

# 利用云南水管仪观测资料检测地球自由振荡\*

杨跃文<sup>1</sup>, 秦嘉政<sup>2</sup>, 任佳<sup>3</sup>, 杨星<sup>2</sup>, 杨玲英<sup>2</sup>, 蒋翠荣<sup>3</sup>, 袁曲<sup>4</sup>, 李丽红<sup>1</sup>, 和玉权<sup>1</sup>

(1. 云南省地震局丽江地震台, 云南 丽江 674100; 2. 云南省地震局, 昆明 650224;

3. 河北省地震局张家口中心台, 河北 张家口 075000; 4. 湖北省地震局宜昌地震台, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** 利用云南省数字化水管仪的观测资料, 采用功率谱密度估计方法, 在没有对资料进行去固体潮处理的情况下, 准确获得了2004年12月26日苏门答腊大地震激发的 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{30}$ 基频球型自由振荡, 并与前人的观测结果进行比较, 同时对照了PREM模型的理论计算周期, 发现水管仪观测与这三者符合得非常好, 除 ${}_0S_4$ 振型的观测周期和周期1、周期2、周期3的相对误差均大于0.3%外, 其余的差别在3‰以下。研究表明, 利用数字化水管仪观测资料的确可以提取到苏门答腊大地震激发的地球球型振荡, 这就为地球自由振荡的研究提供了一种新的观测手段。

**关键词:** 水管仪; 苏门答腊9.0级大地震; 地球自由振荡; 球型振荡

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2010)02-0189-06

## 0 引言

大地震的震动产生地震波, 其中体波直接通过地球传播, 而其他波则沿地球表面传播。面波从震源向各方向射出, 由于地球是球体, 这些不同方向的波最终产生相互干涉, 这种干涉方式叫“自由振荡”。

地球自由振荡的理论研究最早可追溯到18世纪。Lamb (1882) 详细讨论了均匀球体的较简单的振型, 对应现在通常称为球型振荡和环型振荡的两种振型。最早对地球自由振荡进行准确观测是在1960年智利 $M_s 8.3$ 地震后, 分别用Isabella应变仪 (Benioff *et al.*, 1961) 和LaCoste-Romberg重力仪 (Ness *et al.*, 1961) 实现的。两套仪器的观测结果非常吻合并与理论值相当一致, 确认了长周期自由振荡的存在。至今, 用于观测地球自由振荡的仪器主要包括: 宽频带地震仪、基线应变仪、重力仪、水管倾斜仪和垂直摆倾斜仪 (Benioff *et al.*, 1961; Alsop *et al.*, 1961; Bogert, 1961; Dziewonski Gillbert, 1972; Bolt Garnie, 1975; Zadro, Braitenbeng, 1999; 任佳等, 2009)。2004年12月26日发生的苏门答腊大地震为研究地球自由振荡提供了难得的机会。Stein和Okal (2005a, b)、万永革等 (2007)、

雷湘鄂等 (2007)、邱泽华等 (2007) 分别对这次地震激发的地球自由振荡进行了研究。目前国内还没有利用数字化水管仪观测资料对这次地震激发的自由振荡进行研究的报道。本文利用云南省数字化水管仪的观测资料提取了这次地震激发的地球球型自由振荡。

## 1 资料

2004年12月26日印尼苏门答腊岛西部附近海域印度洋发生9.0级地震, 震中位置为 $3.9^\circ\text{N}$ ,  $95.9^\circ\text{E}$  (NEIC资料), 并在印度洋多个周边国家引发大规模海啸, 造成了约1300 km长的余震区。

云南省使用的水管仪是中国地震局武汉地震科学仪器研究院研制的DSQ型数字化水管仪, 这是目前我国地震倾斜潮汐观测台网中使用的主要观测仪器。该仪器是根据连通管内水面保持自然水平的原理研制的, 具有基线长、漂移小、精度高的特点。它不仅提供了垂直位移信息, 而且为地球固体潮汐和地壳岩石物理性质变化的研究提供实验数据 (国家地震局科技监测司, 1995), 状态良好的水管仪适合观测球型的自由振荡。

针对这次地震, 笔者研究了云南省云龙台、永胜台和楚雄台水管仪的观测数据, 发现这3个台站的双向记录均可以较好地识别出球型振荡。图1

\* 收稿日期: 2009-08-01.

基金项目: 云南省重点项目“云南强震活动与动力学研究”与“云南地球物理场研究”共同资助。

是这 3 个台站水管仪双向记录的苏门答腊 9.0 级大地震分钟值曲线, 这些曲线没有经过任何消除干扰的处理, 从图中可清晰看到固体潮和地震波。分析采用的数据从地震发生后开始, 我们提取了有明显地震影响的 5 天的资料, 共 7 200 min。

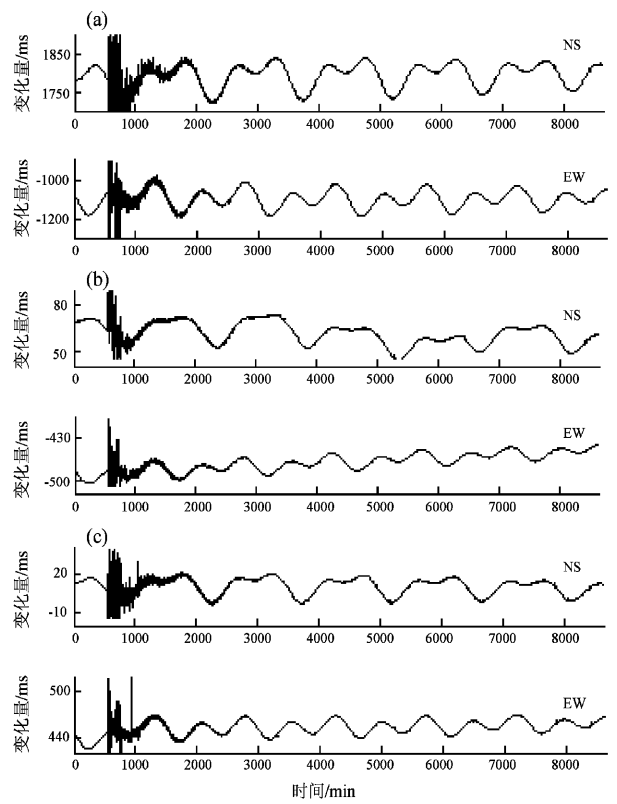


图 1 云南省水管仪记录的苏门答腊 9.0 级大地震分钟值曲线  
(a) 云龙台; (b) 永胜台; (c) 楚雄台  
Fig. 1 Minute-value curves given by the digital water-tube tiltmeters at Yunlong (a), Yongsheng (b) and Chuxiong (c) seismic station in Yunnan Province recorded the M9.0 Sumatra-Andaman great earthquake on 26 December, 2004

## 2 处理方法

本文研究采用功率谱密度估计的方法来提取地球自由振荡, 其定义为记录到的波形资料的自相关函数  $R_n$  的 Fourier 变换 (万永革, 2007), 即

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} R_n e^{-i \frac{2\pi nk}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

其中, 自相关函数

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j x_{j+n} \quad n = -(N-2), -(N-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1, N-1. \quad (2)$$

式中,  $N=7\,200$ , 为所用数据的数目,  $x$  为台站记录的水管仪数据,  $S_k$  离散值为功率谱密度值。为消除数据不能无限长而必须加窗造成的对功率谱密度估计的影响, 本文采用 Hanning 窗来抑制旁瓣, 突出主瓣。

## 3 结果

按照前面的计算方法, 我们得到了云龙台、永胜台和楚雄台水管仪双向记录的功率谱密度估计 (图 2~6)。图 2 为 0.28~0.55 MHz 频段的功率谱密度估计, 在这一频段可以看到, 虽然  ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0T_2$  振型附近的功率谱密度有一个峰值, 但相对于周围的噪声水平并没有明显分开。通常在低频段地球自由振荡振型不易从噪声中予以区分 (雷湘鄂等, 2002)。

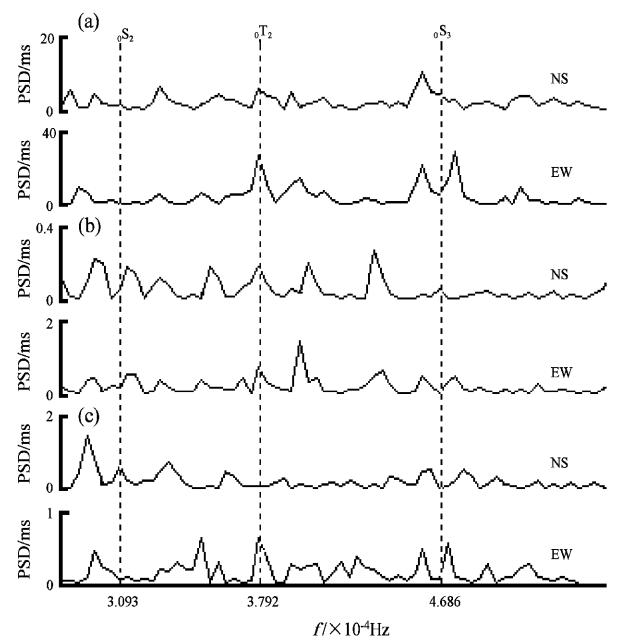


图 2 0.28~0.55 MHz 频段水管仪观测数据功率谱密度估计曲线 (垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值)  
(a) 云龙台; (b) 永胜台; (c) 楚雄台  
Fig. 2 Curves given by power spectrum density estimation of observational data in the 0.28~0.55 MHz frequency band of the digital water-tube tiltmeters (dotted line; the free-oscillation frequency given by PREM model) (a) Yunlong station; (b) Yongsheng station; (c) Chuxiong station

图3、图4为0.55~2.4 MHz频段的功率谱密度（相对值）与PREM模型给出的球型振荡频率值的对应情况。在这一频段，云龙台、永胜台、楚雄台水管仪双向的观测数据可以清楚地检测到球型振荡的基型振荡 ${}_0S_4$ 、 ${}_0S_5$ 、 ${}_0S_6$ 、 ${}_0S_7$ 、 ${}_0S_8$ 、

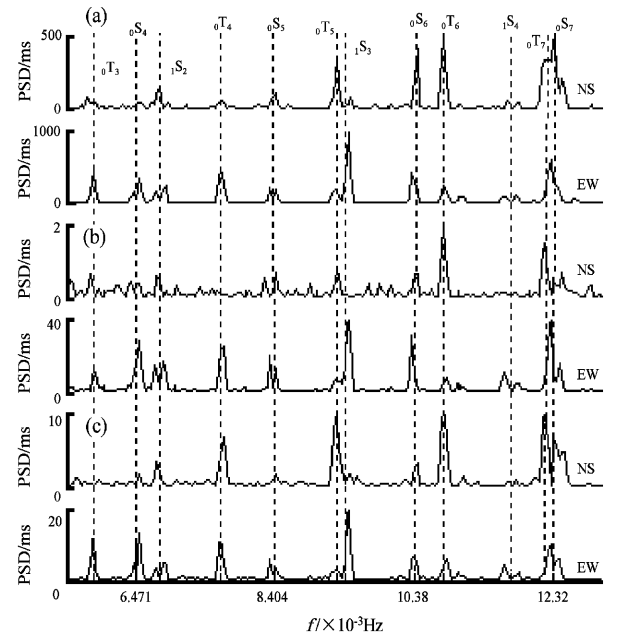


图3 0.55~1.3 MHz 频段水管仪观测数据功率谱密度估计曲线（垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值）  
(a) 云龙台；(b) 永胜台；(c) 楚雄台

Fig.3 Curves given by power spectrum density estimation of observational data in the 0.55 ~ 1.3 MHz frequency band of the digital water-tube tiltmeters (dotted line: the free-oscillation frequency given by PREM model)  
(a) Yunlong station; (b) Yongsheng station; (c) Chuxiong station

图5为2.4~3.2 MHz频段的功率谱密度（相对值）与PREM模型给出的球型振荡频率值的对应情况。可以看出3个台站均能清楚地检测出 ${}_0S_{16}$ ~ ${}_0S_{23}$ 。

图6为3.2~3.84 MHz频段的功率谱密度（相对值）与PREM模型给出的球型振荡频率值的对应情况。可以看到，虽然在这个频段噪声比较大，但3个台站的观测数据仍然可以较清楚地检测到球型基频振荡 ${}_0S_{24}$ ~ ${}_0S_{30}$ 。

通过绘制印尼地震中3个台站的功率谱，我们得到了球型振荡 ${}_0S_4$ ~ ${}_0S_{30}$ 等振型的周期平均值。将我们的观测结果与Benioff等（1961）用Isabella

${}_0S_9$ 、 ${}_0S_{10}$ 、 ${}_0S_{11}$ 、 ${}_0S_{12}$ 、 ${}_0S_{13}$ 、 ${}_0S_{14}$ 、 ${}_0S_{15}$ ，同时，还检测到谐频球型振荡 ${}_1S_2$ 、 ${}_1S_3$ 、 ${}_1S_4$ 、 ${}_1S_5$ 、 ${}_1S_6$ 和环型振荡 ${}_0T_3$ 、 ${}_0T_4$ 、 ${}_0T_5$ 、 ${}_0T_6$ 、 ${}_0T_7$ 、 ${}_0T_8$ 、 ${}_0T_9$ 、 ${}_0T_{10}$ 、 ${}_0T_{11}$ 。

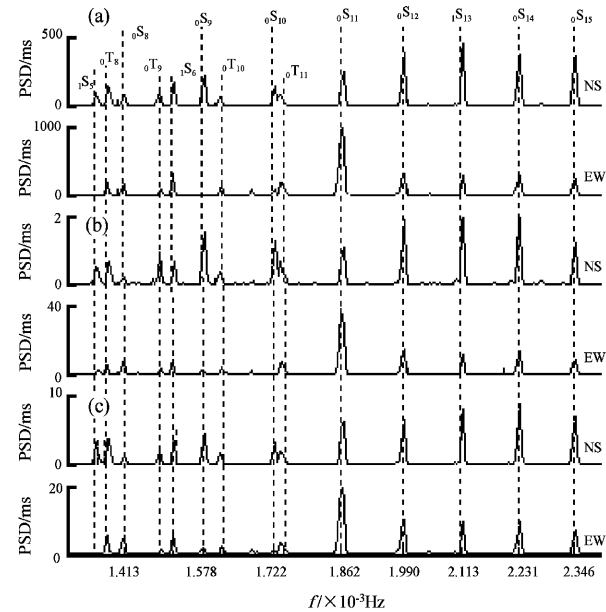


图4 1.3~2.4 MHz 频段水管仪观测数据功率谱密度估计曲线（垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值）  
(a) 云龙台；(b) 永胜台；(c) 楚雄台

Fig.4 Curves given by power spectrum density estimation of observational data in the 1.3 ~ 2.4 MHz frequency band of the digital water-tube tiltmeters (dotted line: the free-oscillation frequency of oscillation mode given by PREM model)  
(a) Yunlong station; (b) Yongsheng station; (c) Chuxiong station

应变仪及Ness等（1961）用Lacoste-Romberg弹簧重力仪对自由振荡的观测进行了比较，同时对照了PREM模型的理论计算周期（表1）。 ${}_0S_4$ ~ ${}_0S_{30}$ 的基频振型，水管仪观测所得数据与这三者符合得非常好，除 ${}_0S_4$ 振型的观测周期和周期1、周期2、周期3的相对误差均大于0.3%外，其余的差别在3‰以下。在周期1、周期2中存在个别振型的相对误差大于0.3%的情形，通过对比发现，水管仪观测结果仅与其中一者的差别较大，而与另一观测结果却符合的很好，尤其与PREM模型符合的最好，我们认为，我们的观测结果可能在部分振型优于周期1和周期2的观测结果。

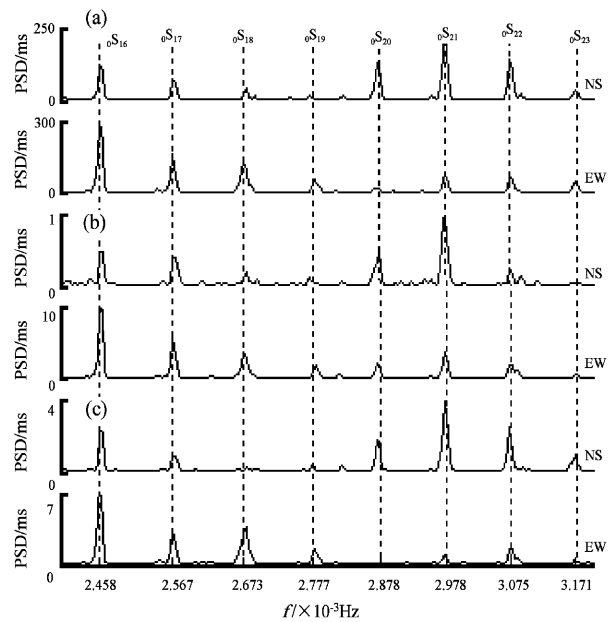


图5 2.4~3.2 MHz 频段水管仪观测数据功率谱密度估计曲线（垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值）  
(a) 云龙台；(b) 永胜台；(c) 楚雄台

Fig. 5 Curves given by power spectrum density estimation of observational data in the 2.4~3.2 MHz frequency band of the digital water-tube tiltmeters (dotted line: the free-oscillation frequency given by PREM model)  
(a) Yunlong station; (b) Yongsheng station; (c) Chuxiong station

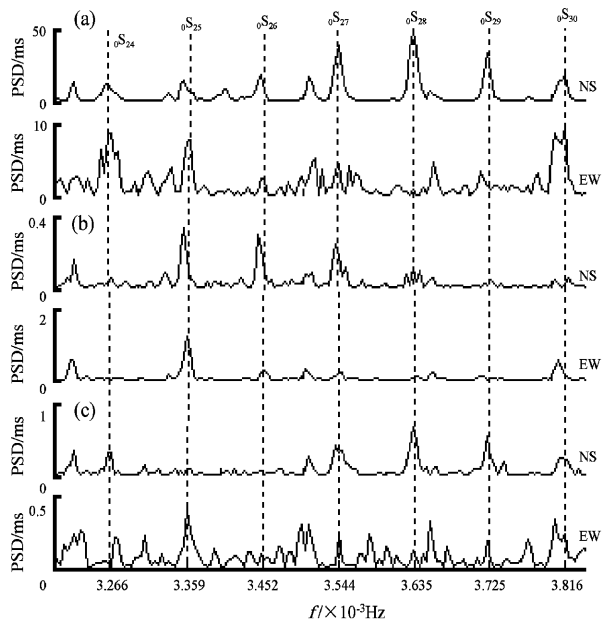


图6 3.2~3.84 MHz 频段水管仪观测数据功率谱密度估计曲线（垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值）  
(a) 云龙台；(b) 永胜台；(c) 楚雄台

Fig. 6 Curves given by power spectrum density estimation of observational data in the 3.2~3.8 MHz frequency band of the digital water-tube tiltmeters (dotted line: the free-oscillation frequency given by PREM model)  
(a) Yunlong station; (b) Yongsheng station; (c) Chuxiong station

表1  ${}_0S_4 \sim {}_0S_{30}$  基频地球自由振荡周期的观测及理论值

Tab. 1 Observed data and the theoretical data of fundamental-frequency, free oscillation ( ${}_0S_4 \sim {}_0S_{30}$ ) of the Earth

振型	周期 1/s	周期 2/s	周期 3/s	周期 4/s	振型	周期 1/s	周期 2/s	周期 3/s	周期 4/s
${}_0S_4$	25.8(0.66%)	25.85(0.85%)	25.76(0.50%)	25.63	${}_0S_{18}$	6.23(0.03%)	6.232(0.06%)	6.235(0.11%)	6.228
${}_0S_5$	19.8(0.10%)	19.83(0.25%)	19.83(0.25%)	19.78	${}_0S_{19}$	6.01(0.18%)	6.002(0.05%)	6.002(0.05%)	5.999
${}_0S_6$	16.0(0.37%)	16.07(0.06%)	16.05(0.06%)	16.06	${}_0S_{20}$	5.78(0.29%)	5.778(0.33%)	5.790(0.12%)	5.797
${}_0S_7$	13.5(0.15%)	13.42(0.75%)	13.53(0.07%)	13.52	${}_0S_{21}$	5.59(0.20%)	5.608(0.12%)	5.597(0.07%)	5.601
${}_0S_8$	11.81(0.08%)	11.78(0.17%)	11.80(0.00%)	11.80	${}_0S_{22}$	5.39(0.59%)	5.423(0.02%)	5.420(0.04%)	5.422
${}_0S_9$	10.56(0.00%)	10.57(0.09%)	10.56(0.00%)	10.56	${}_0S_{23}$	5.26(0.10%)	5.255(0.00%)	5.256(0.02%)	5.255
${}_0S_{10}$	9.66(0.05%)	9.685(0.21%)	9.679(0.14%)	9.665	${}_0S_{24}$	5.10(0.04%)	5.104(0.04%)	5.103(0.02%)	5.102
${}_0S_{11}$	8.98(0.55%)	8.934(0.03%)	8.951(0.22%)	8.931	${}_0S_{25}$	4.96(0.00%)	4.959(0.02%)	4.961(0.02%)	4.960
${}_0S_{12}$	8.37(0.11%)	8.368(0.08%)	8.374(0.16%)	8.361	${}_0S_{26}$	4.83(0.02%)	4.828(0.02%)	4.828(0.02%)	4.829
${}_0S_{13}$	7.88(0.03%)	7.882(0.05%)	7.888(0.13%)	7.878	${}_0S_{27}$	4.69(0.26%)	4.703(0.02%)	4.703(0.02%)	4.702
${}_0S_{14}$	7.47(0.12%)	7.468(0.09%)	7.469(0.11%)	7.461	${}_0S_{28}$	4.59(0.09%)	4.585(0.02%)	4.586(0.00%)	4.586
${}_0S_{15}$	7.10(0.03%)	7.101(0.04%)	7.104(0.08%)	7.098	${}_0S_{29}$	4.47(0.09%)	4.476(0.04%)	4.474(0.00%)	4.474
${}_0S_{16}$	6.78(0.00%)	6.780(0.00%)	6.781(0.01%)	6.780	${}_0S_{30}$	4.37(0.09%)	4.366(0.00%)	4.368(0.05%)	4.366
${}_0S_{17}$	6.48(0.12%)	6.488(0.00%)	6.492(0.06%)	6.488					

注：周期1是 Benioff 等（1961）用 Isabella 应变仪观测到的；周期2是 Ness 等（1961）用 Lacoste-Romberg 弹簧重力仪观测到的；周期3是根据 PREM 模型理论计算得到的；周期4是水管仪检测到的周期平均值。括号中的百分数表示相对误差。

## 4 结论和讨论

(1) 我们用云南省云龙台、永胜台和楚雄台水管仪双向的数字化观测资料成功地对印尼苏门答腊 9.0 级大地震激发的球型自由振荡进行了提取,准确检测到了 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{30}$ 的基型球型振荡,同时还检测到谐频球型振荡 ${}_1S_2$ 、 ${}_1S_3$ 、 ${}_1S_4$ 、 ${}_1S_5$ 、 ${}_1S_6$ 和环型振荡 ${}_0T_3$ 、 ${}_0T_4$ 、 ${}_0T_5$ 、 ${}_0T_6$ 、 ${}_0T_7$ 、 ${}_0T_8$ 、 ${}_0T_9$ 、 ${}_0T_{10}$ 、 ${}_0T_{11}$ 。这为研究地球自由振荡提供了一种新的观测手段。

(2) 本研究没有对观测数据进行去固体潮的处理,而是直接提取地球自由振荡的信息,结果表明这样的处理在一定条件下是可行的。

(3) 这里需要说明的是,除了地震可以激发地球自由振荡外,目前的研究表明有许多其它因素,如大气扰动(Nishida, Kobayashi, 1999)、随季节变化的大气压力变化(Tanimota *et al*, 1998; Tanimota, Um, 1999)也可引起地球自由振荡。因此本文所检测到的印尼苏门答腊大地震激发的地球自由振荡资料还可能其它源的贡献。

(4) 从文中可以看到在某些频段,不同台站、不同方向观测到的差异较大,这可能表明地球介质(特别是上地幔)存在横向不均匀性或各向异性,或许运用地球自由振荡资料可以对横向不均匀性或各向异性提供一种新的约束(Nowroozi, 1972; Widmer-Schmidrig, 1999; Resovsky, Pestana, 2003; 刘希强, 周蕙兰, 1998)。

(5) 对地球自由振荡问题的探讨正在逐渐深入,除为地球结构问题研究提供约束条件外,还可以利用自由振荡观测资料研究震源过程(Park *et al.*, 2005)、测量  $Q$  值(徐彦等, 2004)、鉴别慢地震(Beroza, Jordan, 1990)。至于如何为建立更精确的地球模型提供新信息,是需要深入研究的问题。另外,如何用这种观测资料来检验水管仪观测的频响特性,也是值得进一步研究的问题。

致谢: PREM 模型数据由万永革老师提供,所用数据由云南省地震监测中心前兆台网提供,在此表示感谢。

## 参考文献:

- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震地形变观测技术[M]. 北京:地震出版社, 147.
- 雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽, 等. 2007. 苏门达腊地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论[J]. 中国科学(D 辑), 37(4): 504 - 511.
- 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 2002. 利用超导重力观测资料检测地球自由振荡[J]. 科学通报, 47(18), 1 432 - 1 436.
- 刘希强, 周蕙兰. 1998. 地震各向异性研究进展[J]. 地震研究, 21(2): 185 - 195.
- 邱泽华, 马瑾, 史顺良, 等. 2007. 钻孔差应变仪观测的苏门答腊大地震激发的地球环型自由振荡[J]. 地球物理学报, 50(3): 797 - 805.
- 任佳, 陈华静, 王松, 等. 2009. 汶川大地震激发的地球球型自由振荡[J]. 中国地震, 25(1): 73 - 80.
- 万永革, 盛书中, 周公威. 2007. 中国数字地震台网记录的苏门答腊—安达曼地震激发的地球球型自由振荡的检测[J]. 地震学报, 29(4): 369 - 381.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京: 科学出版社, 252 - 279.
- 徐彦, 苏有锦, 秦嘉政. 2004.  $Q$  值研究动态[J]. 地震研究, 27(4): 385 - 389.
- Alsop L E, Sutton G H, Ewing M. 1961. Free oscillation of Earth observed on strain and pendulum seismographs[J]. J Geophy Res, 66(2): 631 - 641.
- Benioff H, Press F, Smith S. 1961. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes[J]. J Geophy Res, 66(2): 605 - 619.
- Beroza G C, Jordan T H. 1990. Searching for slow and silent earthquakes using free oscillations[J]. J Geophy Res, 95(B3): 2 485 - 2 510.
- Bogert B P. 1961. An observation of free oscillations of the Earth[J]. J Geophy Res, 66(2): 643 - 646.
- Bolt B A, Currie R G. 1975. Maximum entropy estimates of Earth torsional eigenperiods from 1960 trieste data[J]. Geophys J R Astr Soc, 40: 107 - 114.
- Dziewonski A M, Gilbert F. 1972. Observation of normal modes from 84 recordings of the Alaskan earthquakes Of 1964 March 28[J]. Geophys J R Astr Soc, 27: 393 - 446.
- Lamb H. 1882. On the variations of an elastic sphere[J]. Lond Math Soc Proc, 13: 233 - 256.
- Ness N R, Harrison C T, Slichter L B. 1961. Observation of the free oscillation of the earth[J]. J Geophy Res, 66: 621 - 629.
- Nishida K, Kobayashi N. 1999. Statistical features of Earth's continuous free Geophys oscillations[J]. J Geophys Res, 104: 28 741 - 28 750.
- Nowroozi A A. 1972. Characteristic periods of fundamental and overtone oscillations of the earth following a deep-focus earthquake[J]. Bull Seism Soc Amer, 62: 247 - 274.
- Park J, Song T A, Tromp J, *et al.* 2005. Earth's free oscillations excited by

- the 26 December 2004 Sumatra Andaman earthquake[J]. Science, 308:1 139 – 1 146.
- Resovsky J S, Pestana R, 2003. Improved normal mode constraints on lower mantle Vp from generalized spectral fitting[J]. Geophys Res Lett, 30:1 – 4.
- Stein S, Okal E A. 2005a. Seismology: Speed and size of the Sumatra earthquake[J]. Nature, 434 (7033) :581 – 582.
- Stein S, Okal E A. 2005b. The 2004 Sumatra earthquake and India ocean t sunami: What happened and why[J]. The Earth's Scientist, 2:6 – 11.
- Tanimota T, Um J. 1999. Cause of continuous oscillations of the earth[J]. J Geophys Res, 104 (B12) :28 723 – 28 740.
- Tanimota T, Um J, Nishida K, et al. 1998. Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days[J]. Geophys Res Lett, 25 (10) :1 553 – 1 556.
- Widmer – Schnidrig R. 1999. Free oscillations illuminate the mantle[J]. Nature, 398 (6725) :292 – 293. .
- Zadro M, Braitenberg C. 1999. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas[J]. Earth Science Reviews, 47:151 – 187.

## Detecting the Free Oscillation of the Earth through the Observational Data of Water-tube Tiltmeters in Yunnan

YANG Yue-wen<sup>1</sup>, QIN Jia-zheng<sup>2</sup>, Ren Jia<sup>3</sup>, YANG Xing<sup>2</sup>, YANG Ling-ying<sup>2</sup>,  
JIANG Cui-rong<sup>3</sup>, YUAN Qu<sup>4</sup>, LI Li-hong<sup>1</sup>, HE Yu-quan<sup>1</sup>

(1. Lijiang Seismic Station, Earthquake Administration of Yunnan Province, Lijiang 674100, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(3. Zhangjiakou Central Seismic Station, Earthquake Administration of Hebei Province, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

(4. Yichang Seismic Station, Earthquake Administration of Hubei Province, Yichang 443000, Hubei, China)

### Abstract

By power spectrum density estimation, we extract the fundamental-frequency, spheroidal, free oscillation ( ${}_0S_3 \sim {}_0S_{26}$ ) of the Earth excited by the  $M9.0$  Sumatra-Andaman great earthquake on 26 December 2004 from the data of digital water-tube tiltmeters from Yunlong seismic station, Yongsheng seismic station, and Chuxiong seismic station in Yunnan Province without eliminating the Earth's tide. Comparing the extracted free oscillation with those observed by Benioff with the strainmeter Isabella and by Ness with the gravimeter Lacoste-Romberg and referring to the period of the extracted oscillation with that of the theoretical oscillation from the Preliminary Reference Earth Model (PREM), we find that they are in very good accordance with each other; the relative errors of  ${}_0S_4$  period, period 1, period 2, period 3 are greater than 0.3% while the relative errors of other periods are less than 3%. This proves that extracting the free oscillation of the Earth from the data of digital water tube tiltmeter is a new approach.

**Key words:** water-tube tiltmeter,  $M9.0$  Sumatra-Andaman earthquake, free oscillation of the Earth, spheroidal oscillation