

文章编号:0253-9993(2008)10-1107-05

# 深层地下水氢氧稳定同位素组成与水循环示踪

陈陆望<sup>1</sup>, 桂和荣<sup>2,3</sup>, 殷晓曦<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 宿州学院 地理科学与环境科学系, 安徽 宿州 234000; 3. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 利用任楼井田及所在临涣矿区地表水与生产矿井的长观孔、矿井出水点, 从上而下分别取第四系第四含水层、二叠系煤系砂岩含水层、石炭系太原组岩溶含水层及奥陶系岩溶含水层 30 个水样, 测试  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$ , 分析 D 与  $^{18}O$  组成并对含水层水循环进行示踪. 研究表明: 临涣矿区深部地下水样点  $\delta$  值在  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系图上绝大部分均落在中国大气降水线和矿区地表水线下部, 大气降水或地表水为各类含水层的补给主体. 任楼井田煤炭采动影响第四系第四含水层明显, 地表水补给第四系第四含水层速度快; 临涣矿区的临涣、海孜与童亭四含水与大气降水未构成良好的水力联系. 煤系砂岩地下水就整个临涣矿区来说, 任楼井田埋藏相对较新. 石炭系太原组岩溶含水层及奥陶系岩溶含水层在临涣矿区地下水径流速度相对较快,  $^{18}O$  或 D 漂移不明显.

**关键词:** 深层地下水; 氢氧稳定同位素; 水循环; 示踪; 含水层

中图分类号: P597 文献标识码: A

## Composing characteristic of hydrogen and oxygen stable isotopes and tracing of hydrological cycle

CHEN Lu-wang<sup>1</sup>, GUI He-rong<sup>2,3</sup>, YIN Xiao-xi<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Geography and Environmental Science, Suzhou College, Suzhou 234000, China; 3. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Through surface water and the long-observation bores and mine streaming water in Renlou Colliery and local Linhuan coal district, 30 samples belonging to the fourth aquifer of the Quarternary, the coal and sandstone aquifer, the Taiyuan limestone aquifer and the Ordovician limestone aquifer from the top down were gained and tested  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of groundwater. With those samples, composing characteristic of hydrogen and oxygen stable isotopes and tracing of hydrological cycle were analyzed. Research results show that the deep groundwater  $\delta$  values of Linhuan coal district are mostly below precipitation line of China and surface water line of the coal district and precipitation and surface water is major replenishment of these aquifers, and mining influences the fourth aquifer of the Quarternary distinctly in Renlou, so that surface water supplies the aquifer rapidly. Groundwater and precipitation don't form nicer hydraulic contact in the fourth aquifer of Linhuan, Haizi and Tongting. The groundwater of coal and sandstone aquifer in Renlou is youthy in total Linhuan coal district, and the groundwater of Taiyuan limestone aquifer and Ordovician limestone aquifer flows rapidly and  $^{18}O$  or D excursion is inapparent.

**Key words:** deep groundwater; hydrogen and oxygen stable isotopes; hydrological cycle; tracing; aquifer

收稿日期: 2007-10-11 责任编辑: 毕永华

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目 (070414168)

作者简介: 陈陆望 (1973—), 男, 湖北蕲春人, 讲师, 在站博士后. E-mail: luwangchen8888@163.com

国内外关于地表泉水或浅层地下水氢氧稳定同位素研究成果丰富<sup>[1-3]</sup>,但对深层地下水氢氧稳定同位素的研究不多<sup>[4-5]</sup>,对多层深层地下水开展氢氧稳定同位素对比研究则更少.其中一个重要的制约因素是难以同时采取不同类型深层地下水(300 m 以下)水样,而煤矿区具有采取 300 m 以下乃至千余米的各类深层地下水水样的独到优势,这为研究深层地下水氢氧稳定同位素组成及含水层地下水循环提供了可能.

任楼井田位于淮北煤田临涣矿区境内,临涣矿区另外还包括临涣、海孜、童亭、许疃、五沟等生产矿井.矿区从上而下的第四系第四含水层(简称“四含”,埋深 300 m 左右)、二叠系煤系砂岩含水层(简称“煤系”,与开采煤层埋深有关)、石炭系太原组岩溶含水层(简称“太灰”,埋深 600 m 左右)及奥陶系岩溶含水层(简称“奥灰”,埋深 900 m 左右),其埋藏较深,水文地质条件与区域构造复杂,为本矿区生产矿井主要突水含水层<sup>[6]</sup>.随着矿区煤炭资源的大量开采并向深部延伸,对于深层地下水的来源、动态特征及其对矿井充水的影响研究越来越重要.

本文利用任楼井田及所在临涣矿区地表水及各生产矿井各类深部含水层水位观测孔、井下出水点等采取从四含到奥灰地下水水样测试氢氧稳定同位素组成,根据其组成特征研究深层地下水水循环及其动态特征,为煤矿合理进行防治水方案设计及突水预测预报提供科学依据,具有重要的应用基础研究意义.

## 1 取样与测试

利用任楼井田及周围临涣、海孜、童亭、许疃、五沟等矿井常观孔与井下出水点等处从上而下分别取地表、四含、煤系、太灰与奥灰 30 个水样.水样点布置参见文献[7]中的图 1.水样送中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测试.样品<sup>18</sup>O 制备采用 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 平衡法,样品 D 制备采用铀还原法,质谱测试<sup>18</sup>O 与<sup>18</sup>D,测试结果见表 1.

## 2 地表水体氢氧稳定同位素组成

笔者于临涣矿区中的濉河、临涣与任楼取得产生不同蒸发效果的地表水水样进行氢氧稳定同位素测试,得临涣矿区氢氧稳定同位素地表水线为 $\delta D = 5.889 \text{ 5} \delta^{18} \text{O} - 7.680 \text{ 4}$ .临涣矿区 $\delta D$ 与 $\delta^{18} \text{O}$ (SMOW)的地表水线与我国大气降水线<sup>[2]</sup>形状如图 1 所示.从图 1 可以看出,地表水线斜率始终小于大气降水线斜率,大气降水形成地表水体都要不同程度地产生蒸发效应.该区年平均大气降水氢氧稳定同位素组成应为两线交点值( $\delta^{18} \text{O} = -0.79\%$ , $\delta D = -5.4\%$ ).

表 1 任楼井田及所在临涣矿区水样氢氧稳定同位素测试结果

Table 1 Test results of hydrogen and oxygen stable isotopes in Renlou colliery and local Linhuan coal district

样号	水样类型	取样地点	$\delta D/\%$ (SMOW)	$\delta^{18} \text{O}/\%$ (SMOW)
1		濉河水(水流缓慢)	-4.21	-0.580
2	地表水	临涣地表水塘	-4.32	-0.610
3		任楼地表水塘	-4.61	-0.650
4		任楼矿水 1	-5.93	-0.757
5		任楼矿水 5	-6.85	-0.823
6		任楼矿水 9	-5.71	-0.862
7	四含水	任楼矿水 13	-5.51	-0.741
8		童亭	-6.88	-0.708
9		海孜	-6.62	-0.895
10		临涣	-6.67	-0.948
11		任楼矿风 1 孔附近	-6.10	-0.845
12		任楼矿风 2 孔附近	-6.76	-0.848
13		任楼矿-720 主石门 G <sub>9</sub> 向前 30 m	-6.03	-0.855
14		任楼矿中三变电所 B <sub>5</sub> 向前 36 m	-7.57	-0.908
15		任楼矿 II <sub>7</sub> 22 风巷 f <sub>2</sub> 点后 2 m	-6.56	-0.883
16	煤系水	临涣矿(I)	-7.87	-0.881
17		临涣矿(II)	-8.34	-0.890
18		海孜矿	-6.70	-0.902
19		童亭矿	-6.73	-0.862
20		许疃矿	-7.30	-0.972
21		任楼矿水 8	-6.31	-0.830
22		任楼矿水 14	-5.25	-0.679
23		任楼矿水 7	-7.49	-0.877
24	太灰水	海孜矿	-5.92	-0.843
25		童亭矿	-5.59	-0.754
26		五沟矿大任家东	-5.44	-0.552
27		五沟矿东 J <sub>5-1</sub>	-6.30	-0.923
28		任楼矿水 6	-4.58	-0.451
29	奥灰水	童亭矿	-6.37	-0.714
30		五沟矿 J <sub>7-1</sub>	-5.00	-0.603

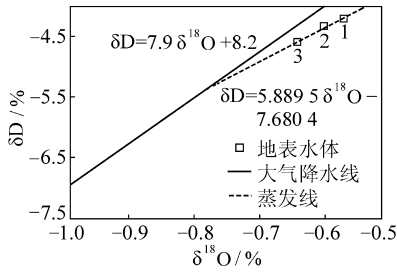


图 1 中国 δD 与 δ<sup>18</sup>O 的大气降水线及矿区地表水线  
Fig. 1 Precipitation line of δD & δ<sup>18</sup>O in China and surface water line of δD & δ<sup>18</sup>O in the coal district

### 3 深层地下水氢氧稳定同位素组成及水循环特征

#### 3.1 含水层地下水年龄估算

由碳同位素质量平衡得到的稀释因子  $q = (\delta^{13}C_{DIC} - \delta^{13}C_{carb}) / (\delta^{13}C_{soil} - \delta^{13}C_{carb})$ ，其中， $\delta^{13}C_{DIC}$  为溶解无机碳 (DIC) 中 <sup>13</sup>C 的测定值； $\delta^{13}C_{carb}$  为被溶解的方解石的 <sup>13</sup>C (取 0)； $\delta^{13}C_{soil}$  为土壤 CO<sub>2</sub> (CO<sub>2(soil)</sub>) 的 <sup>13</sup>C (取 -2.3%)。当 pH 值较高时，与 CO<sub>2(soil)</sub> 平衡的 DIC 富集 <sup>13</sup>C，相对于初始 CO<sub>2(soil)</sub>，其富集程度随着温度在 0.7% ~ 1.0% 之间变化。因此， $\delta^{13}C_{soil}$  被渗透地下水 DIC 的初始 <sup>13</sup>C

( $\delta^{13}C_{rech}$ ) 所代替，即  $\delta^{13}C_{rech} = \delta^{13}C_{soil} + \varepsilon^{13}C_{DIC-CO_2(soil)}$ ，其中， $\varepsilon^{13}C_{DIC-CO_2(soil)}$  为 CO<sub>2(soil)</sub> 与碳水溶液之间的富集，富集程度取决于 pH 值<sup>[1]</sup>。修正后的稀释模型为  $q_{\delta^{13}C} = (\delta^{13}C_{DIC} - \delta^{13}C_{carb}) / (\delta^{13}C_{rech} - \delta^{13}C_{carb})$ ，该模型考虑了碳酸盐在开放和封闭条件下溶解。通过 <sup>13</sup>C 稀释校正衰变方程变为  $\alpha_t^{14}C = q_{\delta^{13}C} \alpha_0^{14}C e^{-\lambda t}$ ，其中  $\alpha_0^{14}C$  为母核 <sup>14</sup>C 的初始放射性； $\alpha_t^{14}C$  为其经过一段时间  $t$  之后的放射性； $\lambda$  为衰变常数， $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$ ，<sup>14</sup>C 的  $t_{1/2}$  为 5 730 a。因此，地下水年龄估算公式可写为

$$t = -8\,267 \ln \left( \frac{\alpha_t^{14}C}{q_{\delta^{13}C} \alpha_0^{14}C} \right)$$

为查明深层水确切形成时间，以获得地下水循环性的直接证据，选取临涣矿区临 (涣) 海 (孜) 童 (亭) 地区四含、煤系与太灰典型水样进行 <sup>14</sup>C、<sup>13</sup>C 与 pH 值等指标测试。根据测试结果，临涣矿区四含、煤系与太灰地下水 <sup>13</sup>C 校正的 <sup>14</sup>C 年龄计算过程见表 2。

表 2 临涣矿区 <sup>13</sup>C 校正的地下水 <sup>14</sup>C 年龄

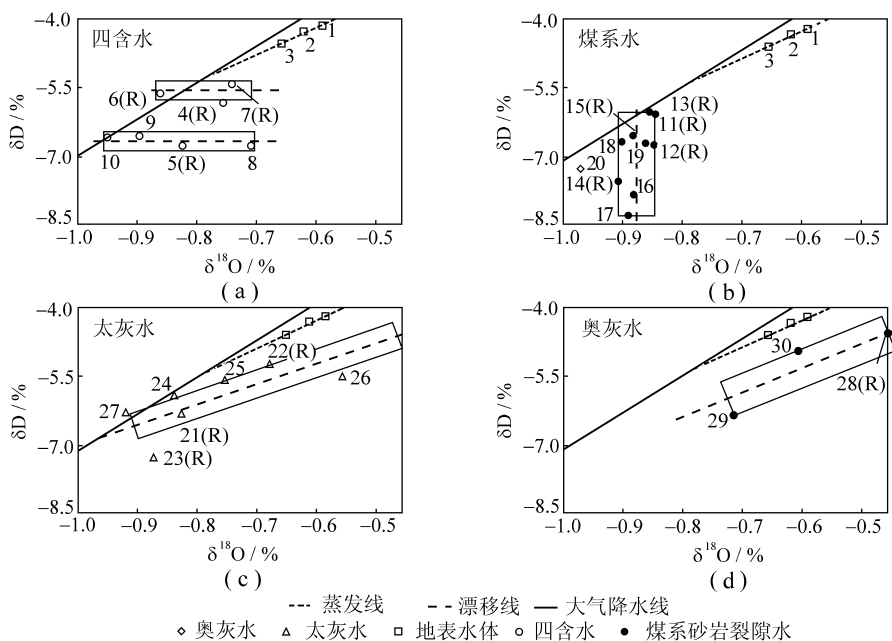
Table 2 <sup>14</sup>C ages corrected by <sup>13</sup>C of groundwater in Linhuan mining area

地下水类	pH	测试值 δ <sup>13</sup> C <sub>DIC</sub> /‰	α <sup>14</sup> C /pmc	估计		(查图 <sup>[1]</sup> ) ε <sup>13</sup> C <sub>DIC-CO<sub>2</sub>(soil)</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>rech</sub> /‰	q <sub>δ<sup>13</sup>C</sub>	计算值	
				δ <sup>13</sup> C <sub>soil</sub> /‰	δ <sup>13</sup> C <sub>carb</sub> /‰				年龄(未校正)/a	年龄(校正)/a
四含	8.2	-1.070	9.1			9.0	-1.40	0.76	19 800	19 500
煤系	8.3	-0.841	6.4	-2.3	0	9.2	-1.38	0.61	22 300	21 900
太灰	7.9	-0.129	9.5			8.8	-1.42	0.09	19 300	600

由表 2 可知，临涣矿区 (特别是临海童) 四含水与煤系水形成时间在 1.95 万 ~ 2.19 万 a 之间，恰恰形成于大理冰期。这些数据说明了四含水与煤系水循环的主体是古溶滤-渗入水，水循环系统不畅。临涣矿区的太灰水经过 <sup>13</sup>C 校正后年龄较新，说明太灰水循环主体是现代水的补给，地下水循环系统畅通。

#### 3.2 同位素组成及水循环一般特征

将任楼井田及所在临涣矿区四含水、煤系水、太灰水与奥灰水氢氧稳定同位素 δ 值描绘在 δD-δ<sup>18</sup>O 关系图上 (图 2, R 表示任楼, 大气降水线和蒸发线方程如图 1), 各类型水点绝大部分均落在我国大气降水线和矿区地表水线下部, 说明深层地下水补给主体归根结底由大气降水补给。临涣矿区四含、煤系、太灰与奥灰氢氧稳定同位素 δ 值在 δD-δ<sup>18</sup>O 关系图上的趋势线与大气降水线交点的同位素组成一般小于本区大气降水年平均值, 一方面说明地下水与大气降水未构成良好的水力联系, 含水层相对封闭; 一方面说明含水层形成过程中, 秋冬季降水补给含水层占优势, 夏秋季降水因地表径流量大, 气温高, 蒸发速度快, 补给含水层处于劣势; 同时也说明含水层水循环过程中一定程度的古水混合。地下水随着运移时间加长, 运移范围加广以及埋深加大, 温度效应、季节效应与雨量效应将会削弱。相反, 地质构造作用、水岩相互作用与含水层间的混合作用将会增强, 使得各主要含水层表现不同氢氧稳定同位素组成特征。

图 2 深层地下水氢氧稳定同位素  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系Fig. 2 Relation of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of hydrogen and oxygen stable isotopes in deep groundwater

### 3.3 不同含水层地下水同位素组成及水循环

(1) 四含水. 任楼井田四含水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.862\%$  ~  $-0.741\%$  之间, 均值  $-0.796\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-6.85\%$  ~  $-5.51\%$  之间, 均值  $-6.00\%$ . 临涣矿区四含水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.948\%$  ~  $-0.708\%$  之间, 均值  $-0.819\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-6.88\%$  ~  $-5.51\%$  之间, 均值  $-6.31\%$ . 大气降水沿着水流路径发生混合, 造成降水随温度、季节与雨量等变化被削弱, 导致任楼井田四含水样的同位素组成和临涣矿区大气降水年平均值相近. 从现场收集的资料看, 任楼井田 5 号四含水位变化幅度大, 该水样与其附近的 14 号煤系水水样点氢氧稳定同位素组成相近, 据此可以推测 5 号四含水与 14 号煤系水通过导水通道已经构成了较强的水力联系, 水混合明显, 5 号点与 14 号点之间的  $F_4$  断层即为产生水力联系的主要导水通道.

任楼井田大部分水样点(图 2(a)方框内的 4 号、6 号和 7 号)氢氧稳定同位素组成特征表现  $^{18}O$  漂移, 漂移线与大气降水线交点的氢氧稳定同位素组成接近本区大气降水年平均值, 说明任楼井田煤炭采动影响四含明显, 四含水循环流畅, 近期形成的地表水补给四含速度快. 临涣、海孜与童亭(图 2(a)方框内的 10 号、9 号和 8 号)同样表现  $^{18}O$  漂移, 但漂移线与大气降水线的交点的氢氧稳定同位素组成小于本区大气降水年平均值, 根据  $^{14}C$  年龄推测, 古水混合的比例较大.

(2) 煤系水. 任楼井田煤系水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.908\%$  ~  $-0.845\%$  之间, 均值  $-0.868\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-7.57\%$  ~  $-6.03\%$  之间, 均值  $-6.604\%$ . 临涣矿区煤系水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.972\%$  ~  $-0.845\%$  之间, 均值  $-0.885\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-8.34\%$  ~  $-6.10\%$  之间, 均值  $-6.99\%$ . 临涣矿区煤系水与大气降水未构成良好的水力联系, 含水层相对封闭, 矿区绝大部分水样点表现 D 漂移(图 2(b)). 临涣矿区煤系水 D 漂移线与大气降水线交点的氢氧稳定同位素组成小于本区大气降水年平均值, 古水混合明显. 任楼井田煤系水氢氧稳定同位素漂移特征符合整个矿区氢氧稳定同位素漂移规律. 大部分任楼井田煤系水更靠近漂移线与大气降水线的交点(图 2(b)方框内的 11 号、13 号和 15 号), 任楼井田煤系水埋藏相对较新, 任楼煤系岩层受采动影响明显, 新地层水容易通过导水通道渗入含水层.

(3) 太灰水. 任楼井田太灰水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.877\%$  ~  $-0.679\%$  之间, 均值  $-0.795\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-7.49\%$  ~  $-5.25\%$  之间, 均值  $-6.350\%$ . 临涣矿区太灰水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.923\%$  ~  $-0.552\%$  之间, 均值  $-0.780\%$ ;  $\delta D$  值介于  $-7.49\%$  ~  $-5.25\%$  之间, 均值  $-6.04\%$ . 矿区绝大部分太灰水样点  $\delta$  值相差较大, 在

$\delta D-\delta^{18}O$  图上的总体变化趋势线与蒸发线几乎平行 (图 2 (c)), 含水层补给过程中水的蒸发效应较显著,  $^{18}O$  漂移或 D 漂移不明显, 说明地下水在太灰含水层中径流速度快. 趋势线与大气降水线交点氢氧稳定同位素组成小于本区大气降水年平均值, 根据  $^{14}C$  年龄推测, 近期春冬季降水补给含水层占优势. 任楼井田 23 号水样点 (水 7 长观孔) 不符合  $\delta D-\delta^{18}O$  总体变化趋势, 其氢氧稳定同位素组成与本井田煤系水氢氧同位素组成相近, 表现较低的  $\delta D$  值, 可推测任楼井田水 7 长观孔附近的太灰水与煤系水出现了不同程度混合, 导致水 7 长观孔  $\delta D$  出现低值.

(4) 奥灰水. 任楼井田奥灰水只有 1 个地下水位观测孔, 其  $\delta^{18}O$  值为  $-0.748\%$ ,  $\delta D$  值为  $-4.58\%$ . 临涣矿区奥灰水  $\delta^{18}O$  值介于  $-0.714\% \sim -0.451\%$  之间, 均值  $-0.589\%$ ,  $\delta D$  值介于  $-6.37\% \sim -5.00\%$  之间, 均值  $-5.317\%$ . 如同太灰, 矿区奥灰水样点  $\delta$  值相差较大, 在  $\delta D-\delta^{18}O$  图上总体变化趋势线与蒸发线平行 (图 2(d)), 含水层补给过程中水的蒸发效应显著,  $^{18}O$  漂移或 D 漂移更不明显, 说明地下水在奥灰含水层中径流速度与太灰水相比更快. 趋势线与大气降水线交点氢氧稳定同位素组成小于本区大气降水年平均值, 近期春冬季降水补给含水层占优势.

## 4 结 论

临涣矿区四含水、煤系水、太灰水与奥灰水样点绝大部分均落在我国大气降水线和矿区地表水线下部, 大气降水或地表水为各类含水层的补给主体. 任楼井田“四含”受煤炭采动影响明显, 地表水补给四含速度快; 矿区临涣、海孜与童亭四含水与大气降水未构成良好的水力联系. 就整个临涣矿区来说, 任楼井田煤系水埋藏相对较新. 临涣矿区太灰与奥灰地下水径流速度相对较快,  $^{18}O$  漂移或 D 漂移不明显.

## 参考文献:

- [1] 张 慧, 张新基. 水文地质学中的环境同位素 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.  
Zhang Hui, Zhang Xinji. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006.
- [2] 王恒纯. 同位素水文地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.  
Wang Hengchun. Hydrogeological conspectus on isotopes [M]. Beijing: Geological Press, 1991.
- [3] Leybourne M I, Clark I D, Goodfellow W D. Stable isotope geochemistry of ground and surface waters associated with undisturbed massive sulfide deposits; constraints on origin of waters and water-rock reactions [J]. Chemical Geology, 2006, 231: 300-325.
- [4] 桂和荣, 陈陆望, 宋晓梅. 皖北矿区地下水中氢氧稳定同位素的漂移特征 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (1): 111-114.  
Gui Herong, Chen Luwang, Song Xiaomei. Drift features of oxygen and hydrogen stable isotopes in deep groundwater in mining area of northern Anhui [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37 (1): 111-114.
- [5] 段玉成, 黑 磊, 解光新. 环境同位素在邢台煤矿放水试验中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 1994, 22 (1): 33-37.  
Duan Yucheng, Hei Lei, Xie Guangxin. Application of environmental isotopes in the drain test of Xingtai Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 1994, 22 (1): 33-37.
- [6] 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 Herong, Chen Luwang. 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.
- [7] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦. 地下水溶解碳酸盐中碳氧稳定同位素组成特征与演化规律 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (5): 537-542.  
Chen Luwang, Gui Herong, Yin Xiaoxi. Composing characteristic and evolution law of carbon and oxygen stable isotopes in groundwater dissolved carbonate [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (5): 537-542.