

文章编号:0253-9993(2013)03-0448-07

山西沁水盆地南部太原组煤储层产出水 氢氧同位素特征

王善博,唐书恒,万毅,李忠诚,张松航

(中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:为了研究沁水盆地南部太原组15号煤储层及其顶板灰岩的含水特征及水动力条件,从沁水盆地南部柿庄地区采集了煤层气井排出水、矿井下的煤层水与煤层顶板灰岩水、地表水共51个水样进行氢氧同位素及主要离子浓度测定。结果表明:目前排采15号煤的煤层气井排出水是煤层水和煤层顶板灰岩水的混合水。15号煤储层和顶板灰岩裂隙含水层之间存在较强的水力联系,煤层在排水过程中接受灰岩水的大量补给。煤层顶板灰岩裂隙含水层封闭性较差,水在灰岩裂隙中径流速度较快。煤层顶板灰岩水表现出 ^{18}O 漂移的特点,排采15号煤的煤层气井排出水既表现出 ^{18}O 漂移特点,也表现出D漂移特点,而排采3号煤的煤层气井排出水则主要表现出D漂移特点。煤层气井排出水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都与矿化度TDS呈现出一定的正相关性, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值也可以作为判断煤层水径流条件的参考因素。

关键词:煤层水;氢氧同位素;太原组;沁水盆地南部;漂移

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A

The hydrogen and oxygen isotope characteristics of drainage water from Taiyuan coal reservoir

WANG Shan-bo, TANG Shu-heng, WAN Yi, LI Zhong-cheng, ZHANG Song-hang

(School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To study water features and hydrodynamic conditions of the No. 15 Taiyuan formation coal reservoir and its roof limestone in the southern Qinshui basin, this paper collected 51 water samples from the river, coal-bed methane well drainage, coal reservoir and its roof limestone in the South Shizhuang region. Measurements of hydrogen and oxygen isotope and main ion concentration in the water samples show that the water discharged from CBM wells is a mixture of coal seam water and roof limestone water. The No. 15 coal seam has a strong hydraulic connection with the roof limestone fracture aquifer, and receives substantial recharge from roof limestone water. The sealing ability of the roof limestone fracture aquifer is weak, and the runoff speed of water in the limestone fracture is fast. Roof limestone water demonstrates a drift of ^{18}O , and the water that is discharged from the CBM wells of the No. 15 coal seam has the drift of both of ^{18}O and D. At the same time, water discharged from the CBM wells of the No. 3 coal seam mainly demonstrates a drift of D. All the water discharged from the CBM wells present a positive correlation with salinity (TDS), and the data of δD and $\delta^{18}\text{O}$ can be used as reference factors for judging the runoff conditions of coal seam water.

Key words: coal seam water; hydrogen and oxygen isotope; Taiyuan formation; southern Qinshui Basin; drift

沁水盆地煤层气勘探和开发实践过程中发现3号煤层的赋水条件较利于煤层气井排水采气,煤层气井产量高,生产稳定。但是由于15号煤层产水量较大,降压困难,造成煤层气井产量不稳定,衰减速度

收稿日期:2012-04-01 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-003);国家自然科学基金资助项目(40972108)

作者简介:王善博(1987—),男,河北邯郸人,硕士研究生。E-mail: wangshanbo123@126.com。通讯作者:唐书恒(1965—),男,河北正定人,教授。Tel:010-82320601, E-mail: tangsh@cugb.edu.cn

快。因此,研究沁水盆地南部太原组 15 号煤储层及其顶板灰岩的含水特征及水动力条件,对太原组 15 号煤储层的煤层气有效开发具有十分重要的指导意义。

目前多位研究者对沁水盆地南部太原组 15 号煤储层及其顶板灰岩含水性及含水域特征已开展了一定的研究^[1-5],在环境同位素的领域也进行了一些针对地下水和煤层气中¹³C 同位素特征的研究^[6-7],但在氢氧同位素方面所做的研究较少。因此,笔者运用氢氧同位素分析资料对沁水盆地南部柿庄地区的太原组 15 号煤储层及其顶板灰岩含水性和含水域特征进行了研究,并结合其他水化学特征进行了综合分析。

1 研究区概况

柿庄南区块位于晋城市北部,向北距太原市 260 km,向南方向距晋城市区 60 km。柿庄南区块构造位置位于沁水盆地东南缘向斜地带,属于中山区地形地貌,地势东南低西北高,海拔高度 780~1 180 m。

本区煤系地层的含水层主要有奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层和太原组裂隙灰岩含水层。其中太原组 K₂ 灰岩含水层为 15 号煤层顶板,奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层构成煤系基底,但煤系地层之下的铝土质泥岩封隔了下伏的奥陶系灰岩水^[8]。

2 样品采集与测试

本次研究所用样品分别于 2011 年 7 月,9 月,10 月和 2012 年 2 月分 4 次从研究区采集得到,共采集了柿庄南区块连续排采 1 a 以上的煤层气井排水水样 38 个,另外还采集了王台铺煤矿井下 15 号煤层水样 1 个、15 号煤层顶板灰岩水样 2 个,寺河二号煤矿井下 15 号煤层顶板灰岩水样 4 个,古书院矿井下 15 号煤层顶板灰岩水样 5 个。并在进行取样的一口煤层气井旁的小河里采集地表水水样 1 个,同时借鉴了前人所测试的该区 3 个地表水样的氢氧同位素组成作为对照。

取样使用 1.5 L 聚乙烯塑料瓶 2 个,直接从煤层气井口及矿井下渗水点采集水样,塑料瓶要用所采集水样反复冲洗 3 次以上。取样时水样装满整个塑料瓶,排出瓶内空气,再用瓶盖密封,并标记取样时间和井名或地点。

水样采集后分别送至北京核工业地质研究所测试中心和中国煤炭地质总局第一勘探局测试中心作氢氧稳定同位素及常规离子测定。氢氧同位素测试借助 Flash EA 元素分析仪,采用天然水中氧同位素

二氧化碳-水平衡法(DZ/T 0184. 21—1997)和氢同位素锌还原法(DZ/T 0184. 19—1997)进行测定。常规离子采用人工滴定的方法测试。测试结果见表 1。

3 氢氧同位素组成特征

从氢氧同位素组成来看,煤层气井排出水的氢氧同位素组成比较接近。排采 3 号煤的煤层气井排出水 δD 值在 $-84.5\% \sim -75.7\%$,平均 -80.6% , $\delta^{18}O$ 值在 $-12.7\% \sim -10.5\%$,平均 -11.1% ;排采 15 号煤的煤层气井排出水 δD 值在 $-85.5\% \sim -80.0\%$,平均 -83.2% , $\delta^{18}O$ 值在 $-11.8\% \sim -10.2\%$,平均 -11.2% ;王台铺煤矿井下采集的 15 号煤层水 δD 值为 -85.4% , $\delta^{18}O$ 值为 -11.0% ,而矿井下采集的 15 号煤层顶板灰岩水的 δD 值在 $-83.1\% \sim -63.1\%$,平均 -72.4% , $\delta^{18}O$ 值在 $-11.0\% \sim -7.3\%$,平均 -9.2% 。

以往的研究认为中国大气降水 δD 在 $20\% \sim -190\%$, $\delta^{18}O$ 在 $2\% \sim -24.3\%$ ^[9]。可以看出本次所取的水样的氢氧同位素组成均在中国大气降水的氢氧同位素组成范围内,说明所有水样的初始来源均为大气降水。此外排采 15 号煤的煤层气井排出水的氢氧同位素组成,比矿井下采集的 15 号煤层水的氢氧同位素组成要重,而比矿井下采集的 15 号煤层顶板灰岩水的同位素组成要轻。所以认为目前排采 15 号煤的煤层气井排出水应该是煤层水和煤层顶板灰岩水的混合水。15 号煤储层和顶板灰岩之间存在较强的水力联系,煤层在排水过程中接受灰岩水的大量补给。这也是造成 15 号煤储层降压困难,产气量低的重要原因。

前人通过大量的研究得到我国的大气降水线方程为 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$,这对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义^[9-10]。将本次采集的水样描绘在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图(图 1),可以看出本次所采集的各类水样在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图上具有一定的分布规律。

本次所取水样在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图上均分布在我国大气降水线附近,说明煤层水、煤层顶板灰岩水、煤层气井排出水以及地表水的原始来源均为大气降水,接受大气降水补给。

地表水样的氢氧同位素组成较重,在图 1 上沿着大气降水线分布在最上方的位置,这是由于地表水长期受到较强的蒸发效应影响的结果。蒸发效应是一个高分馏过程,会使水发生强烈重氢氧稳定同位素富集^[11]。地表水样有 3 个数据点分布在大气降水线右侧,呈现出比较好的线性关系;另有一个地表水样落

表 1 水样测试结果
Table 1 The test results of sample water

水样类型	水样 编号	$\delta D(V-SMOW)$ /‰	$\delta^{18}O(V-SMOW)$ /‰	TDS/ ($mg \cdot L^{-1}$)	离子浓度/($mg \cdot L^{-1}$)					
					$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	NO_3^-
	1	-80.9	-11.1	-	-	-	-	-	-	-
	2	-84.2	-10.2	1 885	615.72	6.03	3.5	536.03	34.33	0.63
	3	-83.7	-11.8	1 263	362.76	6.12	3.31	132.81	21.90	0.35
	4	-84.2	-11.4	1 430	416.21	8.11	4.05	128.41	28.14	0.61
	5	-82.7	-11.6	-	-	-	-	-	-	-
	6	-83.8	-11.2	1 175	353.17	3.57	1.84	109.05	28.14	0.59
	7	-83.7	-11.1	977	291.14	2.59	1.74	109.83	32.13	3.71
	8	-82.7	-11.7	-	-	-	-	-	-	-
15 号煤层 产出水	9	-84.3	-11.0	1 619	538.38	0.84	2.39	455.45	42.40	0.52
	10	-84.8	-11.4	1 147	307.28	0.07	4.85	98.56	33.60	0.35
	11	-83.0	-11.1	1 163	342.71	1.07	4.43	94.98	22.77	0.59
	12	-83.0	-11.1	1 406	417.43	2.22	7.37	160.07	22.77	0.54
	13	-80.0	-11.6	-	-	-	-	-	-	-
	14	-83.0	-10.4	2 475	857.87	1.52	4.79	907.39	43.29	0.68
	15	-81.9	-11.5	1 342	402.87	1.14	6.59	199.74	24.84	0.29
	16	-84.1	-11.2	1 186	349.03	1.23	2.02	52.79	30.81	0.75
	17	-84.3	-11.0	1 202	377.39	0.10	2.02	196.19	44.78	0.63
	18	-85.5	-11.7	991	289.19	0.63	1.86	60.87	36.51	0.23
	19	-83.5	-10.2	981	303.81	5.25	6.67	248.17	14.61	0.40
	20	-83.6	-11.5	1 225	421.43	1.18	4.85	433.74	14.61	0.31
3+15 号煤 层产出水	21	-84.8	-11.2	1 287	434.46	2.11	8.94	471.28	14.16	0.29
	22	-82.7	-12.1	1 100	359.97	0.60	1.74	274.97	21.90	0.29
	23	-82.6	-12.2	2 329	826.87	3.34	0.23	967.76	43.81	0.19
	24	-83.7	-12.0	1 164	339.47	1.46	4.67	132.31	17.52	0.38
	25	-75.7	-11.0	3 858	1 329.13	3.72	12.83	1 454.42	39.43	0.27
	26	-83.6	-11.3	1 004	318.62	7.10	6.63	262.10	16.08	0.42
	27	-84.3	-11.4	948	305.40	8.71	7.58	332.90	14.61	0.42
	28	-81.1	-10.9	1 208	377.84	3.01	1.48	124.90	71.83	0.59
	29	-80.6	-12.7	1 059	325.24	1.53	1.94	112.74	68.65	0.25
	30	-83.9	-12.5	895	276.89	1.13	2.32	153.90	24.84	0.40
3 号煤层 产出水	31	-82.4	-11.3	2 070	687.81	3.07	1.84	564.70	25.47	0.42
	32	-82.3	-12.7	1 927	645.25	1.65	2.91	566.36	48.19	0.27
	33	-70.6	-7.8	1 479	453.61	1.24	3.31	177.69	34.29	0.68
	34	-84.5	-11.2	808	243.76	1.35	2.20	68.60	15.54	0.10
	35	-81.6	-10.5	1 435	453.08	1.79	2.95	253.31	26.79	0.59
	36	-79.0	-10.6	1 594	490.44	0.23	11.96	202.29	62.98	0.56
	37	-78.2	-10.6	1 535	471.38	1.45	2.77	142.49	68.35	0.49
	38	-84.4	-12.2	1 658	577.78	2.01	5.43	643.68	21.90	0.38
15 号煤矿井水	39	-85.4	-11.0	1 412	453.97	3.91	5.16	346.84	39.41	0.37

续表

水样类型	水样编号	$\delta D(V-SMOW)$ /‰	$\delta^{18}O(V-SMOW)$ /‰	TDS/ ($mg \cdot L^{-1}$)	离子浓度/($mg \cdot L^{-1}$)					
					$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	NO_3^-
15号煤层 顶板灰岩水	40	-71.1	-7.3	700	271.14	22.18	42.59	178.67	0.01	0.35
	41	-75.1	-8.8	1345	376.72	13.19	22.20	208.45	25.38	0.32
	42	-76.4	-10.2	731	118.03	22.30	47.88	17.58	6.15	0.23
	43	-70.5	-9.7	629	101.94	12.07	53.77	19.36	0.01	0.59
	44	-71.4	-9.3	633	97.82	13.74	55.61	19.36	0.01	0.47
	45	-70.2	-9.2	3103	543.34	106.10	255.07	51.02	0.01	1.52
	46	-69.3	-9.1	3367	641.07	101.62	247.71	56.30	0.01	1.66
	47	-63.9	-8.0	1194	333.79	2.69	2.95	36.94	22.77	0.26
	48	-64.3	-8.5	1116	311.74	2.01	2.95	29.92	22.77	0.35
	49	-83.1	-10.7	892	256.08	3.65	2.95	75.66	21.46	0.21
50	-82.0	-10.9	873	251.53	1.29	4.79	70.37	22.77	0.19	
地表水	51	-67.4	-10.9	402	63.96	11.47	35.15	25.95	11.67	0.33
	52	-66.8	-8.6	-	-	-	-	-	-	-
	53	-62.0	-8.5	-	-	-	-	-	-	-
	54	-53.6	-6.8	-	-	-	-	-	-	-

注：“-”代表未测试。

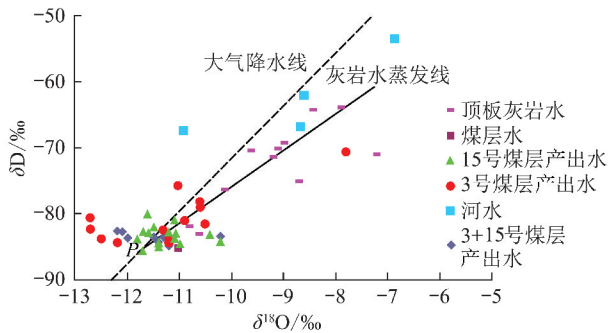


图1 水中氢氧同位素 $\delta D-\delta^{18}O$ 的关系

Fig. 1 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of hydrogen and oxygen isotopes in water

于大气降水线左侧,且同位素组成较轻,该水样取样于煤层气井附近的小河中,可能受到煤层气井排出水及一些浅层地下水的混合。

矿井下采集的15号煤层顶板灰岩水的氢氧同位素组成较地表水偏轻,但在图1上分布特征与地表水类似,沿大气降水线右侧线性分布,大部分顶板灰岩水与地表水分布在同一条直线上,且有些顶板灰岩水样具有与地表水接近的氢氧同位素组成。说明地表水与15号煤层顶板灰岩水之间水力联系较好,顶板灰岩水受地表水补给。根据15号煤层顶板灰岩水样拟合的灰岩水蒸发线,可以反映出蒸发效应对顶板灰岩水氢氧同位素组成的影响^[12]。灰岩水蒸发线与大气降水线的交点P,反应的是大气降水不受蒸发作用影响直接补给灰岩含水层时的氢氧同位素组成^[13]。

可以看出灰岩水蒸发线斜率只略小于大气降水线,说明由于灰岩中裂隙的大量存在,使得15号煤层顶板灰岩裂隙含水层封闭性较差,灰岩水受蒸发作用影响明显,且灰岩水接受大气降水补给较快,水在灰岩裂隙中径流速度较快^[14]。15号煤层顶板灰岩水样大部分分布在灰岩水蒸发线的中部和右上部,反映了受到较强的蒸发作用影响,但也有两个灰岩水样落在了蒸发线的左下部距离P点较近的位置,受蒸发作用影响较小。这说明15号煤层顶板灰岩具有横向的不均一性,局部可能存在封闭条件较好的部位,使得这些部位的灰岩水与大气降水和浅部地下水之间的水力联系较弱。

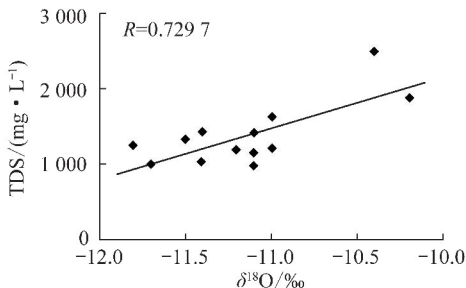
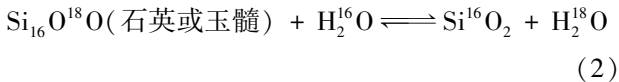
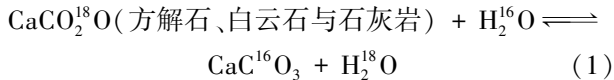
排采3号煤的煤层气井排出水在图1上分布比较离散,大体上分成左右两部分,反映出了煤层的非均质性对煤层水的同位素组成有较大影响。其中35号水样的氢氧同位素组成明显重于其他排采3号煤层的煤层气井排出水,考虑到采集35号水样的煤层气井已排采较长时间,所以压裂液对产出水的影响可以忽略不计,造成该煤层气井排出水氢氧同位素偏重的原因可能是煤层气井附近存在断层构造,使得煤层和其他含水层联通,有其他氢氧同位素组成较重的水体混入。排采15号煤的煤层气井排出水水样是从5口煤层气井多次采集的水样,在同一口煤层气井不同批次所采水样的氢氧同位素组成变化不大,反映出煤层气井产出水的氢氧同位素组成受季节效应影响较小。整体上排采15号煤的煤层气井排出水水样在图

1 上分布较为集中,都分布在顶板灰岩水和矿井下采集的 15 号煤层水之间,说明排采 15 号煤层的煤层气井排出水是煤层水和煤层顶板灰岩水的混合水。3 号和 15 号煤层合采的煤层气井排出水水样分布比较接近于单采 15 号煤的煤层气井排出水水样。说明合采 3 号和 15 号煤层的煤层气井产出水中 15 号煤层贡献较大。

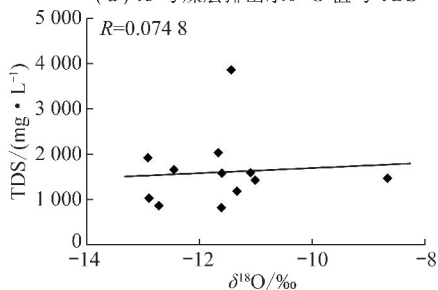
煤矿中采集的 15 号煤层水的同位素组成较轻,在图 1 上落在所有水样的最下部,和煤层气井排出水具有一定差别,但由于在煤矿中取水困难,只取到一个煤层水样。为了更好地研究煤层水的氢氧同位素组成特点,还需在今后的研究中补充井下水样的采集和测试。

4 氢氧同位素漂移特征

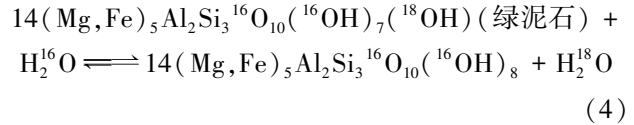
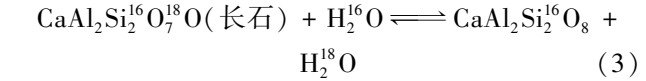
矿井下所取的 15 号煤层顶板灰岩水呈现出明显的 ^{18}O 漂移特征。水样数据点向右偏离大气降水线,如图 1 所示。这是由于碳酸盐岩地层是富集 ^{18}O 的,顶板灰岩水在径流的过程中,不断地溶解灰岩中的含氧矿物成分,含氧矿物中较重的氧原子易于和灰岩水中较轻的氧原子发生同位素交换反应,方程式见式(1)~(4)^[11]。从而使得顶板灰岩水中的 ^{18}O 不断富集,发生 ^{18}O 同位素漂移。



(a) 15 号煤层排出水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 TDS



(c) 3 号煤层排出水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 TDS

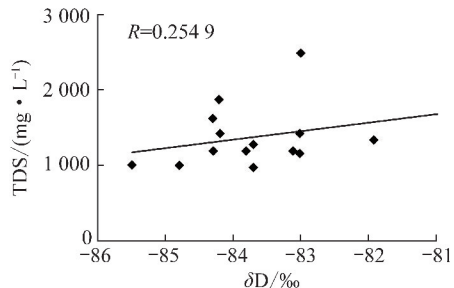


排采 15 号煤的煤层气井排出水由于是煤层水和顶板灰岩水的混合水,所以既表现出 ^{18}O 漂移的特点,也表现出 D 漂移特点。而排采 3 号煤的煤层气井排出水则主要表现出 D 漂移特点。这是由于煤层水通过煤层裂隙形成的相对独立的导水网进行径流,在此过程中煤层水与煤层充分接触,不断溶解煤层中大量的含氢矿物成分(例如 H_2S , CH_4 和可溶有机物等),含氢矿物中的氢原子易于被煤层中的黏土矿物所吸附,而较重的氘原子则易于同水中的氢原子产生同位素交换反应^[11],方程式见式(5)^[14]。从而使煤层水中 δD 值发生变化,形成 D 漂移。

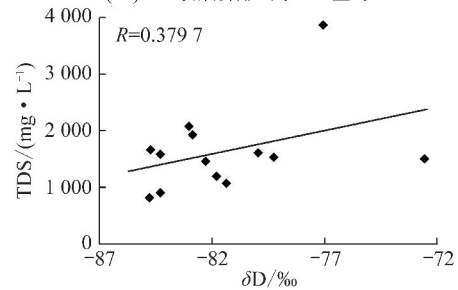


5 煤层气井产出水氢氧同位素与部分常规水化学指标的关系

地下水在径流过程中,不断地溶解地层中的可溶矿物成分,所以沿着地下水的径流方向矿化度 TDS 不断增大,同时溶解的含氢、氧矿物组分不断地同地下水发生氢氧同位素交换反映,使得地下水中的氢氧同位素组成发生变化。所以总体上,煤层气井排出水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都与矿化度 TDS 呈现出一定的相关性,如图 2 所示。由于矿化度 TDS 可以很好地反映



(b) 15 号煤层排出水 δD 值与 TDS



(d) 3 号煤层排出水 δD 值与 TDS

图 2 煤层气井排出水氢氧同位素组成与 TDS 的关系

Fig. 2 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of hydrogen and oxygen isotopes and TDS in water which drained from coalbed

出地下水的径流条件,所以煤层水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也可以作为判断煤层水径流条件的参考因素。

研究发现煤层气井排出水的氢氧同位素组成与水中一些离子的浓度具有一定的相关性。排采15号和3号煤的煤层气井产出水的氢氧同位素组成均与水中的 NO_3^- 离子浓度具有一定的相关性,如图3所示。这可能是由于在还原环境中,水中的 NO_3^- 离子可与有机质发生反映,使得有机质中较重的氢氧同位

素进入水中,见反应方程式(6),(7)^[15]。 NO_3^- 离子浓度越高越有利于反应的发生,使水中氢氧同位素组成变重。

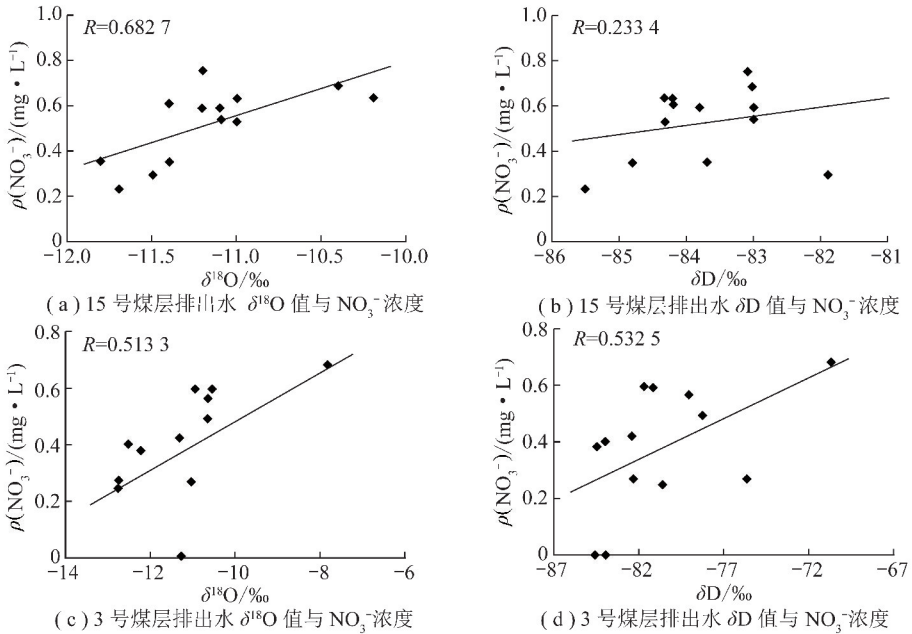
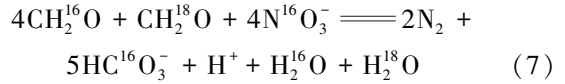
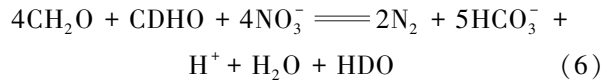


图3 煤层气井排出水氢氧同位素组成与 NO_3^- 离子浓度的关系

Fig. 3 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of hydrogen and oxygen isotopes and concentration of NO_3^- in water which drained from coalbed

通过对比发现排采15号煤的煤层气井排出水 $\delta^{18}O$ 值与水中 CO_3^{2-} 离子浓度具有一定的正相关性,而排采3号煤的煤层气井排出水 $\delta^{18}O$ 值与 CO_3^{2-} 离子浓度相关性较差,如图4所示。这是因为15号煤层排出水中混有顶板灰岩水,灰岩水中 CO_3^{2-} 离子很大部分来自灰岩的溶解,如上文所述灰岩的溶解会使得同位素交换反应的发生,使水中的 $\delta^{18}O$ 值变大,所以15号煤层排出水的 $\delta^{18}O$ 值与 CO_3^{2-} 离子浓度具有正相关的关系。而排采3号煤的煤层气井排出水主要就是3号煤层水,水中的碳酸氢根离子可能主要靠脱硫酸作用产生,所以排采3号煤的煤层气井排出水 $\delta^{18}O$ 值与 CO_3^{2-} 离子浓度相关性较差。

6 结论

(1)所采集的地表水、15号煤层顶板灰岩水、煤层气井排出水和15号煤层水的氢氧同位素数据均分布在我国大气降水线附近,氢氧同位素组成也均在我国大气降水的氢氧同位素组成范围内。说明地表水、

煤层顶板灰岩水、煤层气井排出水和15号煤层水的原始来源均为大气降水,受大气降水补给。

(2)排采15号煤的煤层气井排出水是煤层水和煤层顶板灰岩水的混合水。15号煤储层和顶板灰岩之间存在较强的水力联系,煤层在排水过程中接受灰岩水的大量补给。

(3)15号煤层顶板灰岩裂隙含水层整体上封闭性较差,水在灰岩裂隙中径流速度较快,但灰岩裂隙含水层具有横向的不均一性,局部可能存在裂隙发育较差封闭条件较好的部位,使得这些部位的灰岩水受大气降水补给速度缓慢。

(4)15号煤层顶板灰岩水表现出 ^{18}O 漂移的特点,排采3号煤的煤层气井排出水则主要表现出D 漂移特点。排采15号煤的煤层气井排出水由于是顶板灰岩水和煤层水的混合水,所以既表现出 ^{18}O 漂移特征,也表现出D 漂移特征。

(5)煤层气井排出水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值都与矿化度 TDS 呈现出一定的正相关性,因此 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也可

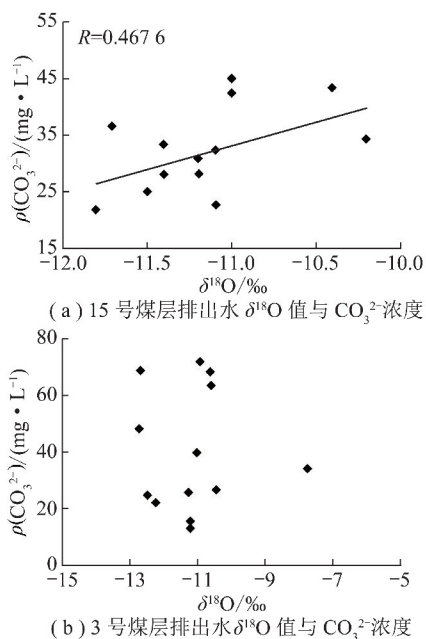


图4 煤层气井排水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 CO_3^{2-} 离子浓度的关系

Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ of oxygen isotopes and concentration of CO_3^{2-} in water which drained from coalbed

以作为判断煤层水径流条件的参考因素。

(6)煤层气井产出水的氢氧同位素组成与水中的 NO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子浓度具有一定的相关性。

参考文献:

- [1] 王红岩,张建博,刘洪林,等.沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征[J].煤田地质与勘探,2001,29(5):33-36.
Wang Hongyan, Zhang Jianbo, Liu Honglin, et al. Hydrogeological characteristics of coalbed methane reservoirs in the southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5): 33-36.
- [2] 傅雪海,秦勇,韦重韬,等.沁水盆地水文地质条件对煤层含气量的控制作用[A].雷群,李景明,赵庆波.煤层气勘探开发理论与实践[C].北京:石油工业出版社,2007:61-69.
Fu Xuehai, Qin Yong, Wei Chongtao, et al. Hydrogeological conditions of Qinshui Basin on the control of methane content in coal seam [A]. Lei Qun, Li Jingming, Zhao Qingbo. Coalbed Methane Exploration and Development Theory and Practice [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 61-69.
- [3] 秦胜飞,宋岩,唐修义,等.水动力条件对煤层气含量的影响——煤层气滞留水控气论[J].天然气地球科学,2005,16(2):70-77.
Qin Shengfei, Song Yan, Tang Xiuyi, et al. The influence on coalbed gas content by hydrodynamics; the stagnant groundwater controlling [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2): 70-77.
- [4] 刘洪林,李景明,王红岩,等.水动力对煤层气成藏的差异研究[J].天然气工业,2006,26(3):35-37.
Liu Honglin, Li Jingming, Wang Hongyan, et al. The different effect of hydrodynamic force on the accumulation of coalbed methane [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 35-37.
- [5] 高小康.沁水盆地南部水动力条件控制煤层气富集的机理研究

[D].北京:中国石油勘探开发研究院,2011.

Gao Xiaokang. Mechanism investigation of hydrodynamic conditions controlling CBM enrichment in the southern Qinshui Basin [D]. Beijing: Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2011.

- [6] 秦胜飞,宋岩,唐修义,等.水动力对煤层甲烷碳同位素的影响[J].天然气工业,2005,25(11):30-32.
Qin Shengfei, Song Yan, Tang Xiuyi, et al. Hydrodynamic influence on carbon isotope of coalbed methane [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 30-32.
- [7] 张建博,陶明信.煤层气甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义——以沁水盆地为例[J].沉积学报,2000,18(4):611-614.
Zhang Jianbo, Tao Mingxin. The geological significance of methane carbon isotope acting on CBM exploration; a case study of the Qinshui Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 611-614.
- [8] 孙强,叶建平,张建,等.沁水盆地南部柿庄南区块煤层气地质特征[J].中国煤炭地质,2010,20(6):9-12.
Sun Qiang, Ye Jianping, Zhang Jian, et al. CBM geological characteristics in Shizhuang south block, Southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology of China, 2010, 20(6): 9-12.
- [9] 郑淑惠,侯发高,倪葆龄.我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J].科学通报,1983,13(2):39-41.
Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Stable isotope research in China atmospheric precipitation [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 13(2): 39-41.
- [10] 徐林玲,王华,冯玉梅.桂林地区大气降水的D和 ^{18}O 同位素的研究[J].中国岩溶,2004,23(4):304-309.
Xu Linling, Wang Hua, Feng Yumei. Research on D and ^{18}O isotope in the precipitation of Guilin [J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(4): 304-309.
- [11] 陈陆望,桂和荣,殷晓曦,等.深层地下水 ^{18}O 与D组成特征与水流场[J].中国矿业大学学报,2008,37(6):855-859.
Chen Luwang, Gui Herong, Yin Xiaoxi, et al. Composing characteristic of ^{18}O and D and current field in deep groundwater [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 855-859.
- [12] 包为民,胡海英,王涛,等.蒸发皿中水面蒸发氢氧同位素分馏的实验研究[J].水科学进展,2008,19(6):780-785.
Bao Weimin, Hu Haiying, Wang Tao, et al. Experimental study on the fractionation mechanism of hydrogen and oxygen stable isotopes in evaporation from water surface of evaporation pans [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 780-785.
- [13] 桂和荣,陈陆望.皖北矿区深部地下水环境同位素混合模式研究[J].煤炭科学技术,2005,33(9):68-71.
Gui Herong, Chen Luwang. Research on mixed mode of isotope in water environment of deep section of Wanbei Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(9): 68-71.
- [14] 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,2007:151-154.
- [15] 沈照理,朱宛华,钟佐荣.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993:43-44