

# 祁连山断裂带中东段地下水地球化学特征研究

苏鹤军<sup>1,2</sup>, 张慧<sup>1,2</sup>, 史杰<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**祁连山断裂带是中国西部地震活动最强烈的地区之一。本文应用 Aquachem5.1 对该断裂带中东段 10 口井水进行了水化学分析;同时利用 Phreeqc 软件对地下水化学组分和饱和指数 *SI* 值进行了模拟计算;并结合氢氧和氦同位素组成特征初步分析了该断裂带地下水成因、水质类型、循环速度及循环深度。研究表明祁连山断裂中东段地下水均为大气成因,总体上体现为循环深度小、滞留时间短、水-岩反应程度较弱等特点,其化学活动性在空间上具有西弱东强分布特征。这一结论为今后进一步研究地下流体地震前兆异常提供了依据。

**关键词:**祁连山断裂带;地下水;地球化学特征;饱和指数;氢氧同位素比

**中图分类号:** P641.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0122-07

## Research on the Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater in the Mid-eastern Segment of Qilianshan Faults Zone

SU He-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, SHI Jie<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Qilianshan fault zone is one of the strongest seismicity regions in western China. In this paper, the types, cycle depth and speed of groundwater in the faults zone are discussed through calculated the saturation index *SI*, the isotope ratio of Hydrogen-Oxygen and <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratio by Aquachem 5.1 and Phreeqc software. The results show that all of the groundwater samples in the zone have the characteristics of atmosphere causes, small cycle depth, short residence time, and weak water-rock reaction. This research conclusion provides the basis date for earthquake prediction in future.

**Key words:** Qilianshan fault zone; Groundwater; Hydrogeochemical characteristics; Saturation index; Isotope ratio of Hydrogen and Oxygen

## 0 前言

地下流体组分记录了流体来源、运移及岩石圈内的信息,通过对地下流体离子浓度及同位素组分的分析,可以判断其类型、成因及循环深度以及流-固反应程度等地球化学特征<sup>[1]</sup>,进而研究地下流体与地质构造之间的关系。这方面的研究在资源与环境方面应用较多,但在地震地下流体研究中目前还没引起人们的足够重视。研究表明:地壳中地

下流体特别是断裂带地下流体循环深度可达到 15~20 km 以上<sup>[2,4]</sup>,这一深度正好与浅源地震的震源深度带相一致。因此加强对断裂带地下流体的研究对地震预报前兆异常分析是非常重要的。祁连山断裂带是地震活动最强烈的地区之一,长期以来该地区地下水多次出现宏观异常现象<sup>[5]</sup>,但由于缺乏对该断裂带地下流体的成因、赋存及与构造之间的关

收稿日期:2008-10-13

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(07699);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2009010

作者简介:苏鹤军(1973-),男(汉族),甘肃通渭人,助理研究员,硕士,主要从事地震地下流体和地震预报研究。

系的深入研究,因此对这些异常不能进行较好的认识与解释。本文通过对该断裂带中东段地下水水质及同位素组分分析,初步探讨了该地区水文地球化学特征及地下流体与断裂之间的关系,为今后地下流体地震前兆异常的研究提供重要的基础性资料。

## 1 水文地质概况

本研究所选取的地下水井主要分布在毛毛山-老虎山-海原断裂带、马雅雪山断裂带和天桥沟-黄羊川活动断裂带上(图1)。毛毛山-老虎山断裂带和马雅雪山断裂带东段属于温带干旱型大陆性气候,降雨量少,蒸发量大,年平均降水量小于298.9 mm,年平均蒸发量3 038.1 mm。该地区地下水主

要为坚硬岩石类裂隙水和松散岩石类孔隙水两种类型:基岩裂隙水主要分布于断裂带构造裂隙和风化裂隙内,以潜水状态赋存。松散岩石类孔隙水主要分布于山前第四系拗陷盆地内,为微承压水。天桥沟-黄羊川断裂带属寒冷高原性气候,年降水量265.5~632 mm之间。该地区以变质岩和沉积岩为主,地下水以基岩裂隙水,松散岩孔隙水和碎屑岩裂隙水的形态分布在高中山区、低山丘陵区以及河谷和沟谷中,由于降水充沛,地下水具有充足的补给来源。含水层为石炭系-白垩系砂岩、砾砂岩,隔水层为上新统泥质砂岩和页岩。

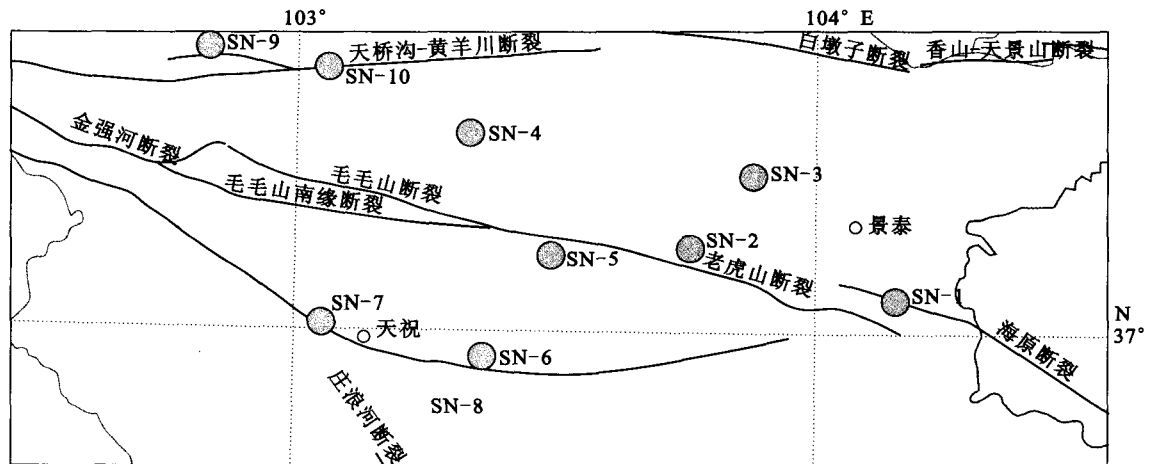


图1 祁连山断裂带中东段及水样分析井位分布图

Fig. 1 Distribution of water sample wells in the mid-eastern segment of Qilianshan faults zone.

SN-1井位于沈家庄断层拉分盆地,南北为断层控制,与盆地北缘海原断裂的最近距离约为200 m。海拔为1 684 m,井深194.2 m,主要含水层部位在159.0和185.2 m处,为第三系砂质泥岩、砂岩,较为致密、坚硬。

SN-2井位于老虎山断裂的北侧,距断层最近距离约为1 km。海拔为2 218 m,为民用井,钻孔资料不详。

SN-3井位于老虎山断裂北侧的寺滩盆地内,海拔1 859 m,井深为66.3 m,非承压,与断裂最近距离为17 km。附近出露石炭系深灰色砂岩、页岩夹灰岩、粉砂岩,含薄煤层。含水层在48.5 m左右,底层为锈黄色,青灰色板岩,岩性破碎,有裂隙,裂隙中的充填物为石英及少量石膏。

SN-4井位于毛毛山北侧,距断层相对较远。海拔为2 418 m,井深193 m。该井上层为第四系褐黄色、灰黄色杂土及粉土,中部为灰褐色、灰色石英

质砾砂岩,质地坚硬、致密、胶结好,下部为灰白色、浅灰色中粗砂岩,有裂隙及溶孔出现。

SN-5井位于毛毛山断裂南侧的松山盆地内,距断层最近距离约为1 km,海拔为2 274 m,井深35 m。地层为疏松砂砾夹亚砂土,为自流井。

SN-6井位于马雅雪山断裂带北侧,距断层最近距离约为1.5 km,海拔为2 585 m,井深约为60 m。主要为第四系冲洪积砾石、亚粘土,下伏第三系临夏组红色砾岩、砂砾岩、砂岩夹桔黄色粉砂质粘土。

SN-7井位于马雅雪山断裂北侧1 km处,在石门河西岸的Ⅱ级阶地上,海拔为2 738 m,出露的地层为第四系全新统,地层为冲洪成因的疏松砂砾夹亚砂土。

SN-8井位于马雅雪山断裂带与庄浪河断裂带交汇区,海拔为2 374 m,井深53 m。上部为浅褐色粉土及砂碎石,下部为石炭系灰色、褐灰色、灰白色

灰岩,有少量的石英岩脉充填,局部地段岩性较为破碎,并有少量的溶孔。

SN-9 位于黄羊川断裂北侧,距该断裂 1 km,海拔为 2 434 m。地处柳条河谷的 II 级阶地上,阶地堆积物为上更新统冲积黄土状亚砂土、砾石,为自流井。

SN-10 位于黄羊川断裂的南侧,距断裂 150 m,海拔为 2 432 m,井深 20 m。该井上部为冲积黄土,下部为冲积砾石。

## 2 地下水水质类型、化学组分及水-岩反应特征

### 2.1 地下水水质类型

表 1 为研究区地下水水质分析结果一览表。从表可知:祁连山断裂带中东段地下水大致分为两种类型:一是重碳酸型水,如 SN-1、SN-3、SN-5、SN-8、SN-9、SN-10 井,代表典型的大气水与岩石之间第一阶段反应,反映了浅层、年龄较轻的水文循环特征;二是氯化物型水或硫酸型水,如 SN-2、SN-4、SN-6、SN-7 井,反映了干旱、半干旱地区地下水补给过程中溶滤作用较强,使得 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度相对富集,同时也反映地下水的循环深度或滞留时间或补给路径相对较大等特点<sup>[6]</sup>。

图 2 是按照 Ca、Mg 和 Na-K 相对浓度和 Cl、SO<sub>4</sub> 与 HCO<sub>3</sub> 相对含量对 10 个水样的化学组成绘制 Piper 图。从图可以看出,大多数井离子浓度的相对含量均位于图的中上部,说明化学成分质量浓度较平均,其 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>,属于火成岩区低矿化度水。而 SN-1 和 SN-2 落在图边线附近,其 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> < Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> < SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,属于混合起

源的中矿化度水,Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子浓度较高,反映出由浅层潜水与自流盆地排泄区经过溶滤和浓缩作用后形成的深部矿化水的混合特征(这两口井均在寺滩-芦阳盆地内,补给区径流路径相对较长,并从 SN-1 钻井资料可知,其含水层为上下两层)。

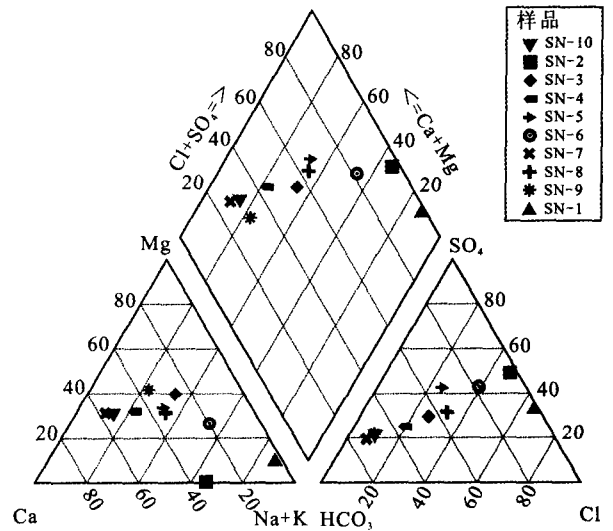


图 2 水化学 Piper 图(单位:mg/L)

Fig. 2 Piper hydrochemical diagram.

### 2.2 化学组分空间分布特征

为了分析祁连山活动断裂带中东段地下水水化学组分空间分布特征,我们把各离子浓度用 radial 图直观表示出来(图 3)。由图可以看出,祁连山活动断裂带中东段地下水的离子总数(或矿化度)具有由西北向西南方向逐渐增大的特征,尤其是 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等离子浓度的增加,集中体现了地下水循环深度或滞留时间均在增大,水岩反应程度或溶滤作用相对较强等特点。

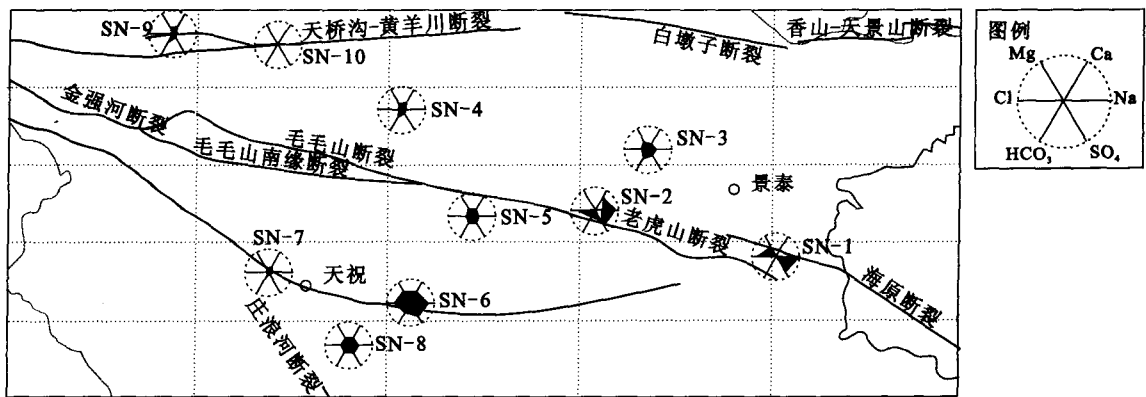


图 3 祁连山活动断裂带中东段地下水水化学组分空间分布图

Fig. 3 Distribution map of groundwater chemical composition in the mid-eastern segment of Qilianshan active faults zone.

表1 地下水化学分析结果一览表

点位	地名	经度 E/°	纬度 N/°	阳离子/[mg·L <sup>-1</sup> ]				阴离子/[mg·L <sup>-1</sup> ]				pH值	碱度	地下水类型	高程 /m	井深 /m	厚度 /m		
				K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>							NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>
SN-1	芦阳	104.15	37.05	25.8	1135.0	34.1	72.3	6.0	59.2	1324.1	922.2	0.7	1.0	8.4	58.6	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	1684	194.2	382.9
SN-2*	寺滩西	103.64	37.18	34.1	648.0	305.6	1.8	68.4	81.8	664.7	924.6	30.6	4.1	11.6	297.7	Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Na <sup>+</sup>	2218	-	770.5
SN-3	寺滩东	103.86	37.23	5.40	97.0	71.1	63.2	0.0	351.5	118.8	181.6	15.5	11.2	7.8	288.3	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Cl <sup>-</sup> -Mg <sup>2+</sup> -Na <sup>+</sup> -Ca <sup>2+</sup>	1859	66.3	437.8
SN-4	横梁	103.33	37.29	4.8	45.8	90.2	37.7	0.0	312.4	62.0	109.0	31.4	7.2	7.7	256.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> -Ca <sup>2+</sup>	2418	193	380.5
SN-5*	松山	103.49	37.11	4.8	82.5	79.6	46.8	0.0	225.8	98.6	227.7	17.9	8.1	8.0	185.2	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	2274	35	391.5
SN-6*	坪城	103.36	36.96	8.0	506.0	169.5	134.4	0.0	396.6	482.1	721.4	406.0	10.8	7.9	325.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup> -Na <sup>+</sup>	2585	60.3	976.8
SN-7*	红沙湾	103.05	37.01	2.1	13.8	68.9	22.4	0.0	255.1	14.9	52.8	10.9	6.5	7.9	209.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	2738	102	264.3
SN-8	鹰湾	103.23	36.88	7.3	140.0	95.8	52.3	0.0	333.8	171.9	225.3	24.2	10.8	7.7	273.7	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	2374	53	454.6
SN-9*	古丰	102.82	37.42	4.10	43.6	65.7	45.5	0.0	375.3	28.4	92.2	8.5	9.7	8.1	307.8	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Na <sup>+</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	2434	-	351.4
SN-10	黄羊川	103.05	37.37	2.80	18.5	67.7	23.1	0.0	253.2	20.6	61.5	9.5	6.4	7.7	207.6	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	2432	20	264.2

注:1. 水样品由甘肃地矿局第二地质勘探院化学分析室测试;2. “\*”表示为民用井;3. SN-1、SN-4、SN-5为“十五”期间建设的地震流体水位、水温观测井。

表2 各井地下水饱和指数SI值

矿物	SI值									
	SN-1	SN-2	SN-3	SN-4	SN-5	SN-6	SN-7	SN-8	SN-9	SN-10
硬石膏	-1.65	-0.68	-1.74	-1.8	-1.57	-1.08	-2.13	-1.54	-1.99	-2.07
文石	0.10	1.22	0.49	0.48	0.5	0.76	0.51	0.42	0.77	0.27
方解石	0.26	1.36	0.64	0.62	0.65	0.91	0.65	0.57	0.91	0.42
玉髓	-2.27	-0.67	-0.18	-0.37	-0.32	-0.19	-0.42	-0.19	-0.25	-0.42
温石棉	11.81	-0.9	-1.23	-2.84	-1.01	-0.47	-2.38	-2.52	-0.23	-3.74
白云母	0.99	0.83	1.57	1.22	1.41	2.06	1.17	1.22	2.02	0.71
石膏	-1.40	-0.47	-1.52	-1.58	-1.35	-0.87	-1.91	-1.32	-1.77	-1.85
岩盐	-4.48	-5.04	-6.55	-7.15	-6.7	-5.3	-8.27	-6.24	-7.5	-8
石英	-1.8	-0.24	0.25	0.06	0.11	0.24	0.01	0.23	0.18	0.01
海泡石	4.38	-1.93	-1.33	-2.73	-1.42	-0.84	-2.5	-2.22	-0.78	-3.41
Sepiolite(d)	1.84	-4.83	-4.23	-5.63	-4.32	-3.74	-5.4	-5.12	-3.68	-6.31
SiO <sub>2</sub> (a)	-3.15	-1.51	-1.02	-1.21	-1.16	-1.03	-1.26	-1.03	-1.09	-1.26
云母	10.79	1.46	2.11	0.11	2.04	2.85	0.48	0.79	2.98	-0.89

### 2.3 水-岩化学平衡反应特征

地下水地球化学演化主要受控于水-岩间发生的各种化学反应,识别这些反应是地下水地球化学演化过程研究的基础。本文利用研究区地下水水化学分析资料,分别用Na-K-Mg三角图解法和饱和指数法分析了地下水组分形态及矿物溶解状态,从而判断了水-岩化学平衡反应特征。

#### 2.3.1 Na-K-Mg三角图解法

Na-K-Mg三角图解由Giggenbach于1988年提出<sup>[7]</sup>,常用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样,由完全平衡线和部分平衡线把整个三角图分为完全平衡、部分平衡和未成熟水3个区。图4为研究区10个水样的Na-K-Mg三角图。由图可见,除SN-2井在部分平衡水区域外,其余所有井水均属于“未成熟水”,并且非常靠近Mg端元附近,表明水-岩反应程度较弱,水-岩之间尚未达到离子平衡状态,溶解作用仍在进行。

#### 2.3.2 饱和指数法

饱和指数是获得水-岩相互作用信息、确定矿物与水溶液间的反应状态的参数之一<sup>[8-9]</sup>。饱和指数  $SI = \log(IAP/k) = \log(Q/k)$ 。当  $SI > 0$  时,矿物处于过饱和状态;当  $SI < 0$ ,矿物处于未饱和状态;当  $SI = 0$  时,矿物处于溶解平衡状态。根据初始溶液的化学成分,可以计算出在不同控制条件下水-岩相互作用系统达到平衡时水的化学组分及某些矿

物的饱和指数。本文利用PHREEQC软件对祁连山断裂带中东段地下水SI值进行模拟计算(表2)。

由表可知,祁连山断裂中东段地下水中除方解石、文石、云母过饱和外,其它矿物饱和指数均小于0,地下水离子浓度处于未饱和状态,表明水-岩反应未达到平衡,矿物溶解仍在进行过程中。这一结论与Na-K-Mg三角图解法分析的结果相一致,同样体现了大气成因浅层潜水的特征。

## 3 同位素组成特征

地下水同位素组成与水的来源、水岩相互作用、断层位移方向以及大小有关。目前人们通常利用氢氧同位素来有效地示踪地下水循环过程。其原理是在水循环过程中同位素质量发生分馏效应,使得不同状态水的氢氧同位素组成不同,从而可用来识别地下水的成因、迁移路径及其成分演化机制等。主要研究方法是与当地大气雨水线对比分析法。氮同位素是用来判断地下流体起源与构造活动的又一个有效示踪标志,大量研究表明不同成因的氮同位素组成明显不同:大气氮、壳源氮和幔源氮的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He表征值分别为  $1.4 \times 10^{-6}$ ,  $2.0 \times 10^{-8}$  和  $1.1 \times 10^{-5}$  (徐永昌,1992)。人们常以  $R/R_a$  来表示氮同位素组成特征(R为样品的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比值, $R_a$ 为大气<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比值),并用来示踪地下水成因及循环深度或断裂带的破裂程度。一般认为,当  $R/R_a < 1$  时,氮同位素组成表现为壳源特征,当  $R/R_a > 1$  氮同位素组成表现为幔源特征(孙文洁,2004)。

### 3.1 氢氧同位素组成特征

地下水氢氧同位素组成特征一般利用区域雨水线进行对比分析。降水的氢氧同位素组成受纬度效应、季节效应、大陆效应以及海拔效应等的影响,不同地区不同季节的大气雨水线各不相同。本文所选用的雨水线方程为  $LMWL: \delta D = 7.05\delta^{18}O - 2.17$ ,是由柳鉴容等人利用50多个水样的氢氧同位素计算出来的西北地区雨水线方程<sup>[10]</sup>。

表3和图5(a)为研究区地下水氢氧同位素组成分析。由图可见所有井水氢氧同位素比值均在大气雨水线附近,表明均为大气成因水,其水-岩反应程度较低,循环深度不大。图5(b)为各井氢氧同位素比值与LMWL偏移现象分析图。由图可见氢氧同位素比值分布在三个不同区域:(1)在LMWL之上;(2)在LMWL右下方;(3)在LMWL左上方。具体分析如下:

(1) SN-1井正好落在大气雨水线LMWL上,

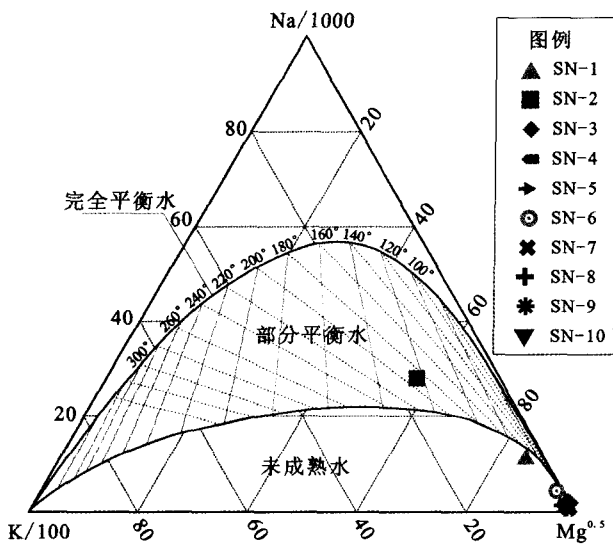


图4 水样的Na-K-Mg三角图 (底图据Giggenbach,1998)

Fig.4 The triangle diagram of Na-K-Mg of the water samples.

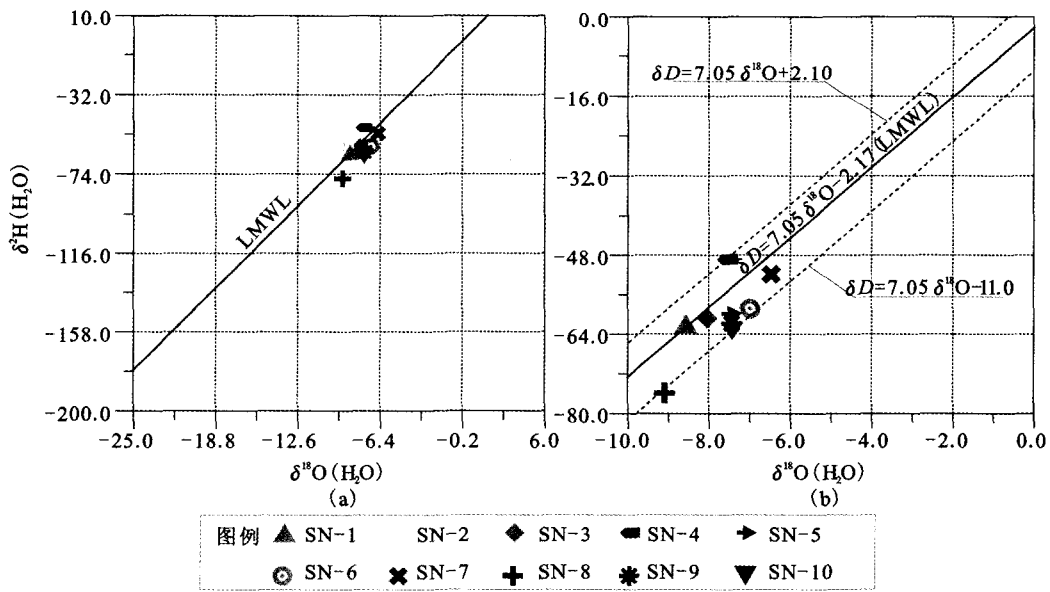


图5 地下水氢氧同位素组成分析图

Fig. 5 The Diagram of Hydrogen - Oxygen isotope composition of the water samples.

表3 祁连山断裂带中东段地下水同位素组成分析结果

井点位		地下水		水溶气*	
名称	编号	$\delta D_{VSMOW}$	$\delta^{18}O_{VSMOW}$	$R(^3He/^4He)$	$R/R_a$
芦阳	SN-1	-62	-8.6	$1.219 \times 10^{-6}$	0.871
寺滩西	SN-2	-59	-8.9	$1.259 \times 10^{-6}$	0.900
寺滩东	SN-3	-61	-8.1	$1.260 \times 10^{-6}$	0.900
横梁	SN-4	-49	-8.6	$1.005 \times 10^{-6}$	0.718
松山	SN-5	-60	-8.5	$1.350 \times 10^{-6}$	0.964
平城	SN-6	-59	-8.0	$1.248 \times 10^{-6}$	0.892
红沙湾	SN-7	-52	-8.5	$1.339 \times 10^{-6}$	0.956
鹰鸽	SN-8	-76	-8.1	$1.409 \times 10^{-6}$	1.007
古丰	SN-9	-62	-8.5	$1.263 \times 10^{-6}$	0.902
黄羊川	SN-10	-6	-8.5	$1.119 \times 10^{-6}$	0.800

注:中科院兰州地质研究所化学实验室分析

表明其完全为大气成因。

(2) SN-3、SN-5、SN-6、SN-7、SN-9 和 SN-8 依次向 LMWL 右下方偏移,这一现象可能有两种原因,一是瑞利分馏现象:反映出干旱、半干旱地区降水量小、蒸发强,使得  $^{18}O$  含量变大(如 SN-3、SN-5 和 SN-9);二是氧飘逸现象:地下水与硅酸岩或碳酸岩之间发生水-岩反应,进行氢氧同位素平衡交换,即  $Si^{18}O_2 + 2H_2^{16}O = Si^{16}O_3 + 2H_2^{18}O$ , 或  $CaC^{18}O_3 + H_2^{16}O = CaC^{16}O_3 + H_2^{18}O$ , 致使地下水  $^{18}O$  含量变大<sup>[11-12]</sup>(如 SN-6、SN-7、SN-8, 均位于祁连山东段硅酸岩地区)。

(3) SN-2、SN-4 均在 LMWL 左上方,造成这一现象的原因可能是高程效应。一般地,区域大气雨水线具有纬度效应、大陆效应、高度效应及季节效应(降水量及温度效应),对于同一地区来说,氢氧

同位素比值仅受季节和高度效应的影响,而本文所有水样都是在同一时间段进行采取的,也就是说没有季节效应。研究表明,当海拔每增加 100 m 时,  $\delta^{18}O$  值减少 0.24‰ VSMOW<sup>[13]</sup>。事实上,在所有取样井中 SN-2、SN-4 井位的海拔最高,分别位于毛毛山-老虎山北缘断裂附近,平均海拔为 2 200 m 以上。

通过对祁连山断裂带中东段地下水氢氧同位素组成特征的分析,结果表明:该区的地下水均为大气成因,具有循环深度不大或滞留时间较短、受地下水-岩反应的改造程度较小等浅层潜水特征。

### 3.2 氦同位素组成特征

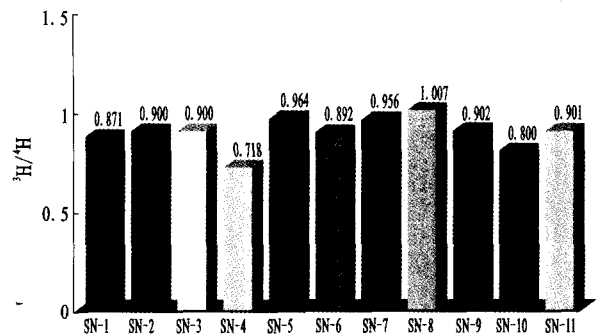


图6 水溶稀有气体 $^3He/^4He$ 分析结果

Fig. 6 Analysis result of  $^3He/^4He$  of the water samples.

图6为祁连山断裂带中东段地下水水溶气氦同位素组成分析图(氦同位素测试结果见表2)。由图可知:除SN-8的 $R/R_a$ 值略大于1外,其余井 $R/R_a$

值均小于并均接近 1,体现了明显的浅层潜水特征<sup>[14]</sup>。其中 SN-1、SN-4、SN-10 的  $R/R_0$  最小,表明其受地壳裂隙或附近断裂活动的影响程度较大。实际上 SN-1 和 SN-10 井与断裂带距离相对最近,受断裂控制程度较大,而 SN-4 井虽然是所有井中离断裂最远的,但从钻孔资料可知其下部砂岩层中有裂隙及溶孔发育,同样有利于深部地下气体的运移与传输。

#### 4 结论与探讨

(1) 通过对地下水离子浓度测试及其水质类型判断,并结合水文地质资料综合分析,结果认为:祁连山活动断裂带中东段地下水矿化度具有由西北向西南方向逐渐增大的空间分布特征。

(2) 利用 Na-K-Mg 三角图解法及饱和指数法,对祁连山活动断裂带中东段地下水水-岩反应特征进行分析,认为祁连山断裂带中东段地下水均为未饱和水,体现了循环深度不大或滞留时间较短,水-岩反应程度较小等特点。

(3) 通过对研究区地下水氢氧同位素及水溶气氮同位素组成特征分析,结果表明:该地区地下水均为大气成因,具有明显的浅层潜水特征,这与方法(2)所得结果相一致。

(4) 综合(1)、(2)、(3)结果,对祁连山断裂带中东段地下水离子浓度、总矿化度空间分布特征以及同位素组成特征进行综合分析,认为该断裂带东段地下水(特别是 SN-1)受附近断裂带控制程度较大,水-岩反应程度相对较强,并具有相对较深的壳源信息,有利于进行地下流体地震前兆监测。

#### [参考文献]

- [1] 杜建国,刘丛生. 同位素地球化学在地震研究方面的作用[J]. 地震,2003,23(2):274-279.
- [2] 张西娟,曾庆利,马寅生. 断裂带中的流体活动及其作用[J]. 西北地震学报,2006,28(3):99-107.
- [3] Gudmundsson A, Berg S, Lyslo K B. Fracture networks and fluid transport in active fault zone[J]. Journal of Structure Geology, 2001,23(2):343-353.
- [4] Muir-Wood R, King G. Hydrological signatures associated with earthquake strain[J]. Journal of Geophysical Research,1993,98(12):22035-22068.
- [5] 刘长才,牛继荣,祁立勇,等. 天祝地区地下水宏观异常与地震的关系初探[J]. 高原地震,2005,17(4):55-61.
- [6] L Pizzino, P Burrato. 深大活动断裂地球化学特征:以 1783 年 2 月 5 日意大利南部卡拉布里亚地震为例[J]. 国际地震动态,2006,(7):131-143.
- [7] Werner F, Giggenbach. Geothermal solute equilibria Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988,52(12):2749-2765.
- [8] 张培青. Phreeqc 在确定奇村地热田地下水矿物饱和度中的应用[J]. 中国水运,2006,4(11):75-77.
- [9] 许万才. 饱和系数法在地下热水研究中的应用[J]. 西安地质学院学报,1992,14(3):66-70.
- [10] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 西北地区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源[J]. 地理学报,2008,63(1):12-22.
- [11] 苏艳,马致远,刘方. 西安、咸阳地下水氡过量参数研究[J]. 煤田地质与勘探,2007,35(3):39-41.
- [12] 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.
- [13] 黄天明,聂中青,袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(8):76-81.
- [14] 陶明信,徐永昌,史宝光. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. 地球科学,2005,35(5):441-451.