

汶川地震前地下水位固体潮加卸载 响应比异常分析*

兰双双¹, 迟宝明^{2,3}

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130026;
3. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 针对汶川地震前地下水位中短期异常信息比较不明显这一问题, 选取受地震影响严重的川、滇、陕、甘及渝等5个省市为研究范围, 依据加卸载响应比理论, 采用固体潮加卸载响应比方法对地下水位动态进行分析。结果表明: 汶川地震前中短期时间内, 地下水位固体潮加卸载响应比存在着明显的异常现象, 异常时间相对集中在震前半年左右或1~2个月, 且随着地震孕育活动的增强, 异常井的空间分布也逐渐由四周向龙门山断裂带附近靠拢, 尤其在震前1~2个月时间内, 震源区异常井数量明显多于其它地区。

关键词: 固体潮; 加卸载响应比; 中短期; 地下水位; 汶川地震

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0271-07

0 引言

地下水是地壳中最活跃的组分之一, 它广布于地表以下0~30 km深的岩体中。由于地下水具有普遍性、流动性与难压缩性, 当其形成一封闭条件的承压含水层系统时, 岩体中微小的应力应变变化都会改变含水层孔隙压力, 并通过地下水的渗流作用表现在井水位的动态变化上, 故深层地下水具有灵敏的映震性, 这已在很多震例中得到证实(耿杰等, 1998; 林淑真等, 2003; Wang *et al.*, 2004)。

2008年5月12日14时28分, 我国四川省汶川县发生了举世震惊的 $M_s 8.0$ 地震, 地震不仅在震中区附近造成了灾难性的破坏, 对四川省及邻近省(市)也造成了严重破坏, 地震规模之大, 灾害之重, 实属罕见。遗憾的是, 地下水作为地壳中最活跃的组分之一, 汶川地震前兆异常井的数量偏少(车用太等, 2008), 尤其是中短期异常更不明显。从地下水位原始观测曲线看, 除了四川省的德阳井水位可以明显地记录到中短期异常外, 其它地区地震监测井水位所反映的地震活动信息都比较不明显。针对这一问题, 本文

选取受地震影响严重的川、滇、陕、甘及渝5个省(市)为研究范围, 依据加卸载响应比理论, 采用地下水位固体潮加卸载响应比方法对地下水位动态进行分析, 以期达到分析震前中短期地下水位异常特征, 揭示深层地下水位中所隐含的地震活动信息的目的, 从而为深入探索强震前中短期地震活动的演化规律及加快强震中短期预报进程等工作提供一定的参考依据。

1 固体潮加卸载响应比理论

加卸载响应比理论(Loading/Unloading Response Ratio, 简称LURR)是尹祥础和尹灿(1991)根据震源区介质的破坏即非线性系统失稳这一自然现象, 在断裂力学、损伤力学、非线性科学等研究成果基础上建立起来的一种新的地震预报方法。近年来, 该理论已在地形变、地倾斜、地磁、地下水位等前兆手段中得以推广, 并不断取得新的进展(尹祥础, 1987; 尹祥础, 尹灿, 1991; Yin *et al.*, 1995; 罗贵安等, 1996; 李佑唐等, 2007)。本文采用固体潮加卸载响应比方法对地下水位进行处理分析, 为准确地掌握震前应力场的演变及地震活动规律提供一定的依据。

* 收稿日期: 2010-07-16.

基金项目: 国家地震局“中国地震局汶川地震科学考察”项目资助.

1.1 加卸载响应比理论

响应比及加卸载响应比理论的关键与核心就是将系统假设为非线性系统。设当一系统载荷改变为 ΔP 时, 其响应的改变为 ΔR 。当系统稳态(载荷为 P_0) 时的响应率为 $\Delta R_0/\Delta P_0$, 载荷为 P_1 时的响应率为 $\Delta R_1/\Delta P_1$, 则系统对于 P_1 的响应比 Y_1 的计算公式为

$$Y_1 = \left(\frac{\Delta R_1}{\Delta P_1} \right) / \left(\frac{\Delta R_0}{\Delta P_0} \right). \quad (1)$$

系统加载(增量为 ΔP_+) 引起的响应率为 $\Delta R_+/\Delta P_+$, 卸载(增量为 ΔP_-) 引起的响应率为 $\Delta R_-/\Delta P_-$, 则系统的加卸载响应比 Y 为

$$Y = \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) / \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right). \quad (2)$$

当系统处在稳定状态时, $\Delta R_+ = \Delta R_-$, 响应比 Y 接近 1; 当系统偏离稳定状态时, 即使 $\Delta P_+ = \Delta P_-$, ΔR_+ 也大于 ΔR_- , 响应比大于 1。由此可得出加卸载响应比 Y 能定量地说明系统趋向失稳的状态。

1.2 固体潮加卸载响应比

地震孕育的物理本质是孕震系统介质由稳态向失稳态演变的过程。当地球自转时, 地球上各点相对天体产生周期性变化, 这种周期性变化使得引潮力的大小和方向随时间发生相应的周期性变化, 每个周期的完成实际上就是对地球加载和卸载的一个完整过程, 这种自然加、卸载过程可以通过地球对引潮力作用的响应(固体潮汐现象)来表示, 故地下水位固体潮加卸载响应比可用来研究地球表面观测点周围系统由荷载稳态向失稳演化的过程(张昭栋等, 1999; 魏焕等, 2003; 陈建民等, 1994)。

当含水层只受固体潮应力作用时, 深层地下水位变化与体应变固体潮呈正比。事实上, 地震孕震过程中, 震源区及附近区域含水层不仅受固体潮应力作用, 而且还受到明显的构造应力作用, 含水层介质的应变是两者共同作用的结果, 即

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{E(t)} (\sigma_t + \sigma_s). \quad (3)$$

式中, σ_t 为固体潮应力; σ_s 为构造应力; $\Delta \varepsilon$ 为应变; $E(t)$ 为介质的杨氏模量, 它的值随应力区域的

不同而不同。由图 1 可见, 在区域 OAB , $E(t)$ 近似为一常数, 在区域 BC , $E(t)$ 越来越大, 在区域 CS , $E(t)$ 越来越小, 在区域 SD , $E(t)$ 又近似为一常数。当时间很短时, 认为构造应力变化不大, 则有

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma_t}{E(t)}. \quad (4)$$

可见, 固体潮应力引起了岩石的固体潮应变, 这种固体潮应变使含水层介质应变发生变化, 导致含水层孔隙压力发生变化, 从而导致深层地下水位发生相应的变化, 所以距震源区较近的承压井水位有可能反映震前岩体系统失稳的变化。

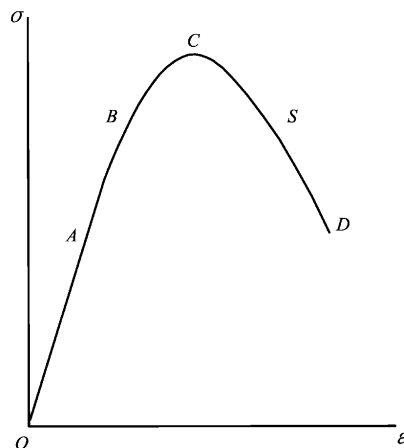


图 1 岩石的全应力应变示意曲线

Fig. 1 Stress - strain curve of rock

根据加卸载响应比的理论原理, 以相应的体应变固体潮理论值 θ 作为加载方式, 对孕震系统施以荷载, 则承压井水位对体应变固体潮理论值的响应率为

$$R = \Delta H_\theta / \Delta \theta. \quad (5)$$

式中, ΔH_θ 为固体潮变化引起的承压井水位变化幅度的观测值; $\Delta \theta$ 为体应变固体潮理论变化值。

利用地下水位对体应变固体潮的响应 R , 可得地下水位固体潮加卸载响应比为

$$Y_w = \frac{(\Delta H_\theta / \Delta \theta)_+}{(\Delta H_\theta / \Delta \theta)_-}. \quad (6)$$

其中, 角标 “+” 表示加载, “-” 表示卸载。

实际工作中, 地下水位固体潮观测值对理论

固体潮加卸载的响应可由近似于 Nakai 拟合模型获得（徐贵明等，2002）

$$H_{\theta}(t) = \begin{cases} \alpha^+ R(t) - \beta^+ \frac{dR}{dt} + K_0^+ + K_1^+ t + K_2^+ t^2, \\ \alpha^- R(t) - \beta^- \frac{dR}{dt} + K_0^- + K_1^- t + K_2^- t^2. \end{cases} \quad (7)$$

式中， $H_{\theta}(t)$ 为地下水位固体潮的实际观测值； $R(t) = \theta$ 和 $\frac{dR}{dt} = \theta'$ 为 t_i 时刻的体应变固体潮理论值及其一阶导数； α^+ 和 α^- 为拟合潮汐因子； β^+ 和 β^- 为与潮汐观测的位相滞后有关的系数； K_0^+ 、 K_1^+ 、 K_2^+ 、 K_0^- 、 K_1^- 和 K_2^- 分别为与非潮汐的常数（仪器零漂）、速度和加速度有关的系数，利用最小二乘法可计算出式中各参数值。

2 实例分析

2.1 地下水位的干扰剔除

正常状态下，大气压力和固体潮应力是影响深层地下水位动态变化最主要的两个因素。因此，在地下水位固体潮加卸载响应比的计算过程中，当以地球体应变固体潮为加载方式时，若地下水位中存在着明显的气压效应，则气压是一种干扰因素，应首先对地下水位观测值进行气压订正，尽量消除气压的影响（徐贵明等，2002），然后再对水位修正值进行地下水位固体潮加卸载响应比的计算。气压修正公式如下：

$$H'(t) = H(t) - B_p \cdot P(t - \Delta t). \quad (8)$$

式中， $H'(t)$ 为修正气压效应后的地下水位值； $H(t)$ 为地下水位观测值； B_p 为气压效率（mm/hPa）； $P(t - \Delta t)$ 为 Δt 时刻气压观测值（hPa）； Δt 为地下水位对气压响应的滞后时间。

对地下水位进行气压修正的关键是计算地下水位的 B_p ，具体方法如下：地下水位和气压等观测数据中往往既包含长周期的趋势变化成分，也包含短周期的日变化成分，这就需要在分析地下水位与气压等干扰因素的关系前，通过数字滤波将原始数据分离为只包含趋势变化的低频部分和只包含短周期变化的高频部分，然后对高频项部分采用线性回归法或差分法来计算地下

水位的气压系数 B_p 。

本文采用别尔采夫滤波方法分别对地下水位、气压观测序列的趋势项（低频部分）和 高频部分进行分离（田竹君，谷圆珠，1985；秦清娟等，1992），如式（9）所示。将时间序列值由中心点向数列前后分别选取第 2、3、5、8、10、13、18 位置上的数值代入即得到中心点的地下水位趋势值。

$$\bar{y}_i = \frac{1}{15} (y_i + y_{i+2} + y_{i-2} + y_{i+3} + y_{i-3} + y_{i+5} + y_{i-5} + y_{i+8} + y_{i-8} + y_{i+10} + y_{i-10} + y_{i+13} + y_{i-13} + y_{i+18} + y_{i-18}). \quad (9)$$

式中， \bar{y}_i 为序列的低频项； $y_i - \bar{y}_i$ 为高频项，数据样本前后各损失 18 个数。

当观测井周围环境较差时，降雨荷载、地表水体荷载以及人为活动等都会对地下水位变化产生干扰，需尽可能地进行调查与排除。

2.2 以北川井为例

北川井位于北川县县委机关大院内，属国家级井网。该井海拔 655.32 m，井深 101.14 m，观测层位深 43.5 ~ 74.4 m，含水层岩性为寒武系灰色长石石英砂岩、灰色灰黑色粉砂质页岩夹薄层状细粒砂岩，岩芯可见多条石英脉条带，岩层有一定程度的裂隙发育。地下水类型属构造裂隙承压水，为非自流井。2006 年 11 月进行数字化改造，使用 LN-3A 型数字化水位仪进行观测，采样率为 1 次/分。该井南约 200 m 有龙门山断裂带的中央断裂通过，断层走向 NE，倾向 NW，汶川地震就发生在此断裂带上。

北川井震中距约为 135 km，但由于地下水位观测时间序列较短，且在汶川地震发生时，观测井被毁，观测中断，故根据地下水位原始观测曲线（图 2a）很难判定震前井附近含水层系统所受应力应变状态是否发生变化。但从该井水位固体潮加卸载响应比计算结果曲线（图 2c）可以明显地看出：自 2008 年 3 月 24 日开始井水位固体潮加卸载响应比异常增大，3 月 26 日响应比值高达 18，而后比较平静，于 4 月 21 日井水位固体潮加卸载响应比再次达到峰值 21，5 月 12 日汶川大地震发生。因此震前 1 个半月左右时间内，北川井附近含水层系统受力处于不稳定的状态。

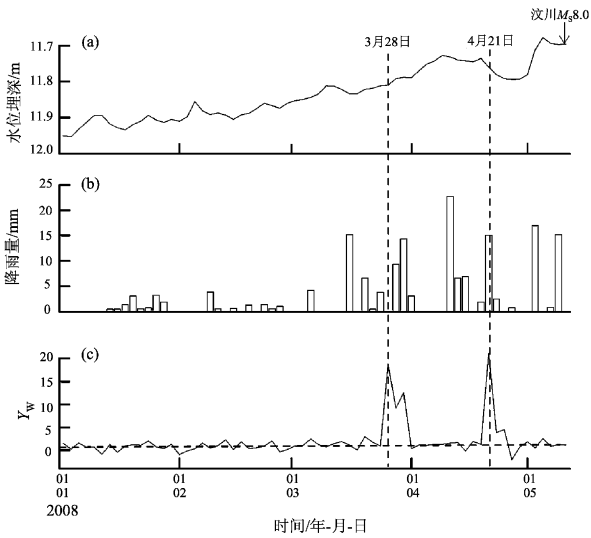


图2 北川井水位固体潮加卸载响应比曲线
(a) 地下水位原始曲线; (b) 降雨量;
(c) 固体潮加卸载响应比曲线
Fig. 2 Earth tidal LURR curve of Beichuan well water-level

(a) Primary curve of groundwater-level; (b) Rainfall;
(c) Earth tide LURR curve

从北川井降水量曲线(图2b)看,2008年3月28日北川开始出现大幅度的降雨,约滞后于井水位固体潮加卸载响应比第一次高值2天时间,这与井水位对降雨荷载的响应具有滞后效应的理论是相违背的,说明3月26日响应比异常高值并不是由降雨荷载引起的;4月份的降雨量从10日开始明显增多,最大值达到7.6 mm/h,但井水位固体潮加卸载响应比并没有出现异常,而是在11天后的4月21日才达到第二次高值,5月3日和9日降雨量也明显增多,最大值达到5.8 mm/h,但井水位固体潮加卸载响应比曲线比较平稳,说明了汶川井水位固体潮加卸载响应比异常在排除降雨荷载干扰影响因素后,存在着另一种起重要作用的应力,即地震构造应力。

3 研究区地下水位固体潮加卸载响应比分析

按照上述步骤,对研究区观测井水位分别进行固体潮加卸载响应比分析,发现震前共有15口井水位固体潮加卸载响应比存在着明显的异常(图3)。包括四川省的北川、邛崃(图4)、南溪

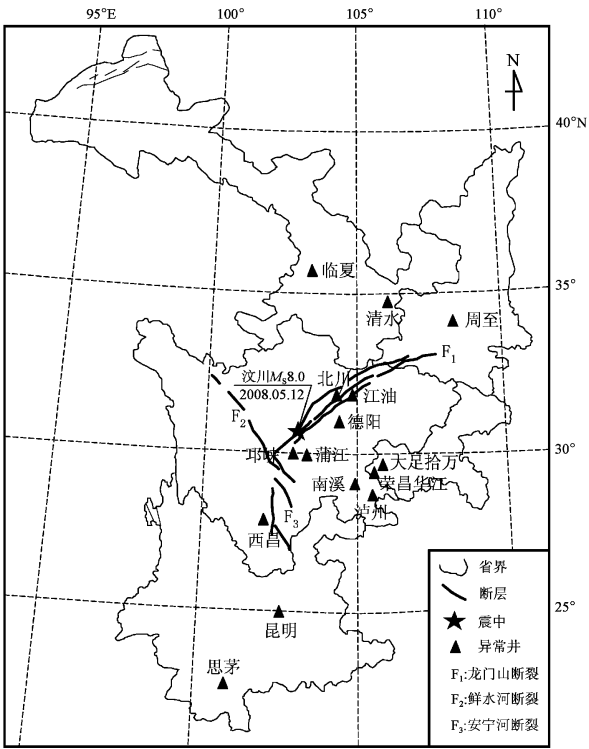


图3 地下水位固体潮加卸载响应比异常井分布图
Fig. 3 Abnormal well distribution of earth tidal LURR of groundwater-level

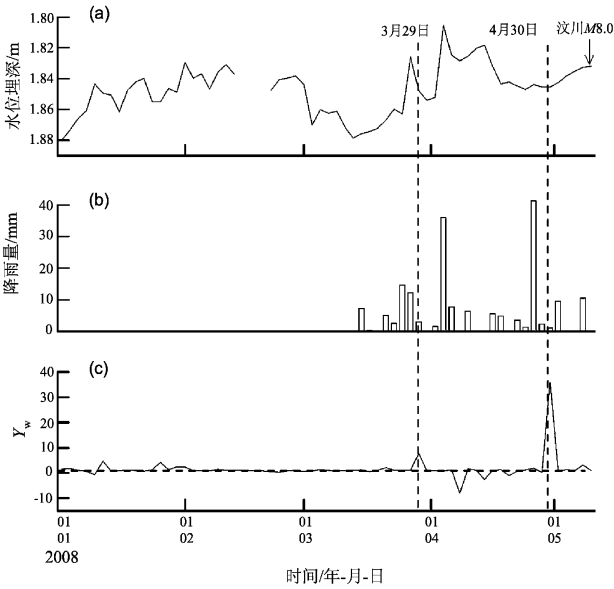


图4 邛崃井水位固体潮加卸载响应比曲线
(a) 地下水位原始曲线; (b) 降雨量;
(c) 固体潮加卸载响应比曲线
Fig. 4 Earth tidal LURR curve of Qionglai well water-level
(a) Primary curve of groundwater-level; (b) Rainfall;
(c) Earth tide LURR curve

(图 5)、西昌 (图 6)、泸州、蒲江、德阳以及江油井, 重庆市的大足拾万和荣昌华江井, 云南省的昆明和思茅井 (图 7), 陕西省的周至井, 甘肃省的古浪横梁和临夏井。笔者分析各观测井水位的固体潮加卸载响应比曲线, 总结震前地下水位固体潮加卸载响应比具有以下特征:

(1) 从形态上来看, 正常状态下井水位固体潮加卸载响应比背景值低且平稳, 以“1”为均值线上下波动; 当孕震系统处于不稳定状态时, 响应比异常变化多表现为计算值偏高或出现大幅突跳、连续突跳现象。

(2) 从时间上来看, 多数井水位固体潮加卸载响应比在震前半年左右或 1~2 个月时间内出现异常变化, 时间分布相对比较集中。

(3) 从空间上来看 (图 8), 震源区附近出现井水位固体潮加卸载响应比异常的井数明显多于其它地区。四川省泸州、蒲江、江油、西昌井在震前半年内均出现异常, 且省内几乎所有井在震前 1~2 个月内异常明显; 其它地区井水位一般在震前半年左右的时间内出现异常, 震前 1~2 个月内较少。

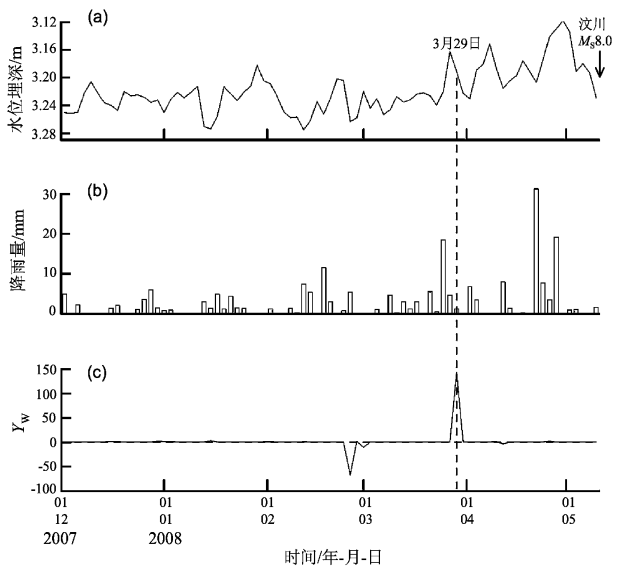


图 5 南溪井水位固体潮加卸载响应比曲线
(a) 地下水位原始曲线; (b) 降雨量;
(c) 固体潮加卸载响应比曲线
Fig. 5 Earth tidal LURR curve of Nanxi well water-level
(a) Primary curve of groundwater-level; (b) Rainfall;
(c) Earth tide LURR curve

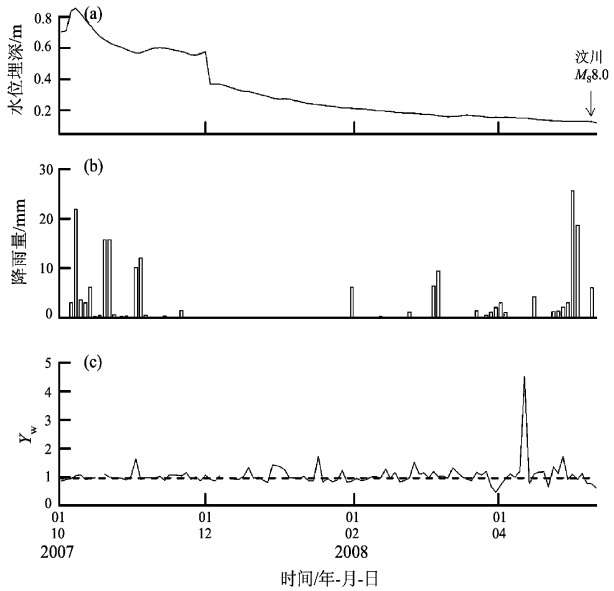


图 6 思茅井水位固体潮加卸载响应比曲线
(a) 地下水位原始曲线; (b) 降雨量;
(c) 固体潮加卸载响应比曲线
Fig. 6 Earth tidal LURR curve of Simao well water-level
(a) Primary curve of groundwater-level; (b) Rainfall;
(c) Earth tide LURR curve

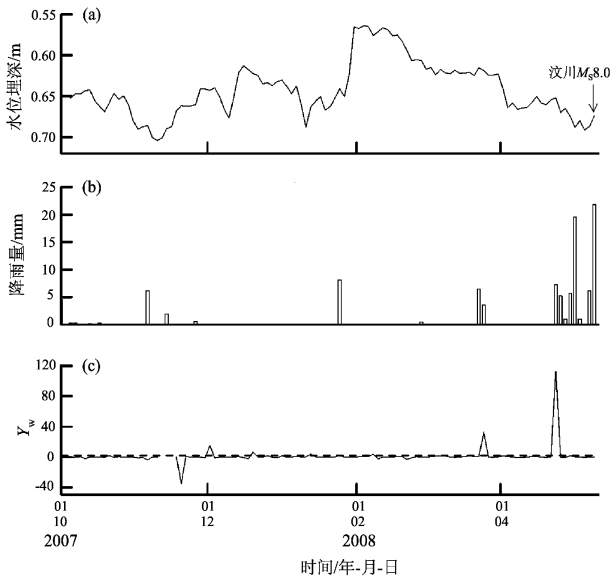


图 7 西昌井水位固体潮加卸载响应比曲线
(a) 地下水位原始曲线; (b) 降雨量;
(c) 固体潮加卸载响应比曲线
Fig. 7 Earth tidal LURR curve of Xichang well water-level
(a) Primary curve of groundwater-level; (b) Rainfall;
(c) Earth tide LURR curve

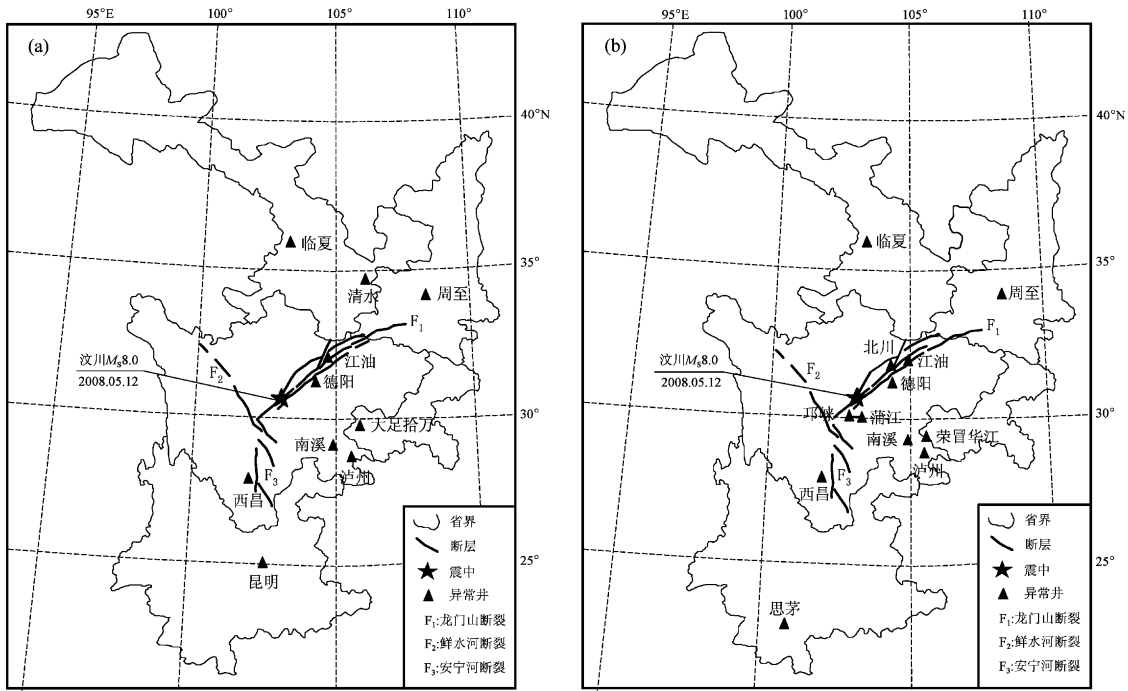


图8 地下水位固体潮加卸载响应比异常时空分布图

(a) 震前半年; (b) 震前1~2个月

Fig. 8 Spatial and temporal distribution of earth tidal LURR anomaly of groundwater-level

(a) Half a year before earthquake; (b) Two months or one month before earthquake

(4) 从时空分布来看(图8),震前半年左右到发震的时间段内,地下水位固体潮加卸载响应比异常井的分布比较分散,随着汶川地震的孕育的发展,异常井也逐渐由四周向震源区附近靠拢,尤其是在震前1~2个月内,异常井均出现在龙门山断裂带附近,即向汶川地震震源区迁移,空间分布相对集中。这与区域地震构造活动孕育震源体,震源体发展并产生地震的理论模式相符合,对加快地震中短期预报进程具有一定的参考价值。同时表明区域构造活动一方面引起了大量的地下水位中短期异常,另一方面又促使区域地震构造带中的局部构造活动强化与强震震源体的生成。

4 结论

(1) 汶川地震前中短期地下水位异常现象不明显,但通过对固体潮加卸载响应比方法的分析,发现研究区地下水位固体潮加卸载响应比存在着明显的异常现象,表明在汶川地震震源区附近的区域内,震前含水层系统处于一种不稳定的受力状态。同时也表明固体潮加卸载响应比方法具有

明确的物理依据,是揭示地下水位中所蕴含的地震活动信息的一种行之有效的方法。

(2) 中短期地下水位固体潮加卸载响应比异常时间相对集中在震前半年左右或1~2个月时间内。随着地震孕育活动的增强,异常井的空间分布逐渐由四周向龙门山断裂带附近靠拢,尤其在震前1~2个月时间内,震源区异常井数量明显多于其它地区,这个特征对今后开展地震中短期预报工作提供了参考依据。且该特征与区域地震构造活动孕育震源体,震源体发展并产生地震的理论模式相符合,对研究中短期地震活动规律具有一定的意义。

参考文献:

车用太,刘成龙,鱼金子,等. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考[J]. 地震地质, 30(4): 828-838.

陈建民,杨林章,张昭栋,等. 1994. 地下水位固体潮响应的地震异常[J]. 地震, 14(1): 73-78.

耿杰,张昭栋,魏焕,等. 1998. 唐山地震前后地下水动态图像及其形成演化模式[J]. 地震地质, 20(3): 255-260.

李佐唐,何少林,许健生,等. 2001. 祁连山地震带两次中强地震前的加卸载响应比异常[J]. 地震研究, 24(3): 197-201.

林淑真,李宗仰,陈璋家. 2003. 台湾地区 9.21 及 3.31 地震的地下水位异常统计与介入分析[J]. 地震地质,26(4):321-327.

罗贵安,宋治平,尹祥础,等. 1996. 云南永善 7.1 级地震前加卸载响应比的时空异常特征[J]. 地震研究,19(2):134-139.

秦清娟,董守玉,贾化周,等. 1992. 单井水位地震异常信息的提取与地震预报[J]. 华北地震科学,10(2):67-72.

田竹君,谷圆珠. 1985. 地下水位微动态资料的分析与处理[J]. 地震地质,7(3):51-59.

魏焕,张昭栋,耿杰,等. 2003. 井水位气压加卸载响应比[J]. 西北地震学报,25(1):82-85.

徐桂明,冯志生,唐振芳. 2002. 江苏地区地下水固体潮加卸载响应比的时空演变特征及预测意义[J]. 地震学刊,22(4):26-35.

尹祥础,尹灿. 1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预报—响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑),21(5):512-518.

尹祥础. 1987. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震,3(1):1-7.

张昭栋,王秀芹,董守德. 1999. 加卸载响应比在体应变固体潮中的应用[J]. 地震,19(3):217-222.

Wang C Y, Wang C H, Kuo C H. 2004. Temporal change in groundwater level following the 1999 (Mw=7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. Geofluids,4(6):210-220.

Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. 1995. A new approach to earthquake prediction; The load/unload response ratio (LURR) theory [J]. Pure and Applied Geophysics,145(3/4):701-715.

Analysis on Earth Tidal Loading/Unloading Response Ratio of Groundwater-Level Before Wenchuan Earthquake

LAN Shuang-shuang¹, CHI Bao-ming^{2,3}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100021, China)

(2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, Jining, China)

(3. Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract

To solve the problem that the mid- and short-term anomaly of the groundwater-level is not obvious before the 2008 Wenchuan, Sichuan Earthquake, we select the areas such as Sichuan Province, Yunnan Province, Shanxi Province, Gansu Province and Chongqing City which were seriously affected by the earthquake to analyze the earth tidal loading-unloading response ratio (LURR) through the dynamics of the groundwater-level. The results turn out that earth tidal LURR of groundwater-level is obviously abnormal in mid-short term before Wenchuan Earthquake. The abnormal time appeared half a year or 2 months or 1 month before the earthquake and the abnormal wells would gradually appear from distant areas to the near areas of Longmenshan Fault in the time process of the earthquake genesis. Especially within the period from 1 to 2 months before the earthquake, the number of abnormal wells in the focal area would obviously become more than those in other area.

Key words: earth tidal; loading-unloading response ratio; mid-short term; groundwater-level; Wenchuan earthquake