

中国大陆科学钻探终孔及研究进展

许志琴¹ 杨经绥¹ 张泽明¹ 刘福来¹ 杨文采¹ 金振民²

王汝成³ 罗立强⁴ 黄 力⁵ 董海良⁶

(1. 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;

2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 3. 南京大学地质系, 江苏 南京 210093;

4. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 5. 中国科学院微生物研究所, 北京 100080;

6. 美国迈阿密大学地质系, Ohio 44106-1767)

摘要: 中国大陆科学钻探工程经过 1309 天的努力奋斗, 于 2005 年 1 月 23 日, 钻井终孔深度达到 5 118.20 m。成为中国钻探技术发展的新里程碑。全面研究正在开展, 在巨量物质深俯冲、超高压深俯冲与折返的精确定年、超高压岩石的原岩形成背景、上地幔流变学、地幔特殊新矿物发现、地下流体异常及地下微生物发现等方面已取得重要进展。

关键词: 中国大陆科学钻探; 终孔; 研究进展

中图分类号: P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0177-07

中国大陆科学钻探(CCS D)工程是国家重大科学工程, 也是当前正在实施的国际大陆科学钻探计划(ICDP)中的最深科钻井。中国大陆科学钻探井孔位于中国东部苏鲁超高压变质带南部的江苏省连云港市东海县毛北村, 为实施此项重大“入地”计划, 在井孔周围建立了世界一流的科学钻探现场和深部物质研究平台^[1~3]。

位于北中国板块与扬子板块之间的大别—苏鲁超高压变质带是世界上规模最大的超高压变质带, 为国内外地学家公认的研究板块会聚边界深部动力学的最佳场所^[2~10]。经过长期科学选孔, 最终将中国大陆科学钻探工程 5 000 m 深的主孔定于苏鲁超高压变质带南部的东海县, 并将中国大陆科学钻探的科学目标定位在: 通过对钻孔中获取的全部连续岩心、液态和气态样品及原位测井数据进行的全方位测量与综合研究, 建立 5 000 m 孔深的各类多学科精细剖面, 再造北中国板块与扬子板块会聚边界深部三维物质的组成和分布及三维结构构造; 阐明板

块会聚边缘的深部流体作用、壳—幔相互作用及地幔中物质循环和流变学; 寻找超深地幔条件下形成的特征矿物, 揭示超高压变质成矿机理; 建立结晶岩地区地球物理理论模型和解释标尺; 揭示超高压变质岩石的形成与折返模型及板块会聚边界的深部动力学机制。通过 5 km 深孔营造的特殊地下空间, 研究现代地壳的物理、化学及生物作用, 进行综合的地球物理测量, 准确地监测现代地壳活动, 完井后的 5 km 深孔将成为亚洲第一个大陆科学钻探深孔的长期观察实验站^[9]。

中国大陆科学钻探工程于 2001 年 6 月 25 日正式开钻, 经过 1309 天的努力奋斗, 2005 年 1 月 23 日, 钻井终孔深度达到 5 118.20 m, 超额完成既定的钻进目标。在国家科技部、国家自然科学基金委和国土资源部的资助下, 聚集了国内 60 多名科学家参与了国家 973 基础研究项目“板块会聚边界的地幔动力学和现代地壳作用、国家基金重大项目“中国大陆科学钻探孔区的多学科综合研究”和中国地质调查

收稿日期: 2005-03-21; 改回日期: 2005-03-23

基金项目: 中国大陆科学钻探工程、国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716502)、国家自然科学基金重大项目(40399143)和国土资源部科技专项(2002207)资助。

作者简介: 许志琴, 女, 1941 年生, 留法博士, 中国科学院院士, 中国大陆科学钻探首席科学家, 主要从事显微构造、大地构造和大陆动力学研究; E-mail: xzq@ccsd.org.cn。

局专项研究。一个多学科全方位的科学研究已经全面开展。国外近 20 个著名的科学家群体及实验室参加了合作研究。

中国大陆科学钻探工程不仅在工程技术上取得了成功,而且在科学上有许多创新性成果及重大发现,受到国内外地学界的高度重视。

1 中国钻探技术史上新的里程碑

在坚硬的结晶岩中钻进 5000 余米,进行全孔定向连续取心,不仅在中国没有先例,在世界上也属于高难度钻井工程,目前世界上只有极少数国家完成了这样的工程。中国的钻探技术人员在科钻一井施工过程中,采用中国自己开发、研制的“液动锤+螺杆马达+金刚石取心钻进”先进钻探技术,克服了重重困难,解决了大量钻探技术难题,实现了高难度的钻进目标,在原科钻设计采取预先导孔(2000 m)和主孔(5000 m)的两孔方案,由于预先导孔的斜度在 3 度之内,打得非常成功,改成了“一孔到底”的方案,加快了工程进度,节约了工程经费。中国大陆科学钻探运用中国自己开发的钻探技术,成功开发了一项具有国际水平的高科技钻探技术,在主孔 2000 m 岩心的深度和方位准确归位的基础上,建立了 2000 m 深度的岩性、地球化学、构造、矿化、岩石物性、地下流体及各类测井等精细剖面,是中国钻探技术发展的新里程碑。

2 科学研究的重要进展及重大发现

中国大陆科学钻探工程在获得主孔 5118.20 m 珍贵岩心和气流体样品的基础上,按照国际大陆科学钻探编录的科学原则及测试,完成了中国第一井的系列“金柱子”,包括岩性剖面、地球化学剖面、构造剖面、岩石伽玛异常剖面、矿化剖面、岩石物性剖面、流体剖面等。同时首次在国内完成了长井段岩心深度和方位测井归位,首次完成结晶岩区的三维地震探测,揭示了精细的地壳结构。与此同时,在主孔周围完成了 7 口卫星孔,总深度达 3000 m。

中国大陆科学钻探工程科学研究得到国家科技部、国家自然科学基金委员会、国土资源部科技司和中国地质调查局的大力支持,取得了重要的创新性成果。一年来,已发表论文共 53 篇,其中 SCI 27 篇,包括国际发表 9 篇和 Nature 杂志 1 篇。

2.1 钻孔岩心、超高压变质带及大陆深俯冲研究进展

(1)中国大陆科学钻探主孔 5000 m 岩性剖面揭示 50 多种丰富多彩的岩石类型。揭示榴辉岩类的厚度超过 1300 m,占 26.6%;副片麻岩类 1400 m,占 28%;正片麻岩类 2100 m,占 44%;超镁铁质岩 70 m,占 1.4%;在原定的金红石矿体下又发现了 400 m 厚的达工业品位的新的金红石矿体。主孔和卫星孔岩心中揭示超镁铁质岩共厚 620 m^[9]。

(2)揭示了主孔 3000 m 深度的各类岩石中均含有超高压矿物柯石英,在主孔附近的榴辉岩薄片中发现金刚石,结合区域大面积范围内普遍发现柯石英,证实了苏鲁地区 2 亿年前发生过巨量物质超深俯冲的壮观地质事件^[11~13]。

(3)SHRIMP U-Pb 定年结果表明,榴辉岩和片麻岩锆石核部记录了 >680 Ma 的原岩形成年龄,含柯石英的幔部记录了 (227±2)Ma 的超高压变质年龄,而边部则记录了 (209±3)Ma 的退变质年龄,表明苏鲁地体在晚三叠纪发生超高压变质后,经历了一个快速抬升的动力学演化过程(折返速率为 5.6 km/Ma 左右)^[14~16]。

(4)查明超高压榴辉岩的主要矿物都含有以 OH 存在的结构水,其中绿辉石的 OH 含量最高,范围是 $321 \times 10^{-6} \sim 1636 \times 10^{-6}$ 。在个别榴辉岩的绿辉石中发现了出溶的流体和固体包裹体,证明名义上无水矿物中结构水的出溶是退变质流体的重要来源。在片麻岩和退变榴辉岩中发现与柯石英共存于同一变质增生锆石微区中的 CO₂(气)NH₂O(液)两相流体包裹体,提供了超高压峰期变质阶段处于“湿体系”环境的有利证据^[17]。

(5)氧同位素研究表明巨量超高压变质岩具有异常低的氧同位素值,平面面积达 5000 km²,深度达 1600 m,表明超高压变质岩的原岩在近地表与大气降水发生交换,花岗岩体的侵入为其提供热源,为新元古代全球性雪球事件提供重要证据^[18]。

(6)对主孔 2000 m 岩心的原岩恢复,初步建立超高压变质岩原岩(700~800 Ma)形成于由大陆玄武岩、辉长岩、岩浆成因的地幔岩及表壳岩、花岗岩组成的被动大陆边缘的构造背景^[19]。

(7)建立了苏鲁高压—变质超高压构造格架,确定岩石—构造单元、构造边界的大型韧性剪切带系列及其几何学、运动学、动力学。确立 2000 m 岩心精细定向的变形构造剖面及构造要素剖面,厘定大型

韧性剪切带的逆冲性质和运动学;划分了构造岩片单元,识别俯冲与折返阶段变形构造样式,建立了构造模型^[20-21]。

(8)在卫星孔(CCSD-PP1)石榴石橄榄岩的单斜辉石包体中发现含钛硅镁石出溶体,其形成在 $T>850^{\circ}\text{C}$, $P>3.5\text{GPa}$ 的温压条件,为早期折返的产物^[22]。通过新的 EBSD 组构技术,获得卫星孔(CCSD-PP1)石榴石橄榄岩中橄榄石的以(100)[001] 滑移系及高含水量为特征的“C”类组构,与著名的阿尔卑斯阿拉米橄榄岩可以对比,显示了大陆板片深俯冲的流变学特征^[23]。

(9)根据卫星孔(CCSD-PP2)岩心中磷灰石裂变径迹年龄测定表明,裂变径迹年龄有随深度变化趋势,推算在 80.4~52.0 Ma 以前的隆升速度约为 35.0m/Ma ,古地温约为 35.6°C/km ^[24]。

(10)主孔 2 000 m 中获得约 1.5 t 的石榴石橄榄岩岩屑样品,经过重选和磁选,获得了不同密度和粒级的矿物样品约 1.6 kg,初步认定的矿物种类达 100 余种,部分为具有奇特球形外貌的合金和金属氧化物。这些物质的形态、成分、结构和其内包含的包裹体与西藏罗布莎超镁铁岩中发现下地幔的某些球粒类矿物可对比,预示着其来源深度很大,带有甚至到下地幔的信息。目前正在美国华盛顿卡耐基地球物理实验室进行结构和组成的测试,部分样品的结构已被验证。

(11)榴辉岩脱水的高温高压流变学实验表明,榴辉岩矿物中结构水(OH)脱水而引起不稳定性,诱发断裂,可以引起高温地震,用以解释地幔转化带中深源地震的成因。该成果第一作者为章军峰博士,发表于 2004 年的 Nature 杂志,并获得杂志内扉页的封面^[25]。

(12)大陆板块会聚边界的深部成矿作用研究方面的新进展

揭示含金红石榴辉岩中锐钛矿、板钛矿、榍石和金红石的产出状态及其可能的相互转化关系;认为榴辉岩和部分片麻岩中的金红石矿物及其原生工业富集体与大陆板块深度俯冲作用有关,而折返松弛阶段的有利构造环境促成了研究区水晶矿床的形成,超高压变质带中的石英脉流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄约 208 Ma,应为印支期退变质阶段折返环境下的产物^[26]。比较了榴辉岩和片麻岩两类岩石中的钛矿物组合;金红石矿床地质特征的研究发现,

轻稀土元素(LREE)和钍是俯冲带中重要的高场强元素。褐帘石和磷灰石被认为是俯冲带岩石中最重要的含 LREE 和 Th 的副矿物之一。

(13)系统测定主孔 2 000 m 岩石物性

在常温常压条件下对 CCSD 主孔 2 000 m 岩心 700 多个样品进行了弹性波速度和岩石热导率的系统测定,并建立了弹性波速度和热导率随岩性变化的连续剖面^[27]。

主孔中新鲜榴辉岩纵波速度(V_p)最大(7.86km/s)。正副片麻岩 V_p 最小,分别为 5.53km/s 和 5.71km/s ;榴辉岩的波速随退变质作用的增强而明显减小。主孔 2 000 m 总平均 V_p 速度为 6.2km/s ,它与地球物理探测方法获得的大别山—苏鲁造山带上地壳具有 $6.2\sim 6.3\text{km/s}$ 高速层的结论是一致的。大部分岩石具有明显地震波各向异性。不同岩性界面的反射系数(R_c)是产生地震强反射层的主要原因。韧性剪切带中糜棱岩化片麻岩和面理化榴辉岩使岩石各向异性和反射强度有明显增加^[28]。

主孔 2 000 m 的岩心热导率介于 $1.873\sim 4.062\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 之间,平均热导率为 $2.967\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。榴辉岩热导率随退变质程度的增加而降低。上述岩石的弹性波速度和热导率物理性质的成果对东海地区地震深反射、热结构和岩石地震波各向异性提供岩石物理学的重要约束^[29]。

(14)VSP 地震剖面的建立及 2 000 m 科钻剖面对地球物理的初步验证

在毛北科钻孔区三维反射地震及地面高精度重磁测量的基础上,进行 VSP 垂直地震剖面的测定,配合钻孔岩心、岩石物性和测井资料,初步标定了超高压变质体内部的地球物理异常。揭示在孔区 6 500 m 深度范围内由若干板片组成叠覆结构,以及板片之间为向 SE 缓倾斜的强地震反射层。发现深部可能存在代表高密度、高波速物质的拱形强反射体,在 700~1 100 m 深度出现的向 SE 缓倾的强反射层与测井资料反映的强波阻抗层相对应,与构造剖面中第二岩性—构造单元下部由副片麻岩夹榴辉岩和超镁铁质岩组成的韧性剪切带的位置及产出相吻合^[21,30-35]。地震反射资料还揭示地幔中层状结构,地震层析资料揭示了郯庐断裂和响水断裂均为超岩石圈($>250\text{km}$)断裂^[36]。中国大陆科学钻探孔区地球物理资料综合研究,提供了孔区地质构造解释结果及波速模型;结合邻近火山岩包体分析,标定孔区岩石圈和地震反

射波场,通过研究还发现了 VSP 记录中的快横波与慢横波。

2.2 现代地壳作用研究方面的重要进展

(1)地下微生物的重大发现,对生命科学的挑战
中美科学家联合采用了克隆技术和微生物培养技术,对 500~2 000 m 的岩石和 500~3 500 m 的泥浆进行了系统的研究,发现具有特殊性能的细菌,并且已经培养出活体:

①在 CCSD 主孔 3 500 m 以上深度的岩石发现具有特殊性能的细菌,对它们的功能测试表明,在岩石中发现的微生物主要含有 *Proteobacteria*,以硝酸盐还原菌为主,它们的生活习性为喜冷(4℃),喜碱性环境、喜盐、能吃硝酸盐进行生物活动,这些生活习性和现代的地热梯度不符,大致推算它们的生存环境可能为岩石矿物中的包体具有。岩石中的微生物较低,每克岩石中含 $10^3 \sim 10^4$ 个体。

②泥浆中主要含 *Proteobacteria*, *Bacteroides*, *Gram-positive*, *Planctomyces* 和 *Candida* 等种类,微生物具有喜高温(68~90℃),厌氧,碱性,喜盐,以硫酸盐、三价铁还原菌和产甲烷菌为主。能摄取地下化学能(不像地表的光合作用),在无氧条件下能依靠金属元素和硫酸盐进行生命活动。这些菌种可能来自地下的流体。泥浆中微生物含量很高,每克含 10⁸~10⁹ 个体。

③在 3 910 m 岩心中培植成功微生物活体。生物培养结果显示,从泥浆中已经分离出了一些生物活体,其中主要的是几种高温的三价铁还原菌,这些菌能还原粘土绿泥石和蒙脱石中的三价铁。从岩石中已经培养出喜热的铁锰还原菌。由于这些菌的特殊性能(厌氧,喜高温和能还原三价铁),笔者可以肯定这些种类是从地下深处来的。

研究表明,生命可以在地下深处在缺氧、缺水、缺少太阳能的极端环境中生存,并且积极的参加新陈代谢活动。这一系列的重大发现是人类对生物科学的挑战,对地球上生物圈的形成和演化以及和水圈、岩石圈的相互作用提供了第一手的丰富资料。新发现的微生物体内还具有特殊的生物组合,如耐高温的生物酶和蛋白质,这些对生物化学的研究和开发具有实用意义。

(2) 地下流体研究工作的主要进展——幔源流体的发现

现已建立起 He、CO₂、CH₄、H₂、N₂、O₂、Ar 气体

组分 5 000 m 前的流体剖面。目前正随主孔钻进,逐步建立气体与无机组分的流体剖面。对于已发现异常流体,同位素分析结果表明,其来源于地下流体。流体来源多样,除大气组分污染外有幔源、壳生、生物成因组分以及附近体系的运移等^[37~38]。

中国大陆科学钻探工程的实施是中国宏伟的“入地”计划的开始,在中国地球科学研究历史上具开创性。正如温家宝总理曾指出:“中国大陆科学钻探工程是一项集科学与技术于一体的综合性工程,也是多学科、多领域的系统集成。该项目的实施将促进中国地球科学理论的发展和地球探测技术水平的提高,具有十分重要的意义”。中国大陆科学钻探工程的胜利完工,标志着中国从地学大国向地学强国迈出了新的步伐,并将会对中国的社会与自然的协调发展和现代化建设产生一定的影响。

参考文献(References):

- [1] Xu Zhiqin, Yang Wencai, et al. Scientific significance and site-selection researches of the first Chinese continental scientific deep drillhole [J]. *Continental Dynamics*, 1998, 3: 1~13.
- [2] 许志琴, 耿瑞伦, 肖庆辉, 等. 中国大陆科学钻探先行研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
Xu Zhiqin, Geng Ruilun, Xiao Qinghui, et al. The Preliminary Study for Chinese Continental Scientific Drilling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House, 1996 (in Chinese).
- [3] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 1~8.
Xu Zhiqin. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- [4] Cong Bolin. Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China [M]. Beijing: Science Press, 1996: 224.
- [5] Hacker B, Liou J G. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1998.
- [6] Jahn BM, Cornichet J, Cong Bolin, Yui TF. Ultrahigh-? Nd eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology* [J]. 1996, 127: 61~79.
- [7] Jahn BM. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen [A]. In: B R. Hacker, J G Liou (eds.), *When Continents Collide: Geochemistry of Ultrahigh-pressure rocks* [C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1998, 203~239.
- [8] Li Shuguang, Chen Y, Cong Bolin, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes [J]. *Chemical Geology*, 1993, 109: 70~89.

- [9] Liou JG, Cong Bolin, et al. Geodynamics for high- and ultrahigh-pressure Metamorphism [J]. *The Island Arc*, 1998, 7.
- [10] Liou JG, Zhang Ruyuan. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks [J]. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 2002, 17(3): 1~18.
- [11] Liu Fulai, Xu Zhiqin, Katayama Ikuo, et al. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Lithos*, 2001, 59:199~215.
- [12] Liu Fulai, Zhang Zeming, Xu Zhiqin. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu Terrane [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77 (1):69~84.
- [13] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):9~26.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):9~26 (in Chinese with English abstract).
- [14] Liu Fulai, Xu Zhiqin, et al. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Lithos*, 2001, 59:199~215.
- [15] Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. Precise Restriction of Non-UHP Granitic Gneiss from the UHP metamorphic belt in the Sulu Terrane, Eastern China: Evidence from mineral inclusions, cathodoluminescence images and SHRIMP U-PB dating in zircon domains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4):533~539.
- [16] Liu Fulai, Xu Zhiqin, et al. Ultrahigh-P mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling site in eastern China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2002, 14:499~512.
- [17] Zheng Yongfei, Fu Bin, Gong Bing, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 1276:1~57.
- [18] 张泽明, 肖益林, Jochen HOFES, 等. 超高压变质作用过程中的流体-岩石相互作用——中国大陆科学钻探工程主孔 (0~2050m) 岩心的氧同位素证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23(4): 289~297.
- Zhang Zeming, Xiao Yilin, Jochen HOFES, et al. The fluid-rock interaction of UHP metamorphism: Oxygen isotopic study of the core rocks from the main hole (0~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(4):289~297 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050m) 榴辉岩岩石化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):27~42.
- Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai, et al. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 27~42 (in Chinese with English abstract).
- [20] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. *地质学报*, 2003, 77(4):433~450.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, Central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4):433~450 (in Chinese with English abstract).
- [21] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造初步解析[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):53~72.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. The structure profile of 0~1200m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and analysis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):53~72 (in Chinese with English abstract).
- [22] 许志琴, 陈晶, 杨经绥, 等. 苏鲁超高压变质带石榴石橄榄岩中含钛硅镁石出溶体的发现及其意义[J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 549~555.
- Xu Zhiqin, Chen Jing, Yang Jingsui, et al. Discovery of titanoclinohumite and titanochondrodite exsolution in clinopyroxene included in garnet peridotite and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4):549~555 (in Chinese with English abstract).
- [23] 许志琴, 陈晶, 王勤, 等. 南苏鲁芝麻房石榴石橄榄岩中橄榄石的"C"类组构及其形成条件探讨[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1).
- Xu Zhiqin, Chen Jing, Wang Qin, et al. Type-C olivine fabric in the Zhimafang garnet peridotite of the southern Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Formation conditions and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1) (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘顺生, 殷秀兰, 许志琴. 中国大陆科学钻探 CCSD-PP1 预先导孔岩芯的磷灰石裂变径迹年龄测定[J]. *地质学报*, 2003, 77: 540~543.
- Liu Shunsheng, Yin Xiulan, Xu Zhiqin. Fission track dating of apatites from Pilot-PP1 Core of the Chinese Continental Scientific Drilling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77 (4):540~543 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhang Junfeng, Harry W, Green II, et al, Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust [J]. *Nature*, 2004, 428: 633~636.
- [26] 王登红, 徐珏, 陈毓川, 等. 苏北榴辉岩中水晶的形成时代及其对超高压变质岩折返的示踪意义[J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 544~548.
- Wang Denghong, Xu Jue, Chen Yuchuan, et al. Dating on the eclogite-hosted quartz crystal and its significance for tracing the exhumation history of the UHP belt in north Jiangsu province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77 (4):544~548 (in Chinese with English abstract).
- [27] 金振民, 欧新功, 徐海军, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 81~96.

- Jin Zhenmin, Ou Xingong, Xu Haijun, et al. Elastic wave velocities of the 2000m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):81~96 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈意, 金振民, 欧新功, 等. 韧性剪切带中片麻岩和超高压榴辉岩变形特征及其与地震波速各向异性的关系: 来自中国大陆科学钻探(CCS D)680~1200米岩心的证据[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):97~108.
- Chen Yi, Jin Zhenmin, Ou Xingong, et al. Deformation features of gneiss and UHP eclogite from ductile shear zone and its relation with seismic velocity anisotropy: Evidences from core samples at depth of 680~1200 of CCS D-Chinese Continental Scientific Drilling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):97~108 (in Chinese with English abstract).
- [29] 欧新功, 金振民, 王璐, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石导热率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):109~118.
- Ou Xingong, Jin Zhenmin, Wang Lu, et al. Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100~2000m mainhole of the Chinese Continental Scientific Drilling: revelations to the study on thermal structure of subduction zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):109~118 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解析[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):127~138.
- Yang Wencai, Yang Wuyang, Cheng Zhenyan. Interpretation of 3D seismic reflection data in the Chinese Continental Scientific Drilling site [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):127~138 (in Chinese with English abstract).
- [31] Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojiu, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1999, 42(1):57~70.
- [32] Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan, et al. Long profile of geophysical investigations from Tanchen to Lianzhui, east-central China[J]. *Chinese J. Geophys.*, 1999, 42(2):311~222.
- [33] 赵志新, 徐纪人, 杨文采, 等. 中国大陆科学钻探孔区反射地震剖面的数值模拟与分析[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):139~148.
- Zhao Zhixin, Xu Jiren, Yang Wencai, et al. Simulations of reflection seismic profile of borehole area of Chinese Continental Scientific Drilling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):139~148 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐纪人, 赵志新. 苏鲁造山带区域地壳山根结构特征[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):149~156.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin. Regional structure characteristics of mountain beneath the orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):149~156 (in Chinese with English abstract).
- [35] 赵志新, 徐纪人, 许志琴. 上地幔三维 S 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):157~164.
- Zhao Zhixin, Xu Jiren, Xu Zhiqin. 3-D S wave velocity structure in the upper mantle and the mechanism investigation for the ultrahigh-pressure metamorphosed belt in the Dabie-Sulu region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):157~164 (in Chinese with English abstract).
- [36] 钱辉, 宿和平, 姜枚, 等. 江苏东海大陆钻址区层析成像[J]. *地质学报*, 2004, 78(1):139~144.
- Qian Hui, Su Heping, Jiang Mei, et al. Tomography in the Chinese Continental Scientific Drilling area of Donghai county, Jiangsu province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1):139~144 (in Chinese with English abstract).
- [37] 孙青, 罗立强, 李圣强. 中国大陆科学钻探主孔 0~2000 米的 N₂、Ar 和 He 流体地球化学[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):179~184.
- Sun Qing, Luo Liqiang, Li Shengqiang. N₂-Ar-He compositions in the 0~2000m mud of Chinese Continental Scientific Drilling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):179~184 (in Chinese with English abstract).
- [38] 罗立强, 孙青, 詹秀春. 中国大陆科学钻探主孔 0~2000 米流体剖面及流体地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):185~191.
- Luo Liqiang, Sun Qing, Zhan Xiuchun. 0~2000m fluid profiles and sources in Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):185~191 (in Chinese with English abstract).

Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project

XU Zhi-qin¹, YANG Jing-sui¹, ZHANG Ze-ming¹, LIU Fu-lai¹, YANG Wen-cai¹,
JIN Zhen-min², WANG Ru-cheng³, LUO Li-qiang⁴, HUANG Li⁵, DONG Hai-liang⁶

- (1. *Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*
3. *Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;*
4. *National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China;*
5. *Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
6. *Department of Geology, Miami University, Ohio 44106-1767, USA*)

Abstract: After 1309 days of hard work, the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project drilled a total depth of 5118.20 m and reached its target depth by January 23th, 2005. The well completion is a new landmark in the development of China's drilling technology. A comprehensive on-going study is being carried out and great advances have been made in the following aspects: precise dating of deep subduction of voluminous continental materials, UHP deep subduction and exhumation, setting of formation of protoliths of UHP rocks, upper mantle rheology, discovery of special, new mantle minerals and discovery of subsurface fluid anomalies and subsurface microorganisms.

Key words: Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project; well completion; achievement

About the first author: XU Zhi-qin, female, born in 1941, got a doctor degree in France, member of the Chinese Academy of Sciences, leader of the CCSD project, mainly engages in the study of microstructures, tectonics and continental dynamics; E-mail: xzq@ccsd.org.cn.