

# 地下水水文地球化学空间分带性 ——以福建大田琴山矿区为例

包国良

(福建省地质调查研究院 福州市 350013)

**提 要** 通过对福建大田琴山矿区水文地质调查，并对研究区所取的 8 件水样水质分析结果研究发现，该地区的地下水类型主要以  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  为主。通过 Gibbs 模型分析，其成因是岩石风化与大气降水共同作用的结果，是大气降水渗入岩层并经过溶滤作用形成现今的地下水特征类型。结合研究区的地质地貌特征，发现研究区水化学成分在垂直方向上存在明显的分带性，由地表到地下，随着深度增加，研究区水化学类型由  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  向  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca}$  过渡，在深部形成  $\text{SO}_4 - \text{Ca}$  型水，主要受研究区矿物岩石组合类型的控制，这为研究地下水水文地球化学分带性成因提供了很好的例子。

**关键词** 地下水化学类型；Gibbs 模型；溶滤作用；水文地球化学分带

## Study of Hydrogeochemical Zoning of Groundwater:

A Case of Qinshan Area in Datian County, Fujian Province

Bao Guoliang

(Fujian Institute of Geological Survey and Research)

**Abstract** Through the hydrogeology survey and analysis on eight water samples quality at Qinshan area in Datian county of Fujian Province, the results show that the main chemical types of groundwater in the area are  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ . Through the Gibbs model analysis, its genesis is the result of rock weathering and precipitation joint action, and is the present groundwater types formed by precipitation leaching. Combined with the geological and morphological characters, we found the obvious vertical hydrogeochemical zoning of groundwater is occurred in the studied area, along with increased depth in the studied area, the water chemical type is also transited from  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  to  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca}$ ,  $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca}$  from surface to ground, and eventually formed the water chemical type  $\text{SO}_4 - \text{Ca}$  in deep area, because it is mainly controlled by mineral rock combination type in studied area, and it provides good example for hydrogeochemical zoning causes of groundwater.

**Keywords** chemical type of groundwater; Gibbs model; lixiviation; hydrogeochemical zoning

## 1 前言

自然界中分带性是一种常见规律，如植被分布、地貌形态、气候特征、水资源量及大气降水量变化等，常在地域上呈现明显的分带现象<sup>[1-2]</sup>。在各类地质现象中，分带性也很常见，如地球化学元素、矿床等地质因素的分布规律时常体现出分带特点<sup>[3]</sup>。地下水的水文地球化学特征作为地下水系统的重要属性，其空间变化也往往表现出分带性<sup>[4]</sup>。地下水的分带性主要表现

为水文地质动力分带和水文地球化学分带，水文地球化学分带包括潜水的纬度分带和承压水的水平和垂直分带<sup>[5]</sup>。研究区琴山矿区水化学在垂直方向上就呈现出很好的分带性，主要受当地地质、地貌特征、气候、水文等多种因素的共同影响。

## 2 区域概况

研究区地处闽中大谷地中部，属构造侵蚀中低山地形，地势北东高南西低，最高峰乌峰寨海拔为 1240.0m，最低为 810m，相对高差 430m；区内水系较发育，呈树枝状展布，主干溪流自北向南分别汇入桃源溪、东埔溪，地表水排泄比较通畅。本区属中亚热

作者简介：包国良（1985-），男，助理工程师，水文与水资源专业。

收稿日期：2012-06-12

带季风气候 年降水量 1071~2346mm。

研究区位于太华-长塔复式背斜西翼,汤泉岩体的西缘。晚古生代海相沉积、海西-印支期构造作用及燕山期岩浆侵入构成本区主要的地质特征。区内主要出露地层有晚古生代早石炭世林地组( $C_1l$ )、中石炭世经畲组( $C_2j$ )、早二叠世文笔山组( $P_1w$ )、童子岩组( $P_1t$ )、晚二叠世翠屏山组( $P_2cp$ )及中生代早三叠世溪口组( $T_1x$ )地层。岩性包括砂

岩、砂砾岩、石英岩、泥岩等。侵入岩主要分布于研究区东南部,由含斑中细粒花岗岩( $\gamma_5^{2(3)c}$ )及含斑中细粒花岗闪长岩( $\gamma_5^{2(3)a}$ )组成,由于花岗岩裂隙较发育,常形成脉状的花岗岩裂隙水。研究区局部有大理岩、灰岩,所以也存在碳酸岩类裂隙水。岩体在灰岩接触带上,常交代形成矽卡岩,铁矿体就赋存于其中。研究区水文地质简图及水文地质剖面图见图1、2。

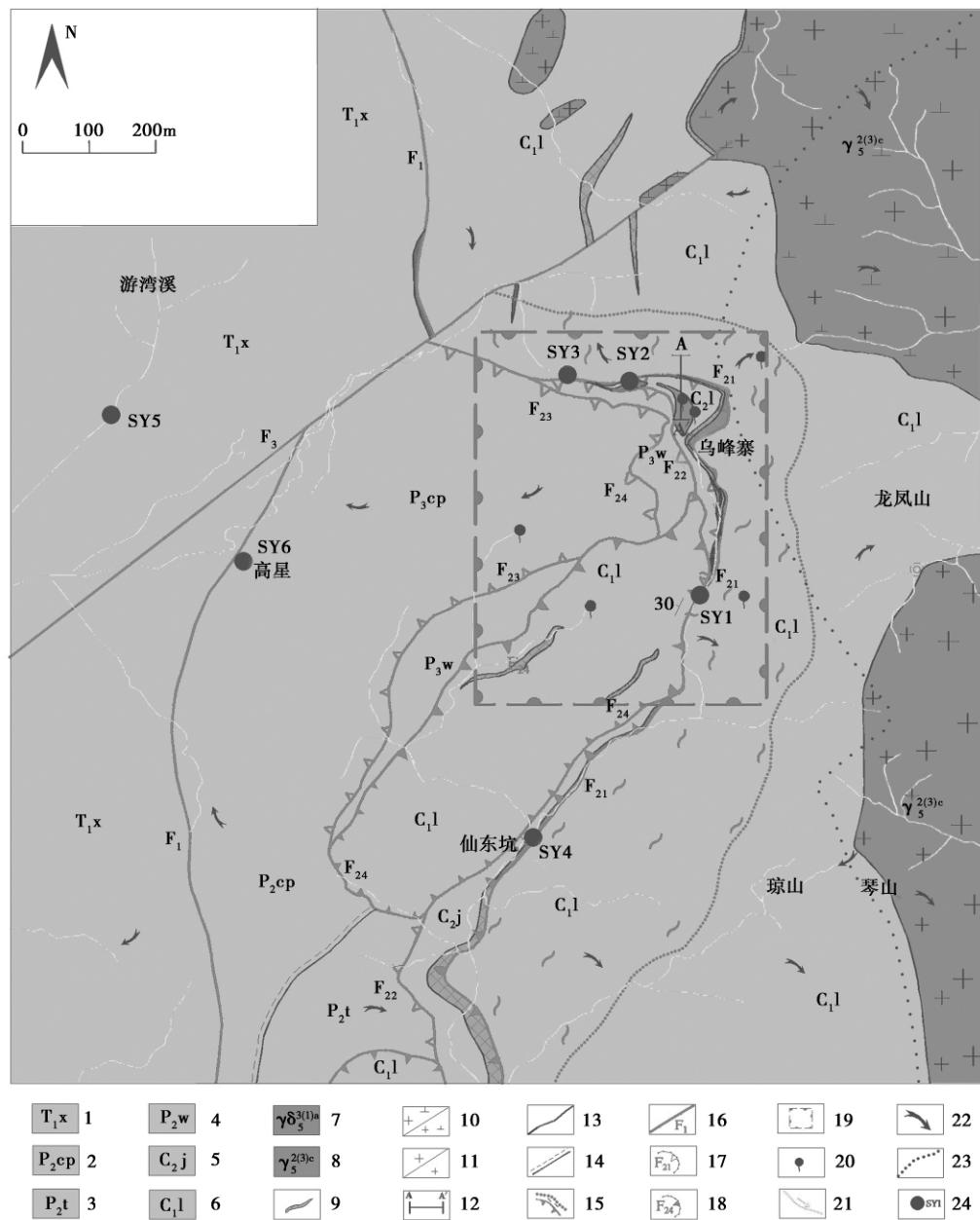


图1 研究区水文地质简图

注:1-早三叠世溪口组;2-晚二叠世翠屏山组;3-早二叠世童子岩组;4-早二叠世文笔山组;5-中石炭世经畲组;6-早石炭世林地组;7-燕山晚期浅灰色含斑中细粒花岗闪长岩;8-燕山早期肉红色中细粒含黑云母钾长花岗岩;9-铁矿或铁矿化蚀变带;10-中细粒花岗闪长岩;11-中细粒花岗岩;12-勘探线及编号;13-地质界线;14-假整合界线;15-动力变质带黑云斜长变粒岩、石英片岩、片理化石英岩;16-断层;17-滑脱断层;18-推覆断层;19-详查区;20-泉点;21-溪流;22-地下水流向;23-分水岭;24-取样位置点;1.2.3.4.5.6-碎屑岩类含水岩组 富水性弱;7.8-块状岩类含水岩组 富水性弱。

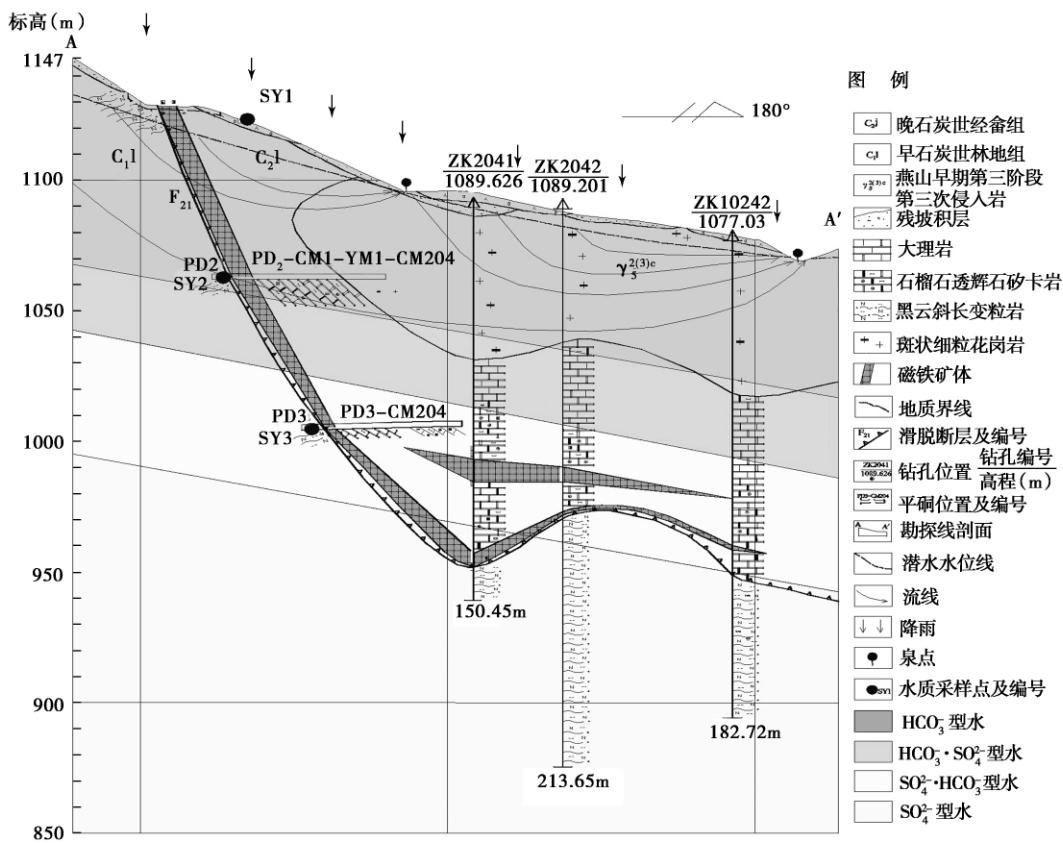


图2 研究区水文地质剖面

本次研究区内(主要指详查区即图1框内)所打23个钻孔终孔稳定水位所绘制的等水位线图(图3)清晰地揭示了区内流场分布情况,在研究区北部地下水流向主要往北西方向,在中部地下水流向出现分叉,在分水岭西侧往南西方向,在分水岭的东侧往北东方向,在南部地下水流向主要集中往南东方向。研究区流场分布情况受当地的地形地貌控制。

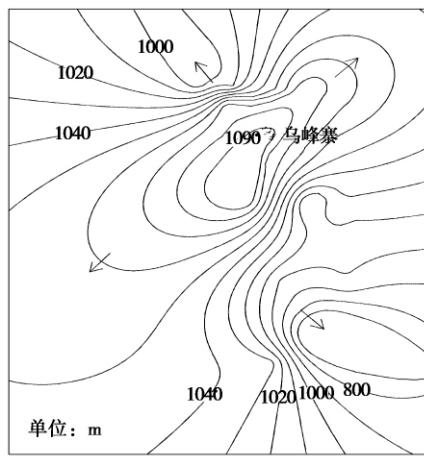


图3 详查区等水位线

### 3 样品采集及分析方法

2011年8月在研究区采了SY1、SY2、SY3、SY4共4件水样,由于研究区还未进行采矿活动,水样未受到污染。其中K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>用原子吸收分光光度法,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>用EDTA容量法,Fe<sup>3+</sup>用二氮杂菲分光光度法,Cl<sup>-</sup>用硝酸银容量法,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>用麝香草酚分光光度法,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>用α萘胺分光光度法,pH用pH计测定,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用盐酸滴定法。

### 4 地下水化学特征及来源讨论

#### 4.1 地下水化学特征

研究区地下水TDS变化范围为0.008~0.163 g/L,溶解性总固体总体较小,水中阴阳离子含量总体都比较小,最大不超过(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)0.068 g/L;由于Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量低,故总硬度较小,为19.02~114.09 mg/L,属极软~软水;pH值介于7.1~7.94,属中性水。经计算分析,水化学类型有:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>·HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca-Mg三种类型,见表1。表1中SY1、SY4、SY7为地表水,SY2、SY3、SY5、SY6、SY8为地下水,SY5、SY6为同时期矿山环评时所测样品,SY7、SY8参考引用邻近矿区铁矿详查报

告的资料以作对比 阴阳离子均以摩尔含量大于 25% 的离子计。由此可见 研究区水化学类型以  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$  为主 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  占优势 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  占优势。水样的 Piper 图也显示了这样的情况 在菱形区域 所有水样碱土金属均大于碱金属。SY1、SY2、

SY4、SY5、SY6、SY7、SY8 水样为弱酸大于强酸且碳酸盐硬度超过 50% SY3 水样属强酸大于弱酸。在三角形区域 大部分阳离子位于三角形的底端 且偏左 高  $\text{Ca}^{2+}$  低  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  大部分的阴离子位于三角形的底端且偏左 高  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  低  $\text{Cl}^-$  (图 4)。

表 1 研究区水化学成分

mg/L

水样号	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{H}_2\text{SiO}_3$	TDS	pH	水化学类型
SY1	8.42	1.22	1.77	0.81	24.77	3.84	4.39	11.61	45.11	7.4	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY2	25.25	2.43	1.28	0.46	68.08	6.72	8.77	11.67	94.91	7.1	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY3	36.07	5.83	3.12	1.79	44.87	67.24	4.39	22.75	162.96	7.44	$\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY4	7.21	0.24	1.14	0.54	13.93	0.96	4.39	8.13	33.61	7.94	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY5	7.91	2.22	1.52	2.08	48.9	0.29	1.05		105	7.51	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca} - \text{Mg}$
SY6	7.04	1.57	0.76	2.08	29.7	1.21	1.12		50.8	7.49	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY7	24.36	3.81		2.12	74.26	6.59	10.53		105.63	6.92	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$
SY8	25.15	3.81		3.35	83.54	5.65	8.77		119.29	6.96	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$

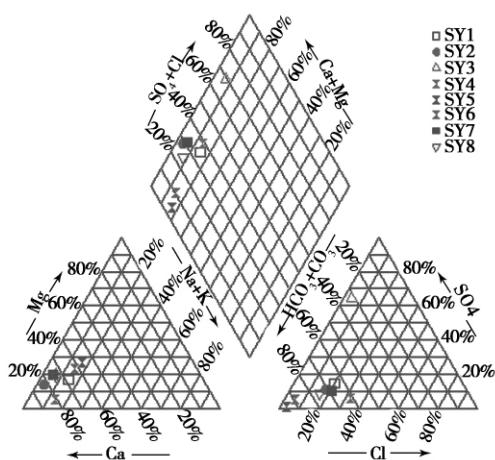


图 4 水样的 Piper 图

#### 4.2 地下水离子来源机制讨论

Gibbs 设计的关系图能简单有效地判断天然水中离子各种起源机制<sup>[7~10]</sup>；他用 TDS 与  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  关系图区别出天然水化学成分的 3 个主要来源，即大气降水、岩石风化、蒸发沉淀。将所采的 8 件地表水和地下水数据全部投绘到 Gibbs 图中(图 5)。图中显示所有水样均位于岩石风化带或其与大气降水带的过渡带，并远离蒸发结晶作用带。因此研究区地下水及地表水离子的来源受岩石的风化及大气降水的共同控制。

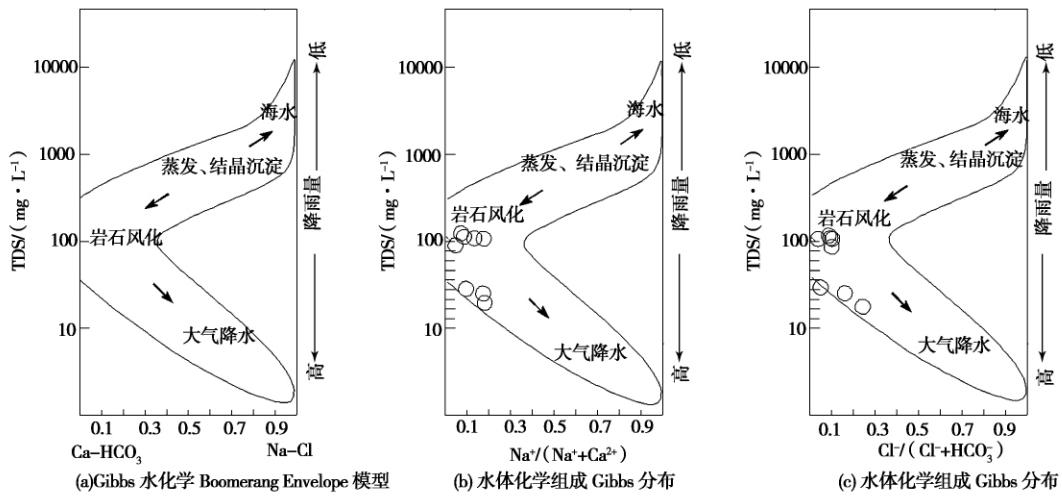
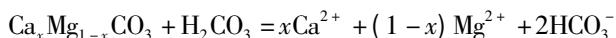


图 5 水化学组成的 Gibbs 图解

地下水  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的来源可由  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  的相对比例决定<sup>[11]</sup>, 主要风化过程:



由图 6 可知, 多数水样位于  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  离子比例 1:1 等量线的下方, 暗示碳酸盐类不是水中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  离子的唯一来源, 研究区存在硅酸盐矿物, 花岗岩中含  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  矿物的溶解也是来源之一。如钙长石的溶解:

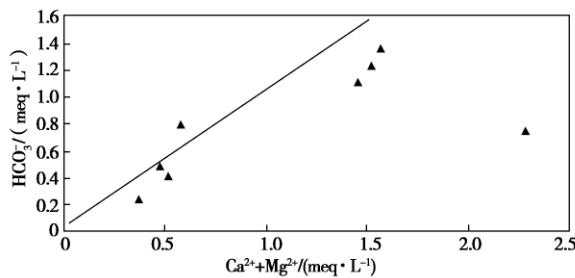
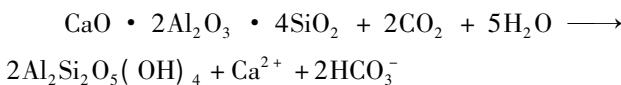


图 6  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  离子比例关系

由图 7 可知, 多数水样位于  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  离子比例 1:1 等量线的附近, 暗示硫酸盐类矿物的风化水解也可能是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子的重要来源, 且研究区为铁矿区, 存在大量的黄铁矿, 过量的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子由  $\text{SO}_4^{2-}$  离子来平衡, 以黄铁矿氧化为例:

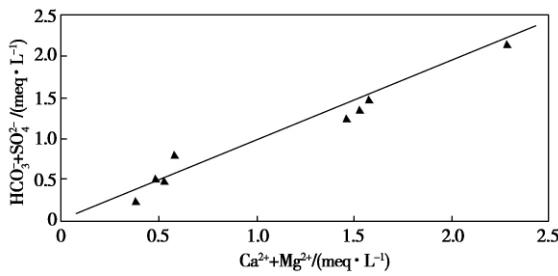
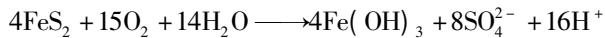


图 7  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  离子比例关系

## 5 水文地球化学空间分带性及成因

地下水分布的主要规律是它的分带性, 研究区地下水也表现出它的这一规律, 水样 SY1、SY2、SY3 水化学成分在垂直方向上呈现出很好的分带性(图 2)。水样 SY1 为地表水, 水样 SY2、SY3 分别为平硐 PD2、PD3 的水样(图 2)。从地表到地下, 水中  $\text{SO}_4^{2-}$  呈逐渐递增趋势, 这是由于研究区分布有大量的黄铁矿, 黄铁矿氧化, 再经水的溶滤, 使水中  $\text{SO}_4^{2-}$  离

子大量增加, 继续氧化可形成  $\text{Fe}^{3+}$  离子直至产生铁褐色的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀。

在垂直方向上,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量随深度有不同程度的增长(图 8), 分别从水样 SY1 的 8.42、1.22、1.77、0.81 mg/L 上升到水样 SY3 的 36.07、5.83、3.12、1.79 mg/L, 超过相邻铁矿区水样 SY7、SY8 中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量(表 1)。产生  $\text{SO}_4^{2-}$  的同时, 也会产生  $\text{H}^+$ , 使水体呈酸性, 而事实上研究区水样 pH 介于 7.10~7.94, 为中性, 这是因为研究区存在大理石岩层和花岗岩(图 2)。大理石的成分主要为  $\text{CaCO}_3$ , 其次为  $\text{MgCO}_3$ , 而花岗岩中含有钠长石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )和钾长石( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )。当含有大量  $\text{H}^+$  的水遇到大理石及花岗岩时, 会使  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  产生溶解, 从而使水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  增加,  $\text{pH}$  升高。由于水溶解了相当数量的离子, 水中 TDS 和总硬度随深度也不断增加。由于反应会使花岗岩发生溶解, 并产生白色高岭土。上述观察到的现象具体反应如下:

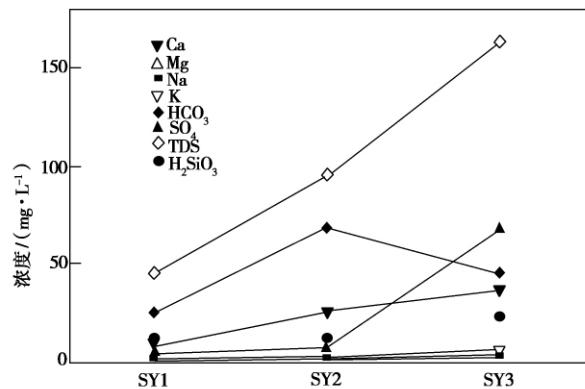
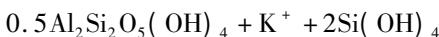
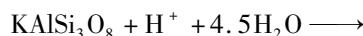
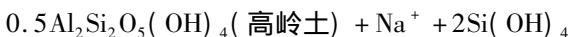
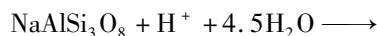
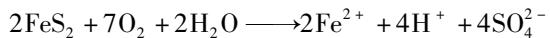


图 8 水样中离子深度变化曲线

地下水化学场的形成主要受地下水循环条件、含水层介质、古气候及现代气候条件的影响<sup>[12]</sup>。在浅部, 由于受到大气降水充分的渗入补给, 地下水循环交替条件良好, 水化学场受溶滤作用控制为主, 从而形成低矿化度的  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$  型水, 随着深度的增加, 研究区黄铁矿的氧化使水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子大量

增加 同时产生的  $H^+$  离子使水具有了溶蚀性 致使周围大理岩及花岗岩矿物有不同程度的溶解 ,水中主要离子含量也呈不同程度的增加趋势 ,水质类型由  $HCO_3^- - Ca$  向  $HCO_3^- \cdot SO_4^- - Ca$ 、 $SO_4^- \cdot HCO_3^- - Ca$  型水逐渐过渡。在深部由于补给条件较差 ,主要受上层承压水的越流补给 ,黄铁矿继续氧化 , $SO_4^{2-}$  离子不断增加 ,水中  $HCO_3^-$  离子含量减少 ,水质类型变成  $SO_4^- - Ca$  类型的水。

## 6 结论

1) 研究区水化学类型以低矿化度的  $HCO_3^- - Ca$  为主 阴离子以  $HCO_3^-$  占优势 阳离子以  $Ca^{2+}$  占优势 ,水的总硬度较小 属极软 – 软水。

2) 研究区地下水离子成分起源于大气降水和岩石风化作用 ,为大气降水与岩石风化共同控制的溶滤 – 渗入水。

3) 研究区地下水化学成分在垂直方向上存在明显的分带性 ,由地表的  $HCO_3^- - Ca$  型水往浅部  $HCO_3^- - SO_4^- - Ca$ 、 $SO_4^- \cdot HCO_3^- - Ca$  型水逐渐过渡 ,在深部最终形成  $SO_4^- - Ca$  型水 ,随着深度的增加 ,水中主要阴阳离子及 TDS 含量都呈明显增加趋势 ,其受研究区地下水循环条件、含水层介质、气候等因素的共同制约 其中含水层介质如岩石矿物组合对研究区地下水化学分带性影响最为显著。

## 参考文献

- [1] Guillen J ,PalanCues A. A shoreface zonation in the Ebro Delta based on grain size distribution. *Journal of Coastal Research* ,1997 ,13: 867 ~ 878
- [2] Mallik A U ,Lamb E G ,Rasi D H. Vegetation zonation among the microhabitats in a lacustrine environment: Analysis and application of below ground species trait patterns. *Ecological Engineering* ,2001 ,18: 135 ~ 146
- [3] Naito K ,Fukahori Y ,Peiming H ,et al. Oxygen and carbon isotope zonations of wall rocks around the Kamioka Pb – Zn skarn deposits ,central Japan: Application to prospecting. *Journal of Geochemical Exploration* ,1995 ,54 : 199 ~ 211
- [4] 郭清海 ,阎世龙 ,蒋方媛. 太原市深层孔隙水的水化学分带性及其地球化学模拟. 地球科学 – 中国地质大学学报 ,2005 ,30( 2) : 245 ~ 254
- [5] 沈照理 ,朱宛华 ,钟佐燊. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社: 1993
- [6] 王大纯 ,张人权 ,许绍倬 ,等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社 ,1994
- [7] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* ,1970 ,170: 1088 ~ 1090
- [8] 朱启秉 ,杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及成因. *科学通报* ,2007 ,52( 13) : 1561 ~ 1566
- [9] 侯昭华 ,徐海 ,安芷生. 青海湖流域水化学主离子特征及控制因素探讨. *地球与环境* ,2009 ,37( 1) : 11 ~ 19
- [10] 叶宏萌 ,袁旭英 ,葛敏霞. 太湖北部流域水化学特征及其控制因素. *生态环境学报* ,2010 ,19( 1) : 23 ~ 27
- [11] Qiao Xiaojian ,Li Guomin ,Li Ming ,et al. Influence of coal mining on regional karst groundwater system: a case study in west mountain area of Taiyuan City ,northern China. *Environ. Earth Sci.* ,2011 ,64: 1525 ~ 1535
- [12] 苏春丽 ,王焰新. 大同盆地孔隙地下水化学场的分带规律性研究. *水文地质工程地质* ,2008 ,1( 1) : 83 ~ 89