

赵爱平, 周红艳. 不同力源作用下九江地震台井水位仪与伸缩仪的体应变响应分析[J]. 华南地震, 2014, 34(4): 94-101. [ZHAO Aiping, ZHOU Hongyan. Analysis of Volumetric Strain Response of Water-level Instrument and Extensometer Caused by the Action of Different Forces in Jiujiang Seismic Station[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(4): 94-101.]

不同力源作用下九江地震台井水位仪与 伸缩仪的体应变响应分析

赵爱平, 周红艳

(江西省地震局, 南昌 330039)

摘要: 根据潮汐因子计算结果, 确定了井水位观测格值。又由线应变和水位与体应变转换公式, 分别计算了在固体潮、大气压、强远震和承压含水层排水作用下伸缩仪与水位仪的体应变响应量, 二者相对变化率(体应变比值)在 0.242~0.668 之间, 分析比较了二者的响应特征, 并初步解释了水位与应变同步变化的物理机制。

关键词: 水位仪; 伸缩仪; 体应变响应; 气压; 强远震; 承压含水层排水

中图分类号: P315.723 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 04-0094-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.04.017

Analysis of Volumetric Strain Response of Water-level Instrument and Extensometer Caused by the Action of Different Forces in Jiujiang Seismic Station

ZHAO Aiping, ZHOU Hongyan

(Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang 330039, China)

Abstract: Based on calculation results of the tidal factor, the paper determines the value of the observation grid of well water level. Then, according to conversion formula of the linear strain and volumetric strain, the paper calculates the volumetric strain magnitudes of the extensometer and water-level instrument caused by tide, atmospheric pressure, strong teleseisms and drainage action of confined aquifer. The relative variance ratios of volumetric strain are between 0.242 and 0.668. The paper analyzes the response characteristics of both, and preliminarily explains the physical mechanism of synchronous changes in the water level and the strain.

Keywords: Water level instrument; Extensometer; Volumetric strain response; Air pressure; Strong teleseismic; Confined aquifer drainage

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 地震科技星火计划项目 XH13014Y 资助

作者简介: 赵爱平 (1974-), 男, 工程师, 要从事前兆台网运行及前兆分析预报工作。

E-mail: zhaoaip8000@sina.com.

0 引言

大量的观测事实表明,能够记录到固体潮的承压井可将水位当作灵敏的体应变仪^[1-2],刘序俨等^[3]基于弹性力学与流体静力学原理,导出了承压含水层这种弹性孔隙介质的井水位与体应变关系式,给出了在孔隙度等于0和1时井水位的理论格值范围,认为可以将M2波潮汐因子的倒数作为该井水位观测系统的格值计算体应变。SS-Y型伸缩仪能测量地表两点间基线的相对变化(线应变),利用线性组合可求得地表体应变^[4]。陈莹等^[5]分析了漳州台2008年5月12日汶川8.0级地震时水位仪、体应变仪、伸缩仪和地震仪记录的体应变幅值水平,李航^[6]采用最大相关系数法分析了川18井和仁和台水位及应变资料认为测点处的应力应变场是地下水位变化的主导因素。九江地震台安装了水位仪和伸缩仪,二者相距30 m,均能清晰地检测到固体潮汐、强远震、气压等幅值大小不一的地壳应力-应变事件,为分析局部的动力环境变化创造了条件,本文以该台井水位和伸缩仪的体应变响应数据为基础,研究区域地壳应力作用下不同仪器的响应特征及其差异,这对该地区地震前兆异常的探索有实际意义。

1 九江台水位和洞体应变观测概况

九江台位于江西省北部,地理位置为东经116.01°,北纬29.65°,海拔110 m。台址所属地处

庐山西北侧,在大地构造上属于扬子陆块下扬子地块中部,区域构造位于庐山山体西北缘的边缘剪切带上的夏家-威家岭左行走滑断裂带上,该断裂带呈北东向走向,延伸约8 km,宽约1~1.5 km,总体倾向320°~330°,倾角60°~70°,在中-新生代以来长期多次活动,继承了早第四纪时发生的断块抬升运动,并控制第四纪的分布^[7]。1911年2月6日在该断裂带发生5.0级地震,该地震距台站仅1.5 km。

九江台水位井深71 m,主要出露第四系联圩组(Qh1al)亚粘土、砂砾石和震旦系皮园组(Z2P)强风化炭质硅质岩,厚度约6~10 m,井底为下元古代砂岩,井孔套管至11.4 m,含水层在38.34~40.67 m、58.32~61.48 m和64.36~67.25 m,主要含水层为下两个,累积厚度约6 m,储水性好,基本不受地表潜水影响,属构造承压井,接受大气降雨和断裂带远程补给。形变观测山洞进深45 m,覆盖层厚25 m,洞内年温差<1.0℃,日温差<0.02℃,洞体基岩为硅质灰岩,其上山体高约70 m,近EW走向,EW缓、NS陡,表层植被丰富。九江台水位、洞体应变观测环境及地层分布见图1。

2007年5月开始水位观测,正常情况下固体潮记录清晰,水位年变幅约50 cm。SS-Y型石英伸缩仪安装于2007年3月,仪器分辨力优于 10^{-9} ,漂移小于 10^{-6} /年,NS、EW分量的应变格值分别为 1.84×10^{-9} mV和 1.43×10^{-9} mV,能记录到清晰固体潮,稳定性好。

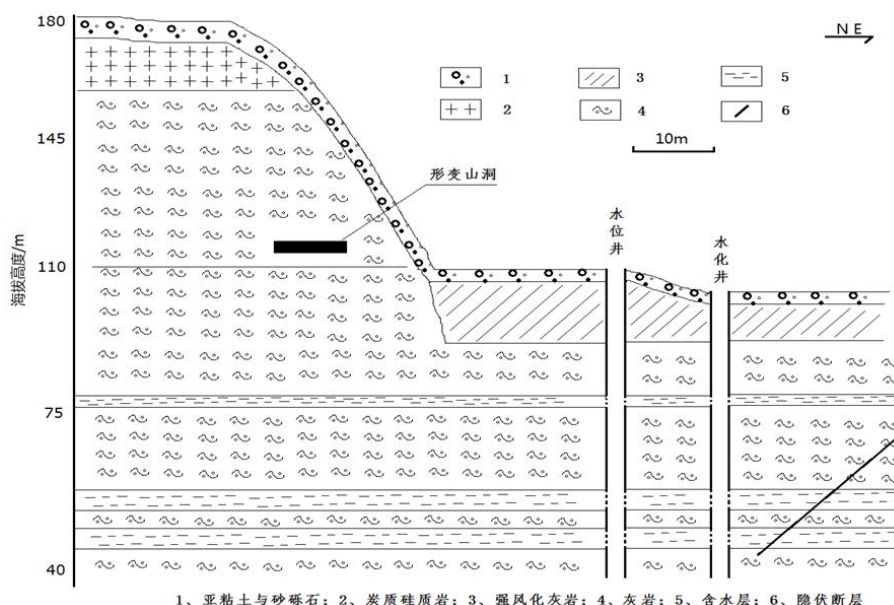


图1 九江台观测场地地层剖面图

Fig.1 The stratigraphic section of observation site in Jiujiang seismic station

2 处理方法

2.1 伸缩仪与体应变

根据弹性力学理论, 位移可分解为平移、旋转与应变三个部分, 应变部分可用应变张量矩阵表达, 其表达式为

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 ε_{ii} ($i=1, 2, 3$) 为在某一正交曲线坐标系沿坐标轴方向上的线应变, 可由伸缩仪进行观测。 ε_{ij} ($i \neq j$) ($i, j=1, 2, 3$) 表示在 ij 平面上 i 轴与 j 轴之间的剪应变, 且 $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, 表示应变张量矩阵为一对称矩阵, 该矩阵的迹为一几何不变量^[8], 即:

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (2)$$

式(2)中, Δ 为该质点处的体应变。根据弹性力学理论, 地表面一点的任意两个正交方向上线应变之和亦为一与坐标系选择无关的几何不变量, 这个量即为该点的面应变。在近地表面, 面应变的 $2/3$ 即为该点的体应变^[9], 即

$$\Delta = \frac{2}{3} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \quad (3)$$

式(3)中, ε 、 $\Delta < 0$, 表示压缩, 反之为膨胀。因此, 可以用伸缩仪观测到的两个分量的线应变, 经过(3)式的转换, 即可获得观测点的体应变值。

2.2 水位仪与体应变

对井水位进行调和分析, 其 M2 波群的潮汐因子作为井水位观测系统的灵敏度, 其倒数即为井

水位观测系统的格值^[3]。

考虑到观测井-含水层系统实际体应变与采用理论模型计算的理论体应变的差异, 可用九江台伸缩仪资料计算出实际体应变, 经调和分析求得实测体应变潮汐因子, 则水位体应变实际格值可按如下公式计算:

$$\eta = 1/\gamma_{\text{水}} * \gamma_{\text{体}} \quad (4)$$

式(4)中 η 为水位体应变格值, $\gamma_{\text{水}}$ 为水位潮汐因子, $\gamma_{\text{体}}$ 为体应变潮汐因子。

2.3 体应变相对变化率

九江台水位井与伸缩仪测量基线相距仅十几米, 可以近似看成同一个测点, 水位仪观测的是井-含水层系统对体应变的响应, 伸缩仪观测山体岩层对体应变的响应, 二者应具有可比性。定义下式来定量表征两种仪器对体应变响应的相对变化:

$$\alpha = \Delta_{\text{伸}} / \Delta_{\text{水}} \quad (5)$$

式(5)中, α 为体应变相对变化率, $\Delta_{\text{伸}}$ 为伸缩仪测得的体应变, $\Delta_{\text{水}}$ 为水位仪测得的体应变, α 反映了这两种仪器测得的体应变的相对变化, 越接近于 1 表明两者越接近。

3 数据分析

3.1 水位观测格值的确定

取九江台 2010 年 1 月至 2013 年 10 月的水位资料作调和分析, 潮汐因子序列稳定, 观测精度高(图 2), 取稳定段均值作为水位潮汐因子。2012

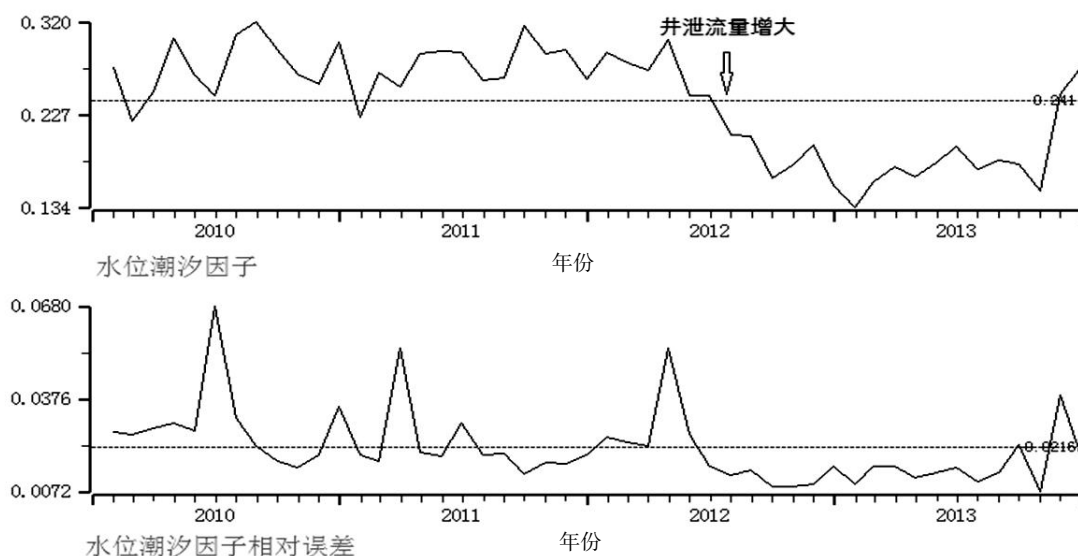


图 2 水位潮汐因子及其观测精度

Fig.2 The water-level tide factor and its observation accuracy

年 6 月后, 由于水井泄流情况发生改变, 采用分段计算水位体应变格值的方法, 2010 年 1 月至 2012 年 6 月水位潮汐因子均值为 0.275, 2012 年 7 月至 2013 年 10 月水位潮汐因子均值为 0.175, 根据式 (4), 水位体应变格值分别为 1.847×10^{-9} mm 和 3.646×10^{-9} mm, 与文献[5]中福建厦门、闽候和尤溪井的所取的格值相当。

3.2 固体潮响应

九江台水位固体潮日潮差为 10~30 mm, 线应变固体潮日潮差为 $(10\sim50)\times10^{-9}$ 。在 2010 年 1 月至 2013 年 10 月期间, 每月取 1 次形态清晰的固体潮双振幅数据, 剔除线性漂移, 避开降雨、气压、地震等影响因素的干扰, 计算水位仪和伸缩仪测得的体应变及其相对变化率, 如表 1。

表 1 九江台固体潮引起的体应变统计

Table 1 The volumetric strain caused by the tide in Jiujiang seismic station

日期	水位/m	$\varepsilon_{\text{面}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{水}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{伸}} (10^{-9})$	α
2010-01-28	0.031	57.75	57.26	38.50	0.672
2010-02-05	0.021	22.72	38.79	15.15	0.390
2010-03-28	0.037	44.78	68.34	29.85	0.437
2010-04-26	0.026	30.36	48.02	20.24	0.422
2010-05-28	0.026	44.66	48.02	29.78	0.620
2010-06-25	0.023	54.60	42.48	36.40	0.857
2010-07-04	0.009	26.76	16.62	17.84	1.073
2010-08-26	0.024	47.05	44.33	31.36	0.708
2010-09-09	0.028	38.47	51.72	25.65	0.496
2010-10-05	0.015	36.51	27.71	24.34	0.879
2010-11-05	0.026	43.75	48.02	29.16	0.607
2010-12-03	0.027	45.68	49.87	30.45	0.611
2011-01-02	0.026	51.96	48.02	34.64	0.721
2011-02-25	0.014	37.51	25.86	25.01	0.967
2011-03-02	0.022	42.51	40.63	28.34	0.697
2011-04-11	0.031	60.01	57.26	40.00	0.699
2011-05-03	0.034	37.61	62.80	25.07	0.399
2011-06-12	0.02	28.09	36.94	18.73	0.507
2011-07-01	0.032	40.36	59.10	26.90	0.455
2011-08-26	0.022	33.20	40.63	22.13	0.545
2011-09-03	0.013	29.85	24.01	19.90	0.829
2011-09-10	0.037	46.02	68.34	30.68	0.449
2011-09-26	0.032	58.75	59.10	39.17	0.663
2011-10-09	0.031	29.92	57.26	19.94	0.348
2011-11-10	0.024	38.18	44.33	25.45	0.574
2011-12-25	0.031	51.84	57.26	34.56	0.604
2012-01-20	0.027	31.08	49.87	20.72	0.415
2012-02-18	0.034	53.90	62.80	35.93	0.572
2012-03-07	0.031	44.71	57.26	29.80	0.521
2012-04-07	0.031	58.3	57.26	38.86	0.679
2012-05-06	0.025	42.93	46.18	28.62	0.620
2012-06-01	0.027	50.81	49.87	33.87	0.679
2012-07-19	0.02	59.90	72.92	39.94	0.548
2012-08-01	0.022	52.91	80.21	35.27	0.440
2012-09-27	0.019	62.24	69.27	41.49	0.599
2012-10-28	0.014	54.69	51.04	36.46	0.714
2012-11-27	0.015	43.31	54.69	28.87	0.528
2012-12-27	0.018	56.77	65.63	37.85	0.577
2013-01-25	0.019	49.52	69.27	33.02	0.477
2013-02-22	0.015	51.03	54.69	34.02	0.622
体应变相对变化	0.605(均值)	均方差	0.160	相对标准偏差	26.45%

3.3 气压变化响应

九江台气压多年来在 990~1 030 hPa 间变化, 每日变化幅度约 5 hPa 左右, 气压与水位具有负相关关系, 体应变观测普遍受气压的影响^[9-10]。避开降雨、抽水等干扰因素, 取气压显著上升过程来

作分析, 气压增大, 水位下降, 线应变 NS、EW 降低。共收集九江台 11 次气压变化 11.8 hPa 以上的水位和线应变同步变化资料, 分别计算面应变、体应变及其相对变化率等, 见表 2, 可看出, 体应变相对变化率均值为 0.242。

表 2 气压上升引起的体应变统计

Table 2 The volumetric strain caused by the air pressure raising in Jiujiang seismic station

起止日期	气压/hPa	水位/m	$\varepsilon_{\text{面}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{水}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{伸}} (10^{-9})$	α
2010-10-24~26	17.20	-0.074	-43.70	-136.68	-29.13	0.213
2010-11-13~15	14.20	-0.049	-17.30	-90.50	-11.53	0.127
2010-12-05~07	16.84	-0.058	-44.33	-107.13	-29.55	0.276
2011-03-13~15	23.70	-0.087	-87.41	-160.69	-58.27	0.363
2011-09-07~11	13.00	-0.068	-43.10	-125.60	-28.73	0.229
2011-09-17~19	11.80	-0.059	-33.26	-108.97	-22.17	0.203
2011-12-13~16	14.20	-0.038	-22.13	-70.19	-14.76	0.210
2012-04-02~03	21.06	-0.114	-100.96	-210.56	-67.31	0.320
2013-01-01~03	20.77	-0.049	-93.27	-178.65	-62.18	0.348
2013-02-07~08	16.49	-0.045	-60.28	-164.07	-40.18	0.245
2013-11-26~28	15.69	-0.053	-36.11	-193.24	-24.07	0.125
体应变相对变化	均值	0.242	均方差	0.0796	相对标准偏差	32.89%

3.4 强远震响应

九江台水位仪和伸缩仪均能记录到强远震的同震响应。Cooper^[11]等认为任何类型的能够造成含水层体膨胀或垂直运动的地震波都能引起水位的波动, 水位的波动主要由 15~20 s 的瑞雷波引起。车用太等^[12]收集了我国地震地下水动态观测网中的几十口井的资料, 对 1983 年 5 月 26 日日本秋田

7.8 级地震记录的水位振幅进行了对比研究, 发现具有强透水性的碳酸盐岩含水层中井孔记震比例高达 88%, 九江台基岩为碳酸盐类的硅质灰岩。选取 2008~2013 年全球 7.4 级以上的地震 18 次, 分别统计水位水震波和线应变 NS、EW 最大双振幅数据, 计算面应变、体应变值及其相对变化率, 见表 3, 可看出, 体应变相对变化率均值为 0.47。

表 3 强远震引起的体应变统计

Table 3 The volumetric strain caused by the strong teleseismic

发震时刻	震级	地点	震中距/km	水位/mm	$\varepsilon_{\text{面}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{水}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{伸}} (10^{-9})$	α
2008-02-20	$M 7.7$	印尼苏门答腊	3.70	48	88.66	15.20	10.13	0.11
2008-05-12	$M 8.0$	四川汶川县	1.22	275	507.93	495.84	330.56	0.65
2009-01-04	$M 7.7$	印度尼西亚巴布亚群岛北部	3.80	13	24.01	15.00	0.00	10.42
2009-09-30	$M 8.0$	萨摩亚群岛地区	9.30	22	40.63	20.30	13.53	0.33
2009-09-30	$M 7.7$	印尼苏门答腊南部	3.80	47	86.81	41.80	27.87	0.32
2009-10-08	$M 7.7$	瓦努阿图	7.20	53	97.89	45.70	30.47	0.31
2010-02-27	$M 8.8$	智利	19.00	134	247.50	146.40	97.60	0.39
2010-04-07	$M 7.8$	苏门答腊北部	3.63	218	402.65	70.40	46.93	0.12
2011-03-11	$M_w 9.0$	日本本州东海岸附近海域	2.62	672	1241.18	1186.80	791.20	0.64
2012-04-11	$M 8.6$	苏门答腊北部附近海域	3.90	404	746.19	911.00	607.33	0.81
2012-04-11	$M 8.2$	苏门答腊北部附近海域	4.10	154	284.44	348.30	232.20	0.82
2012-10-28	$M 7.7$	夏洛特皇后群岛地区	8.70	11	20.32	15.60	8.22	0.40
2012-12-07	$M 7.4$	日本本州东海岸附近海域	2.80	17	31.40	35.70	18.80	0.60
2013-01-05	$M 7.8$	阿拉斯加东南部海域	8.40	21	38.79	17.20	9.06	0.23
2013-04-16	$M 7.7$	伊朗、巴基斯坦交界地区	5.20	12	22.16	22.90	12.06	0.54
2013-05-24	$M 8.2$	鄂霍次克海	4.10	10	18.47	32.60	7.171	0.93
2013-09-24	$M 7.8$	巴基斯坦	4.90	15	27.71	24.50	12.90	0.47
2013-11-17	$M 7.8$	斯科舍海	16.30	22	40.63	22.30	11.74	0.29
体应变相对变化			均值	0.47	均方差	0.24	相对标准偏差	50.21%

图3为2008年5月12日四川汶川8.0级地震时九江井水位与洞体应变响应图像。

3.5 承压含水层排水响应

2008年9月8日起,距水位井10 m处,新钻一口水化井,孔径为130 mm,终孔71 m,11月3日停止钻孔。9月23日打穿第一个含水层,17~22 m,有少量水溢出,水位和线应变无明显变化,10

月13日进入第二个含水层,58~63 m,大量水涌出,流量可达15吨/小时,水位开始大幅下降,线应变NS、EW同步减小,至10月25日,水位和线应变停止下降,如图4。根据水位、线应变NS、EW变化速率的不同,可把这次承压含水层卸载分为突然释放、平稳释放和剩余释放三个阶段,计算面应变、体应变值及其相对变化率,见表4,可看出,体应变相对变化率均值为0.668。

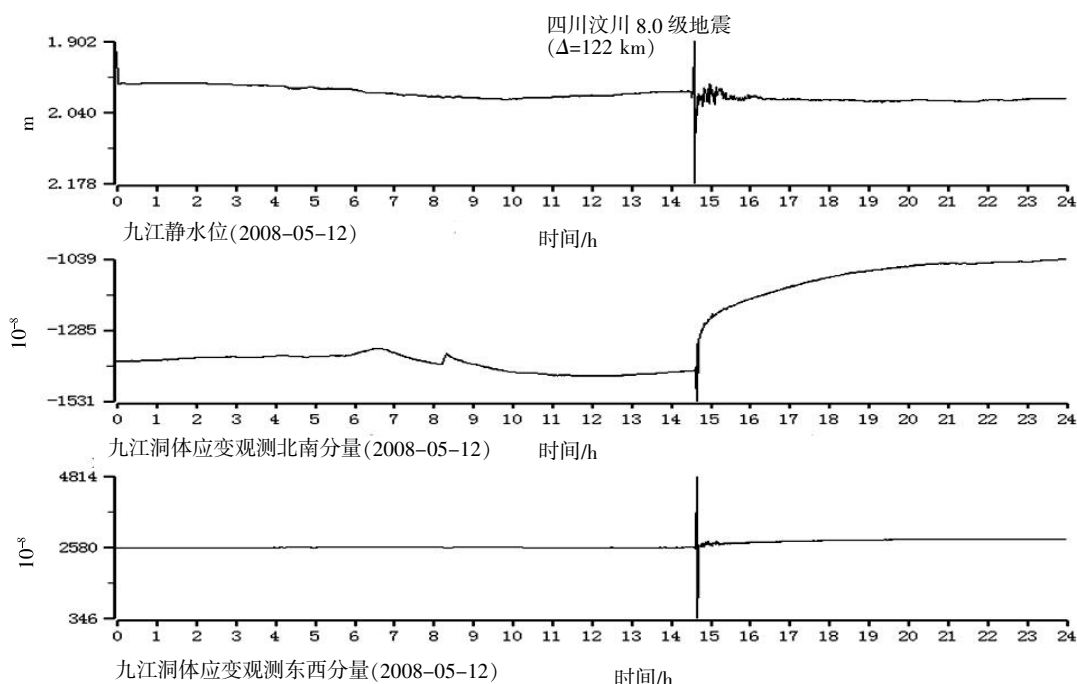


图3 九江台水位与洞体应变对四川汶川8.0级地震的响应

Fig.3 The responses of water-level and cave strain of Jiujiang seismic station to the Wenchuan M 8.0 earthquake occurred in Sichuan province

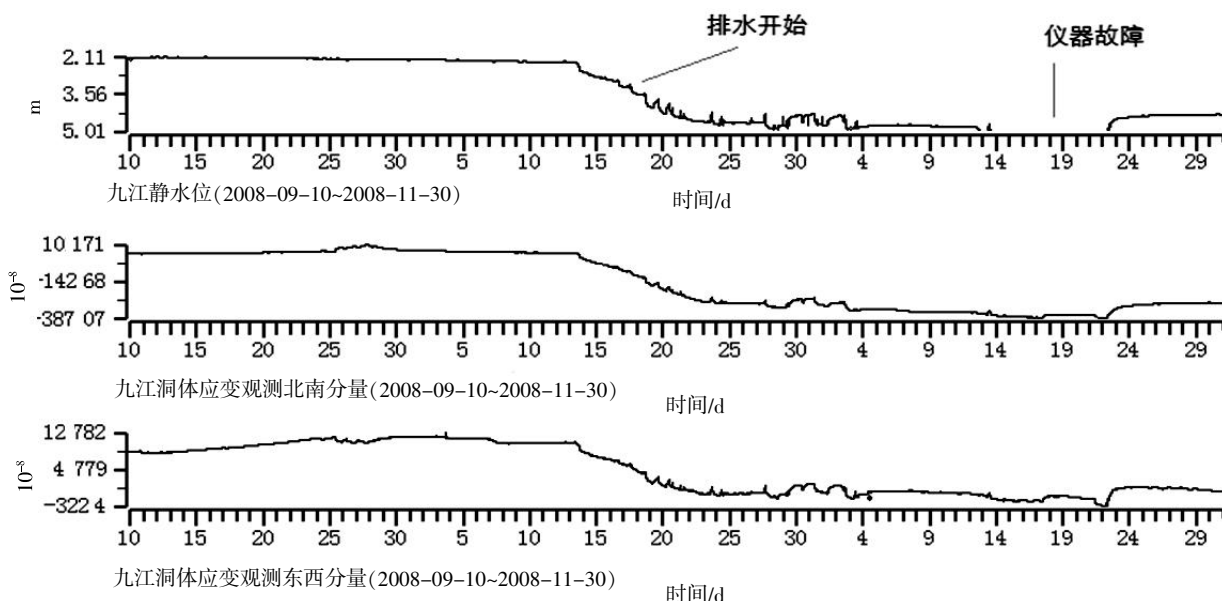


图4 九江台承压含水层排水引起的水位和应变变化

Fig.4 The strain and water level variations caused by drainage of the confined aquifer in Jiujiang seismic station

表 4 九江台承压含水层排水引起的应变变化

Table 4 The strain variations caused by drainage of the confined aquifer in Jiujiang seismic station

时 间	水位/m	$\varepsilon_{\text{面}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{水}} (10^{-9})$	$\Delta_{\text{伸}} (10^{-9})$	α
10-13 14:04~23:59	-0.373	-528.27	-688.93	-352.18	0.511
10-14~10-18	-1.364	-2 335.72	-2 519.31	-1 557.15	0.618
10-19~10-25	-0.648	-1 551.04	-1 196.86	-1 034.03	0.864
总时段	-2.385	-4 415.03	-4 405.10	-2 943.36	0.668

4 结语

4.1 体应变响应量级与相对变化率

基于观测事实，分别统计了不同作用力对水位、应变产生的影响，固体潮汐、气压变化、强远震和深含水层卸载均能引起水位、应变的同步变化，实测应变量为：2008 年 10 月 13 日至 10 月 19 日，九江台深含水层排水引起的体应变在 10^{-6} 量级；7.4 级以上强远震引起的体应变在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级；台站气压变化 11~21 hPa 期间引起的体应变在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级；固体潮汐引起的体应变在 10^{-8} 量级。

水位仪、伸缩仪对体应变响应在时域上基本同步，即对于地壳不同作用力，这两种仪器能同时做出响应，体现了同源观测的特点。从伸缩仪和水位测得的体应变相对变化看， α 系数均小于 1，前者均小于后者，如图 5，固体潮响应 α 均值为 0.605，气压变化为 0.242，强远震为 0.470，承压含水层排水为 0.668，这或许与两种仪器进行体应变观测的机制不同有关，伸缩仪观测的是近地表的面应变，而水位仪观测的是井-含水层系统对体应变的响应，可以看出，气压变化引起的体应变 α 值明显偏小，说明气压对伸缩仪影响小，对井水位影响大，前者气压是通过山体对洞中伸缩仪产生间接影响，而后者气压是直接作用在井孔水面上。

4.2 水位与应变同步变化的物理解释

对于理想的水平层状承压含水层，假定各层的力学性质是各向同性的理想弹性体，考虑在承压含水层中，单位体积多孔介质中流体含量的改变量为零，饱和岩石含水层总应力由岩石固体骨架和孔隙水两部分共同承担，岩体变化引起的孔隙压力变化与平均应力成正比。根据线性孔隙弹性理论和流体静力学基本方程，文献[13]给出了对于含水层这种弹性孔隙介质，由静水压力所产生的弹性孔隙介质的体应变公式：

$$\Theta = - \left(\frac{1-n}{B_s} + \frac{n}{B_w} \right) pgh \tag{6}$$

式(6)中 Θ 为体应变， n 为含水层的孔隙度， B_s 和 B_w 分别为岩石和流体的体积模量， pgh 为水的重度， h 为井水位的埋深。

九江台水位井是由多个含水层和岩体骨架组成的承压含水层系统，在岩石含水层饱和或达到静力平衡的条件下基本遵循上面的关系式。由式(6)可知，当水位埋深降低，含水层静水压力减小，体应变相应减小。由实际观测可知，在气压上升时，水位下降，线应变 NS、EW 分量同步减小，体应变相应减小；在承压含水层排水时，水位大幅下降，线应变两个分量同步大幅减小，体应变亦相应减小。表明伸缩仪观测到的体应变与含水层变化(水位埋深变化)有关，且与理论结果相符。

另一方面，由于水化井打穿承压含水层的水井发生自流导致含水层大幅减压，水位下降 2 m 余，数年后一直未恢复，我们按式(6)估算含水层孔隙度发生的变化。灰岩的 B_s 取 3.1×10^{10} Pa，水的 B_w 取 2.2×10^9 Pa^[14]， ρg 可取 10^4 Pa/m，在承压含水层排水阶段按式(6)计算，含水层孔隙度 n 为 0.216，在此事件前，由固体潮汐引起的水位波动和同时刻的体应变值计算的 n 值在 0.25~0.31 之间，含水层孔隙度出现一定程度的下降，表明岩体骨架和含水层系统可能发生失水过程，从而导致系统介质的收缩，而伸缩仪记录到的线应变 NS、EW 的降低或许正是这种效应的观测证据。

参考文献：

[1] Bodvarsson G. Confined fluids as strain meters [J]. J Geophy Res, 1970, 75 (14): 2711-2718.
[2] 汪成民，车用太，万迪堃，等，地下水微动态研究 [M]. 北京：地震出版社，1988.
[3] 刘序俨，郑小菁，王林，等.承压井水位观测系统对体应变的响应机制分析[J]. 地球物理学报，2009，52 (12): 3147-3157

- [4] 刘序俨, 李平, 张雁滨. 地表的面应变和体应变固体潮理论值计算及其调和分析[J]. 地壳形变与地震, 1988 (4): 354-358.
- [5] 陈莹, 刘序俨. 汶川大震时福建四种观测系统的体应变响应分析[J]. 华南地震, 2009, 29 (4): 85-94.
- [6] 李航. 地下水位与应变的相关性分析[J]. 内陆地震, 2001, 15 (3): 247-251.
- [7] 江西地质矿产勘查开发局. 中华人民共和国地质图说明书(海会幅 H-50-89-A)[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [8] 王敏中, 王炜, 武际可. 弹性力学教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [9] 苏恺之, 李海亮, 张钧, 等. 钻孔地应变观测新进展[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [10] 张凌空, 牛安福. 不同周期气压波对钻孔体应变仪观测结果的影响[J]. 中国地震, 2008, 24 (4), 415-421.
- [11] H H Cooper. The Response of Well-Aquifer Systems to Seismic Waves [J]. J Geophysical Res, 1965, 70 (16): 3915-3926
- [12] 车用太, 王铁成, 鱼金子. 我国水震波研究的现状与动向[J]. 地震, 1989 (20): 70-72
- [13] 刘序俨, 郑小菁, 陈莹, 等. 承压井与非承压井水位潮汐效应及其定量分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33 (1): 35-39.
- [14] 毛根海, 邵卫云, 张燕, 等. 应用流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, .