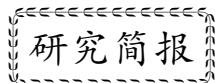


徐纪人, 赵志新, 曾祥芝, 皮金云. 2016. 东海深井地球物理长期观测仪器设置与观测研究. 地震学报, 38(2): 321-325. doi:10.11939/jass.2016.02.016.

Xu J R, Zhao Z X, Zeng X Z, Pi J Y. 2016. Instrument installation and observation research for borehole geophysical long-term observation in Donghai, Jiangsu. *Acta Seismologica Sinica*, 38(2): 321-325. doi:10.11939/jass.2016.02.016.



东海深井地球物理长期观测仪器设置与观测研究^{*}

徐纪人^{*} 赵志新 曾祥芝 皮金云

(中国北京 100037 中国地质科学院地质研究所)

关键词 深井地球物理长期观测 仪器设置 观测研究 微小地震 深井地震学

doi:10.11939/jass.2016.02.016 中图分类号: P315.6 文献标志码: A

Instrument installation and observation research for borehole geophysical long-term observation in Donghai, Jiangsu

Xu Jiren^{*} Zhao Zhixin Zeng Xiangzhi Pi Jinyun

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Key words: borehole geophysical long-term observation; instrument installation; observation research; micro-earthquake; borehole seismology

东海深井地球物理长期观测是我国开展深井地震学观测研究的第一步, 其目的是为了排除地面干扰, 取得高信噪比、高分辨率和高精度的地球物理观测资料。美国圣安德列斯断层项目组开展的深井综合地球物理观测研究项目在4000 m深井的不同深度处设置了多种观测仪器(Chavarria *et al.*, 2003), 进行震源过程及地震预报等研究(Schleicher *et al.*, 2009; Tembe *et al.*, 2009; Jeppson, Tobin, 2015)。日本已建成数十所深井地球物理观测站, 观测资料用于地震预报研究(Fujimoto *et al.*, 2007; 石井絃, 2010)以及2011年东日本M9巨大地震高滑动区域的动力学特征(Ikali *et al.*, 2015)等研究。联邦德国大陆深钻项目的主孔深达9101 m, 4000 m先导孔注水诱发地震实验表明, 诱发地震仅发生在该区10 km深处脆延性过渡带以上的地层内(涂毅敏, 陈运泰, 2002)。Ma等(2012)在我国台湾地区车龙埔断层上1300 m深的钻孔内设置了7台深井地震仪进行长期观测, 并进行地震预报研究。

经过数年的调研与前期工作, 我们在江苏东海中国大陆科学钻探(Chinese continental scientific drilling, 简写为CCSD)项目5158 m深的主孔内($34^{\circ}24'20.9''N$, $118^{\circ}40'22.1''E$), 实施了深井地震仪设置的一期工程(徐纪人, 赵志新, 2009), 将4组8套耐高温高压的短周期深井地震仪分别安置在4050, 2545.5, 1559.5和544.5 m深度处, 建立了我国第一所深井地球物理长期观测站, 并已投入了试验性观测。东海深井地球物理长期观测站(简称东海长观站)的建立, 将大大提高我国东部大陆活动断裂带及其近海海域的地震活动监测能力, 为研究大陆现代构造运动特征、揭示地域岩石圈形成及演化过程提供客观的地震学证据, 为丰富地球动力学的科学认知发挥重要作用(徐纪人等, 2003; 徐纪人, 赵志新, 2004)。东海长

* 基金项目 国家自然科学基金(41374052)资助。

收稿日期 2015-09-14 收到初稿, 2016-01-28 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: xujiren1125@aliyun.com.cn



观站不仅是我也是目前世界上最深的深井地球物理长期观测站, 其填补了我国在深井地震学研究方面的空白, 为我国在该领域赶超世界先进水平迈出了第一步(徐纪人等, 2012, 2013, 2015).

东海长观站位于苏鲁超高压变质带与现代地震活动频繁的郯庐断裂带交汇处, 如图 1 所示. 1668 年郯城 $M8.5$ 大地震和 1937 年山东菏泽 $M7.0$ 地震就发生在该断裂带上(Zhao *et al*, 2012). 观测站周围被出露的含石榴石和黑云母的斜长(二长)花岗质片麻岩和表壳岩系包围, 岩石完整性好, 适合开展地球物理综合观测. 东海长观站位于 CCSD 主孔内, 在 5000 m 深处温度高达 142.4°C , 压力高达 50 MPa. CCSD 主孔的最小内径为 104 mm, 井深 4790 m 以下为裸孔. 在深井主孔 544.5, 1559.5, 2545.5 和 4050 m 深度处各设置了两组地震仪, 从浅至深编号依次为 L_1 , L_2 , L_3 和 L_4 . 不同深度处的岩石性质和类型均有所差异. 4 组观测仪器处的井壁岩石均比较完整, 适合进行地震观测. 各深度处深井观测仪器参数及其周围岩石的岩性和物理参数如表 1 所示. 在地面设置了 2 台英国 Guralp 公司制造的宽频三分量地震仪 L_0 , 共同组成了深井地震观测网.



图 1 中国东部大地构造和东海深井地球物理长期观测站位置(三角形)

Fig. 1 Geotectonic of eastern China and the location of the Borehole Geophysical Long-Term Observatory in Donghai (triangle)

表 1 各深度处深井观测仪器参数及其周围岩石的岩性和物理参数

Table 1 Parameters of borehole observation instruments in different depths and the lithology and physical parameters of the surrounding rocks

仪器编号	设置深度/m	f	岩性	$v_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_s/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	温度/°C
L_0	0	60 s—50 Hz				
L_1	544.5	4.5 Hz 15.0 Hz	斜长角闪岩和 退变榴辉岩	6.65	3.70	29.1
L_2	1559.5	4.5 Hz 15.0 Hz	花岗质片麻岩 (正片麻岩)	5.50	2.94	51
L_3	2545.5	4.5 Hz 15.0 Hz	斜长片麻岩	5.98		75
L_4	4050	4.5 Hz 15.0 Hz	花岗质片麻岩	6.45		118

2011 年夏, 我们在东海长观站进行了深井地震仪安装设置的一期工程. 在深井中设置了美国 SONDI 公司研发制造的深井观测仪器设备. 不同深度的 L_1 , L_2 , L_3 和 L_4 等 4 组地震观测仪各安装了 2 套三分量高精度数字地震仪(1 套观测主频为 4.5 Hz, 另 1 套观测主频为 15 Hz), 1 套地温观测仪, 并在 3500 m

深度处安装1套流体压力仪, 4组地震仪分别用4根不同的电缆与地面数据处理设备相连接。 L_1 、 L_2 和 L_3 配用单铠甲电缆, L_4 仪器配用耐高温的双铠甲电缆, 供三分量地震仪、地温观测仪和流体压力仪使用。

考虑到东海深井地震仪安置在井下5000 m深处, 仪器必须具备耐高温(150°C以上)、耐高压(50 MPa以上)及稳定连续工作10年以上等性能。根据深井孔径大小, 确定仪器的外径尺寸。CCSD主孔的内径最小处仅有104 mm, 需选用适用的小口径仪器, 最终选用耐高温高压的仪器材料和OYO GEOSPACE公司制造的4.5 Hz地震观测仪, 以满足东海深井观测的基本要求。

图2a左起分别为下井安装前的 L_4 、 L_3 、 L_2 和 L_1 深井地震仪、三分量地震仪等密封于不锈钢管外壳内, 电缆与仪器外壳密封连接。井下仪器观测信号通过双铠甲和单铠甲多芯电缆传输到地面与接收器相连接。为了防止电缆在空中摆动和减轻电缆向下的拉力强度, 通过箍捆将其固定在钢质钻杆(石油标准钻杆)上, 将连接地震仪与地面接收系统的电缆与支撑电缆的钢质钻杆同时放入井中, 如图2b所示。从地表至3500 m深度, 由钻管支撑井下地震仪及其电缆重量。钻杆放置在3500 m深处的阻流器上, 其下端的流体压力阻流器密封后安置于尾管悬挂器上。东海深井地震仪的电缆和仪器通过井架吊起下井。

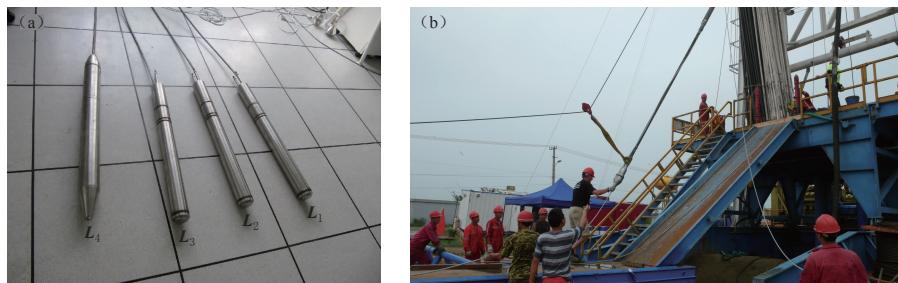


图2 与双、单铠甲电缆相连的 L_4 、 L_3 、 L_2 和 L_1 深井地震仪(a)及其下井安装设置(b)

Fig 2 Borehole seismographs L_4 , L_3 , L_2 and L_1 lined with the double armours and single armour (a) and their installation (b)

在一期安装工程中, 最深的地震仪 L_4 的设置深度达到了4050 m, 超过了之前日本3800 m的世界最深深度, 成为目前世界第一深的深井观测站。井下仪器无供电要求, 可以在深井高温高压环境下连续工作。仪器安装完成的3年多内, 东海深井地震仪经受了雷击等干扰, 工作状态基本保持正常。三分量地震仪灵敏度高于2.00 V/in/s, 动态范围为100 dB。深井4.5 Hz地震仪的峰值输出幅度为5.75 V; 另一套地震仪主频为15 Hz, 峰值输出幅度为2.08 V。地震仪的模数转换使用美国Reftek公司的记录模数转换系统, 该系统功耗低。深井地震仪多道地震数采系统通过电缆与地面室内计算机网络设备相连接, 将采集到的数据传输至深井观测站地面处理中心。目前, 在维持正常观测的同时, 仍积极探索制定新的实施方案, 计划在条件成熟时进行深井观测仪器安装的二期工程, 以达到预期目标。

自2011年11月起至今, 东海深井地震仪已记录到周围地面常规台站观测不到的 $M_{L0}-1$ 甚至更小的微小地震活动。多年观测资料表明, 东海深井地震观测能有效地排除地面噪音, 高精度地接收地球内部的微小地震信息, 基本达到了预期效果。

图3为东海长观站 L_3 深井地震仪记录到的典型地震波形。可以看出, 地震前噪音水平低, 地震事件三分量的初动和波形均十分清晰, 各震相清晰可辨。与地面相似频带的地震台站观测记录进行初步对比, 结果表明深井地震观测信噪比明显高于地面标准地震台站。到目前为止, 东海深井地震观测到的最小地震为 $M_{L0}0.3$, 震中距为21 km, 是附近常规地震台站所观测不到的微小地震活动。对于震中距小于200 km的近震, 东海长观站观测到的初至波震相更为清晰, 其观测质量明显优于地面常规台站。

目前, 东海主孔深井地球物理观测仪器工作基本正常, 我们正在利用地面和不同深度处的地震资料, 定性定量地研究深井地震仪不同深度的观测能力和地震波信噪比的变化规律; 研究不同深度岩层地震波形的非线性增幅效应特征; 利用高精度的深井地震观测资料进行郯庐断裂带微小地震活动及其构造动力

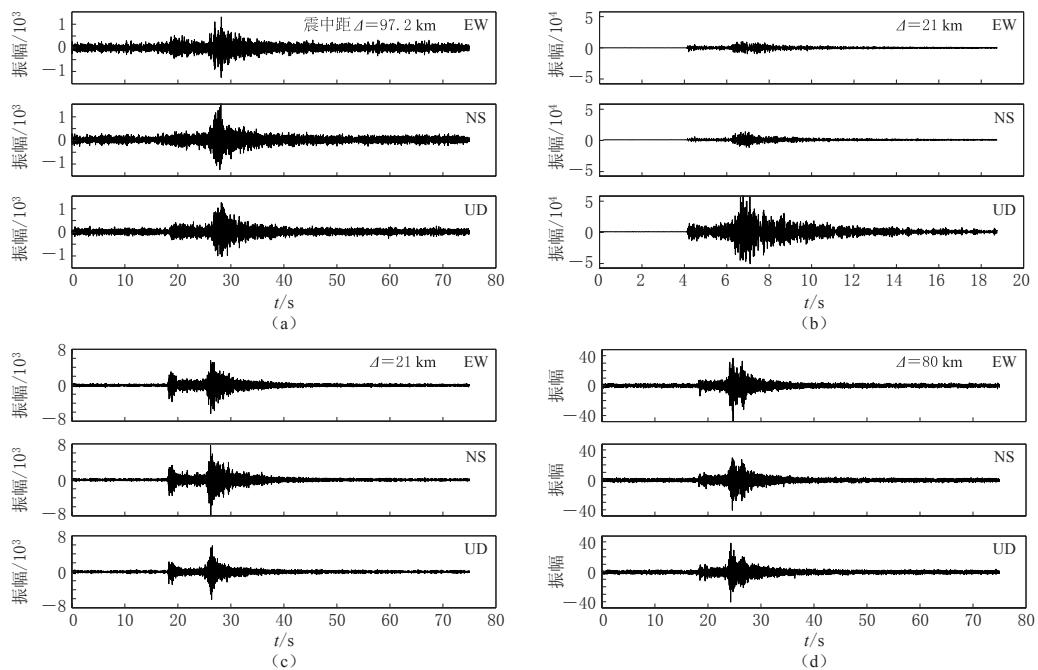


图 3 东海深井地球物理长期观测站 L_3 地震仪(4.5 Hz)记录的典型地震波形
 (a) 2013 年 2 月 3 日江苏灌云 $M_{L0.8}$ 地震; (b) 2012 年 11 月 9 日江苏东海 $M_{L0.6}$ 地震;
 (c) 2013 年 6 月 12 日江苏涟水 $M_{L0.3}$ 地震; (d) 2012 年 4 月 10 日山东苍山 $M_{L1.5}$ 地震
 Fig. 3 Typical waveforms recorded by the seismographs L_3 with main frequency 4.5 Hz
 of the Borehole Geophysical Long-Term Observatory in Donghai
 (a) $M_{L0.8}$ Guanyun, Jiangsu earthquake on 3 February, 2013; (b) $M_{L0.6}$ Donghai,
 Jiangsu earthquake on 9 November, 2012; (c) $M_{L0.3}$ Lianshui, Jiangsu earthquake
 on 12 June, 2013; (d) $M_{L1.5}$ Cangshan, Shandong earthquake on 10 April, 2012

学特征以及地震三要素预报研究。

东海深井地球物理观测初见成效,有待今后大量的资料积累和研究工作,为我国深井观测研究积累更多经验。

参 考 文 献

- 涂毅敏, 陈运泰. 2002. 德国大陆超深钻井注水诱发地震的精确定位[J]. 地震学报, 24(6): 587-598.
 Tu Y M, Chen Y T. 2002. The accurate location of the injection-induced microearthquakes in German continental deep drilling program[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(6): 587-598 (in Chinese).
 徐纪人, 杨文采, 赵志新, 程振炎. 2003. 苏鲁大别造山带岩石圈三维 P 波速度结构特征[J]. 地质学报, 77(4): 577-582.
 Xu J R, Yang W C, Zhao Z X, Chen Z Y. 2003. Three-dimensional velocity structures of the Sulu-Dabie orogen belt[J].
Acta Geologica Sinica, 77(4): 577-582 (in Chinese).
 徐纪人, 赵志新. 2004. 苏鲁造山带区域地壳根结构特征[J]. 岩石学报, 20(1): 149-156.
 Xu J R, Zhao Z X. 2004. Regional structure characteristics of crustal root of mountain beneath the Sulu orogenic belt[J].
Acta Petrologica Sinica, 20(1): 149-156 (in Chinese).
 徐纪人, 赵志新. 2009. 深井地球物理观测的最新进展与中国大陆科学钻探长期观测[J]. 地球物理学进展, 24(4):
 1176-1182.
 Xu J R, Zhao Z X. 2009. Recent advance of borehole geophysical observation and Chinese continental scientific drilling

- long-term observatory at depth[J]. *Progress in Geophysics*, **24**(4): 1176–1182 (in Chinese).
- 徐纪人, 高锦曦, 赵志新, 皮金云, 曾祥芝, 周云好, 傅德荣. 2012. 江苏东海 5000 米深井地球物理长期观测的最新进展[J]. 国际地震动态, (6): 129.
- Xu J R, Gao J X, Zhao Z X, Pi J Y, Zeng X Z, Zhou Y H, Fu D R. 2012. New advance for borehole geophysical long-term observation of 5000 m depth in Donghai, Jiangsu[J]. *Recent Developments in Word Seismology*, (6): 129 (in Chinese).
- 徐纪人, 高锦曦, 赵志新, 皮金云, 曾祥芝, 周云好, 傅德荣, 曲明. 2013. 中国大陆科学钻探 5000 米深井地球物理长期观测最新进展[C]//中国地球物理 2013—第十分会场论文集. 北京: 中国地球物理学会: 348.
- Xu J R, Gao J X, Zhao Z X, Pi J Y, Zeng X Z, Zhou Y H, Fu D R, Qu M. 2013. New observation progress for 5000 m depth borehole geophysical long-term observatory of Chinese continental scientific drilling[C]// *The Tenth Breakout of Chinese Geophysical Collection in 2003*. Beijing: Chinese Geophysical Society: 348 (in Chinese).
- 徐纪人, 赵志新, 曾祥芝. 2015. 深井地球物理观测与东海深井长期观测的最新进展[J]. 国际地震动态, (9): 108.
- Xu J R, Zhao Z X, Zeng X Z. 2015. New advance for borehole geophysical observation and the borehole long-term observation in Donghai[J]. *Recent Developments in Word Seismology*, (9): 108 (in Chinese).
- 石井絃. 2010. 応力連続観測と今後の地震予知研究: ポアホール応力連続観測計器の開発による今後の展開[J]. 地震ジャーナル, **50**(1): 73–77.
- Ishii H. 2010. Continual stress observation and earthquake prediction research: Prospect based on the development of borehole stress observation instrument[J]. *Earthquake Journal*, **50**(1): 73–77 (in Japanese).
- Chavarria J A, Malin P, Catchings R D, Shalev E. 2003. A look inside the San Andreas Fault at Parkfield through vertical seismic profiling[J]. *Science*, **302**(5651): 1746–1748.
- Fujimoto K, Ueda A, Ohtani T, Takahashi M, Ito H, Tanaka H, Boullier A M. 2007. Borehole water and hydrologic model around the Nojima fault, SW Japan[J]. *Tectonophysics*, **443**(3/4): 174–182.
- Ikali M J, Kameda J, Saffer D M, Kopf A J. 2015. Strength characteristics of Japan Trench borehole samples in the high-slip region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **412**: 35–41.
- Jeppson T N, Tobin H J. 2015. San Andreas Fault Zone velocity structure at SAFOD at core, log, and seismic scales[J]. *J Geophys Res*, **120**(7): 4983–4997.
- Ma K F, Lin Y Y, Lee S J, Mori J, Brodsky E E. 2012. Isotropic events observed with a borehole array in the Chelungpu fault zone, Taiwan[J]. *Science*, **337**(6093): 459–463.
- Schleicher A M, Tourscher S N, van der Pluijm B A, Warr L N. 2009. Constraints on mineralization, fluid-rock interaction, and mass transfer during faulting at 2–3 km depth from the SAFOD drill hole[J]. *J Geophys Res*, **114**(B4): B04202.
- Tembe S, Lockner D, Wong T F. 2009. Constraints on the stress state of the San Andreas Fault with analysis based on core and cuttings from San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD) drilling phases 1 and 2[J]. *J Geophys Res*, **114**(B11): B11401.
- Zhao Z, Zhao Z X, Xu J R. 2012. Velocity structure heterogeneity and tectonic motion in and around the Tan-Lu fault of China[J]. *J Asian Earth Sci*, **57**: 6–14.