

深井地球物理长期观测的最新进展及其前景

徐纪人, 赵志新

中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

摘要: 地球科学是以观测为基础的科学. 当前, 如何克服城市化、工业化、现代化发展带来的噪音干扰, 提高观测的信噪比, 成为地球科学发展的重要课题之一. 开展深井观测是解决地面噪音干扰的主要途径. 近年来, 随着地球系统科学研究的深入以及解决环境、资源、防灾等科学问题的需求, 世界大陆、大洋科学钻探工程研究以及在钻孔深井内进行的地球物理长期观测得到飞速发展, 并取得了初步的观测研究成果. 本文介绍了世界各国在深井长期观测方面的最新进展, 展示了中国大陆科学钻探工程在江苏东海现场开展深井地球物理综合观测的方案及其观测研究前景. 东海深井长期观测站将成为中国第一个无地面干扰的综合性深井地震、地球物理实验观测站, 它是实现我国“入地”科学计划的重要基础, 将开创我国 21 世纪地球科学观测研究的崭新局面.

关键词: 深井长期观测; 地震观测; 地球物理综合观测; 现代地壳变动; 原地应力测量.

中图分类号: P 631.8

文章编号: 1000-2383(2006)04-0557-07

收稿日期: 2006-04-09

Advances and Prospects for Long-Term Geophysical Observation in Deep Borehole

XU Ji ren, ZHAO Zhi xin

Key Laboratory for Continent Dynamics of the Ministry of Land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Observation is the basis of geoscientific research. A significant project in the development of geoscientific study is the improvement of the signal to noise ratio in the heavily ambient noise of industrialization and urban expansion. Observation in a deep borehole is one way to restrain the noise. Recently, scientific drilling and the long term multi component geophysical observations in deep boreholes have been speedily developed on the continent as well as in the ocean. Many observations and studies have been reported. In the present analysis, we provide an overview of geophysical observation achievements in deep boreholes worldwide. A plan for observation in the borehole in Donghai, Jiangsu of the Chinese Continent Scientific Drilling (CCSD) project is discussed and the bright future for the deep borehole geophysical observation is clarified. The long term borehole observatory in Donghai will be the first noiseless multi geophysical observatory in China. The observatory is a significant study base for researching the inner earth. The deep borehole observation will enrich geoscientific knowledge and benefit areas such as resource prospecting, environmental protection and disaster prevention.

Key words: long term observation in deep boreholes; seismic observation; integrated geophysical observation; modern crustal movement; in situ stress measurement.

地球科学是涉及到自然科学各个领域的基础科学. 近年来, 我国以及世界其他国家在航天事业方面有了突飞猛进的发展, 然而对地球内部的调查研究却因坚硬岩石的阻隔而困难重重. 迄今为止, 科学家

们对地球的认识基本是靠地表及地面探测得到的资料进行, 不但具有很大局限性, 而且难以确认其正确与否. 为了对地球内部, 如物质组成、结构、形成演化历史、运动状态和动力学机制等有比较全面、真实的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2003CB716505); 国家自然科学基金项目(No. 40399141).

作者简介: 徐纪人(1947-), 女, 日本京大工学博士, 研究员, 从事地震、地球物理及地球动力学研究. E-mail: xujiren@ccsd.org.cn

了解,我们必须“钻”进地球深处去探索.因此,进行深井观测是当前地球科学发展势在必行的重要途径.

20 世纪 80~90 年代启动的大陆、大洋科学钻探以及深钻底部进行的长期观测,是促进固体地球科学及其相关科学技术发展的重大科研项目.科学钻探不仅直接采取岩石圈地壳岩心进行测试研究,还利用钻孔深井设置仪器,在无地面干扰环境下进行长期观测,可以得到来自地球内部的客观真实信息,进而研究地球深部构造与岩石圈运动.其观测研究成果将为解决人类社会所面临的环境、资源、灾害问题开拓崭新的途径.它标志着地球科学研究已经从地面向地下深部发展,具有划时代意义.

21 世纪是地球科学飞速发展的世纪.2005 年春,中国大陆科学钻探工程首次在我国完成了 5 158 m 科学钻井,并制定了利用主孔与卫星孔进行深井长期观测规划.本文重点介绍世界科技先进国家利用深井进行地震、地球物理长期观测研究的最新进展与成果,结合我国现实情况,提出了在江苏省东海县中国大陆科学钻探工程深钻现场,开展深井长期综合观测的初步方案及其观测研究前景.

1 深井观测推动现代地球科学的发展

地球科学是以观测为基础的多学科综合科学.如何提高观测的信噪比始终是观测研究中最重要课题.特别是在人类社会工业化、城市化、现代化高度发展的今天,各种交通、工业等人为噪音,加上地球的表面效应,严重地干扰了传统地面地震与地球物理观测结果,使微小地震和来自地下微弱的地球物理信息混杂在高噪音背景下无法辨认、识别.日本 1995 年神户 7.2 级地震预报失败就是其中一例.当时,神户市区及其周围虽然有现代化的地面地震观测台网,然而在主震发生前的 12h 内仅记录到 4 个前震,没有观测到明显的前兆性变动信息(Katao and Ando, 1996).震后总结其原因与教训认为,由于城市噪音掩盖了微小前震和大震前微弱的前兆信息,致使地震预报失败,导致 6 000 余人死亡,20 万栋房屋倒塌,地铁、新干线、高速公路、桥梁等毁于一旦,现代化城市一度瘫痪的严重后果(Fukao and Ishibashi, 1996).

为了尽可能地排除地面噪音干扰的影响,提高观测的信噪比,近年来国外地震观测台站开始从地面向地下深井发展,建设了大量深井观测台站并组成深井观测台网.井深从数百米逐步发展到 1 000 m

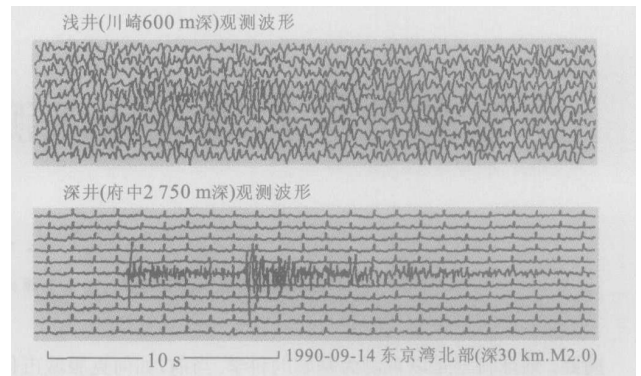


图 1 对于同一个小地震(东京湾北部 M² 地震,震源深度 30 km),浅井与深井观测站所记录的波形对比

Fig. 1 Comparison of seismic waves of same earthquake obtained at shallow (600 m) and deeper (2 750 m) boreholes

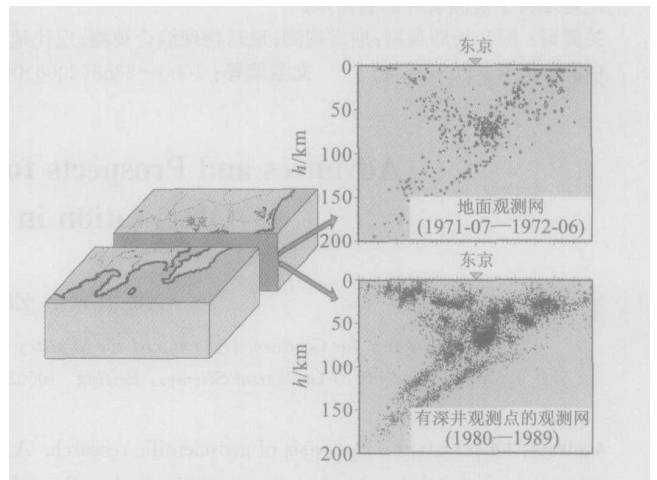


图 2 东京湾地区的地震震源剖面对比

Fig. 2 Comparison of two profiles of epicentral distribution in Tokyo bay

右上与右下图分别用地面台网观测资料与增加深井观测后的台网观测资料作成

以下,最深达 3 800 m,成为深井长期观测站.对同一个小震,地面、浅井与深井观测站的对比观测结果证明,深井长期观测可以有效地排除各种地面噪音干扰,大大提高了对微小地震和微弱的地球物理信息的观测精度(图 1).日本东京湾地区 1980 年后陆续增加了深井观测台网,取得了仅有地面观测台网无法得到的高精度、高信噪比的地震观测资料,直接推动了该区域岩石圈板块构造、运动特征以及地震预报等方面的研究(图 2).

由于深井观测具有深远的科学意义,成为世界各国大陆、海洋科学钻探项目的重要组成部分.作为国际大陆科学钻探组织(ICDP)项目,中国大陆科学

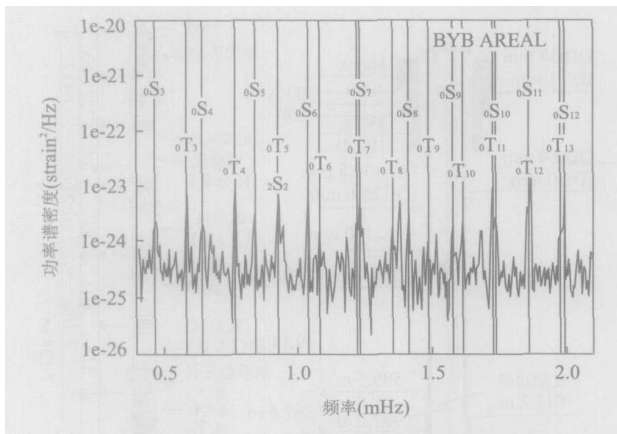


图 4 日本屏风山深井地球物理观测站应变仪记录到的地球长周期自由震荡

Fig. 4 Long periodic free oscillations of earth recorded by the strain meter of the geophysical observation for deep borehole located at the Byobusan, Japan

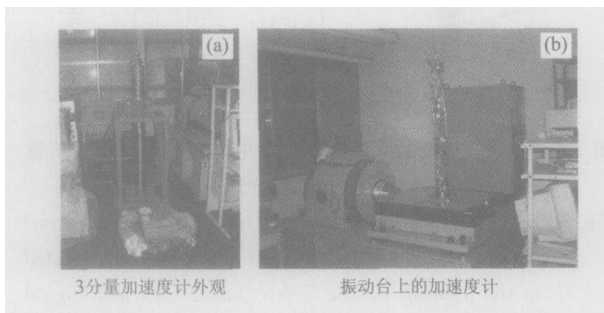


图 5 深井用光纤式宽频地震仪(a)及其在振动实验中的照片(b)

Fig. 5 Optically linked broadband seismometer for borehole observations (a) and it's in testing on vibrating platform (b)

该仪器本体采用特殊合金,可以在 300 °C 以上高温环境下连续工作,完全适用于 5 000~10 000 m 的超深井内设置使用.由于采用了激光计测原理,这种地震仪具有安定性好、低仪器噪声、能自动校正等优点.此外,由于用光纤电缆代替了同心电缆,不但免除耐高温的问题,还大大提高了资料传输中的稳定性(Araya *et al.*, 2005).

在德国南部的波希米亚进行的德国大陆超深钻井计划是世界最著名的大陆科学钻探项目之一(Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, 简称 KTB).KTB 项目是德国地球科学领域里进行的规模最大、耗资最多的科学项目.德国科学技术委员会共投入资金 5.28 亿马克,有多达 700 余人的科学家参加该项目的各项研究.到

1994 年 1 月 12 日终孔,KTB 已经完成了 4 000 m 先导孔与 9 101 m 深的主孔钻井工程.从钻井深度上看,德国 KTB 虽然比苏联科拉半岛的超深钻井(12 000 m 深)浅,为世界上在结晶岩中钻进的第二口超深井,然而,与以往旧苏联等国进行的大陆科学钻探工程不同的是,KTB 主孔钻井现场有一个庞大的世界最先进的地表与深井长期观测系统,开展一整套深井地球物理以及流体、地球化学等项观测与研究.德国科学家计划在此超深钻井基础上开展一系列的科学观测,例如深井地震观测、重、磁、潮汐以及气候观测等,并把它建成一个“地壳长期科学试验观测站”(王祝文等,1999).按照计划,2002~2007 年期间进行水压实验以及相应的长期观测与研究.在此之前,2000 年 8~10 月已进行了 4 000 m 先导孔注水,并在孔内以及周围布设 40 台宽频地震仪,进行注水诱发地震的长期实验观测研究.目前,围绕 KTB 先导孔与主孔得到的各种观测研究成果已陆续在学术刊物上发表(Zoback *et al.*, 1993).如发现了该区所有的诱发地震截止于 10 km 深度,即脆—延性过渡带的深度上(涂毅敏和陈运泰,2002).随着观测时间的推移可以期待,实施中的德国 KTB 项目在地下深井长期观测方面将取得越来越多令世界瞩目的科研成果.

美国从 1992 年底起在世界著名的圣安德列斯断层进行的深部长期观测研究项目(San Andreas Fault Observatory at Depth, 简称为 SAFOD),是一个以深井地震、地球物理观测为主的重大科学项目.其主要内容是在板块边界地震活动区域的深孔钻井内直接观测深部地球物理状态与变化.SAFOD 项目选址在沿太平洋与北美两大板块边界的圣安德列斯断层,大地震重复发生区与无震蠕变区之间的交接地区实施.SAFOD 项目包括已经完成的 2 200 m 深先导孔和 4 000 m 深的主孔.其中,主孔采取从地面到 2 200 m 深为垂直钻井,随后向地震震源区 50°转向打钻成为倾斜钻井,最终钻井深入到圣安德列斯断层地震震源区内进行长期观测.主孔的全部工程和观测项目分阶段进行,采取了钻井—观测—钻井—观测,最后钻井深入到震源区内部进行长期观测的独特钻孔的科学程序.前两个阶段均采取打钻到计划预定深度后,立即投入约 2 年的地震与流体等观测.第三阶段钻井穿进断层的震源区域,最终进入长达 20 年的长期观测阶段.长期观测内容包括地震(宽频和加速度地震仪)、流体压力、温度、应变、倾斜等多种项目(Zoback *et al.*, 1993, 1998).SAFOD 项目投资巨

大,仅工程项目约 2 100 万美金.2004 年 5 月将继续进行主孔阶段 I 钻井以及各种观测(Zoback *et al.*, 2004).SAFOD 采取开放式管理,欢迎世界各国的科学家参加,有近 10 所美国国内外大学和科研单位参加围绕 2 200 m 先导孔进行了各种观测与研究,已取得多项科研成果.目前,每年都有数十篇有关 SAFOD 项目的论文与科研成果发表.其中,利用地震转换波观测研究得到的圣安德列斯断层 2~4 km 规模的次级断裂系统精密构造结果(Chavarria *et al.*, 2003),其精度仅靠地面观测是无法达到的.

在我国,深井长期综合观测属于势在必行的创新科技规划项目.众所周知,地球内部温度与压力随深度而增加,如德国 KTB 主孔底部 9 101 m 处,温度高达 265 °C,压力达 104.5 MPa(王祝文等, 1999).深井观测仪器设备在地下高温高压环境下,进行长期而稳定的高精度观测,不仅对井下仪器本身,对资料传输电缆及其他辅助设备都有非常高的技术要求.此外,深井长期观测仪器的设置技术等亦属于世界高科技范畴.另外,对设置深井观测仪器的深井钻孔亦有很高的技术要求,例如井要打得相当直,井斜要小于规范要求等.因此,深钻本身的技术与成本都很高.近年来,我国虽然在平原地区设置了一些深度为 200~480 m 井下地震观测站,然而观测资料证明,浅井观测不能较好地排除地面干扰,急需发展 1 000 m 以下的深井长期观测站.到目前为止,我国还没有 1 000 m 深的深井观测站,深井地球物理综合观测属于空白领域.

21 世纪的今天,我国科学家可以研制“神舟”六号飞船进行宇宙航天飞行,成为世界第 3 个实现“上天”规划的科技大国,也完全有能力进行深井长期综合观测,完成我国的“入地”计划.我们应该利用已有的深井条件,广泛吸取和引进世界各国的先进经验与高科技,在投入较小的条件下,达到填补我国在深井长期综合观测研究领域的空白,为我国科学发展提供无噪音的地下观测基地和高精度资料,使我国在较短的时间内达到在地球科学领域里赶超世界先进水平之目标.

3 CCSD 深井长期地球物理综合观测规划及其前景

中国大陆科学钻探现场位于江苏北部东海县境

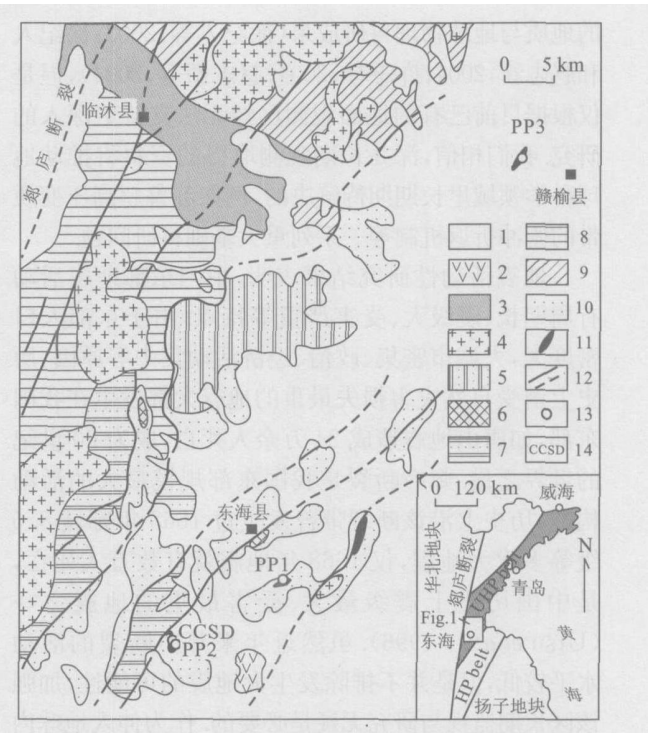


图 6 中国大陆科学钻探(CCSD)现场地质构造分布
Fig. 6 Simplified geological and tectonic map of the site of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD)

图中 PP1、PP2、PP3 分别为卫星孔的位置;1. 第四系;2. 第三纪玄武岩;3. 白垩纪盆地沉积;4. 造山后未变质花岗岩;5. 含霓石角闪石二长花岗质片麻岩;6. 角闪黑云斜长花岗质片麻岩;7. 斜长(二长)花岗质片麻岩;8. 含黑云母二长花岗质片麻岩;9. 钾长花岗质片麻岩;10. 表壳岩系;11. 榴辉岩和超基性岩;12. 剪切带或断层;13. 卫星孔;14. 主孔;HP belt·高压变质带;UHP belt·超高压变质带

内,位于中国华北(中朝板块)、华南块体(扬子板块)交界的苏鲁一大别超高压变质带东段,我国东部最大断裂带—郯庐断裂以东约 40 km 处(图 6).以科学研究为主要目标的中国大陆科学钻探是一个系统工程. CCSD 在钻井同时进行全岩心取样分析和各种测井之后,最终在 5 158 m 深的井底设置仪器实现深井长期综合观测,对我国东部地区地震、地球物理状态及其变动进行 20 年的长期监视与观测,进行中国东部大陆岩石圈构造运动的观测研究.深井长期综合观测是大陆科学钻探工程的极其重要组成部分.通过深井地震、地球物理观测仪器长期进行深入岩石圈的直接观测,可以揭示大陆地壳深部的物质组成与结构构造,探索地下深部应力、地球物理状态与变化,监测地震活动,揭示地震发生规律,观察研究全球性环境变化与变迁等多学科研究.从地球科学基础研究方面来看,虽然近年来对超高压变质带的研究已经取得大量

的地质与地球物理科研成果(徐纪人等, 2003; 徐纪人和赵志新, 2004; 许志琴, 2004; 赵志新等, 2004), 但是仅根据目前已有的地面观测已经无法支持更深入的研究. 我们相信, 深井长期观测取得的资料将推动地球科学领域里长期期待解决的, 例如苏鲁超高压变质带的俯冲折返机制等一系列重大基础科研问题.

地震活动性研究结果表明, 中国东部地震活动有周期长、震级大、受害严重等特点. 由于东部人口密度大, 大城市密集、政治、经济活动集中等原因, 历史上遭受自然灾害损失最重的地震大都发生在我国东部, 如唐山地震造成 24 万余人死亡, 成为 20 世纪的世界之最. 郯庐断裂是我国东部规模最大的活动构造, 历史上沿该断裂带曾发生过 1668 年郯城 8.5 级等多次大地震, 仅 1668 年地震就有数万人死亡, 是中国历史上震级最大、受害最重的地震之一 (Utsu *et al.*, 1996). 虽然近年来郯庐断裂的活动水平较低, 但是并不排除发生大地震的可能性, 加强该区长期监视与研究无疑是必要的. 作为伸入地球内部“望远镜”, CCSD 深井长期观测将在保护我国东部地区免受或减轻地震、地质灾害, 实现地震预报等方面发挥极其重要的监视作用. 20 世纪 90 年代以来, 我国东部虽然增加了地震、地球物理等观测力度, 但是由于东部地区现代化、城市化、工业化的高速发展, 常规观测的精度已经远远达不到地震、地质灾害监视预报和现代地学发展的要求. 因此, 尽快在我国东部开展深井长期观测是十分必要的. 随着时间的推移, 深井长期观测必将越来越显示出其优越性.

根据上述宗旨和中国大陆科学钻探实施状况, 在充分调查研究了世界深井观测状况与进展的基础上, 我们制定了 CCSD 深井长期地震、地球物理长期观测规划. 计划充分利用已有的 CCSD 卫星孔 PP2 (1 028 m 深) 以及 5 158 m 主孔, 引进并设置井下综合地球物理观测仪器, 进行高感度地震观测以及高精度应变、地磁、倾斜、地温等地球物理场的长期观测与研究. 根据国外的观测经验, CCSD PP2 深井观测站可以监视周围 0~1 级左右的极微震活动; 水晶温度计可以达到 1/1 000 °C 的观测精度; 应变仪的观测精度可达 10^{-10} , 比地面高出 1~2 个数量级. CCSD 主孔深井长期观测站设置成功后, 将成为目前世界最深的综合观测站. 在深井综合观测仪器设置前, 计划利用可回收智能型应变仪进行不同深度的初期应力测量. 该技术属于世界先进水平, 其优点为可以在不破坏井壁的情况下高精度测量地下绝对

应力值 (Ishii *et al.*, 2005b).

由于深井观测仪器要固定在井底, 即使仪器发生故障也不能从井下取出来, 因此深井观测仪器不同于一般仪器, 要充分保证仪器几乎不发生任何故障. 目前, 正在解决如何最大限度地排除雷击产生的感应电压的影响, 降低同芯电缆电压损失及其自重等问题. 同时, 信号 A/D 变换以及利用光纤电缆传输资料等技术也在不断改良发展. 这些高科技将保证 CCSD 主孔和 PP2 孔深井观测的顺利进行.

CCSD 深井地震、地球物理长期观测将连续进行 15 年, 整个规划分为 3 个五年计划进行. 在第 1 个五年期间要完成卫星孔与主孔内深井观测仪器设置、预观测, 最后进入正常观测; 建立数据库, 逐步实现资料共享; 进行深井不同深度上的垂直与地面水平的对比观测等观测研究项目 (Xu *et al.*, 2006).

在条件具备时, 利用其他 CCSD 卫星孔开展深井流体地球化学长期观测研究, 探索地下深部流体来源、研究流体运移途径、揭示流体转换规律. 为中国大陆科学钻探和流体地球化学领域提供翔实的数据资料和研究成果, 达到确定其来源和形成机制, 揭示流体与环境相互作用关系与规律的目的. 并对大陆钻探计划提供的岩心及流体样品进行微生物学分析, 以增加对地下生物圈的认识.

深井长期观测可以直接监视超高压变质带现代岩石圈地壳运动和内部物理场变化状况, 研究其动力学规律, 为研究大陆内陆板块造山带运动、板内地震活动以及地球物理场的长期变化, 为我国资源开发、环境变化、地震地质灾害预防以及研究大陆内部岩石圈构造、地震发生机制等提供科学依据. 其中, 5 158 m 主孔内设置仪器进行长期观测将开创世界深井地球物理综合观测的最深记录, 不仅填补我国在深井观测研究的空白, 并使我国在地球科学“入地”的领域里, 跨入世界先进国的行列.

References

- Araya, A., Takamori, A., Otake, Y., et al., 2005. Performance of an optically linked broadband seismometer for borehole observations. Abstracts of 2005 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting. S048-005.
- Asai, Y., Okubo, M., Ishii, H., et al., 2005. Co-seismic strain steps associated with the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes—Observed with Ishii type borehole strain meters and quartz tube extensometers. *Earth Planets Space*, 57: 309-314.

- Chavarria, J. A., Malin, P., Catchings, R. D., et al., 2003. A look inside the Andreas fault at Parkfield through vertical seismic profiling. *Science*, 302:1746—1748.
- Fukao, Y., Ishibashi, K., 1996. Damages caused by Osaka-Kobe-Awaji large earthquake and earthquake prediction. Iwanami Press, Tokyo (in Japanese).
- Ishii, H., Asai, Y., Okubo, M., et al., 2005a. Development of deep borehole instruments for both multi component observation and in situ stress measurement and some interesting results obtained, 2005. *Zisin 2. J. Seis mo. Soc. Japan*, 58: 1—14 (in Japanese with English abstract).
- Ishii, H., Okubo, M., Asai, Y., et al., 2005b. New development of seismology by deep strain observations. Abstracts of 2005 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, S098—005.
- Ishii, H., Yamauchi, T., Asai, Y., et al., 2003. Continuous multi component monitoring of crustal activities by a newly developed instrument installed in a 1200 m depth borehole—The deepest multiple observation in the world consisting of stress, strain, tilt, seismic wave, geomagnetism, temperature. IUGG 2003 Poster, Sapporo Japan.
- Katao, H., Ando, M., 1996. Crustal movement before and after the Hyogo ken Nanbu earthquake. *Science*, 66:78—85 (in Japanese with English abstract).
- Ogasawara, H., Sato, S., Nishii, N., et al., 2000. Semi-controlled seismogenic experiments in South African deep gold mines. *The South African Institute of Mining and Metallurgy Symposium Series* 27:293—300.
- Okubo, M., Asai, Y., Aoki, H., et al., 2005. The seismological and geodetical roles of strain seismogram suggested from the 2004 off the Kii peninsula earthquakes. *Earth Planets Space*, 57:303—308.
- Okubo, M., Ishii, H., Yamauchi, T., 2004. The 2003 Yocochi-oki Earthquake observed by borehole strainmeter array—Comparison with broadband seismogram. *Zisin 2. J. Seis mo. Soc. Japan*, 57: 105—113 (in Japanese with English abstract).
- Tu, Y. M., Chen, Y. T., 2002. The accurate location of the injection induced microearthquakes in German Continental Deep Drilling Program. *Acta Seismologica Sinica*, 15(6):616—627 (in Chinese with English abstract).
- Utsu, T., Shi ma, E., Yoshii, K., 1996. Encyclopaedia of earthquakes. Asakura Press, Tokyo, 456—466.
- Wang, Z. W., Liu, J. H., Li, Z. B., et al., 1999. KTB deep crustal Lab. *World Geology*, 18(4):96—99.
- Xu, J. R., Yang, W. C., Zhao, Z. X., et al., 2003. Three dimensional velocity structures of the Sulu-Dabie orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(4):577—582 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. R., Zhao, Z. X., 2004. Regional structure characteristics of crustal root of mountain beneath the Sulu orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):149—156 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. R., Zhao, Z. X., Ishii, H., et al., 2006. Multiple geophysical observations by a newly developed multi component borehole instrument at the Continental Deep Drilling Site of the CCSD, Donghai, China. A proposal to ICDP.
- Xu, Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):1—8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, W. C., Cong, B. L., et al., 1998. Drilling operations in the Dabie-Sulu UHPM Belt, East China. A proposal to ICDP.
- Zhao, Z. X., Xu, J. R., Yang, W. C., et al., 2004. Simulations of reflection seismic profile of borehole area of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):139—148 (in Chinese with English abstract).
- Zoback, M. D., Apel, R., Baumgartner, J., et al., 1993. Upper crustal strength inferred from stress measurements to 6 km depth in the KTB borehole. *Nature*, 365:633—634.
- Zoback, M. D., Hickman, S. H., Ellsworth, W. L., 1998. Scientific Drilling into the San Andreas fault at Parkfield, CA: Project overview and operational plan. A proposal to National Science Foundation.
- Zoback, M. D., Hickman, S. H., Ellsworth, W. L., 2004. San Andreas fault observatory at depth (SAFOD). A proposal to ICDP.

附中文参考文献

- 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. *地震学报*, 24(6): 587—598.
- 王祝文, 刘菁华, 李舟波, 等, 1999. KTB 深部地壳实验室. *世界地质*, 18(4): 96—99.
- 徐纪人, 杨文采, 赵志新, 等, 2003. 苏鲁大别造山带岩石圈三维 P 波速度结构特征. *地质学报*, 77(4): 577—582.
- 徐纪人, 赵志新, 2004. 苏鲁造山带区域地壳山根结构特征. *岩石学报*, 20(1): 149—156.
- 许志琴, 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1—8.
- 赵志新, 徐纪人, 杨文采, 等, 2004. 中国大陆科学钻探孔区反射地震剖面的数值模拟与分析. *岩石学报*, 20(1): 139—148.