Geochemistry and stable isotope investigation of acid mine drainage associated with abandoned coal mines in central Montana, USA [J]. Chemical Geology, 2010, 269(1/2): 100 - 112.

- [27] BURROWS J E, PETERS S C, III C A C. Temporal geochemical variations in above-and below-drainage coal mine discharge [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 62:84 - 95.
- [28] 周强. 中国煤中硫氮的赋存状态研究[J]. *煤质技术*, 2008, 14(1):73 - 77. [ZHOU Q. Study on occurrence mode of sulfur and nitrogen in coal in China[J]. *Coal Quality Technology*, 2008, 14(1):73 - 77. (in Chinese)]
- [29] 高连芬, 刘桂建, Chou, 等. 中国煤中硫的地球化学研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(1):79 - 87. [GAO L F, LIU G J, CHOU C L, *et al.* The study of sulfur geochemistry in Chinese coals [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(1):79 - 87. (in Chinese)]
- [30] RYUH Y G, DO H K, KIM K H, *et al.* Vertical hydrochemical stratification of groundwater in a monitoring well: Implications for groundwater monitoring on CO₂ leakage in geologic storage sites [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114:3863 - 3869.
- [31] BLOWES D W, PTACEK C J, JAMBOR J L, *et al.* The Geochemistry of Acid Mine Drainage [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014:131 - 190.
- [32] 臧红飞, 郑秀清, 张永波, 等. 柳林泉域岩溶水中 SO₄²⁻ 的来源探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1):9 - 15. [ZANG H F, ZHENG X Q, ZHANG Y B, *et al.* Source of SO₄²⁻ in karst groundwater in the Liulin spring area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1):9 - 15. (in Chinese)]
- [33] 李小倩, 张彬, 周爱国, 等. 酸性矿山废水对合山地下水污染的硫氧同位素示踪[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6):103 - 109. [LI X Q, ZHANG B, ZHOU A G, *et al.* Using sulfur and oxygen isotopes of sulfate to track groundwater contamination from coal mine drainage in Heshan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6):103 - 109. (in Chinese)]

编辑:汪美华

(上接第 162 页)

- [15] 魏来. 降雨诱发滑坡预测模型研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013. [WEI L. Study on the prediction model of landslide induced by rainfall [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)]
- [16] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):1055 - 1060. [GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early - warning and prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5):1055 - 1060. (in Chinese)]
- [17] 孟庆丰, 王学良. 北京怀柔区降雨引发地质灾害危险性预测[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2):167 - 170. [MENG Q F, WANG X L. Geo - hazard assessment and prediction induced by rainfall in Huairou district of Beijing China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2):167 - 170. (in Chinese)]
- [18] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(1):33 - 35. [LI T F, CONG W Q. A method for rainfall-induced landslides prediction based on Logistic regression and effective antecedent rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(1):33 - 35. (in Chinese)]

编辑:汪美华