

文章编号:1000-582X(2011)05-087-06

利用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 示踪重庆都市圈地下热水循环过程

肖琼¹, 沈立成¹, 袁道先^{1,2}, 杨雷¹, 陈展图¹, 汪智军¹

(1. 西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 地理科学学院, 重庆 400715;

2. 国土资源部 岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:重庆市地下热水储存量大约有1亿 m^3 ,其中75%分布在都市圈内。通过对重庆市都市圈13个温泉群,20个泉点的温泉水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 调查,结合水化学指标进行分析表明:重庆市都市圈温泉水类型为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}$ 或者 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型,水的来源为大气降水。 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-7.41\text{‰}\sim-9.48\text{‰}$,研究认为地下热水的补给来源于海拔672~1503 m研究区域背斜核部岩溶出露区和背斜北端的岩溶出露区。热水中主要离子 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均存在很好的正相关性,且 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $31.46\text{‰}\sim34.32\text{‰}$,正好处于下三叠统嘉陵江组二段硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值异常段,由此表明雨水和地表径流沿岩溶裂隙等进入深部的含有硬石膏的嘉陵江组,由此认为重庆都市圈温泉水储水层可能为下三叠统嘉陵江组二段。

关键词:地下热水; $\delta^{18}\text{O}$; $\delta^{34}\text{S}$;水化学;重庆都市圈

中图分类号:P593;P641

文献标志码:A

Using $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{34}\text{S}$ isotopic techniques to trace the recycling process of hot springs in Chongqing metropolitan

XIAO Qiong¹, SHEN Li-cheng¹, YUAN Dao-xian^{1,2}, YANG Lei¹, CHEN Zhan-tu¹, WANG Zhi-jun¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laboratory, MLR,

Guilin, Guangxi 541004, P. R. China)

Abstract: There is about 100 million m^3 underground thermal resource storage in Chongqing, of which 75% are stockpiled in metropolitan area. 20 samples from 13 hot springs in Chongqing metropolitan area are collected and analyzed for chemistry and isotopes of heavy hydrogen, oxygen and sulfur. The results shows that these hot springs are $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}$ and $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}-\text{Mg}$, and the water sources is precipitation. The value of $\delta^{18}\text{O}$ is between $-7.41\text{‰}\sim-9.48\text{‰}$, which can ascertain that the recharge area of these hot springs are the karst area in these anticlines and the karst area at the north of these anticlines with the altitude of 672~1503 m. There is a good positive correlation between SO_4^{2-} and Ca^{2+} , Mg^{2+} . The $\delta^{34}\text{S}$ value of the samples is between $31.46\text{‰}\sim34.32\text{‰}$, precisely the same with the $\delta^{34}\text{S}$ value in gypsum at the second phase of Jialingjiang formation in Early Trias. Both of them shows that rainflow and surface flow along the karst

收稿日期:2011-01-22

基金项目:科技部国际合作项目(2008GR1256);重庆市科委院士专项(CSTC,2010BC7004);国家自然科学基金(41072192);西南大学研究生创新基金项目(kb2009004,ky2010002)

作者简介:肖琼(1984-),女,西南大学博士研究生,主要研究方向为岩溶水资源。

袁道先(联系人),男,西南大学地理科学学院教授,主要研究方向为岩溶学和岩溶动力系统,

(E-mail)dxyuan@karst.com。

fissures infiltrate into the Jialingjiang Formation which have gypsum, and it also shows that the hot springs storage formation may be the second phase of Jialingjiang formation in Early Trias.

Key words: hot springs; $\delta^{18}\text{O}$; $\delta^{34}\text{S}$; hydrochemistry; Chongqing metropolitan

温泉旅游业在中国发展历史悠久,目前越来越受到重视。2008年《重庆市“一圈百泉”总体策划》通过了评审,要在三年内打造“一圈百泉”。主要为打造主城核心温泉旅游产业区,整合主城九区的温泉资源。独特的喀斯特作用使得地下存在很多空洞,利于热水存储。南江水文地质调查院总工程师罗祥康认为重庆的温泉海洋大约储量在1亿 m^3 以上,其中75%集中在主城区^[1]。主城区地下热水属于盆地型地热水,天然补给资源有限^[2],一旦过度开发,热水资源环境将会受到不可逆转的破坏。温泉是地下热水的天然或人工露头,弄清重庆都市圈温泉水的径流过程,能够为重庆打造“温泉之都”的可行性研究提供必不可少的基础依据。

随着地热作为新能源在能源结构中所占比例增大,对地热资源的研究也日益增多。1964年Elsli^[3]等在*Geochemistry and Geothermal Systems*一书中认为热水中大部分溶解组分来自于水与围岩之间的反应,即地热田是一个高温条件下的水文地球化学系统,构成该系统的基本物质成分是地热流体和固相介质(围岩)。1988-1992年,Giggnebach^[4]创立了一系列三角图作为研究地热流体起源和形成机理的标志(GoindicatorS),国内学者近几年来通过水文地球化学方法和同位素方法对温泉的形成演化、径流特征等方面进行了很多的研究,王蔚等^[5]于1995年通过对湘西北地区温泉水的化学组成等方面的研究探讨温泉地热源的成因问题。万登堡等^[6]在1998年通过对腾冲热海温泉群化学组分特征的研究,探讨了泉群的形成机理。王广才等^[7]在2003年对延怀盆地地下热水及稀有气体的地球化学特征进行探讨,确定该地区的热水成因。

1987年,罗祥康^[8]发表论文《重庆市地下热水开发利用的初步研究》,对重庆地区的温泉水化学特征及其开发利用进行了研究。随后一些学者试图通过用同位素和水化学特征对重庆市都市圈温泉水补给途径,埋藏深度,以及径流过程进行了探讨,取得一些成果。笔者从基本水化学特征着手,并通过氧、硫稳定同位素组成,研究了重庆都市圈温泉水的来源以及水岩作用过程。

1 区域地质背景

重庆位于四川盆地东部与中部接壤地带,东部以东北向条带状高隆起紧密褶皱为特征,以华蓥山、铜锣峡、明月峡为主体的川东平行排列的隔挡式褶皱。本区沉积岩广布,出露地层以白垩系至三叠系

为主,厚达六千余米,其中以侏罗系红层厚度最大,分布最广,三叠系地层次之。下三叠统嘉陵江组地层是本区的主要热储层位,广泛出露于各高隆起背斜的轴部,厚600m左右,以灰岩为主,间夹白云质灰岩及角砾状灰岩等。热储层上覆为上三叠统须家河组砂岩夹黑色灰色碳质页岩的含煤地层及侏罗系砂泥岩,总厚度约3000m,是良好的隔热盖层。其下伏为下三叠统飞仙关组碎屑岩夹碳酸盐岩地层,是良好的隔水层^[9]。

该区属于二级大地构造单元四川台坳的川东陷褶束,主要构造为一系列NE-NNE向的近乎平行的不对称的线形的梳状或者箱状褶皱组成,褶皱背斜紧凑狭窄,向斜开阔平坦形成隔挡式。次一级褶皱主要发育在背斜的轴部附近以及宽缓的向斜之中,和褶皱相伴随的同方向的压扭性断裂主要发育在背斜轴部及其倾没端,以及背斜轴线弯转和轴面扭接地带。该区多为走向逆冲型断层,断层面倾角 $50^\circ\sim 80^\circ$,且多为SE-NWW逆冲。主要有青木关断层,高石坎断层,凉亭关断层,白庙子断层,中梁山断层,龙洞子断层等^[10]。

研究区内受地质环境和构造控制,背斜狭窄成山,向斜开阔为谷。热水主要埋藏于高隆起背斜翼部的下三叠统嘉陵江组碳酸盐岩中,在横向上被向斜深部热储盐卤水所隔,相互之间没有水力联系^[9]。同一背斜两翼热水也只有背斜始端和末端有所不同,中间被背斜核部下三叠统飞仙关组砂页岩分隔。嘉陵江、长江深切本区,形成深切峡谷,对背斜内地下水的循环起到控制作用,使得深切峡谷处成为岩溶水的排泄点,形成上升泉。重庆都市区自然出露泉点有10来处,人工揭露的温泉约30处。比较著名的有南温泉、北温泉、东温泉以及统景温泉。

2 样品采集与分析

2.1 野外测定

在重庆市都市圈范围内的温塘峡背斜、观音峡背斜、铜锣峡背斜、南温泉背斜、明月峡背斜选取1~2处天然或人工钻取泉点进行水化学分析,共取泉点13处,包括20个泉眼(图1)。对泉点现场测量水温、pH、电导率、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 。温度、pH值和电导用美国Hach公司便携式水质分析仪测定,其精度分别为 0.1°C 、0.01pH和 $1\mu\text{S}/\text{cm}$; HCO_3^- 和 Ca^{2+} 采用德国Merck公司便携式试剂盒,精度分别为 $0.1\text{mmol}/\text{L}$ 和 $2\text{mg}/\text{L}$ 。

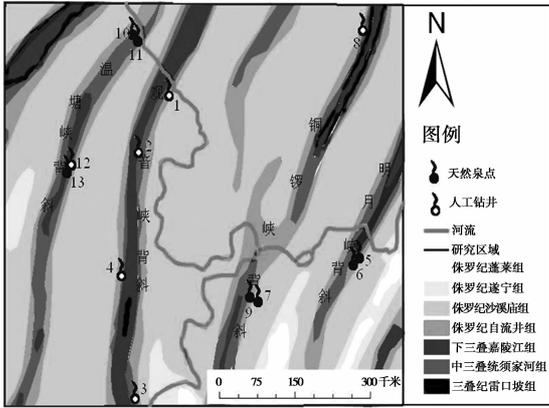


图 1 取样点水地质图

2.2 样品采集和实验室分析

取回水样, Cl^- 使用 AgNO_3 滴定法 (0.1 mg/L), SO_4^{2-} 测定采用紫外分光光度计 (0.01 mg/L); 阳离子水样酸化防吸附后用 ICP-OES Optima 2100 DV 测定 (0.001 mg/L)。实验均在西南大学地理科学学院水化学分析实验室和同位素实验室完成。

氧同位素分析测试采用 Delta V Plus 质谱仪在西南大学同位素实验室完成, 前处理设备为 Gas Bench 在线致样装置, 结果以相对于 Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) 标准给出, 绝对误差 $< 0.2\%$; 硫同位素的分析是在宜昌地矿所完成, 将水样用碳酸钠-氧化锌半熔法转化为硫酸钡

(BaSO_4), 再用五氧化二钒 (V_2O_5) 法将 BaSO_4 转化成二氧化硫 (SO_2), 用气体同位素质谱计分析硫同位素组成, 使用质谱仪为德国产 MAT-251, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 测定值的精密度为 $\pm 0.2\%$ 。重复样品分析的相对误差小于 $\pm 0.5\%$ 。

3 重庆市都市圈温泉水循环特征研究

3.1 水化学特征

根据各温泉水阴阳离子含量 (表 1) 得出水化学类型图 (图 2), 可见, 研究区地下热水温度为 $30 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$, 阳离子主要为 Ca^{2+} 离子, 均达到 500 mg/L 以上, 其次为 Mg^{2+} 。阴离子主要为 SO_4^{2-} , 高达 $749.95 \sim 1889.9 \text{ mg/L}$, 其次为 HCO_3^- 。温泉水 pH 值呈中性, 含有多种微量元素, 其中含量稍大的有氟、锶、铁、锰、钡等, 另外还含有钴、镍、铬、钨等, 同时有些热水中还存在较多的硫化氢气体和少量放射性元素。所以, 重庆市温泉均属于中温微咸热水, 矿化度均超过 2000 mg/L 。

地下热水水化学成份受地下水储存和运移的地球化学环境控制, 通过它们可以反映热水储存运移过程中的介质条件以及循环交替过程^[11]。重庆市主要温泉水化学性质基本一致, 各离子浓度相差不大, 这说明重庆都市圈不同地点温泉水储存运移过程中的介质条件和循环交替条件大体相似。

表 1 重庆市温泉水化学特征

mg/L

化学特征	观音峡背斜				明月峡背斜		铜锣峡背斜			温塘峡背斜			
	颐尚温泉*	翡翠湖*	南海温泉*	天赐温泉*	东泉镇	东泉热门	南泉	统景温泉	南泉 2 号	北温泉	水文站	青木关*	驷公桥
pH	7.47	7.27	7.05	7.28	7.56	7.66	7.23	7.12	7.69	7.02	7.54	6.78	7.15
E_c^{**}	3250	2860	2990	3090	2960	2970	2940	2890	2540	2390	2710	1842	1320
T/ $^\circ\text{C}$	28.50	37.10	50.60	42.70	45.80	38.40	33.10	45.00	29.90	35.90	33.90	29.50	26.70
HCO_3^-	152.50	176.90	195.20	170.80	152.00	158.60	207.40	183.00	207.40	158.60	152.50	244.00	292.80
Cl^-	12.04	14.11	15.83	15.83	17.21	18.58	70.89	34.00	30.63	15.83	14.11	9.44	8.76
SO_4^{2-}	1889.90	1641.47	1473.11	1771.29	1743.13	1836.71	1201.88	1643.00	1352.13	1247.97	1441.98	1126.59	749.95
NO_3^-	2.53	1.98	0.58	0.70	0.00	0.47	4.05	0.56	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00
PO_4^{3-}	0.04	0.12	0.22	0.28	0.00	1.24	3.42	0.21	0.00	2.08	4.44	0.00	0.00
F^-	11.44	12.69	14.71	13.83	11.97	12.85	9.87	12.46	9.23	9.71	11.69	0.64	0.60
K	22.22	24.29	31.69	37.30	20.88	22.16	13.34	30.12	12.91	9.11	8.89	6.65	3.98
Na	11.44	18.97	29.09	23.45	30.03	31.62	40.43	28.75	39.49	15.74	15.76	6.28	4.88
Ca	725.68	679.52	578.96	675.30	699.62	708.91	526.30	578.00	542.16	540.56	581.05	331.23	223.07
Mg	146.18	136.54	122.38	136.80	145.27	148.99	117.77	120.32	126.55	110.17	118.80	93.08	80.01
Fe	1.95	0.28	5.71	7.23	1.04	0.86	0.18	5.56	3.55	0.08	0.07	0.91	0.19
Mn	0.09	0.02	0.07	0.11	0.02	0.06	0.01	0.07	0.12	0.02	0.01	0.12	0.03
Ba	3.65	0.25	0.29	0.27	0.22	1.05	5.74	0.25	5.11	0.90	0.13	0.02	0.03
Sr	13.12	14.29	12.52	13.77	13.14	13.41	10.10	12.11	10.44	10.74	11.73	5.12	4.25

说明: * 表示为人工钻井泉点, 其余为自然出露泉点; ** 表示 E_c 为电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$

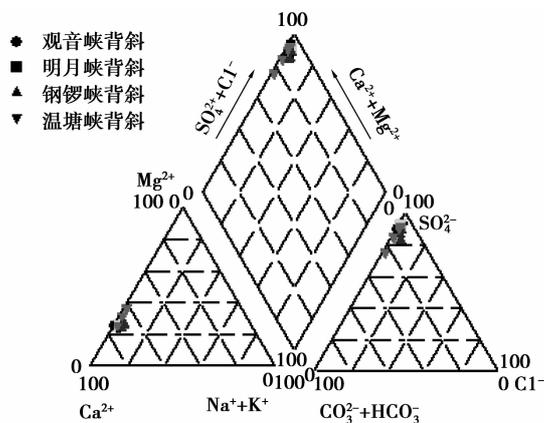
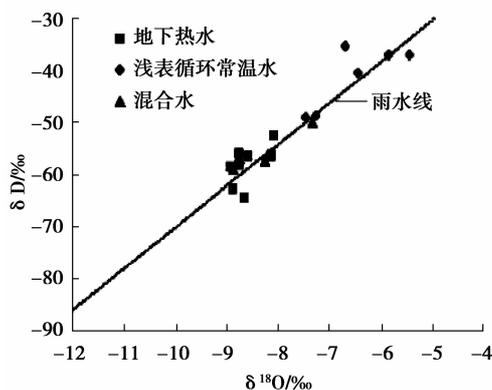


图 2 研究区水化学类型图

3.2 热水来源

很多学者用 δD 和 $\delta^{18}O$ 来研究了地下热水的来源^[12]。罗云菊等^[10]对重庆市温泉水研究表明 δD 和 $\delta^{18}O$ 值都落在大气降水线附近(图 3),表明重庆市都市圈温泉水主要补给途径是大气降水。大气降水的氧同位素组成具有高程效应^[13]。为了更清楚地确定重庆地下热水补给区,对重庆市温泉水进行了氧同位素取样测定,用来计算地下热水的补给高程(表 2)。

图 3 重庆地下水样 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图^[10]

于津生等^[14]对西藏东部地区 $\delta^{18}O$ 高程效应的研究,表明 $\delta^{18}O$ 梯度值为 $-0.26\text{‰}/100\text{ m}$,即海拔每增高 100 m , $\delta^{18}O$ 值降低 0.26‰ 。重庆市都市圈温泉的 $\delta^{18}O$ 值为 $-7.41\text{‰}\sim-9.48\text{‰}$ (表 2),而温泉所在区河水的 $\delta^{18}O$ 均值为 -6.31‰ ,重庆都市区温泉出露点平均海拔高度为 284 m ,由此可以根据以下公式^[13]计算出温泉水的补给高程 H 。

$$H = \frac{R - (-6.31)}{-0.26} \times 100 + 284,$$

式中, R 为温泉水的 $\delta^{18}O$ 值。

计算表明,重庆市温泉水的补给区主要是位于海拔 $672\sim1503\text{ m}$ 的地区,根据四川盆地东部边缘

地带构造和补给区高程,结合长江、嘉陵江对背斜内地下水循环的控制,研究认为重庆市都市圈地下热水的补给主要来源于背斜核部的岩溶出露区和背斜北端的岩溶出露区。

表 2 重庆市都市圈温泉 $\delta^{18}O, \delta^{34}S$ 值

地点	$\delta^{34}S$	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$
	(2009 年 1 月)	(2009 年 1 月)	(2009 年 7 月)
颐尚温泉	34.32	-9.48	—
翡翠湖	32.69	-9.39	-9.22
天赐温泉	34.06	-9.35	-9.25
东泉八一光中	31.66	-8.45	-8.58
东泉热洞	31.46	-9.39	-9.06
南温泉	31.98	-8.40	-8.56
南温泉 2 号	32.57	-8.49	-8.73
北温泉大游泳池	32.14	-7.32	-8.57
水文站	32.16	-8.15	-8.30
青木关游泳池	33.62	-8.03	-8.15
驷公桥	33.22	-7.41	-7.44
嘉陵江水	—	-6.32	-6.30

3.3 循环过程探讨

3.3.1 $SO_4^{2-} (HCO_3^-)$ 和 $Ca^{2+} (Mg^{2+})$ 相关性分析

通过对重庆市都市圈温泉所有泉点的 $SO_4^{2-} (HCO_3^-)$ 和 $Ca^{2+} (Mg^{2+})$ 的量浓度进行相关性比较(表 1),表明 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 的平均摩尔浓度比为 $5:1$ 。当 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 的摩尔浓度比大于 $1:2$ 时,说明碳酸盐岩风化时存在硫酸盐蒸发岩的风化^[15]。而区内所有泉点的 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 的平均摩尔浓度比高内达 5,表明其来源主要是硫酸盐岩的风化。地下热水与硫酸盐岩的相互作用和地下热水与碳酸盐岩的相互作用不同,它们可以直接反应,不需借助任何溶剂,比如 CO_2 。硬石膏或者是石膏在水作用下溶解为 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 。同时,石膏硬度小,除了遭受化学溶蚀作用外,也容易受水流等机械物理力学等的破坏。研究区地下地层为三叠系嘉陵江组和雷口坡组,是四川盆地硫酸盐的主要分布地。地下热水在径流过程中,与周围硫酸盐岩发生强烈的物理化学溶蚀作用,从而导致水中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 异常。

从 SO_4^{2-} 和 $Ca^{2+} (Mg^{2+})$ 摩尔浓度的相关关系图(图 4)可知, SO_4^{2-} 摩尔浓度略大于 Ca^{2+} 摩尔浓度,且两者具有很好的正相关关系,相关系数达 0.94129 ; Mg^{2+} 摩尔浓度较前两者小很多,却依然和 SO_4^{2-} 存在很好的正相关关系,相关系数为 0.94632 。表明重庆市温泉水可能是地表雨水补给进入深部的以灰岩、白云质灰岩

为主的雷口坡组和嘉陵江组(含有石膏)地层,发生水岩作用后流出地表的结果。比较表 1 和图 4 可以发现,水文站、北温泉、青木关温泉以及驷公桥 4 个泉点的 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} (Mg^{2+}) 浓度均较小,位于拟合线的左下方,且与其他泉点的含量相差很大。据调查,这 4 个泉点位于温塘峡背斜,均是出露于须家河组砂岩的天然泉点,受断层或裂隙影响,在局部地段,嘉陵江组岩溶水和上部须家河组裂隙水相沟通,具有局部水力联系,且储热层水在沿裂隙上升过程中亦与须家河组砂岩裂隙水存在水力联系。由此可见,温泉出露于须家河组砂页岩中,并与须家河组冷水掺合,使水温降低,又因须家河组砂岩裂隙水 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度远远小于地下热水,故出露于须家河组砂岩地区的温泉水的各种离子浓度小于其他的深钻井泉点。

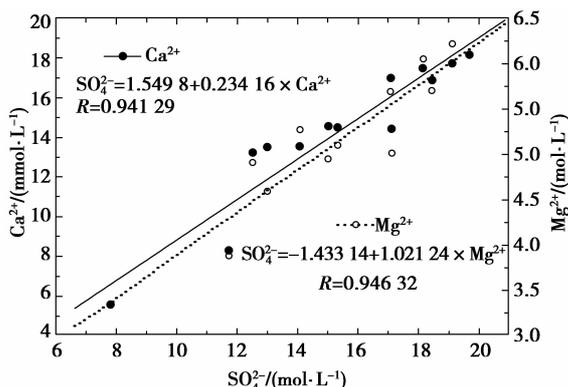


图 4 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} (Mg^{2+}) 相关关系图

3.3.2 硫同位素组成特征

在地表水或地下水体系研究中, $\delta^{34}\text{S}$ 被广泛用于示踪硫的来源以及运移转换条件^[16-19];通过对硫来源和运移转换条件的研究可以了解地下热水径流途径以及水岩作用过程。前文中对 SO_4^{2-} (HCO_3^-) 和 Ca^{2+} (Mg^{2+}) 的研究表明重庆市地下热水水岩作用过程中主要是地下水对含石膏的雷口坡组和嘉陵江组的碳酸盐岩的风化作用。通过对 $\delta^{34}\text{S}$ 的研究,四川盆地海相三叠系硫同位素有极强的分布规律。在纵向上自下而上呈阶梯状递减分布而在横向上变化很小,相同层段的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布稳定,可进行广泛的区域性对比,甚至可进行全球性对比,但近年研究发现,其硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值存在异常^[20]。造成这一段 $\delta^{34}\text{S}$ 的异常原因是四川盆地在早三叠世嘉二期是广泛海进之后转为海退环境的第一个成盐期,处于与外海隔绝的盐湖环境,强烈的蒸发作用有利于蒸发岩类的形成,大量的厌氧细菌将硫酸盐还原为 H_2S 或形成其它硫化物^[21] 所致。

重庆市都市圈位于四川盆地东部边缘,表 2 显示市区主要温泉水 SO_4^{2-} 中 $\delta^{34}\text{S}$ 的范围为 31.46‰~34.32‰,与四川盆地海相三叠系硫同位素值相比(图 5)与 $\delta^{34}\text{S}$ 值异常段下三叠统嘉陵江组二段石膏中 $\delta^{34}\text{S}$ 值(32.5‰~35.4‰)正好吻合。地下水 SO_4^{2-} 中 $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围为 -13‰~+41‰,但由于地下水赋存环境不同引起同位素分馏程度有所差异^[13]。温泉水 SO_4^{2-} 中 $\delta^{34}\text{S}$ 值恰好处于这一异常段,证实地表雨水补给进入的是下三叠统嘉陵江组二段碳酸盐岩地层,溶解其中的石膏。而温泉水高 SO_4^{2-} 浓度与同位素值相对应,表明温泉水含水层的位置很大可能为此段岩层。

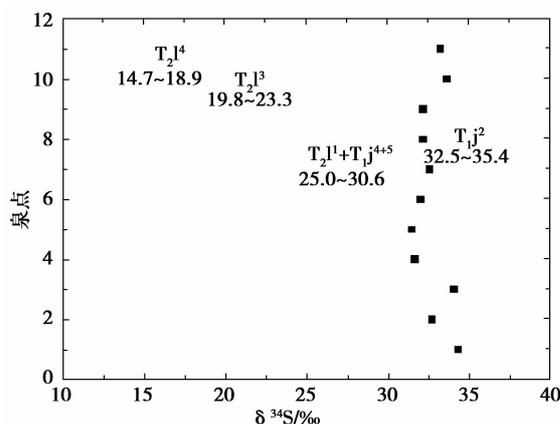


图 5 重庆市温泉 $\delta^{34}\text{S}$ 值与三叠系岩层中硬石膏值对比

4 结 语

通过对重庆市都市圈温泉水水温地球化学特征的研究,得出以下结论:

1) 重庆市都市圈温泉分布于主城区内各高隆起背斜翼部,水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}$ 和 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca} - \text{Mg}$;且各泉点所含离子基本相同,由此表明,重庆市都市圈温泉水有着相似的补给来源和循环过程。

2) 通过对温泉水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的研究,确定重庆都市圈温泉水为大气降水补给,通过氧同位素高程效应,地下热水的补给主要来源于海拔 672~1 503 m 的背斜核部的岩溶出露区和背斜北端的岩溶出露区。

3) 通过对 SO_4^{2-} (HCO_3^-) 和 Ca^{2+} (Mg^{2+}) 以及温泉水 SO_4^{2-} 中 $\delta^{34}\text{S}$ 的研究发现,重庆市温泉水是地表雨水补给进入埋藏地下的下三叠统嘉陵江组二段含有硬石膏的碳酸盐岩地层,形成地下热水径流。径流过程中与周围的硫酸盐岩发生化学溶蚀和物理力学风化作用,使得地下热水中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 浓度存在异常高值。

4) 地下热水循环中,受地质构造和自身承压作

用沿裂隙上升穿过须家河组砂岩地层自然出露地表。上升过程中与须家河组砂岩水存在水力联系,出露于须家河组砂岩地区的温泉水的各种离子浓度小于其他的深钻井泉点。

致谢:感谢西南大学同位素实验室和水化学分析室老师和同学们的帮助。

参考文献:

- [1] 刘帮云. 重庆地下是个温泉海洋——面积约1万平方公里[J]. 科学咨询(决策管理), 2003, 23(12): 47.
LIU BANG-YUN. Chongqing is a hot underground ocean—an area of about 10 000 square kilometers[J]. Scientific Consult, 2003, 23(12): 47.
- [2] 周训, 周海燕, 方斌, 等. 浅析开采条件下地下热水资源的演变[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 482-486.
ZHOU XUN, ZHOU HAI-YAN, FANG BIN, et al. Evolution of thermal groundwater resources under the conditions of exploitation: A preliminary analysis[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(4): 482-486.
- [3] ELLIS A J, MAHON W A J. Geochemistry and Geothermal Systems[M]. New York: Academic Press, 1977.
- [4] GIGGENBACH W F. Reply to comment by P. Blattner: “Andesitic water”: A phantom of isotopic evolution of water silicate system[J]. Earth Planet Science Letters, 1993, 120(3/4): 519-522.
- [5] 王蔚, 张景荣, 胡桂兴, 等. 湘西北地区现代温泉地球化学[J]. 中国科学B辑, 1995, 25(4): 427-433.
Wang wei, Zhang Jing-rong, Hu Gui-xing et. Geochemistry in modern hot spring in the western and northern area in Hunan[J]. Science in China(B), 1995, 25(4), 427-433.
- [6] 万登堡. 腾冲热海温泉群化学特征与形成机理研究[J]. 地震研究, 1998, 21(4): 389-396.
WANG DENG -BAO. Studies on mechanism and chemical characteristic of hot spring swarms in Tengchong hot sea [J]. Journal of Seismological Research, 1998, 21(4): 389-396.
- [7] 王广才, 张作辰, 汪明, 等. 延坪盆地地下热水与稀有气体的地球化学特征[J]. 地震地质, 2003, 25(3): 421-429.
WANG GUANG-CAI, ZHANG ZUO-CHEN, WANG MING, et al. Geochemistry of geothermal water noble gases in Yanhuai basin, China [J]. Seismology and Geology, 2003, 25(3): 421-429.
- [8] 罗祥康. 重庆市地下热水开发利用条件的初步研究[J]. 四川地质学报, 1987, 7(1): 58-65.
LUO XIANG -KANG. The preliminary study in the conditions of development and utilization in the hot springs in Chongqing [J]. Acta Geological Sichuan, 1987, 7(1): 58-68.
- [9] 中华人民共和国区域水文地质普查报告 1:20 万重庆幅[R]. 北京:四川省地质局, 1977.
- [10] 罗云菊, 刘东燕, 许模. 重庆地下热水径流特征研究[J]. 地球与环境, 2006, 34(1): 49-54.
LUO YUN-JU, LIU DONG-YAN, XU MO. Study on the geothermal water runoff Chongqing [J]. Earth and Environment, 2006, 34(1): 49-54.
- [11] 叶思源, 孙继朝, 姜春永. 水文地球化学研究线状与进展[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 477-482.
YE SI-YUAN, SUN JI-CHAO, JIANG CHUN-YONG. Current Situation and Advances in Hydrogeochemical Researches [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(5): 477-482.
- [12] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- [13] 于津生, 张鸿斌, 虞福基, 等. 西藏东部大气降水氧同位素组成特征[J]. 地球化学, 1980, 9(2): 113-121.
YU JIN-SHENG, ZHANG HONG -BIN, YU FU-JI, et al. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Tibet [J]. Geochimica, 1980, 9(2): 113-121.
- [14] 蒋颖魁, 刘丛强, 陶发祥, 等. 贵州乌江水系枯水期河水硫同位素组成研究[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 623-628.
JIANG YIN-KUI, LIU CONG -QIANG, TAO FA-XIANG, et al. Sulfur isotopic composition of Wujiang river water in Guizhou province during low-flow period [J]. Geochimica, 2006, 35(6): 623-628.
- [15] VAN DONKELAAR C, HUTCHEON I E, KROUSE H R. $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ and δD in shallow groundwater: Tracing anthropogenic sulfate and accompanying groundwater/rock interactions [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 79(1/4): 279-298.
- [16] THOMAS P. $\delta^{34}\text{S}$ isotope values of dissolved sulfate (SO_4^{2-}) as a tracer for battery acid (H_2SO_4) contamination in groundwater [J]. Environmental Geology, 2005, 47(2): 215-224.
- [17] 储雪蕾. 北京地区地表水的硫同位素组成与环境地球化学[J]. 第四纪研究, 2000, 20(1): 87-97.
CHU XUE-LEI. Sulfur isotopic compositions and environmental geochemistry of surface water in Beijing district [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(1): 87-97.
- [18] 顾慰祖, 林曾平, 费光灿, 等. 环境同位素硫在大同南武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 14-20.
GU WEI-ZU, LIN ZENG-PING, FEI GUANG-CAN, et al. The use of environmental sulphur isotopes in the study of the cambrian-ordovician aquifer system in the south of Datong [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 14-20.
- [19] 林耀庭, 高立民, 宋鹤彬. 四川盆地海相三叠系硫同位素组成及其地质意义 [J]. 地质地球化学 1998, 26(4): 43-49.
LIN YAO-TING, GAO LI-MIN, SONG HE-BIN. Sulfur isotopic composition of the marine Triassic in the Sichuan basin and its geological significance [J]. Geology-Geochemistry, 1998, 26(4): 43-49.
- [20] BORCHERT H, MUIR R O. The Origin Metamorphism and Deformation of Evaporites [M]. Beijing: Geology Publishing Company, 1976.