

SinoProbe——中国深部探测实验

董树文, 李廷栋

中国地质科学院, 北京, 100037

内容提要:在人类向太空发展, 实施新一轮太空计划, 中国“神舟7号”载人航天飞船、“嫦娥”探月工程圆满成功之时, 中国地球科学家不得不面对这样一个现实: 对人类赖以生存的地球内部了解的太少, 直接钻探深度只有12 km, 涉及的仅仅是地球的表皮。可谓上天不易, “入地”更难。地球是人类居住的唯一场所, 为人类提供了生命必需的粮食、水, 和生活必须能源和矿产资源; 同时也常给人类带来诸如火山、地震、海啸等灾难。通过深部探测, 了解地下的物质、结构和动力学过程, 不仅是人类探求自然奥秘的追求, 更是人类汲取资源、保障自身安全的基本需要。近百年来, 各国的地球科学家一直不断地进行探索, 我国科学家也意识到必须开展中国的地球深部探测计划, 才能解决面临的重大资源环境问题, 才能全面实现地球科学的创新和发展。最近, 国家启动“深部探测技术与实验研究”专项(英文简写 SinoProbe), 标志了我国地球科学的深部探测计划拉开帷幕。该专项(2008~2012)年总体任务是, 为全面开展我国地壳探测工程做好关键技术准备, 解决关键探测技术难点与核心技术集成, 形成对固体地球层圈立体探测技术体系; 在不同自然景观、复杂矿集区、含油气盆地深层、重大地质灾害区等关键地带进行试验、示范, 形成若干深部探测实验基地; 解决急迫的重大地质科学难题, 部署实验任务; 实现深部数据融合与共享, 建立深部数据管理系统; 积累、培养优秀人才, 形成若干技术体系的研究团队。

关键词: 深部探测; 技术; 实验; 部署与实施; 中国

21世纪初, 人类向太空发展更加迅猛, 以美国、俄罗斯为首的全球新一轮深空探测和月球探测计划正在全面实施, 欧洲“伽利略”计划的实施将打破美国全球导航的垄断地位, 日本、中国和印度等国也跻身太空竞争的大家庭。我国的“北斗”卫星导航系统已经奠定基础, “神州5号”、“神州6号”载人飞船成功升空并安全返回地球, “嫦娥1号”绕月卫星成功发射开启了我国“探月工程”征程, 中国正在走向航天大国。然而, 在登天从月球到火星, 再到金星, 甚至更远的时代, 人们不得不面对这样一个现实: 我们对人类赖以生存的地球却了解太少, 从认知角度看, 远不及对太空的认识程度。迄今对地球深部的钻探最深只有12 km, 对地球深部探测的投入实在太少。但是, 不了解地球岂能了解宇宙? 解决人口、资源和环境的问题首先必须立足地球, 这个道理几乎没有人怀疑!

2008年被联合国定为“行星地球年”, 呼吁全世界从行星系统角度关爱惟一具有生命的地球, 重新重视地球科学, 保障资源供应, 保护生态环境, 支持

脆弱的生命系统。为此, 负责组织“行星地球年”的国际地质科学联合会(IUGS)、联合国科教文组织(UNESCO)从战略高度提出: 进军我们最后的前沿——地下的物质与结构, 呼吁强化对地球深部的探测和认识。

地球深部成为地学前沿基于以下的认识: ①了解地球深部, 特别是地壳、岩石圈等固体地球圈层的结构与组成, 是解决人类生存发展的适宜环境和资源充足供应等重大问题的前提和基础, 对地球了解甚少, 也难以深入了解月球和火星、金星等行星; ②地质学家在地球表层找矿的面积仅占陆地的一半, 而另一半是被松散沉积物和植被所覆盖的“新大陆”; 即使在出露区目前勘探的深部也非常有限, 突破深部“第二找矿空间”, 加大深部勘查成为必然; ③地质灾害的营力主要来自地球内部, 人类现在往往面对火山、地震的肆虐束手无策, 原因是掌握不了灾害发生的内在规律, 对地壳的结构和动力学过程认识肤浅。

从地面、到浅表、到地壳、再到地幔、甚至地核,

注: 本文为国土资源部深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)资助的成果。

收稿日期: 2009-04-19; 改回日期: 2009-06-15; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 董树文, 男, 1954年生。研究员, 博士生导师。长期从事构造地质学、动力成岩成矿与碰撞造山带研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街26号; 电话: 010-68999606; Email: swdong@cags.ac.cn。

这条地球科学认识的轨迹随着科学技术的发展不断地引向深部,近两百年来地质科学正是随着认识深部的加大不断地发展和完善。人类如向往太空一样,对地球的深部充满着探索的冲动,从来没有停止过对地球的探测脚步,尽管步履艰难。

从技术精度上讲,对地球深部的真正科学探测起始于20世纪70~80年代,美国实施地壳探测计划(COCORP)开辟了深反射地震深部探测的新方法,使探测深度和精度达到前所未有的程度,首次揭示出北美地壳的精细结构,确定了阿帕拉契亚造山带大规模推覆构造,在落基山等造山带之下发现一系列油田,成为深部探测最成功的范例(Oliver, 1978; Oliver et al., 1983; COCORP, 1992)。由此引发了全球的深部探测计划,20世纪80年代国际岩石圈委员会(ILP)发起全球地学断面计划(GGT),在全球重要大陆和造山带完成了数十条数万千米长的断面,但是由于经费问题,只部署了折射地震等低精度的探测方法。欧洲仿效美国先后实施了大陆地壳的深地震反射探测,法国(ECORP, 3-D France)、德国(DECOPE)、英国(BIRPS)、瑞士(NRP20)、意大利(CROP)等国都制定了相应计划,长期实施(Cavazza et al., 2004)。欧洲各国联合开展了“欧洲探测计划”(EGT, EUROPROBE, Eurobridge, 2001),完成横穿欧洲的地学断面(Blundell, 1992; Gee & Stephenson, 2006),通过横过阿尔卑斯造山带深地震反射剖面,建立了碰撞造山理论和薄皮构造理论(DEKORP Research Group, 1990; Pfiffner et al., 1997; Schmid et al., 1997)。俄罗斯乌拉尔造山带实施的“URSEIS 95”反射地震探测计划,首次发现了保留山根的古生代造山带,丰富了山根动力学理论(Echtler et al., 1996; Knapp et al., 1996; Berzin et al., 1996; Carbonell et al., 1996)。俄罗斯近十年部署了跨越板块的洲际反射地震剖面,最长达3040 km,创造了世界之最,其中2000年在西伯利亚东北成矿带反射地震剖面(2-DV)发现地幔流体上涌通道,为下一步资源开发指出了目标(ROSNEFRA, 2005)。加拿大1984~2003年岩石圈探测计划(LITHOPROBE)证实3Ga前即发生与板块构造有关的作用,对古老岩石圈板块碰撞和新地壳形成过程进行了重大修正,揭示了若干大型矿集区的深部控矿构造的反射影像,使加拿大的地球科学研究走到世界的前列(Clowes, 2005; Clowes & Li, 2005; Wilson, 2003)。澳大利亚实施国家四维地球动力学探测计划(AGCRC, 1992~

2000)和“玻璃地球”计划,在研究岩石圈结构的同时开展了成矿带地壳精细结构探测,为研究成矿理论和资源评价提供强大的技术支撑。2003年美国国会批准了新的更大规模的“地球探测计划”(EarthScope),预计投入超过200亿美元,再次站在全球深部探测的领跑线(David et al., 2002; David et al., 2008)上。

2008年在挪威奥斯陆召开的国际三十三届地质大会,从一个侧面反映了深部探测的国际发展最新趋势。北欧学者以深地震反射为先锋,折射地震与宽频地震为骨干,取得了大量的深部探测研究成果。研究领域不仅在基础地质,而且广泛应用到资源与环境效应,例如研究盐构造与盆地深部结构。他们突出新的目标:“LINKING TOP AND DEEP”,即通过深部探测连接地球深部和表面变形。特别是,俄罗斯学者运用深地震反射剖面方法进行深部探测的研究进展令人吃惊。近十年俄罗斯完成了10000 km的反射地震探测,其中欧洲部分的剖面长3040 km,成为世界最长反射地震断面。研究水平已经与北美学者接近,研究领域包括了地球基础科学和资源环境。例如,使用上千公里的反射剖面编制地学断面,研究矿集区的成矿深部背景;提出使用深反射剖面,编制穿越欧洲到亚洲的地学断面。

1992年在法国布雷斯特,国际经济合作发展组织(OECD)理事会举行了深部钻探讨论会,建立了国际大陆科学钻探计划(ICDP)的框架。1993年9月,成立了国际大陆科学钻探计划(ICDP)的科学目标与组织机构,宣布执行全球大陆科学钻探的共同纲领。1997年1月,中国参加了国际大陆科学钻探计划,成为该组织的理事国之一。大陆科学钻探实施50年来,迄今为止已有13国家实施了22口大于4000m的科学深钻,目前完成的超深钻(大于8000m)有前苏联的科拉(井深12261 m)和德国的KTB(井深9101 m)两口。我国在江苏省东海的超高压变质带内完成了科学钻探(CCSN)5156 m,是当前正在实施的20项国际大陆科学钻探项目中最深科学井,也称亚洲第一井(许志琴等,2003,2004, 2005)。

国际深部研究表明,要了解地球结构与组成,要建立地球动力学,实现成矿理论的创新,要查明油气藏与矿产资源的赋存规律和地质灾害发生机制,必须从深部地质着手,对整个岩石圈进行不同层次探测。美国第一轮深部探测(70~80年代)已完成约

60000 km 的反射地震剖面,英国超过 20000 km,意大利 10000 km。近年俄罗斯完成了 10000 km 的反射地震探测。据统计我国用于地壳深部探测的反射地震剖面总长仅为 4565 km,相当美国的 1/13,英国的 1/5,俄罗斯的 1/5,意大利的 1/2。因而,运用当代高新技术,实施“中国深部探测计划”,揭示地壳的组成和结构,是一项有效缓解资源与灾害压力,惠及可持续发展的、推动中国地球科学腾飞的重大科学计划,具有巨大的经济价值、深远社会效益和特别重要的科学意义。

1 深部探测的意义

(1)“深部探测”是新世纪我国科技赶超世界科技先进水平的重大计划,是实现我国“上天、入地、下海、登极”大国科学规划的战略布局。

“上天、入地、下海、登极”是任何一个大国都关注的极限性科学行动,是代表一个国家的综合实力和科技水平的标志。中国人“上天”的梦想正在成为现实,载人飞船发射成功,探月工程已经启动,火星探测也列入我国深空发展计划,中国正进入航天大国的行列。中国科学家足迹早已踏上南极、北极,南极科考今年已是 25 个年头,已经列为国家的年度例行计划,中国已经成为南极科考的重要国家之一。“下海”比较落后,但是我国远洋科考活动也持续了数十年,特别是大洋经济专属区的锰结核、钴结壳的研究取得了突出的成果,“十五”期间我国重点研制了 6000 m 水深的科学潜艇,2007 年开始了大洋热流体的考察,标志了深海科考进入新的阶段。然而,“入地”是我国的软肋,与国际先进水平相比差距巨大,深部探测的反射地震剖面仅是美国的 1/13,英国的 1/5。而从国家对资源需求来看,深部信息的缺位导致地质科学理论创新、资源勘查和地质灾害预警能力的全面落后。世界发达国家在 20 世纪 70~90 年代已经完成了一轮深部探测与研究,全面占据地球科学前沿制高点,据统计近 30 年的地质科学理论的提出绝大多数依赖于深部认识的突破。以美国为首的新一轮深部研究和探测在新世纪初拉开了序幕。深部研究成为全球大国科技和实力的重要标志,也是我国急追赶上的核心科技计划,从国家科技发展战略布局高度上启动我国的深部研究计划刻不容缓。

(2)“深部探测”是实现我国从地质大国走向地质强国的决定性举措,是我国地球科学原始性创新的基础性工作,是建立地球系统科学的基石。

我国大陆地质构造复杂、演化历史漫长,不仅记录了小洋盆关闭、微陆块碰撞演化的完整历史,也叠加了中、新生代太平洋板块俯冲和印度板块碰撞的大陆动力学过程;有地壳最厚的青藏高原,有沿滨太平洋带发育典型的沟-弧-盆体系,有稳定的前寒武纪克拉通,还有现代仍在活动的新生代造山带;矿产资源丰富,地质灾害频繁,地球动力学过程复杂,是世界地球动力学和大陆地质研究的热点领域。随着板块构造“登陆”遇到诸多科学难题,世界地球科学家已经把研究大陆形成、演化的地球动力学理论视为地球科学的前沿,竞相开展大陆动力学研究。我国具有先天的地域优势,因此,开展深部探测与科学群钻计划,创新大陆动力学理论,必将带动地球动力学、大地构造学、中国区域地质学等地学基础学科发展与进步,是我国占据国际地球科学前沿、使中国从地质大国走向地质强国的最好机遇。

(3)“深部探测”将成为能源、矿产资源成藏成矿理论创新的源泉,将为资源深层突破和开辟“第二找矿空间”提供坚实的技术支撑。

我国是资源大国,矿产资源开采量年达 60 亿吨(其中石油 1.8 亿吨、煤炭 20 亿吨),有力支撑着国家的经济社会发展;同时又是人均资源小国,人均水、矿产、耕地资源都不足世界人均的 1/2。近年,我国经济高速发展,资源储备急剧下降,现有能源和重要矿产资源对社会经济可持续发展的保证程度日见下滑,资源的供需矛盾日益突出。2006 年我国原油和成品油进口达 1.8 亿吨(对外依存度 46%),铁矿砂进口 1.4 亿吨(对外依存度达 50%),铜矿进口 360 万吨(对外依存度达 80%);全年消耗矿产资源总量超过 60 亿吨,成为世界第二矿产资源消费大国。然而,我国矿产资源勘探深度平均只有 400 m,油气开采深度平均也不足 4500 m,还有约 1/3 面积的陆地浅覆盖区和特殊景观地域没有进行勘查,深部能源、金属资源潜力十分巨大。目前石油可采资源探明程度为 42%,有待发现可采资源 87 亿吨;天然气可采资源探明率仅为 18%,有待发现可采资源量近 10 万亿立方米。油气资源探明程度较低,勘探潜力较大。

深部探测将揭示地下精细结构与组成,科学超深井的实施将大大提高对深部地层、沉积、烃源岩、温度、压力场的认识,有利于更全面、客观地探索地球深层的油气勘探潜力,为开辟深层能源与重要矿产资源远景提供科学依据。

(4)“深部探测”将揭示地质灾害成灾机理和过

程,重大地质灾害发生区域与深部背景,为地质灾害高精度的预警预报提供理论依据。

我国是地质灾害频繁发生的国家,汶川、唐山、海城大地震曾给国家和人民带来巨大的灾难和损失;至今,仍时常有重大地质灾害威胁人民的生命和财产的安全。我们面对灾害肆虐往往显得束手无策,对灾害发生内在规律知之甚少。地质灾害的营力主要来自地球内部,对地壳结构和地应力作用的了解是认识灾害发生规律的基础。地壳表面和内部发生的各种构造现象及其伴生的物理化学现象都与地应力的作用密切相关。地表的各种褶皱、断裂是地应力作用的结果。各种地下流体(石油、天然气、含矿流体、地下水)也在地应力的作用下运动、聚集,形成可供开采的资源。同样,地应力作用也造成多种地质灾害,如地震、矿震、煤瓦斯突出、岩爆、坑道突水、巷道变形、油井套损等。因此,研究地壳应力状态,对于地球动力学问题和工程应用问题都具有十分重要的意义;减轻自然灾害,保障人类自身安全也迫切需要开展深部探测,提高对地球深部的认知水平(石耀霖,2000;陈群策等,1998,2004;李方全等,1986)。

(5)“深部探测”实施将形成具有国际竞争力的深部地质、深部探测领域的研究群体与团体,为建立深部研究国家实验室奠定扎实基础。

全球深部探测与研究不仅开拓了认识地球的新领域,而且造就了一大批从事深部探测和研究地球深部结构的世界级科研团队和人才群。这批著名的研究群体已经成为引领地球科学理论创新和发展走向的思想库和实践者,从20世纪80年代以来,在国际顶级科学杂志上登载的地球深部与探测方面的论文约占1/5-1/4,这对新型的研究领域而言,足以显示出强大的生命力和引领性。走向深部是地学发展的必然。我国“深部探测”的启动不仅将大大缩短与先进国家的研究差距,更重要的是将迅速造就一批国际水准的研究团队和人才,为建立我国深部研究国家实验室打下坚实基础,这无疑具有前瞻性和战略性的意义。

因此,要全面提高对地球的认知程度,推动中国地球科学的整体进步,以及为资源形成及赋存规律、地质灾害发生机理,拓展资源发现空间提供科学依据,必须从深部研究与探测着手。运用和发展当代高新技术,在中国陆海实施深部探测和科学群钻行动,必将有效缓解资源与灾害的压力,惠及可持续发展,维护国家安全,具有特别重要的科学意义和现实

意义。

2 深部探测实验框架

2.1 总体部署

2008~2010年期间部署“两网、两区、四带、多点”的探测综合实验。“两网”:全国导电性参数标准网、全国地球化学基准网;“两区”:大华北综合探测实验区、华南综合探测实验区;“四带”:西秦岭中央造山带、青藏高原腹地、三江活动带、松辽油气盆地;“多点”:金川铜镍矿集区、罗布莎地幔探针(铬铁矿集区)、腾冲火山、大巴山前陆等。

2.1.1 两网——全国电磁参数标准网和地球化学基准网

“两网”:以物性、组分为基准的覆盖全国参数网,作为深部结构探测、物质组分探测的标准参考系,是基础性工作,专项将开展部分的实验。

全国电磁参数标准网:建立覆盖全国、网度为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的高精度区域电性“标准点”观测网控制格架(图1),并以华北为基地创立高精度区域大地电磁场“标准点”观测网的构建方法、技术;构建 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 华北地区壳、幔三维导电性结构标准模型“格架”,以及 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网度的壳、幔导电性三维结构模型,为覆盖全国的高精度区域电性“基准点”观测网最佳网度选择提供依据,为最终建立中国大陆地壳和上地幔三维导电性结构标准模型奠定基础(魏文博等,1997,2002,2003,2006)。

地球化学基准网:按照全球地球化学基准网格(图2),每个网格大小 $160\text{ km}\times 160\text{ km}$,野外地质考察和样品采集,查明研究区内地质构造背景、岩石组成等,进行代表性样品的采集、分析。建立中国出露地壳(岩石和地表疏松物)76种元素基准值。为下一步地壳物质探测提供基础参考数据,并为研究元素在中国大陆的时空分布奠定基础(谢学锦,1979,2003;王学求等,2006)。

2.1.2 两区——大华北和华南综合探测实验区

“两区”:重点部署在我国东部,在地质基础资料相对集中、重大科学、资源环境问题突出、实验条件较好的大华北和华南开展深部探测试验,以解决重大能源与矿产资源问题为目标,部署探测实验,集成技术方法体系。

大华北综合探测实验区:

(1) $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 大地电磁场“标准点”观测网;

(2)胶东半岛一胜利油田—燕山造山带—内蒙古亚洲带综合地震探测剖面,同时参与基准网标定;

图1 大地电磁场“标准点”观测网

Fig. 1 The planned standard magnetotellurics observational network

(3)大华北地球化学基准网,地震剖面地球化学调查走廊;

(4)莱阳盆地中国南北古板块界线科学钻及胶东反射地震剖面地球物理标定验证;

(5)北京活动带现今地应力测量。

重大科学与资源环境问题:华北是我国最古老的结晶陆核,也是中、新生代太平洋与古亚洲构造域交会、转换带,大陆岩石圈拆沉、地幔上涌,下地壳更新,伴有大规模岩浆—火山喷发,巨量成矿作用,气候畸变,生物更替等一系列地质事件的发生点,是地球科学研究的热点。所以,实施综合探测试验,揭示华北深部结构和组成,具有重要科学意义。同时,试

验区有我国规模最大的胶东金矿田、我国最大的油气资源基地——渤海湾盆地和新型的环渤海经济圈、渤海新区等,涉及首都地区地壳稳定性与安全。环渤海油气盆地是现今地壳最薄、地幔隆起最高的地域,高热流值异常,出现罕见的富金油田,形成外圈有胶东金矿田、辽东、燕山金矿富集带,内有富金油气的地球化学省,是研究无机生油、地幔柱构造的关键地区,也是万米科学钻首选地址之一。

华南综合探测实验区:

(1)穿越东南沿海—武夷山—江绍古缝合带—扬子古陆—雪峰山—四川盆地—龙门山构造带超长反射地震剖面;

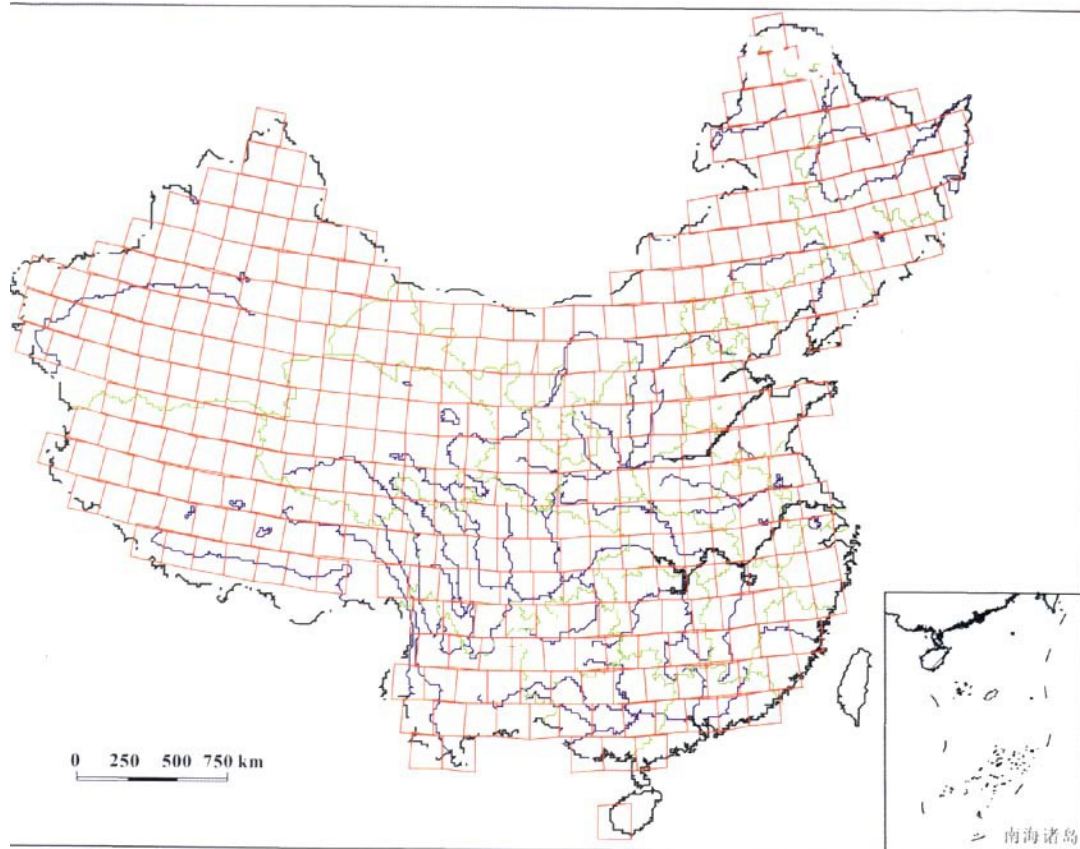


图 2 全国地球化学国际基准网(每 1 网格大小是 160 km×160 km)

Fig. 2 The planned standard international geochemical grids in China

(2)地球化学走廊带调查;

(3)长江中下游成矿带庐枞矿集区、铜陵矿集区立体探测;

(4)庐枞火山岩盆地科学钻,验证并标定地球物理参数;

(5)铜陵矿集区科学钻,验证并标定地球物理参数;

(6)南岭—武夷山成矿带的矿集区立体探测等。

重大的科学、资源环境问题:华南地区是由华夏陆块、扬子陆块拼合组成,经历了加里东、印支和燕山构造运动复杂的变形过程。燕山期发生重大的岩浆活动事件,产生了巨厚的火山岩和宽大(500 km)的花岗岩带,伴有成矿作用大爆发,形成世界第一的钨、锡、钼、铋矿产和重稀土矿产,著名的长江中下游铁、铜、金、硫火山岩型—矽卡岩型矿产。试验区将揭示华夏与扬子陆块古缝合带,穿过武夷山异常花岗岩带(地幔源)及其成矿带,雪峰山隆起(推覆? 变

质核杂岩?),四川油气盆地和龙门山地震带。同时,探测东部第二找矿空间,精确深部勘查,为东部深部找矿重大突破集成技术方法路线和探测示范。

2.1.3 四带——西秦岭、青藏高原腹地、三江活动带、松辽盆地

“四带”:集中部署在西部地区,兼顾东部,以探测技术试验为主,结合科学目标对特殊的地质结构进行探测实验。

西秦岭中央造山带—阿拉善地块联合地震剖面,与已经完成的松潘地块—西秦岭造山带反射地震剖面(高锐等,2006;王海燕等,2007)连接,构成我国最长的(长约 650~700 km)穿越造山带及其两侧盆地的深反射地震剖面。此剖面跨越了青藏高原东北边界和中国大陆晚中生代和古生代的陆陆碰撞带,穿过著名的白银矿集区,将精细揭露地壳结构,揭示大陆汇聚、碰撞的深部过程,并为金川矿集区深部找矿提供科学依据。

图3 华北、华南“两区”综合探测测试试验区部署图

Fig. 3 The planned integrated deep exploration of North and South China

青藏高原腹地地势平坦,是实验全球巨厚地壳(70~80 km)深反射地震探测技术的天然实验室。许多学者认为下地壳的流体作用是维持高原平坦地貌的原因(Armijo, 1986; Owens et al., 1997),也可能是印度板块与欧亚板块在高原腹地汇聚的结果(Jin et al., 1996; 高锐, 1997; Gao et al., 2005; 郑洪伟等, 2007)。在以往实验基础上(卢占武等, 2006),本次实验重点是获取下地壳和 MOHO 的信息,同时了解羌塘盆地的油气远景和深部构造控制作用。

三江活动带地应力监测,目的是建立世界上现今构造最活跃区的地球动力学野外监测试验室,为该区重大工程建设提供基础数据。

松辽油气盆地探测,以穿越大庆和松辽盆地的深反射地震剖面为核心,揭示世界上规模最大的油气盆地之一的地壳结构,同时穿过大庆 5 km 深科学钻井位,对探测结果实行标定。该项目将与大庆油田、大庆白垩系科学钻探工程合作执行。

2.1.4 多点

“多点”:以重大科学问题为目标,围绕急缺资源部署局部探测试验工作,为更深入地探测和科学钻探选址做好前期准备。

金川铜镍矿集区是世界上第三大铜镍矿床,目前资源储备不足,深部找矿难以突破,急需探测技术试验和方法组合,同时为超深科学钻选址做准备。

罗布莎地幔探针(铬铁矿矿集区)是世界上来源最深的地幔岩石露头,2007 年发现了斯石英假象和金刚石包体(白文吉等, 2004, 2006, 2007),以及大批的自然金属矿物和特殊结构的矿物(杨经绥等, 2007, 2008a, b)。因此,深入研究罗布莎超基性岩石和矿物,是了解深地幔组成和结构的探针。更有意义的是,罗布莎是我国最大的铬铁矿床,潜力巨大,拟部署科学钻探,寻找深部资源。

腾冲火山是全新世火山爆发产物,不仅指示了现今构造作用的活动性,而且也显示了全新世岩浆成矿作用的活跃性,兼具环境与资源双重研究价值。

山东莱阳盆地是苏鲁超高压变质岩石剥露、巨

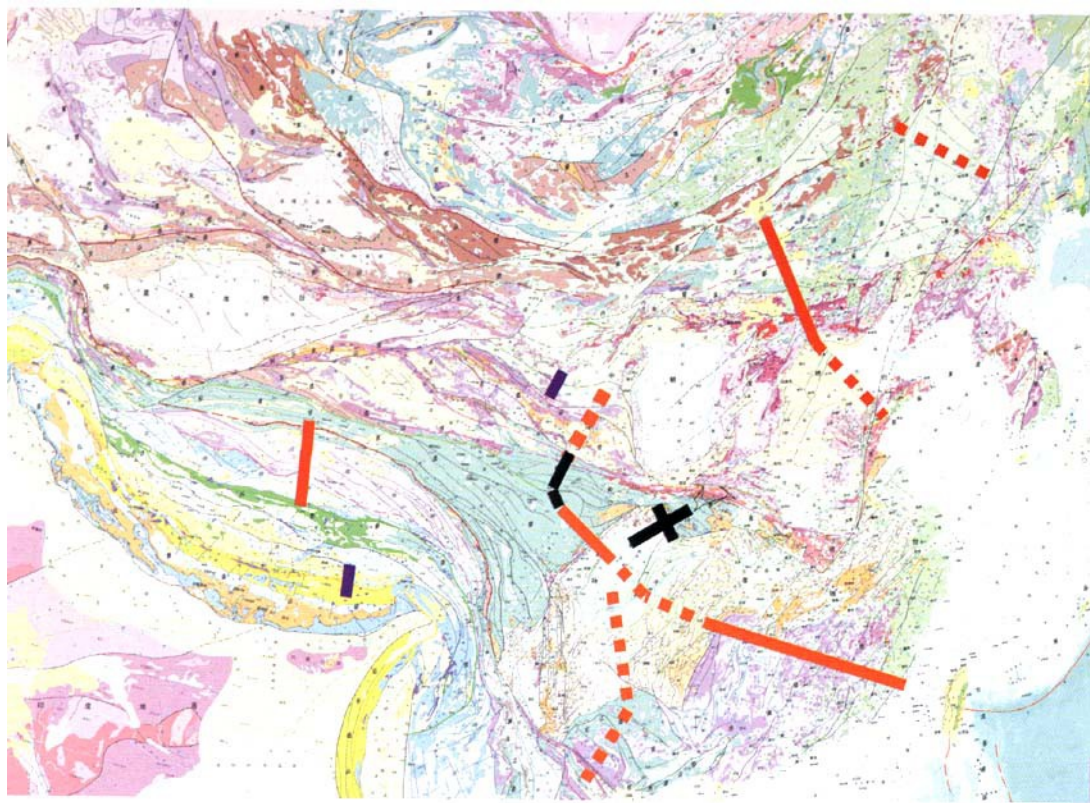


图 4 “四带”部署示意图

Fig. 4 The planned 4 zones for integrated deep geophysical and geochemical exploration
(红线拟实施的探测剖面, 虚线为拟与石油公司合作的剖面, 黑线为已完成剖面)

(The red lines indicate the profiles which planned to be probed; The dashed lines indicate the profiles planned to be probed in cooperation with petroleum company; The black lines indicate the profiles which have been probed)

量俯冲物质折返后的去处, 是研究南、北中国板块汇聚边界的最佳场所, 对该盆地的油气资源潜力进行评价, 将具有潜在的经济和社会意义。

2.2 关键技术问题

(1) 建立我国大陆导电性标准网、地球化学基准网, 构建深部结构、组分探测的参考系。

建立全国电性参数标准网: 以 $2^\circ \times 2^\circ$ 网度初步建立起全国电性的标准格架, 在华北地区建立 $1^\circ \times 1^\circ$ 网度的高精度区域电性标准网, 完成全国电性参数标准网网度试验, 并提出合理的大区域岩石圈尺度综合物性成像方法。

建立我国全元素地球化学丰度基准值: 按照全球地球化学基准值统一网度, 覆盖我国大陆约 500 个基准网格, 依据国际地球化学基准分析方案和精度分析 76 种元素(自然元素)标准值, 作为我国表层地球化学基准参数背景。

(2) 深部结构精细探测技术集成, 建立适应我国大陆地质背景和条件的深部探测技术体系。

深地震反射与折射地震共震源同时接收的联合采集探测技术。其创新之处在于在深反射探测长剖面测线上同时安置低频检波器, 获取共爆破震源信号, 同时采集反射与折射数据。同时获得地壳反射与速度结构, 提高探测解释的可靠性。

巨厚地壳深地震反射与折射探测技术。突破青藏高原全球最厚的地壳(80 km)结构精细探测技术及有效组合与运用, 特别是深井有效激发、小道距超长偏移距接收的采集技术, 以及近地表不均匀叠前偏移。

壳、幔物性探测技术有效组合。运用宽频地震与大地电磁联合观测与反演, 分地域在不同深度解决深部壳幔物性探测技术有效组合。

浅层矿集区立体探测技术试验。建立矿集区

深、中、浅三个层次立体探测技术体系,突破花岗岩区、火山岩区和碳酸盐岩区反射地震数据采集技术及激发技术;陡起伏条件深反射地震采集与处理技术、重力地震联合反演技术及深部成矿动力学过程的探测识别技术,发展弱信号提取技术、三维重磁反演技术、起伏地形大地电磁二维/三维反演技术,建立有效的深部找矿方法技术组合。

(3)高精度与穿透性地球化学技术:发展高精度地壳物质成分探测技术,深部地球化学示踪技术,盆地穿透性地球化学技术,海量地球化学数据库管理与图形显示技术。

(4)大陆科学钻探选址与预导孔技术实验:建立不同地质构造环境大陆科学钻探选址的有效技术方案组合,突破对陡立产出岩石(或断面)采取“斜钻”或“直立+水平钻结合”的钻探技术难题;研究复杂介质钻具和钻探技术的可行性、在复杂介质的安全

钻进和取心的保证技术措施;提出万米超深科学钻施工方案。

(5)地应力测量与应力应变综合监测:突破地应力测量标定与深孔水压致裂原地应力测试技术,深孔应力解除测试技术,攻克耐高压封隔器及井下数据自动采集、存储、传输等技术难题,研发深孔地应力综合监测技术。

(6)岩石圈三维结构模拟技术:创新一种新的计算平台对中国大陆深部动力学进行研究,利用大规模和超大规模并行计算机硬件技术的迅速革新、海量地球科学数据的实时更新和处理,尤其是数据网格和高性能网格计算等有利因素及时应用到计算地球动力学中来;能够综合考虑亚洲各种边界约束及其变形、岩石分布和力学、热力学性质参数沿地表水平方向分布的不均匀性和沿径向分布的不均匀性等影响中国大陆地球动力学的重要因素;模拟精度接

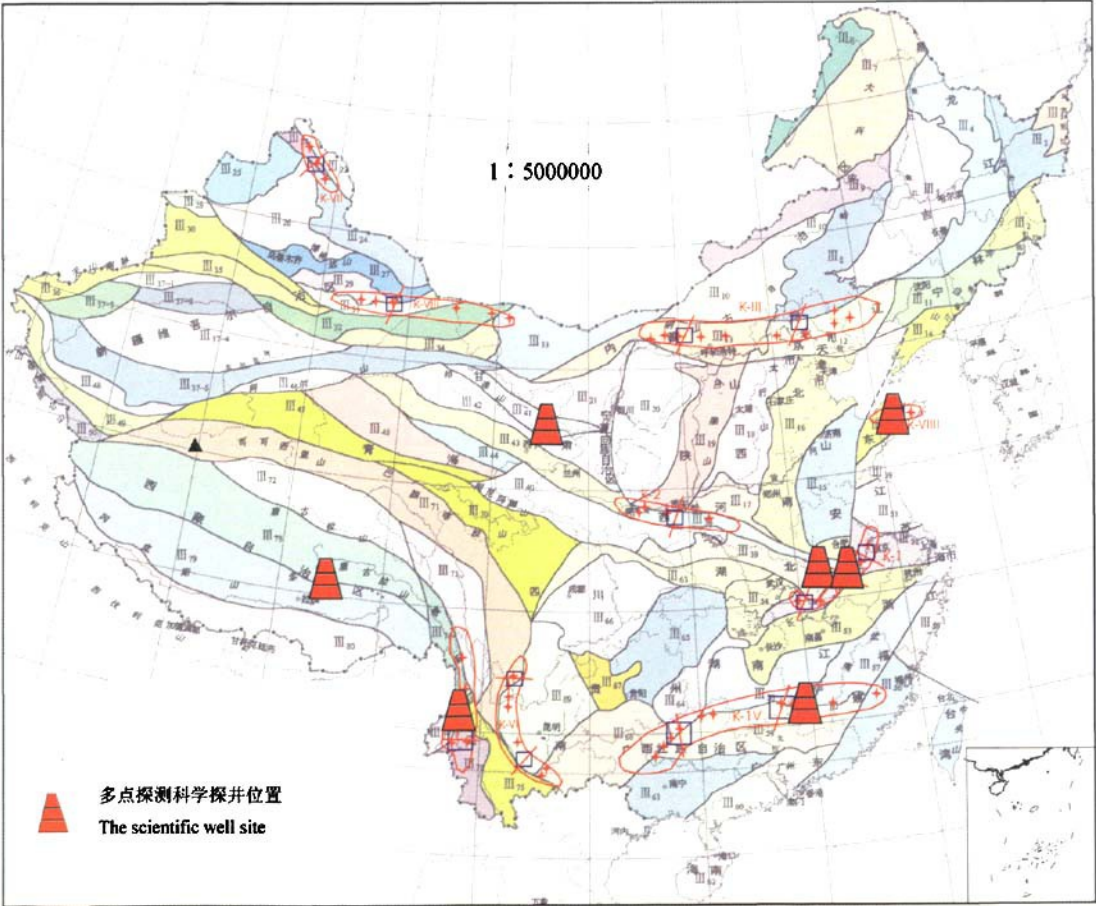


图 5 “多点”探测部署示意图
Fig. 5 The planned multiple exploration sites of SinoProbe

近3.0km网格的计算精度,三维模拟网格量在百万量级以上(300~500万网格),甚至达到千万量级的有限元网格。

(7)深部探测综合集成与数据管理:综合分析处理各类地球物理、地质构造和地球化学数据,对中国大陆地壳结构框架与演化进行探讨和研究。初步建立我国大陆主要构造框架,重塑演化过程。应用多源信息主体数据库建设技术,解决中国地壳探测工程所采集的地球物理、地球化学、地应力及地质勘查等多源数据的融合和建库问题。应用GIS技术,解决探测数据空间管理问题,建立必要的数据管理中心;开发可视化技术,实现数据3D立体动态显示;进行探测数据更新维护及门户网站信息发布;通过磁盘阵列和网络数据传输技术,解决海量探测数据存储和共享问题,最终实现探测数据集成和管理。

3 探测主要任务

建立中国大陆导电性“标准网”,全国地球化学基准网,为深部探测提供结构、组分的参考系;在东部的华北、华南开展综合探测实验,运用不同的方法、技术集中探测实验,包括区域超长剖面、矿集区立体探测和万米科学钻选址等,形成深部探测技术体系;选择复杂结构的西秦岭中央造山带,超厚地壳的青藏高原腹地,现今最活跃的三江地球动力活动带,松辽超大型油气盆地进行探测技术实验,获得特殊地质结构的高精度探测数据;在具有重大科学研究、资源环境意义的关键部位,开展精细探测和科学钻验证,以取得重要科学发现,并为进一步部署超深科学钻进行选址;研究深部地壳地球化学探测技术,包括深穿透地球化学、岩石探针等方法技术;研发具有自主知识产权的深层地应力测量,监测现今地壳运动,建立地应力标定技术系统;创新并行巨型地壳结构数值模拟平台,计算模拟洲际规模的地球动力学过程,建立岩石圈三维结构;集成各种方法数据与成果,集成深部探测有效的技术体系;实现海量探测数据储存、计算、共享、演示与发布全流程现代化,提升科学管理水平。

3.1 探测实验主要内容

3.1.1 大陆导电性参数“标准网”实验研究

拟在汇编、标定和同化中国大陆区域大地电磁场资料的基础上,在数据空白区用现代先进仪器及技术补充布置大地电磁测站进行观测,取得在全国相对均匀分布的高精度大地电磁场数据,构建中国大陆壳、幔大地电磁场三维数据体及电性结构“标准

模型”,为细化地壳、上地幔地质构造模型提供证据。尽可能预先建立覆盖全国、网度为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的高精度区域电性“标准点”观测网“控制格架”,以便研究大区域岩石圈尺度综合物性成像方法,并以华北为基地创立高精度区域大地电磁场“标准点”观测网 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的构建方法、技术;构建华北地区壳、幔三维导电性结构标准模型“格架”,以及不同网度的壳、幔导电性三维结构模型,为覆盖全国的高精度区域大地电磁“标准点”观测网最佳网度选择提供依据,为最终建立中国大陆地壳和上地幔三维导电性结构标准模型奠定基础。

3.1.2 深部探测技术实验与集成

针对中国大陆复杂地质条件和深部探测对象,选择青藏高原及其周缘、西部前陆冲断带、中亚造山带、松辽盆地、燕山造山带、华南成矿域等关键部位,开展主动源地震探测技术实验、被动源地震和电磁探测技术实验、大尺度地幔成像技术实验、断面构造地球物理综合解释技术实验,建立并集成可行的深部探测方法技术组合,为揭示深部不同层次精细结构、分析壳幔相互作用过程,为深部资源勘查,提供有效的技术支撑与示范研究,为进一步的工作提供技术准备。同时,通过实验剖面的探测成果,精细了解中国大陆及海域典型地域的岩石圈-软流圈的三维结构图像与构造格架,对比亚洲相邻地区和世界其他大陆,建立自地表到深部软流圈中国大陆及其边缘海域形成与演化的地球动力学过程。

3.1.3 深部矿产资源立体探测技术及实验研究

选择我国东部南岭、长江中下游成矿带的代表性矿集区,开展地壳深部30~40km深度范围和地壳浅部3~5km深度范围的综合地球物理精细探测试验,部署地壳表层2000m深度范围参数钻探试验、建立地球物理解释“标尺”,精细刻画矿集区3~5km立体精细结构和物质组成,追踪“第二找矿空间”容矿控矿构造与含矿岩体的深部延伸,为揭示矿集区深部构造背景及成矿动力学过程、研究深部成矿规律、建立深部成矿模式、开展深部成矿预测和深部资源潜力评价、拓展资源勘查深度,提供有效的现代技术方法体系。

3.1.4 地壳全元素探测与深穿透地球化学技术

重点发展千米深度物质组成和时空分布的精确探测技术,按照全球地球化学基准网格,建立中国地壳表层物质(岩石和地表疏松物)76种元素基准值;发展地壳深部物质成分识别技术、深部地球化学示踪技术和能探测盆地及盆地周边矿产资源的穿透性

地球化学技术;横穿华北地台—兴蒙造山带走廊带、华南造山带—扬子地台、秦岭—阿拉善走廊带开展地壳物质联合探测试验与示范研究。

3.1.5 大陆科学钻探选址与钻探实验

围绕中国大陆动力学基础地质研究的重大关键问题——板块汇聚边界的深部动力学、重要矿产资源集聚区成矿背景、成矿条件和成矿前景、盆山结合带对油气资源制约以及火山地热地质等方面,开展地质、地球物理的预研究、大比例尺地质调查填图和科学钻探选址;在此基础上,运用不同技术方案(竖孔、斜孔、水平孔以及结合孔)和在条件成熟的选区实施6~7口预导孔的科学钻探;选择2个科钻选址区分别进行“斜钻”和“垂直与水平钻探技术结合”的全取心钻探技术示范;完成可满足我国地球科学研究需求的12000m以上超深孔钻探技术设计,促进相关钻探工艺技术的发展完善,提高我国在科学超深孔钻探技术领域研究水平;通过可靠的钻进成孔技术方法研究,研制快速行走和强力钻进的多功能钻机,实现地震物探在坚硬、破碎地层钻孔的高效施工,达到钻进到任何地层无须提出孔内钻杆即可将安放炸药到预定深度之目的。

3.1.6 地应力测量与监测技术实验研究

研制千米深孔水压致裂应力测量系统以及深孔应力解除测试系统,对压磁、压容、体积式不同类型的应力应变监测系统进行对比试验研究,研发深井综合观测技术、实现同一钻孔多种参数综合观测;在首都圈和青藏高原东南缘分别建立综合观测试验站和应力应变综合监测网,为建设全国应力应变监测网络提供示范;建立全国地应力数据库,开展大陆动力学和构造应力场数值模拟的示范研究。

3.1.7 岩石圈三维结构与动力学数值模拟

系统地进行岩石物理性质参数测试,初步建立我国大陆主要岩石类型物性参数数据库;开展岩石物性实验研究,探讨不同温压条件下岩石物理力学性质与岩石内部结构及构造变形的内在关系,构建地球物理探测与地质岩性解译之间的桥梁。在此基础上集成地质和地球物理深部探测结果,综合实验室和野外观测成果,建立我国和若干重点地区的岩石圈结构模型;发展出一套并行三维有限元计算技术,考虑力学变形与热传递过程的耦合作用,开展岩石圈动力学过程的大规模三维计算模拟,量化了解控制区与岩石圈变形的主要控制因素。在板块运动框架下模拟我国应力场的形成原因和演化机理,探索应力场变化与大地震发生之间的关系,提高对

地质灾害的预测能力。

3.1.8 深部探测综合集成与数据管理

综合分析处理各类地球物理、地质构造和地球化学数据,对中国大陆地壳结构框架与演化进行探讨和研究。初步建立我国大陆主要构造框架,重塑演化过程。应用多源信息主体数据库建设技术,解决中国地壳探测工程所采集的地球物理、地球化学、地应力及地质勘查等多源数据的融合和建库问题;应用GIS技术,解决探测数据空间管理问题,建立必要的数据管理中心;开发可视化技术,实现数据3D立体动态显示;进行探测数据更新维护及门户网站信息发布;通过磁盘阵列和网络数据传输技术,解决海量探测数据存储和共享问题,最终实现探测数据集成和管理。引进购置一定数量的高新技术探测仪器及IT设备,为地球科学研究及实施地壳探测工程计划建立数据资源和技术支撑。实现地壳探测计划的系统工程管理。

3.2 实施技术路线

通过实施深部探测技术与实验专项,开展区域地球物理场和大地电磁场建设、区域长剖面深地震反射、折射地震探测、大尺度地幔层析成像、矿集区高精度立体探测等技术试验、形成地壳结构多层次、多尺度探测技术体系;开展地球化学深穿透技术、深部物质探针技术和1000m岩石全元素基准研究,形成地壳物质多层次、多目标探测技术体系;开展万米科学钻选址与技术方案论证、验证地球物理探测结果、建立深部物理、化学标志、围绕重大科学难题和资源环境问题,实施深部科学钻探,取得新发现,建立我国超深、深部科学钻探技术体系;自主开发研制深部应力测量、监测装置与应力标定技术系统,实现我国地应力测量与监测技术的跨越;构建深部探测海量数据储存、计算、共享、发布现代化流程和管理系统,开发具有特色的岩石圈结构与动力学模拟技术平台;完善《地壳探测工程》技术设计与实施方案,推动国家立项论证。

本专项以技术为先导,以核心技术组合集成为重点,通过示范与实验形成适用于我国地质条件和背景的深部探测技术体系。采用跨部门、多机构合作联合作战,多方法、多兵种攻关技术方式,多层次、多视角探测目标,国际合作、全球对比原则和顶层设计、高端综合的集成路线,组织实施专项研究计划,完成专项各项任务和目标,为实施地壳探测计划做好技术准备、人才储备和相关基地建设。

4 预期成果

4.1 主要成果

实施“深部探测技术与实验研究”专项,将全面提升我国地球探测能力和水平,形成适应不同地质景观条件和地质背景的深部探测技术体系,特别是集成探测第二找矿空间的有效技术方法系统,并在实验区带可望获得重大科学发现,构成一支国际一流水准的我国深部探测团队和研究实验基地。

(1) 集成深部探测技术体系:提交不同景观条件的探测技术标准、探测实验剖面例证;在完成深部探测技术实验与探测实验剖面基础上,创立中国大陆壳、幔导电性三维结构标准模型建设方法、技术流程和技术标准。提交反映探测技术实验创新成果的研究报告及获取重大发现的实验剖面例证。实验技术水平达到国际先进,部分达到国际一流水准。

(2) 建立我国大陆区域大地电磁场标准网和地球化学基准网:建立我国大陆区域大地电磁场标准网,构建深部地球物理数据网络共享平台;建立全国地球化学基准值,形成地壳物质成分探测技术体系和“化学地球”共享平台,形成深部探测数据储存处理与管理运行中心。

(3) 获取关键探测技术实验成果专利:在完成深部探测技术研发与探测剖面试验的同时,对取得的技术实验成果申报国家专利。

(4) 建设深部探测数据库实现深部数据共享:建立国际一流的我国深部探测数据库,包括原始数据、处理数据、解释成果数据;建立中国大陆主要岩石类型物性参数数据库,并达到无障碍向科学界和公众开放共享的水平。

(5) 实验探测剖面的重大发现:预计深部探测技术实验剖面会对国家重要经济区带的重大基础研究、油气与矿业开发、地质灾害发生背景与预测等方面取得重大发现成果。

(6) 形成一支深部探测研究的国家专业队:专业结构合理、年龄层次优化、理论联系实际、国际化的深部探测研究国内一流队伍,参与国际合作与竞争,为地壳探测工程提供人才储备。

4.2 效益分析

(1) 通过对深部探测技术进行系统集成和试验研究,建立有效可行的深部探测技术体系,为地壳探测和对地观测提供技术准备,推动我国深部探测和超深钻探发展,促进地球科学观测技术进步和地球科学理论发展。

(2) 在基础研究、资源开发、灾害环境背景与预测等探测技术方面取得重大进展,为资源勘查、灾害减轻提供新的深部背景依据,也为深部探测能够带动深部资源开发,促进环境经济以及人类和谐发展提供例证。

(3) 实验获取的技术成果将及时推广转化到实验剖面探测之中,部分探测技术能够产生显著效益。如应力应变监测技术对工程设计、灾害防治、地震监测预报具有良好应用前景;高精度立体探测技术能够为深部隐伏矿产资源评价和深部矿体勘探提供重要技术方法,对解决危机矿山找矿技术难题、缓解我国矿产资源紧张局面将发挥重要作用。实施科学钻探直接揭示深部结构与组分,以获取重大科学发现。

致谢:深部探测技术与实验研究专项是财政部、科技部支持和资助的国家科技专项,是目前我国地球科学基础性研究规模最大的项目,谨向国家有关部门对地球深部探测意义的深刻理解和鼎力支持的战略取向表示由衷的敬佩和感激。深部探测计划的构思和策划是在国土资源部“十一五”科技发展战略研究中提出并逐步完善的,历时6年。我们对国土资源部各级领导,特别是科技司、规划司和财务司的持续支持,并不遗余力推动立项的敬业精神和高度责任感表示崇高的敬意。同时感谢地球科学界的老中青三代科学家长期对深部探测工作和立项的呵护和扶植,特别是孙枢、马宗晋、曾融生、滕吉文、谢学锦、常印佛、陈毓川、许志琴等院士和专家,在立项论证过程中予以的关怀和帮助。

参 考 文 献

- 白文吉,杨经绥,施倪承,方青松,代明泉,熊明,颜秉刚. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩地幔岩中首次发现超高压矿物方铁矿和自然铁. 地质论评, 50(2): 184~188.
- 白文吉,杨经绥,方青松,任玉峰,戎合,施倪承,李国武,马喆生. 2006. 雅鲁藏布江蛇绿岩中超高压矿物硅尖晶石的研究. 中国地质, 33(6): 1379~1385.
- 白文吉,施倪承,杨经绥,方青松,任玉峰,戎合,李国武,马喆生. 2007. 西藏蛇绿岩豆荚状铬铁矿中简单氧化物矿物组合及其超高压成因. 地质学报, 81(11): 1538~1549.
- 陈群策,安美建,李方全. 1998. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨. 地质力学学报, 4(1): 37~44.
- 陈群策,毛吉震,侯硯和. 2004. 利用地应力实测数据讨论地形对地应力的影响. 岩石力学与工程学报, 23(23): 3990~3995.
- 高锐. 1997. 青藏高原岩石圈结构与地球动力学的30个为什么? 地质论评, 43(5): 460~469.
- 高锐,马永生,李秋生,朱铨,张季生,王海燕,李鹏武,卢占武. 2006. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质与关系——深地震反射剖面的揭露. 地质通报, 25(12): 1361~1367.
- 国际岩石力学学会试验方法委员会确定的岩石应力建议方法. 1987.

- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 24(1): 53~73.
- 金振民, 欧新功, 徐海军, H Kern, 金淑燕, 侯光久. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 m 岩石弹性波速度; 对地震深反射的约束. 岩石学报, 20(1): 83~98.
- 李方全, 孙世宗, 李立球. 1982. 华北及郑庐断裂带地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1(1): 73~86.
- 李方全, 刘光勋. 1986. 地应力测量, 地壳上部应力状态与地震. 中国地震, 2(1): 50~55.
- 李方全, 刘光勋. 1986. 我国现今地应力状态及有关问题. 地震学报, 8: 156~171.
- 李宏, 张伯崇. 2004. 北京房山花岗岩原地应力状态 AE 法估计. 岩石力学与工程学报, 23(8): 1349~1352.
- 李宏, 谢富仁. 2004. 中国大陆地壳应力环境基础数据库数据格式与标准. 岩石力学与工程学报, 23(23): 4090~4094.
- 李宏, 安其美, 谢富仁. 2005. 福建沿海边缘陆域的原地应力测量研究. 地震学报, 27(5): 508~514.
- 石井弘. 2001. 新钻孔地壳活动综合观测装置的开发和观测. 东浓地震科学研究所报告, 6: 5~10.
- 石耀霖. 2000. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考. 地震, 21(3): 1~7.
- 孙钧. 2007. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展. 岩石力学与工程学报, 26(6): 1081~1106.
- 王海燕, 高锐, 马永生, 等. 2007. 若尔盖与西秦岭地震反射岩石圈结构和盆山耦合. 地球物理学报, 50(2): 471~481.
- 王恒升, 白文吉, 王炳照, 等. 1983. 中国铬铁矿床及成因. 北京: 科学出版社.
- 王绳祖. 1995. 高温高压岩石力学——历史、现状、展望. 地球物理学进展, 10(4): 1~31.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 1987. 西藏蛇绿岩. 北京: 地质出版社.
- 王学求, 谢学锦. 2000. 金的勘查地球化学. 济南: 山东科技出版社.
- 王学求. 2005. 深穿透地球化学迁移模型. 地质通报, 24(10~11): 892~896.
- 王学求, 徐善法, 程志中, 刘红艳. 2006. 国际地球化学填图新进展. 地质学报, 80(10): 1598~1605.
- 王学求, 申伍军, 张必敏, 聂兰仕, 迟清华, 徐善法. 2007. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例. 地学前缘, 14(5): 116~123.
- 王学求, Л. А. Ярцева, 徐善法, 迟清华, Т. А. Волкова, Ж. Кушербаев, 刘大文, 聂兰仕, 张必敏, 孙彬彬, 申伍军. 2007. 天山成矿带境内外地球化学特征对比——中国东天山和哈萨克斯坦楚伊犁地区. 地质通报, 26(12): 1519~1530.
- 魏文博, 陈乐寿, 等. 1997. 西藏高原地电磁深探测——亚东-巴木措沿线地区壳幔电性结构. 现代地质, 11(3): 366~374.
- 魏文博, 陈乐寿, 等. 1997. 关于印度板块俯冲的探讨——据 INDEPTH~MT 研究结果. 现代地质, 11(3): 379~386.
- 魏文博, 陈乐寿, 等. 1997. 西藏中、南部壳内高导体与热结构特点——INDEPTH-MT 提供的证据. 现代地质, 11(3): 387~392.
- 魏文博, 谭捍东, 金胜, 等. 2002. 华北中部岩石圈电性结构. 地球科学, 27(5): 645~650.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 2003. 大陆岩石圈导电性的研究方法. 地学前缘, 10(1): 15~22.
- 魏文博, 金胜, 等. 2006. 西藏高原中、北部断裂构造特征; INDEPTH (III)-MT 观测提供的依据. 地球科学, 31(2): 257~265.
- 肖序常. 1984. 中国蛇绿岩概论. 中国地质科学院院报, 9: 19~30.
- 谢学锦. 1979. 区域化探. 北京: 地质出版社, 192.
- 谢学锦, 向运川. 1999. 巨型矿床的地球化学预测方法. 谢学锦, 邵跃, 王学求. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学. 北京: 地质出版社, 61~91.
- 谢学锦, 周国华. 2002. 多目标地球化学填图及多层次环境地球化学监控网络. 地质通报, 21(12): 809~816.
- 谢学锦, 刘大文, 向运川, 严光生. 2002. 地球化学块体——概念和方法学的发展. 中国地质, 29(3): 225~233.
- 谢学锦. 2003. 全球地球化学填图. 中国地质, 30(1): 1~9.
- 谢学锦, 叶家瑜, 鄢明才, 等. 2003. 考核不同实验室分析质量的新方法. 地质通报, 22(1): 1~11.
- 许志琴. 1995. 中国大陆科学钻探面临解决的关键地球科学问题. 地球学报, 1(1): 101~106.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 杨经绥, 李海兵, 杨天南, 邱海峻, 李天福, 孟繁聪, 陈世忠, 唐哲民, 陈方远. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. 地质学报, 77(4): 163~176.
- 许志琴, 陈晶, 杨经绥, 李旭平, 陈方远. 2003. 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. 地质学报, 77(4): 549~555.
- 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.
- 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 刘福来, 杨文采, 金振民, 王汝成, 罗立强, 黄力, 董海良. 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展. 中国地质, 32(2): 177~183.
- 杨凤英, 康志琴, 刘淑春. 1981. 蛇纹石的八面体假象及其成因的初步探讨. 矿物学报, 1(1): 52~54.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 孟繁聪, 陈松永, 张仲明, 戎合. 2007. 极地乌拉尔蛇绿岩铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群. 中国地质, 34(5): 950~952.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 戎合. 2008a. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述). 地球学报, 29(3): 263~274.
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 白文吉, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008b. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物. 岩石学报, 24(7): 1545~1552.
- 杨文采, 刘光林, 杨锴, 程振炎. 2006. 中国大陆科学钻探孔区全视式三维地震采集. 地球物理学报, 49(3): 735~744.
- 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 2006. 中国大陆科学钻探孔区地震反射的标定. 地球物理学报, 49(6): 1682~1692.
- 杨文采, 朱光明, 杨振华, 王宏琳, 徐刚, 周一平, 姚虹, 李桂华. 2007. 中国大陆科学钻探孔区的数字三分量反射地震调查. 地球物理学报, 50(3): 780~790.
- 杨文采, 于常青. 2007. 中国大陆科学钻探地球物理工程. 辉煌的历程——回顾中国地球物理学会 60 周年专刊.
- 张本仁, 高山, 等. 2003. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社.
- 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 等. 1996. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究. 西藏: 西藏人民出版社.
- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 赵大鹏, 贺日政. 2007. 印度岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震 P 波层析成像证据. 地球物理学报, 50(5): 1418~1426.
- 中国地质科学院地质研究所金刚石组. 1981. 西藏阿尔卑斯型超基性岩中发现金刚石. 地质论评, 22: 455~457.
- 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年. 地质论评, 52: 224~229.
- Armijo R. 1986. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implication. JGR, 91: 13803~13872.
- Berzin R, Oncken O, Knapp J H, Perez-Estaun A, Hismatulin T, Yunusov N, Lipilin A. 1996. Orogenic evolution of the Ural Mountains: Results from an integrated seismic experiment. Science, 274: 220~221.
- Blundell D, Freeman R, Mueller E. 1992. A Continent Revealed The European Geotraverse. Cambridge University Press, Cambridge.
- Brown L D, Zhao W, Nelson K D, Hauck M, Alsdorf D, Ross A.

- Cogan M, Clark M, Liu X, Che J. 1996. Bright spots, structure and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. *Science*, 274: 1688~1690.
- Brun J P, Wenzel F, ECORS-DEKORP Working Group. 1991. Crustal-scale structure of the southern Rhinegraben from ECORS-DEKORP seismic reflection data. *Geology*, 19(7): 758~762.
- Carbonell R, P r z-Estaun A, Galart J, Diaz J, Kashubin S, Mechie J, Stadlander R, Schulze A, Knapp J H, Morozov A. 1996. Crustal root beneath the Urals: wide-angle seismic evidence. *Science*, 274: 222~223.
- Cavazza W, Roure F, Spakman W, Stampfli G, Ziegler P. 2004. The TRANSMED Atlas. The Mediterranean Region from Crust to Mantle. Springer, Berlin.
- Chen Q, Li F. 2003. A new method of three dimensional in situ stress measurements by hydraulic fracturing technique. Sugawara, Obara, Sato. *Rock Stress*. Swets & Zeitlinger, Lisse. 153~159.
- Clowes R M, Cook F A, Ludden J N. 1998. LITHOPROBE leads to new perspectives on continental evolution. *GSA Today*, 8: 1~7.
- Clowes R M. 2005. The Evolution of a Continent Revealed, 2002-03 to 2004-05 Final Report for NSERC.
- Clowes R M, Li C. 2005. LITHOPROBE Celebratory Conference Oral and Poster Presentations. LITHOPROBE Secretariat, University of British Columbia, Vancouver, Canada, E-Publication No. 5, 2 CDs.
- COCORP. 1992. Tibetan trek; A time for reflection; COCORP targets last frontier. *AAPG Explorer*, 1: 15~19.
- Coisy P, Nicolas A. 1978. Regional structure and geodynamics of the upper mantle beneath the Massif Central. *Nature*, 274: 429~432.
- Cook F A, Vander Velden A J, Hal K W, et al. 1998. Tectonic delamination and subcrustal imbrication of the Precambrian lithosphere in northwestern Canada mapped by LITHOPROBE. *Geology*, 26: 839~842.
- Darnley A G, Bjorklund B, Gustavsson N, Kval P V, Plant J A, Steinfeldt A, Tauchid M, David S, Mike J, Mark Z. 2008. EarthScope Facility Operation and Maintenance. Report to NSF.
- David S, Willam P, Mark Z. 2002. EarthScope: Acquisition, Construction, Integration and Facility Management. A Collaborative Proposal to NSF.
- DEKORP Research Group. 1985. First results and preliminary interpretation of deep-reflection seismic recordings along profile DEKORP 2-South. *J. Geophys.*, 57: 137~163.
- DEKORP Research Group. 1990. Results of deep-seismic reflection investigations in the Rhenish Massif. *Tectonophysics*, 173: 507~515.
- DOBRefraction'99 Working Group. 2003. DOBRefraction'99-velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371: 81~110.
- Echtler H P, Stiller M, Steinhoff F, Krawczyk C, Suleimanov A, Spiridonov V, Knapp J H, Menshikov Y, Alvarez-Marron J, Yunusov N. 1996. Preserved collisional crustal structure of the Southern Urals revealed by Vibroseis Profiling. *Science*, 274: 224~226.
- Egorkin A V, Mikhaltsev A V. 1990. The result of seismic investigations along geotraverses. In: Fuchs K, Kozlovsky Ye A, Krivtsov A I, Zoback M D. *Supper-deep Continental Drilling and Deep Geophysical Sounding*. Springer, Berlin, 111~119.
- EREGT Group. 1990. An electrical resistivity crustal section from the Alps to the Baltic Sea (central segment of the EGT). *Tectonophysics*, 207: 123~139.
- EUROBRIDGE Working Group, EUROBRIDGE95. 2001. Deep seismic profiling within the East European Craton. *Tectonophysics*, 339: 153~175.
- Gao R, Lu Z, Li Q, Guan Y, Zhang J, He R, Huang L. 2005. Geophysical probe and geodynamic study of the crust and upper mantle in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Episodes*, 28(4): 263~273.
- Gee D, Zeyen H. 1996. EUROPROBE. Uppsala University, Uppsala.
- Gee D, Artemieva I M. 2001. EUROPROBE 1992~2001. Uppsala University, Uppsala.
- Gee D G, Stephenson R A. 2006. *European Lithosphere Dynamics*. Geological Society, London, Memoirs, 32.
- Grad M, Keller G R, Thybo H, Guterch A, POLONAISE Working Group. 2002. Lower lithospheric structure beneath the Trans-European Suture Zone from POLONAISE '97 seismic profiles. *Tectonophysics*, 360: 153~168.
- Henk A. 1993. Late orogenic basin evolution in the Variscan internides; The Saar-Nahe Basin, southwest Germany. *Tectonophysics*, 223(3~4): 273~290.
- ILIHADSS Group. 1993. A deep seismic sounding investigation of lithospheric heterogeneity and anisotropy beneath the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 221: 35~51.
- Jin Y, McNutt M K, Zhu Y S. 1996. Mapping the descent of Indian and Eurasian plates beneath the Tibetan Plateau from gravity anomalies. *J. Geophys. Res.*, 101: 11275~11290.
- Knapp J H, Steer D N, Brown L D, Berzin R, Suleimanov A, Stiller M, L schen E, Brown D L, Bulgakov R, Kashubin S N, Rybalka A V. 1996. Lithosphere-scale seismic image of the Southern Urals from explosion-source reflection profiling. *Science*, 274: 226~228.
- Long C, Salisbury M H. 1996. Velocity structure of the Britt Domain, southwestern Grenville Province, from laboratory and refraction and experiments. *Can. J. Earth Sci.*, 33: 729~745.
- MONA LISA Working Group. 1997. MONA LISA-deep seismic investigations of the lithosphere in the southeastern North Sea. *Tectonophysics*, 269: 1~19.
- Nelson K D, Zhao W, Brown L D, Kuo J, Che J, Liu X, Klemperer S L, Makovsky J, Meissner R, Mechie J, Kind R, Wenzel F, Ni J, Nabelek J, Chen L, Tan H, Wei W, Jones A G, Booker J, Unsworth M, Kidd W S F, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogan M, Wu C, Sandvol E, Edwards M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet; Synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 274: 1684~1687.
- Oliver J E. 1978. Exploration of the continental basement by seismic reflection profiling. *Nature*, 275: 485~488.
- Oliver J E, Cook F A, Brown L D. 1983. COCORP and the continental crust. *J Geophys. Res.*, 88: 3329~3347.
- Owens T J, Zandt G. 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution. *Nature*, 387: 37~43.
- Pfiffner O A, Lehner P, et al. 1997. *Deep structure of the Swiss Alps; Results of NRP 20*. Basel, Boston, Berlin: Birkhauser.
- ROSNEDRA. 2005. The goals and areas of activity of ROSNEDRA. Moscow.
- Rousset D, Bayer R, Guillon D, Edel J B. 1993. Structure of the southern Rhine Graben from gravity and reflection seismic data (ECORS-DEKORP program). *Tectonophysics*, 221(2): 135~153.
- Sandoval S, Kissling E, Ansorge J, SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group. 2004. High-resolution body wave

- tomography beneath the SVEKALAPKO array-II. Anomalous upper mantle structure beneath the central Baltic shield. *Geophysical Journal International*, 157: 200~214.
- Schmid S M, et al. 1997. Integrated cross section and tectonic evolution of the Alps along the Eastern Traverse. In: Pfiffner O A. 1997. *Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20*, Birkhauser, 289~304.
- Thybo H, Pharaoh T, Guterch A. 1999. Geophysical investigations of the Trans-European Suture Zone. *Tectonophysics*, 314.
- Thybo H. 2001. Crustal structure along the EGT profile across the Tornquist Fan interpreted from seismic, gravity and magnetic data. *Tectonophysics*, 334: 155~190.
- Wei W, Unsworth M, et al. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716~718.
- Wenzel F, Brun J P, ECORS-DEKORP Working Group. 1991. A deep reflection seismic line across the Northern Rhine Graben. *Earth and Planetary Letters*, 104: 140~150.
- Wilson J. 2003. LITHOPROBE: Dancing Elephants & Floating Continents-The story of Canada beneath your feet. Key Porter Books.
- Wang Xueqiu. 2005. National and global scale geochemical mapping for mineral exploration and assessment in China. *Explore*, 127: 23~29.
- Xie X J. 1995. A global geochemical database for environmental and resource management. *Earth Sciences* 19. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- Zhao W, Nelson K D, Project INDEPTH Team. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366: 557~559.

SinoProbe: the Exploration of the Deep Interior Beneath the Chinese Continent

DONG Shuwen, LI Tingdong

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

When the Chinese have achieved a lot in outer space exploration with manned space craft "Shenzhou No. 7" and Change Project for Lunar exploration, we still have to face such a fact: we know only very few about the interior of the Earth which is the only homeland for the human being, with the largest direct drilling depth of 12 km on the very shallow skin of the Earth. This is to say that going down into the deep interior of the Earth is much more difficult than going up to the outer space. The Earth is the only place for human being to live, and provides human being food, water, energy and mineral resources which are necessary for life. Meanwhile, the Earth also brings geo-hazards like volcanic eruption, earthquake and Tsunami. To know the components, structures and dynamic processes in the deep interior of the Earth through deep drilling and geochemical and geophysical explorations, is not only the pursuit of human being on knowledge of natural secrets, but also the basic requirement of human being on resources and security. The Chinese geologists recognized that, it is very necessary to do wide and thorough exploration of the deep interior beneath the Chinese continent, to solve the key problems on resources and environment. The recently started National Scientific Program of China titled as "Deep Exploration Technology and Experimentation" (ab. as SinoProbe), indicates the beginning of the Chinese deep exploration era. The purpose of the Sinoprobe (2008~2012) is to facilitate the integration of new exploration technologies and the latest experimental techniques in the area of deep-crustal exploration, to explore the composition, structure and evolution of the crust and mantle lithosphere beneath continental China, to better understand the physical processes controlling the formation and distribution of large-scale mineralization, and to gain deeper insights into the mechanisms causing earthquakes and volcanism. Sinoprobe is also to provide scientific data and information needed to discover new sources of energy and metals, to predict geological disasters, and to mitigate the damage associated with those catastrophic events. This program promotes international cooperation while using the latest detection equipment, devices, and technology, and while educating world-class young scientists to ensure the continuous and sustainable implementation and execution of the planned long-term deep exploration program in China.

Key words: SinoProbe; deep interior exploration; technology and experiment; arrangement and execution, China