

文章编号:1001-4810(2011)02-0209-07

不同地质背景地热系统水-岩作用下 温泉水的地球化学特征 ——以重庆市温塘峡背斜温泉、滇东小江断裂带温泉为例

杨雷,肖琼,沈立成,伍坤宇

(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)

摘 要:本文以重庆市温塘峡背斜和滇东小江断裂带出露温泉为例,探讨了其水文地球化学特征的差异。研究发现,由于地质背景条件基本相同,温塘峡背斜出露的温泉水文地球化学特征比较接近,水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ 型,而小江断裂带温泉水文地球化学特征差异较大,泉水水化学类型主要有 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型(YN1)、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型(YN2)、 $\text{SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ 型(YN3 和 YN5) 和 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型(YN4),这与各泉点所处地质背景条件不同有很大关系。此外,通过对 Na-K-Mg 和 Na-K-Mg-Ca 图解模型的解读得出,所有样品均未达到水-岩平衡,仅有 YN1 泉点样品接近完全平衡线,表明 YN1 接近水-岩作用平衡状态,并由上述图解模型估算得到 YN1 点热储温度大概为 $100\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$,与运用 SiO_2 温标计算的热储温度($133\sim 139\text{ }^\circ\text{C}$)相差不大。此外,水化学特征和 Na-K-Mg-Ca 图解分析也表明,YN2 与温塘峡背斜温泉水-岩作用过程比较相似。

关键词:温泉;水文地球化学;温塘峡背斜;小江断裂带

中图分类号:314.3 **文献标识码:**A

地热温泉作为一种特殊的自然资源,由于其能源价值、疗养价值、休闲娱乐带来巨大的经济价值,一直以来都受到人们的广泛关注,加之它是特殊地质条件的产物,因此,国内外学者对于温泉成因、形成机理、补给来源和路径以及地热资源开发利用等做了大量研究。1977年, Ellis 等^[1]在《地热系统化学》一书中就热水的起源、热水的物理化学同位素特征、热水蚀变、热水中矿物沉淀等做了详细阐述。Giggnebach^[2] 1988—1992年间创建了一系列三角图来研究地热流体起源和形成机制。1998年刘文辉^[3]等研究了咸阳市区地下热水水化学特征认为咸阳市区地下热水水化学特征的空间分布与渭河北岸断裂有着密切联系,并依据地下热水用途对热水进行分类评价。2000年刘再华等^[4]研究表明地热系统 $\text{CO}_2\text{-水-碳酸盐岩}$ 系统与出露在火成岩地层中的地热系统有不同的水文

地球化学特征。2002年刘久荣等^[5]通过对北京某地热田 1984—2001年间的地热水化学成分、地热温标、地热活动总体强度和示温矿物的研究,得出开采引起了热储压力的降低,从而导致热储水和热的补给加强的结论。本文从重庆市温塘峡背斜和滇东小江断裂带温泉的区域地质背景状况入手,结合温泉水中各种化学组分和水化学指标的分析,探讨各温泉水文地球化学特征之间的差异,揭示不同地质背景下地热系统的水-岩作用过程,为地热资源合理的开发利用提供必要的基础依据。

1 研究区概况

云南小江断裂带是滇中地块中南北走滑断裂系中的一条主干断裂(图 1),也是一条长期活动的发震

基金项目:国家自然科学基金(编号 41072192)、重庆市科委院士专项(CSTC2010BC7004)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号 XDJK2010B006)、西南大学研究生科技创新基金(编号 ky2010002)

第一作者简介:杨雷(1987—),男,硕士研究生,主要从事水文地质方面的研究,E-mail: yanglei112@126.com.

收稿日期:2010-12-14

断裂,破碎带宽 500 m 以上。新生代由于印度板块与欧亚板块的汇聚、碰撞和楔入,菲律宾和太平洋板块对中国大陆的夹持,构成了云南境内特有的构造格局和复杂的应变面貌,形成了众多的剪切构造及其伴生的形态多样的走滑盆地群。小江断裂表现为左行走滑运动性质,构成川滇菱形断块体的东界,自北向南总体形态由单一结构分支为二,进而向南撤开,沿断裂分布着一系列新生代褐煤断陷盆地,温泉沿断裂带呈线状分布^[6-7],出露地质背景状况有很大差异,

出露于前震旦系哀牢山群阿龙组($Pt_1\alpha$)大理岩中,位于红河断裂的西南边,主要受红河压扭性断裂控制;宜良汤池(YN4)温泉位于宜良汤池镇内,阳宗海东北角,出露在小江断裂带上的震旦系灯影组(Z_3d)白云岩内,阳宗海以西为二叠系灰岩地层,较高处有峨眉山玄武岩出露,中间为小江断裂砾岩,大小不一,混杂第三系褐煤层;宜良蓬莱(YN5)温泉位于宜良蓬莱乡,出露在小江断裂的东支上,出露地层为第四系,下部为下泥盆和志留系灰岩、白云质灰岩地层。

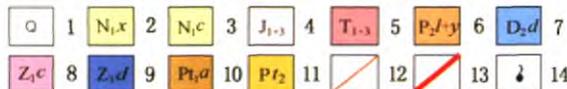
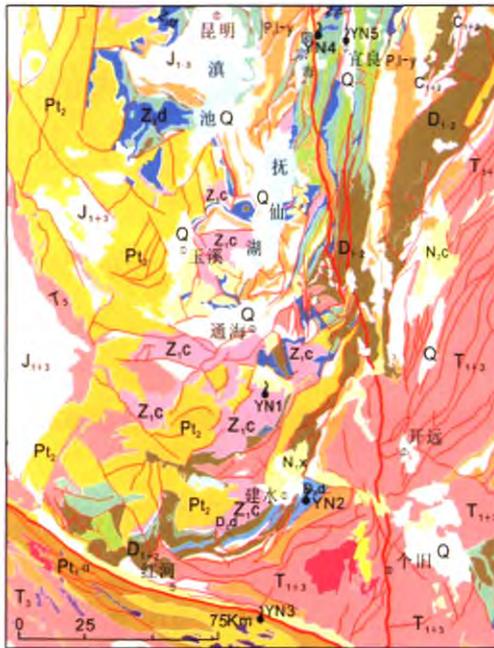


图1 滇东区域地质图(据 1:25 万云南省区域地质图)

Fig. 1 Geologic map of the East Yunnan

1. 第四纪沉积物;2. 中新统小龙潭组;3. 上新统茨营组;4. 侏罗系地层;5. 三叠系地层;6. 下二叠统梁山组和阳新组邻接部分;7. 中泥盆统东岗岭组;8. 震旦系澄江组;9. 震旦系灯影组;10. 元古宙哀牢山群;11. 中元古界地层;12. 区域小断裂;13. 断裂带;14. 取样点

其温泉热源主要来自于地热增温,补给水源主要来自于大气降水,热储层位主要为碳酸盐岩地层^[8-9]。建水澡堂村(YN1)温泉,位于建水县以北,曲江盆地边缘,“山”字型构造的转折端,受曲江隐伏断层控制,泉水出露地层为震旦系澄江组(Z_1c)紫红色砂岩。在该泉点东北面出露三叠系深灰色、黄绿色泥岩、砂质泥岩、钙质粉砂岩不等厚互夹少量泥灰岩、灰岩和细砂岩,与澄江组为不整合接触,再往东为二叠系灰岩地层;建水黄龙寺(YN2)温泉,出露于泥盆系东岗岭组(D_2d)灰岩中,位于小江断裂南段和建水断裂的交汇处,东面有第三系泥灰岩出露;元阳南沙(YN3)温泉,

重庆市温塘峡背斜属于二级大地构造单元四川台坳的川东平行排列的隔挡式褶皱束中华蓑山构造带向西南的梳状分支^[10-11],区内出露地层主要有下三叠统嘉陵江组(T_1j)灰岩、白云质灰岩和石膏互层;中三叠统雷口坡组(T_2l)白云质灰岩、泥页岩;上三叠统须家河组(T_3xj)砂岩、碳质页岩(图2)。本区温泉的储热含水层主要为三叠系嘉陵江组和雷口坡组的碳酸盐岩地层^[12],根据邻近地区露头剖面调查,雷口坡组为咸化浅海相碳酸盐沉积,由灰色厚层状白云质灰岩和白云岩组成,含有硬石膏、岩盐等岩溶角砾,但大部分已被剥蚀,现残存厚度 10~20 m。雷口坡组之下的嘉陵江组为半咸化浅海相碳酸盐沉积,以浅灰、灰黄色薄层—中厚层灰岩和岩溶角砾状白云质灰岩为主,厚度大约 500~520 m^[13]。区内温泉热源主要来自于地热增温,补给水源主要来自于大气降水^[14]。北温泉(CQ1)和水文站(CQ2)两

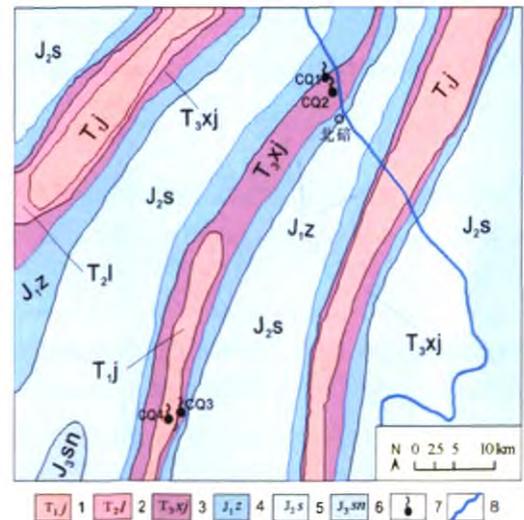


图2 重庆市温塘峡区域地质图

(据 1:100 万重庆市水文地质图)

Fig. 2 Geologic map of the Wentangxia in Chongqing

1. 下三叠统嘉陵江组;2. 中三叠统雷口坡组;3. 上三叠统须家河组;4. 下侏罗统自流井组;5. 中侏罗统沙溪庙组;6. 下侏罗统遂宁组;7. 取样点;8. 河流

个泉点位于嘉陵家右岸深切峡谷内,出露地层为上三叠统须家河组砂岩;青木关(CQ3)和驷公桥(CQ4)两个泉点位于青木关镇,出露岩层为下三叠统嘉陵江组灰岩地层,其中CQ4泉点位于青木溪旁一洗衣池边。

2 样品采集与分析方法

2.1 野外测定

2009年8月中旬,在云南小江断裂带和重庆市温塘峡背斜一共选取9个温泉点(其中小江断裂带5个,编号为YN1、YN2、YN3、YN4、YN5;温塘峡背斜4个,分别标记为CQ1、CQ2、CQ3、CQ4)进行水化学分析。现场测量各泉点水温(T)、pH、电导率(Ec)、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 。温度、pH值和电导率用美国Hach公司便携式水质分析仪测定,其精度分别为0.1℃、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0.1mmol/L和2mg/L。

2.2 样品采集和实验室分析

采样前,用水样润洗取样瓶3~4次,现场用直径50mm,0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤水样后,存储于500mL聚乙烯样品瓶中,立即放入便携式冰袋保存,12h内运至室内4℃冷藏,用于水中阴离子检测;另取过滤后水样装于事先用1:1的 HNO_3 溶液清洗过的50mL聚乙烯取样瓶中,立即加1:1优级纯硝酸溶液5~8滴,调节pH值<2,12h内运至室内4℃冷藏,用于水中阳离子检测。采样结束立即返回实验室进行样品测试。 Cl^- 使用 AgNO_3 滴定法

(0.1mg/L), SO_4^{2-} 测定采用紫外分光光度计(0.01mg/L);阳离子用ICP-OES Optima 2100 DV测定(0.001mg/L)。上述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。

3 温泉水化学特征及其形成的岩性影响

3.1 温泉水化学特征

重庆温塘峡和云南小江断裂带温泉水化学分析结果如表1所示。由表1可以看出,所有样点泉水均表现为中性(pH在6.55~7.55之间),电导率也都比较高,除YN2外(585 $\mu\text{s}/\text{cm}$),均超过1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。此外,小江断裂带上出露温泉水温普遍较高,一般高出温塘峡背斜温泉10~25℃左右(YN2除外),这是因为小江断裂带上出露温泉循环深度比较大,而且大地热流背景值也比重庆地区高^[15-17]。YN2出露点位于两大断裂交汇处,可能自身循环深度较浅,且出露地层为灰岩地层,表层岩溶作用强烈,溶隙、裂隙发育,热水在向上运移过程中参入了大量的冷水,导致电导率和水温均较低。同样,CQ3、CQ4的水温也相对较低,可能也是因为其出露于灰岩地层,岩溶管道裂隙发育,向上运移至地表的过程中与浅层岩溶水混合所致,尤其CQ4泉点位于青木溪旁,由于溪水的混入,水温只有26.7℃。因此,可以推测YN2和温塘峡背斜温泉水-岩作用过程比较类似。此外,小江断裂带温泉向大气中释放着大量 CO_2 气体^[18],这是其水中 HCO_3^- 含量高的必然表现。

表1 研究区温泉水样分析数据

Tab.1 Analyzed data of water samples in the study area

研究区	取样点	编号	pH	EC/ $\mu\text{s}/\text{cm}$	T /℃	离子含量/mg/L								
						HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Sr^{2+}	SiO_2
温塘峡背斜	北温泉	CQ1	7.02	2390	35.9	185.6	1247.97	15.83	9.11	15.74	540.56	110.17	10.74	28.73
	水文站	CQ2	7.54	2710	33.9	152.5	1441.98	14.11	8.89	15.76	581.05	118.8	11.73	27.32
	青木关	CQ3	6.78	1842	29.5	244	1126.59	9.44	6.65	6.28	379.23	93.08	5.12	26.04
	驷公桥	CQ4	7.15	1320	26.7	292.8	749.95	8.76	3.98	4.88	301.07	80.01	4.25	21.49
小江断裂带	莲水澡堂村	YN1	6.73	1078	62.4	738.1	44.69	8.22	8.5	318.18	16.46	0.64	0.51	101.96
	莲水黄龙寺	YN2	7.12	585	25.9	420.9	18.87	3.77	1.09	1.45	121.01	28.45	0.08	9.99
	元阳南沙	YN3	7.55	1810	45.9	353.8	1401.61	45.23	14.69	244.03	257.35	30.31	2.91	89.4
	宜良汤池	YN4	6.55	1975	62.8	579.5	956.03	163.44	24.91	325.01	197.55	49.18	2.72	50.92
	宜良蓬莱	YN5	6.73	1606	47.9	225.7	826.72	7.09	6.42	92.56	255	44.5	—	69.92

水化学类型图^[19]能较好地反映了地下水水化学属性。图3是由表1得到的温泉水水化学类型图。在该水化学类型图上,重庆市温塘峡背斜出露的几个温泉位置很集中,都落在了D区,均属于SO₄-Ca(Mg)型水,而云南小江断裂带出露的温泉其在水化学类型图上的位置很分散,水化学差异较大,从图中可以看出,YN1为HCO₃-Na型水,YN2为HCO₃-Ca型水,YN3和YN5均为SO₄-Ca(Mg)水,YN4则属于SO₄-HCO₃-Na-Ca型水。

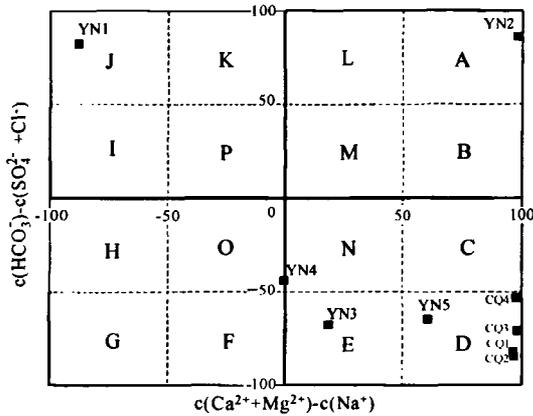


图3 研究区温泉水化学类型图(孙亚乔,2007)

Fig.3 Hydrochemic chart of water samples in the study area

3.2 岩性对水化学形成的影响

温泉水在地下运移过程中会与围岩发生水-岩作用,水中高含量的各种离子基本均来自其对围岩中各种矿物的溶解。因此围岩岩性在很大程度上影响着温泉水的化学特征。由表1可以看出,重庆市温塘峡背斜出露的温泉,水化学性质非常相近,水中各种离子含量相差并不大。其中,阳离子以Ca²⁺和Mg²⁺为主,占阳离子总量的98%左右,阴离子以SO₄²⁻和HCO₃⁻为主,同样占阴离子总量的98%左右。下三叠统嘉陵江组(T_{1j})地层是温塘峡温泉的主要储热含水层^[12,20],岩性主要为灰岩、白云质灰岩(含硬石膏层),因此,温泉中高含量的Ca²⁺、Mg²⁺和SO₄²⁻、HCO₃⁻无不与热水对围岩的溶蚀有关。对温塘峡背斜温泉水中SO₄²⁻和Ca²⁺、Mg²⁺做相关性分析,发现它们彼此间存在很高的相关性(图4),也说明了它们有相同的来源。然而,在分析HCO₃⁻和Ca²⁺、Mg²⁺的相关性时,却发现它们呈很高的反相关性(图5),其原因在于和围岩发生水-岩作用过程中,热水溶解了大量的硬石膏,产生大量的Ca²⁺、Mg²⁺,由于同离子效应的存在,在一定程度上抑制了CaCO₃和MgCO₃的溶解所引起。仔细查看表1中的数据,还发现温塘峡背斜温泉虽然水化学特征比较接近,但还

是有一些差别。CQ3和CQ4中各种离子(除HCO₃⁻外)以及水温均小于CQ1和CQ2,分析其原因为,CQ3和CQ4出露于下三叠统嘉陵江组(T_{1j})灰岩地层,表层岩溶作用十分强烈,岩溶管道、裂隙发育,导致温泉水中混入浅层岩溶水所致;至于CQ3和CQ4的HCO₃⁻含量相对较高,可能与青木关地区表层岩溶水中本身HCO₃⁻(>300 mg/L)较高有关。

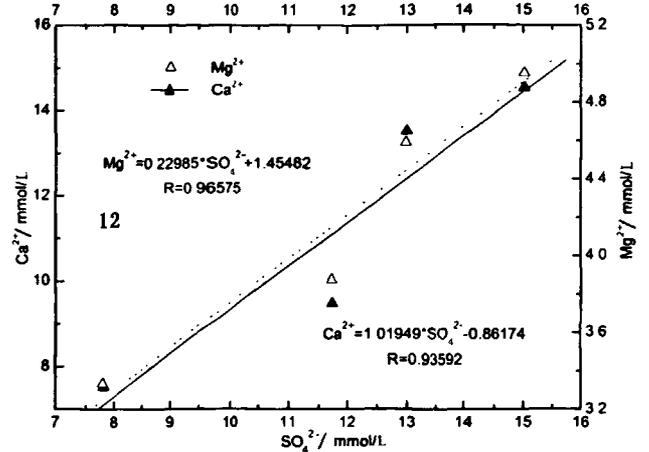


图4 温塘峡温泉SO₄²⁻与Ca²⁺和Mg²⁺的相关关系图

Fig.4 The correlativity of SO₄²⁻, Ca²⁺ and Mg²⁺ in the water samples from Wentangxia

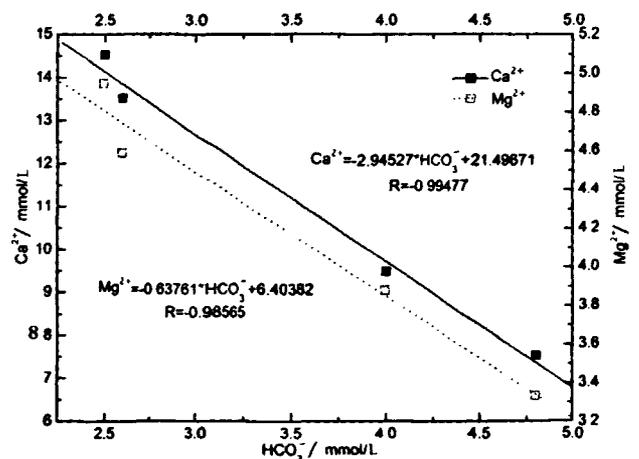


图5 温塘峡温泉HCO₃⁻与Ca²⁺和Mg²⁺的相关关系图

Fig.5 The correlativity of HCO₃⁻, Ca²⁺ and Mg²⁺ in the water samples from Wentangxia

表1中显示,云南小江断裂带温泉水中各种离子含量差异较大。YN1位于建水县以北,曲江盆地边缘,“山”字型构造的转折端,受曲江隐伏断裂控制,出露地层为震旦系澄江组紫红色长石砂岩(Z_{1c}),热水在沿断裂裂隙向上运移过程中,溶解了来自深部的CO₂,并与围岩发生水-岩作用,溶解了围岩中的钠长石,导致水中HCO₃⁻和Na⁺含量比较高。YN2出

露在中泥盆统东岗岭组(D₂d)灰岩地层中,位于小江断裂南段和近东西向建水断裂的交汇处,泉口有CO₂逸出,热水在沿断裂运移至地表过程中溶蚀周围的碳酸盐岩致使水中主要离子为HCO₃⁻和Ca²⁺,水化学类型表现为HCO₃-Ca型。由于位于断裂交汇处,加之灰岩地层岩溶裂隙、管道发育,有浅层冷水的混入,导致其水温并不是很高。YN3中HCO₃⁻、Ca²⁺和Na⁺的含量均比较高,主要受到出露地层岩性的控制,即该泉的围岩主要为下元古界哀牢山群阿龙组上亚组大理岩夹斜长角闪岩透辉角闪斜长变粒岩和下亚组斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩等混合岩^[21],热水在地下运移过程中溶解了围岩中的方解石和钠长石,导致了水中HCO₃⁻、Ca²⁺和Na⁺含量均较高。YN4出露在上震旦统灯影组(Z₃d)白云岩地层中,中间夹杂有硅质条纹和条带,并存在石盐假晶^[21],HCO₃⁻和Ca²⁺来自于白云岩的溶解,而水中较高的Cl⁻主要来自于热水对石盐假晶的溶解。该泉水中的Na⁺除来自石盐溶解外,还来源于硅酸盐矿物的溶解,以至泉水中的Na⁺含量要明显高于Cl⁻。YN5出露在第四纪地层中,其下覆岩层为下泥盆系和志留系灰岩和白云质灰岩,热水在运移过程中水-岩作用主要表现为对灰岩的溶解,导致水中的HCO₃⁻和Ca²⁺的含量比较高。此外,YN3、YN4和YN5中均含有很高的SO₄²⁻,对其出露点所在区域地质背景考察,发现有第三系褐煤地层广泛分布^[22],因此SO₄²⁻可能来自于褐煤中硫化物的氧化。

4 水-岩平衡状态分析与热储温度计算

4.1 Na-K-Mg 图解

图6显示的是研究区热水样品在Giggenbach(1988)提出的热水Na-K-Mg图解模型中的分布情况,此图解广泛应用于评价地下热水的水-岩平衡状态^[23-25]。图6表明,所有泉点样品均分布在完全平衡线以下,即所有泉点热水均未达到水-岩作用平衡状态,可能热水在向上运移过程中均受到了不同程度的浅层地下水的混合作用影响。然而,由图6可以看出YN1已经比较接近完全平衡线,表明它比其它几个泉点热水更接近水-岩平衡状态,水的成熟度更高,受到冷水混入的影响较小,更接近深部储水层的热水特征。图中YN1所处位置对应的热储平衡温度为100~120℃,此温度与SiO₂温标计算出来的热储温度(表2)偏低,但相差不大。其他泉点热水均远离

水-岩平衡状态,属于未成熟水,可能是因为这些泉点在向上运移过程中,均有流经碳酸盐岩地层,受到浅层冷水混入影响较大。

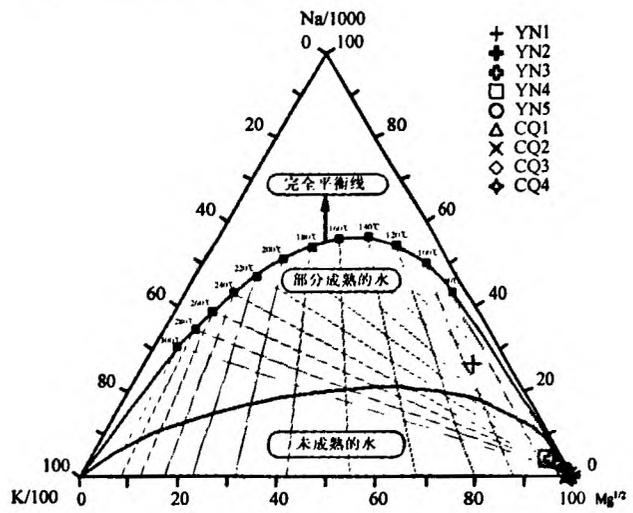


图6 Na-K-Mg图解

(据Giggenbach(1988)修改)

Fig. 6 Na-K-Mg diagram (Giggenbach, 1988)

表2 各泉点的热储温度计算值(t/°C)

Tab. 2 The geothermal reservoir temperatures of each hot spring (t/°C)

地点	泉口实测温度	石英温标 ¹	石英温标 ²	石英温标 ³	热储温度范围
建水澡堂村	62.4	138.44	138.28	133.63	133~139
建水黄龙寺	25.9	37.65	39.23	47.24	37~48
南沙温泉	45.9	131.19	131.03	127.52	127~132
宜良汤池	62.8	103.06	102.66	103.29	102~104
宜良蓬莱	47.9	118.37	118.13	116.57	116~119
北温泉	35.9	78.13	77.63	81.49	77~82
水文站	33.9	76.07	75.59	79.69	76~80
青木关	29.5	74.12	73.66	78.00	73~78
骊公桥	26.7	66.46	66.17	71.37	66~72

* ¹Fournier and Potter (1982)^[27], ^{2,3}Fournier(1977)^[28].

4.2 Na-K-Mg-Ca 图解

另一个基于阳离子比率来反映水-岩作用平衡的图解模型是Giggenbach(1988)提出的Na-K-Mg-Ca图解。图7是基于本研究水化学资料计算得到的Na-K-Mg-Ca图解,图上显示的是所有热水样品中10Mg²⁺/(10Mg²⁺+Ca²⁺)与10K⁺/(10K⁺+Na⁺)的关系。

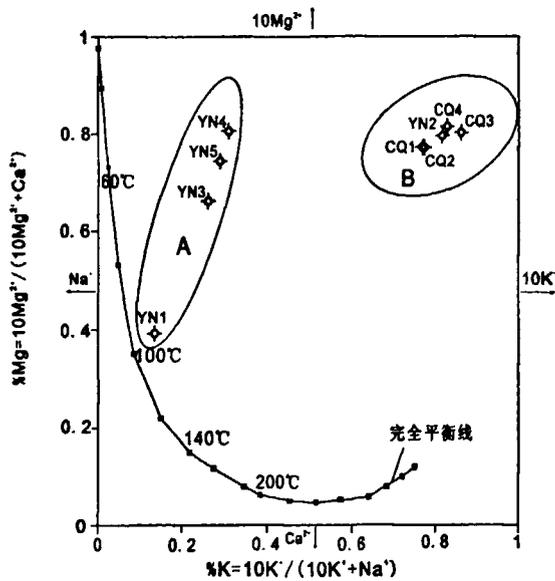


图7 Na-K-Mg-Ca 图解
(据 Giggenbach(1988)修改)

Fig. 7 Na-K-Mg-Ca diagram (Giggenbach, 1988)

与图6一样,图7同样显示没有一件热水样品达到水-岩作用平衡状态。但是仔细观察该Na-K-Mg-Ca图解,可以看到YN1非常接近完全平衡线,接近水-岩作用平衡状态,这点与图6反映的信息是一致的,且其对应的热储平衡温度为110℃左右,与图6中显示的热储温度和SiO₂温标计算的结果(表2)同样比较接近。而其它泉点也表现的与图6中一样,均远离完全平衡线。另外,仔细观察图7,不难发现所有样品分布于A、B两个区域,而且分布于A区域中的4个样品的 $[10K^+/(10K^++Na^+)]$ (0.13~0.31)的变化没有 $[10Mg^{2+}/(10Mg^{2+}+Ca^{2+})]$ (0.39~0.81)的大,分析可能是因为热水中K/Na受到系统中溶解、沉积过程的影响没有那么强烈。而Mg和Ca的来源比较广泛(尤其像碳酸盐矿物),更容易受到系统中溶解和沉积过程的影响^[26]。B区域中的5个样品其 $[10K^+/(10K^++Na^+)]$ 变化(0.76~0.86)和 $[10Mg^{2+}/(10Mg^{2+}+Ca^{2+})]$ 变化(0.77~0.82)都不大,可能是由于这5个样品点热水储层均为灰岩地层,尤其是温塘峡背斜的4个样品,地质背景条件基本相同,物质来源基本一致,所以表现出Mg/Ca相对比较稳定,从而再次证明了YN2和温塘峡背斜温泉水-岩作用过程比较接近。

5 结论

通过对云南小江断裂带和重庆市温塘峡背斜的

温塘峡背斜温泉水化学特征进行对比研究,可以得出以下结论:

(1)温塘峡背斜温泉水化学类型均为SO₄-Ca(Mg)型,所含物质基本相同,地质背景也基本一致,因此它们有着相同的物质来源和相似的循环运移过程。

(2)云南小江断裂带温泉水化学类型差异较大,建水澡堂村为HCO₃-Na型,建水黄龙寺为HCO₃-Ca型,元阳南沙和宜良蓬莱均为SO₄-Ca(Mg)型,而宜良汤池为SO₄-HCO₃-Na-Ca型,这主要决定于小江断裂带复杂的地质背景。

(3)通过Na-K-Mg图解和Na-K-Mg-Ca图解模型的研究表明,所有样品均未达到水-岩平衡,属于未成熟水,只有建水澡堂村温泉接近水-岩平衡状态。

(4)通过SiO₂温标计算出建水澡堂村热储温度在133~139℃范围内,与Na-K-Mg和Na-K-Mg-Ca图解模型反映的热储温度相差不大,进一步证明了建水澡堂村温泉水成熟度更高,接近平衡状态。

(5)由水化学分析结果以及Na-K-Mg-Ca图解分析得出,温塘峡背斜和小江建水黄龙寺温泉水-岩作用过程比较类似,且其水温均较低,是因为这几个样点出露地层岩溶作用强烈,裂隙、管道发育,热水在向上运移的过程中混合了表层冷水所致。

致 谢:感谢西南大学同位素实验室和水化学分析室的老师和同学们的帮助。

参考文献

- [1] Ellis A J, Mahon W A J. Geochemistry and geothermal systems [M]. New York. Academic Press, 1977: 1-52.
- [2] Giggenbach W F 1993. Reply to comment by P. Blattner. "Andesitic water": A Phantom of Isotopic Evolution of Water Silicate System[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 120: 519-522.
- [3] 刘文辉,胡雪生,刑宪生. 咸阳市区地下热水特征[J]. 陕西地质, 1998, 17(2): 49-56.
- [4] 刘再华,袁道先,何师意,等. 地热CO₂-水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及其CO₂来源——以四川黄龙沟、康定和云南中甸下给为例[J]. 中国科学(D辑), 2000, 17(2): 209-214.
- [5] 刘久荣,潘小平,杨亚军,等. 北京城区地热田某地热井热水地球化学研究[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 318-321.
- [6] 李坪. 鲜水河—小江断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 1-21.
- [7] 朱炎铭,邵震杰,任文忠,等. 小江断裂带第三纪走滑断陷盆地的充填层序特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 37-42.
- [8] 陈默香,汪集昭,邓孝. 中国地热系统类型图及其简要说明[J]. 地质科学, 1996, 31(2): 114-120.
- [9] 陈默香,邓孝. 中国地下热水分布之特点及属性[J]. 第四纪研

- 究,1996,(2),131-136.
- [10] 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).
- [11] 成都地质学院水文地质72级联队.观音峡、温塘峡两背斜青木关地区的暗河水及其开发[J].成都理工大学学报:自然科学版,1975(Z1),68-78.
- [12] 罗祥康,曾云松.论重庆地热——“热水库”.[C]第三次全国地热学术会议交流资料.
- [13] 重庆市北碚区地方志编撰委员会.北碚自然地理[M].重庆:西南师范大学出版社,1986:1-42.
- [14] 罗菊菊,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.
- [15] 徐青,李翠华,汪缙安,等.云南地热资源——以腾冲地区为重点进行解剖[J].地质地球化学,1997,(4),77-84.
- [16] 汪缙安,徐青,张文仁.云南省大地热流及地热地质问题[J].地震地质,1990,12(4),367-378.
- [17] 胡圣标,何丽娟,汪集旸/.中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J].地球物理学报,2001,44(5),611-626.
- [18] 赵柯,姜光辉,杨炎,等.滇东主要断裂带温泉CO₂成因浅析[J].地球与环境,2005,33(2),11-15.
- [19] 孙亚乔,钱会,张黎,等.基于矩形图的天然水化学分类和水化学规律研究[J].地球科学与环境学报,2007,29(1),75-79.
- [20] 肖琼,沈立成,袁道先,等.利用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 示踪重庆都市圈地下水循环过程[J].重庆大学学报,2011.
- [21] 云南省地质矿产局.云南省地质志[M].北京:地质出版社,1990:5-135.
- [22] 李瑞生,顾谷声.中国的含煤地层[M].北京:地质出版社,1994:199-203.
- [23] 郑西来,刘鸿俊.地热温标中的水-岩平衡研究[J].西安地质学院学报,1996,18(1),74-79.
- [24] 王莹,周训,于漫,等.应用地热温标估算地下热储温度[J].现代地质,2007,21(4),605-612.
- [25] 苗慧婷.云南省下关温泉和安宁温泉的特征及成因研究[D].2009:43-54.
- [26] Yildiray P, Umran S. Geochemical assessment of Simav geothermal field, turkey [J]. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2008, 25(3), 408-425.
- [27] Fournier R O, Potter R W. II, A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geotherm. Resour. Counc., 1982, 11-10, 3-12.
- [28] Fournier R O. Chemical geothermometers and mixing model for geothermal systems. Geothermics, 1977, 5, 41-50.

Hydrogeochemical features of hot spring under water-rock processes of different geologic conditions—A case in the Wentangxia hot spring of Chongqing and the hot spring at Xiaojiang fault zone of the East Yunnan

YANG Lei, XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, WU Kun-yu

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Taking the Wentangxia hot springs in Chongqing and the hot springs at Xiaojiang fault zone in the East Yunnan as the research object, the hydrogeochemic features are studied in the paper. It is found that the hydrogeochemic features of the hot springs outcrop from Wentangxia anticline are similar because of the same geologic backgrounds, and their hydrochemistry types are SO₄-Ca (Mg); but that the hydrochemic features of the thermal water outcrop from Xiaojiang fault zone are quiet different for their difference of geologic conditions, their hydrochemistry types are HCO₃-Na(YN1), HCO₃-Ca(YN2), SO₄-Ca(YN3 and YN5) and SO₄-HCO₃-Ca-Na(YN4). In addition, the Na-K-Mg diagram model and the Na-K-Mg-Ca diagram model evidently shows that all of the water samples have not reached equilibrium between water and rock, and only YN1 is closest to the complete equilibrium line to be close to equilibrium state. Moreover, the temperatures calculated with the silica geothermometer indicates a geothermal reservoir at 133~139 °C, which is similar to the geothermal reservoir temperatures of YN1 showed by Na-K-Mg diagram and Na-K-Mg-Ca diagram (100~120 °C). The analysis on hydrochemistry and Na-K-Mg-Ca diagram shows the water-rock process of YN2 is similar to the hot springs outcrop from Wentangxia anticline.

Key words: hot spring; hydrogeochemical feature; Wentangxia anticline; Xiaojiang fault zone