

顾申宜, 张慧, 解晓静, 刘阳, 叶向顶. 2012. 海南井水位对热带气旋响应特征分析. 地震学报, 34(5): 716-724.
Gu Shenyi, Zhang Hui, Xie Xiaojing, Liu Yang, Ye Xiangding. 2012. Analysis on features of well water response in Hainan Province to tropical cyclones. *Acta Seismologica Sinica*, 34(5): 716-724.

海南井水位对热带气旋响应特征分析^{*}

顾申宜[†] 张 慧 解晓静 刘 阳 叶向顶

(中国海口 570203 海南省地震局)

摘要 2001—2010 年, 海南省地下流体观测台网记录到多次热带气旋引起的井水位抖动现象. 本文以 2003 年 7 月 21 日强热带气旋“天鹅”和 2005 年 9 月 27 日台风“达维”为例, 系统地研究了这两次热带气旋引起的水位抖动变化的特征. 结果表明, 经过高通滤波, 水位抖动变化图像更加明显; 通过频谱分析, 得知热带气旋引起的水位抖动周期为 10^0 — 10^1 min; 井水位抖动的起始时间、幅度最大值的时间与热带气旋通过海南岛陆的时间一致, 且与热带气旋的结构特点、发展和运动过程密切相关, 与井孔自身的井-含水层系统对微动态信息响应的能力也有关系. 分析认为, 气压振荡式升降变化和摩擦是热带气旋引起水位抖动的原因.

关键词 热带气旋 井水位 抖动 海南

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.05.013

中图分类号: P641

文献标志码: A

Analysis on features of well water response in Hainan Province to tropical cyclones

Gu Shenyi[†] Zhang Hui Xie Xiaojing Liu Yang Ye Xiangding

(Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: Well water vibration phenomena caused by tropical cyclones were recorded by Hainan underground fluid observatory from 2001 to 2010. Taking strong tropical cyclone “Swan” on July 21, 2003, and typhoon “Damrey” on September 27, 2005, as examples, this paper systematically studies the features of water vibration caused by the above two tropical cyclones. The results show that water vibration variation image is more obvious through high-pass filtering, the water vibration period caused by tropical cyclones is 1—10 min according to spectrum analysis, the starting time and amplitude peak time of well water vibration are consistent with the time of tropical cyclone passing Hainan Island, and are associated with the structural features, progress and movement process of tropical cyclones, as well as the response capability of well aquifer system to micro-dynamic message. Analysis shows that atmospheric pressure fluctuation and friction enable tropical cyclones to cause water level fluctuation.

Key words: tropical cyclone; well water; vibration; Hainan

^{*} 基金项目 中国地震局 2011 年星火计划(XH1020)和海南省重点科技计划项目(ZDXM20110107)资助.

收稿日期 2012-02-20 收到初稿, 2012-04-19 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: gsy33@163.com

网络出版时间: 2012-08-30 14:22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2012.20120830.1422.012.html>

引言

大量观测资料及实验研究证实，地下水对地壳应力-应变的响应频率较宽，可记录到地震波中的瑞利波(10—20 s)，潮汐波动(1/3—1/2 d)，气压波动(几小时至几十天)等(张淑亮等，2005)。在文献中，已见热带气旋引起地震仪的震颤波，倾斜仪和重力仪的“脉动加粗”等方面研究成果(金星，康兰池，2007)，但井水位对大气环流、雷暴高压、热带气旋等的响应，则未见报道。海南省素有“台风走廊”之称，为我国多热带气旋影响的地区之一。笔者研究了井水位的热带气旋响应问题，介绍了如何识别井水位的热带气旋响应现象，分析了这种效应的基本特征及其影响因素等。这对数字化观测数据处理，井水位动态和异常机理的探索，都有十分重要的意义。

热带气旋按照近中心最大风力的大小分为：热带低压(风速 10.8—17.1 m/s，风力6—7级)，热带风暴(风速 17.2—24.4 m/s，风力 8—9 级)，强热带风暴(风速 24.5—32.6 m/s，风力 10—11 级)，台风(风速 32.741.4 m/s，风力 12—13 级)，强台风(风速 41.5—50.9 m/s，风力 14—15 级)和超强台风(风速≥51.0 m/s，风力≥16 级)6 个等级。本文采用海南省气象局提供的气象数据和本区域水位观测台网的观测资料展开分析和研究。

1 水位观测与热带气旋概况

1.1 水位观测井

海南省境内有水位观测井 6 口，各观测井基本情况列于表 1。水位观测用 LN-3 型仪器，其量程为 0—10 m，分辨率 1 mm，全量程测量准确度±0.2%、测量重复性±0.1%，每年全量程测量稳定性±0.2%，动态响应速度>1 m/s，使用温度 0—40℃。

表 1 水位观测井基本情况

Table 1 Basic information of the water level observation wells

序号	台站名称	井孔名称	井(泉)位置			井深/m	井-含水层特征		
			经度 /°E	纬度 /°N	所在断裂		地层时代 与岩性	地下水 类型	观测 仪器
1	海口地震台	ZK26 井	110.35	20.03	马袅—铺前断裂	706.3	Q ₄ 玄武岩 砂砾岩	承压水	LN-3
2	火山流体台	迈仍村井	110.35	20.00	马袅—铺前断裂	276.1	N ₂ 砂岩	孔隙水	LN-3
3	海口市 向荣村台	向荣村井	110.26	20.00	马袅—铺前断裂	320.0	砂岩	孔隙水	LN-3
4	琼海加积台	加积台井	110.45	19.24	文昌—琼海— 三亚断裂带	525.9	K ₂ 砂砾岩	裂隙承压水	LN-3
5	三亚南滨台	南滨井	109.17	18.38	崖城—雅亮和 天涯—高峰断裂	104.8	亚粘土砂岩	裂隙承压水	LN-3
6	文昌潭牛台	潭牛井	110.78	19.72	王五—文教断裂	150.7	白垩系花岗岩	裂隙水	LN-3

1.2 热带气旋

据海南省气象局资料统计，2001—2010 年影响海南岛陆的热带气旋共有 70 余次，其中影响最为严重且登陆的气旋有两次：第一次为 2003 年 7 月 19—22 日“天鹅”，第二次是 2005 年 9 月 21—27 日“达维”。两次热带气旋路径及到达各气象站的时间如图 1 所示，中心风速、7 级风圈半径及移动速度列于表 2。

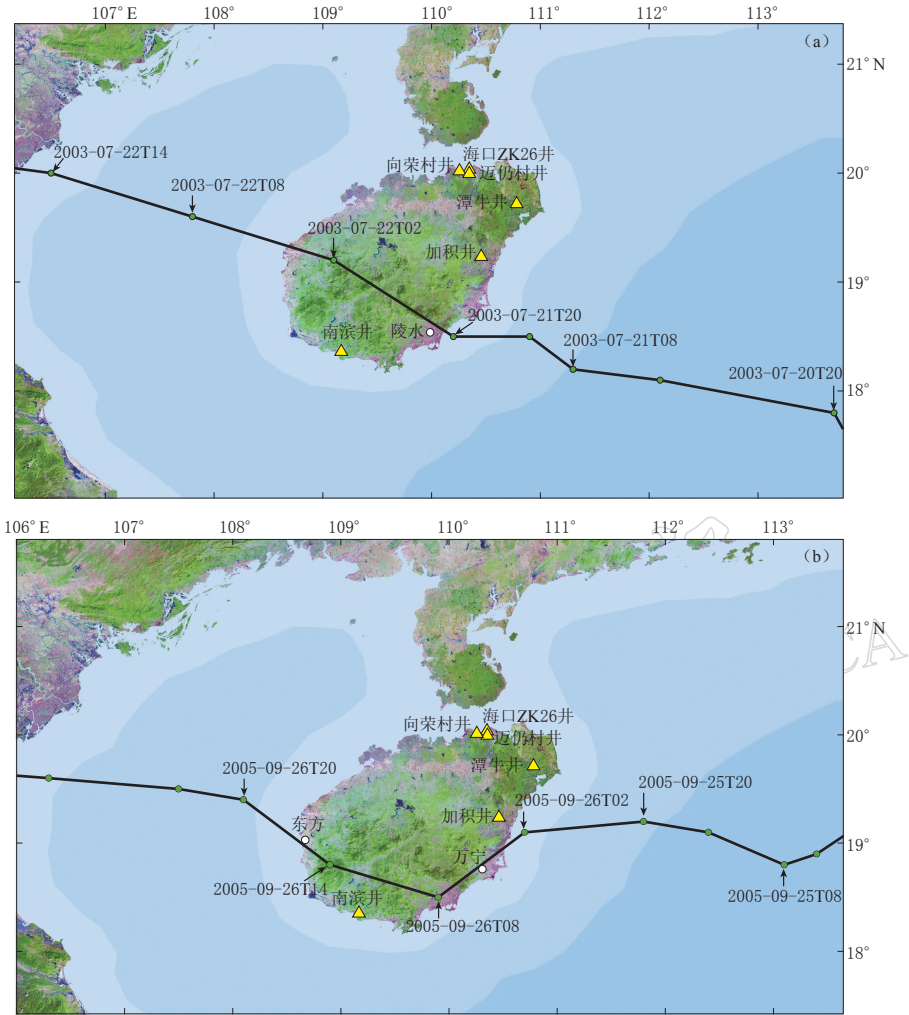


图 1 热带气旋路径与台站分布图

(a) 热带气旋“天鹅”; (b) 热带气旋“达维”

Fig. 1 Tropical cyclone routes and station distribution

(a) Tropical cyclone “Swan”; (b) Tropical cyclone “Damrey”

表 2 热带气旋“天鹅”和“达维”各项信息表(引自日本区域气象中心)

Table 2 Information of tropical cyclones “Swan” and “Damrey” (quoted from Japan Regional Meteorological Center)

热带气旋“天鹅”						热带气旋“达维”					
时间 年-月-日 时	经度 /°E	纬度 /°N	中心 风速 /m·s ⁻¹	7 级风 圈半径 /km	移动 速度 /m·s ⁻¹	时间 年-月-日 时	经度 /°E	纬度 /°N	中心 风速 /m·s ⁻¹	7 级风 圈半径 /km	移动 速度 /m·s ⁻¹
2003-07-15T14	9.7	133.7	0.00	0.0	21.09	2005-09-19T20	13.8	126.1	0.00	0.0	20.01
2003-07-18T14	12.3	119.1	17.99	111.0	22.28	2005-09-21T08	18.0	122.8	17.99	351.9	17.45
2003-07-21T14	18.5	110.9	28.27	166.7	9.25	2005-09-25T14	19.1	112.4	41.12	444.5	14.09
2003-07-22T08	19.6	107.8	23.13	166.7	25.16	2005-09-26T02	19.1	110.7	41.12	426.0	20.43
2003-07-23T02	20.0	103.0	0.00	0.0	37.18	2005-09-28T14	21.0	99.7	0.00	0.0	31.61

2 2003 年热带气旋“天鹅”期间水位抖动特征

2.1 水位抖动现象

热带气旋“天鹅”于 2003 年 7 月 18 日下午在南海南部形成热带风暴，翌日进一步向西北偏西推进，7 月 20 日 02 时—21 日 08 时增强为强热带风暴，中心风速为 30.84 m/s，21 日 14 时左右在海南陵水登陆。登陆时中心气压 975 hPa，风速 28.27 m/s。登陆后台风中心继续向偏西北方向移动，22 日 08 时减弱为热带风暴进入北部湾。

在热带气旋“天鹅”影响期间，海南观测井地下水位动态变化如图 2 所示。可以看出，在 21 日 11 时左右的水位曲线上，海口 ZK26 井和琼海加积井出现较明显的抖动加粗情况。经过高通滤波(王梅等，2009)，去掉水位正常的日周期变化后，水位脉动加粗特征更加明显。此时间段正好是热带风暴中心风速由最大变为次大，并穿过海南岛陆的时间(表 2)。从气旋中心离井孔的距离来看(图 2)，水位抖动基本开始于气旋中心登陆前，而此时的风速却不是最强的。

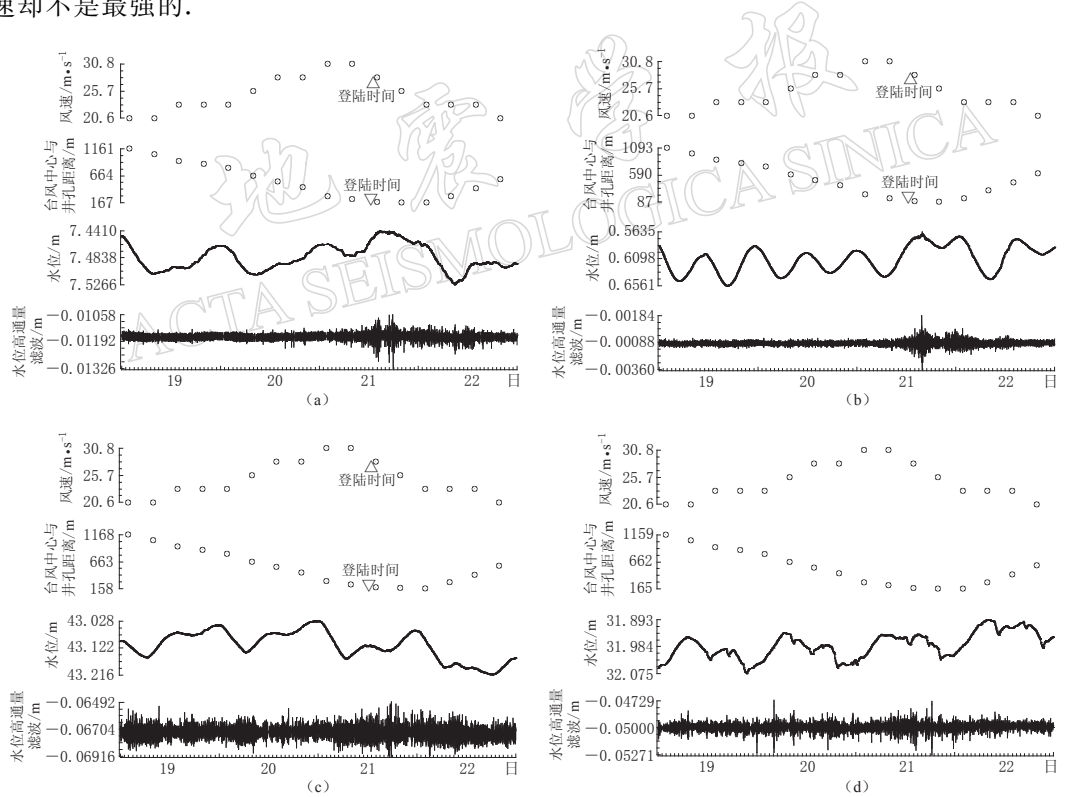


图 2 2003 年 7 月 19—22 日热带气旋“天鹅”强度与海口 ZK26 井(a)、加积井(b)、向荣村井(c)和迈仍村井(d)水位及其高通滤波变化曲线图

Fig. 2 Intensity of tropical cyclone “Swan” on July 19—22, 2003, variation of well water and its high-pass filtered variation in ZK26 (a), Jiaji (b), Xiangrong (c) and Maireng (d) wells

海口 ZK26 井和琼海加积井水位抖动幅度最大的时间分别为 21 日 18 时和 16 时，此时间段则是热带风暴中心登陆岛陆的时间，风速在 25.70 m/s。两口井水位的最大抖动幅度分别为 0.00268 m 和 0.00176 m(表 3)。台风中心与两口井距离分别为 170.641 km 和 96.14 km。

表 3 热带气旋与井水位抖动特征统计表

Table 3 Statistics of the tropical cyclones and well water level fluctuations

名称	热带气旋					地下水位抖动	
	发生时间 年-月-日 时	登陆时的状况			离岛时间	井孔名称	开始时间
		登陆时间	中心 风速 /m·s ⁻¹	7 级风圈 半径 /km			
天鹅	2003-07-18T14	2003-07-21T14	28.27	166.7	2003-07-22T08	海口 ZK26	2003-07-21T11
						海口向荣村	无明显加粗
						海口迈仍村	无明显加粗
						琼海加积	2003-07-21T11
						三亚南滨	仪器故障
达维	2005-09-19T20	2005-09-26T02	41.12	426.0	2005-09-26T17:30	海口 ZK26	2005-09-25T08
						海口迈仍村	2005-09-25T09
						海口向荣村	仪器故障
						文昌潭牛	2005-09-25T08
						琼海加积	2005-09-25T08
						三亚南滨	2005-09-25T22

由图 2 还可见,海口市向荣村井和迈仍村井无明显的加粗现象,其高通滤波曲线上的加粗变化依然不明显,原因后面再讨论.

2.2 水位抖动的频谱特征

2003 年 7 月 21 日“天鹅”影响期间,海口 ZK26、海口向荣村、海口迈仍村和琼海加积 4 井频谱分析效果较好(三亚南滨仪器故障,文昌潭牛还没有数字化观测).经过对比这 4 口井正常天气时的曲线形态及分析 4 口井的频谱特征(图 3)发现:①正常天气时,各井水

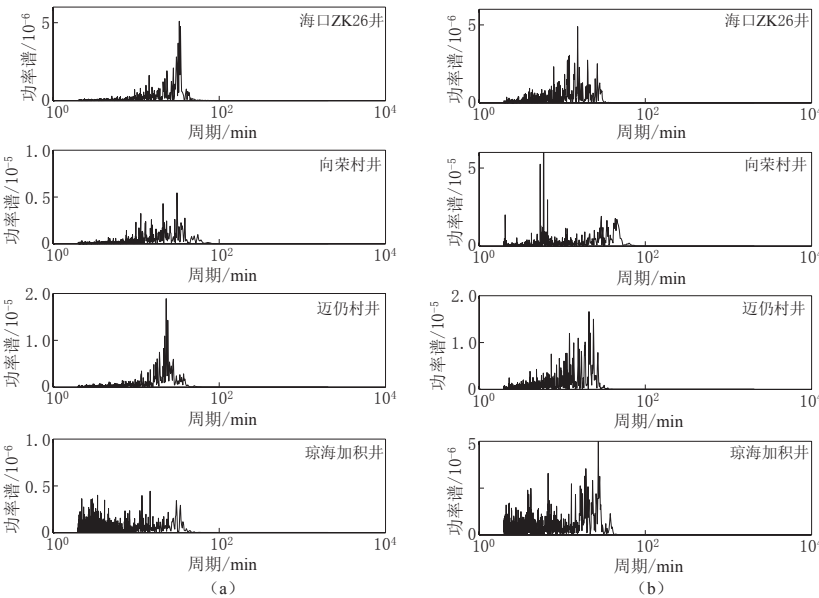


图 3 2003 年热带气旋“天鹅”引起的水位抖动信号频率曲线. (a) 正常形态; (b) 台风形态

Fig. 3 Frequency content of water vibration in the 4 wells caused by tropical cyclone “Swan” in 2003. (a) Normal state; (b) State under typhoon

位周期范围在 10^1 — 10^2 min, 基本集中在 30—50 min; ② 台风引起的井水位抖动明显偏离正常形态, 表明抖动主要为高频影响, 周期范围均在 10^0 — 10^1 min, 其中多数存在于 0.8 min, 有的井孔变化周期缩短, 如海口 ZK26 井; ③ 从能量(功率谱幅度, 而不是水位幅度或频率)角度分析, 受台风影响, 各井功率谱在高频段幅度较大, 与较正常形态比较, 能量明显增强。

另需指出的是, 从频谱特征看, 向荣村井与迈仍村井由“天鹅”气旋引起抖动的频率变化并不明显, 这与两口井的高通滤波无显著的加粗现象相呼应(图 2)。究其原因, 一是由于这两口井本身的混合水性质, 受外界干扰较大, 背景噪声较强; 二是“天鹅”台风的强度和能量未能达到掩盖背景噪声的程度; 三是“天鹅”台风中心与这两口井的距离较大(图 1)。

3 2005 年热带气旋“达维”期间水位抖动的特征

3.1 水位抖动现象

热带气旋“达维”于 2005 年 9 月 21 日上午 8 时生成热带风暴, 25 日加强为强热带风暴, 26 日转为强台风。9 月 26 日凌晨 02 时, “达维”在海南省万宁市北部沿海地区登陆, 台风中心附近最大风力为 41.12 m/s, 下午 14 时仍位于海南省东方市境内, 最大风力仍有 33.41 m/s, 17 时 30 分左右台风进入北部湾海面。27 日上午在北部湾西部海面减弱为强热带风暴。台风自东向西移动横扫整个海南, 持续达 13 个小时之久。

从图 4 可以看出, 各水点的水位曲线大约在 9 月 25 日 08 时—9 月 27 日 06 时出现明显抖动加粗现象。其中, 以文昌潭牛井、琼海加积井和三亚南滨井加粗特征尤为明显。各水点出现的变化在时间上基本同步(唯三亚南滨井除外, 气旋中心到达该井的时间相对滞后, 所造成的水位抖动起始时间也相对滞后)。抖动起始时间均为台风登陆前, 此时台风中心风速最大为 38.55 m/s, 台风中心与各个井孔的距离为 279.97—334.39 km, 其中距离最近为文昌井, 最远为海口 ZK26 井。

由图 4 还可见, 26 日 02 时台风中心登陆本岛时, 海口 ZK26 井、迈仍村井、文昌潭牛井、琼海加积井的水位抖动幅度达到最大, 分别是 0.0074, 0.0091, 0.0214, 0.0110 m (向荣村仪器故障)(表 3)。唯三亚南滨井的水位抖动最大幅度(0.0266 m)的时间滞后, 此时台风中心距离这几口井 82.12—187.70 km。

3.2 水位抖动的频谱特征

2005 年 9 月 21—27 日“天鹅”影响期间, 海口 ZK26、海口向荣村、海口迈仍村和琼海加积 4 口井频谱分析效果较好(图 5)。其频谱特征主要是: ① 正常天气时, 各井水位周期范围在 10^1 — 10^2 min, 基本集中在 40—50 min; ② 台风引起的多数井孔的水位抖动明显偏离正常形态, 且变化周期缩短, 意味着抖动频率加快, 主要为高频影响, 周期范围均在 10^0 — 10^1 min, 其中多数存在于 0.8 min; ③ 从能量角度分析, 受台风影响, 各井功率谱在高频段幅度较大, 高出正常形态 10^1 — 10^2 倍, 表明能量明显增强。

4 讨论与结论

4.1 热带气旋引起水位抖动的原因分析

封闭的“井-含水层”系统相当于安装在地下的一种非常灵敏的应变仪。无论哪种类型的微动态信息(压应力与张应力、横波与纵波等), 都会造成含水层孔隙的变形, 进而引起

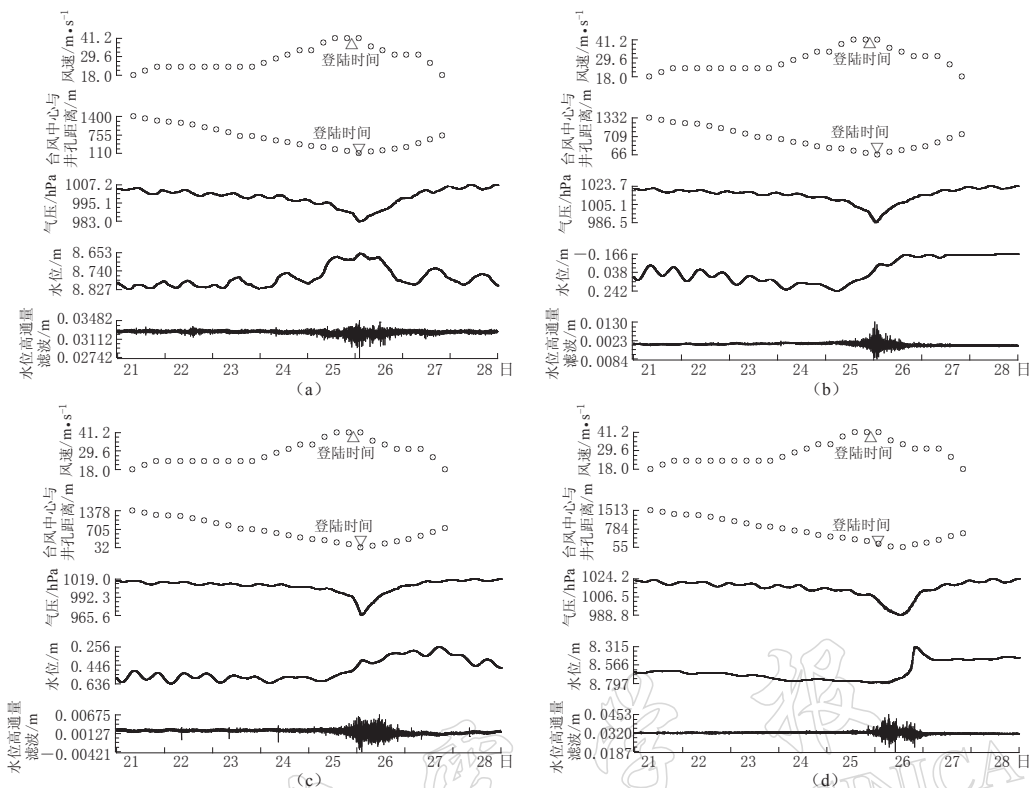


图 4 2005 年 9 月 21—27 日热带气旋“达维”强度与海口 ZK26 井(a)、潭牛井(b)、加积井(c)和南滨井(d)水位及其高通滤波变化曲线图

Fig.4 Intensity of tropical cyclone “Damrey” on Sept. 21—27, 2005, water level variation and its high-pass filtered variation at ZK26 (a), Tanniu (b), Jiaji (c) and Nanbin (d) wells

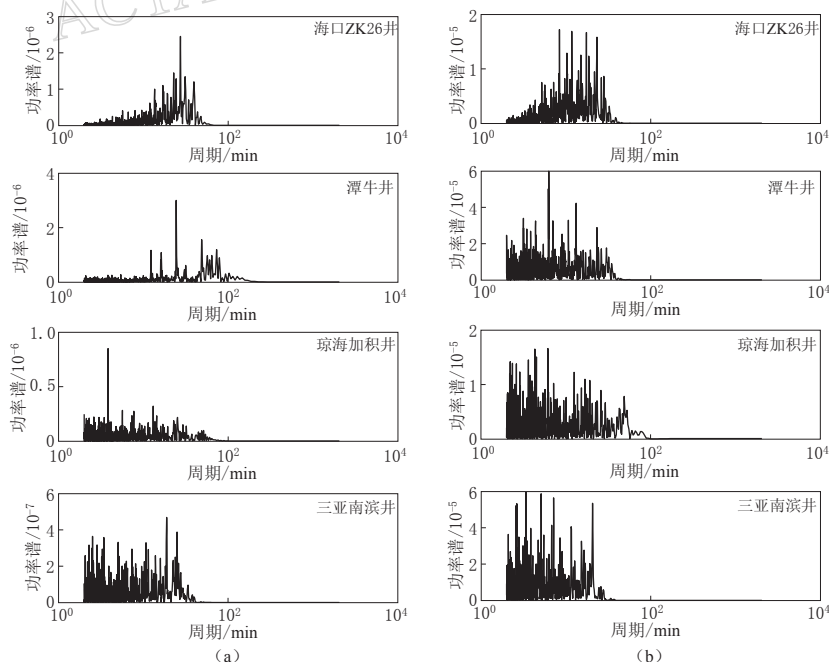


图 5 2005 年热带气旋“达维”引起的水位抖动信号频率曲线. (a) 正常形态; (b) 台风形态

Fig.5 Frequency content of water vibration in the 4 wells caused by tropical cyclone “Damrey” in 2005. (a) Normal state; (b) State under typhoon

孔隙压力的增减，致使井水位发生上升或下降变化。

热带气旋是一个扁平的气旋性低气压漩涡，具有 5—50 km/h 的整体移动速度(张雁滨等，2010)。登陆台风的边界层存在一支低空急流，急流与地形的辐合区会产生活跃的中尺度强对流活动，且登陆前边界层有较强的垂直运动(达 2 m/s)(陈联寿等，2004)。实际资料表明，当热带气旋中心风速大于 25 m/s，且其中心与井孔距离在 350 km 以内时，井水位才出现抖动(此时热带气旋风圈半径外缘已接近观测井)。且热带气旋的强度越大，这个距离也越大。依据这一基本事实，热带气旋与地面的直接作用被认为是造成水位抖动的原因。其具体机制是：① 在热带气旋移动的范围，气压出现振荡式下降与上升变化，由于井水位与气压关系密切(呈负相关)，故井水位也出现振荡式升降变化；② 热带气旋高速旋转而产生的与地面极不稳定的摩擦，造成了地壳压力的振荡式增减变化，井水位亦出现相应的抖动变化。

为讨论气压的影响，对其进行了高通滤波(图 6)。从图 6 可见，气压与水位的高通滤波曲线上都出现明显的抖动图像，且两者变化的形态和时间都很相似和接近。这种可对比性是“气压振荡引起水位抖动”这一认识的直接证据。人们早就知道，气压是井水位动态变化的影响因素之一(汪成民等，1988)。当地表面与观测井水面同时受到气压作用时，地层与水体应力传递的差异性致使“含水层-井系统”中地下水具有特定的流动方向。其结果是：当气压升高时，井水回流入含水层中，致使井水位下降；而气压变小时，含水层中的地下水流入井中或井水回流到含水层的水量变小，致使井水位相对上升。

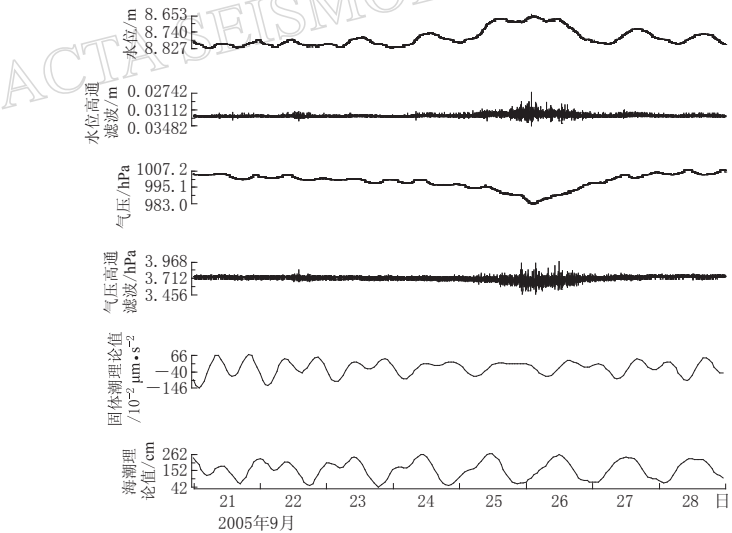


图 6 海口 ZK26 井地下水位、水位滤波、气压滤波、气压、固体潮及海潮变化曲线图
Fig. 6 Variation curves of underground water level, high-pass filtered water level, high-pass filtered air pressure, air pressure, Earth tide and sea tide in ZK26 well

研究表明，热带气旋与地面的摩擦是地壳岩石“震颤波”形成的原因之一(罗哲贤，陈联寿，2003；徐祥德等，2004；张雁滨等，2010)。笔者引用了张雁滨等(2010)的摩擦观点。从气压与水位的高通滤波曲线可见，两者在脉动细节(如高值或低值)上并不完全对应(图 6)，表明除气压因素外，还应有其它因素的存在。众所周知，地下水观测系统的特点是，井管顶端直接出露于地表，井水面埋藏于井管内一定深度上，且井水面与大气直接接

触. 因此, 热带气旋与观测井房以及与井管顶部周围土层的摩擦作用不可忽视.

依据水位抖动的气压机制, 可以解释热带气旋中心与井孔距离为何在 350 km 以内, 即在热带气旋登陆前, 井水位就开始抖动. 实际上, 这时气旋的边界层已经到达观测井的上方, 因为除三亚南滨井(该井水位抖动的开始时间也滞后)外, 海南各井孔距离登陆地点(陵水、万宁)都在 170 km 以内, 而热带气旋的半径则达 166.7 km 以上.

这里还涉及一个问题, 即从宽频数字地震计和倾斜、重力仪记录到的“震颤波”来看, 热带气旋的影响响应可达上千公里(张雁滨等, 2010). 而当热带气旋距离井孔 350 km 以内时, 井水位才开始抖动. 笔者认为, 其差异的原因在于两者的机理不同: “震颤波”的产生, 主要源于热带气旋对浅海区大陆架、板块边界断层等的直接作用, 并可通过地壳岩层快速地传播, 故影响距离很大. 而由于储存地下水的含水层分布范围的局限性(含水层的最大宽度一般为 100 km), 只有当热带气旋边界层临近井管上空时, 通过气压振荡和摩擦, 才能引起水位抖动变化, 故影响距离较小. 另外, 由于水位仪器采样率为分钟值, 数字地震计的采样率是 100 Hz, 这一因素也可能关系到影响距离的大小.

4.2 热带气旋效应与潮汐、气压及同震效应的差异

按照变化的时间特征, 地下水的应力-应变效应可分为两类: ① 周期性变化, 即由海潮、固体潮及气压变化引起的地下水位周期性变化(图 6); ② 偶然性变化, 即由地震波和热带气旋引起的地下水位的急剧短期变化.

资料与研究表明, 海潮、固体潮、气压、地震波及热带气旋引起水位变化的特征与机理, 彼此之间是有显著区别的. 海潮、固体潮及气压引起的水位效应为有规律的周期性变化, 系地层岩石受到侧向或垂向应力作用而被压缩或拉伸的结果. 地震波引起的水位效应则为偶然性的振荡、突升或突降变化. 与发震时间相比, 水位效应具有滞后与延续的特点. 热带气旋引起的水位效应更不同于其它所有的影响因素, 其变化特点表现为水位的抖动, 而抖动机理系热带气旋移动范围的气压不稳定下降与气旋对地面的不稳定摩擦造成的地壳压力振荡式变化.

本研究仅使用了海南省的观测资料, 研究两次热带气旋事件所选择的井孔不完全一致, 气象数据采样率仅为 6 小时一个数据(水位观测采样率为分钟值). 这对于热带气旋水位抖动特征及响应机理的深入研究有一定影响. 因此, 本文给出的只是初步认识.

参 考 文 献

- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究进展[J]. 气象学报, **62**(5): 541-54.
- 金星, 康兰池. 2007. 利用宽频带速度记录的频域特征研究台风[J]. 自然灾害学报, **16**(4): 27-35.
- 罗哲贤, 陈联寿. 2003. 地形对涡旋 Rossby 波影响的研究[J]. 自然科学进展, **13**(4): 372-377.
- 汪成民, 车用太, 万迪堃, 董守玉. 1988. 地下水微动态研究[M]. 北京: 地震出版社: 27-34.
- 王梅, 季爱东, 郑建常. 2009. 台风引起的重力扰动现象[J]. 地震学报, **31**(6): 641-649.
- 徐祥德, 张胜军, 陈联寿, 魏凤英. 2004. 台风涡旋螺旋波及其波列传播动力学特征: 诊断分析[J]. 地球物理学报, **47**(1): 33-41.
- 张淑亮, 李冬梅, 范雪芳. 2005. 井水位先驱波与气压、风、降雨及强震关系的分析[J]. 地震, **25**(3): 69-77.
- 张雁滨, 蒋骏, 李胜乐, 杨辉, 陈德璉. 2010. 热带气旋引起的震颤波[J]. 地球物理学报, **53**(2): 335-341.