中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 7 期: 1132 ~ 1140
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

承压含水层地下水位固体潮潮汐因子和相位滞后与汶川地震的关系

史浙明[①②], 王广才[①②*]

① 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083;
② 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083
* 联系人, E-mail: wanggc@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-08-09; 接受日期: 2012-11-20; 网络版发表日期: 2013-06-28
国家自然科学基金(批准号: 40930637)、地震行业科研专项(编号: 200808079)和教育部高校博士点学科基金(编号: 20100022110001)资助

摘要 本文通过对位于中国大陆不同活动地块交界处的4口地下水位观测井的研究, 探索了地震前后潮汐因子及相位滞后的变化情况. 这些观测井位于几条活动断裂带上, 并且对汶川地震同震水位响应幅度较大. 本文收集了该4口井2007~2009年的水位整点观测值并进行处理分析, 分别计算出各个观测井水位在汶川地震前后的潮汐因子、相位滞后和潮汐残差相位差变化, 发现汶川地震发生时四口井潮汐因子处于快速变化阶段, 而相位滞后和潮汐残差相位差则在迅速下降阶段, 反映了孕震过程中井-含水层系统所受的应力应变变化过程.

关键词
潮汐因子
相位滞后
潮汐残差相位差
汶川地震
承压水

地震预报是公认的世界性难题, 关于地震是否可以预测一直是地震科学领域争论的问题[1~5]. 尽管如此, 国内外地震科学工作者们一直没有放弃对于地震预测的方法的探索. 许多学者认为由于地震孕育过程是应力-应变逐渐积累的过程, 在此过程中会引起局部或区域尺度地壳深、浅部介质结构和物理化学性质的变化, 经过精度极高的仪器监测可以发现这些异常现象[6]. 地下水作为地壳中普遍存在且对地壳应力与固体变形反映最灵敏的物质之一, 其动态变化能反映地壳介质变化和构造活动信息. 对于封闭性较好的承压的井-含水层系统, 可以将其看作灵敏的应变仪, 其对地壳体应变响应灵敏度可达 10^{-10} [7] 量级.

多年的研究与观测证明, 一些承压井能够记录到良好的水位潮汐现象[8~11]. 而且固体潮作为目前少数可以精确计算的力源之一[12], 通过对井-含水层系统记录的潮汐现象, 例如潮汐因子与相位变化等信息进行提取、计算和分析, 能在一定程度上反映了孕震过程中地壳介质与岩石性质的变化[13]. 许多学者试图通过潮汐效应进行地震前兆的探索以及进行地震预报, 发现地震前体应变和井水位的潮汐因子及相位滞后都出现了突变异常, 而且下降型异常占了多数[14~20]. 同时, 通过对地震前后的潮汐参数变化的研究可以了解含水层所在地壳在地震前后的变化特征, 这对于深入理解地震导致的水文地质现象以及地震形成机制都具有重要意义.

在离震中体应变能达到 10^{-8} 量级以上的距离范围内都可能观测到前兆现象[21], 而各大活动地块交界处的断裂带无疑是对孕震过程中反应最敏感的部位, 在这些地方安置的地下水观测井最容易捕捉到

中文引用格式: 史浙明, 王广才. 承压含水层地下水位固体潮潮汐因子和相位滞后与汶川地震的关系. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1132–1140
英文引用格式: Shi Z M, Wang G C. Relationship between the Earth tidal factor and phase lag of groundwater levels in confined aquifers and the Wenchuan M_s8.0 earthquake of 2008. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4605-6

地震前兆异常, 而且地震引起的体应变在块体边界比内部大得多[22], 有利于比较地震前后地壳介质变化. 为此, 我们选取了位于我国大陆不同活动地块交界处构造带上, 并且对于汶川地震响应幅度大的邛崃、南溪、介休、孝义四口地下水位观测井进行研究, 探索潮汐参数在地震前后变化特点, 以期了解地震前后的潮汐特征以及地震对含水层造成的影响.

1　四口观测井概况

本文选取了位于川滇活动地块与华南活动地块交界的龙门山断裂带上的邛崃井以及华蓥山断裂带上的南溪井, 鄂尔多斯活动地块与华北平原活动地块交界处的山西断裂带上的介休井和孝义井, 这四口井所处的断裂带基本处于北东-南西向(图 1). 四口井简要水文地质条件如表 1 所示. 这些井受外界干扰较少, 观测资料较理想, 我们收集了这四口井 2007 年 5 月至 2009 年 12 月地下水位以及气压资料. 尽管各井井深差别较大, 但是距离相近的井之间深度接近, 而且井深只影响潮汐响应幅度大小, 对相位滞后影响很小, 所以可以对这些深度不同的承压井的潮汐分析结果进行对比分析[23].

2　水位资料的预处理

承压井地下水位由于受到气压波动、固体潮、海潮、降雨、抽水、季节性变化等因素影响, 在分析前往往要经过处理. 主要固体潮分波的周期为 12~25 h, 地震波的周期为 0.1~100 s, 气压波动周期为 1 min~1 a, 降雨入渗一般为几天以上, 海潮周期为 12~25 h. 地震波和降雨入渗周期与固体潮作用周期相差较大, 而且四口井位于离海洋较远的内陆地区, 可以忽略

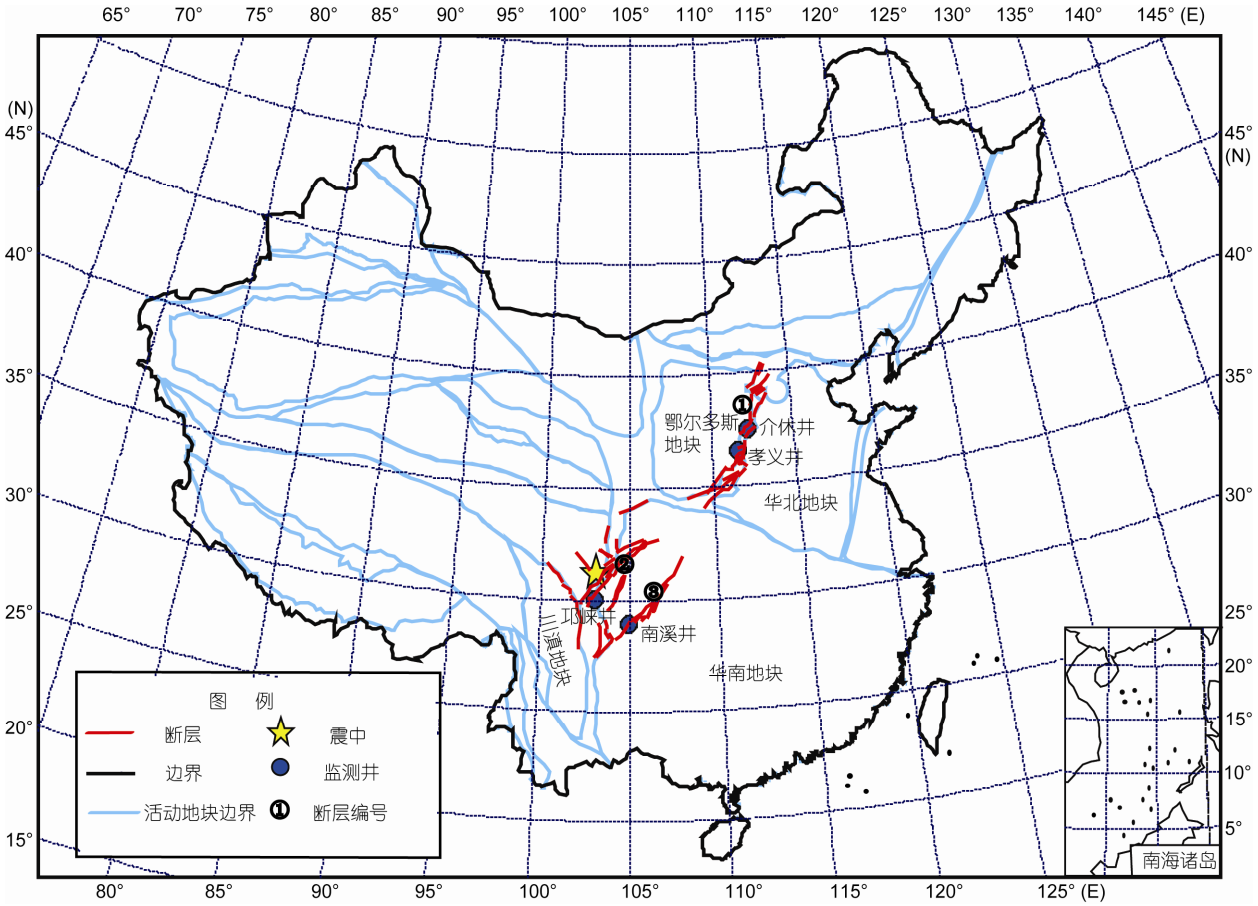

图 1　四口井地理位置示意图

① 山西断裂带; ② 龙门山断裂带; ③ 华蓥山断裂带

海潮对地下水水位的影响. 所以本文中我们仅对观测数据进行长周期变化及气压干扰项的校正.

由于仪器故障以及传输中断等意外状况会导致数据缺失情况的发生, 首先要对缺失的数据进行补全处理. 本文利用三次样条插值方法较好地补全了这些数据. 而由于气压波动对承压井水位动态造成的影响则利用卷积回归的方法来去除[24](图 2), 然后利用多项式拟合去除水位的长周期成分(图 3). 最后利用窗函数法设计的带通滤波器对剩余水位进行处理, 提取出水位数据中周期为 12~25 h 的井水位固体潮成分(图 4).

3 潮汐因子和相位滞后的计算和分析

目前国际上比较通用的潮汐分析方法为 Venedikov 调和分析法, 主要算法是最小二乘法. 所采用的潮汐模型为[25]:

固体潮理论值:

$$s(t)=\sum_{\omega}h_{\omega}\cos\left(\varphi_{\omega}(t)\right)=\sum_{\omega}h_{\omega}\cos\left(\varphi_{\omega}(0)+\omega t\right), \quad (1)$$

固体潮观测值:

$$S(t)=\sum_{\omega}H_{\omega}\cos\Phi_{\omega}(t)=\sum_{\omega}H_{\omega}\cos\left(\Phi_{\omega}(0)+\omega t\right), \quad (2)$$

这里, $s(t)$为固体潮理论值; $\omega=\omega_1, \omega_2, \omega_m$ 表示角频率(弧度); h_ω和$\varphi_\omega(t)$分别表示 t 时刻理论振幅(10^{-9})和相

表 1 四口井简要水文地质条件

观测井名称	井深(m)	含水层岩性	含水层厚度(m)	地下水类型	构造部位
介休井	315	第四系、第三系、二叠系砂、砂砾岩	221.2	孔隙承压水, 非自流	太谷断裂与霍山断裂交汇处
孝义井	502.93	二叠系砂、页岩	178.3	裂隙承压水, 非自流	交城断裂与 NW 向断裂交汇处
邛崃井	175.8	白垩系细中粒砂岩	152.3	裂隙承压水, 震前非自流, 震后自流	龙门山前山断裂三和场背斜翼部
南溪井	101.54	三叠系厚层状中粒长石石英砂岩	96.54	裂隙承压水, 非自流	华蓥山断裂带青山岭背斜北西翼

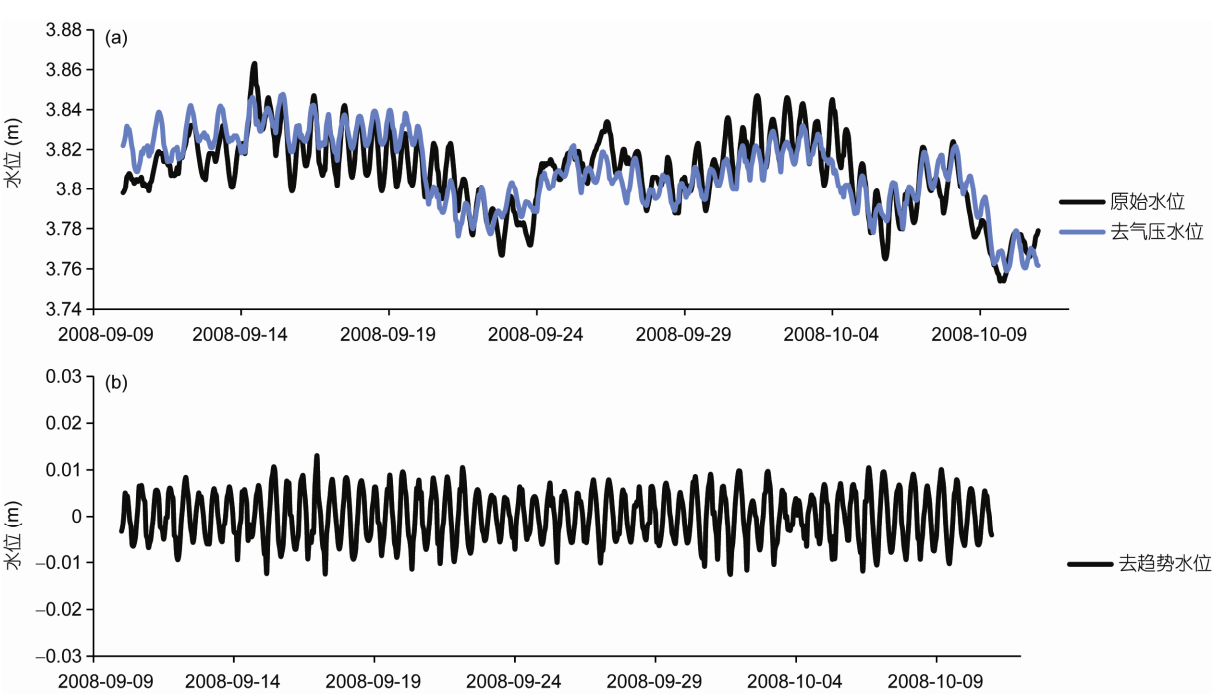

图 2 南溪井水位去气压去趋势

(a)中黑色曲线为原始水位, 蓝色曲线为去除气压效应后的水位; (b)中曲线表示去除了趋势项后的剩余水位

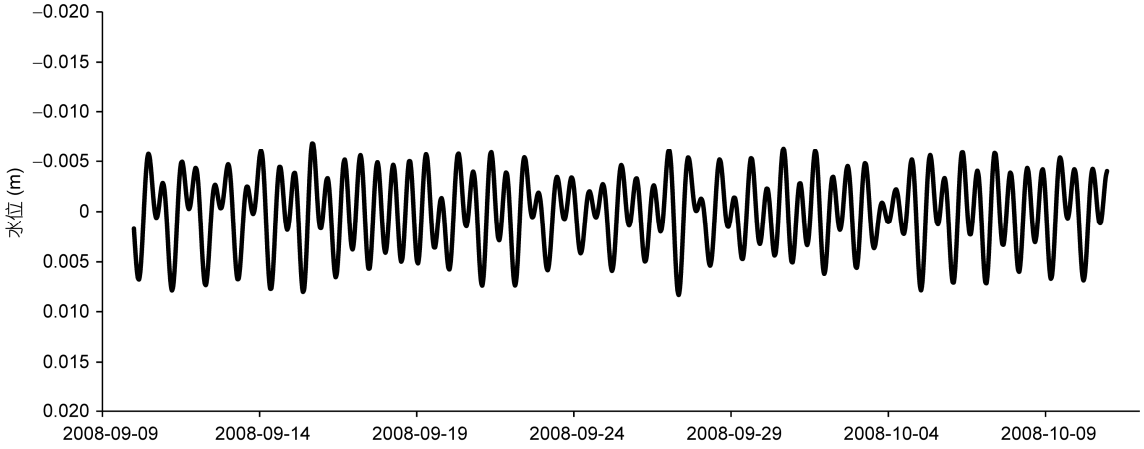

图 3　南溪井水位固体潮

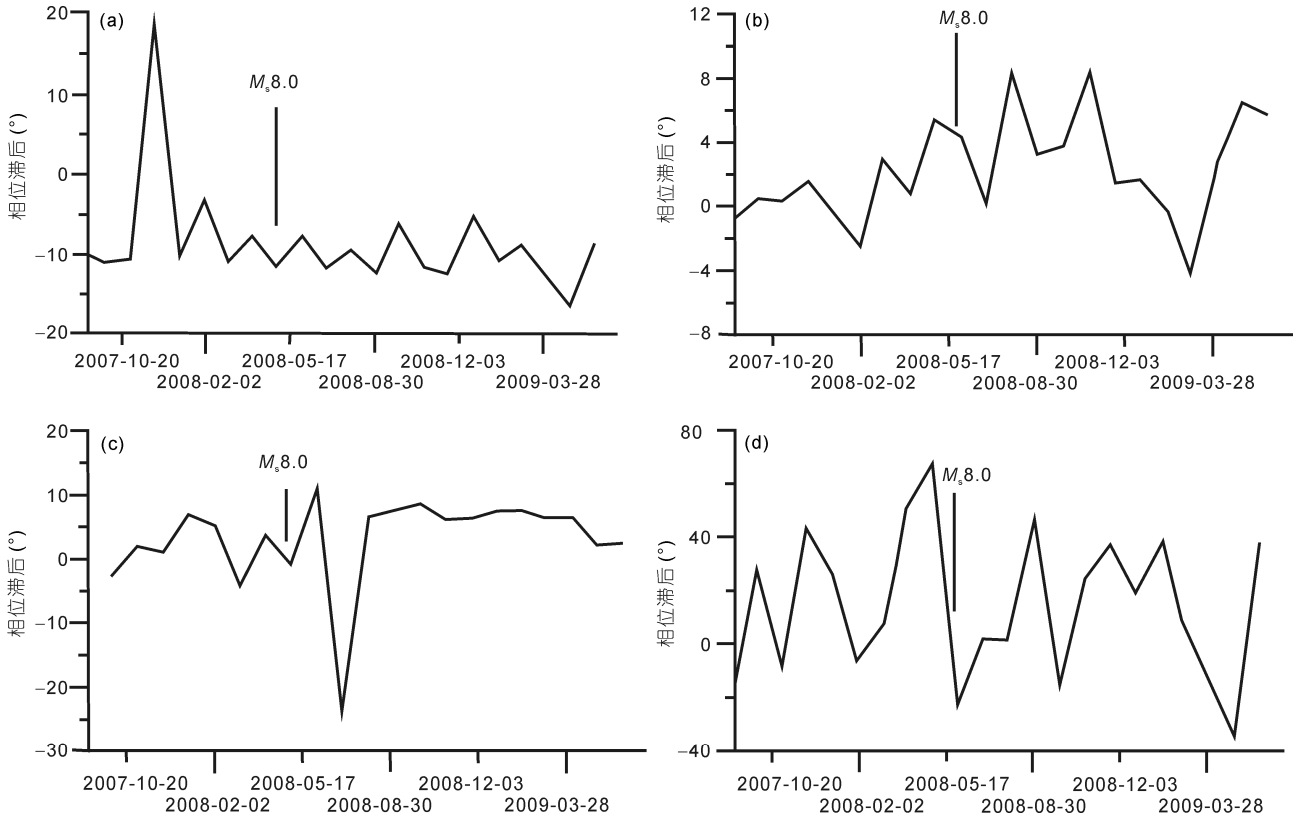

图 4　各井相位滞后变化

(a) 介休井; (b) 南溪井; (c) 孝义井; (d) 邛崃井

位(°), 式(1)中每一项都可以精确求得. $S(t)$表示固体潮观测值; H_ω和$\Phi_\omega(t)$表示t时刻观测振幅(mm)和相位(°). 首先利用奇偶数字滤波器对固体潮观测资料进行数字滤波, 将日波和半日波信号加以分离. 然后采用最小二乘法解线性方程组, 从日波中分离不同的日波波群, 半日波中分离出不同的半日波波群, 分别求出它们的振幅比和相位差, 振幅比即潮汐因子. 潮汐因子和相位滞后表达式如下:

潮汐因子:

$$\delta_\omega=H_\omega/h_\omega. \quad (3)$$

相位滞后:

$$\mathrm{d}\varphi=\Phi_\omega(t)-\varphi_\omega(t). \quad (4)$$

(3)式中潮汐因子指的是实际固体潮观测值与理论固体潮观测值之比, 对于井-含水系统而言, 指的是受含水层中周期性潮汐应变影响而产生的水位波动振幅与理论固体潮振幅的比值, 它表明了承压含水层对地壳应力响应的灵敏性. 在固体潮引力作用下, 含水层水位会发生变化从而导致井孔与含水层之间存在水力梯度, 为了平衡含水层与井孔间的水头差, 会导致含水层与井孔之间水量交换, 由于井孔储存效应的存在, 含水层所受应变变化与井孔水位变化之间会存在响应时间差. 此时井孔中水位振荡的相位变化会滞后于固体潮体应变变化. 所以相位滞后的大小从一定程度上表征了含水层水力条件(如渗透性)的变化[26].

Venedikov 调和分析只要求最小的数据段大于 48 h, 并且连续, 而各个数据段之间可以间断. 为了研究地震前后水位固体潮相位滞后的变化, 我们将提取出的水位固体潮资料以一个月为一组, 依次进行调和分析, 计算四口井水位固体潮相位滞后随时间的变化. 在调和分析得到的日波和半日波潮汐分波中, 周期约为 12.421 h 的 M_2 波波幅最大, 相位滞后现象最明显. 所以本文主要对 M_2 波进行分析, 结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 介休井相位滞后在发震前五个月突然增大, 然后逐渐变小, 发震时相位滞后达到最小值. 南溪井相位滞后从半年前开始逐渐增大, 发震时相位滞后处于变小阶段. 孝义井相位滞后也是震前几个月开始先逐渐增大然后减小, 到发震时相位滞后处在逐渐变小阶段. 同样地, 邛崃井相位滞后在发震时也处在快速变小阶段, 也就是说地震容易发生在相位滞后迅速变小的阶段. 由于相位滞后反映的是含水层中应力变化与井孔中发生相应水位变化之间的时间, 所以相位滞后减小可能反映了发震前夕含水层渗透性的逐渐增大, 导致井孔水位变化与含水层应变变化之间的响应时间缩短, 使得在含水层应力状态发生变化时与井孔之间的水量交换更加容易进行. 其原因可能是随着应力增强岩体中微裂隙开始增加, 形成新的水流通道, 引起含水层渗透率增加, 相位滞后减小. 所以这四口井相位滞后的变化反映了区域不同阶段的应力应变状态变化.

潮汐因子变化反应的是介质物性的变化, 通过对潮汐因子的研究发现, 一旦介质物性发生变化, 潮汐因子就会发生明显变化[14]. 在潮汐波波群中, M_2 波相对来说占了整个波群中相当大一部分, 而且其变化比较稳定, 所受其他因素的干扰较小, 所以分析潮汐因子变化时我们主要分析半日波群和 M_2 波的潮汐因子变化. 我们对各个井的水位固体潮资料以两日 (48 h) 为一组进行调和分析, 分别计算出其 2007~2009 年 M_2 波、半日波波群潮汐因子随时间的变化, 如图 5 和 6 所示.

从图 5 中可以看出, 介休和孝义井地下水固体潮潮汐因子在地震前夕出现了短期的快速下降异常, 震后一段时间后恢复正常; 而南溪井和邛崃井的潮汐因子则出现了上升异常现象, 震后一段时间后恢复正常. 同样从图 6 可以看出, 在地震前后的平静期半日波潮汐因子变化较平稳, 但是在汶川地震前则突然出现脉冲上升过程, 潮汐因子迅速变化, 震后便恢复正常. 从图 5 和图 6 可以发现, 地震发生时潮汐因子都处于快速变化阶段, 一般来说, 一个地区地壳的岩体特征在正常情况下是稳定的, 所以潮汐因子也应该呈稳定态势. 潮汐因子的突变反映了地壳应力应变积累到一定程度后使得地壳岩石物性发生了变化(主要是弹性模量等参数), 一定程度上反映了地壳介质的变形过程. 四口井的潮汐因子仅在地震前夕才出现较大异常, 从岩体应力应变过程来看, 在含水层进入塑性变形阶段后, 随着区域应力的增加, 含水层岩体微裂隙进一步扩张而且发生体积膨胀(扩容), 使得含水层弹性模量变小, 导致潮汐因子也减小. 但在含水层岩体扩容到一定程度时扩容区外围的水将渗入扩容区(扩散渗透), 使得其中孔隙压力迅速变大导致破裂的发生[27]. 所以, 离汶川地震震中较近的邛崃和南溪井临震前尽管含水层弹性模量变小, 但是由于扩容区外围的水量的渗入, 导致最后潮汐因子的异常表现为上升异常. 而离震中较远的介休和孝义井处于扩容区外围, 由于扩容导致含水层弹性模量的减小, 所以其潮汐因子表现为下降异常.

汶川地震后上述四口井都发生了不同程度的同震水位阶变: 其中介休井是下降阶变, 水位变幅为 260 mm, 孝义井上升型阶变, 水位变幅达 535 mm, 南溪井为下降型阶变, 水位变幅 222 mm, 邛崃井为

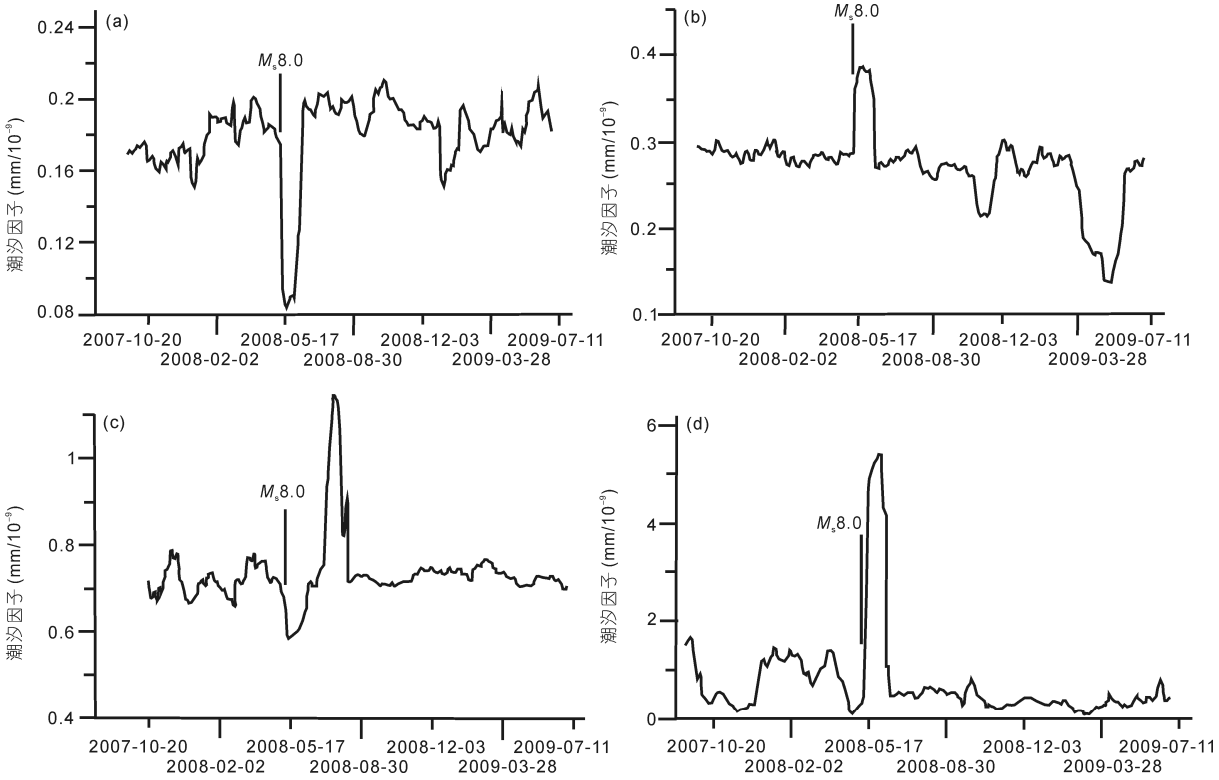

图 5　各井 M_2 波潮汐因子变化图

(a) 介休井; (b) 南溪井; (c) 孝义井; (d) 邛崃井

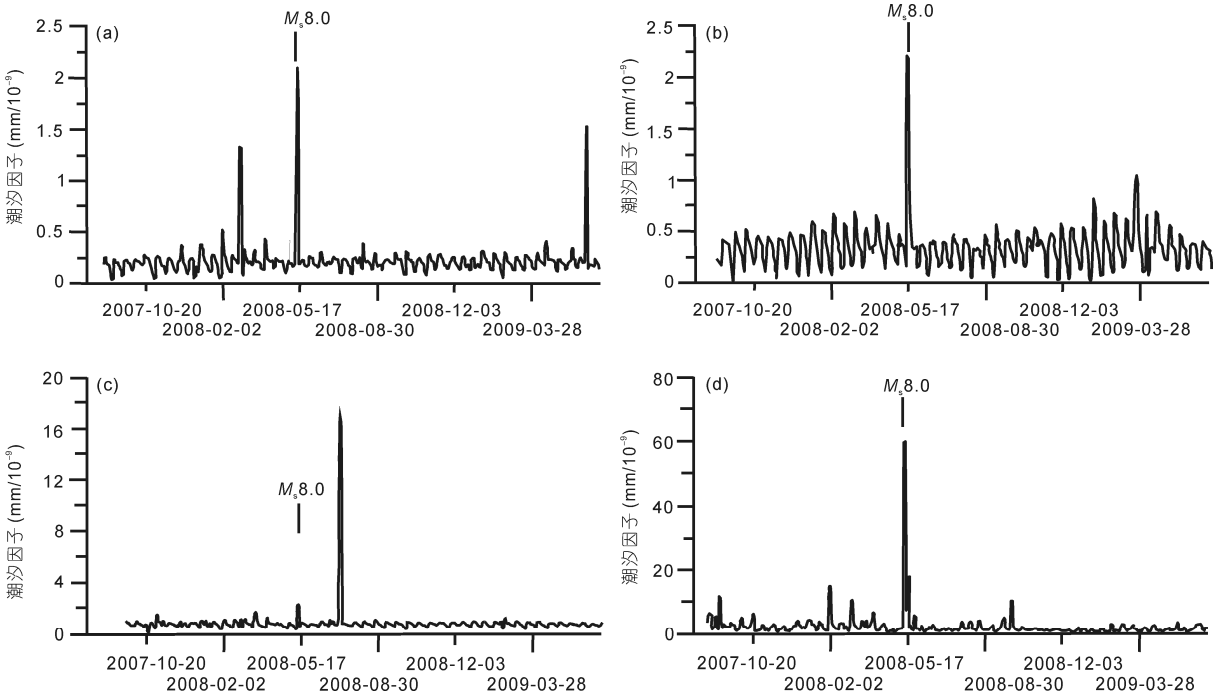

图 6　各井半日波潮汐因子变化图

(a) 介休井; (b) 南溪井; (c) 孝义井; (d) 邛崃井

上升型阶变, 水位变幅达 660 mm. 从中可以看出, 震时水位阶变状态与潮汐因子变化趋势并无直接关联. 影响同震水位阶变的因素比较复杂, 有些学者认为离震中距离较近的井孔水位阶变主要受到地震产生的静态应力影响, 在应力压缩区水位表现为阶升, 而在应力扩张区水位表现为阶降[28~30]. 而离震中较远地区, 同震水位变化则主要是地震波与含水层的交互作用结果, 同时观测井周围的水文地质条件以及构造条件对其也有重要作用[31,32].

4 潮汐残差相位差的分析

前述分析的潮汐因子与相位滞后主要是反映了受到潮汐引力影响的水位成分在震前后的变化特征. 而对不受潮汐影响的部分的水位分析其相位变化则对于探索地震前兆也具有重要的意义. 该部分的水位称为潮汐残差, 它指的是各潮汐观测值中去掉正常潮汐变化后的残余部分, 即非潮汐的作用效果, 可以在调和分析基础上计算求得. 由于已经去除了气压、长周期趋势部分以及潮汐引力影响的水位, 潮汐残差水位变化主要反映了地壳介质、环境干扰以及地震孕育等信息影响下的水位变化. 根据前人对地震成因理论的研究结果, 潮汐残差相位差的变化与前兆理论扩容模型下的形变、应变变化过程相似.

固体潮残差矢量 $\overline{B}(B,\beta)$ 是实际固体潮观测矢量 $\overline{A}(A,\Delta\varphi)$ 与理论固体潮矢量 $\overline{R}(R,0)$ 之差[33], 即

$$\overline{B}(B,\beta)=\overline{A}(A,\Delta\varphi)-\overline{R}(R,0). \tag{4}$$

对某一角频率为 ω的潮汐波 i 有

$$\left.\begin{aligned} &B_i\cos(\omega_i t+\beta_i)=A_i\cos(\omega_i t+\alpha_i)-R_i\cos\omega_i t\\ &A_i=L_i A_i^{th},R_i=L_i^{th}A_i^{th}\end{aligned}\right\}, \tag{5}$$

式(5)中 B_i 为潮汐残差矢量振幅; t 为时间; β_i 为潮汐残差的相位滞后; A_i 为潮汐观测振幅; α_i 为潮汐相位滞后; R_i 为理论潮汐振幅; L_i 为观测潮汐因子; L_i^{th} 为理论潮汐因子; A_i^{th} 为地球为完全弹性模型时的潮汐理论振幅. 解式(5)可以得到

$$\left.\begin{aligned} &B_i^2=A_i^2+R_i^2-2A_iR_i\cos\alpha_i\\ &\beta_i=\tan^{-1}\frac{L_i\sin\alpha_i}{L_i\cos\alpha_i-L_i^{th}}\end{aligned}\right\}. \tag{6}$$

所以由潮汐的理论振幅 R_i, 观测振幅 A_i 以及相位滞后 α_i 便可以得到各潮汐分波的潮汐残差振幅 B_i 和潮汐残差相位滞后 β_i. 在计算 M_2 波潮汐相位滞后的基础上, 可以得到 M_2 波残差矢量的相位差随时间的变化(图 7).

从图 7 可以看出, 四口井在地震发震时潮汐残差相位差都处在下降阶段或者差值的最低点. 一般在震前 2~3 个月开始发生残差相位差变小的现象, 到发震时残差相位差变化十分剧烈, 说明了发震前期含水层处于塑性变形阶段时, 含水层中岩体微裂隙增加, 体积发生扩容, 导致残差矢量相位差减小, 至地震发生时, 岩体发生破裂, 微裂隙进一步增加, 残差矢量相位差进一步减小. 这一现象反映了汶川地震前位于龙门山断裂带上以及山西断裂带上的这四口井所在含水层周围的构造应力状态, 同时也说明了大地震孕育过程中可能涉及到了多个块体与多条断裂带, 这与车用太等[34]对我国地震地下流体前兆异常分布研究的结果也相吻合.

5 讨论与结论

本文以汶川地震为例, 选取震中距较小的位于不同断裂带上的四口地下水位监测井两年多的水位观测资料进行潮汐分析, 计算和分析了汶川地震前后各个井地下水 M_2 波潮汐因子与 M_2 波相位滞后以及潮汐残差相位滞后随时间的变化, 发现了地震发生时, 各个观测井水位数据的相位滞后处于快速下降阶段, 也就是井孔水位对于地壳应变响应时间减少, 这可能反应了地震孕育过程中应力的积累导致了含水层渗透性的增大; M_2 波潮汐因子则处在快速变化阶段, 在离震中较近地区出现潮汐因子上升异常, 较远地区出现潮汐因子下降异常. 发震时潮汐残差矢量相位差基本处于下降或最低点也反映了发震时岩体发生破裂后的应力应变状态. 这些参量的异常现象符合地震扩容理论, 它们的异常反映了含水层孕震过程中应力应变状态变化过程.

一次强震的发生往往涉及到多个地块与地块边界的活动断裂带, 通过对这些部位的地下水位监测井数据进行分析我们可以捕捉到一些地震孕育过程中的地壳应力应变信息. 然而, 由于大地震所能造成的地下水位前兆异常的空间范围非常大, 这也使得我们对于地震发震地点的准确预测产生了困难. 同时, 由于地震形成的复杂性, 到目前为止还没有确切的一种理论可以完全解释其形成机制, 本文利用地

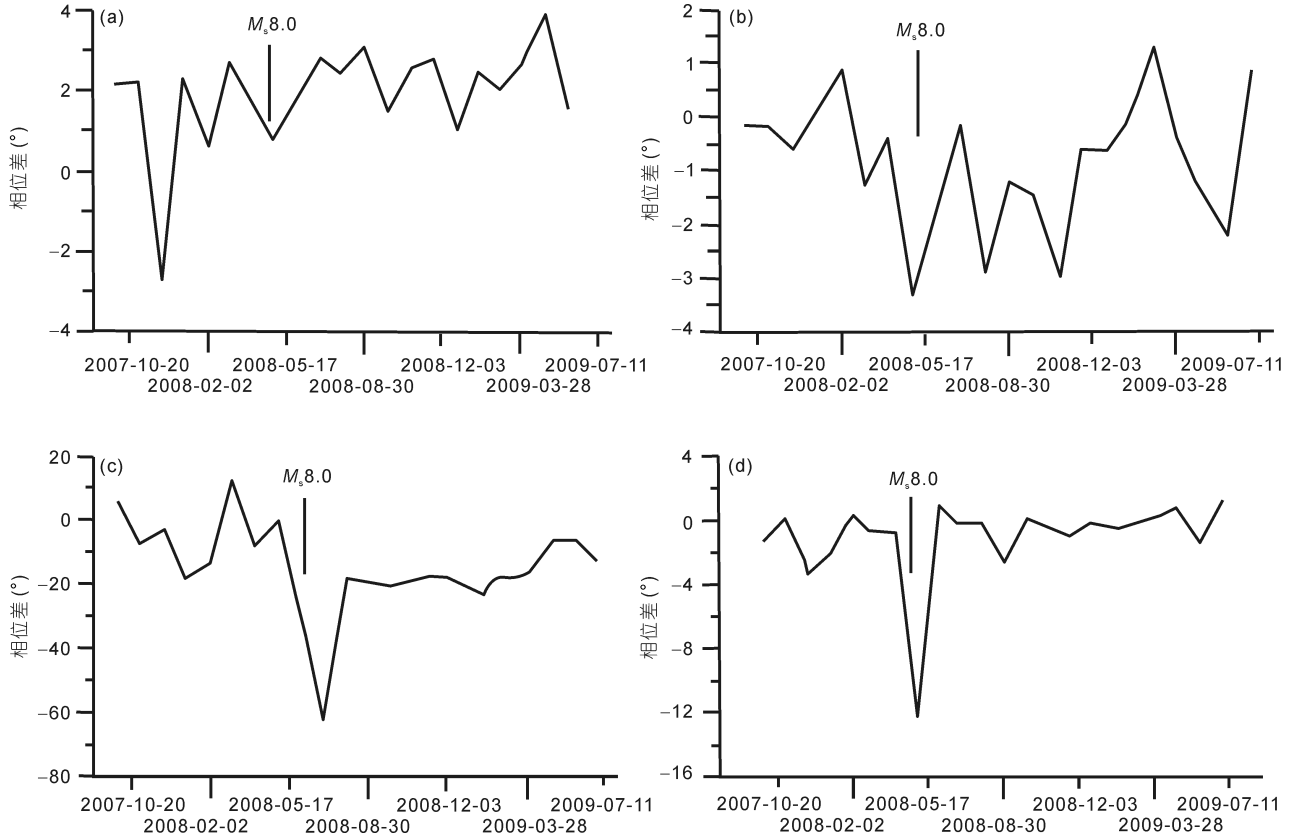

图 7　残差矢量相位差随时间变化图

(a) 介休井; (b) 南溪井; (c) 孝义井; (d) 邛崃井

下水潮汐信息进行的地震前兆及其形成机制的探索也只是一种尝试, 未来还需要进一步利用更多的观测井数据以及更多的震例资料对其进行验证, 从而深入了解孕震过程中井-含水层系统的应力应变变化.

致谢　感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1　Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes cannot be predicted. Science, 1997, 275: 1616
2　Wyss M. Cannot earthquake be predicted? Science, 1997, 278: 487–490
3　Geller R J. Earthquake prediction: A critical review. Geophys J Int, 1997, 131: 425–450
4　Scholz H C, Sykes L R, Aggarwal Y P. Earthquake prediction: A physical basis. Science, 1973, 181: 803–810
5　车用太, 刘成龙. 汶川地震后关于地震预测问题的再思考. 国际地震动态, 2008, 10: 1–6
6　王广才, 沈照理. 地震地下水动态监测与地震预测. 自然杂志, 2010, 32: 90–93
7　晏锐. 影响井水位变化的几种因素研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2008. 1–4
8　张昭栋, 郑金涵. 中国地下水潮汐研究的新进展. 国际地震新动态, 1991, 6: 1–5
9　邓亮, 刘春平, 万飞, 等. 从水位观测数据中排除非构造因素影响的状态空间分析方法. 华北地震科学, 2009, 27: 17–21
10　汪成民, 车用太, 万迪堃, 等. 地下水微动态研究. 北京: 地震出版社, 1988. 11–14
11　Melchior P J. The Tide of the Planet Earth. NewYork: Pergamon Press, 1983. 241–243
12　万永革, 黄猛. 固体潮汐理论值算法在 VB6.0 中的应用与实现. 地震地磁观测与研究, 2006, 27: 97–102
13　廖欣. 承压井水位潮汐异常机理研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学, 2010. 1–2

14 刘澜波, 郑香媛. 井水固体潮分析结果及其在地震预报中的应用. 地震, 1985, 1: 7–12
15 张文革, 刘宝恒. 地下水动态固体潮畸变与地震. 东北地震研究, 1992, 8: 73–80
16 王勇. 宁夏井水位固体潮调和分析结果及应用. 地震地质, 1992, 14: 245–250
17 唐九安, 简春林, 孙振璈. 高村井水位潮汐参数的动态特征及其对大同地震前兆响应. 地震, 1996, 16: 277–283
18 王勇, 刘福生, 张国红, 等. 1998 年 1 月 10 日张北尚义 6.2 级地震前昌平地震台应变资料的异常变化分析. 西北地震学报, 1999, 21: 274–279
19 李正媛, 陈鹏, 林穗平, 等. 川滇强震震源区形变潮汐短临变化特征. 大地测量与地球动力学, 2003, 23: 55–60
20 陈志遥, 吕品姬, 李正媛, 等. 汶川 M_s8.0 级地震前的潮汐变化分析. 大地测量与地球动力学, 2009, 29: 47–50
21 Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure Appl Geophys, 1979, 117: 1025–1044
22 黄辅琼. 中国大陆地震地下水观测井网对远距离大地震的响应. 博士学位论文, 北京: 中国地震局地球物理所, 2008. 79–80
23 Igarashi G, Wakita H. Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells. J Geophys Res, 1991, 96: 4269–4278
24 Toll N J, Rasmussen T C. Removal of barometric press effects and earth tides from observed water levels. Ground water, 2007, 45: 101–105
25 Venedikov A P, Arnoso J, Vieira R. VAV: A program for tidal data processing. Comput Geosci, 2003, 29: 487–502
26 Elkhoury J E, Brodsk E E, Agnew D C. Seismic waves increase permeability. Nature, 2006, 441: 1135–1138
27 车用太, 鱼金子等. 地震地下流体学. 北京: 气象出版社, 2006. 380–383
28 Jonsson S P, Segall P, Pedersen R, et al. Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. Nature, 2003, 424: 179–183
29 Quilty E G, Roeloffs E A. Water-level changes in response to the 20 December 1994 earthquake near Parkfield, California. Bull Seismol Soc Amer, 1997, 87: 310–317
30 Roeloffs E A. Poroelastic techniques in the study of earthquake related hydrologic phenomena. Adv Geophys, 1996, 37: 135–195
31 Huang F Q, Jian C L, Tang Y, et al. Response of some wells in the mainland subsurface fluid network of China, due to the september 21, 1999, M_s 7.6 Chi-Chi earthquake. Tectonophysics, 2004, 390: 217–234
32 杨竹转, 邓志辉, 刘春国, 等. 中国大陆井水位与水温动态对川 M8.0 级地震的同震响应特征分析. 地震地质, 2008, 30: 895–905
33 张雁滨, 蒋俊, 周翠屏. 地表潮汐线应变、剪应变与面应变观测的残差矢量及其震兆变化. 地壳形变与地震, 1996, 16: 49–54
34 车用太, 谷元珠, 鱼金子. 昆仑山口西 M_s 8.1 级地震前地下流体远兆异常及其意义. 地震, 2002, 22: 106–113