

印尼苏门答腊海域强震与广东地下水位响应特征研究^{*}

万永芳, 李健梅

(广东省地震局, 广东 广州 510070)

摘要: 2004年以来印尼苏门答腊海域发生了4次8.3级以上巨大地震, 广东地区地下水位观测记录到这4次地震的大量响应信息, 归纳这些响应信息的表现形态、特征、及响应过程, 获得响应强弱与震级大小之间的关系以及响应的“敏感点”等。通过总结这4次强震响应信息, 有助于理解强地震的衰减过程和开展震源物理相关研究。

关键词: 印尼强震; 强震响应; 地下水位; 广东

中图分类号: P315.72⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)02-0069-06

印尼苏门答腊海域2004年12月26日8.7级地震、2005年3月29日8.5级地震、2007年9月12日8.5级地震和2007年9月13日8.3级地震(本文下面研究中提到的地震均指这4次强震)是近40年来全球发生的最强烈的4次地震事件, 并引起广东地区大量微观水位记录异常变化。国际地震学者认为, 同震响应研究是揭示地壳介质对应力—应变过程响应最直接和最有效的手段之一^[1]。目前对同震响应的研究已成为地震基础理论研究的热点之一。系统收集和整理这些响应信息, 有利于评价各水位观测井对应力应变反映的特点、强弱和能力。

选用广东地区构造部位较为敏感、观测资料连续的8个数字化观测井的资料。各测项都属静水位, 采样率均为1sample/min, 其中汕头台、深圳台观测点采用LN-3型水位仪进行观测, 电白台、南海台、中山台、顺德台、增城台和东莞台观测点都采用DLKH-19水位传感器进行观测。各测点与印尼4次强震震中距离约2 200~3 000 km。

1 印尼巨大地震引起的广东水位响应记录

一般说来, 地震响应是指强烈地震发生后, 地震波向外传播时发生的“共振”现象^[2]。本文中强震响应记录主要指印尼4次强震发生后, 广东微观水位观测井对其响应或激发而形成的异常, 包括延迟数分钟到数天内在相应台站观测到的显著波动、阶跃变化等。

1.1 2004年12月26日08:58印尼8.7级地震响应记录

广东台网87%的观测井记录到此次强震响应。水位固体潮畸变形态多样, 表现为缓降阶跃变化(如电白台观测井)、突升阶跃变化(如顺德台观测井)、振荡变化(如中山台观测井)等。响应幅度都大于3 mm, 最大达70 mm(表1, 图1)。

(1) 电白台水位记录到地震波引起的振荡变化, 震后20 h, 出现水位下降阶变, 幅度约25 mm, 之后水位在一个新的基值附近变化。

(2) 南海台水位记录到振荡变化和阶跃变化, 阶跃升幅达70 mm, 震后变化形态属“振荡—缓慢上升—恢复”型。

(3) 汕头台水位于震后约15 min出现阶变, 之后16 min内下降幅度达34 mm, 震后变化形态属“突然下降—恢复”型。

(4) 顺德台水位记录到小幅振荡变化, 震后约11 min出现阶变, 随后10 min内上升约28 mm, 震后变化形态属“突然上升—振荡—恢复”型。

(5) 中山台水位分钟值数据显示, 震后约7 min, 固体潮波形出现畸变, 记录到的振荡幅度有16 mm, 至27日01:00点固体潮形态恢复正常, 震后变化形态属“振荡—恢复”型。

(6) 深圳台水位震后约16 min出现上升阶变, 但变幅很小, 仅有6 mm, 至26日10:26后水位开始回落, 其变化属“缓慢上升—恢复”型。

(7) 增城台水位震后约14 min显现上升阶变, 幅度仅为3 mm, 26日09:30已恢复至震前时的变化趋势。

^{*} 收稿日期: 2008-11-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAC01B02-03-03)

作者简介: 万永芳(1973-), 女, 江西南昌人, 硕士, 工程师, 主要从事地下流体学和地震预报等研究. E-mail: wyf86586@163.com

表 1		印尼 4 次巨大地震广东水位记录异常情况统计表									
地震目录	响应形态	观 测 井 名 称									
		电白	南海	顺德	增城	中山	东莞	汕头	深圳		
2004 - 12 - 26 8.7 级	振荡变化	振荡起始时间	26 日 09:04	26 日 09:05	26 日 09:21		26 日 09:05				
		振荡峰值时间	26 日 09:12	26 日 09:15	26 日 09:30		26 日 09:15				
		振荡持续时间	7 h	4 h	4 h	无	4 h	无	无		
		最大峰值幅度	11 mm	12 mm	2 mm		12 mm				
	阶跃变化	阶跃形态	缓慢下降	缓慢上升	突然上升	缓慢上升		无	突然下降	缓慢上升	
		阶跃起始时间	27 日 10 时	26 日 23 时	26 日 09:10	26 日 09:13		无	26 日 09:13	26 日 09:15	
		阶跃峰值时间	27 日 14 时	27 日 08 时	26 日 09:21	26 日 09:23		无	26 日 09:29	26 日 10:25	
		阶跃幅度	25 mm	70 mm	28 mm	3 mm		无	34 mm	6 mm	
		振荡变化	振荡起始时间	29 日 00:14	29 日 00:19	29 日 01 时		29 日 00:15			
	振荡峰值时间		29 日 00:23	29 日 00:25	29 日 03 时	无	29 日 00:24				
	振荡持续时间		7 h	4 h	3 h		4 h				
	最大峰值幅度		6 mm	6 mm	0.8 mm		5 mm				
	8.5 级	阶跃变化	阶跃形态	缓慢下降		突然上升	缓慢上升		无	无	无
阶跃起始时间			29 日 13:45		29 日 00:20	29 日 00:21		无			
阶跃峰值时间		29 日 15:12	无	29 日 00:29	29 日 00:32		无				
阶跃幅度		0.5 mm		9 mm	0.6 mm						
2007 - 09 - 12 8.5 级		振荡变化	振荡起始时间	12 日 19:16	12 日 19:24	12 日 19:23		12 日 19:18			
	振荡峰值时间		12 日 19:24	12 日 19:26	12 日 19:26		12 日 19:25				
	振荡持续时间		5 h	2 h	11 min		12 min				
	最大峰值幅度		3 mm	9 mm	4 mm	仪器故障	6 mm				
	8.5 级	阶跃变化	阶跃形态	缓慢上升			无数据		无	无	无
			阶跃起始时间	12 日 20:07							
		阶跃峰值时间	12 日 20:29	无	无		无				
		阶跃幅度	0.8 mm								
		2007 - 09 - 13 8.3 级	振荡变化	振荡起始时间	13 日 08:01	13 日 08:02			13 日 08:01		
	振荡峰值时间			13 日 08:02	13 日 08:03			13 日 08:04			
	振荡持续时间			40 min	20 min			7 min			
	最大峰值幅度			0.7 mm	2 mm			1.5 mm			
	8.3 级		阶跃变化	阶跃形态			无	仪器故障		无	无
阶跃起始时间							无数据				
阶跃峰值时间											
阶跃幅度											
阶跃变化			阶跃起始时间								
	阶跃峰值时间										
	阶跃幅度										

1.2 2005 年 3 月 29 日 00:09 印尼 8.5 级地震响应记录

广东 62% 的观测井记录到此次强震响应；固体潮畸变形态以阶跃(如顺德台)和振荡变化(如南海台)为主；响应幅度为 0.5 ~ 9 mm(表 1, 图 2)。

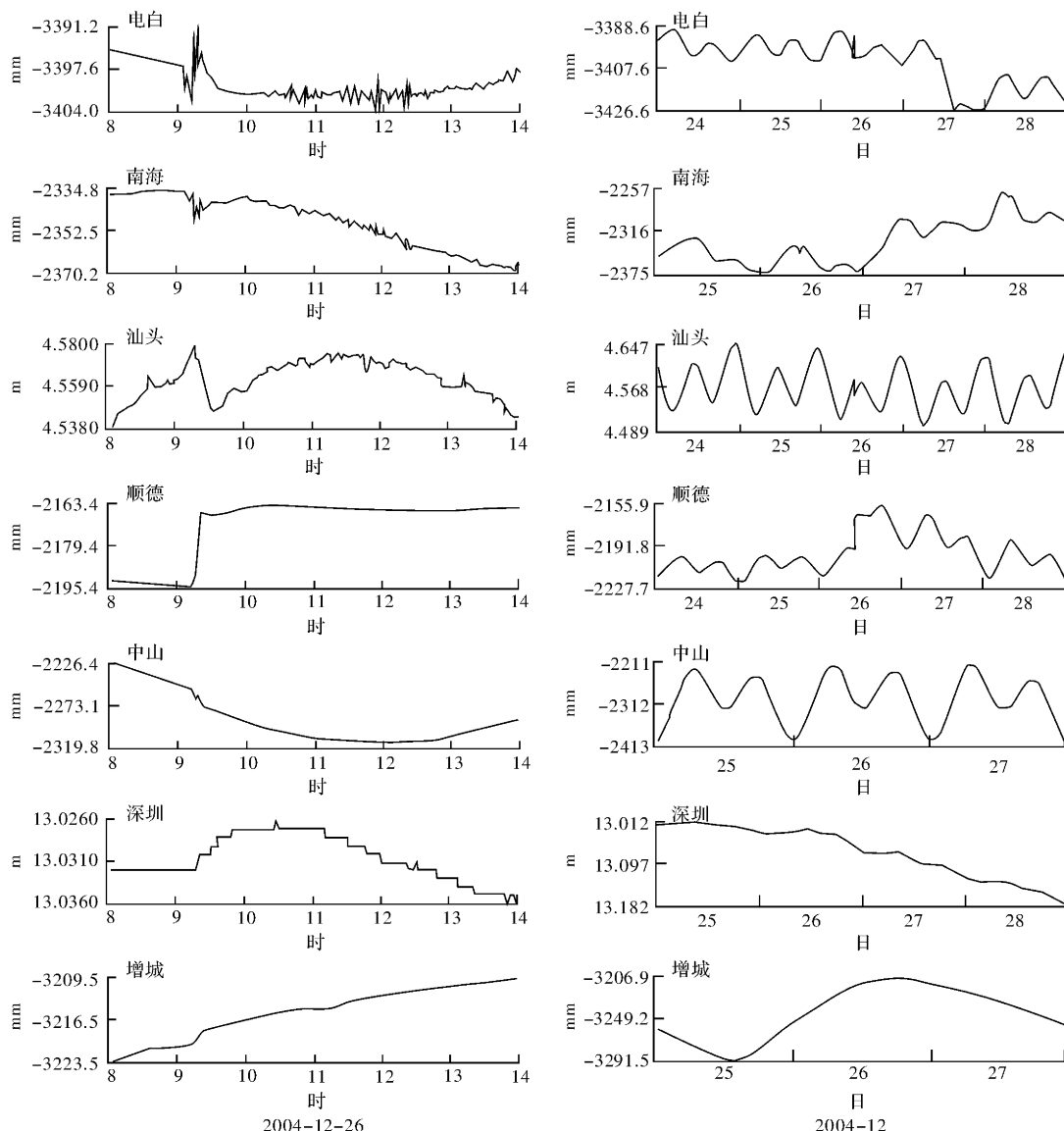


图1 2004年12月26日印尼8.7级地震前后水位分钟值曲线

(1) 电白台水位记录到振荡变化,震后14 h,出现转折,呈现缓慢下降变化,降幅约0.5 mm,之后固体潮形态恢复正常。

(2) 南海台水位仅记录到振荡变化。

(3) 顺德台水位记录到的振荡变化幅度较小,震后约11 min出现阶变,随后10 min内上升约9 mm。

(4) 中山台水位数据显示,震后约6 min,记录到振荡变化,幅度约为5 mm,4 h后固体潮形态回至正常。

(5) 增城台水位震后约12 min显现上升阶变,幅度仅为0.6 mm,震后变化形态属“缓慢上升—恢复”型。

1.3 2007年9月12日19:10 印尼8.5级地震响应记录

广东57%的观测井记录到此次强震响应;水

位固体潮畸变形态较单一,以振荡变化为主;响应幅度为3~9 mm(表1,图3)。

(1) 电白台水位记录到地震波引起的振荡,震后1 h,出现转折,呈现缓慢上升变化,升幅约0.8 mm,之后固体潮形态恢复正常。

(2) 南海台、顺德台和中山台水位仅记录到振荡变化,震后变化形态均属于“振荡—恢复”型。

1.4 2007年9月13日07:49 印尼8.3级地震响应记录

广东43%的观测井(电白台、南海台和中山台)记录到此次强震响应。水位固体潮畸变形态均为振荡变化;响应幅度为0.7~2 mm;震后变化形态都属于“振荡—恢复”型(表1,图4)。

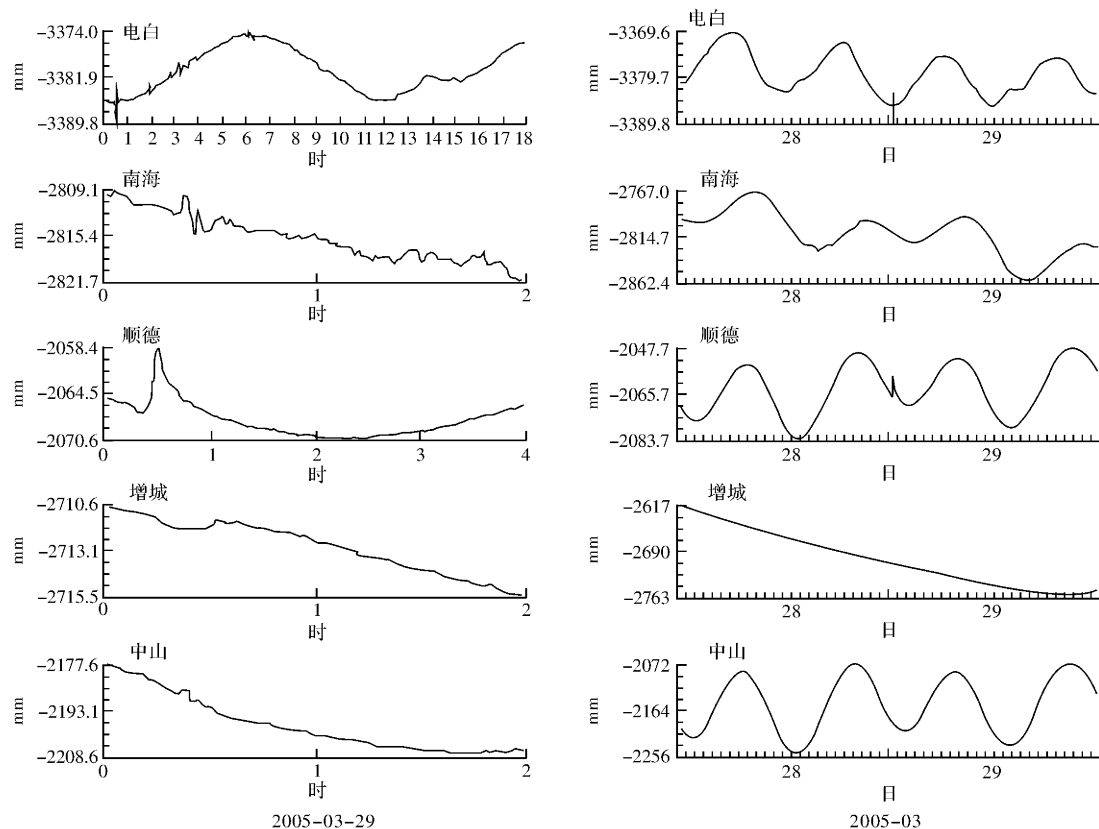


图2 2005年3月29日印尼8.5级地震前后水位分钟值曲线

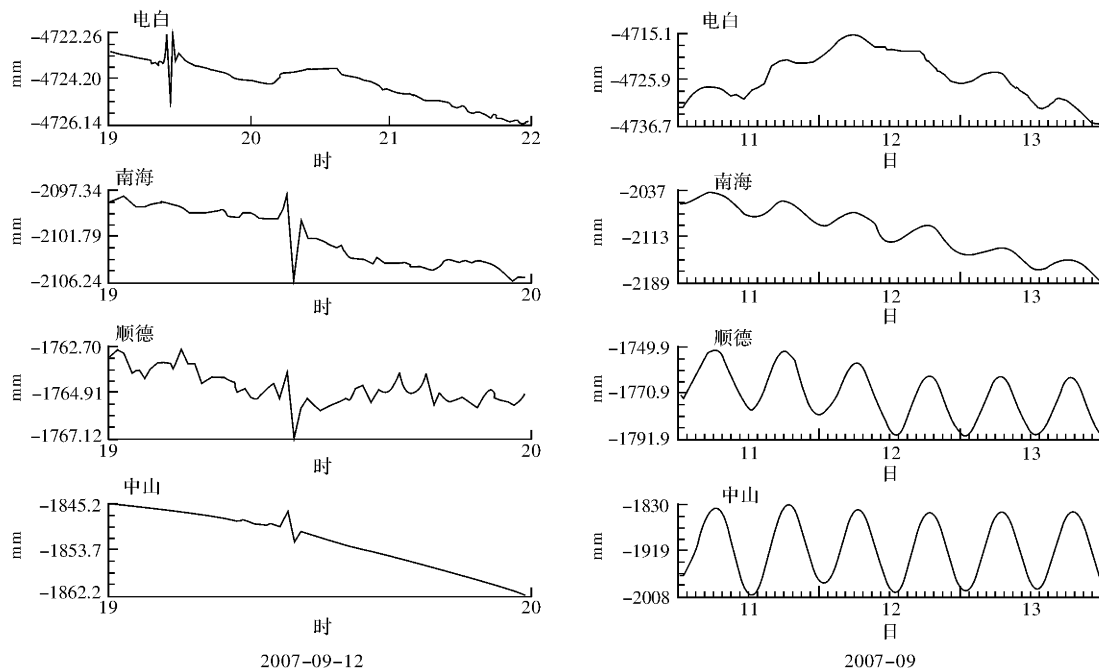


图3 2007年9月12日印尼8.5级地震前后水位分钟值曲线

2 强震响应特征分析

从表1的统计结果可以看出, 印尼4次强震引起的响应普遍而突出。从时序记录上看, 水位出现固体潮畸变的起始时间与地震波到达的时间基

本一致, 属于同震响应。上述8个数字化水位台站, 有7个在2004年8.7级地震后记录到响应变化, 2005年8.5级地震后有5个台站记录到响应变化, 2007年8.5级地震后有4个台站记录到响应变化(增城台水位因仪器故障, 无数据资料)。记录到后2次强震的5个台站都包括在记录到8.7

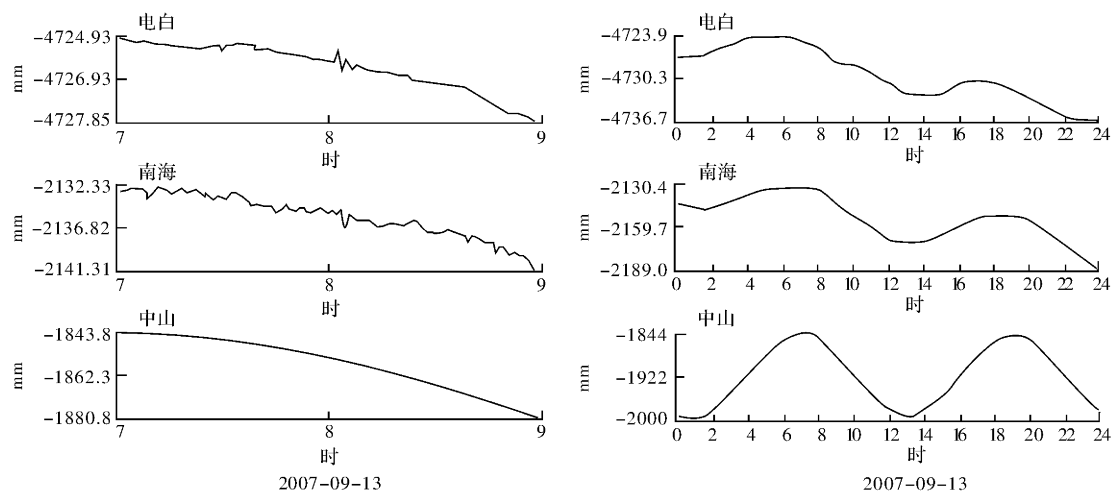


图4 2007年9月13日印尼8.3级地震前后水位分钟值曲线

级地震的7个台站中;记录到后2次强震的水位响应幅度低于8.7级强震时记录到的响应幅度,并且水位恢复至正常动态的速度快于2004年8.7级强震响应后的恢复速度。

2.1 水位响应形态特点

数据图像分析显示,水位响应从形态上可分为振荡变化(地震波引起的脉冲)和阶跃变化。这两种变化形态有时单一出现,有时组合出现。归纳发现,震级越大引起的响应种类越多,如8.7级强震南海台水位既记录到振荡变化又记录到上升阶跃,而后2次强震仅记录到振荡变化;汕头台和深圳台8.7级强震时水位都只记录到阶跃变化,而后2次强震则均无响应显示。

振荡变化表现为脉冲式跳变。根据采样定理,1 min采样率数据至多能完整地恢复周期大于2 min的水位变化,而水震波周期约为数秒到数十秒。水位观测由于受到仪器最高采样率1 sample/min的局限,响应记录过程中不可避免的出现数据缺失现象,造成记录波形不全,因而在每个测点上实际观测不到真实的最大值。这对于依据同震响应研究震源方位特征是不充分的,但多次地震在多个台站上记录到的响应幅度最大值与地震震级之间仍可能寻找到一定的相关性^[3],此次研究证实了二者之间存在正相关性(见表1)。

阶跃变化的起始时间各有不同,达到峰值的时间短则1 min(受采样率的限制)、几分钟,长则可持续数十分钟、数小时。这反映了不同观测井的不同水文地质参数、井径、井孔水柱高度等的综合影响。阶跃形态按变化方向划分,存在上升和下降两种类型;按变化速度划分,存在缓变和突变两种类型。如2004年8.7级强震时,顺德台

水位出现突升,10 min升幅达28 mm;南海台水位表现为缓升,10 h升幅约70 mm。

强震引起的阶跃变化,可能是地震波的作用改变了构造单元的应力所致,并与井点的地质构造部位有关^[4]。记录到阶跃响应的水位测点从空间分布上看,位于东南沿海地震带内带中部的珠江三角洲地区的台站(包括南海台、顺德台、增城台和深圳台),阶跃变化都表现为上升;位于樟林—汕头断裂带附近的汕头台,阶跃变化为下降;属次一级构造部位的电白台,阶跃变化有上升也有下降。

2.2 同测点响应形态的相似性

地下水位变化的方式主要取决于观测井所在的地质构造和水文地质条件,对于同一台站记录到的异常图像存在相似性(见表1,图1~4)。如中山台4次地震记录到的都是类似地震波的脉冲式振荡变化;电白台出现阶跃变化的3次地震的响应形态均属于“振荡—缓变阶跃—恢复”型;顺德台出现阶跃变化的2次地震的响应形态均为“突升阶跃—振荡—恢复”型;增城台有记录的2次强震响应形态都表现为“缓升阶跃—恢复”型。印尼2004、2005年2次强震都发生在苏门答腊断层上,震源机制一致,均为逆断层。广东水位同一井孔对这2次强震响应的记录除幅度有所差别外,形态完全一致。再一次验证了,同一井孔对同一断层上破裂方式一致的强震的响应方式一致^[4]。

2.3 强震响应的敏感点

不同的观测井具有不同的放大倍数和记震能力,对强震的敏感度各有不同。8个水位观测井中,增城台无法记录到固体潮变化、深圳台固体潮形态不显著,二者所记录到的强震响应较弱,响应幅度均小于6 mm。东莞台水位4次强震均无响应,最不敏

感。其余 5 个观测井, 正常情况下每天能记录到清晰的半日周期固体潮, 一日两峰两谷, 月潮汐变化为两次大两次小(变幅)的半月周期波, 波动幅度规律, 这 5 个观测井水位所记录到的响应明显, 形态多样, 异常变幅较大, 最高达 70 mm。上述统计验证了含水层系统对地震波具有天然的放大效能; 证明了能记录到清晰固体潮的观测井内在质量较好、灵敏度较高^[5], 是强震响应的“敏感点”。

3 认识与讨论

(1) 巨大地震能够引起大范围(几百至几千公里)的地下水位发生变化, 印尼海域强地震引起了广东大范围水位微观变化。数据分析显示, 4 次强震记录到清晰的同震震波、同震阶跃以及震后振荡现象, 强震响应显著。验证了含水层系统对地震波具有天然的放大效能。验证了地震波的传播能够引起含水层应力应变的变化, 从而使得含水层的孔隙压力发生变化而引起水位变化。尤其是突变阶跃现象(如汕头台、顺德台水位), 反映出由强烈地震波引起的压力变化作用于含水介质后导致孔隙应力的瞬时变化。

(2) 水位响应形态可分为振荡变化和阶跃变化两种, 出现响应的测项, 均在地震后数分钟至数小时内恢复正常动态或者进入一个新的稳定状态。从记录地下水位快速变化如脉冲、阶跃等的实际需要出发, 提高地震前兆数据的采样率是必要的^[6]。

(3) 印尼 2 次 8.5 级地震记录到响应的台站数目、水位响应幅度、响应形态的种类均低于 2004 年 8.7 级地震, 而恢复至正常动态所需的时间短于

2004 年 8.7 级地震; 印尼 8.3 级地震响应表现是 4 次地震中最弱的。说明地震震级大小与响应强弱之间存在一定的正相关性。

(4) 通过对响应信息的定量研究, 认识到在同一力源作用下, 各测点记录到的响应特征的差异性, 以及不同地震时, 同一测点响应的特征, 这有助于理解水位前兆观测的物理本质。地壳形变过程可能引起地下水位异常, 但水位异常未必都是由地震过程引起的, 地下水位异常既可能是最直接的短临前兆, 也可能是影响地壳形变异常的主要控制因素^[7]。因此, 综合分析震后响应可提供很多有用信息, 对于追溯地震前兆、识别前兆异常、估计地球物理及水文地质参数、预测后续地震以及地震烈度和震害评定都具有十分重要的意义^[8-9]。

参考文献:

- [1] 中国地震局监测预报司. 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [2] 杨选辉. 印尼 8.7 级地震后中国大陆出现的同震、震后宏观现象[C]//2005 年地震预报专业委员会会议论文集. 2005.
- [3] 牛安福, 张晶, 吉平. 印尼强地震引起的同震形变响应[J]. 内陆地震, 2005, 19(1): 1-7.
- [4] 付虹, 邹成栋, 刘强, 等. 印尼巨大地震引起的云南水位异常记录及其意义[J]. 地震地质, 2007, 29(4): 873-882.
- [5] 王永芳, 叶东华. 2006 年 9 月 14 日担杆岛海域 3.5 级地震前兆异常特征研究[J]. 华南地震, 2007, 27(4): 67-72.
- [6] 冯德益, 张少泉, 卫鹏飞, 等. 深井观测地震波典型记录与分析应用[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [7] 高小其, 陈华静, 杨又陵, 等. 2004 年 12 月 26 日印尼 8.7 级强震新疆地区的同震效应[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(3): 40-46.
- [8] 陆明勇, 黄辅琼, 周峥嵘, 等. 地壳形变与地下水异常关系研究进展[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 98-104.
- [9] 陆明勇, 黄辅琼, 刘华, 等. 地壳变形与地下水相互作用及其异常关系初探[J]. 地震, 2005, 25(1): 67-73.

Research on Large Earthquakes in the Sea of Sumatra, Indonesia and the Response Characteristic of Water Level in Guangdong

Wan Yongfang and Li Jianmei

(Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Four large earthquakes above M8.3 in the sea of Sumatra, Indonesia have occurred since 2004. Great deals of response information about the four earthquakes have been recorded in the observation of water level in Guangdong. The manifestation, characteristic and response process of the response information are concluded. The relation between the response data and the earthquake degree, and the sensitivity point of response are thus got. Summarizing the response information of the mentioned 4 strong earthquakes is helpful for understanding the attenuation process of strong earthquake and for studying seismic source physics.

Key words: Indonesia strong earthquake; strong earthquake response; groundwater level; Guangdong