

焦作矿区含水岩组间水力联系特征

陈立^{1,2}, 万力¹, 张发旺³, 马琳娜², 耿新新²

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 3. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 焦作矿区水文地质条件复杂, 矿井水害严重, 探明矿区含水层组间的水力联系特征, 可为水害防治提供科学依据。根据焦作矿区已有的地质、水文地质资料, 从当地构造、矿区的水化学和同位素特征三个角度进行分析, 发现矿区内奥陶系含水层与石炭系含水层之间有较强的水力联系, 且石炭系含水层的主要补给来源为奥陶系含水层; 二叠砂岩含水层除了与石炭系含水层存在微弱的水力联系外, 与其他含水层无密切联系; 第四系含水层的主要补给来源为地表水; 地表水及第四系含水层可通过断裂通道补给下部的奥陶及石炭系含水层。

关键词: 焦作矿区; 含水岩组; 水化学特征; 环境同位素; 水力联系

中图分类号: P641.139 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0330-04

Characteristics of hydraulic connection between aquifer groups in Jiaozuo Mine Area

CHEN Li^{1,2}, WAN Li¹, ZHANG Fa wang³, MA Lin na², GENG Xin xin²

(1. College of Water Resources of China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China;)

Abstract: Jiaozuo Mine Area has complex hydrogeological conditions with serious mine water damage, determination of the hydraulic connection between the aquifer groups can provide the scientific support for water damage control. According to the geological and hydrogeological data, the hydraulic connection characteristics between the aquifer groups were analyzed from the perspectives of construction, mine water chemistry, and environmental isotopic characteristics. The results showed that (1) the Ordovician and Carboniferous aquifers have a strong hydraulic connection and the main recharge source of the Carboniferous aquifer is Ordovician aquifer; (2) the Permian sandstone aquifer has no hydraulic connection with other aquifers except for the Carboniferous aquifer; (3) the main recharge source of the Quaternary aquifer is surface water; and (4) the surface water and Quaternary aquifer can recharge the Ordovician and Carboniferous aquifers through the tectonic fault in the mine area.

Key words: Jiaozuo mine area; aquifer group; hydrochemistry characteristics; environmental isotope; hydraulic connection

煤矿水害是矿山建设与生产过程中的主要安全灾害之一,它是因井巷、工作面与含水层等接近或沟通而突然产生的出水事故^[1-3]。在我国北方煤矿区,尤其太行山东麓南段,当地的岩溶水是发生水害的主要水源。在这些矿区地质结构复杂,各个含水层水力联系错综复杂,采动影响下导致发生水害的可能性增大^[4-5]。焦作矿区就是其中的典范,水文地质条件复杂,矿井水害严重,尤其充沛的岩溶水是矿区正常生产的一大安全隐患^[6]。矿区北部的太行山区广泛出露有大面积的寒武及奥陶系碳酸盐岩,且岩溶裂隙十分发育,赋水性强,岩溶水资源丰富,成为矿区地下水的主要补给源

区^[7-8]。这个矿区采煤过程中突水事故频发,究其原因主要是当地的地质条件,特别是水文地质条件复杂。本文根据地质构造特征、水化学特征、同位素分布规律,探明矿区含水层组间的水力联系特征,以期当地采矿过程中的水害防治提供科学依据。

1 矿区水文地质条件

焦作矿区位于河南省焦作市境内,东西长 65 km,南北宽 20 km,是华北煤田的重要组成部分,也是我国著名的大水矿区。本区属温带大陆性季风型气候,降水量主要受地形

收稿日期: 2014-10-13 修回日期: 2015-03-04 网络出版时间: 2014-03-20
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1635.009.html>
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130637)

作者简介: 陈立(1974),男,助理研究员,博士研究生,主要从事矿山地质环境和土壤修复方面研究。E-mail: sunboyli2003@126.com
通讯作者: 万力(1962),男,教授,博士生导师,主要从事地下水资源评价与开发利用方面研究。E-mail: wanli@cugb.edu.cn

控制,自北部山区(多年平均降水量为 701 mm)到山前冲积平原(多年平均降水量为 595 mm)呈逐渐减少趋势。北部为太行山脉,南部为黄河、沁河冲洪积平原,地形特征为西北高,东南低。矿区内有四条河流,分别是峪河、石门子河、山门河、西门河。河流均发源于矿区北部的山区,河流流向

均为自西北流向东南,与矿区的构造断裂带相交。

矿区煤层属隐蔽性煤田,煤系露头被第四系松散岩层掩盖,仅在北部的太行山区有少量煤系露头。主要含煤地层为二叠系,岩性主要为陆相碎屑岩,厚度为 490 m;基底为前震旦系变质岩系。矿区水文地质剖面见图 1。

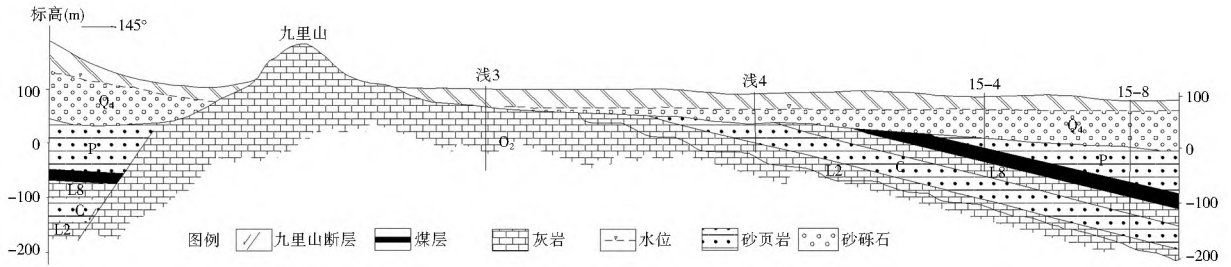


图 1 焦作矿区水文地质剖面图

Fig. 1 The hydrogeological profile of Jiaozuo Mine Area

区内赋水丰富的地层主要是石炭系灰岩和中奥陶系(O₂)灰岩。石炭系灰岩在矿区内出露面积较小,但分布广泛,主要由海相薄层灰岩和陆相碎屑岩互层组成,假整合于中奥陶系灰岩之上,其中薄层灰岩共有 9 层,只有 L₂ 灰岩和 L₈ 灰岩厚度较大且稳定,岩溶裂隙也较发育。L₂ 灰岩厚度在 4~14 m 之间,一般为 8~10 m, L₈ 灰岩厚度在 16~25 m 之间,一般为 22 m 左右。奥陶系主要出露于北部山区,矿区内可见零星出露,该系地层下部主要由白云质结晶灰岩、白云质泥灰岩、泥岩等组成,中部以质纯的灰岩为主,夹角砾状灰岩、豹皮灰岩等,总厚度为 355~720 m,山区灰岩中岩溶洞穴发育^{[9] 10}。

研究认为区内断层往往伴生着裂隙的发育,这个特征是不同的含水层存在水力联系的重要标志。另外,河流在上游接受两岸溶洞水补给,水量逐渐变大,在流经矿区时时大时小,总体趋势为逐渐减少甚至消失。这是由于河流横向流经近东西向、东北-南西向构造断裂带,与地下水在不同区域发生不同方式的交换^[11]。

断层为地表水补给地下水提供通道,也为各含水岩组间不同水体发生水力联系提供了通道(见图 3)。

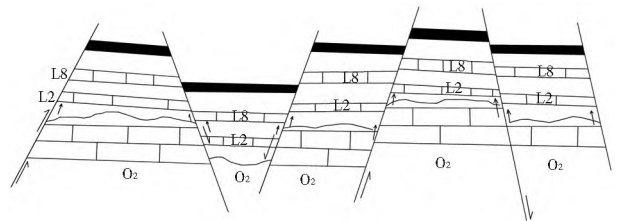


图 3 断裂带水通道示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault channels

矿区主要有 4 个含水层(组),自上而下分别是第四系孔隙含水层、二叠系砂岩裂隙含水层、石炭系灰岩岩溶含水层、中奥陶系(O₂)灰岩岩溶含水层,石炭系灰岩岩溶含水层是矿区内煤层之间的主要含水层。

矿区地下水水流向总体上由北向南流动,与地形变化一致。奥陶系在矿区内连续分布,特别是北部山区有巨厚地层广泛出露,且岩溶裂隙发育较好,赋水性强,可直接接受大气降水的补给,在地下水由北向南流动过程中,受到凤凰岭、九里山及朱村断层的阻水作用后,水位抬升,可补给上部的石炭系含水层。石炭系在区内出露面积较小,难直接接受大气降水的补给。韩王煤矿和李封煤矿发育着入字型构造,根据这两个煤矿发生突水观测, L₈ 灰岩易于与其对盘的奥陶系灰岩发生水力联系,从突水水量观测认为 L₈ 灰岩含水层接受了奥陶系灰岩含水层的补给。

2 矿区构造控水分析

3 含水岩组水化学特征分析

焦作矿区的主要构造与太行山复背斜一致。区内较大的断层有九里山断层、凤凰岭断层和朱村断层,均向东南倾斜,倾角为 70°左右。根据图 2 可知,矿区内的构造是受着东西向构造带控制,即东西向凤凰断层及朱村断层控制了一系列次一级雁行式排列的东北-西南向断裂构造^[11]。矿区西部以地垒、地堑相间出现为特征,东部则是南升北降的阶梯状断块依次出现。

根据矿区各含水岩组的水化学资料绘制了水化学 piper 图(图 4),从图中可看出,二叠系砂岩水的水化学类型与区内其他地下水有较大差异。矿区的奥陶系灰岩水及其岩溶泉水化学点分布较为集中,说明其的水化学类型单一,主要为 HCO₃⁻·Ca·Mg 型,有少量的 HCO₃⁻·SO₄⁻·Ca·Mg 型水^[12]。

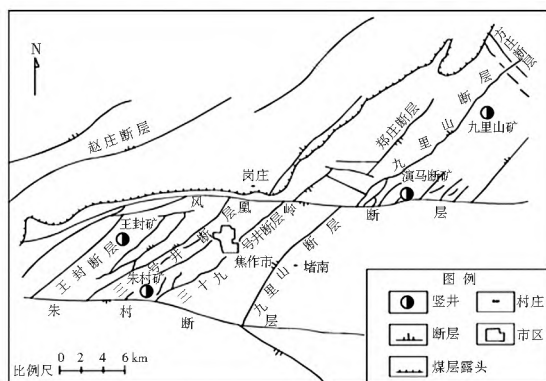


图 2 焦作矿区断裂构造分布^[11]

Fig. 2 Distribution of fault structures in Jiaozuo Mine Area

石炭系灰岩水的水化学点在两个圆圈中均有分布,但局部分布较为集中,水化学类型主要为 HCO₃⁻·Ca·Mg 型和

HCO₃⁻Na 型^[1], 有少量的 HCO₃⁻·SO₄²⁻Ca·Mg 型水。

砂岩水的水化学点集中分布在菱形区域的下部, 水化学类型主要为 HCO₃⁻Na 型, 第四系孔隙水及地表水的水化学点分布较离散, 反映出其水化学类型比较复杂, 主要包括 HCO₃⁻·SO₄²⁻Ca·Mg 型、HCO₃⁻·SO₄²⁻Cl·Ca·Mg 和 HCO₃⁻·SO₄²⁻Ca·Mg·Na 型水。

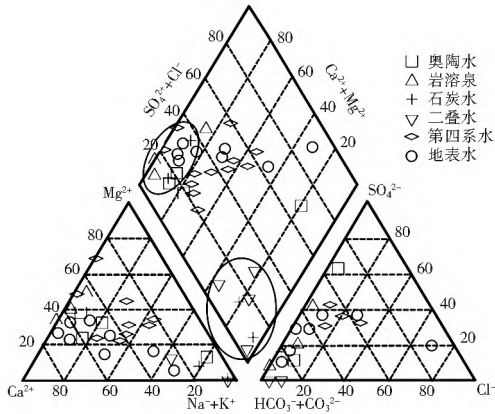


图 4 焦作矿区地下水水化学 Piper 图

Fig. 4 Piper diagram of groundwater hydrochemistry in Jiaozuo Mine Area

依据矿区水化学 piper 图, 构建矿区含水岩组与主要水化学类型关系图(图 5), 不难看出, 奥陶灰岩水与二叠灰岩水的水化学类型相似度较高, 均包含有 HCO₃⁻Ca·Mg 型和 HCO₃⁻·SO₄²⁻Ca·Mg 型水, 反映出奥陶灰岩水与石炭灰岩水之间存在强烈的水力联系, 结合前面的构造控水分析可知, 受断层阻水作用的影响, 可确定石炭灰岩水的主要补给来源为奥灰水。

石炭灰岩水的主要水化学类型还包括 HCO₃⁻Na 型与砂岩水的主要水化学类型一致, 说明石炭灰岩水与二叠砂岩水之间也存在一定的水力联系, 补给关系需进一步确定。

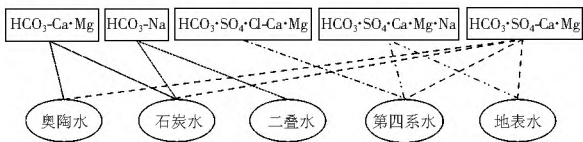


图 5 焦作矿区各含水岩组与主要水化学类型关系

Fig. 5 The aquifer groups and corresponding hydrochemical types in Jiaozuo Mine Area

通过对比分析, 可知地表水及第四系孔隙水的水化学类型高度一致, 反映出二者存在强烈的水力联系; 另外, 矿区水化学特征也反映出, 地表水及第四系孔隙水与奥陶灰岩水及石炭灰岩水之间也存在较强的水力联系, 结合研究区构造发育条件, 可推断出地表水及第四系孔隙水可通过构造断裂带补给下部的奥陶及石炭系含水层。

4 含水岩组环境同位素特征分析

根据裴建国等人研究, 焦作矿区大气降水直线方程 (LMWL) 为 $\delta D = 8.0326\delta^{18}O + 12.68$ ($r = 0.96$)^[14, 15], 依据焦作矿区主要含水层地下水环境同位素数据, 建立的矿区地下水氢氧同位素拟合方程为 $\delta D = 5.46\delta^{18}O - 17.4$ ($r = 0.95$), 见

图 6。图示矿区地下水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 均落在大气雨水线的右下方, 说明在蒸发效应的影响下, 地下水中的重同位素相对富集。

从表 1 可以看出, 奥陶及石炭(L₂、L₈) 灰岩水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分布范围有较高的一致性, 这三个含水层中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值均落在雨水线附近, 表明了这三个含水层均接受大气降水的补给, 并且都集中在黑色实线所圈区域内, 说明这三个含水层具有紧密的水力联系。在奥陶灰岩水所测定的水样中有一处孤立点, 图中虚线所圈区域, $\delta D = -64.7\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O = -8.71\text{‰}$, 偏向降雨和河水的同位素值, 表明有一定的河水混入。

从奥陶、石炭(L₂、L₈) 地层在矿区出露的分布来看, 石炭地层在区内出露面积较小, 不易直接接受大气降水的补给, 而奥陶地层在北部山区广泛出露且地层较厚与石炭地层直接接触, 因此, 石炭地层接受大气降水补给的方式主要来自奥陶地层水的间接补给。奥陶及石炭灰岩水的 ³H 值均较大, 反映出地下水交替程度强烈, 循环条件较好, 更新能力较强。

表 1 各含水层中 δD 、 $\delta^{18}O$ 及 ³H 值分布范围

Tab. 1 The distribution ranges of δD , $\delta^{18}O$, and ³H value in each aquifer

地下水类型	项目		
	δD (‰ _{SNOW})	$\delta^{18}O$ (‰ _{SNOW})	³ H(TU)
奥陶系灰岩水	-67.1~ -70.2	-9.34~ -9.67	12.4~ 28.8
石炭系灰岩水(L ₂)	-65.9~ -66.9	-9.25~ -9.36	26.7~ 39.6
石炭系灰岩水(L ₈)	-67.8~ -68.9	-9.36~ -9.55	25.3~ 27.3
二叠系砂岩水	-67.7~ -73.1	-9.35~ -10.4	7.2~ 18.9
第四系孔隙水	-63.9~ -65.8	-8.53~ -8.76	21.2~ 35.4

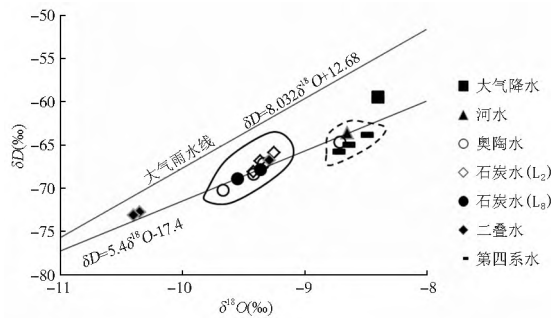


图 6 焦作矿区地下水 δD - $\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 6 Stable isotopic composition of hydrogen and oxygen in Jiaozuo Mine Area

从图中可见, 二叠系砂岩水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 点分布与其他水体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 点分布区域具有明显的差异, 距离其他水体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 点分布距离较远, 仅有一点落在奥陶及石炭灰岩水的分布范围内, 而二叠系砂岩含水层分布在石炭系含水层之上, 说明二叠系砂岩含水层仅与石炭系含水层具有一定的水力联系, 可知石炭系含水层补给二叠系砂岩含水层。二叠系砂岩水与其他水体的水力联系不密切, 水循环条件差, 这与二叠系砂岩水低³H 含量(7.2~ 18.9 TU)相吻合。

第四系孔隙水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 点分布与河水具有较好的一致性, 见图 6 中虚线所圈区域, 说明孔隙水的主要补给来源为地表水, 矿区内农田灌溉主要以河水为主。另外, 图 6 中虚线所圈区域, 除了包括孔隙水及河水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 点, 还有

奥陶灰岩水的 $\delta D, \delta^{18}O$ 点,这是奥陶灰岩水与孔隙水及地表水具有水力联系的重要依据。孔隙水的 3H 含量为21.2~35.4 TU,说明矿区孔隙水更新较快,循环条件较好。

5 结论

焦作矿区断层构造极为发育,为矿区各含水岩组间发生水力联系提供条件。研究表明,矿区水化学及同位素特征均表明,奥陶系含水层补给石炭系含水层,石炭系含水层补给二叠系含水层,后者与其他含水层均无密切水力联系,第四系孔隙水主要接受大气降水及地表水的补给,且孔隙水与地表水均通过导水断层补给奥陶及石炭系含水层。因此对矿井安全生产威胁较大的含水层为奥陶系含水层、石炭系的 L_2 及 L_8 灰岩含水层。

参考文献(References):

- [1] 武强,潘国营,管恩太,等. 焦作矿区突水灾害研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(4): 44-49. (WU Qiang, PAN Guo ying, GU AN En tai. A study summary of water bursting hazards in Jiaozuo mining region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(4): 44-49. (in Chinese))
- [2] 桂和荣,陈陆望. 皖北矿区主要突水水源水文地质特征研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 323-327. (GUI He rong, CHEN Lu wang. Study on hydrogeological feature of the main pouring water aquifers within the mining area in northern Anhui[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 323-327. (in Chinese))
- [3] 靳德武,刘英锋,刘再斌,等. 煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 25-29. (JIN De wu, LIU Ying-feng, LIU Zai bin, et al. New progress of study on major water inrush disaster prevention and control technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 25-29. (in Chinese))
- [4] 王建国. 邯邢地区大水铁矿田开采对地下水环境的影响及防治[J]. 水资源保护, 2009, 25(5): 98-102. (WANG Jian guo. Influence of water rich iron ore mining field exploration on the groundwater environment in Hanxing district and prevention[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(5): 98-102. (in Chinese))
- [5] 方向清,傅耀军,王红艳,等. 华北型煤田岩溶充水矿床充水模式及特征[J]. 中国煤炭地质, 2013, 9(25): 32-36. (FANG Xiang qing, FU Yao jun, WANG Hong-yan, et al. Water filling pattern and characteristics of North China type coalfield karstic water filling deposit[J]. Coal Geology of China, 2013, 9(25): 32-36. (in Chinese))
- [6] 牛森营. 河南省焦作煤田矿井水防治研究[M]. 地质出版社, 2007. (NIU Sen ying. Research on Prevention of Coal Mine Water in Jiaozuo Henan[M]. Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [7] 勒德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2007, 30(6): 1-4. (JIN De wu. Research status and outlook of water outburst from seam floor in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2007, 30(6): 1-4. (in Chinese))
- [8] 钱家忠,潘国营,吴剑锋,等. 焦作矿区裂隙岩溶水优势流形成机理研究[J]. 水利学报, 2003, 6(6): 95-99. (QIAN Jia zhong, PAN Guo ying, WU Jian feng, et al. Mechanism of preferential flow in the media of fractured karst in Jiaozuo Mine[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 6(6): 95-99. (in Chinese))
- [9] 付江伟,傅雪海,胡晓,等. 焦作矿区煤层气开发的水文地质条件分析[J]. 中国矿业, 2011, 20(4): 105-110. (FU Jiang wei, FU Xue hai, HU Xiao, et al. Analysis on hydrogeological condition for coal bed methane exploitation in Jiaozuo coal mine area[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(4): 105-110. (in Chinese))
- [10] 牛森营. 焦作矿区水文地质内边界特征研究[J]. 煤炭工程, 2006(8): 66-68. (NIU Sen ying. Research on the boundaries within the hydrogeological characteristics of Jiaozuo mining[J]. Coal Engineering, 2006(8): 66-68. (in Chinese))
- [11] 牛森营. 焦作矿区构造控水特征研究[J]. 煤炭工程, 2007(5): 75-77. (NIU Sen ying. Research on the characteristics of structural control water in Jiaozuo mine area[J]. Coal Engineering 2007(5): 75-77. (in Chinese))
- [12] 黄平华,陈建生,宁超,等. 焦作矿区地下水水化学特征及其地球化学模拟[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 369-376. (HUANG Ping-hua, CHEN Jian sheng, NING Chao, et al. Hydrochemical characteristic and hydrogeochemical modeling of groundwater in the Jiaozuo mining district[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 369-376. (in Chinese))
- [13] 徐树媛. 李家庄矿区地下水水化学及环境同位素特征研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013(2): 67-70. (XU Shu yuan. Research on groundwater chemistry and environmental isotope in Liyazhuang Mining area[J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2013(2): 67-70. (in Chinese))
- [14] 裴建国,陶友良,童长水. 焦作地区天然水环境同位素组成及其在岩溶水文地质中的应用[J]. 中国岩溶, 1993, 12(1): 45-53. (PEI Jian guo, TAO You liang, TONG Chang shui, et al. Environmental isotope of natural water and its application in karst hydrogeology in Jiaozuo area[J]. Carsologica Sinica, 1993, 12(1): 45-53. (in Chinese))
- [15] 黄平华,陈建生,宁超. 焦作矿区地下水中氢氧同位素分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 770-775. (HUANG Ping-hua, CHEN Jian sheng, NING Chao. The analysis of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater of Jiaozuo mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 770-775. (in Chinese))