

煤炭开采后峰峰矿区奥陶系岩溶水 硫酸盐演化过程研究

郝春明¹,何培雍¹,王议¹,侯双林²,董建芳²

(1. 中国地质环境监测院,北京 100081;2. 河北省地质环境监测总站,河北 石家庄 050021)

摘 要:文章运用水化学和同位素水文学等手段,寻求奥陶系岩溶水硫酸盐演化过程的“指纹”,通过不同含水层间水化学、稳定同位素差异的比对,分析其与上覆含水层间的水力联系和疏动力分馏过程,阐述采矿活动影响下峰峰矿区奥陶系岩溶水硫酸盐的演化过程。研究结果表明:煤矿开采后,峰峰矿区奥陶系岩溶水硫酸盐含量普遍增高,演化特征呈现多样性,存在多种疏动力分馏过程。分馏动力主要来自矿坑水和孔隙水通过导水裂隙的渗漏(越流)补给,以及脱白云石化过程中自身蒸发岩矿物(石膏)的溶解。

关键词:同位素;硫酸盐;水力联系;岩溶地下水;采煤活动

中图分类号:P597+.2;P641 **文献标识码:**A

0 引 言

峰峰煤炭矿区奥陶系岩溶水系统隶属于邯邢南单元黑龙洞泉域,黑龙洞泉是我国北方著名的岩溶大泉之一,一直被作为冀中地区工农业生产和生活的重要供水水源。然而,近几年来,由于泉域内的煤矿大规模高强度的开采,岩溶地下水的水位和水量持续下降,闫玉梅等^[1]长期监测发现:20世纪90年代后,矿区奥陶系岩溶水水位年平均衰减1.5 m左右,径流区水位标高由原来的130~139 m降至110 m左右,黑龙洞泉群流量也由多年平均11.0 m³/s衰减到1.0 m³/s(2005年),甚至断流(2009年)。更让人担忧的是,高强度的开采还破坏了含水层结构,引发了地下水的越流补给,造成奥陶系岩溶水水质恶化,尤其是硫酸盐普遍增高^[2-3],严重威胁着矿区饮用水的安全。矿区奥陶系岩溶水硫酸盐含量普遍增高已成为阻碍煤矿开采和保障饮水安全的重大瓶颈,为避免这一事件的发生,探究其演化及成因是预防的关键。

然而,硫酸盐含量增高的演化过程,还未曾深入研究。

环境稳定同位素在解决含水层间的水力联系,溶质运移等方面已得到了很好的应用,比如杨郟城等^[4]利用氢氧同位素分析了鄂尔多斯盆地浅层地下水的补径排关系,陈陆望等^[5]利用氢氧同位素进行了皖北煤矿区深层地下水的水循环示踪,并判别其来源。李思亮等^[6]利用碳同位素示踪了贵阳地下水碳的地球化学循环过程。水化学方法如离子比值法、多元统计法、饱和系数法和水文地球化学模拟等在刻画地下水水质演化过程中也起着重要的作用,如李义连等^[7]曾尝试利用离子比值法分析煤矿开采后娘子关泉域地下水硫酸盐的污染,并运用地球化学软件PHREEQC模拟了其水岩作用过程。越来越多的学者^[8-9]认为任何单一的方法,都不能完全反映地下水中溶剂和溶质组分的来源和演化过程。因此,多种方法并用,互相验证成为当前研究的热点。

为此,我们利用奥陶系岩溶水硫酸盐为媒介,尝试运用水文地球化学和环境同位素等多种手段,分析

资助项目:国家级地质环境监测与预报专项(项目编号:1210800000022-6);资源城市地下水基础环境状况调查与评估(项目编号:2011A113)

第一作者简介:郝春明(1978-),男,高工,博士,研究方向:矿山地质环境调查与监测。E-mail:haoqm@mail.cigem.gov.cn。

收稿日期:2014-09-19

讨论奥陶系岩溶水硫酸盐演化过程,以期为区域岩溶水资源保护和加强煤炭资源开发利用管理提供重要的科学依据。

1 矿区水文地质条件概况

峰峰煤炭矿区位于祁吕贺山字型构造前弧东翼边缘,新华夏系第三隆起带与第二沉降带连接处。按其含水岩性、含水介质特征和埋藏条件,矿区主要赋存寒武系鲕状灰岩裂隙岩溶含水层、奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层、石炭系太原统薄层灰岩裂隙含水层组、二叠系山西组砂岩裂隙孔隙含水层和第四系洪积一坡积砂土孔隙含水层。奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层是矿区主要的含水层,它是以西部山区和中部灰岩裸露区降雨补给,构造断陷盆地强径流,石炭一二叠系煤层阻隔以泉群方式排泄为主的水文地质单元;含水介质为一套碳酸盐岩海相沉积地层,以角砾状灰岩、厚层花斑灰岩、纯灰岩、薄层灰岩和泥灰岩等组成,局部富含石膏,总厚度 470~584 m,裂隙发育,以溶孔和溶隙为主。

2 取样与测试

2012年9月和10月共采集了水样品27件,其中奥陶系灰岩裂隙岩溶水(奥陶系岩溶水)样品15件,石炭系太原统薄层灰岩裂隙岩溶水(太原统岩溶水)样品2件,矿坑水样品4件,第四系孔隙水(孔隙水)样品4件,地表水样品2件,奥陶系岩溶地下水样品点分布如图1所示,A-A'剖面图见图2。

样品采集前,先用蒸馏水洗涤2~3遍,再用样品水涮洗2~3遍,最后再将采集的水样过滤后装入1000 mL玻璃瓶中。每个样品采集5瓶,其中原水,加酸(稀HNO₃),加碱(NaOH)和稳定同位素样品各一瓶。测定硫同位素的样品中加入10% BaCl₂溶液,搅拌均匀后使溶液中的SO₄²⁻离子全部转化成BaSO₄沉淀,过滤并清洗沉淀后装入样品瓶中备检。

系统编号后,全分析样品送往河北省水环境监测实验中心实验室,氢氧同位素样品送往中国地质科学院水文地质环境地质研究所,硫同位素样品送往中国地质科学院矿产资源研究所进行测试。原水样品控制从采样到测定的时间不超过30天,酸化和碱化水样分别控制不超过10天和2天。为监控采样质量,

按不低于5%的采样比例采集平行样;每批次样品均按比例插入标准物质,重复试样和空白样,同时随机抽取20%的试样作为检查分析样,确保每批次重复分析相对偏差合格率不低于90%。

水化学指标Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺稳定同位素D和¹⁸O分别依据GB/T8538-2008、JY/T015-1996和DZ/T0064-93标准进行测试,其中Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺等采用滴定法;SO₄²⁻等采用离子色谱法;NO₃⁻等采用紫外分光光度法;K⁺、Na⁺等采用火焰发射光谱法;氢氧同位素测试采用连续流Gashench II-IRMS方法,³⁴S采用V₂O₅-SiO₂-铜丝法。氢氧同位素和³⁴S的测定值均为相对于国际标准CDT值,测定精度优于±0.2‰。

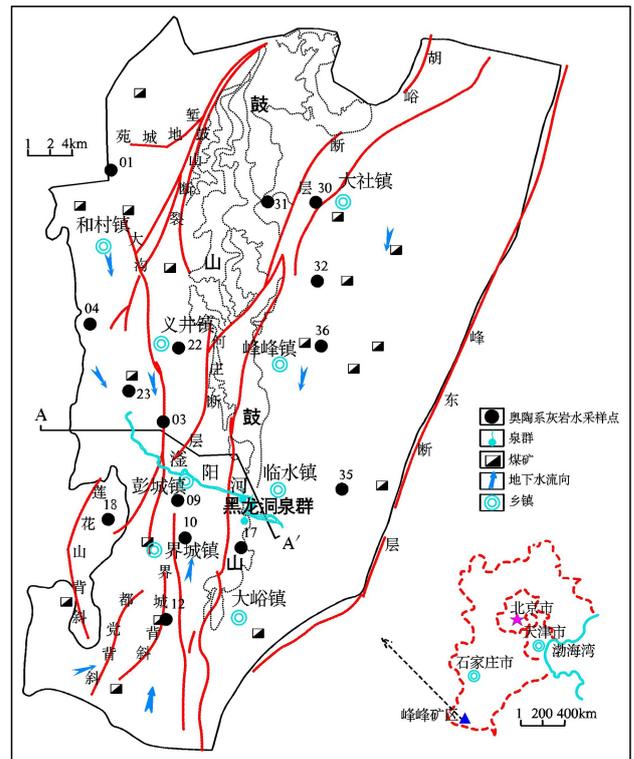


图1 峰峰矿区奥陶系岩溶地下水采样点分布图
Fig. 1 Ordovician karst groundwater sampling points in the Fengfeng coal mining area

3 结果与分析

矿区地下水与地表水主要水化学成分和稳定同位素δD、δ¹⁸O和δ³⁴S分析测试结果见表1所示,水化学三线图,SO₄²⁻和δ³⁴S箱式统计图见图3、图4。

3.1 煤矿开采后奥陶系岩溶水水化学和稳定同位素特征

受含水岩性和介质控制明显,煤矿开采后奥陶系岩溶水阳离子仍以 Ca^{2+} 为主,含量分布于 81.0~248.5 mg/L 之间,平均值为 111.9 mg/L;阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, HCO_3^- 含量分布于 241.6~327.1 mg/L 之间,平均值为 274.38 mg/L;硫酸盐含量分布于 59.9~477.1 mg/L 之间,平均值为 145.6 mg/L。水化学类型仍以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型为主,但少数奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 含量明显增高,水化学特征趋向于矿坑水和孔隙水,演化成 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型等。

煤矿开采后,奥陶系岩溶水稳定同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 分布于 -3.9% ~ 10.5% 之间,平均值为 4.19% ; δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别分布于 -69% ~ -63% 和 -9.7% ~ -8.3% 之间。奥陶系岩溶水稳定同位素呈现较强的差异性,表明煤矿开采后,其补给来源和硫动力分馏向多样性和差异性发展。

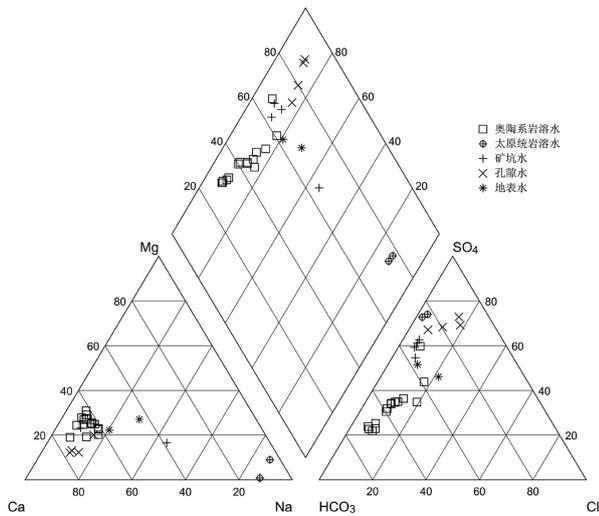


图 3 水化学类型图

Fig. 3 Classification of mine water using Piper diagram

不同水体间硫酸盐和稳定同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 的差异(图 4),与水动力和水文地球化学过程的不同有关。太原统灰岩含水层较薄,且岩溶发育差异较大,导致水动力条件呈现显著的非均匀性。太原统岩溶水因径流速率慢,更新速率低,往往呈现出高硫酸盐,高矿化度的特征^[10]。高 $\delta^{34}\text{S}$ 可能是由于深部滞缓交替环境下,生物细菌还原活动引起硫同位素动力分馏。由于溶解了煤系中的黄铁矿,矿坑水的硫酸盐偏高, $\delta^{34}\text{S}$ 则往往小于 0。大多数奥陶系岩溶水硫酸盐含量最低,而 $\delta^{34}\text{S}$ 则介于太原统灰岩水和矿坑水之间。孔隙水因受到土壤 S 的动力分馏, $\delta^{34}\text{S}$ 值往往更接近

于 0。

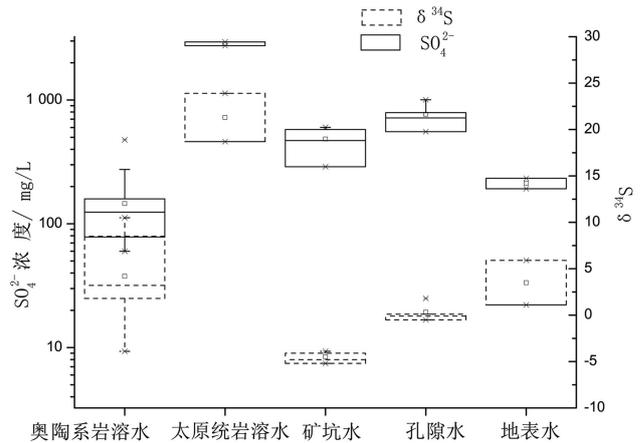


图 4 不同水体 SO_4^{2-} 和 $\delta^{34}\text{S}$ 值统计分布图

Fig. 4 SO_4^{2-} and $\delta^{34}\text{S}$ for different water bodies

3.2 煤矿开采后奥陶系岩溶水硫酸盐的演化特征

煤矿开采后,峰峰矿区奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 、溶解性总固体(TDS)和 Cl^- 分布如图 5。郝春明等^[11]曾将该地区 $\text{Cl}^- \leq 25.5 \text{ mg/L}$, $\text{TDS} \leq 550 \text{ mg/L}$ 设定为煤矿开采前(1980 年)奥陶系岩溶水的背景浓度。图 5 中可明显看出,煤矿开采后,36 号、23 号、32 号、09 号、35 号和 17 号奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 含量明显高于背景浓度,说明煤矿开采会引起部分奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 含量的升高,该现象与王焰新等^[12]调查煤矿开采前后娘子关泉域岩溶地下水环境演化规律吻合。

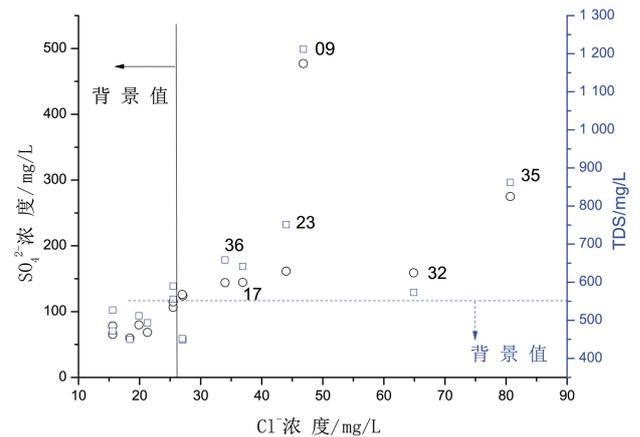


图 5 奥陶系岩溶水 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TDS 关系图

Fig. 5 Relationship among Cl^- , SO_4^{2-} and TDS in groundwater from the Ordovician karst aquifer

然而,煤矿开采后,该地区奥陶系岩溶水硫酸盐演化特征呈现多样性,反映出不同的硫动力分馏过程。23 和 35 号奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 TDS 值均有大幅度增高,且增高都很明显;32 号和 09 号奥陶系岩溶水,虽然 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 TDS 值都有增高,但

Cl⁻ 含量增高幅度远高于 SO₄²⁻ 和 TDS 值;36 号和 17 号奥陶系岩溶水 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 TDS 值虽都有小幅增高,但增高幅度却不显著。

3.3 煤矿开采后奥陶系岩溶水硫酸盐的演化过程

用相对稳定的硫同位素组分的测定,可以示踪环境中硫的来源、迁移和归宿,SO₄²⁻ 含有不同的 δ³⁴S 值,据此可判别水体硫的来源^[13]。

张江华等^[14]曾认为以奥陶系碳酸盐岩为含水介质的中国北方多数岩溶地下水浅循环系统中,岩溶水硫酸根的主要来源有中奥陶统石膏的溶解、岩溶含水层上覆煤系地层中黄铁矿氧化溶解并补给岩溶水以及与土层密切相关的地表水中硫酸根的加入。

不同水体 δD 和 δ¹⁸O 关系图(图 6)中,受蒸发效应明显,绝大多数奥陶系岩溶水 δD 和 δ¹⁸O 值位于大气降雨线之下,表明煤矿开采后,大多数岩溶水的补给来源仍为大气降雨,而位于大气降雨线上的个别点可能存有二次蒸发效应。23 号、09 号、17 号、32 号、35 号和 36 号奥陶系岩溶水的 δD 和 δ¹⁸O 值分布在太原统岩溶水、矿坑水、地表水和孔隙水之间,表明其可能与除大气降雨入渗补给外,还存在其它补给源。

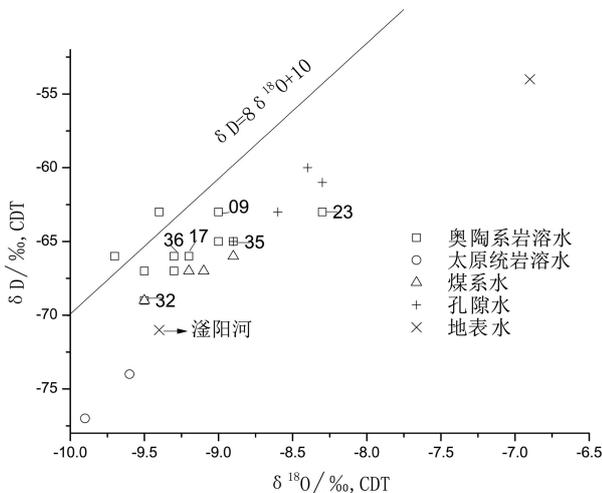


图 6 不同水体 δD 和 δ¹⁸O 分布图

Fig. 6 Relationship between δD and δ¹⁸O in different water bodies

δD-δ¹⁸O 变化主要与水体的蒸发有关,δ³⁴S 与水样中硫酸根的溶解和沉淀有关^[15]。图 7 中,32 号和 09 号奥陶系岩溶水 δ³⁴S 和 δ¹⁸O 值都偏离背景区域,偏向矿坑水,表明 32 号和 09 号奥陶系岩溶水可能受到了矿坑水的混合,可能溶入了高硫酸盐和低 δ³⁴S 的矿坑水,发生了硫的动力分馏作用。

传统观念普遍认为:峰峰矿区奥陶系岩溶水为典型的“单斜构造分散径流集中排泄奥陶系岩溶水系统”,奥陶系岩溶水水位远高于煤层。高承压水压下,

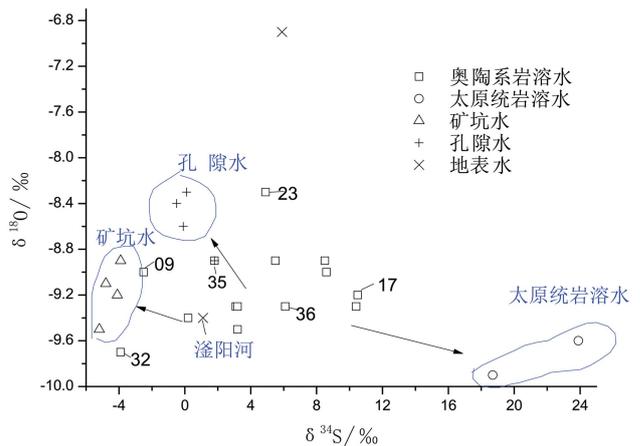


图 7 不同水体 δ¹⁸O 与 δ³⁴S 分布图

Fig. 7 Relationship between δ¹⁸O and δ³⁴S in different water bodies

井田矿坑水一般不会向下伏岩溶含水层补给^[16-17]。但 09 号和 32 号的数据明显与传统观念相违背,可能的原因有 2 种:①由于煤层的长期大规模开采,采空塌陷造成下覆底板的原构造裂隙进一步发育,当奥陶系岩溶水水位持续下降到低于煤层标高时,煤系地层中黄铁矿暴露于空气中,从而加速了黄铁矿的氧化,形成高硫酸盐和低 δ³⁴S 值的矿坑水,并通过导水裂隙,断裂或岩溶塌陷柱等越流渗漏补给奥陶系岩溶水,造成奥陶系岩溶水 SO₄²⁻ 值增高。②煤矿开采后形成众多大小不等的采空区,待采空区蓄水后,当矿井闭坑停产后,奥陶系岩溶水水位缓慢恢复上升。当超过煤系地层底板标高后,高硫酸盐和低 δ³⁴S 值的采空区充水与奥陶系岩溶水混合,也造成了其 SO₄²⁻ 值增高。

图 7 中 23 号和 35 号奥陶系岩溶水 δ³⁴S 和 δ¹⁸O 值偏离背景区域趋于孔隙水,而远离地表水、矿坑水和太原统岩溶水。其 δ³⁴S 与 NO₃⁻ 值(图 8)明显高于其他奥陶系岩溶水,也趋于孔隙水特征,表明其可能受到了孔隙水的补给,混合了孔隙水中的硫。

发生越流补给的可能原因为:石炭一二叠煤层的开采出现了众多地下采空区,而传统的采煤方式又都是以顶板自然垮落为主的采空区管理模式。当煤层顶板岩石拉应力超过自身允许强度时,随着开采强度的扩大和采空区面积的增大,直接和间接顶板在重力作用下破碎、垮落,根据地质条件的不同会出现“冒落带”、“断裂带”和“弯曲带”,其中“冒落带”和“断裂带”一般统称为“导水裂隙带”。当导水裂隙带的高度超过煤层的直接顶(煤层)和关键顶(隔水层)的厚度时,煤层上覆含水层(孔隙水)会沿着导水裂隙进入采空区,进而补给奥陶系岩溶水,所携带的大气降水硫和

土壤硫等造成了奥陶系岩溶水 SO_4^{2-} 值增高。

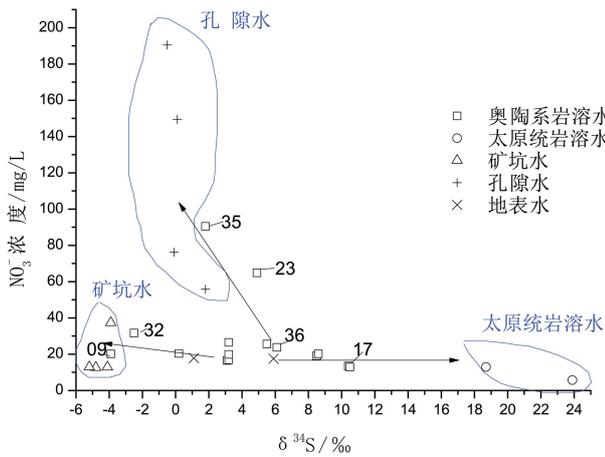


图8 不同水体 $\delta^{34}S$ 与 NO_3^- 分布图

Fig. 8 Relationship between $\delta^{34}S$ and NO_3^- in different water bodies

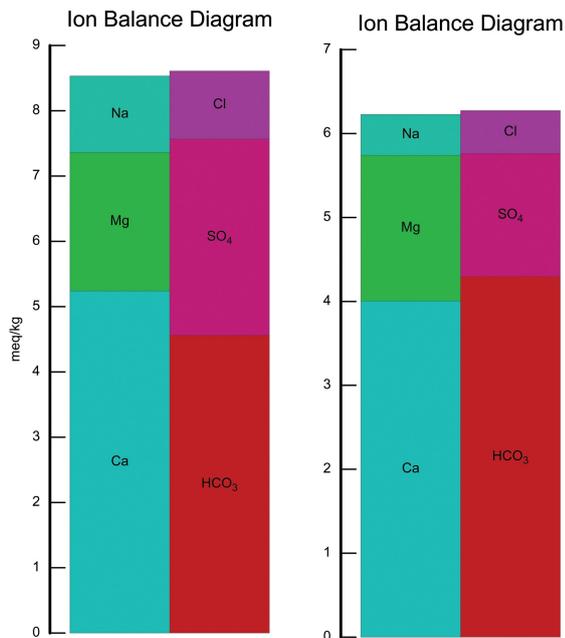


图9 17号奥陶系岩溶水与背景均值的离子平衡对比图

Fig. 9 Comparison of the ion balance between No. 17 for groundwater from the Ordovician karst aquifer and the average background value

17号和36号奥陶系岩溶水 $\delta^{34}S$ 和 SO_4^{2-} 特征体现“背景”特征,但硫酸盐含量稍偏高于背景浓度,可能为内生硫酸盐反应过程^[18]。离子平衡对比图9中17号岩溶水的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子偏高于背景均值,可能溶解了更多的石膏,表明高强度的疏干排水后,奥陶系含水层可能发生了脱白云石化现象^[19]。当奥陶系岩溶水水压减小,水位下降,水温降低时,随着含水介质溶解度的降低,方解石和白云石依次沉淀,水

样中方解石、白云石饱和指数 $[SI = \lg(IAP/K_{sp})]$ 均大于0是最好的证实,此时析出的 Ca^{2+} 造成了石膏的未饱和状态,于是岩溶水开始溶解石膏,造成硫酸盐含量的增高。

4 结论

煤矿开采后,奥陶系岩溶水硫酸盐含量会普遍增高。奥陶系岩溶水硫酸盐含量升高的机理模式主要包括以下三种:

(1)煤矿大规模开采下强排奥陶系岩溶水,水位持续下降后,原煤系地层的还原条件演变成氧化条件,黄铁矿暴露于空气中,从而加速了黄铁矿的氧化,形成高硫酸盐和低 $\delta^{34}S$ 值的矿坑水,一部分矿坑水通过导水裂隙或断裂反向补给奥陶系岩溶水,一部分待承压水位上升后与奥陶系岩溶水混合,造成奥陶系岩溶水硫酸盐含量的增高。

(2)采空区范围内广泛发育着导水裂隙带,当导水裂隙带的高度超过煤层的直接顶和关键顶的厚度时,煤层上覆含水层(孔隙水)则沿着导水裂隙带进入采空区,进而越流补给奥陶系岩溶水,孔隙水所携带的大气降水硫和土壤硫等造成了奥陶系岩溶水硫酸盐含量的增高。

(3)煤矿开采后,奥陶系岩溶水矿物溶解能力会增强,脱白云石化过程致使溶解更多的蒸发型矿物(如石膏),也会引起奥陶系岩溶水硫酸盐含量的增高,但增高幅度不明显。

随着煤矿的深层开采和综采技术的全面实施,未来的矿区含水层结构会遭到更大的破坏,为保护奥陶系岩溶水资源,有关部门应密切关注奥陶系岩溶水的水质变化,尤其是监测水质更差的太原统岩溶水未来会不会污染到奥陶系岩溶水,必要的时候,我们必须通过帷幕灌浆等方式切断其与奥陶系岩溶水的通道,防止其通过导水通道污染奥陶系岩溶水。

参考文献

[1] 闫玉梅,秦鹏,吴振岭,等. 峰峰矿区煤炭开采对岩溶地下水环境的影响研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(12): 120-125.

[2] 白喜庆,吴振岭,李连娟,等. 邯邢煤矿区矿床水环境问题调查评价[R]. 邯郸:中国煤炭地质总局水文地质局, 2010.

[3] 吴振岭,白喜庆. 峰峰煤矿区岩溶地下水流场演化规律[J]. 地下水, 2009, 31(2): 23-27.

[4] Yang Y C, Shen Z L, Weng D G, et al. Oxygen and Hydrogen Isotopes of Waters in the Ordos Basin, China: Implications for Recharge of Groundwater in the North of Cretaceous Groundwater Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(1): 103-113.

[5] 陈陆望,桂和荣,殷晓曦. 深层地下水氢氧稳定同位素组成与水

- 循环示踪[J]. 煤炭学报, 2008, 10(33): 1107-1111.
- [6] 李思亮, 刘丛强, 陶发祥, 等. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用[J]. 地球化学, 2004, 32(2): 165-170.
- [7] 李义连, 王焰新, 张江华, 等. 娘子关泉域奥陶系岩溶水硫酸盐污染的地球化学模拟分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2000, 5(25): 26-30.
- [8] KU T CW, Walter L M, Coleman M L, et al. Coupling between sulfur recycling and depositional carbonate dissolution: evidence from oxygen and sulfur isotope composition of pore water sulfate, south Florida Platform, U. S. A[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(17): 2529-2546.
- [9] Ian D, Peter F, 张慧(译). 水文地质学中的环境同位素[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [10] 桂和荣, 陈陆望. 矿区地下水水文地球化学演化与识别[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [11] 郝春明, 张进德, 何培雍, 等. 采煤影响下峰峰矿区岩溶地下水水动力环境的演变[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 465-471.
- [12] 王焰新, 高旭波. 人类活动影响下娘子关奥陶系岩溶水系统地球化学演化[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 103-110.
- [13] Moncaster S J, Bottrell S H, Tellam J H, et al. Migration and attenuation of agrochemical pollutants: insights from isotopic analysis of groundwater sulphate[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 43(2): 147-163.
- [14] 张江华, 梁永平, 王维泰, 等. 硫同位素技术在北方岩溶水资源调查中的应用实例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 235-241.
- [15] 朱莉娜, 王瑞久, 柯昌麟. 用环境同位素研究灰场灰水对周围地下水的影响[J]. 环境科学研究, 2002, 15(4): 31-34.
- [16] 翟立娟, 马秀芬, 唐燕波, 等. 我国大型煤炭基地区域含水层保护战略研究[R]. 邯郸: 中国煤炭地质总局水文地质局, 2011: 49-70.
- [17] 方向清, 傅耀军. 采煤对峰峰矿区黑龙洞泉奥陶系岩溶水系统影响程度评价[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(3): 25-30.
- [18] 吴春勇. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水水化学演化的同位素示踪研究[M]. 吉林大学硕士学位论文, 2011.
- [19] 万利勤. 济南泉域岩溶地下水的示踪研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2008.

Study on the evolutionary process of sulfate concentration in Ordovician karst water after coal mining in Fengfeng mine

HAO Chun-ming¹, HE Pei-yong¹, WANG Yi¹, HOU Shuang-lin², DONG Jian-fang²

(1. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;*

2. *Geological Environment Monitoring Station of Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050021, China*)

Abstract: Increases in the concentration of sulfate in water from an Ordovician karst aquifer following mining activity pose a major hazard to drinking water safety. Therefore, research into the impact of mining activities on the sulfate concentration is very significant. Hydrochemistry, isotope hydrology and other methods were adopted. Hydraulic connection and sulfur kinetic fractionation processes were investigated in order to evaluate sulfate changes in the Ordovician karst aquifer due to mining activity.

Fengfeng coal mine is located in the southeast of Taihang Mountain, which is next to Jiu mountain in the west, and North China Plain in the east, with a total area of 340.6 km². Based on the characteristics of the water bearing rock, aqueous medium and burial conditions, the main aquifers are, Cambrian oolitic limestone karst fracture aquifer, Ordovician fracture karst aquifer, Taiyuan Carboniferous thin limestone fractured aquifer, Permian Shanxi formation sandstone fissure pore aquifer and Quaternary alluvial slope of aeolian sandy soil pore aquifer. The Ordovician fracture karst aquifer is the most important aquifer, with a total area was 2,404 km² in the mine. The aquifer matrix is composed of brecciated limestone, mottled limestone, limestone and marlite, gypsum, etc, and the total aquifer thickness is 470 to 584 m.

The results indicate that the sulfate concentration in the groundwater of the Ordovician karst aquifer increased after mining activities, with different characteristics and sulfur kinetic fractionation process. The main source of kinetic fractionation was groundwater seepage from pits and pore water flowing through fractures, and the ability of minerals in evaporate to dissolve had been enhanced during the de-dolomitization process. The results are useful for evaluating the evolution of sulfate in karst water in areas with similar mining activity, protecting karst water resources, and improving the management of coal resource development.

Key words: isotope; sulfate; hydraulic connections; karst groundwater; mining activities

(编辑 黄晨晖)