

文章编号: 1001-4810(2009)04-0385-06

重庆北温泉水化学特征对汶川8.0级地震的响应^①

肖琼¹, 沈立成¹, 袁道先^{1,2}, 贺秋芳¹, 王翔宇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 北碚 400715;

2. 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 2008年5月1日至7月4日汶川8.0级地震前后, 对距震中约400 km的重庆北温泉7个泉点进行采样监测, 发现其水温、水量及水化学特征均发生了较大变化: (1) 所有泉点震后水温都下降了1℃左右; (2) 海拔相对较高的BWQ-2、BWQ-3、BWQ-4泉点相继断流, 而下游海拔较低的BWQ-1泉点水量则增加了15 L/s, BWQ-6泉点水量也有所增加; (3) 海拔较低泉点泉水中K⁺、Na⁺、Ca²⁺浓度减少, Mg²⁺浓度增大, 且K⁺、Na⁺、Ca²⁺浓度呈正相关; Fe²⁺、Mn²⁺浓度于地震当日成倍增长, 随后逐渐减小, 7月4日时浓度与5月1日相当; SO₄²⁻、F⁻浓度增大后逐渐减少。引起北温泉水物理化学变化的主因是: 由于汶川强烈地震, 导致北温泉区上覆盖层裂隙与下伏温泉含水层裂隙贯通, 地表或上覆盖层低温水汇入含水层所致。

关键词: 汶川大地震; 温泉; 水量; 水温; 水化学; 重庆

中图分类号: P641.3; P314.1 **文献标识码:** A

0 前言

2008年5月12日14时28分, 四川东部龙门山构造带汶川附近发生了8.0级强烈地震。此次地震对四川省和邻近省市造成灾难性破坏, 影响波及全国大部分地区乃至境外, 是新中国建立以来我国大陆发生的破坏性最为严重的地震。由于印度板块与欧亚大陆碰撞及其向北的推挤, 导致了亚洲大陆内部大规模的构造变形, 造成了青藏高原的地壳缩短、地貌隆升和向东挤出。青藏高原在向东北方向运动的过程中, 于四川盆地一带遭到华南活动地块的强烈阻挡, 使得应力在龙门山推覆构造带上高度积累, 以至于沿映秀—北川断裂突然发生错动, 产生8.0级强烈地震。

近年来, 国内外学者对地震引起地下流体同震响应的现象进行了大量的研究^[1~5], 特别是水位对远场大震的同震响应(多表现为水震波)研究。他们的研究结果表明, 地下水对地壳应变(crustal strain)或者地

震波(seismic waves)的变化具有高度的敏感性(King, 1986; Thomas, 1988; Igarashi and Wakita, 1995)。地下水化学变化反映了不同的地质、地热以及构造背景。本文拟对2008年5月12日汶川8.0级地震前后重庆北温泉(距震中400 km)水质水量进行监测, 并结合研究区的地质背景, 探讨北温泉水对远场地震的响应。

1 研究区概况

重庆市位于四川盆地东部与中部的接壤地带, 离汶川县城东南方向约400 km。受汶川地震影响, 重庆市地震烈度为5度。重庆市北温泉位于北碚区城北郊缙云山下, 距重庆市区52 km, 距汶川震中约452 km。北温泉泉点均自然出露在嘉陵江干流深切的峡谷中, 处于呈NNE向延伸的东陡西缓轴部开阔的温塘峡不对称箱状背斜核部倾没段, 节理裂隙发育, 同时发育

① 基金项目: 重庆市科委院士专项(CSTC2007BC7001)、国家自然科学基金(40672165)、重庆市科技项目(CSTC, 2005AB7006)、教育部博士点基金(20050635001)、西南大学博士基金(SWUB2008013)

第一作者简介: 肖琼(1984—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为第四纪地质学。E-mail: xiaoqiong-8423@163.com.

通讯作者: 沈立成, 西南大学副教授。E-mail: xqimei@swu.edu.cn.

收稿日期: 2008-12-04

有青木关断层,青木关断层是压扭性逆冲断层,位于温塘峡背斜核部,北东向延伸长 30 km,倾向为北西向,倾角 $35^{\circ}\sim 80^{\circ}$,切穿嘉陵江组和须家河组地层^[6,7]。北温泉水含水地层包括以白质灰岩和石膏盐岩为主的雷口坡组(T_2l)和以角砾状白云质灰岩、灰岩、石膏盐岩等为主的嘉陵江组(T_{1j}) (深埋地下 600~1 000 m)。雷口坡组和嘉陵江组碳酸盐岩之上是三叠统须家河组(T_3xj)砂、页岩,为含水岩层的

盖层,起着隔水、保温作用。北温泉景区内主要分布有 7 个泉点(图 1),其中 BWQ-2, BWQ-3, BWQ-4, BWQ-5 出露的海拔高程为 252 m, BWQ-1, BWQ-6, BWQ-7 为 240 m。北温泉的水温主要来自地热增温,水质与嘉陵江组和雷口坡组的石膏层及碳酸盐岩有关^[6~10]。本区属亚热带季风气候,年降雨量为 1 087 mm,年均气温 18°C ^[8]。

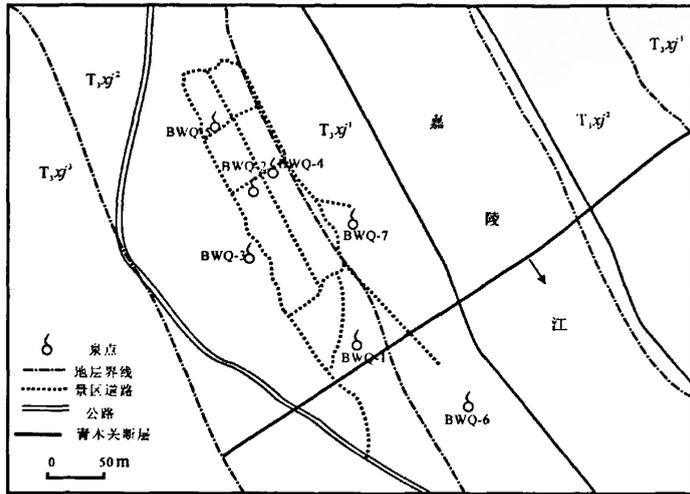


图 1 北温泉泉点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the distribution of spring spots in Beiwenquan

2 样品及分析方法

2.1 野外测定

2008年5月1日至7月4日对北温泉7处泉点观测5次(断流泉点除外),泉点包括BWQ-1(大游泳池)、BWQ-2(接引殿前1号)、BWQ-3(半月池,温泉水流入池内,池水为温泉水囤积和雨天降水混合)、BWQ-4(接引殿前2号)、BWQ-5(水井,温泉水囤积,水用于北温泉公园建设工地)、BWQ-6(水文站,水流出后引入康乐温泉度假村)、BWQ-7(乳花洞,洞内沉积有钙华,水量较小)。现场测量水温、pH、电导率(E_c)、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 。温度、pH值和电导采用美国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 1us/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 。

北温泉7个泉点位置和流量不同,其中BWQ-1为主要出水口,日出水量达 $2\,000\text{m}^3$ 以上,是北温泉旅游开发的水源地,也是本文水量水质的主要观测点。在BWQ-1处安装马歇尔槽和明渠流量计,用于监测温

泉水流量,并同时使用流速仪对所测数据进行校正。马歇尔槽修建和水量监测由北温泉旅游开发公司完成。水位超过仪器量程时,人工测量水位并计算水量。

2.2 样品的采集和室内分析

室内分析项目包括对水中阳离子和阴离子浓度的分析。

使用洁净采样瓶,润洗两次后采集600 ml左右水样,用于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 的测定;同时洁净采样瓶另取50 ml水样,并加入 HNO_3 防止金属离子吸附,用于 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和其他微量元素的测定。 Cl^- 使用 AgNO_3 滴定法(0.1mg/L), SO_4^{2-} 的测定采用 BaSO_4 比浊法(0.01mg/L), K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和其他微量元素采用ICP-OES Optima 2100 DV测定(0.001mg/L)。所有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 结果与讨论

3.1 温度与水量变化

震前BWQ-1水位保持在 $30\sim 32\text{cm}$,流量常年稳

定在 2 400 m³/d。地震后,由于水位高度超过 33 cm,明渠流量计不能直接测出水位高度,因此由人工进行水位测量计算。地震前后温泉水温水量变化如图 2 所示。

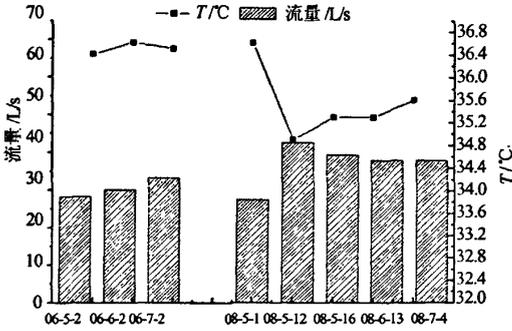


图2 BWQ-1 温泉水温流量的动态变化

Fig. 2 Regime in temperature and discharge of BWQ-1

注:文中06年数据来源于曹云硕士毕业论文

图2显示了06年5月到7月以及地震后两个月内BWQ-1的水温水量变化^[9]。5月12日下午2点28分,震后BWQ-1水量增大到19 L/s,达42.797 L/s。随后水流量回落,5月16日水流量为39.526 L/s,至6月13日水流量趋于稳定,但与震前相比仍然大15 L/s左右。同时,温度也发生相应变化:震前BWQ-1水温基本保持 36.5℃左右,5月12日下降到 34.9℃,然后慢慢回升,至6月13日稳定在 35.6℃,水温下降了约 1℃。其余各泉点温度除BWQ-7(位于洞内)外也均降低 1℃(图3)。

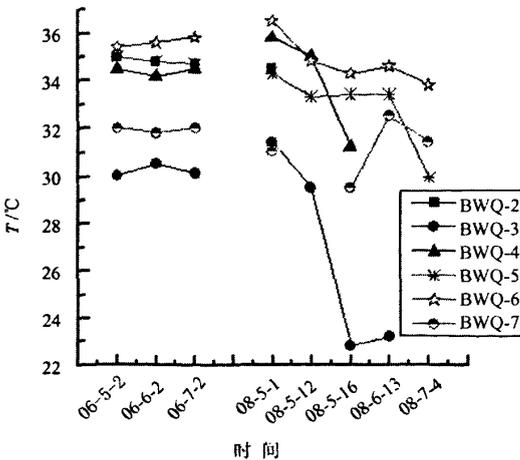


图3 重庆北温泉各泉点温度现场测定指标

Fig. 3 The field testing water temperature in hot springs

除了BWQ-1外,BWQ-5,BWQ-7水量也有所增

加。图4是可以监测的部分泉点流量变化情况。从该图可以看出,地震后BWQ-2立即断流,BWQ-4于5月16日断流。BWQ-3出水口位于一水池底部,是水池的唯一水源,地震前水池水温为31℃左右,地震后水温开始下降,到6月13日仅为23.2℃。与此同时,水池水位也明显下降,由此推断,BWQ-3在震后接近断流。BWQ-5为一水井,变化不明显。

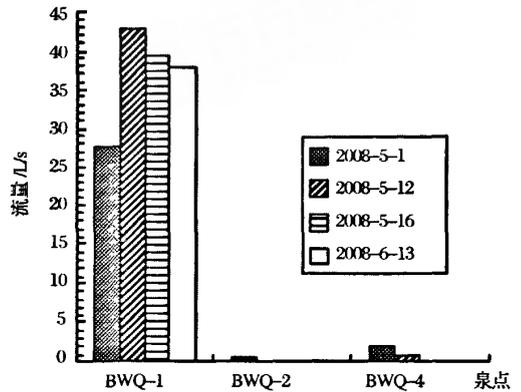


图4 部分泉点流量变化图

Fig. 4 The discharge of some springs

从震后BWQ-2、BWQ-3、BWQ-4相继断流情况来看,BWQ-1、BWQ-6、BWQ-7等水点震后流量的增加,可能是由于地震破坏作用,上游地下水流路径改变而直接补给该3个泉点所致;也可能是因为北温泉区域及其顶部均为须家河组砂岩,小构造发育,裂隙纵多,在地震作用下,这些裂隙与下伏嘉陵江组碳酸盐岩含水层贯通,砂岩裂隙水沿裂隙进入嘉陵江组碳酸盐岩含水层中所引起。BWQ-1水温和水量的负相关性(图5)也明显地暗示震后BWQ-1有低温外源水汇入。

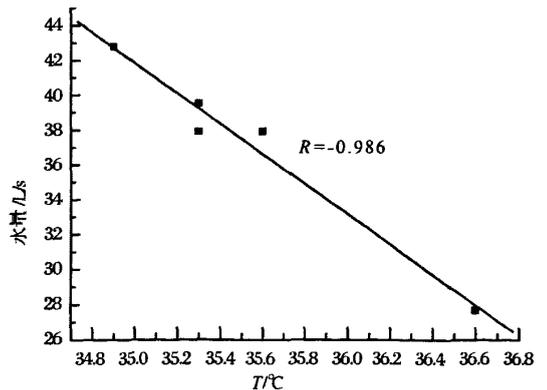


图5 震后流量温度相关关系

Fig. 5 Correlations between discharge and temperature of Beiwenguan after the earthquake

3.2 水化学特征变化

由于BWQ-2、BWQ-3、BWQ-4 断流,而在未断流的4个泉点中,因为BWQ-5 为水井,温泉水囤积不具有代表性,BWQ-7 位于洞中且水量很小,地震时洞内因垮塌不便取样,BWQ6 取样点离自然出口较远,所以本文水化学仅分析BWQ-1 泉点。

3.2.1 水化学类型分析

图6 中是北温泉的水质类型图。由图6 可见,北温泉阴离子主要以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主,阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,水化学类型为 SO_4-Ca 型。pH 值接近于中性。

3.2.2 阳离子浓度的变化

表2 为5月1日至7月4日近两个月5次对北温泉最大出水口——温泉游泳池(BWQ-1)和温泉附近砂岩泉水阴阳离子的检测和对比(表1)。

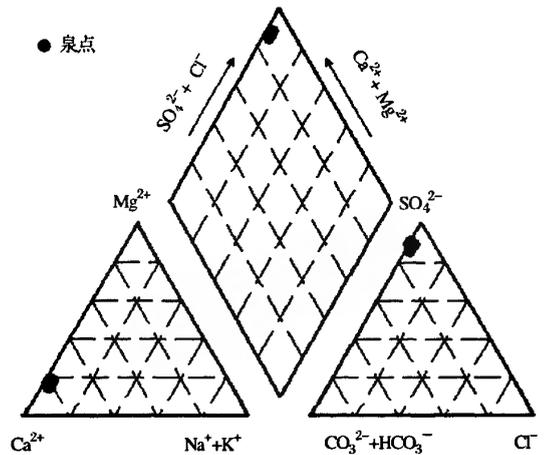


图6 北温泉水化学类型图

Fig. 6 Diagram of hydrochemical type in the Beiwenguan

表1 重庆北温泉大游泳池及其附近砂岩泉水水化学对比

Tab. 1 Comparison of hydrochemical features between the waters from the swimming pool of Beiwenguan and the cold springs in sandstone adjacent to the swimming pool in Chongqing

泉点	pH	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mn	Fe	
		mmol/L	mg/L								
大游泳池	2008-5-1	6.96	2.9	1366.90	1.16	7.25	12.60	96.52	544.06	0.0304	0.1518
	2008-5-12	6.43	2.8	1429.07	1.135	7.60	14.30	96.54	539.27	0.1137	2.1140
	2008-5-16	6.85	2.8	1471.71	0.87	7.24	12.93	98.69	538.62	0.0590	0.8837
	2008-6-13	6.96	2.8	1425.89	0.80	4.07	4.81	104.78	498.69	0.0336	0.1557
	2008-7-4	6.98	2.5	1323.22	0.545	4.02	4.32	112.058	472.10	0.0350	0.1485
砂岩泉水(月均值)	6.52	0.5	37.27	0.10	3.25	4.06	5.83	13.23	0.004	0.0135	

由表1 可以看出:

(1) K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 在地震期间变化不大,但6月13日和7月4日的监测数据表明,在地震一个月后, K^+ 下降了3 mg/L、 Na^+ 离子下降了8 mg/L; Ca^{2+} 浓度由544 mg/L 下降至472 mg/L。分析发现 K^+ 、 Na^+ 浓度之和与 Ca^{2+} 浓度的变化正相关,相关系数 $R=$

0.950 3(图7),说明引起 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度变化的原因相同。前已述及温泉含水层接受上覆砂岩裂隙水的补给,裂隙水的 K^+ 、 Na^+ 浓度较为低,为3.25 mg/L 和4.06 mg/L, Ca^{2+} 浓度也小于20 mg/L。因此,外源水的进入应是造成 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度下降的主要原因。

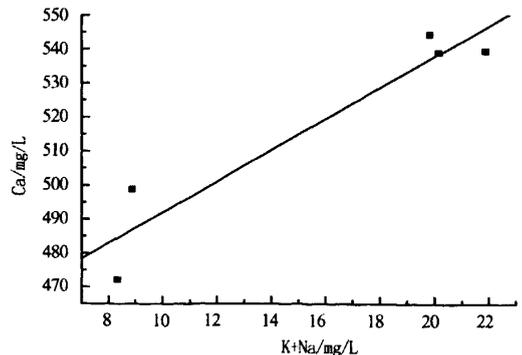
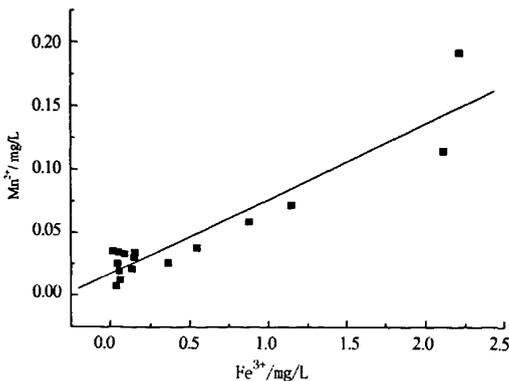


图7 各阳离子相关关系图

Fig. 7 Correlations of positive ions

然而,为什么 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度大幅度减小都是在地震后一个月,而地震后几天内 K^+ 、 Na^+ 浓度却基本不变, Ca^{2+} 浓度微弱减小?通过2005年一年北温泉水化学数据分析,得知温泉水水化学特征稳定,季节变化微弱^[9],北温泉水震后异常与季节变化无关。对2008年地震前后水中悬浮颗粒研究,发现地震前和震后一个月水中几乎无悬浮颗粒,而地震时水中悬浮颗粒达到130 mg/L,毫无疑义,这些悬浮颗粒应源自外源水,通过Nikon E600偏光显微镜观察发现,这些悬浮颗粒均主要为粘土矿物。我们知道,粘土矿物颗粒表面带负电荷,对阳离子有很强的吸附作用^[10],使得悬浮颗粒表面有相当数量的阳离子集结。地震时,这些表面吸附有一定数量阳离子的悬浮颗粒在重力作用下,通过裂隙管道进入含水层并随环境条件的改变发生解吸,从而导致含水层即使有外源水补给稀释,水中阳离子浓度还能基本保持不变。 K^+ 、 Na^+ 容易与硫酸钙水相互作用进入水体中^[10],所以 K^+ 、 Na^+ 浓度变化幅度比 Ca^{2+} 浓度大。到6月13日,随着悬浮颗粒含量的越来越少,外源水稀释作用逐渐显现,导致温泉水 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度降低。

(2) Mg^{2+} 地震后逐渐升高,7月4日达到峰值112 mg/L。北温泉水中 Mg^{2+} 主要来自背斜地下600 m~1 000 m深处含白云质灰岩、白云岩的嘉陵江组 and 雷口坡组地层。这些岩石中Mg存在的主要形式是 $MgCO_3$ 、 $Mg(OH)_2$ 。而在水-岩反应过程中, $MgCO_3$ 、 $Mg(OH)_2$ 的离解量与温度直接相关,随着温度的降低其离解量将逐步增加^[11]。地震后北温泉水温度平均下降1℃,由此造成 $MgCO_3$ 、 $Mg(OH)_2$ 离解量的增大,故水中 Mg^{2+} 含量增大。地下水中 Mg^{2+} 的含量除了受岩性、温度条件制约外,还与水-岩作用表面大小有关。在地震作用下岩石裂隙增多,比表面增大,增加了岩石表面 Mg^{2+} 的离解。

(3)Fe含量在震后增大了15倍,Mn含量也增大了4倍左右,随后开始逐渐下降,到7月4日,基本达到地震前的浓度。两种离子的变化正相关,相关系数 $R=0.99749$ (图7),说明在此温泉水中,Fe、Mn离子浓度产生变化的原因是相同的^[12]。北温泉属于硫酸盐温泉,微量元素铁、锰含量比较少,但在地震当日两种离子成倍增长,造成此现象的原因与北温泉所在地的地质背景和铁锰的物化特征有关。地壳中的铁质多分散在各种岩浆岩和沉积岩及第四系地层中,锰的来源主要由岩石和矿物中锰的氧化物、硫化物、碳酸盐、硅酸盐等溶解提供^[13]。在重庆一带,侏罗系底部常见粘土岩、綦江式赤铁矿(又称之为“綦江段”^[7])。距研究区几百米为侏罗系和三叠系的分界线,分布有大量

的含赤铁矿的粘土岩,同时嘉陵江边也有很厚的第四系地层。所以,储存于表层裂隙或者孔隙水中的铁锰离子含量比温泉含水层中高得多。地震后温泉水中铁锰离子浓度大幅度上升,后又慢慢回落,表明受地震影响,确有上层裂隙水进入含水层,而后又因裂隙水补给不足而进入含水层的水量减少,铁锰离子的浓度又恢复原来水平。

3.2.3 阴离子的变化

地震后,北温泉水中 HCO_3^- 浓度变化不大,而 SO_4^{2-} 浓度先增加后逐渐减少, F^- 浓度持续减少。北温泉水中的 SO_4^{2-} 主要是地表水对流经的雷口坡组石膏层的溶解^[14]。所以, SO_4^{2-} 的变化与温泉水对雷口坡组石膏层的溶蚀有密切的关系。当外源水进入含水层产生稀释作用的同时,溶蚀作用也增强;又由于裂隙的增多,先前储存于裂隙或者其他孔隙中的高 SO_4^{2-} 含量的水,以活塞作用的方式推入含水层。地震时,在溶蚀作用、活塞作用、稀释作用的共同影响下, SO_4^{2-} 浓度增大;地震后,活塞作用减弱甚至消失, SO_4^{2-} 浓度逐渐减少。 F^- 浓度没有对应的先增大后减小,而是逐步减小,原因在于北温泉地区地表水中 F^- 浓度低,约为0.1 mg/L,经过实地调查确定北温泉流域内没有人为 F^- 污染源,也没有 F^- 来源地层。初步认为,北温泉含水层中的 F^- 来自地球深部,并怀疑 F^- 浓度的变化是由地震导致深部来源的变化和水量增加引起的稀释作用共同导致的。

4 结论

(1)北温泉水量和水温对5月12日汶川8.0级大地震响应强烈,地震发生后,7个泉点中海拔相对较高的BWQ-2、BWQ-3、BWQ-4三个泉点逐渐断流,BWQ-1水量增大了15 L/s,BWQ-6水量也有明显的增大。水量增大的同时,各泉点水温都下降了1℃。

(2)在水量和水温响应地震的同时,北温泉水水化学特征也发生了一系列的变化: K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度减少, Mg^{2+} 浓度增大,且 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度呈正相关; Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 浓度于地震当日成倍增长,随后逐渐减小,7月4日时浓度与5月1日相当; SO_4^{2-} 浓度增大后逐渐减少, F^- 浓度减小。各离子的变化与地震及北温泉地区的水文地质条件有关。

(3)地震导致北温泉砂岩盖层和含水层裂隙增多、增大,以致盖层裂隙与含水层裂隙贯通,地表或上覆盖层低温水汇入含水层,是引起北温泉水物理化学特性发生变化的主要原因。

致谢:感谢西南大学实验室老师和同学们以及审稿人员的辛勤劳动和帮助!

参考文献

- [1] 刘澜波,郑香媛,彭贵荣.地震波引起注里井水位振荡的初步分析[J].地震,1983(5):12-19.
- [2] 付子忠.地热动态观测与地热前兆[C].地壳构造与地壳应力文集,1988,1:1-7.
- [3] P. P. Iassonov, I. A. Beresnev. A model for enhanced fluid percolation in porous media by application of low-frequency elastic waves [J]. J Geophys Res, 2003, 108 (B3), doi: 10. 1029/2001JB000683.
- [4] D. R. Montgomery, M. Manga. Streamflow and water well responses to earthquakes [J]. Science, 2003, 300 (27): 2047-2049.
- [5] Chi-yuen Wang, Chung-ho Wang, Michael Manga. Coseismic release of water from mountainins; Evidence from the 1999 (Mw = 7. 5) Chi Chi [J]. Taiwan, earthquake. Geology, 2004, 32 (9): 769-772.
- [6] 胡克定.重庆市北温泉危岩带特征与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报, 1995, 6 (3): 57-62.
- [7] 重庆市1:5万区域水文地质报告[R].重庆市水文地质调查队, 2003.
- [8] 重庆市北碚区地方志编纂委员会.北碚自然地理[M].重庆:西南师范大学出版社, 1986:1-145.
- [9] 曹云.重庆市北温泉景区温泉和钙华的地球化学研究[D]. 2007:30-35.
- [10] K·E·比契叶娃,彭立红译.水文地球化学——地下水化学成分的形成[M].地质出版社,1981:102-108.
- [11] 章至洁,韩宝平,张月华.水文地质学基础[M].徐州:矿业大学出版社,1995.
- [12] Satoru Nishizawa, George Igarashi, Yuji Sano. Radon, Cl⁻ and SO₄²⁻ anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, central Japan. Applied Geochemistry, Vol. 13, pp: 89-94, 1998.
- [13] 沈照理.水文地球化学基础(试用本)[M].武汉:武汉地质学院, 1995.
- [14] 曹云.重庆市北温泉与四川康定温泉水之地球化学特征对比[J].中国岩溶,2007,25(2):112-120.

Response of the Beiwenquan hot spring's hydrochemical features in Chongqing to the Wenchuan earthquake of magnitude 8.0 in Sichuan

XIAO Qiong¹, SHEN Li-cheng¹, YUAN Dao-xian^{1,2}, HE Qiu-fang¹, WANG-Aoyu¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorge Reservoir Region's Eco-environment, Southwest University,

Chongqing 400715, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS & Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The Beiwenquan hot spring were continuously monitored from May 1 to July 4, 2008. It proves that the temperature and discharge as well as hydrochemistry have obvious response to the earthquake of magnitude 8.0 in Wenchuan. (1) After the earthquake, temperature of these springs all dropped about 1°C. (2) Three higher elevation springs BWQ-2, BWQ-3, BWQ-4 ceased to flow, but BWQ-1, being located lower, increased its discharge by nearly 50%, and BWQ-6's discharge also increased. (3) Concentration of K⁺, Na⁺, Ca²⁺ in those lower located hot springs reduced after the earthquake and has excellent linear correlation with the earthquake. But concentration of Mg²⁺ increased. Concentration of Fe²⁺, Mn²⁺ increased several fold on May 12 and decreased gradually thereafter. On July 4, the Concentration of Fe³⁺, Mn²⁺ was the same with May 1. Concentration of SO₄²⁻, F⁻ changed anomalously. It is believed that the variation of physicochemical properties in hot springs results from the mixture of cold waters from surface or from overlying aquifer mixed with the hot water of the spring because the fractures connected the upper or overlying aquifer with the hot spring after the earthquake.

Key words: Wenchuan earthquake; hot spring; water quantity; water temperature; hydrochemistry; Chongqing