

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

# 地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

顾鸿宇,王东辉,李胜伟,郑万模,刘 港,向元英,李 丹,陈能德

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

GU Hongyu, WANG Donghui, LI Shengwei, ZHENG Wanmo, LIU Gang, XIANG Yuanying, LI Dan, and CHEN Nengde

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104019

# 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

# 永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River 胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析

Characteristics and causes of hydrochemical evolution of deep groundwater in the Luanhe Delta 牛兆轩, 蒋小伟, 胡云壮 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 27-27

# 三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring 张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62–71

### 云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin 常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9–15

#### 运用地下水对潮汐的响应识别压力传导系数

Identification of hydraulic conductivity using the response of groundwater levels to oceanic tide 阳玲, 杜金月, 王同科, 赵志学, 郝永红 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 26-30

# 京津冀水源涵养区水化学环境分析——以承德市兴隆县为例

Hydrochemical environment in a typical conservation area in the Beijing–Tianjin–Hebei region: A case study in Xinglong County of Chengde

鲁重生, 刘文波, 李志明, 武雄, 康伟, 任玉祥 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 132-141



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104019

# 地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析 ——以青白江地震为例

顾鸿宇<sup>1</sup>,王东辉<sup>1</sup>,李胜伟<sup>1</sup>,郑万模<sup>1</sup>,刘 港<sup>2</sup>,向元英<sup>3</sup>,李 丹<sup>1</sup>,陈能德<sup>4</sup> (1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081;2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;3. 四川省工程咨询研究院,四川 成都 610016;4. 四川省开元集团有限公司, 四川 成都 610081)

摘要:相邻监测井的同震差异响应分析是研究地下水同震响应机理的路径之一。2020年2月3号青白江地震引发了龙泉山地下水监测井水位及水质的异常变化。利用多种水化学组分及水位的自动监测数据分析了相邻两口监测井的同震差异响应特征,讨论了水化学组分及水位差异响应机理。在相同能量密度情况下,ZK1水位变幅较ZK6大,表明ZK1对本次地 震响应的敏感性高于ZK6。地震主要引起了处于还原环境(*E*<sub>h</sub><0)的第二含水层(主要离子为NH<sup>+</sup><sub>4</sub>和NO<sup>-</sup><sub>3</sub>)中地下水向 ZK1的排泄,而处于氧化环境(*E*<sub>h</sub>>0)的第一含水层(高浓度Cl<sup>-</sup>,高TDS及pH)中地下水主要向ZK6排泄。不同含水层水体 向井排泄和混合是造成两口井地下水化学组分差异响应的原因。根据震后井水位及水化学组分的趋势变化规律分析,岩 体在地震作用下的不排水体积改变是造成地下水水位阶跃变化的主要原因,ZK1周围第二含水层发生了塑性变形,渗透性 发生了永久改变,而ZK6周围岩体发生弹性变形,渗透性未发生永久改变。 关键词:监测井;水化学组分; nc; 同震响应; 含水层渗透性

中图分类号: P641.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)06-0044-10

# An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

GU Hongyu<sup>1</sup>, WANG Donghui<sup>1</sup>, LI Shengwei<sup>1</sup>, ZHENG Wanmo<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, XIANG Yuanying<sup>3</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, CHEN Nengde<sup>4</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Sichuan Engineering Consulting and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610016, China; 4. Sichuan Kaiyuan Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Analysis of the coseismic differential response of adjacent monitoring wells is an important way to study the coseismic response mechanism of groundwater. On February 3, 2020, the Qingbaijiang earthquake caused the abnormal changes of groundwater levels and water quality in the monitoring wells of Longquanshan. In this paper, the coseismic differential response characteristics of two adjacent monitoring wells are analyzed by using the automatic monitoring data of various hydrochemical components and water levels. Based on the coupling response characteristics of hydrochemical components and water levels, the mechanism of differential response of hydrochemical components and water levels. In the case of the same energy density, the

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41907174);中国地质调查局地质调查项目(DD20189210;DD20211402;DD20211381)

第一作者:顾鸿宇(1991-),男,博士,工程师,地下水及地质灾害监测。E-mail: 1083471408@qq.com

通讯作者: 王东辉(1982-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事水工环、城市地质调查相关工作。E-mail: 16216813@qq.com

water level variation amplitude of well ZK1 is larger than that of well ZK6, which indicates that ZK1 is more sensitive to the earthquake response than ZK6. The earthquake mainly caused the discharge of the groundwater  $(E_h < 0)$  from the second aquifer (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) to ZK1, while the groundwater  $(E_h > 0)$  from the first aquifer (high concentration of Cl<sup>-</sup>, TDS, and pH) to ZK6. The discharge and mixing of water from different aquifers into the wells are the reason for the different response of chemical components of groundwater in these two wells. According to the trends of chemical components and water levels after the earthquake, rock mass under seismic action of undrained volume change is the main cause of groundwater water status step change, that is, plastic deformation and permanent change in permeability occurred in the second aquifer around well ZK1, and no permanent change in permeability but elastic deformation occurred in rock mass around well ZK6.

Keywords: monitoring wells; hydrochemical components; water level; coseismic response; permeability of aquifer

近年来,地下水系统对地震的响应机理引发了众 多学者的广泛关注。地下水系统对地震的响应,从地 震时间历程划分,包括震前响应、同震响应和震后响 应3个阶段。其响应方式多种多样,包括地下水水 位、水温、水化学组分及地下水流量的改变等<sup>[1-2]</sup>。

由于地下水水位监测简便,前人研究普遍关注地 下水水位对地震的响应规律<sup>[3]</sup>。研究形式可归结为 2类:(1)单一监测井对多次地震的监测,此方法有利 于消除非地震引发的水位变动以及不同水文地质条 件的干扰,常用于分析地震引起的应力扰动<sup>[4-5]</sup>;(2)多 监测井对同一地震响应规律的监测,监测井的空间分 布有利于研究地下水位在不同水文地质条件及构造 条件中对地震的差异响应<sup>[6]</sup>。由于地震能改变地球的 地壳结构,从而导致岩体内孔隙压力变化以及含水层 介质特性(如渗透率),进而产生不同形式的同震水位 响应。地下水水位的响应通常有阶跃式、渐变式和振 荡式 3 种典型形式以及不同的组合形式,其空间分布 与地震震级及震中距有关<sup>[6]</sup>。

此外,由于地下热流分布广泛,岩体的热导率在 空间和时间上变异性较小等特点,地下水温度也可用 于追踪地震对地下水系统的影响<sup>[7]</sup>。温度剖面和温度 时间序列数据常被用于解释地下水系统的地震响 应。地层浅部的温度通常反映气候周期的变化规律 (日变化、季节变化和年变化)。不同深度之间的温度 差异及不同的时间变化规律可以造成热流扩散。由 于地震改变了岩体渗透性,地下水在流动过程中会对 温度场进行重构,改变温度数据的时间序列特征。因 此,对比地震前后的温度时间序列规律常用于判断地 下水系统特征变化。

地下水水化学组分的地震响应规律更为复杂,地 震引发的物理作用(如渗透性改变)和水-岩反应均会 造成水化学组分的改变<sup>[8-10]</sup>。由于地震可能导致岩体 的塑性变形,不同含水层间的隔水层被破坏,不同化 学特征的水源混合,甚至发生化学反应。同时,地震 对流体压力的改变可能导致某些矿物发生溶解或结 晶。因此,离子本身在场地环境中的化学稳定性以及 浓度是其地震敏感性的重要影响因素。

目前,水位、水温的联合监测较为普遍,而地下水 水化学组分的时间序列数据还较为缺乏。一方面,水 化学数据大多是定期采样检测,其采样周期较长,难 以捕捉到地震期间的短时响应特征。另一方面,由于 地下水系统的各个指标对地震响应的敏感性不同,单 一指标可能会忽略重要的信息,从而导致对机理认识 出现偏差。本文采用了水位、水温、Cl、NO<sub>3</sub>、NH<sup>4</sup>、 溶解性总固体(TDS)、pH 及氧化还原电位(Eh)多参 数联合实时监测,获得了用较高频率采样的时间序列 数据,并探讨了龙泉山地区地下水系统对近场地震的 差异响应机理。

# 1 研究区概况

#### 1.1 地质概况

研究区位于成都市龙泉山(图1),地貌属构造剥 蚀浅切脊状低山地貌,地势呈西北高东南低,高差约 100 m。龙泉山断裂总体走向 NE20°~30°,断裂带北 端位于德阳以北,向南经过中江县西侧、金堂镇、龙 泉驿镇、久隆场镇和仁寿镇西侧,直达乐山新桥镇附 近,全长大于230 km。研究区内密切相关的构造有金 龙寺背斜和四方山断裂,位于龙泉山背斜北西翼,西 距龙泉山断层约 2.5 km<sup>[11]</sup>。

金龙寺背斜呈北东走向,全长约16km,两翼受四 方山断层的影响呈不对称形态,西翼倾角8°~11°,东 翼倾角4°。研究区内出露的地层均为蓬莱镇组地层, 局部出现岩层倒转。



图 1 研究区构造地质概况 Fig. 1 Tectonic geology in the study area

四方山断裂走向为北北西向(图 2),地表出露约 6 km。断层两盘均为蓬莱镇组地层,两侧岩层产状陡 峭,局部倒转。断层带岩体破碎,裂隙和劈理发育,此 断层为倾向北西的高角度逆断层。断层附近有 2 组 节理: 25°∠38°,节理密度 7 条/m; 2°∠53°,节理密度 0.4 条/m。井位附近地表测得 2 组节理: 15°~ 30°∠ 80°~89°和 45°~50°∠70°~89°。

研究区内地下水补给主要为大气降水,地表无自 然水体下渗。含水基岩主要为蓬莱镇组的互层砂泥 岩,地下水总体沿顺层裂隙自南向北流动。

1.2 监测井概况

ZK1位于垃圾填埋场大坝北渗滤池下游沟谷 600 m 左侧斜坡上,钻孔孔口标高为 576.2 m,深度 90.7 m。 表层 0~8 m 用直径 110 mm 钢管护壁,并进行水泥永 久止水,8 m 以下采用花管。ZK6 位于长安垃圾场北 西 20°方位 1.2 km 处, 钻孔孔口标高为 555.5 m, 深度 61.2 m。表层 0~5.6 m 用直径 110 mm 钢管护壁, 并进 行水泥永久止水, 5.6 m 以下采用花管。ZK6 位于 ZK1 西北方向下游位置, 直线距离约 700 m(图 3)。

根据抽水试验结果, ZK1 在井深 7.2 ~ 63.7 m 的渗 透系数为 9.491×10<sup>-5</sup> ~ 1.227×10<sup>-4</sup> cm/s, 井深 63.7 ~ 90.7 m 的渗透系数为  $1.632\times10^{-4}$  ~  $1.910\times10^{-4}$  cm/s。ZK6 井深 7.0 ~ 61.2 m 的渗透系数为  $4.815\times10^{-4}$  ~  $6.644\times$  $10^{-4}$  cm/s。ZK1 水 温为 18.87 ~ 20.36 ℃, ZK6 水 温为 18.82 ~ 19.30 ℃。

根据钻孔岩芯、物探电阻率、声波测井并结合水 位观测等资料,综合确定了水文地质结构,揭露2层 含水层(图4):第一含水层,在斜坡区埋深32.5~46.2 m, 在山谷地区顶板埋深为12.0~21.0 m,底板埋深为31.0~ 32.2 m,厚度为11.0~16.0 m,岩性以粉砂质泥岩为主,



图 2 研究区水文地质剖面图





图 3 监测井位置 Fig. 3 Location of two monitoring wells

中风化,表面可见灰绿色粉砂质斑点及条带,发育 5条斜倾角节理,倾角为30°~68°,裂面起伏粗糙;发 育一组陡倾角节理,倾角为85°,裂面起伏粗糙。第二 含水层,顶板41.6~48.9 m,底板深度51.6 m以下(未 揭穿),含水岩组(段)厚度3.0~5.5 m,岩性以中-强风 化粉砂质泥岩为主,节理裂隙较为发育,岩体破碎,为 风化带裂隙孔隙水。

ZK1 取样深度为 50.0 m, 位于第二含水层, 其主要 化学指标 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>及 TDS 值分别为 15, 16.88, <0.04, 431.2 mg/L, 水化学类型为 HCO<sub>3</sub>—Na·Ca·Mg 型。ZK6 取样深度为 19.0 m, 位于第一含水层, 其主要 化学指标 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>及 TDS 值分别为 1 274, 68.72, <0.04, 1 791.0 mg/L, 水化学类型为 HCO<sub>3</sub>·Cl—Na·Ca·Mg 型。结果表明垃圾渗滤液主要影响第一含水层, 对第 二含水层影响较小。



# 1.3 监测设备及方法

为了获得地下水系统的变化规律,2019年10月 25日—2020年7月16日对2口井中地下水进行自动 监测,仪器型号为In-Situ公司Aqua TROLL@500型水 位水质自动监测仪,见图5。监测参数包括:地下水水 位,温度,Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub>、NH<sup>4</sup>、溶解性总固体(TDS)、pH、 氧化还原电位( $E_h$ )。数据采集间隔为12h,即0点和 12点整采集数据,数据发射频率为1次/d。各传感器 在布设前采用标准液进行标定。

# 2 结果

#### 2.1 同震差异响应特征

2020年2月3日0时5分,成都市青白江发生 5.1级地震,引发了龙泉山地下水监测井ZK1和ZK6 的水位、水化学组分及其他参数的同震异常。两口监 测井距离震中约13 km(图1)。两口监测井虽相距



图 5 监测井及仪器设备 Fig. 5 Photo of the monitoring well and equipment

仅约 700 m,但其响应特征明显不同。差异性响应为研究地下水系统的地震响应机理提供了更详实的依据。

震前,两口井水位未见异常波动。地震发生时, 两口井的地下水位都发生了同震阶跃形式的上升,但 上升幅度不同。ZK1水位上升了 0.80 m,见图 6(a), ZK6水位上升了 0.25 m,见图 7(a)。两口井的含水层



Fig. 6 Coseismic characteristics of groundwater parameters in ZK1 to the Qingbaijiang earthquake

(1)水位

13.10

13.20

13.40

13.45 13.50

5 000

4 800

4 600 (\_\_\_

4 0 0 0

3 800 ± 3 600

3 400

3 200 3 000

1.6

1.4

(c)

E 13.25

迫 13.30 ₹13.35

. (a) 13.15

(b)

2019-12-25

W







厚度差异可能是导致补给量差异的原因之一。

(2)水化学组分

CI 在地下水中化学性质较稳定,因此可作为示踪 离子。震前两口井的 CI 未见异常波动, 以一定的速 率不断增大。地震发生时,ZK1中Cl浓度出现了同 震阶跃形式的下降,浓度下降幅度达196 mg/L,见 图 6(b)。ZK6 中 CI浓度则出现了相反的变化趋势, CI浓度同震阶跃上升了752 mg/L, 见图7(b)。两者的 差异变化反映了地震时地下水补给来源发生改变。

NH4<sup>+</sup>浓度均未发生异常波动。地震发生时,ZK1 中 $NH_4^+$ 未出现异常,见图 6(c)。而 ZK6 中的 $NH_4^+$ 现了 明显的增加,浓度从 0.1 mg/L 增加到 1.4 mg/L, 见 **图 7(c)**。

两口井中NO款度的震前和同震特征差异较大。 震前, ZK1中NO;波动较大, 但波动周期约为 36 h, 见 图 6(d), 而 ZK6 中 NO<sub>5</sub>浓度未见明显波动。这可能是 由于两口井中硝酸根补给通道的差异造成。地震发 生时, ZK1 中NO; 的浓度出现了下降, 但下降幅度仍在 正常波动峰谷附近。同时,地震对其波动周期有一定 影响, 地震后的 60 h内, 硝酸根的增长变缓, 周期增 大。ZK6中NO<sub>5</sub>浓度出现了同震阶跃上升,浓度从 11.58 mg/L 增加到 87.35 mg/L, 增加幅度较大, 见 **₹** 7(d)<sub>°</sub>

震前,两口井中的 pH 都未发生异常波动。地震 发生时, ZK1 中的 pH 有小幅度升高, 但并未偏离其长 期变化趋势,见图 6(e)。ZK6 中的 pH 出现了较大幅 度的增加,从7.27增加到7.35,见图7(e)。

ZK1 的 Eh 为负值, 而 ZK6 的 Eh 为正值, 这表明两 口井所处的氧化还原环境差异明显,地下水的补给来 源不同。地震发生时,ZK1中的Eh变化规律和NO;变 化规律相似,出现了周期的短暂改变,见图 6(f)。ZK6 中的 *E*<sub>h</sub> 出现了阶跃式的下降,从 481 mV 下降到 404 mV,见图 7(f)。

震前,两口井的 TDS 均保持原有的趋势性变化。地 震发生时,ZK1 中 TDS 出现了明显的下降,从1435.5 mg/L 下降到1384.9 mg/L,见图 6(g)。ZK6 中 TDS 则出现 了大幅增长现象,从1888.7 mg/L 增加到2247.3 mg/L, 见图 7(g)。地下水补给来源的不同以及不同含水层 在地震时的补给比例差异是导致两口井 TDS 差异变 化的因素之一。

地震对两口井的温度并无影响,两口井温度都保 持在18.7℃,见图6(h)、图7(h),说明向井补给的含 水层无明显温度差异,且地震并未导致深部高温地下 水的补给。

# 2.2 震后差异响应特征

两口观测井的震后差异主要表现在各参数的恢 复特征不同(表1)。ZK1中的水位和 CI震后呈现出 平移现象,即震后并未出现明显的恢复过程,地震后 各参数的变化速率(曲线的斜率)与震前基本一致。 TDS 震后也未出现明显的恢复过程,但其变化趋势相 反,TDS 值由逐渐增加变为缓慢下降。ZK6中 CI、NH<sub>4</sub>、 pH 及 TDS 均出现了明显的恢复过程,恢复周期约40 d。 水位的恢复过程较快,周期约15 d,且恢复曲线特征 呈突变的形状。ZK6中NO<sub>3</sub>在震后无恢复过程,可能 是部分不连通裂隙中高浓度 NO<sub>3</sub>地下水在地震作用下 短暂开启并排入井内,从而掩盖了 NO<sub>3</sub>的恢复过程。

表 1 ZK1 和 ZK6 水位及水化学参数同震变化表 Table 1 Coseismic response of water levels and chemical components in ZK1 and ZK6

井号	阶段	水位埋深/m	$Cl^{-1}/(mg \cdot L^{-1})$	$NH_4^+/(mg \cdot L^{-1})$	$NO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$	pН	$E_{\rm h}/{\rm mV}$	$TDS/(mg \cdot L^{-1})$	温度/℃
ZK1	震前	12.36	2 280	/	/	/	/	1 435.5	/
	震后	11.56	2 084	/	/	/	/	1 384.9	/
ZK6	震前	13.43	3 575	0.1	/	7.27	481	1 888.7	/
	震后	13.18	4 327	1.4	/	7.35	404	2 247.3	/

注:"/"表示震前及震后无明显异常。

# 3 地下水系统地震响应机理探讨

#### 3.1 地震敏感性分析

地震能量密度代表着地震施加在单位体积介质 上的最大能量,关键参数包括震中距以及震级。 Wang等<sup>[12]</sup>根据全球地震数据统计了同震响应大小和 震中距以及震级的相关性,研究表明10<sup>-4</sup> J/m<sup>3</sup> 是激发 同震响应所需的最小能量密度阈值。本文中监测井 与震中的距离约13 km,小于单位断裂长度。因此,以 震源与监测井距离判断,青白江地震属于近场地震。 根据 Wang等<sup>[13]</sup>提出的能量密度计算公式:

 $\log r = 0.48 * M - 0.33 * \log e - 1.4$ 

式中:r——震中到监测井距离/km;

M——地震震级。

本次地震在监测井附近产生的能量密度为4.77× 10<sup>-1</sup> J/m<sup>3</sup>(图8),远高于同震地下水位响应的阈值10<sup>-4</sup> J/m<sup>3</sup>。 两口井的位置虽相距较近,但水位变幅却相差达到 0.55 m。这说明能量密度只能判断ZK1 对近场地震的 敏感性高于 ZK6,可能是由于两口井结构、含水层厚 度、岩体结构以及地形差异等造成的。

#### 3.2 地下水化学组分及物理参数分析

离子浓度的变化受多种因素影响,尚无统一的机 理能对所有现象进行解释。研究表明,地震引起的深 部高温地下水与浅部低温地下水混合将引起化学再 平衡,最终改变离子浓度及物理参数。青白江地震前 后两口井的温度均未发生变化,这表明此次地震并未





连通深部和浅部的含水层。因此,化学反应导致的离子浓度变化不能解释观测数据的异常。此外,从观测数据可以看出,ZK1和ZK6的离子浓度耦合变化规律截然不同,即ZK1中各离子浓度及参数变化规律较为独立,而ZK6中的离子浓度及参数变化协同性较好,这表明不同井中离子浓度变化的控制因素存在差异。

地震导致不同水源混合是地下水化学组分异常 的另一可能的原因。从图9可知,大气压力周期约为 128 h, 而 NO 变化周期依然约为 36 h, 说明其周期变化 并不受大气压力控制。推测可知,影响硝酸根浓度波 动的因素可能为固体潮,周期性的固体潮使得裂隙反 复地张开和闭合,从而导致不连通裂隙中高浓度 NO<sub>3</sub>间歇性地与井内地下水混合,造成NO<sub>3</sub>浓度周期 性波动。此外,ZK1水位及CI浓度出现同震阶跃变 化,其震后未出现缓慢的恢复过程。这种现象表明地 震改变了渗透性。由于同震时向井排泄的流体压力 远高于震后井水流入含水层的压力,加之裂隙开度在 震后减小,使得井水回流到裂隙的体积减少,回流速 率急剧降低,最终导致水位及 Cl 浓度在震后恢复过 程不显著。由于钻孔揭露了两层含水层,必定存在着 其中一层含水层地下水发生向井内的大量补给(图 10)。 伴随着水位上升, Cl 浓度和 TDS 显著下降, 说明向井 补给的地下水中并未受到垃圾填埋场的污染。同时, E<sub>b</sub>值未发生同震的显著异常波动,进一步说明该主要 补给层控制着井内 Eh, Eh 为负值说明该含水层较为封 闭且与地表连通性差。两层含水层以泥岩作为中间 隔水层,隔水性较好,第二含水层理论上应具有更低 的 Eh 值。因此,可以推断地震引发的深部第二含水层 大量向井补给和混合是导致 ZK1 中化学组分同震异 常的主要原因。同时,混合作用并未导致NO5浓度和



Fig. 9 Magnitude Scalogram of the atmospheric pressure

NH<sub>4</sub>浓度异常,表明NO<sub>3</sub>和NH<sub>4</sub>主要来源于第二含水 层,其补给来源主要是大气降水。

ZK6中化学组分的异常较为一致,呈现阶跃式变 化。除 Eh 出现阶跃下降外,其余组分均出现阶跃上 升。随着水位的上升, pH、Cl 浓度和 TDS 急剧增加, 表明浅部第一含水层(受到垃圾渗滤液的污染)发生 了向井的强烈补给。同时, NO3和NH4的阶跃上升表 明深部第二含水层也发生了向井的补给,但补给比例 比第一含水层小(图 10)。从 CI浓度和 TDS 震后恢复 曲线可以看出,震前和震后恢复以后其浓度增长速率 未出现显著变化,表明地震并未改变两层含水层的渗 诱性,只是在同震及震后恢复期间出现了渗透性的短 暂变化。井中化学组分的同震变化是由于地震沟通 了含水层中原本不连通的裂隙,使含高浓度离子的地 下水补给到井中并与低浓度地下水(赋存于连通裂隙 中)混合。此外, ZK6中NO5并未出现类似于 ZK1中 NO<sub>5</sub>浓度周期性波动的现象,这可能与ZK6附近含水 层岩体结构变化有关。这也反映了岩体结构的差异



Fig. 10 Schematic diagrams showing the coseismic differential response of groundwater in wells ZK1 and ZK6

影响地下水系统的同震响应特征。

3.3 地下水水位响应机理

根据前人研究<sup>[13-14]</sup>,引起地下水位变化的机理大 致可分为4类:(1)地壳弹性应变引起孔隙压力振荡; (2)岩土体不排水体积改变,包括不排水剪胀和不排 水固结;(3)地震波引起渗透性增强,包括裂隙张开、 新裂隙的形成以及驱替填充物,通常引起地下水位缓 慢且持续地改变;(4)地震造成井筒-含水层结构共振。

岩土体不排水体积改变被认为是引起近场地下 水水位阶跃变化的主要因素<sup>[13]</sup>。水位波动正比于含 水层的体应变,但两者反相,即体应变膨胀时水位下 降,压缩时水位上升<sup>[15]</sup>。研究的两口井均位于砂泥岩 互层的岩体中,岩体体积改变首先是结构面的闭合或 张开及岩块本身的变形,其次是岩块间的滑移。两者 都可能发生弹性变形或者塑性变形。若地震仅引起 弹性变形,则在震前加载过程中,震前一段时间水位 增速应随结构面开度的增加而增加,反之随开度减小 而减小。与此同时,由于地下水的稳定补给,渗流通 道的变化会造成地下水压力缓慢变大。地震发生时, 岩体卸荷造成结构面的弹性回跳,地下水在较高的压 力下向井排泄,将造成地下水位的阶跃变化。由于弹 性变形不改变岩体震前的渗透性,震后地下水位应逐 渐恢复到震前水平,或震前水位变化的趋势线上。在 这个过程中,恢复曲线呈指数型,这是由于在岩体恢 复到震前应力状态过程中,渗透性也在逐渐恢复。若 地震引起的应变超过10<sup>-4</sup>,将导致岩体的塑性变形,岩 体沿裂隙错动或产生新的裂隙,将导致渗透性的永久 改变[16]。

ZK1水位出现了阶跃上升,震后并未恢复,而是 持续上升。这说明岩体在不排水条件下发生的塑性 变形导致了裂隙渗透的连通性或者开度的减小,从而 降低了渗透性<sup>[17-18]</sup>。此外,从水位-水化学组分耦合 变化规律可以看出,第一含水层的渗透性未出现显著 变化,因为震前和震后 CI浓度增长速率基本一致。 第二含水层的渗透性出现了显著降低,井水在震后无 法快速回流到岩体裂隙中,导致了水位无法回落并恢 复到震前水平。由于第二含水层中的NO<sub>5</sub>浓度波动周 期并未受到地震影响,可以推断第二含水层的渗透性 降低并不是裂隙连通性减小引起,而是由于裂隙开度 的减小引起(图 10)。

ZK6水位出现了阶跃上升,但在约15d后恢复到 了震前水平,这种指数型的恢复曲线反映了震后渗透 性的缓慢恢复。岩体在地震时发生了弹性变形,增加 了裂隙的连通程度以及开度,导致了两层含水层中地 下水向井的排泄。地震后岩体内应力水平远低于同 震时岩体内的应力水平。因此,震后较慢的卸载速率 导致了裂隙的回弹速度减慢,进而使得地下水位的恢 复出现了滞后的现象(图 10)。

# 4 结论

本文利用水化学组分和水位联合监测数据分析 了龙泉山地区两口相邻地下水监测井的同震差异响 应特征:

(1)青白江地震在监测井附近产生了 $4.77 \times 10^{-1}$  J/m<sup>3</sup> 的能量密度,远高于地震触发水文响应的能量密度阈 值  $10^{-4}$  J/m<sup>3</sup>,但相邻监测井的水位响应差异巨大 (ZK1的水位变幅大于ZK6),表明ZK1的地震敏感性 高于ZK6。

(2)不同含水层地下水的混合引起了水化学组分 异常。深部第二含水层大量向井的补给,并与井水混 合是导致 ZK1 中化学组分同震异常的主要原因。ZK6 水化学组分异常主要是浅部第一含水层向井补给,并 与井水混合造成,第二含水层向井补给的比例较小。

(3)岩体不排水体积改变引起了地下水水位阶跃 变化。ZK1水位出现了永久性阶跃上升,震后并未恢 复,原因是围岩在地震作用下发生了塑性变形,造成 第二含水层的裂隙开度减小,从而显著降低了含水层 渗透性,而第一含水层渗透性未生显著改变。ZK6水 位出现了阶跃上升,但震后恢复到震前水平。这表明 地震造成ZK6围岩的弹性变形,岩体渗透性虽暂时改 变,但应力缓慢恢复后,渗透性也恢复到震前水平。

#### 参考文献(References):

- ELKHOURY J E, BRODSKY E E, AGNEW D C.
   Seismic waves increase permeability[J]. Nature, 2006, 441(7097): 1135 1138.
- YECHIELI Y, BEIN A. Response of groundwater systems in the Dead Sea Rift Valley to the Nuweiba earthquake: Changes in head, water chemistry, and near-surface effects[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2002, 107(B12): ETG4-1 – ETG4-10.
- [3] SHI Z M, WANG G C, MANGA M, et al. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes-insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 430: 66 – 74.
- [4] 向阳, 孙小龙, 杨朋涛, 等. 2019年长宁M6.0 和2018年

兴文M5.7 地震引起的井水位同震响应对比分析[J]. 地震, 2020, 40(2): 155 - 165. [XIANG Yang, SUN Xiaolong, YANG Pengtao, et al. Comparative analysis of coseismic well water level response caused by 2019 Changning M6.0 and 2018 Xingwen M5.7 earthquakes[J]. Earthquake, 2020, 40(2): 155 - 165. (in Chinese with English abstract)]

- [5] LAI G J, JIANG C S, HAN L B, et al. Co-seismic water level changes in response to multiple large earthquakes at the LGH well in Sichuan, China[J]. Tectonophysics, 2016, 679: 211 – 217.
- [6] XIANG Y, SUN X L, GAO X Q. Different coseismic groundwater level changes in two adjacent wells in a faultintersected aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124123.
- [7] LIU Q Y, CHEN S Y, CHEN L C, et al. Detection of groundwater flux changes in response to two large earthquakes using long-term bedrock temperature time series[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125245.
- [8] ROSEN M R, BINDA G, ARCHER C, et al. Mechanisms of earthquake-induced chemical and fluid transport to carbonate groundwater springs after earthquakes[J].
   Water Resources Research, 2018, 54(8): 5225 5244.
- [9] SHI Z M, ZHANG H, WANG G C. Groundwater trace elements change induced by M5.0 earthquake in Yunnan[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124424.
- SKELTON A, LILJEDAHL-CLAESSON L, WÄSTEBY
   N, et al. Hydrochemical changes before and after earthquakes based on long-term measurements of multiple parameters at two sites in northern Iceland—A review[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124(3): 2702 2720.
- [11] 张澄博,孔德坊,张莲花.成都市长安垃圾填埋场地质特征及其防渗意义[J].地质灾害与环境保护,1998,9(1):17-21.[ZHANG Chengbo, KONG Defang,ZHANG Lianhua. Geological characteristics and anti seepage process of Chang'an refuse landfill[J].

Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(1): 17 – 21. (in Chinese with English abstract)]

- [12] WANG C Y, MANGA M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric[J]. Geofluids, 2010, 10(1/2): 206 - 216.
- [13] WANG C Y, CHIA Y. Mechanism of water level changes during earthquakes: Near field versus intermediate field[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(12): L12402.
- [14] WEINGARTEN M, GE S M. Insights into water level response to seismic waves: a 24 year high-fidelity record of global seismicity at Devils Hole[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(1): 74 – 80.
- [15] 周坤根,李胜乐,谭适龄,等. 深井水位固体潮的相位差问题[J]. 地壳形变与地震, 1993, 13(3): 18-24.
  [ZHOU Kungen, LI Shengle, TAN Shiling, et al. On phase shift in observation of tidal fluctuation in a deep well[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1993, 13(3): 18-24. (in Chinese with English abstract)]
- ELKHOURY J E, NIEMEIJER A, BRODSKY E E, et al. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2011, 116(B2): B02311.
- [17] MANGA M, BERESNEV I, BRODSKY E E, et al. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): RG2004.
- [18] 郭子奇,李胜伟,王东辉,等. 浅析四川成都龙泉山城 市森林公园主要环境地质问题[J]. 沉积与特提斯地 质, 2019, 39(4): 90 - 99. [GUO Ziqi, LI Shengwei, WANG Donghui, et al. Environmental geology of the Longquanshan urban forest park, Chengdu, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2019, 39(4): 90 - 99. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张若琳