

文章编号:1001-4810(2011)03-0248-05

# 5·12 汶川地震对黄龙世界遗产 地源泉水文地球化学的影响

## ——高分辨率和高精度的水文地球化学监测证据

刘再华<sup>1</sup>,王海静<sup>1</sup>,刘彦<sup>1</sup>,台永东<sup>2</sup>,付如贤<sup>2</sup>,汪孝萍<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 黄龙国家级风景名胜区管理局, 四川 松潘 623300)

**摘要:**2008年5月12日的汶川特大地震不仅造成了惨重的人员伤亡和巨大的经济损失,而且对当地生态环境产生了严重的影响。本文根据黄龙钙华景观退化的人为和自然影响机理研究获得的部分高分辨率和高精度水文地球化学监测数据分析发现,大地震通过诱导控制黄龙源泉的深源断裂活动对源泉的水文地球化学产生了显著影响,主要表现为地震后泉流量、水温、电导率和CO<sub>2</sub>分压升高,反映出地震增加了地下向地表的水、热、钙离子和CO<sub>2</sub>通量。然而,地震对从泉水中沉积的钙华景观的后续影响以及汶川地震造成深源CO<sub>2</sub>向大气CO<sub>2</sub>释放对全球碳循环的影响,有待进一步的监测评估。

**关键词:**汶川地震;水文地球化学响应;黄龙源泉;世界自然遗产

**中图分类号:**P592 **文献标识码:**A

## 0 引言

2008年5月12日的汶川特大地震不仅造成了惨重的人员伤亡和巨大的经济损失,而且对当地生态环境产生了严重的影响<sup>[1]</sup>。本文主要结合国家自然科学基金项目(“世界遗产—黄龙钙华景观退化的人为和自然影响机理研究”)获得的部分高分辨率和高精度水文地球化学监测数据,对5·12汶川特大地震对黄龙世界自然遗产地源泉水文地球化学的影响作进一步的分析,旨在为保护和修复不可再生的钙华景观资源等提供科学基础。

## 1 黄龙世界自然遗产地概况

黄龙位于川西北高原,阿坝藏族羌族自治州境内,属于青藏高原东部边缘向四川盆地的过渡地带,距离汶川地震震中<sup>[2]</sup>约200km(图1)。黄龙以其美

丽和独特的自然景观,尤其是其多彩的钙华景观被联合国教科文组织世界遗产委员会于1992年列入世界自然遗产名录。

黄龙沟钙华全长3.5km,南起望乡台(高程3658m),北至涪江河谷(高程3080m),主要沉积在志留系板岩、砂岩之上(图2)<sup>[3-4]</sup>。形成钙华的源泉水为典型的岩溶水,补给区岩层以泥盆—石炭系灰岩、白云岩为主。沟内年均气温1.1℃,降水较丰沛,达758.9mm/a,且集中在5—9月份,约占年降水量的70%,春涸夏盈,季节性强,属高原季风气候。雨、雪水在流经地下深处时溶解了大量的地球深部的CO<sub>2</sub>,增加了水对补给区可溶性碳酸盐岩的溶蚀能力,加之黄龙源泉(转花池泉群)稳定的水源补给,为黄龙钙华形成提供了丰厚的物质基础<sup>[3]</sup>。此外,在上游由雨水和融雪水混合形成的地表水和黄龙源泉一起构成了黄龙沟的主要水源。1号点黄龙源泉在流至2号点(五彩池处)一大部分转入地下,一小部分在3号点和地表融雪水及雨水混合,然后在中游又以二

基金项目:中国科学院百人计划项目、国家自然科学基金项目(编号40872168)

第一作者简介:刘再华(1963—),男,研究员,博士生导师。长期从事岩溶作用动力学与全球变化研究。E-mail:liuzaihua@vip.gyig.ac.cn.

收稿日期:2011-08-20

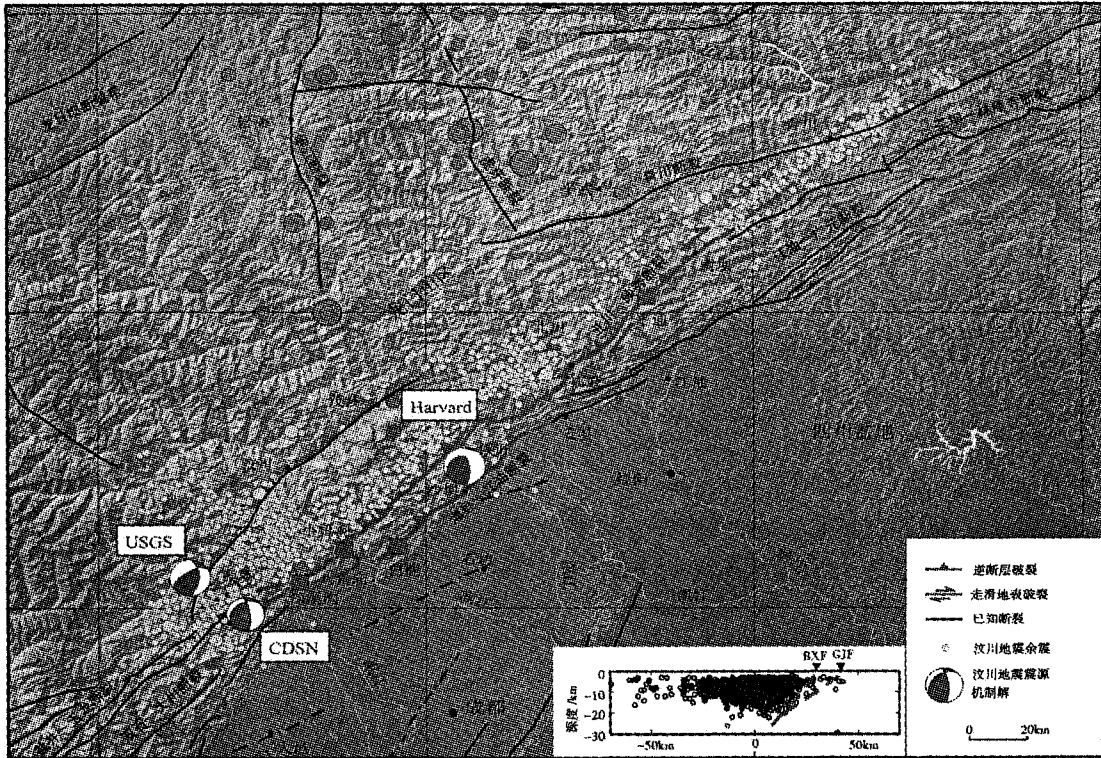


图 1 汶川地震区域地震构造、震中分布(据文献[2])及黄龙所在位置图

Fig. 1 Regional seismo-tectonics, distribution of historical earthquakes in Wenchuan earthquake region, and the location of the Huanglong World Natural Heritage Site

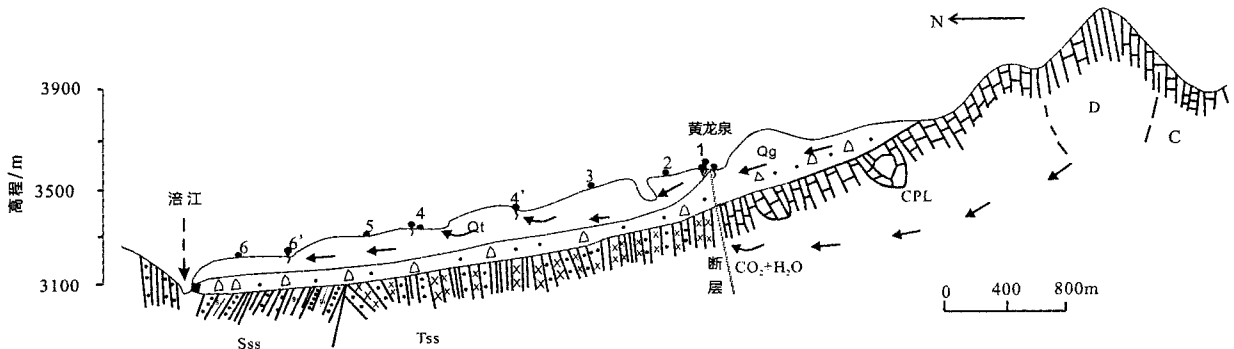


图 2 黄龙沟地质剖面图(含野外试验监测点 1—6)<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Geological section of the Huanglong Ravine

Q<sub>t</sub>/Q<sub>g</sub>—第四系钙华/冰碛砂及砾石; T—三叠系凝灰质砂岩、板岩和千枚岩; C+P—石炭—二叠系灰岩; D—泥盆系板岩夹灰岩; S—志留系硅质板岩夹砂岩; 1—6, 4', 6'—研究监测点

次转化泉(4'泉)的形式出露地表,形成 4 号点(争艳彩池)的主要水源,补给源水沿途多次在地表—地下间转化,直到 6 号点迎宾彩池(图 2)<sup>[3-4]</sup>才完全转化成为地表水。

## 2 研究方法和内容

主要采用仪器自动记录、现场滴定和样品室内测试相结合的方法进行研究。

自动记录使用澳大利亚 Greenspan 公司生产的 CDTP300 水文水化学多参数仪,自动记录降雨量、泉

水的水位、pH、温度和电导率,分辨率分别达到 0.5mm、0.001m、0.01pH 单位、0.01℃ 和 0.01μs/cm。数据采集间隔根据能够揭示参数的时间变化设定为 15 分钟。仪器在测量之前进行校正,其 pH 值用 4 和 7 两种标准缓冲溶液进行校正,而电导率用 1 412μs/cm 标准校正液校正。

现场滴定使用德国 Merck 公司生产的碱度计和硬度计测定水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>,其精度分别为 6mg/L 和 2mg/L。利用多次滴定结果可得到 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup> 与电导率的线性关系<sup>[4]</sup>。

水化学采样时间从 2008 年 5 月 10 日到 10 月 6

日。采样期间通常每半个月左右取一次样。用于水化学分析的水样带回环境地球化学国家重点实验室测定其  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  含量。水的方解石饱和指数 (SIc) 和  $CO_2$  分压 ( $pCO_2$ ) 的计算利用 WATSPEC 软件<sup>[5]</sup> 进行。计算至少需要 9 个参数, 它们是水温、pH、7 种主要离子 ( $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$ ) 的浓度。

### 3 5·12 汶川地震前后黄龙源泉水文和水化学的监测结果及其分析

#### 3.1 短时间尺度变化分析

5·12 汶川大地震开始于 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分。图 3 显示了地震前后 3 天黄龙源泉水短时间

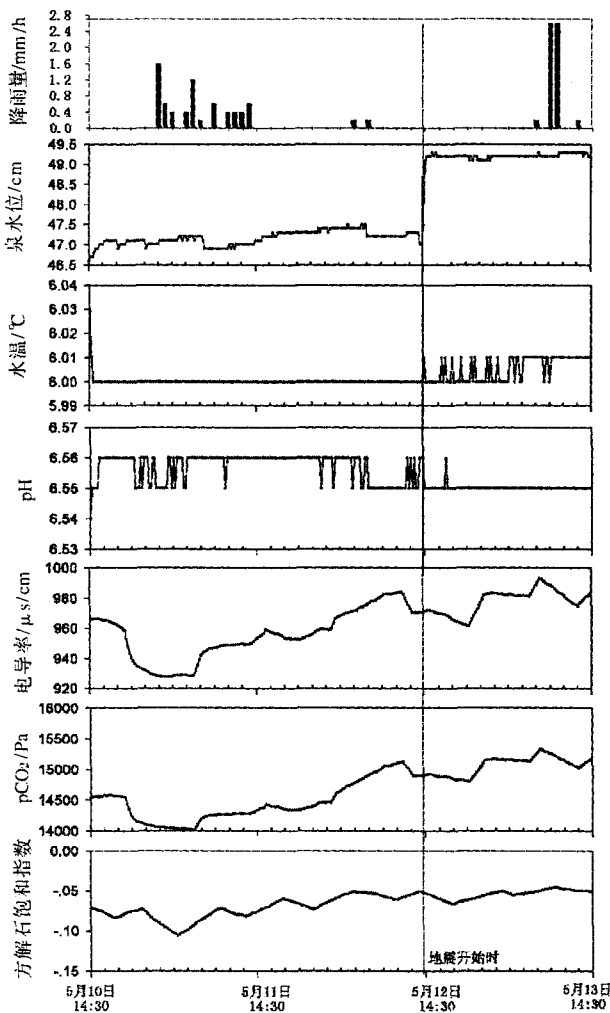


图 3 5·12 地震前后 3 天黄龙源泉水短时间尺度的水位、水温和水化学变化

Fig. 3 Three-day variations in water stage, temperature and hydrochemistry of the Huanglong source spring before and after the May-12 Wenchuan Earthquake

尺度的水位、水温和水化学变化。由图 3 可见, 泉水位变化几乎立刻响应地震, 在 14 : 30 左右即刻升高 2cm, 由 47cm 到 49cm, 反映了地震造成的地应力迅速增加的影响<sup>[6]</sup>; 同时, 水温升高 0. 01℃, 但仍然在仪器的分辨率范围之内。另一方面, 泉水  $CO_2$  分压  $pCO_2$ 、pH 值、电导率和方解石饱和指数在 14 : 30 左右未显示显著的变化, 反映了地震通过溶质传输对泉水化学的影响慢于地应力快速传输对泉水位的影响, 这在以下水文水化学的长时间尺度分析时将会更清晰地显现出来。

#### 3.2 长时间尺度变化分析

图 4 显示了地震后 5 个月的黄龙源泉水长时间尺度的水位、水温和水化学变化。由图 4 可见, 从长时间来看, 地震后泉水位在上述 5 月 12 日 14 : 30 左右

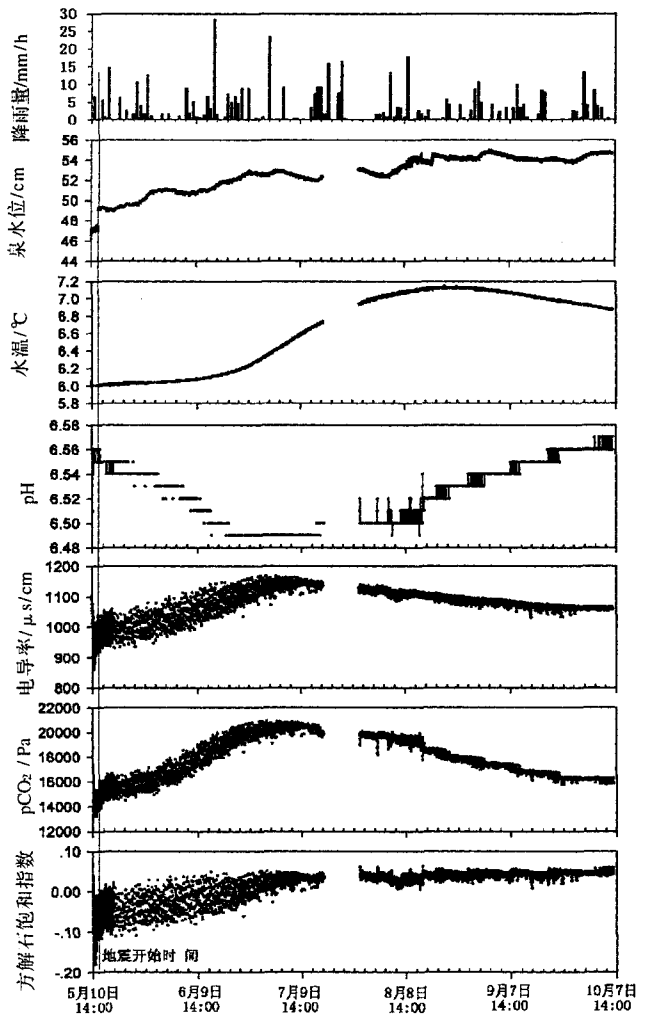


图 4 5·12 汶川地震后 5 个月的黄龙源泉水位、水温和水化学变化

Fig. 4 Variations in water stage, temperature and hydrochemistry of the Huanglong source spring five months after the May-12 Wenchuan Earthquake

有一个跃升后继续呈升高趋势,水温也继续走高。水位和水温的升高固然和季节性气候变化有关,但地震后源泉水温升高达 $1^{\circ}\text{C}$ 以上在黄龙20余年的观测记录中是创纪录的,可见,地震增加了地下向地表的水热通量,这可能与前期发现的黄龙源泉受深部地热系统影响<sup>[7-8]</sup>有关。而且,水位和水温升高的同时,泉水 $\text{pCO}_2$ (增加40%)、电导率(增加20%)和 $\text{SiC}$ (由 $-0.05$ 增加至 $0.05$ )也呈现明显上升,而 $\text{pH}$ 值则呈现下降趋势(图4)。这些变化表明,地震不仅增加了地下向地表的水热通量,而且增加了 $\text{CO}_2$ 和钙(与电导率呈正相关<sup>[4]</sup>)的通量。所有这些变化持续时间2个月有余,即直至2008年7月15日左右(图4)。而后,泉水位、水温、 $\text{SiC}$ 保持相对稳定,而 $\text{pH}$ 值呈升高趋势, $\text{pCO}_2$ 和电导率(或 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ )则降低,但仍高于地震前(图4),反映了地震的影响在逐步降低。

总之,与泉水水化学稳定的2007年<sup>[4]</sup>相比,黄龙泉2008年的水化学的波动明显偏大,因此,可以认为,地震对水化学变化的影响主要发生在地震至2008年7月15日这段时间,而后地震的影响在逐渐降低(图4)。

关于地震引起水位和水化学变化的机理,Hartmann(2006)<sup>[6]</sup>认为与地震波驱动了由地幔气泡成核产生的地下水泵有关,结果导致泉流量、气体含量的增加和不同来源水的混合比例的变化。尽管黄龙的观测结果有相似之处,但其形成机理则可能主要与汶川地震诱导控制黄龙源泉的东西向深源大断层(图1,图2)<sup>[3]</sup>活动有关。详细分析见下节。

## 4 5·12汶川特大地震对黄龙水文地球化学产生影响的构造分析

### 4.1 汶川特大地震发生的地质构造背景

2008年5月12日14时28分,四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县发生强烈地震,中国地震台网测定震级 $M_s 8.0$ ,震中为 $31.0^{\circ}\text{N}$ , $103.4^{\circ}\text{E}$ ,震源深度 $14\text{km}$ ,这是迄今世界上仪器记录到的最大的板内地震,与1923年日本关东大地震相同,是新中国建立以来中国大陆发生的破坏性最为严重的地震<sup>[9]</sup>。

这次特大地震发生在青藏块体与扬子块体的接触带内,龙门山构造带是本次地震的主要发震构造(图1)。龙门山构造带开始发育于三叠纪晚期,是一NE向展布的褶皱一逆断层带,处于松潘一甘孜造山带与扬子准地台的接合部位,构造带长约 $500\text{km}$ ,EW向宽约 $30\text{km}$ ,经过印支运动和喜马拉雅运动的

剧烈构造变形,造就了复杂的龙门山褶皱逆断层带及其伴生的四川前陆盆地,以及青藏高原与成都平原之间数十千米范围内,约 $4000\text{m}$ 的巨大地形落差。自西向东由茂汶一汶川断裂、北川一映秀断裂、灌县一江油断裂及山前隐伏断裂与前陆盆地组成(图1)。为明显的地貌构造单元分界,也是大地构造和活动地块划分的主边界构造带<sup>[2,10]</sup>。

第四纪以来,龙门山推覆构造带的活动主要集中在前山(彭县一灌县断裂)、中央(北川一映秀断裂)和后山(茂县一汶川断裂)和山前隐伏断裂上,这次地震发生在龙门山推覆构造带中段(图1),汶川、北川和青川等县受到毁灭性打击<sup>[2]</sup>。

### 4.2 黄龙与汶川地震区域地震构造和震中的关系

由上分析介绍可知,黄龙并不在汶川大地震发生的主构造带上,且距离震中约 $200\text{km}$ (图1),这是黄龙世界自然遗产得以保存之万幸!然而,尽管如此,由于此次地震强度太大,加之黄龙钙华的形成与近东西向的次级深部地质构造(图1、图2)有关<sup>[3,7-8]</sup>,因此,黄龙仍然受到了地震的较大影响,包括地动山摇,泉水位、水温、电导率和 $\text{pCO}_2$ 升高,以及泉水的 $\text{pH}$ 值降低。所有这些表明汶川特大地震可能通过诱发黄龙钙华景观得以形成的东西向次级地质构造——望乡台大断层(图1、图2)的活动增加了从深部向地表的水、热、钙离子和 $\text{CO}_2$ 通量,从而影响到黄龙源泉。这些无疑将影响到景区钙华的形成,但相关论据与分析,还有待继续观测研究。

## 5 结论和展望

由上述分析可知,5·12汶川特大地震通过诱导控制黄龙源泉的深大断层显现了它对黄龙源泉水文和水化学的影响,主要表现为泉流量、水温、电导率和 $\text{pCO}_2$ 升高,反映出地震增加了地下向地表的水、热、钙离子和 $\text{CO}_2$ 通量。

黄龙作为汶川地震的诱导影响区,高分辨率和高精度的水文地球化学监测显示了这一技术在震后水、热和离子通量变化异常识别方面的应用价值。无疑,这一技术也能应用到主震区,可通过其记录的水文和水化学的异变进行地震的前期预报<sup>[11]</sup>,值得相关部门关注。

此外,由于泉水是钙华最主要的补给源,因此,地震也将会影响到钙华的形成和生长。而钙华是黄龙作为世界自然遗产的主要组成部分,所以,地震对钙华的后续影响问题将不容忽视,需要做进一步的监测研究。

另一方面,从黄龙源泉流量及其深源 CO<sub>2</sub> 的增加可以推知,地震也导致向大气 CO<sub>2</sub> 排放的增加,因此,汶川特大地震造成深部 CO<sub>2</sub> 向大气 CO<sub>2</sub> 排放对全球碳循环的影响也有待进一步的评估。

### 参考文献

- [1] 王文杰, 潘英姿, 徐卫华, 等. 四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 110—116.
- [2] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597—629.
- [3] 刘再华, 袁道先, 何师意, 等. 四川黄龙沟景区钙华的起源和形成机理研究[J]. 地球化学, 32(1): 1—10.
- [4] 王海静, 刘再华, 曾成, 等. 四川黄龙沟源头泉水及其下游溪水的水化学变化研究[J]. 地球化学, 2009, 38(3): 307—314.
- [5] Wigley T M L. WATSPEC: a computer program for determining equilibrium speciation of aqueous solutions[J]. British Geomorphologic Research Group Technical Bulletin, 1977, 20: 1—48.
- [6] Hartmann J. Long-term seismotectonic influence on the hydrochemical composition of a spring located at Koryaksky-Volcano, Kamchatka; deduced from aggregated earthquake information [J]. International Journal of Earth Sciences, 2006, 95: 649—664.
- [7] 刘再华, 袁道先, 何师意. 不同岩溶动力系统的碳稳定同位素和地球化学特征及其意义——以我国几个典型岩溶地区为例[J]. 地质学报, 1997, 71(3): 281—288.
- [8] 刘再华, 袁道先, 何师意, 等. 地热 CO<sub>2</sub>—水—碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 CO<sub>2</sub> 来源[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(2): 209—214.
- [9] 何宏林, 孙昭民, 王世元, 等. 汶川 MS 8.0 地震地表破裂带[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 359—362.
- [10] 郑文俊, 李传友, 王伟涛, 等. 汶川 8.0 级地震陡坎(北川以北段)探槽的记录特征[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 697—709.
- [11] Hartmann J, Levy J K. The influence of seismotectonics on precursory changes in groundwater composition for the 1995 Kobe earthquake, Japan [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14: 1307—1318.

## Influence of the May-12 Wenchuan Earthquake on hydrogeochemistry of the source spring at the Huanglong World Heritage Site: Evidences from high resolution and high precision monitoring of hydrogeochemistry

LIU Zai-hua<sup>1</sup>, WANG Hai-jing<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, TAI Yong-dong<sup>2</sup>, FU Ru-xian<sup>2</sup>, WANG Xiao-ping<sup>2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China; 2. Huanglong National Scenic Spot Administration, Songpan, Sichuan 623300, China)

**Abstract:** The May-12 Wenchuan Earthquake in 2008 has not only huge injuries, casualties and economic losses but also serious impacts on the local eco-environment. Based on the high resolution and high precision monitoring results of hydrogeochemistry obtained from the NSFC-supported project “Investigation on the mechanisms of anthropogenic and natural impacts on the decline of the travertine landscape at Huanglong, the World Natural Heritage Site”, it was found that the great earthquake has remarkable influences on the hydrogeochemistry of the Huanglong source spring, which recharges the Huanglong travertine-deposition stream. The influences mainly reflected in the increase in discharge, water temperature and electric conductivity as well as pCO<sub>2</sub> of the spring, indicating the increase in fluxes of discharge, heat, calcium ion and CO<sub>2</sub> towards the surface. However, the effect of the earthquake on the travertine landscape and CO<sub>2</sub> release to the atmosphere remains to be assessed.

**Key words:** Wenchuan Earthquake; hydrogeochemical response; Huanglong source spring; World Natural Heritage