

# 淮南煤田潘谢矿区深层地下水氢氧同位素特征分析

葛涛, 储婷婷, 刘桂建, 范翔, 吴盾

(中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026)

**摘要:**从淮南煤田潘谢矿区采集了不同水体(大气降水、地表河水、太原组灰岩水、奥陶系灰岩水和寒武系灰岩水)样品34个,进行溶解性总固体(TDS), $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的测试,分析了不同水体的氢氧同位素组成特征及其成因。结果表明:不同的蒸发斜率以及氘盈余表明潘谢矿区多个灰岩含水层的蒸发作用以及地下水滞留时间的差异。太原组灰岩水与地表水(河流)水力联系相对于奥陶系灰岩水更强,灰岩水(石炭系、奥陶系、寒武系的碳酸盐岩裂隙岩溶水)的同位素组成特征可能因为浅层水与深部地下水的混合、水岩作用等原因导致灰岩含水层表现出了不同程度的氢氧同位素漂移。

**关键词:**氢同位素;氧同位素;氘盈余;淮南煤田

**中图分类号:**P641.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2014.02.006

**引用格式:** Ge Tao, Chu tingting, Liu Guijian, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of deep ground water in the Panxie mining area in Huainan Coalfield[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(2):112-118,170.

葛涛, 储婷婷, 刘桂建, 等. 淮南煤田潘谢矿区深层地下水氢氧同位素特征分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014,44(2):112-118,170.

## Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of deep ground water in the Panxie mining area in Huainan Coalfield

GE Tao, CHU tingting, LIU Guijian, FAN Xiang, WU Dun

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** 34 water samples (i. e., rainfall, surface water, groundwater from the Taiyuan Formation limestone aquifer, the Ordovician limestone aquifer and the Cambrian limestone aquifer) were collected from the Panxie mining area of Huainan Coalfield, and TDS (total dissolved solids), hydrogen and oxygen isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) were determined. Different evaporation slopes and deuterium excesses of individual aquifers indicate that there are different evaporation rates and residence times among them. The Taiyuan Formation limestone aquifer has a stronger hydraulic connection with the surface water compared with the Ordovician limestone aquifer. Isotope composition of the limestone water is associated with mixing between shallow recharge groundwater and a contribution including mineralized fluids from the deep aquifer. The primary factor responsible for  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  excursion may be attributed to water-rock interaction in the limestone aquifer.

**Key words:** hydrogen isotope; oxygen isotope; deuterium excess; Huainan Coalfield

收稿日期:2013-07-15;修回日期:2013-10-08

基金项目:国家自然科学基金(41173032),国家科技支撑计划项目(1012BAC10B02),淮南矿业集团科技创新项目资助。

作者简介:葛涛,男,1988年生,硕士生。研究方向:环境地球化学。E-mail: gts520@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘桂建,教授。E-mail: lgj@ustc.edu.cn

# 0 引言

从水文地质学来说,不同环境下的补给水中的同位素组成由于受到大气过程的改变会产生特定的同位素信号,这个信号可以成为地下水来源的自然示踪<sup>[1]</sup>,因此,地下水中的环境同位素是研究区域水文循环的理想方法<sup>[2-4]</sup>.环境同位素指环境中广为存在的同位素 H,C,N,O 和 S 等,是水文、地质和生物系统中的基本元素,这些元素的稳定同位素(包括 <sup>2</sup>H,<sup>3</sup>H,<sup>13</sup>C,<sup>14</sup>C 和 <sup>18</sup>O 等)可作为水、碳、养分和溶质循环的示踪剂<sup>[1]</sup>.

国内外学者对于大气降水、河水以及浅层地下水中的氢氧同位素组成都已有较成熟的研究<sup>[5-7]</sup>,对于深部灰岩<sup>[8]</sup>以及岩浆岩<sup>[9]</sup>已经有一系列的研究,但由于采样等客观因素的限制导致对深部地下水的研究不多,刘俊杰等<sup>[10]</sup>、陈陆望等<sup>[11]</sup>、黄平华<sup>[12]</sup>等利用氢氧同位素对不同煤矿深层地下水进行过研究.本文从氢氧同位素组成出发,分析深部灰岩含水层地下水中氢氧同位素组成特征,查明大气降水、地表水对深层地下水的补给关系,为矿井突水水源的识别奠定基础.

# 1 研究区概况

淮南煤田位于安徽省淮南市北部,该区为过渡

带气候,季节明显,年平均降水量为 926.33 mm,低于全年蒸发量 1 442.9 mm,蒸发作用明显.雨量多集中在 6,7 和 8 月.矿区地表水系丰富,包括常年性河流——淮河、季节性河流——泥河和黑河等河流以及较多的坍陷湖.

淮南煤田潘谢矿区地处淮河中游冲积平原区内,属华北地台南缘,在地质构造上属于淮南复向斜的组成部分.淮南煤田潘谢矿区(图 1)包括潘二、潘三、潘北、顾北、谢桥和张集等多个生产煤矿.潘谢矿区各个矿井的煤系地层均为淮河厚冲积层覆盖,各个矿井地层发育相近(图 2),并且由于几大断层的切割使得潘谢矿区属于一个相对独立的水文地质单元(图 1),主要充水含水层由上到下包括直接覆盖于煤系地层之上的新生界松散层下部含水层(简称“下含”),对矿井直接充水的二叠系煤系砂岩裂隙含水层(简称“煤系”),埋藏较深、水文地质条件复杂的石炭系太原组灰岩岩溶裂隙含水层(简称“太灰”)和奥陶系灰岩岩溶裂隙含水组(简称“奥灰”)(图 3).随着煤层开采深度的逐渐加大,太原组灰岩水和奥陶系灰岩水的影响越来越大,引起关注.

# 2 采样与测试

## 2.1 样品采集与前处理

从 6 大矿井(图 1)的长观孔、井下放水孔、出水

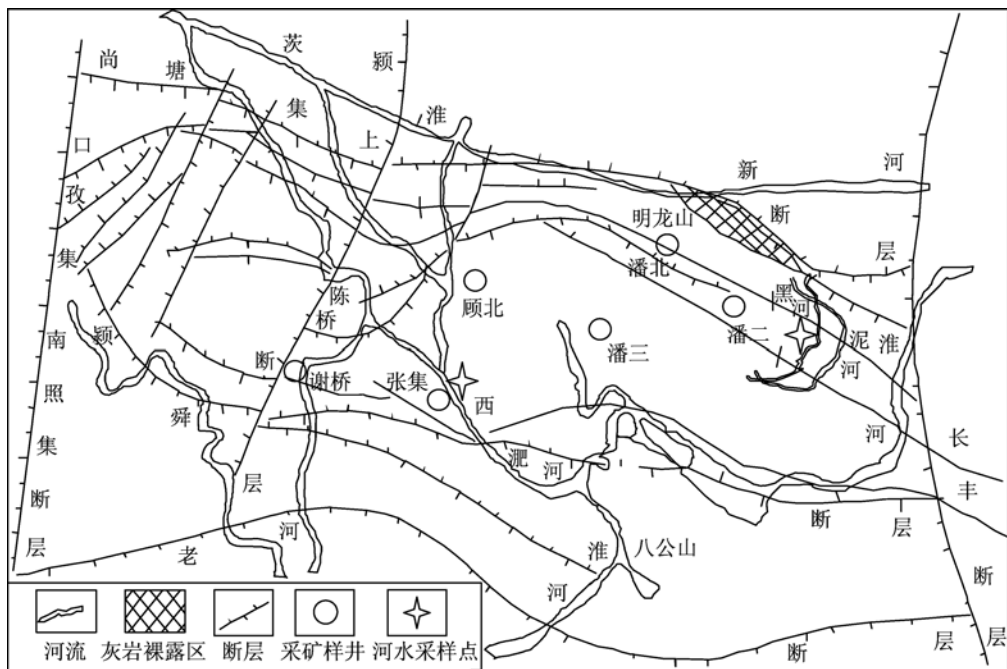


图 1 研究区略图

Fig. 1 Sketch of the studied area

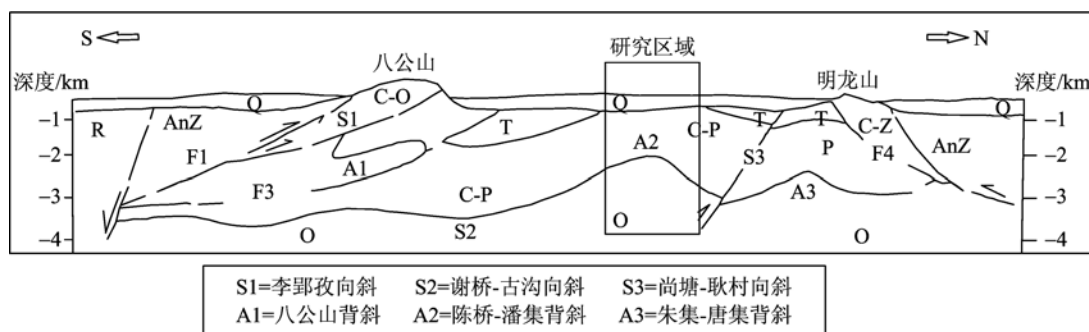


图 2 淮南矿区地质剖面图

Fig. 2 Schematic geologic map of the substratum, Huainan

点以及附近河流共采集地表水、太原组灰岩水、奥陶系灰岩水和寒武系灰岩水样品共 34 件(表 1),由于条件限制寒武系灰岩水样品(井下)仅作为参考. 水样使用酸洗过的塑料瓶采集,使用  $0.45 \mu\text{m}$  的滤纸过滤,加超纯硝酸消解使样品  $\text{pH} < 2$ , 低温 ( $< 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 保存直至测试.

表 1 样品信息及同位素测试结果

Tab. 1 The geographic information of sampling sites and the isotope test result

样品编号	取样时间	取样井田	水样类型	$\delta\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	TDS/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
S1	2012-07-15	潘集	雨水	-5.50	-40.23		3.77
S2	2012-07-20	泥河	河水	-6.10	-43.70		5.10
S3	2012-07-21	淮河	河水	-5.90	-42.91		4.29
T4	2011-07-25	潘二		-9.42	-72.87	1.72	2.49
T5	2012-03-23	张集		-9.89	-69.73		9.39
T6	2012-03-24	张集		-9.74	-81.37	2.51	-3.45
T7	2012-03-25	张集		-10.00	-70.40		9.6
T8	2012-03-28	潘北		-5.42	-36.21		7.15
T9	2012-04-26	谢桥		-5.73	-36.89		8.95
T10	2012-04-27	谢桥		-5.84	-48.84	2.21	-2.12
T11	2012-03-29	潘二	太原组灰岩水	-5.09	-30.87		9.85
T12	2012-04-28	潘二		-6.69	-42.75		10.77
T13	2012-04-29	顾北		-6.67	-59.85	2.98	-6.49
T14	2012-05-07	顾北		-6.71	-50.17	2.11	3.51
T15	2012-05-08	顾北		-6.08	-54.42	2.71	-5.78
T16	2011-12-09	潘三		-7.38	-57.48	2.34	1.56
T17	2011-12-10	潘三		-10.83	-73.48		13.16
T18	2011-01-09	谢桥		-9.04	-71.36	2.44	0.96
T19	2011-04-25	谢桥		-9.61	-75.06	1.97	1.82
A20	2012-04-04	潘北		-3.53	-26.1	2.31	2.14
A21	2012-04-04	潘北		-3.37	-23.09	1.98	3.87
A22	2012-04-30	顾北		-5.12	-51.33		-10.37
A23	2012-04-29	顾北		-4.11	-31.15	2.01	1.73
A24	2012-04-30	顾北		-4.31	-40.62	2.88	-6.14
A25	2011-09-08	谢桥		-9.43	-67.89		7.55
A26	2012-01-06	顾北	奥陶系灰岩水	-9.48	-71.62	1.64	4.22
A27	2012-01-07	张集		-9.46	-69.67		6.01
A28	2012-01-13	张集		-8.40	-79.91		-12.71
A29	2012-01-14	张集		-8.44	-63.61	1.42	3.91
A30	2012-01-14	潘二		-9.15	-70.67	1.90	2.53
A31	2012-01-17	潘二		-9.23	-76.19	2.31	-2.35
A32	2012-01-17	潘三		-9.15	-69.98	1.91	3.22
A33	2012-01-16	潘三		-9.32	-81.75	3.21	-7.19
H34	2011-04-30	谢桥	寒武纪灰岩水	-9.62	-87.65		-10.66

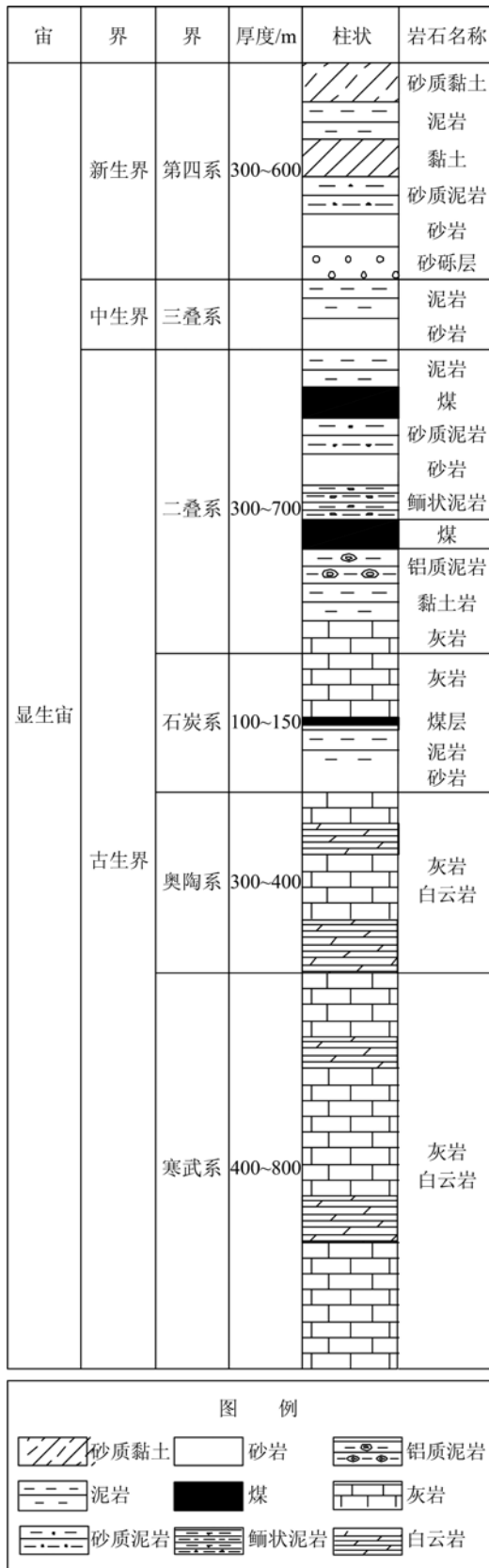


图 3 淮南矿区地层结构示意图

Fig. 3 A stratigraphic column of Huainan coal field

## 2.2 实验与测试

水样的氢氧同位素在南京地质矿产研究所实验室测试,测定仪器为 MAT 253 同位素比率质谱仪.氢同位素测定采用锌反应法,氧同位素测定采用氧-二氧化碳平衡法,测定结果以相对于 SMOW 标准的千分差表示,氢、氧同位素测定精度分别为  $\pm 0.2\text{‰}$  和  $\pm 0.1\text{‰}$ . 总溶解固体 (TDS) 采用重量法测定.

## 3 结果与讨论

### 3.1 地表水及地下水氢氧同位素组成分析

根据潘谢矿区所有水样品的测试结果(表 1)得到地表水及太灰和奥灰含水层地下水的氢氧同位素拟合曲线如图 4 所示,其中矿区地表水体拟合曲线(c),即地表水(2 个水样,1 个降水样)体蒸发线为  $\delta D/\text{‰} = 5.9\delta^{18}\text{O} - 7.8$ . 从图 4 中可以看出蒸发线明显落在全球大气降水线(GMWL)<sup>[13]</sup>以及我国大气降水线(LMWL)<sup>[14]</sup>的右下方,说明潘谢矿区地表水在经由大气降水形成之前经历了强烈的蒸发作用<sup>[15]</sup>,引起了雨水中的氢氧同位素富集,使得蒸发线明显偏离大气降水线<sup>[16]</sup>. 并且蒸发线与当地大气降水线的交点( $\delta^{18}\text{O} = -8.0\text{‰}$ ,  $\delta D = -55.0\text{‰}$ )为矿区地下水降水补给源的年平均降水的氢氧同位素组成.

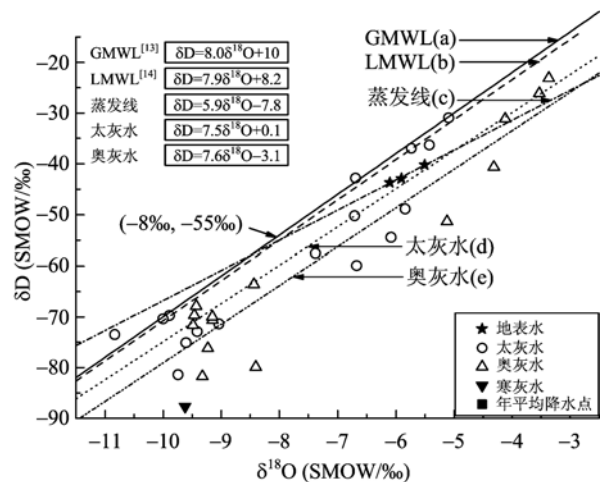


图 4 潘谢矿区不同水体  $\delta D - \delta^{18}O$  关系图

Fig. 4 Relationship between oxygen and hydrogen isotope composition of water from different aquifers of the Panxie mining area

从图 4 中可以看出,大部分的灰岩水样品均落在大气降水线的右下方或者在其附近,这充分说明

了大气降水是地下水的最根本来源. 部分太原组灰岩水样品与奥陶系灰岩水样品较为接近, 表明太原组含水层与奥陶系含水层具有某些相同的补给源. 相对于年平均降水点和地表水样品, 太原组灰岩水与奥陶系灰岩水样品处于两个变化范围内, 表明了潘谢矿区灰岩水存在着一些特征.

### 3.2 $\delta D - \delta^{18}O$ 拟合线斜率和氘盈余及其环境意义

大气降水是地表水和地下水的最终来源, 在大气降水经过蒸发作用成为地表水或者地下水之后, 地表水和地下水的氢氧同位素拟合线的斜率应小于 8<sup>[2]</sup>. Clark 等的研究表明  $\delta D - \delta^{18}O$  的“蒸发斜率”是湿度的函数<sup>[1]</sup>, 并且斜率越低表明蒸发作用越强烈<sup>[17-18]</sup>. 地表水体蒸发线的斜率明显低于 GMWL 和 LMWL 的斜率说明了所采集样品的水体多为夏季降水补给水体, 这与采样时间相符合(表 1). 潘谢矿区太原组灰岩水和奥陶系灰岩水的蒸发斜率均接近大气降水线的蒸发斜率, 这表明太原组灰岩含水层和奥陶系灰岩含水层的地下水多来自于冬季降水的补给, 虽然均经历了一定程度的蒸发作用.

氘盈余“ $d$ ”作为研究地下水补给来源的一个重要指标, 能有效指示地下水环境特征<sup>[13]</sup>, 表达式为  $d/\text{‰} = \delta D - 8\delta^{18}O$ . 氘盈余值的大小主要受到空气的相对湿度控制<sup>[1-2]</sup>, 即蒸发作用控制着氘盈余值的大小, 呈正相关关系<sup>[19]</sup>, 即相对湿度与氘盈余值呈负相关关系<sup>[20]</sup>. 从表 1 可以看出, 潘谢矿区太原组灰岩水和奥陶系灰岩水的氘盈余值之间的变化范围较大, 这可能是由于太原组灰岩水和奥陶系灰岩水由来自不同时期的降水混合形成<sup>[19]</sup>. 但是从整体的氘盈余平均值来看, 地表水 ( $d_{\text{mean}} = 4.39\text{‰}$ )、太原组灰岩水 ( $d_{\text{mean}} = 3.83\text{‰}$ ) 和奥陶系灰岩水 ( $d_{\text{mean}} = -0.26\text{‰}$ ) 的氘盈余平均值均明显低于  $10\text{‰}$ , 表明潘谢矿区灰岩水多集中为相对湿度较高的冬季降水所补给<sup>[1, 19]</sup>. 当水体受到强烈蒸发时, 产生动力同位素分馏效应, 导致氘盈余值下降<sup>[1]</sup>, 并且地下水的滞留时间越长, 其“ $d$ ”值也相对减小<sup>[21-23]</sup>. 当地下水在补给源不足、径流缓慢的过程中, 因动力学影响的蒸发作用再次活跃使得“ $d$ ”值更低, 并且水中的盐分会变得更高, 两者呈一种负相关关系, 这对再度蒸发的地下水尤为典型<sup>[24-25]</sup>. 对于部分水样品进行了总溶解固体 (TDS) 的测定. 各含水层地下水中的  $d$  与 TDS 之间的关系如图 5 所示.

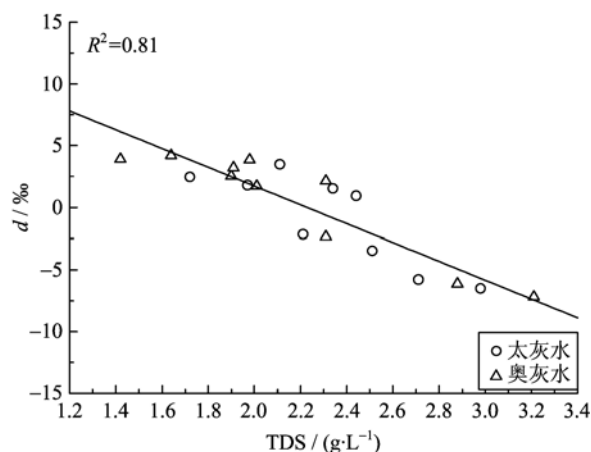


图 5 潘谢矿区地下水氘盈余与 TDS 的关系

Fig. 5 Relationship of deuterium excesses and TDS of groundwater from the Panxie mining area

从图 5 可以看到, 无论是太原组灰岩水还是奥陶系灰岩水的氘盈余与 TDS 都呈负相关关系, 这与相关文献资料<sup>[24-25]</sup>提到的氘盈余与 TDS 的关系基本相符. 总溶解固体 (TDS) 是水中溶解组分的总量. TDS 小表明水流补给充分, 地下水滞留时间短, 与围岩的水岩相互作用相对较弱; TDS 大表明水流补给不充分, 地下水滞留时间较长, 与围岩的相互作用较强<sup>[26]</sup>. 这解释了氘盈余与 TDS 之间的负相关关系. 奥陶系灰岩水较长的滞留时间增大了水中的 TDS 含量, 同时增大了灰岩水二次蒸发的可能, 进而导致了氘盈余值的进一步减小. 图 5 同时表明潘谢矿区不同地区的灰岩水的径流补给条件存在着一定的差别, 原因可能为煤矿采动改变了水动力条件.

### 3.3 不同含水层地下水氢氧同位素组成特征

(I) 太原组灰岩水: 潘谢矿区太原组灰岩水  $\delta^{18}O$  值介于  $-10.83\text{‰} \sim -5.09\text{‰}$  之间, 平均值为  $-7.78\text{‰}$ ;  $\delta D$  值介于  $-81.37\text{‰} \sim -30.87\text{‰}$  之间, 平均值为  $-58.00\text{‰}$ . 从图 6(a) 可以看出, 太原组灰岩水样品除 T8, T9, T11 和 T12 号样品外均落在当地蒸发线右下方. 表明潘谢矿区太原组灰岩水多为大气降水. 从图 6(a) 可以看出水样点分布较广, 表明了矿区内水文地质条件较为复杂. 对比下部寒灰水样点, 推测由于部分矿区采动的影响, 导致了局部地区的地下水径流发生了改变, 深部水与浅层水在此含水层发生混合, 不同含水层水源不同程度的混合产生了这种氢氧同位素组成特征. 对于 T8, T9, T11 和 T12 号样品相对于地表

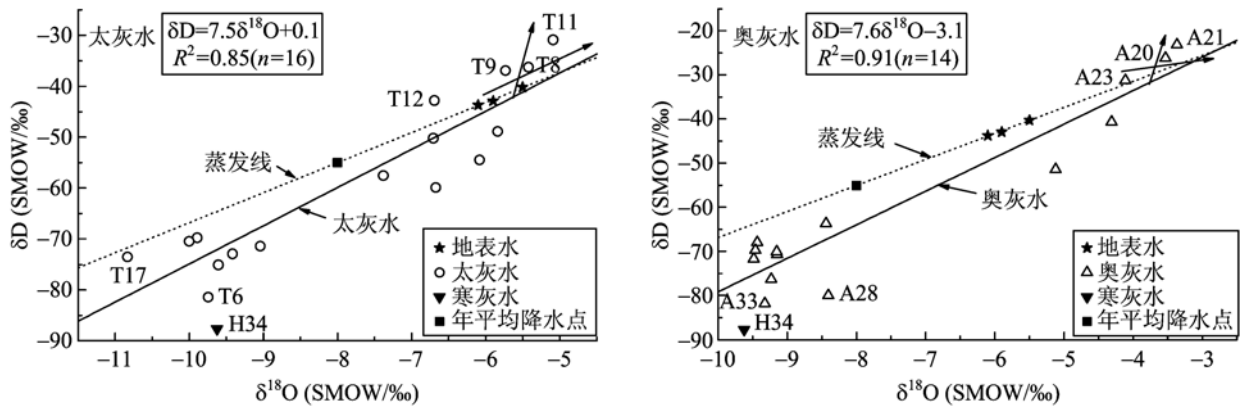


图 6 灰岩水氢氧同位素组成关系  
Fig. 6 Relationship of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in deep limestone aquifer

水所表现出的一定程度的氘漂移和氧漂移(图 6(a))<sup>[11,26]</sup>,可能为地表水或者浅层水在采动影响下透过构造裂隙向深部含水层运移,或者夏季降水透过北部灰岩出露区直接补给的过程中与围岩产生了同位素交换作用产生<sup>[11,26]</sup>.同时 T8, T9, T11 和 T12 号样品与地表水样点极为接近,表明太原组灰岩水与地表或者浅层水体的水力联系较为紧密.

(II) 奥陶系灰岩水:潘谢矿区奥陶系灰岩水  $\delta^{18}O$  值介于  $-9.7\text{‰} \sim -3.37\text{‰}$  之间,平均值为  $-7.59\text{‰}$ ;  $\delta D$  值介于  $-81.75\text{‰} \sim -23.09\text{‰}$  之间,平均值为  $-59.62\text{‰}$ .从图 6(b)中可以得到与太原组灰岩水极为相似的结论,除 A20, A21 和 A23 样品落在蒸发线左上方外,大部分样品均落在右下方,表明了奥陶系灰岩水同样多为大气降水来源.奥陶系灰岩水的氢氧同位素组成同样在一个较大范围内变化,表现出了与太原组灰岩水相似的特征,奥陶系含水层中的地下水也发生了深部古水与浅层水体不同程度的混合. T8, T9, T11 和 T12 号样品也表现出了与围岩矿物之间的相互作用,产生了一定的同位素漂移特征(图 6(b))<sup>[11,26]</sup>.但相对于太原组灰岩水与地表水体的差别较大,说明与太原组灰岩水相比,奥陶系灰岩水与地表水的水力联系稍差,奥陶系灰岩水的滞留时间相对长一些,这也与上文中氘盈余值反映的地下水滞留时间相符合.

总体来说,潘谢矿区的太原组灰岩水与奥陶系灰岩水可能有着极为相似的同位素组成特征,说明它们之间也具有一定的水力联系.

#### 4 结论

大气降水和地表水是潘谢矿区地下水的主要补给源,深部灰岩水以不同时期的冬季降水补给为主.氘盈余值以及样品点之间的亲疏关系表明,潘谢矿区太原组灰岩水与地表水或浅层水的水力联系更为紧密.奥陶系灰岩水相对于太原组灰岩水的滞留时间较长.深部灰岩水的氢氧同位素组成特征表明:由于采动的影响改变了局部地区的水文地质条件,使得浅层水体与深部水之间发生了不同程度的不均匀混合.与围岩矿物的同位素交换作用导致了太原组灰岩水和奥陶系灰岩水均发生了一定程度的氘漂移和氧漂移.

#### 参考文献 (References)

[1] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC press, 1997.  
 [2] Dansgard W. Stable isotope in precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4):436-468.  
 [3] 胡中信,薛怀军,穆月祥. 同位素技术在矿井水防治研究中的应用[J]. 煤炭工程, 2006(11): 48-50.  
 [4] Pan Guoying, Wang Suna, Sun xiaoyan, et al. Application of isotopic technique in identification of mine water inrush source [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(1):32-34. 潘国营,王素娜,孙小岩,等. 同位素技术在判别矿井突水水源中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(1): 32-34.  
 [5] 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(4):300-325.
- [6] Zhang Cuiyun, Zhang Sheng, Li Zhenghong, et al. Isotopic characteristics of surface water and groundwater in the up-stream of Hutuo River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(5):160-164.  
张翠云,张胜,李政红,等. 滹沱河上游区地表水和地下水同位素特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(5):160-164.
- [7] Chen Zongyu, Wan Li, Nie Zhenlong, et al. Identification of groundwater recharge in the Heihe Basin using environmental isotopes [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, 33(6):9-14.
- [8] Wu Bin, Wu Dun, Wan Zongqi et al. Geochemical characteristics of REE in limestone of the Taiyuan formation, Paner coalmine and their constraint on depositional environment [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(5):355-362.  
吴斌,吴盾,万宗启,等. 淮南潘二矿太原组灰岩稀土元素特征及沉积环境的分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2013, 43(5):355-362.
- [9] Jiang Mengmeng, Liu Guijian, Wu Bin et al. Geochemistry of rare earth elements (REEs) in coal from magmatic intrusion area from Wolonghu Coal Mine [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 42(1):10-16.  
姜萌萌,刘桂建,吴斌,等. 卧龙湖煤矿岩浆侵入区煤中稀土元素的地球化学特征[J]. *中国科学技术大学学报*, 2012, 42(1):10-16.
- [10] Liu Junjie, Zhao Feng, Wang daguo. Explain about the source of mine water by oxygen and hydrogen isotope composition in Fuxin coalmine area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1):39-43.  
刘俊杰,赵峰,王大国. 氢氧同位素组成对阜新煤矿区矿井水来源的解释[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1):39-43.
- [11] Chen Luwang, Gui Herong, Yin xiaoxi. Composing characteristic of hydrogen and oxygen stable isotopes and tracing of hydrological cycle [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10):1107-1111.  
陈陆望,桂和荣,尹晓曦. 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, 33(10):1107-1111.
- [12] Huang Pinghua, Chen Jiansheng, Ning chao. The analysis of hydrogen and oxygen isotopes in the ground water of Jiaozuo mine area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(05):770-775.  
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(05):770-775.
- [13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133:1702-1703.
- [14] 王恒纯. 同位素水文地质概论 [M]. 北京:地质出版社, 1991.
- [15] Zhang Yinghua, Wu Yanqing. Oxygen and hydrogen isotopes in precipitation in Heihe River Basin, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1):34-39.  
张应华,仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素研究[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1):34-39.
- [16] Allen D M. Sources of groundwater salinity on islands using  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  and  $^{34}\text{S}$  [J]. *Ground Water*, 2004, 42(1):17-31.
- [17] Friedman I, Machta L, Soller R. Water vapour exchange between a water droplet and its environment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(7):2761-2766.
- [18] Shi Hui, Liu Shirong, Zhao xiaoguang. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in water circulation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2):163-166.  
石辉,刘世荣,赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2):163-166.
- [19] Deshpande R D, Bhattacharya S K, Jani R A, et al. Distribution of oxygen and hydrogen isotopes in shallow groundwaters from Southern India: influence of a dual monsoon system [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 271:226-239.
- [20] Gat J R, Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area [J]. *Journal of geophysical research-atmospheres*, 1970, 75(15):3039-3048.
- [21] Yin Guan, Ni Shijun, Zhang qichun. Deuterium excess parameter and geohydrology significance: Taking the geohydrology researches in Jiuzhaigou and Yele, Sichuan for example [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(3):251-254.  
尹观,倪师军,张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义:以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(3):251-254.
- [22] Yang Bo, Yin Guan. Isotope Composition and deuterium excess parameter of water bodies as tracers in exploration of geothermal water: A case study on exploration of geothermal water in Sanjianshui, Sichuan [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(2):129-133.  
杨波,尹观. 水体同位素组成及氘过量参数在地热勘探中的示踪作用:以四川绵竹三箭水温泉开发为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(2):129-133.