

揭开中国入地计划序幕

“上天、入地、下海”是人类挑战自然的三大壮举，深部探测是我国入地计划的先锋。2008年启动的“深部探测技术与实验研究”专项的总体目标是：为《地壳探测工程》做好关键技术准备，研制深部探测关键仪器装备，解决关键探测技术难点与核心技术集成，形成对固体地球深部层圈立体探测的技术体系；在不同景观、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实验、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热点，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；积聚优秀人才，形成若干技术体系的研究团队；完善《地壳探测工程》设计方案，推动国家立项。

《深部探测技术与实验研究》专项是《地壳探测工程》的培育性计划。从2002年国土资源部组织“十一五”国土资源科技发展战略研究开始构思、起草了《地壳探测工程》建议书，2005年列入“十一五国土资源发展规划”，2006年《国务院关于加强地质工作的决定》明确“实施地壳探测工程，提高地球认知、资源勘查和灾害预警水平”。历经6年



照片人员介绍：

后排左起：黄大年教授，马岩处长，高锐研究员，王学求研究员，吕庆田研究员，魏文博教授，杨经绥研究员，陈群策研究员。
前排左起：黄宗理研究员，许志琴院士，陈毓川院士，石耀霖院士，汤中立院士，董树文研究员，李廷栋院士，刘嘉麒院士，吴珍汉研究员。

30 多次易稿, 多次论证, 终于在财政部、科技部支持下正式立项启动。

专项将围绕深部探测实验和示范, 设计“两网、两区、四带、多点”的总体部署, 建立我国大陆电磁参数标准网、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, 争取重要科学发现, 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, 完善《地壳探测工程》的技术路线和实施方案, 推动国家立项论证。

专项紧紧围绕国家需求, 从了解深部结构入手, 集中揭示我国大陆地壳结构, 聚焦大型金属矿集区, 探索 3000 ~ 5000 m 深度的“透明化”和含油气盆地的深部控制条件, 部署现今活动地带的地应力测量与监测, 数值模拟再现岩石圈的动力学过程, 发展具有知识产权的深部探测仪器和装备, 力争逐步在地球深部探测领域的主力技术装备国产化。

《深部探测技术与实验研究》专项的正式启动, 标志着中国人地计划拉开序幕, 中国地球科学走进地球深部探测新时代。专项的实施, 将全面提升我国深部探测和超深钻探技术, 实现地质科学研究、深部资源勘查、自然灾害预测等重大发现, 从深层次推动我国从地质大国向地质强国的转变。

专项负责人:

专项技术负责人:

二〇一一年一月七日于北京

深部探测技术与实验研究(SinoProbe)

董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队

中国地质科学院, 北京 100037

摘要:“深部探测技术与实验研究”作为国家地壳探测工程的培育性启动计划(2008—2012年), 专项围绕深部探测实验和示范, 在全国部署“两网、两区、四带、多点”的深部探测技术与实验研究工作, “两网”: 全国电磁参数标准网和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(铬铁矿矿集区)、腾冲火山、长江中下游和南岭矿集区、南北中国板块汇聚边界等。旨在: 自主研发深部探测关键仪器装备, 全面提升国产化水平; 为实现能源与重要矿产资源重大突破提供全新科学背景依据和基础信息; 揭示成藏成矿控制因素, 突破深层找矿瓶颈, 开辟找矿“新空间”; 把握地壳活动脉搏, 提升地质灾害监测预警能力; 深化认识岩石圈结构与组成, 全面提升地球科学发展; 为国防安全的需要了解地壳深部物性参数; 为地壳探测工程的全面实施进行关键技术与实验准备。

关键词: 深部探测; 技术; 实验; SinoProbe

中图分类号: P542.5; P548 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.s1.01

Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)

DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: As a training startup program of national crustal exploration project (2008—2012), the project of “Deep Exploration Technology and Experimentation” has centered specially on deep exploration experimentation and demonstration, and arranged deep exploration technology and experimentation throughout the country characterized by “two networks, two regions, four belts and multiple points”. “Two networks” refers to standard network of nationwide electromagnetic parameters and datum network of nationwide geochemical exploration, “Two regions” stands for generalized North China integrated exploration experimentation region and South China integrated exploration experimentation region, “Four belts” signifies West Qinling central orogenic belt, hinterland of Qinghai-Tibet plateau, Sanjiang (Three-River) active belt and Song-Liao oil-gas basin, and “Multiple points” means such areas as Jinchuan copper-nickel ore concentration area, Luobusha mantle probe (chromite ore concentration area), Tengchong volcanic rocks, middle and lower Yangtze River and Nanling ore concentration area, and convergent boundary between North China plate and South China plate. The aims of the research work lie in the following aspects: to independently design and develop most important instruments and equipment for deep exploration and raise the domestic production level in every aspect; to provide the newest scientific background and basic information for the realization of great breakthrough in search for energy resources and important mineral resources; to reveal factors governing the formation of resource accumulation and mineral deposits, break the bottleneck in deep ore-prospecting, and open up ore-prospecting “new space”; to grasp the pulse of crustal activities and raise the capability for monitoring and warning of geo-hazards; to deepen the understanding of the structure and composition of the lithosphere so as to accelerate the development of Earth science; to understand the physical

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(SinoProbe)资助。

收稿日期: 2010-08-20; 改回日期: 2010-12-07. 责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 董树文, 男, 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。E-mail: swdong@cags.ac.cn。

parameters of the deep crust for national defense; to make key technological and experimental preparations for deep crustal exploration.

Key words: deep exploration; technology; experimentation; SinoProbe

我国在工业化进程中,社会经济可持续发展正面临资源环境多重压力。我国是一个资源大国,目前,已发现 170 余种矿产,资源开采量居世界第二,支撑了 50 年社会主义经济建设和工业化发展,使我国的综合国力跃居世界第四。然而,随着矿产开发力度的加大,资源储备急剧下降,矿床发现率长期低靡,已勘探的能源和固体矿产资源对工业化的保证程度日见下滑,资源的供需矛盾突显。初步统计 2007 年我国原油和成品油进口达 1.8 亿吨(对外依存度 50%),铁矿石进口 3.2 亿吨(对外依存度 56%),铜矿进口 361 万吨(对外依存度 80%),氧化铝进口 691 万吨(对外依存度 >60%),铅精矿进口 72 万吨(对外依存度 40%)。2007 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。由于我国正处于工业化中期阶段,对矿产资源的需求在未来 15~20 年仍然居高不下,资源压力相当一段时期难以缓解。从国家安全出发,矿产资源对外依存度必须保持在安全临界线以内,而增加国内资源供应和提高保障度是惟一的、积极的策略。但当前我国深部找矿缺乏有效的技术方法支撑,面临技术瓶颈。

随着社会经济长期快速发展,我国面临日益突出的资源、能源、环境问题,急需发展深部探测及相关技术,为深部矿产资源评价与减灾防灾提供必要的科技支撑。2006 年 4 月,国务院发布《关于加强地质工作的决定》(国发[2006]4 号),明确提出“实施地壳探测工程,提高地球认知、资源勘查和灾害预警水平”。2006 年在全国地质工作会议上,曾培炎副总理指出,“要支持加强地质工作的一些专项工程,如矿产资源保障和地壳探测等”。为了保障国家经济社会可持续发展,响应国际地球科学发展趋势,参与全球科学竞争,有必要实施我国“地壳探测工程”。通过开展“深部探测技术与实验研究”专项,发展现代深部探测技术方法体系,提升自主研发深部探测仪器装备能力,扭转深部探测仪器长期依赖进口的局面,打破国外垄断,能够有效推动我国地壳探测技术准备和立项进程,为解决国家资源环境重大问题提供科技支撑。

世界各国近百年地球科学观测实践表明,要想揭开大陆地壳演化奥秘,更加有效的寻找资源、保护环境、减轻灾害,必须进行深部探测。很多发达国家自 20 世纪 70 年代以来,陆续启动了深部探测

和超深钻探计划,通过“揭开”地表覆盖层,把视线延伸到地壳深部,获得了重大成果;相继揭示了板块碰撞带的双莫霍结构,发现造山带山根,提出岩石圈拆沉模式和大陆深俯冲理论。美国在造山带下找到了大型油田,澳大利亚在覆盖层下发现奥林匹克坝超大型矿床;苏联在超深钻中发现了极端条件下的生物、深部油气和矿化显示,突破了传统油气成藏理论,拓展了人类索取资源的空间,加深了对生命演化的认识。目前,世界主要发达国家都已经将“地壳探测”计划作为实现可持续发展的国家科技发展战略(Oliver, 1978; Oliver et al., 1983; DEKORP Research Group, 1990; COCORP, 1992; Blundell, 1992; Echtler et al., 1996; Knapp et al., 1996; Berzin et al., 1996; Carbonell et al., 1996; Pfiffner et al., 1997; Schmid et al., 1997; Eurobridge, 2001; David et al., 2002, 2008; Wilson, 2003; Cavazza et al., 2004; Clowes, 2005; Clowes et al., 2005b; Gee et al., 2006)。

为落实《国务院关于加强地质工作的决定》(国发[2006]4 号文)关于实施《地壳探测工程》的部署精神,启动“深部探测技术与实验研究专项”(英文简写: SinoProbe)作为《地壳探测工程》的培育性启动计划,由中国地质科学院组织实施,国土资源部归口管理。专项核心任务是,为“地壳探测工程”做好关键技术准备,围绕《地壳探测工程》的全面实施,研制深部探测关键仪器装备,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实验、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热点,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;积聚、培养优秀人才,形成若干技术体系的研究团队;完善《地壳探测工程》设计方案,推动国家立项。

为了保障国家经济社会可持续发展,响应国际地球科学发展趋势,参与全球科学竞争,有必要开展“深部探测技术与实验研究”,发展现代深部探测技术方法体系,能够有效推动我国地壳探测技术准备和立项进程,为解决国家资源环境重大问题提供科技支撑(董树文等, 2009, 2010)。

(1)为实现能源与重要矿产资源重大突破提供全新科学背景依据和基础信息。我国资源环境面临的问题,已经成为经济建设和社会发展的重要制约因

素,并且越来越突出。党中央和国务院对此极为重视,胡锦涛总书记指出,要加大重要矿产资源勘查开发力度,增加接替资源。温家宝总理多次指示,加强重点矿种、重要成矿区带勘查,实现找矿重大突破。“国务院关于加强地质工作的决定”总体要求是,切实加强重要矿产资源勘查,努力实现地质找矿新的重大突破,为全面建设小康社会提供更加有力的资源保障和基础支撑。如何缓解当前资源压力,保持可持续发展,从地球科学技术发展角度,资源环境问题的解决必须从根本抓起,必须提高对地球的组成与结构的认识,解决能源和金属矿产资源的形成和分布规律,解决地质灾害发生、发展过程与发灾机理。这些基础问题归溯于对地球的深部结构和组成了解的匮乏,发达国家前 20 年的实践已经证明。我国急需开展对地球的精细探测,急需获得对地球深部的更多的知识。

(2)揭示成藏成矿控制因素,突破深层找矿瓶颈,开辟找矿“新空间”。当前我国在境内急需解决能源与重要矿产资源的途径有二,一是开辟“新区”,二是突破深层。就油气资源而言,开拓深层新区新层系是今后一段时间油气战略突破的关键,刚刚完成的第三轮油气资源潜力评价确定了这一方向。此外,造山带几乎成为油气勘查的禁区,然而美国落基山推覆体下 5 km 深层油田的发现,我国近年祁连山前陆油气田、大庆油田火山岩之下大气田、扬子海相碳酸盐深部整装“普光气田”突破,预示造山带和深部将成为油气资源勘查的新区。我国造山带面积约 150 万 km²,将成为未来寻找油气资源的“新大陆”。

对金属矿而言,中国约占 1/2 的陆地因被盆地和各种覆盖层所掩盖,成为找矿的“处女地”或“甚低工作区”。根据全球找矿的经历,这些地区蕴藏着巨量的固体矿产资源,依照当前科学技术和成矿理论,以及探测技术水平,穿透 500 m 覆盖层评价隐伏矿床是可及的。据统计,我国 500 m 深覆盖区面积约 50~80 万 km²,相当于我国已调查、勘探的陆地面积的 1/5,是一片极具潜力的金属矿产的新区,我们称为“找矿新空间”。

另外,我国金属矿产资源勘探深度平均为 450 m 深,勘探程度最高的东部地区平均深度为 500 m。然而,世界上资源大国勘探深度超过 1500 m,2000 m 以深的矿区有 20 多座,最深开采达 4800 m。如果把我国金属找矿勘探深度延深到 1000 m,可使我国矿产资源量大幅度增加;如果把评价深度延伸到 2000 m,我国金属资源潜力可能翻番。油气资源的勘查深度总体在 4000~4500 m 以内,深层油气田已

经成为下一轮突破的关键,对此毫无疑问。由此,开辟油气和重要矿产资源找矿“新大陆”和“新空间”,向深部找矿,加强深部探测、加大勘探深度是发现矿床和油气田,大幅度增加资源量的必经之路。

(3)把握地壳活动脉搏,提升地质灾害监测预警能力。我国是世界上地质灾害最为严重的国家,随着社会经济的快速发展,正面临越来越多的灾害威胁和越来越重的环境压力。开展深部探测技术与实验研究,能够为研究地震与地质灾害机理、合理制定减灾防灾规划提供科学依据。发展地应力测量与监测技术,了解大陆地壳应力场活动状况,在活动断裂带、重大工程沿线、重点矿山、城市集中区进行地应力动态监测,对于研究新构造运动规律,地应力聚集过程,灾害诱发机制,灾害预警预报具有重要的科学价值和实用意义。

随着浅部资源的日益枯竭,矿产资源采掘向超深矿山进军,地热资源开发、核废料的地下深埋、深埋隧道等的深度越来越大,随之而来的是地应力的增大,深部岩体结构和构造更加复杂。近年来我国大型矿山煤瓦斯突出、岩爆、巷道变形破坏、突水等问题越来越严重,深部矿区地质灾害的频发,促使人们更加关注深部高应力状态下岩体力学性状和岩石破坏机理、灾害预测和防范措施的研究。人们开采地下资源的工程活动同样使相对稳定的原岩应力状态受到扰动,一旦达到岩石的破裂临界值,就会引发各种矿难。如何既能有效地将矿产资源开采出来,又能制约诱应力集中的因素,减少和防治灾害的发生,是人们长期不懈努力追求的目标。因此,为了减少地质灾害的发生及确保工程的安全,开展地应力测量和监测研究是非常必要的,既具有理论意义,又有实际应用价值。

(4)深化认识岩石圈结构与组成,全面提升地球科学发展。岩石圈是地球外层固体部分,漂浮在地幔软流层之上,并因物质的比重大小而分成若干次级圈层,由于板块构造的俯冲、碰撞,物质循环,地幔物质上涌,地壳岩石变质,火山喷发,岩浆侵入等造成十分复杂的结构。深部探测关键技术在于建立穿透不同深度,精确萃取岩石物理性质的技术组合与集成,以及探测数据的处理和有效信息提取。当今地球科学的发展和进步对地球深部数据和认识程度的依赖越来越高,可以说没有对地球深部的探测就没有地球科学理论的进步。

地球动力学是地球科学与力学相结合的跨学科研究分支,它从地球整体运动,地球内部和表面的构造运动探讨其动力演化过程,进而寻求它们的驱

动机制。它的核心内容是从力学分析的角度探讨地球各圈层的发展演化特征。70年代初板块学说的建立和兴起,以及GPS为主的大地测距技术的日臻完善,世界及中国大陆地壳运动观测网络的建立,全球数字化台网的建立,深海钻探计划,大陆断面计划等多学科联合研究已经取得了很大的进展。但是,在确定作用于板块上的力以及板块内部的力学响应的动力学研究方面仍存在问题。因此,地球动力学研究迫切需要有大量的地壳应力应变场的实测资料为基础,才可能从运动学的研究步入科学的动力学的研究阶段。

(5)了解深部物性参数是国防安全的需要。地球深部探测的另一个深层次背景是国家安全的需要。除了深部探测研究本身所具有的科学价值外,为了提高监测可能秘密进行的核实验位置的准确性,为了在地壳深部掩埋核废料、存储核原料,要求得到所在地区的岩石圈结构和地震波震相的精确传播时间,引力场、磁场和密度等数据参数,这些数据在军事上具有极大的价值。加拿大LITHOPROBE计划已经提供出类似的范例。考虑到我国国家安全的重要利益,尽快实施国家深部探测研究相关计划是十分必要的。

(6)自主研发深部探测仪器装备,全面提升国产化水平。我国科学钻探与固体矿产勘探钻机的能力有限,远远不能满足科学钻探与固体矿产资源勘查的需求。为实施深部探测工程,提高深部探测技术,推动深部探测工程的顺利进行,需进行深部钻探专用钻机的研究。

目前国内外现代勘查地球物理技术装置和方法十分丰富和多样化,但不同亚学科领域所发展出来的深部探测技术,其针对的具体探测对象和环境适应性一般会有所不同。因此,对于特定环境和期望探测的具体对象,需要一套与之相适应的探测技术组合。整合现代探查技术,发展区域适应的技术组合,对于提高隐伏矿探测的命中率和工作效率十分重要。

为更好地实施《地壳探测工程》提供技术支撑,提升自主研发深部探测仪器装备的能力,扭转深部探测仪器长期以来依赖进口的局面,打破国外的垄断,研发具有自主知识产权的分布式自定位宽频地震勘探系统等,引领深部探测重大科研装备的突破,使我国深部探测仪器装备部分占据国际领先地位,推动地球资源探测领域科技进步。

1 国内外现状与发展趋势

“上天、入地、下海”是人类探索宇宙及地球奥

秘的长期梦想,是人类向地球和宇宙挑战的三大壮举。21世纪初,在人类向太空发展,实施新一轮太空计划,中国“神舟7号”载人航天飞船圆满成功,航天员完成太空行走的壮举之时,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面。可谓上天不易,“入地”更难。

地球是人类居住的唯一场所,为人类提供了生活必需的粮食、水、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在不断地进行探索。

20世纪70年代,美国COCORP计划的实施大大推动了深部探测进程,开辟了反射地震深部探测的新方法,探测精度和深度达到前所未有的程度,完成约60000 km的反射地震剖面,揭示了阿帕拉契亚造山带精细结构和大规模推覆构造,在造山带之下发现一系列油田,成为深部探测最成功的范例(Brown et al., 1986; Oliver, 1978; Oliver et al., 1983; COCORP, 1992)。此后,欧洲各国先后实施了大陆地壳的深地震反射探测计划,如,英国(BIRPS, 完成约20000 km)、法国(ECORP, 3-D France)、德国(DECOPE)、瑞士(NRP20)、意大利(CROP, 完成约10000 km)等国都制定了相应计划,长期实施(Klemperer et al., 1992; Matthews et al., 1987; Gee et al., 2006;)。欧洲各国联合开展了“欧洲探测计划”(EUROPROBE),完成横穿欧洲的地学断面(EGT)。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。美国、德国和俄罗斯在乌拉尔造山带联合实施的“URSEIS'95”反射地震探测计划,首次发现了残留山根的古生代造山带,丰富了山根动力学理论。2000年在西伯利亚东北成矿带实施的反射地震剖面(2-DV)发现了地幔流体上涌通道,为下一步资源开发指出了目标。

近十年,世界主要发达国家都已经将“地壳探测”计划作为实现可持续发展的国家科技发展战略。加拿大1984-2003年实施的岩石圈探测计划(LITHOPROBE)证实,地球30亿年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,运用深地震反射剖面揭示了若干大型矿集区的深部控矿构造,使加拿大的地球科学研究走到世界的前列(Wilson, 2003; Clowes et al., 2005a)。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了强大的技术支撑。

不久前在挪威奥斯陆召开的三十三届国际地质大会, 从一个侧面反映了深部探测的国际发展趋势。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, 还广泛应用到资源与环境领域, 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。其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, 编制跨越欧洲到亚洲的地学断面。

钻探技术是地壳探测工程唯一有效的证实手段。1992 年在法国布雷斯斯特, 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。1996 年, 成立了国际大陆科学钻探计划(ICDP)组织机构, 中国是该组织发起国之一。大陆科学钻探实施 50 年来, 迄今为止已有 13 个国家实施了 22 口大于 4000 m 的科学深钻, 目前完成的超深钻(大于 8000 m)有前苏联的科拉(井深 12262 m; 使用 Uralmash 15000 型钻机)和德国的 KTB(井深 9101 m; 使用 KTB 型钻机)两口。美国已研制出液压顶驱组合式取心钻机 - DOSECC 型专用钻机, 利用该钻机已完成 4500 m 的科学深钻。我国在江苏省东海县超高压变质带内的科学钻探工程被列入国家“九五”重大科学工程, 成为近年来实施的 20 项国际大陆科学钻探项目中最深科学井(许志琴, 2004; 许志琴等, 2005)。瑞典、法国及加拿大等越来越多的国家均制定了科学钻探计划, 把大陆科学钻探作为国家优先研究领域给予重点发展。

运用大陆超深井开拓深层油气资源新领域取得过成功。前苏联在含油气盆地中打过超深钻, 开采了 75 个 6 km 以下的油藏。2003 年美国壳牌石油公司在墨西哥湾的外陆架实施一口 25000 英尺(7~8 km)的石油钻井。

自 1970 年以来, 在世界上实施的大陆科学钻探计划揭示了重要的无机生油信息。俄罗斯、瑞典等国的科学钻探已发现来自地幔的流(气)体, 并有油气的显示。德国 KTB(3434 m)也发现深源气, 揭示流体随着深度不是减少而是增加, 运移方式由裂隙运移转化为晶格内及颗粒边界运移, 随深度增加, H、He 和 CH₄ 气体含量也增加, 为流体来源于地幔提供了更多的证据。乌克兰第聂伯 - 顿涅茨盆地深钻 3100~4000 m 的前寒武系变质岩中意外发现 5 个大型生、储油层, 产量 2.19 百万吨工业油田。油气中含大量微量元素, Ni/V 比高; 微生物、细菌分析, 所谓生物标示分子连 ppm 级都达不到; 大量氦气(He)来源于深源(上地幔), 是随碳氢化合物、CO、烃类、氮等及深部流体带上。最近, 中国大陆科学钻探 3000 m 钻孔地下流体异常发现 H、He 和 CH₄ 气体含量随深度增加以及初步确定幔源气体的存在。围绕中国大陆科学钻探进行的区域地震层析剖面揭示钻孔附近的响水断裂和郯庐断裂为抵达地幔的超岩石圈断裂(或地幔断裂), 为来自地幔的流体提供了直接通道的可能。此外, 来源深部的无机成因的二氧化碳气藏(田)在郯庐断裂两侧的渤海湾、松辽、苏北和东海等含油气盆地均有分布。苏北黄桥二氧化碳气田是我国目前开发利用的最大气田之一, 在济阳拗陷已发现二氧化碳气藏 6 个, 探明储量一百余亿立方米。这些结果表明来源深部的气藏(或幔源烃)具有较大的勘探前景。上述发现使传统的生物成因油气观受到了严峻挑战, 而非生物成因油气研究成为了科学家关注的焦点。在生物物源相对贫乏的地下深处, 可以聚集巨量油气。实验和计算表明, 非生物成因油气不仅通过费托合成反应可以生成, 还可在热液等适当条件下(如 200~400℃, 50 MPa, 铁镍矿作催化剂), 通过碳酸溶液的加氢反应生成。洋中脊、大陆超基性岩和前寒武纪地盾等都可能满足上述条件。由于超壳流体上升, 携带大量热能, 加速油气的生成, 同时携带大量具有明显幔源特征的烃。因此, 幔源流体对烃类的生成具有重要影响。

地球物理学的基本体系和地球物理探测的工作原理绝大多数在 20 世纪 80 年代以前就逐渐认识了。然而, 由于现代制造技术、电子技术、材料技术、信息技术、通信技术、空间技术等相关领域的长足进步, 使得今天的地球物理探测技术向多功能化、智能化、网络化、多道化、遥测遥控化发展; 仪器指标如测量精度、分辨率、灵敏度、探测深度、抗干扰性能、可移动性能、野外数据采集效率、数据

质量等都发生了质的飞跃。近年来国外地球物理大型装备不断推陈出新,不断更新换代,超导技术被应用于地球物理装备,仪器电路的数字化则使仪器性能更稳定、测量精度更高。

在我国,世界上所有的重力、磁法、电法、地震、放射性、地温、测井、航空物探、海洋物探九大类物探方法和四十几个亚类方法都应用过。在深部探测方面,我国学者已经掌握了深部探测先进技术,引进了数量较多的国际一流仪器设备,在一些局部典型地域实验完成了多条高质量的探测剖面,取得了若干重要发现,积累了实际经验,得到国际同行的认可和赞许。

但是我国与国际先进国家相比仍存在较大差距。最大的差距是深部探测工作程度低,东部西部工作程度差距很大,探测精度低,深达地壳底部的精细的深地震反射剖面还很少,分布地域有限。另一个显著差距是缺乏贯穿中国大陆不同地质单元、不同造山带与盆地的控制性区域深反射精细探测长剖面,难以针对重大基础科学与资源环境效应问题开展综合解释研究。究其原因,一方面尚无专门的深部探测计划来系统地设计并组织实施,已完成的深部调查多是在配合特定的局部科研项目实施的,不仅分散,而且目标各异,方法单一。另一方面,资金投入严重不足,已有完成的深反射精细探测剖面长度短,难以完整跨越大的地质单元或造山带与盆地。从33届国际地质大会展示的成果说明,不用说北美,欧洲在深地震反射剖面技术的快速发展拉大了我国与国际一流水平的差距。

在地球物理仪器装备研制方面,20多年来(尤其是1986年原地质矿产部撤消物探局以来),我国既没有系统的规划,也没有组织有效的工作,地球物理重大装备长期依赖进口。如加拿大凤凰公司2005年推出V8多功能电法勘探系统,50%以上销量在中国。可以说,是中国巨大的市场需求养活了国外地球物理仪器公司,而他们又拿着从中国赚来的钱投入新一轮技术研发,如此循环,许多核心技术还对我国封锁。如基于旋转加速度计技术,澳大利亚BHP发展了重力梯度部分张量测量系统FALCON,美国Bell公司发展了全张量梯度测量系统Air-FTG。这两套系统的梯度仪均来自美国军方研究成果,属于出口管制产品,美国曾于2005年4月阻止了FALCON在中国的合作探矿。

我国科学钻探与固体矿床勘探钻机的最大深度为3000 m,为连云港黄海机械厂生产的HCR-8全液压岩芯钻机。目前我国科学钻探使用的钻机只能用

石油钻机经改装后代替,而石油钻机由于其转速低、钻进工艺简单,不适合科学钻探复杂地层的多工艺钻进方法。因此,有必要研制适合复杂地层取心钻进的多工艺钻进方法的深部钻探专用钻机。

因此,可以说我国已经完成深部探测先进技术装备引进和消化吸收阶段,需要进入区域长剖面实施和难点技术实验攻关阶段,研制具有自主知识产权的深部探测仪器装备,开展深部探测技术与实验研究,推动《地壳探测工程》实施,提高我国深部探测能力与研究程度、促进地球科学进步、解决资源环境重大问题,使深部探测能够带动我国国民经济建设、造福人类。

2 总体目标和主要研究任务

2.1 总体目标

为《地壳探测工程》做好关键技术准备,研制深部探测关键仪器装备,解决关键探测技术难点与核心技术集成,形成对固体地球深部层圈立体探测的技术体系;在不同景观、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实验、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热点,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;积聚优秀人才,形成若干技术体系的研究团队;完善《地壳探测工程》设计方案,推动国家立项。

2.2 主要研究任务

建立我国大陆电磁参数标准网、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,争取重要科学发现,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;研发具有自主知识产权的分布式自定位宽频地震勘探系统等仪器装备,引领深部探测重大科研装备的突

破, 使我国深部探测仪器装备部分占据国际领先地位, 推动地球资源探测领域科技进步; 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, 完善《地壳探测工程》的技术路线和实施方案, 推动国家立项论证。专项设立 9 个项目, 平行实施。

(1) 大陆电磁参数标准网实验研究。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磁结构“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 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的高精度区域电磁“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、幔三维电磁结构标准模型“格架”, 以及不同网度的壳、幔电磁三维结构模型, 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电磁结构标准模型奠定基础。

(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、华南成矿域等的关键部位, 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时空过程。

(3) 深部矿产资源立体探测及实验研究。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 30~40 km 深度范围和地壳浅部 3~5 km 深度范围的综合地球物理精细探测试验, 部署地壳表部 2000 m 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 3~5 km 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。

(4) 地壳全元素探测技术与实验示范。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, 采集各类代表性岩石和地表疏松物样品约 16000 件, 建立中国地壳表层物质 76 种元素基准值, 为下一步地壳物质成分探测提供基础参考数据; 发展地壳深部物质信息识别技术、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直接信息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-扬子地台走廊带、秦岭-阿拉善走廊带开展地壳物质联合探测实验与示范研究, 形成地壳物质探测技术体系和解释系统。

(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、重要的矿产资源集聚区的成矿背景、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 12000 m 以深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的研究水平; 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炸药安放到预定深度之目的。

(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, 开展大陆动力学数

值模拟的示范研究。

(7)岩石圈三维结构与动力学数值模拟。设计一个能够使用大规模实时观测数据和岩石学实验数据的并行计算软件平台,结合系统采集岩心进行岩石物理力学参数测试及实验研究,初步建立我国重点区域(首都圈、西南三江)岩石物性参数数据库;开展高温高压岩石力学实验,掌握不同温压条件下的岩石变形本构关系;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,定量化了解控制区与岩石圈变形的主要控制因素。在板块运动框架下计算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相关关系,提高对地质灾害的预测能力。

(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的支持。实现地壳探测计划的系统工程管理。

(9)深部探测关键仪器装备研制与实验。发挥多部门联合与多学科综合的优势,联合国内高校和研究院所有效资源,研发具有自主知识产权的深部探测关键仪器装备,包括地面电磁探测(SEP)系统、无缆自定位地震勘探系统、固定翼无人航磁探测系统、深部大陆科学钻探装备,建立深部探测关键仪器装备研发的野外实验检测与示范基地,为固体地球深部层圈立体探测、复杂地表条件和深部矿产资源勘探开发提供必要的仪器设备与技术支持。自主研发移动平台综合地球物理数据处理与集成系统,着重解决国家高度敏感数据的处理问题。推动相关基础研究和应用领域的发展,提升我国深部探测关

键仪器装备研发与自主国产化能力,培养专业人才,推动行业进步。

2.3 关键科技问题与创新性研究思路

(1)建立我国大陆电磁标准网、地球化学基准网,构建深部结构、组分探测的参考系:①建立全国电磁参数标准网:以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网度初步建立起全国电磁的标准格架,在华北地区建立 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网度的高精度区域电磁标准网,完成全国电磁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。②建立我国全元素地球化学丰度基准网:按照国际地球化学基准统一网度,覆盖我国大陆约500个基准点,依据国际地球化学基准分析精度与程序分析78种元素(自然元素)标准值,作为我国地球化学表层参数背景。以大华北为地球化学基准网实验区,形成地球化学基准技术体系。

(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:①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。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。②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。③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。④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、火山岩区岩和碳酸盐岩区反射地震数据采集技术及激发技术;陡起伏条件深地震反射采集与处理技术、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法组合,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、在复杂介质中安全钻进和取心的保证技术措施;提出万米超深科学钻探施工方案。

(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,设计一个能够使用大规模实时观测数据和岩石学实验数据的并行计算软件平台。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。模拟精度接近 3.0 km 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)深部探测关键仪器装备研制与实验:①建立移动平台综合地球物理数据处理与集成系统:建立开源和跨平台软件研发环境,在工业平台上迅速实现和检验新的学术理论和想法,采用 Qt 技术,实现与国外最新软件产品的插入式对接;借鉴、肢解和重建国外传统主流软件系统(简称 GMS 系统)和新一代软件系统(简称 MPS 系统),分别用于二维三维重磁震数据处理-正反演解释和钻孔约束条件下的地震数据多波随机正反演解释;扩展传统重磁数据处理软件系统功能,在 GX 开发环境下实现插入式对接,加强国内急需的移动平台(航载、船载、潜航和地面车载)数据处理功能,提高数据精度,为国家目标服务。②基于分布式自定位地震勘探无缆遥测长期观测技术,采集站彻底摆脱通讯电缆的束缚,解决分布式有缆地震仪不便于在山地等复杂地形地区进行地震勘探的难题;采集站具备单点多分量地震数据记录能力,为多波多分量地震勘探提供技术支持。③GPS 和高精度石英钟联用的时钟同步技术,解决多个分布式自定位遥测地震仪记录数据的高精度时间同步问题;采用 GPS 静态相对定位功能,实现地震数据采集站达到厘米级的自定位,为后续地震数据处理提供高精度的位置信息,免去常规地震勘探中相对繁琐的地质测量工作环节,提高工作效率,降低施工成本;分布式自定位地震仪采用“统一

放置、长期观测、集中回收”工作模式,实现地震数据一次观测,兼容地震反射、层析成像等多种勘探方法的研究。④多探头、数字化、智能化、轻便化、集成化、产品化,提升航磁数据处理和反演解释软件多参量,提升数据质量,拓宽工作比例尺,提升探测结果反映地质信息的水平和找矿效果,保障操作人员安全。⑤以技术为先导,以核心技术组合集成为出发点,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,通过实施深部钻探装备的研制,开展深部钻探自动化、智能化顶驱电驱动钻机的研究、仿生高寿命耐高温钻头研究、高强铝合金钻杆研究,通过示范与实验形成适用我国地质条件和背景的深部钻探装备。

(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。

3 技术路线与研究方法

3.1 技术路线

通过实施深部探测技术与实验研究专项,开展大地电磁场标准网建设、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 1000 米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;开展大陆科学钻探实验,验证地球物理探测结果,建立深部物理、化学标识,围绕重大科学难题和资源环境问题、争取新发现,开展万米科学钻探选址与技术方案论证,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;自主研发深部探测关键仪器装备,包括移动平台综合地球物理数据处理与集成系统、地面电磁勘探(SEP)系统、无缆自定位地震勘探系统、固定翼无人机航磁探测系统和深部大陆科学钻探装备,建立深

部探测关键仪器装备野外检测实验与示范基地；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。

专项以技术为先导，以核心技术组合集成为重点，自主研制深部探测仪器设备，通过示范与实验形成适用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《地壳探测工程》做好技术准备、人才储备和相关基地建设。

在结合矿产油气方面，积极推动与地方和企业的合作，密切结合矿产资源和油气勘查所需进行工作部署，促进产学研结合，鼓励机制创新。与中石油川庆公司的高密度高精度浅部地震勘探剖面结合，开展四川盆地和龙门山深浅结合的深反射地震勘探，揭示含油气盆地和地震活动带的深部构造背景；与大庆油田合作，拓宽深地震反射剖面覆盖范围，大幅度增强探测能力；与安徽省国土资源厅合作在长江中下游庐枞矿集区合作开展三维结构探测，提高矿集区立体探测程度，指导深部找矿；与江西省国土资源厅和地质矿产局合作，共同开展赣南、南岭成矿带深部探测，支撑找矿突破。

专项鼓励并开展实质性国际合作与交流。开展中-美 Texan 地震数据联合观测实验，组团参加国际相关会议，洽谈国际合作，在国际上宣传深部探测专项与地壳探测工程计划，扩大专项国际影响力。邀请国际知名的深部探测专家参与专项科学咨

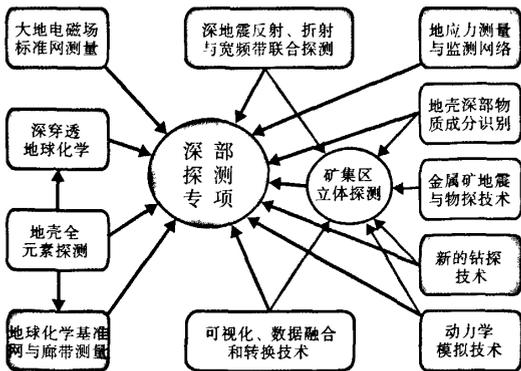


图 1 为培育地壳探测工程进行专项技术研发示意图
Fig. 1 Diagrammatic sketch of the crustal exploration project

询和指导研究，建立国际咨询专家小组，挖掘利用国际智力，提高专项研究的整体水平与国际竞争力。

3.2 研究方法

收集并总结深部探测方法技术，通过目标牵引、统筹规划，分阶段实施深部探测技术与实验研究，研制具有自主知识产权的深部探测仪器装备，在实验探测研究中发展方法技术，集成深部探测的有效技术组合。主要研究方法包括：

(1)全国层次电磁参数标准网：首先开展构建高精度区域大地电磁场“标准点”观测网，以及标定、同化原有大地电磁信息的方法、技术研究；在此基础上，完成覆盖全国的I级精度区域大地电磁场“标准点”观测网控制格架，约 2°×2°网度(剔除少数确实不能进入的地方)的观测，研究、建立中国大陆壳、幔三维电磁“标准模型”格架；并通过华北试验区示范研究，建立覆盖华北地区(1°×1°)网度，精度为II级的区域大地电磁场“标准点”观测网，标定及同化原有大地电磁信息并结合“标准网”观测数据，构建华北试验区电磁三维数据体，形成试验区壳、幔三维电磁结构“标准模型”，并开展大区域岩石圈尺度综合性成像技术和解译方法预研究，为讨论中国大陆成矿动力学机制及油气成藏的深部动力学背景提供依据。

全国地球化学基准网：按照全球地球化学基准网格，每个格子为 160×160 km²，建立中国出露地壳 76 种元素基准值，包括涵盖各大地质构造单元沉积盖层与结晶基底，不同时代火成岩、沉积岩和变质岩主要岩类 76 元素基准值；20000 个样品。盆地等覆盖区的疏松物，涵盖不同景观(荒漠戈壁、森林草原、冲积平原、黄土、红土)地区的土壤、水系沉积物、泛滥平原沉积物 76 种元素基准值；8000 个样品。

(2)区域层次实验选择典型剖面 and 不同地形地貌条件，实验当前最先进的三种地震方法，包括“近垂直深反射地震剖面法”、“宽角反射与折射地震剖面法”和“宽频带数字地震移动台站”，配合进行大地电磁测深，进行深部地球物理综合探测、数据处理与构造解释试验研究。选择不同构造单元和关键部位，开展地幔层析成像，揭示不同深度结构图像与大陆动力学过程。

(3)重点矿集区选择紧缺矿产成矿区带：采取以地球物理探测为主的多层次、多学科综合研究的技术路线。

第一层次：成矿带地壳 30 ~ 40 km 综合探测试

验, 揭示成矿带形成的深部构造背景、动力学过程及对大型矿集区形成的制约。以跨过典型矿集区的地质廊带为研究对象, 对地质廊带实施综合地球物理探测, 构建地质廊带 2D 地质模型, 分析地壳结构特征和动力学过程留下的痕迹, 结合区域构造、岩石和成矿规律, 综合分析成矿带深部构造背景, 认识矿集区形成的动力学要素, 预测新的矿集区。

第二层次: 矿集区浅表 3~5 km 的立体探测。揭示矿集区结构框架和主要容矿、控矿构造的深部分布, 预测深部成矿潜力。以穿过矿集区关键成矿单元的若干地质剖面为主要探测研究对象, 实施以反射地震、重震联合反演、重磁 2D 反演为主要的综合探测和解释, 建立矿集区骨架剖面 2D 模型。用骨架剖面为约束, 用区域重磁位场三维反演为主要技术, 构建矿集区三维构造模型, 认识成矿系统(源-运-储)形成机制。结合矿集区成矿、控矿模型, 开展深部成矿预测, 并实施钻探验证。

(4)地壳全元素探测技术与实验示范: 使用 HR-ICP-MS 与 ICP-MS/AES 和 XRF 为主的十余种配套分析方法, 实现地壳物质全元素分析; 使用元素赋存相态分离提取与分析技术、微米精度筛分技术、矿物成分的电子探针分析测试技术, 实现对物质成分形态的认识; 在不同温(T)、压(P)条件下, 地壳各结构层组成岩石地震波速的精确实验测定, 综合深源包体、壳源岩浆源区地球化学示踪研究成果, 建立地壳结构-岩石组成-地球化学模型及海量地球化学数据库。

(5)大陆科学钻探选址与钻探实验: 通过野外调研、大比例尺构造剖面 and 构造地质填图, 从宏观上查明构造带、岩浆岩带、矿集区的空间展布; 地球物理探测, 查明构造-岩浆岩-成矿带深部变化特点, 为钻孔的布设提供依据; 预导孔的实施, 验证地球物理成果, 获取不同地质条件和不同钻探要求(斜孔或直立+水平孔)的各种地质、地球物理和钻探技术参数, 为深孔钻探选区、选址提供依据; 综合地质地球物理研究, 完成深钻选区和选址。开展 12000m 以深超深孔钻探技术设计与论证。

(6)地应力测量与应力应变监测实验: 通过水压致裂与应力解除原地应力测试技术现场试验对比、应力应变连续监测技术的现场试验对比、深孔水压致裂地应力测试、深井综合观测、岩石力学实验, 建立北京地区综合实验观测站和青藏高原东南缘地区地应力监测网络; 以滑动拟合法为技术主线, 利用震源机制解资料、断层滑动资料、跨断层监测资料

及 GPS 形变观测资料等, 求解构造应力张量。

(7)岩石圈三维结构与动力学模拟: 着重建立一个功能强大、运行可靠的专门用来模拟中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系的精细数值模拟实验平台。利用有限元方法, 结合目前国际上先进的大规模和超大规模数值计算算法, 在现有研究工作基础上, 整合和开发一个三维有限元大规模并行数值模拟平台系统; 专门针对壳-岩石圈地幔-软流圈地幔和上地幔演化涉及到的牛顿流体(地幔)与非牛顿流体(地壳)方程、温度场(能量方程)、壳幔热化学演化方程、质量守恒方程等强耦合核心科学问题, 开展中国大陆深部地幔对流与岩石圈耦合关系的精细数值模拟实验。

(8)深部探测数据管理相关技术研发: 通过综合研究不同技术方法和探测手段得到的数据资料与研究成果, 探讨中国大陆地壳中生代以来的结构框架与演化历史, 初步建立起我国大陆地壳和重要区段的精细构造框架和演化过程。应用多源信息主体数据库建设技术, 解决深部探测采集的地球物理、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, 建立必要的数据库管理中心; 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。建立地壳探测工程的数据中心、技术支撑与实验体系, 培育地壳探测工程的野外实验基地, 实现地壳探测技术装备的集中管理、综合配置和资源共享。开展国际合作与学术交流, 培养具有全球视野的地壳探测技术人才。进行地壳探测系统工程研究, 对地壳探测工程计划的培育性专项进行进度与质量管理, 完善地壳探测工程, 形成地壳探测工程的综合管理科学体系。

(9)深部探测关键仪器装备研制与实验: 以技术为先导, 以核心技术组合集成为出发点, 充分消化、吸收国内外现有仪器设备的优点与特性, 通过借鉴、肢解、重建与扩展, 进行仪器设备系统的数字化、智能化、轻量化、集成化与产品化, 并根据我国实际进行对比观测、模拟、调试、对接与系统集成; 以无缆自定位地震勘探系统、地面电磁探测(SEP)系统、固定翼无人航磁探测系统、深部大陆科学钻探装备等仪器设备的研制为主体, 建立部件筛选、电气检测、野外环境模拟、仪器工艺等设计、加工与检测环境; 建立移动平台综合地球物理数据

处理与集成系统,着重解决国家高度敏感数据的处理问题;建设深部探测关键地质地球物理仪器装备的综合野外实验与检测基地;建设野外基地的数字化仿真平台,为地学高层次人才培养提供野外工作示范。

4 工作部署与进度安排

4.1 专项工作总体部署方案

4.1.1 部署原则

①以技术为先导,以集成为重点,以解决科学、资源环境问题为出发点,部署研究任务。②联合探测,相互补充,实现不同层次、不同尺度、不同精度的探测空间综合,形成各具地质特色的探测试验基地。③以实验示范为突破口,点线结合,区域展开,形成若干深部探测技术体系。④坚持顶层设计、高端综合的集成路线,实现技术组合创新、重大科学发现并举。

4.1.2 总体部署

专项总体部署方案:总体部署“两网,两区,四带,多点”的深部探测实验;以深部探测实验目标为

需求,引进与自主研发深部探测关键仪器装备,建立深部探测技术方法体系与实验示范基地。“两网”:全国电磁参数标准网、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(铬铁矿矿集区)、腾冲火山、长江中下游和南岭矿集区、南北中国板块汇聚边界等。

(1)“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。电磁参数标准网:建立覆盖全国网度为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的高精度区域电磁“标准点”观测网控制格架,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、幔三维电磁结构标准模型“格架”,以及 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网度的壳、幔电磁三维结构模型,为覆盖全国的高精度区域电磁“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电磁结构标准模型奠定基础。

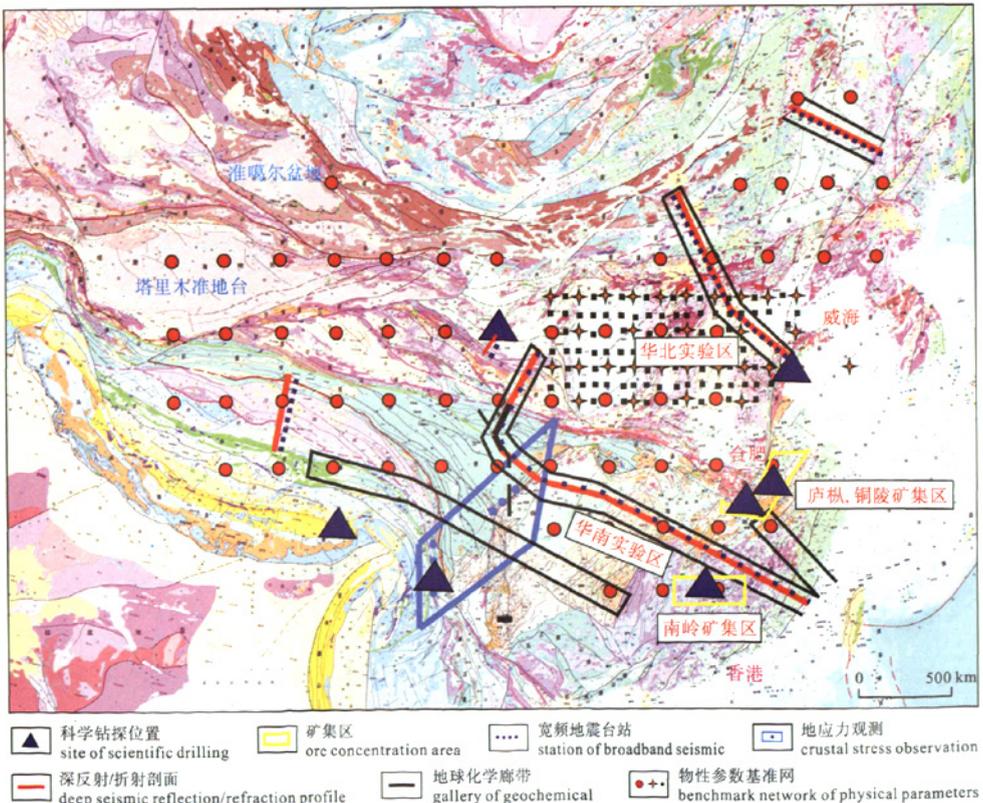


图2 专项“两网,两区,四带,多点”总体部署(据董树文等, 2009)

Fig. 2 “Two networks, two regions, four belts, multiple points” overall arrangements of SinoProbe(after Dong et al., 2009)

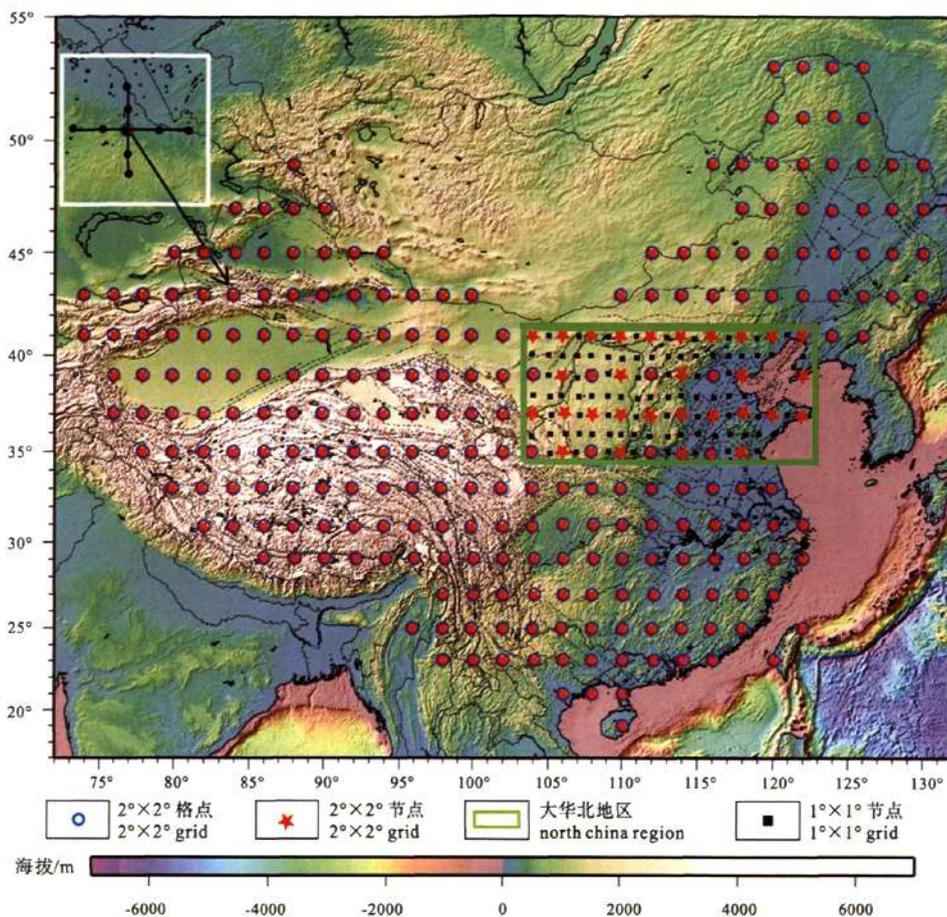


图 3 大地电磁场“标准点”观测网

Fig. 3 MT “standard point” observation network

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 km × 160 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

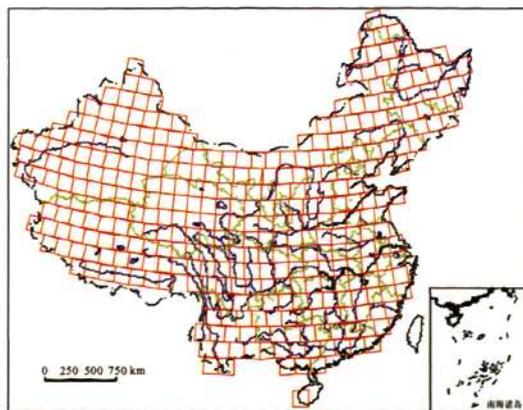


图 4 全国地球化学国际基准网(500 格)

Fig. 4 National geochemical international benchmarking network (500 cells)

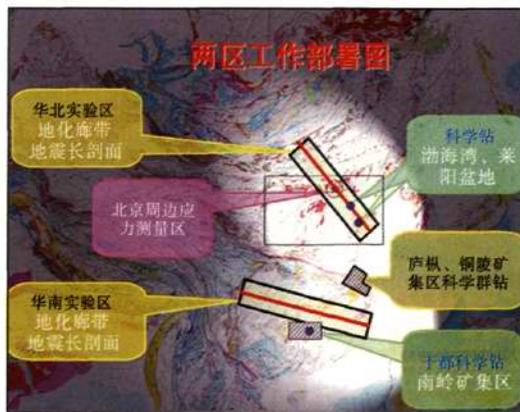


图 5 华北、华南“两区”综合探测试验区部署图

Fig. 5 North China and South China integrated detection test in the deployment plan

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。

(2)“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,以解决重大能源与矿产资源问题为目标,部署深部探测实验,集成技术方法体系。

重大科学与资源环境问题:①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,试验区由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,新型的环渤海经济圈、渤海新区等,涉及首都圈地壳稳定性与国土安全。环渤海油气盆地是现今地壳最薄、地幔隆起最高的地域,低热流值异常,出现罕见富金的油田,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。②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,形成世界第一的南岭成矿带钨、锡、钼、铋和重稀土矿产地,以及著名的长江中下游成矿带铁、铜、金、硫火山岩型-矽卡岩型矿产地。试验区将揭示华南深部是否存在古太平洋板块俯冲的证据,华夏与扬子陆块古缝合带、武夷山异常幔源花岗岩-成矿带、南岭花岗岩-成矿带的深部结构与控制因素,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等重大科学与资源环境问题;同时探测中国东部第二找矿空间,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。

(3)“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。

西秦岭中央造山带联合地震剖面,构成我国最长的穿越造山带的深地震反射剖面 and 精确地学断面,揭露三叠纪南北大陆碰撞带的精细地壳结构,穿过著名的白银矿集区,揭示深部精细结构,并为金川矿集区深部找矿提供深部背景。

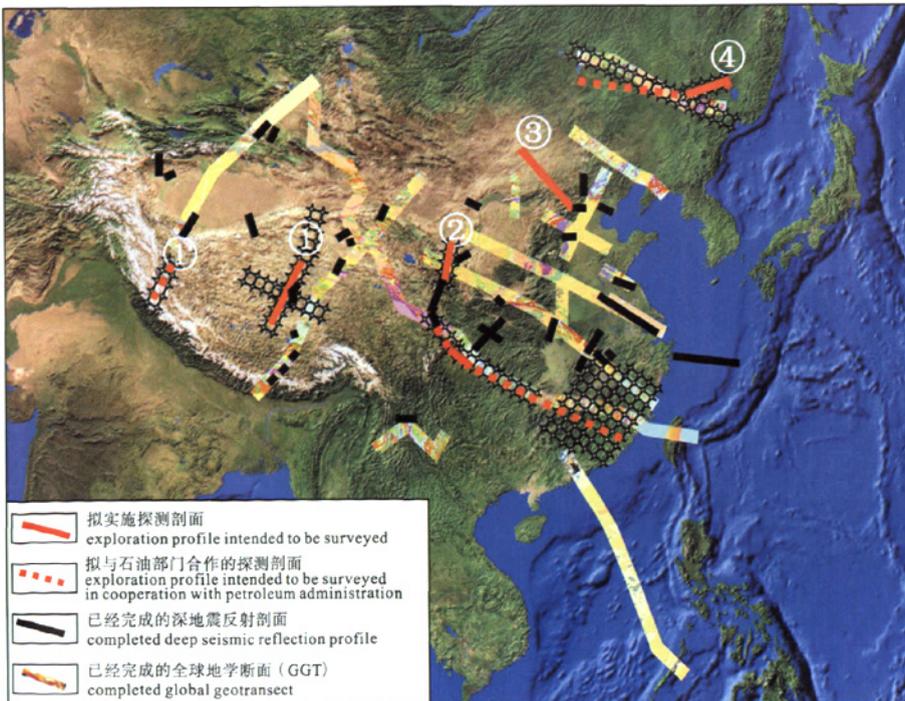


图6 “四带”部署示意图(高锐等, 2011)

Fig. 6 “Four belts” deployment diagram(Gao et al., 2011)

青藏高原腹地深地震探测剖面, 探讨巨厚地壳(70~80 km)反射地震探测技术, 尤其是下地壳和MOHO的信息获取, 同时了解羌塘盆地的油气远景和深部控制构造。

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实验室, 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油气盆地之一的地壳结构, 同时穿过大庆5 km科学深钻井位, 对探测结果实行标定。该项目将与大庆油田、大庆白垩纪科学钻探工程合作执行。

(4)“多点”以重大科学问题为目标, 围绕紧缺资源部署局部探测试验工作, 为更深入的探测和科学钻选址做好前期准备。

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, 以及大批的自然金属矿物和特殊结构的矿物。因此, 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, 值得深入研究。更有意义的是, 罗布莎是我国最大的铬铁矿床, 潜力巨大, 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。

4.2 项目设置和任务分解

专项围绕总体目标设立9个项目分别开展研究工作: (1)大陆电磁参数标准网实验研究; (2)深部探测技术实验与集成; (3)深部矿产资源立体探测及实验研究; (4)地壳全元素探测技术与实验示范; (5)大陆科学钻探选址与钻探实验; (6)地应力测量与监测技术实验研究; (7)岩石圈三维结构与动力学数值模拟; (8)深部探测综合集成与数据管理; (9)深部探测关键仪器装备研制与实验。各项目研究进度图见下页。

4.2.1 大陆电磁参数标准网实验研究

(1)区域电磁参数“标准网”观测技术集成: 在汇编、标定和同化中国大陆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观测, 取得在全国相对均匀分布的高精度大地电磁场数据, 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, 具体包括: 中国大陆区域大地电磁场“标准点”数据观测、处理与反演方法研

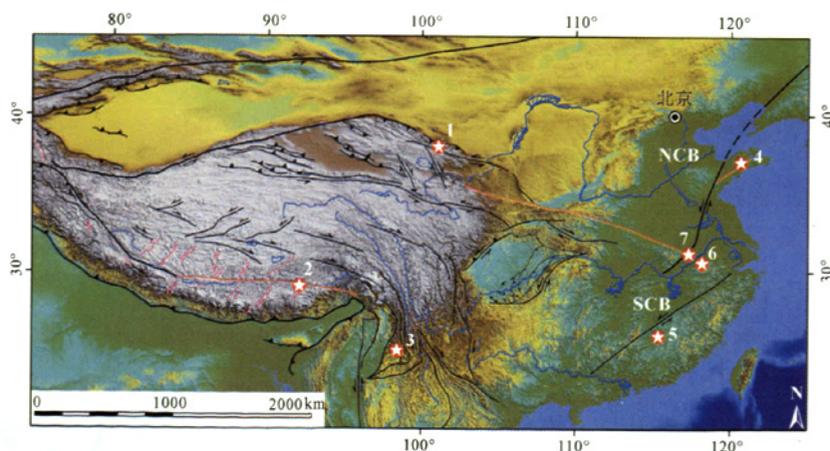


图7 “多点”探测部署示意图

Fig. 7 “Multi-point” probe deployment diagram

大陆科学钻探选址: 1-金川铜镍硫化物矿集区; 2-西藏罗布莎铬铁矿区; 3-云南腾冲火山-地热构造带; 4-山东莱阳盆地中国南北板块边界; 5-华南于都-赣县多金属矿集区; 6-铜陵矿集区; 7-庐枞矿集区

Sites of Continental Scientific Drilling: 1-Jinchuan copper-nickel sulfide ore concentration area; 2-Luobusha chromite ore district in Tibet; 3-Tengchong volcano-geothermal belt; 4-Laiyang Basin, boundary between South China plate and North China plate; 5-Yudou-Ganxian polymetallic ore concentration area in South China; 6-Tongling ore concentration area; 7-Luzong ore concentration area

究; 中国大陆区域大地电磁场老资料汇编、标定和同化技术研究。

(2)区域电磁参数“标准网”观测试验: 建立覆盖全国、网度为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的高精度区域电磁“标准点”观测网控制格架, 并以华北为基地, 在全国壳、幔三维电磁“标准模型格架”下构建华北($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)的壳、幔电磁三维结构标准模型, 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电磁结构基准模型, 及中国大陆地壳和上地幔三维综合物性建模与解译奠定基础; 具体研究任务包括: 中国大陆壳、幔三维电磁结构基准模型建模研究; 中国大陆区域重、磁场建模方法预研究。

4.2.2 深部探测技术实验与集成

(1)主动源探测技术实验与集成: 包括被国际称为深部探测先锋技术的“深地震反射剖面法”和骨干技术的“宽角反射与折射地震剖面法”等探测技术。实验剖面逐年在中国大陆青藏高原冻土带、西部造山带与前陆盆地、东北平原深层、华南山区结晶岩等不同复杂地质条件地带展开, 实验研究不同类型地区的探测技术。实验研究区域长剖面深反射与折射主动源联合探测的技术组合和数据约束处理解释新技术, 实验研究同时获取浅深地壳信息的高次叠加精细探测技术。2008年实施实验剖面 600 km(包括反射地震和折射地震), 5年实施实验剖面 3500 km。

(2)被动源探测技术实验与集成: 包括“宽频带数字地震移动台站法”和“大地电磁测深法”。实验剖面逐年青藏高原、中部山地、东南沿海等特殊地貌地带展开, 针对不同目标实验研究探测深部壳幔物性二维与三维精细变化的被动源探测技术。大致沿深地震反射剖面布设测点, 台站间距 3~5 km。2008年实施实验测点 220 个, 5年实施实验 780 测点。

(3)大尺度地幔成像技术实验与集成: 实验研究地幔非均匀性连续介质地球物理反演技术, 对地壳/地幔界面、岩石圈/软流圈界面和上地幔物质进行速度成像和密度成像研究。实验透视上地幔物性变化的可视技术。实验区域逐年在中国北方大陆及邻区展开。实验区约 4800 万 km^2 , 按 1:10 000 000 比例尺进行成像计算, 约有 5000 点, 每年完成试验 1000 点。

(4)探测技术集成与断面构造地球物理综合解释技术实验研究: 集成探测技术实验研究成果, 建立

可行的深部探测方法技术组合。沿探测剖面进行构造平衡剖面填绘。研究地壳断面地球物理与构造综合解释技术, 建立综合解释技术系统。基于地理信息系统平台, 提供自地表到深部数据融合分析的空间系统, 发展交互型构造地球物理互动解释技术。2008—2009年建立起数据空间融合与数据分析平台, 开展探测断面的构造解释。

4.2.3 深部矿产资源立体探测及实验研究

包括三个方面研究内容, 即: “南岭、长江中下游成矿带地壳结构与控矿构造探测试验”; “代表性矿集区‘第二找矿空间’立体探测实验”; “重要异常的钻探验证与金属垂向分布规律研究”。项目紧密围绕解决深部地壳结构和深部“第二找矿空间”控矿构造等关键问题, 从不同尺度、不同方面入手开展研究。

(1)南岭、长江中下游成矿带地壳结构与控矿构造探测实验。①南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验: 综合实验反射/折射地震、流动地震台网、大地电磁等技术, 探测以壳源岩浆成矿系统为特点的地壳结构的有效性。探测目标包括: 南岭成矿带的地壳结构及与两侧的地壳结构; 深部岩浆系统结构与浅部岩体空间形态; 岩浆起源深度及源区结构形态; 深部断裂系统及对岩浆流体的控制, 重要盆地的基底埋深、基底性质及结构形态等。②长江中下游成矿带地壳结构与深部过程探测实验: 综合实验反射/折射地震、流动地震台网、大地电磁等综合地球物理技术, 探测以幔源岩浆成矿系统为特点的地壳结构和上地幔结构的有效性。探测目标主要包括: 成矿带地壳结构及与大别和江南古陆的地壳结构; 地壳内结构与构造、岩浆系统结构, 如长江断裂带及主要边界断裂的深部形态, 壳内巨型滑脱带的空间形态, 壳内岩浆系统结构和上升动力学过程, 壳内流体通道等; 上地幔结构与动力学过程, 如, 壳幔结构、上地幔盖层结构, 岩浆源区性质及对金属类型的影响, 壳幔结构对岩浆流体系统的控制作用等。

(2)代表性矿集区“第二找矿空间”立体探测实验。①南岭于都—赣县矿集区立体探测实验与深部成矿模式: 通过系统部署高分辨率反射地震、大地电磁剖面(包括布设南北、东西十字剖面), 大比例尺重、磁测量和电磁法(CSAMT, TEM)面积测量, 实验研究在大面积花岗岩区探测矿集区 3~5 km 精细结构的方法技术组合。研究在大面积花岗岩区的地震采集技术(激发技术)、弱信号提取技术等。结合矿田构造和典型矿床解剖, 研究矿集区浅部(3~5 km)与

成矿有关岩体的空间形态、规模, 主要控矿断裂的空间分布; 系统研究石英脉型黑钨矿、矽卡岩型白钨矿、岩浆热液型锡多金属的成矿模式; 开展深部成矿、找矿信息的提取、分析和判别, 建立主要矿床类型的综合信息找矿模式, 开展深部成矿靶区优选, 并开展综合地球物理查证。②庐枞矿集区立体填图实验与深部成矿预测示范: 通过系统部署高分辨率反射地震、大地电磁剖面, 大比例尺重、磁测量和电磁法(CSAMT, TEM)面积测量, 实验研究在火山岩区开展三维立体填图的技术流程和集成。研究火山岩区高分辨率反射地震数据采集和处理技术, 如, 激发技术、静校技术、去噪技术、偏移技术等。结合矿田构造和典型矿床解剖, 研究盆地三维精细结构与主要控矿构造, 如, 火山岩盆地形态、基底, 盆地内部主要构造、岩性界面(如硅质岩), 火山机构及深部次火山岩体的空间分布; 开展火山岩盆地构造-岩相填图研究; 开展盆地各火山旋回的岩石学、地球化学、年代学及成矿特征研究; 开展典型矿床解剖研究, 在典型矿床上开展综合地球物理剖面研究, 建立综合找矿模型, 总结深部成矿、控矿规律, 开展深部成矿预测。③铜陵矿集区立体填图与深部控矿层探测实验: 通过系统部署高分辨率反射地震、大地电磁剖面, 大比例尺重、磁测量和电磁

法(CSAMT, TEM)面积测量, 实验研究在大面积灰岩地区和复杂起伏地形条件, 开展立体填图的技术流程和技术集成。研究灰岩地区地震采集技术和处理解释技术, 重点包括强干扰区去噪技术、复杂地表条件的静校技术和偏移成像技术等。结合矿田构造和典型矿床解剖, 实验研究浅部主要容矿地层(五通-黄龙组、奥陶系)、断裂的空间分布; 与成矿有关岩体(侵入岩、次火山岩)的空间形态、规模; 矿集区成矿系统的类型, 时间、空间分布, 各时期成矿系统之间的叠加与改造关系研究。重点包括海西期喷流沉积成矿系统能否独立成矿? 成矿的构造、岩相古地理环境。探索奥陶系灰岩深部成矿的可能性及成矿模式; 建立各类矿床的成矿模式, 开展矿集区综合成矿信息的提取, 尤其是深部示弱矿信息的研究和识别, 根据模式类比, 进行深部成矿预测, 圈定深部找矿靶区。

(3)重要异常的钻探验证与金属垂向分布规律研究。在三个代表性矿集区综合地球物理探测、立体填图和深部成矿预测研究的基础上, 选择深部成矿可能性大, 具有区域成矿代表性的重要异常, 实施1~2口2000~3000 m参数钻探, 直接验证综合地球物理异常, 揭示异常性质; 研究矿集区金属垂向分布规律。开展岩石物性研究, 建立异常解释的“标

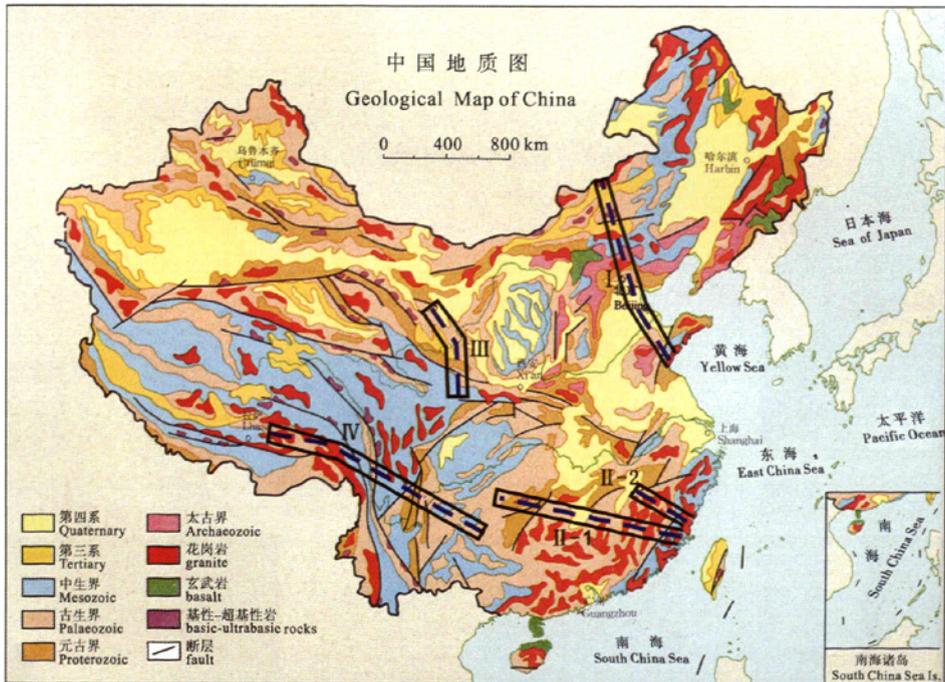


图 8 地球化学走廊分布图
Fig. 8 Distribution of geochemical corridors

尺”，并开展综合地球物理测井研究。

4.2.4 地壳全元素探测技术与实验示范

分为三个层次开展工作：技术研制、基准建立、实验与示范。

(1)技术研制：突破地壳物质探测的几项关键技术。完善 76 种元素配套分析方案和难分析样品的精确分析技术，重点是突破含碳质岩石和有机物土壤的贵金属(金、铂族)元素精确分析技术。建立 76 种元素的分析配套方案是以现代先进的大型分析仪器等离子体质谱仪(ICP-MS)，等离子体光学发射光谱仪(ICP-OES)和 X 射线荧光光谱仪(XRF)为主，配合其他多种专用分析仪器及技术而组成的方法体系。开发基于 GIS 的海量地球化学数据库平台，采用 Window XP 为操作平台、以 ArcGIS 为开发工具、集 Visual C++6.0 和 Access8.0 数据库的优势，采用软件工程的结构化设计模式，在系统立足整体的同时使各子系统具有相对的独立性，以达到系统设计模块的完备性和稳定性、功能的实用性、操作的可视化之目的。

(2)基准值建立：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。按照全球地球化学基准网格，每个网格大小 160 km×160 km，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。

(3)实验与示范：选择穿越不同大地构造单元和重要成矿区带的 4 个走廊带进行试验与示范，(I)华北地台 - 兴蒙造山带(东海县大陆科学钻 - 胜利油田 - 燕山造山带 - 兴蒙造山带)走廊带，长度约 1500 km；(II)华南造山带 - 扬子地台走廊带(武夷山 - 南岭 - 扬子地台走廊带，1000 km，武夷山 - 德兴 - 九江，500 km)；(III)西秦岭 - 阿拉善走廊带，穿过白银厂和金川矿区，长度 800 km；(IV)扬子地台西南缘 - 三江 - 冈底斯走廊带，1000 km。精确探测走廊带内沉积盖层与结晶基底，不同时代岩浆岩、沉积岩和变质岩 76 元素的含量和变化，研究不同大地构造单元元素时空分布不均一性对矿产资源的制约因素及其动力学背景和演化历史。

(4)对 4 个走廊带的物质成分、成矿条件、板块相互作用的物质表现进行综合研究与建模。对南岭 - 武夷山走廊带，进行有关地质、地球化学、地球物理资料收集与购买，并进行实地野外踏勘和采样点布设，2009 年之前完成全部采样工作，预计走廊

带总长度约 700 km，宽度 50 km，总样品量约 500 件。其它 3 条走廊带的工作安排在 2010—2012 年陆续实施。

4.2.5 大陆科学钻探选址与钻探实验

选择西藏罗布莎铬铁矿集区、山东莱阳盆地南/北中国板块边界、云南腾冲构造/岩浆成矿带、甘肃川铜镍硫化物矿集区、庐江 - 枞阳火山岩盆地、安徽铜陵矿集区和南岭于都 - 赣县矿集区的重要剖面重要部位，开展地表地质调查、大比例尺科研填图、地震层析成像和大地电磁测深及关键科学问题研究，进行中国大陆科学钻探工程选址和预研究；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。收集国内外科学钻探和超深孔钻探技术的相关材料和采用的钻探技术方案，开展部分关键技术的实验室研究与应用检验，编制 12000 m 超深井钻探技术方案。

4.2.6 地应力测量与监测技术实验研究

研制深孔水压致裂地应力测量井下数据自动记录和采集系统，研制深孔水压致裂地应力测量井下定向系统。完善千米深孔水压致裂应力测量系统和深孔应力解除测量系统；完成原地应力测量数据自动计算分析软件系统研制；对压磁、压容、体积式不同类型的应力应变监测系统开展对比试验，研发深井综合观测技术并实现同一钻孔多种参数综合观测；建立首都圈深孔综合观测试验站和青藏高原东南缘应力应变综合监测网，开展利用震源机制解反演构造(偏)应力张量优化算法的研究，完善利用跨断层定点、GPS 形变观测资料确定构造应力张量的计算方法，建立全国地应力数据库。开展重点区带的构造应力场及其演化规律的综合分析研究工作，编写地应力测量与监测技术方法指南。

4.2.7 岩石圈三维结构与动力学数值模拟

(1)建立考虑耦合过程的高性能计算的平台，编制并行计算有限元程序和实现科学计算结果可视化分析，并在典型地区开展计算研究。建立和完善典型区域构造热演化和动力学演化耦合的区域构造演化数值试验模型。通过合理运用非结构化网格加密技术，建立千米尺度平均空间分辨率的区域网格模型。采用大规模并行有限元数值计算模拟方法，通过严谨的科学建模，基于变时间尺度，对典型地区的各种可能动力学问题，进行大规模数值模拟试验分析。

(2)通过试验室和野外岩石测试和研究，采集并

确定目标区常温、高、超高温高压条件下的岩石力学参数(岩石的常规及高温高压力学参数、动静力学强度、岩石的组成、密度、孔隙度、渗透率、地震波特性和电、磁、热等物理特性)及岩石变形特征及变形本构关系,重点覆盖我国首都圈、西南三江等区域的主要构造单元和岩石类型,建立三维岩石物性数据库,为大型数值模拟提供第一手数据。

4.2.8 深部探测系统集成与数据管理

(1)大陆地壳的结构框架与演化探讨:综合分析、处理和集成深部探测与实验研究所取得的各类地球物理、地质构造和地球化学数据,结合以往研究积累,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和岩石圈四维结构概念模型,以重塑主要构造单元的演化过程。

(2)探测数据集成与共享:数据中心是由数据库平台、服务平台、技术支持和管理平台组成的多层综合系统。通过数据层的多源信息数据库建设技术,进行主体数据库建设和分布式数据管理,实现数据的集成和存储。在此基础上实现地壳探测所采集的地球物理、地球化学、地应力及地质勘查等多源数据的空间服务功能以及目录服务、数据共享服务。通过技术层面的开发应用,实现对探测数据资源和信息的传输、管理、更新、三维立体显示、空间数据检索服务功能提供保障。通过门户网站的建设最终实现探测数据集成和管理。

(3)探测技术支撑与实验基地构建: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、技术支撑与实验基地。

(4)地壳探测系统工程研究:开展国际合作,培养具有全球视野的地壳探测技术人才,调研国际地球探测计划和工程的科学与技术体系、研究进展和

探测成果,完善我国的地壳探测工程计划,促进地壳探测工程计划的实施,实现我国地壳探测计划系统工程的科学管理。进行专项的日常管理,并组织各项项目的立项、检查、中期评估、成果评审与验收。综合集成专项研究成果,在各项项目成果报告基础上编写专项成果报告并验收。

4.2.9 深部探测关键仪器装备研制与实验

研发具有自主知识产权的无缆自定位地震勘探系统、地面电磁勘探(SEP)系统、固定翼无人机航磁勘探系统、深部大陆科学钻探装备、移动平台综合地球物理数据处理与集成系统等;进行关键仪器设备的综合集成与野外示范,引领深部探测重大科研装备的突破;为《地壳探测工程》提供技术装备基础,推动地球资源与环境探测领域科技进步。

(1)移动平台综合地球物理数据处理与集成系统:为尽快缩小与国外的差距,找准和踏住国外软件研发前端的巨人肩膀,肢解已获取的软件系统,领会软件工程师设计的精髓,在新的软件开发平台上改写和重建新的软件系统,为科研和生产提供有力支持。尤其是,针对国外产品售后服务限制,对于敏感数据,如国家保密级重力数据,处理过程中出现的问题,能够提供直接支持。

(2)地面电磁探测(SEP)系统研制:采用可控源音频大地电磁(CSAMT)和大地电磁(MT)一体化的综合观测技术,利用观测得到宽频带(8192 Hz - 128 s)电磁场来构建(通过反演和偏移成像)深度 5000 m 范围内的电导率结构,为寻找埋深小于 2000 m 的深部矿、隐伏矿提供技术支撑,打破找矿仪器依赖进口的局面,引领国内电磁找矿理论和应用技术的发展。

(3)固定翼无人机航磁勘探系统研制:通过对核心器件与配套软件的研制和开发,完成能装载在轻小飞机上的新型高精度多探头航磁梯度测量系统的实用样机,成为我国具有完全自主知识产权的深部矿产资源勘探新装备。针对系统核心传感器、轻小型(无人机)化、高精度数据解算、强抗磁干扰等关键技术,进行系统集成攻关,形成一套完整的探测系统和地质勘查方法体系,具备实际操作能力,在主要技术指标达到国内领先水平,部分指标到达国际先进水平,将我国现有航磁梯度探测系统的能力提升一大步。

(4)无缆自定位地震勘探系统研制:针对地球深部目标探测需求,自主研发无缆自定位地震勘探系统。重点研发大容量、宽频带、三分量无缆地震数据采集系统,包括地震数据记录单元、野外现场数

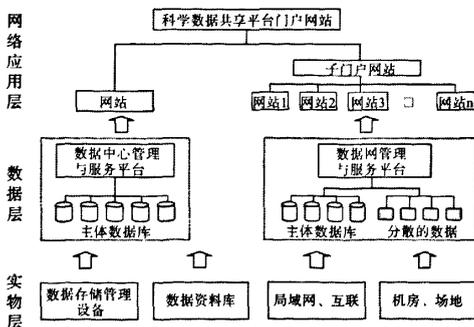


图 9 数据中心结构框架图

Fig. 9 Structural framework of the map data centers

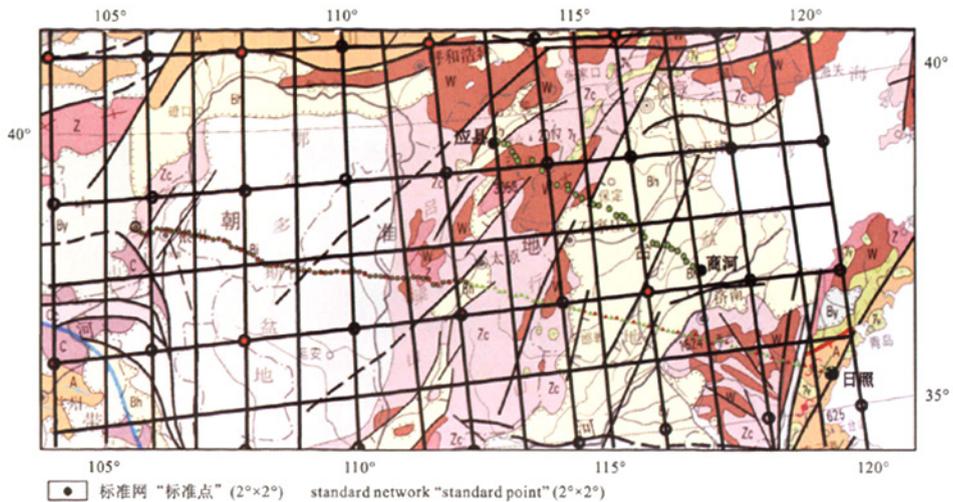


图 10 2008 年大华北地区电磁标准网观测控制格点分布图

Fig. 10 Distribution of controlled grids for electromagnetic standard network observation in North China region in 2008

据分析单元、室内数据回收单元、可控震源相关叠加器、GPS 同步时标以及采集站高精度定位系统等功能模块。

(5)深部大陆科学钻探装备研制: 研发深部探测计划的先进钻探机具新体系, 在深部探测钻机整机设计理论及配套装备先进制造技术方面取得长足进展, 在数字化设计、智能化与自动化钻进装备领域有所突破, 抢占钻井技术装备的制高点。全面提升钻井信息化、智能化及自动化程度, 同时在钻井方式上有新的发展, 最终形成我国自主知识产权的钻井装备科学理论体系和先进装备, 使钻井装备开发水平达到国际先进水平, 有力促进重大地球科学新发现, 促进矿产资源储量的快速增加。

(6)深部探测关键仪器装备野外实验与示范: 选定野外实验靶区, 开展无缆自定位地震勘探系统、地面电磁勘探(SEP)系统和固定翼无人机航磁探测系统野外性能对比实验, 检验系统的有效性和可用性, 并通过钻井验证; 建设地球探测仪器装备室内测试平台和野外测试基地。

5 预期成果及效益分析

(1)通过对深部探测技术进行综合集成和试验研究, 建立的有效的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)仪器设备的自主研发将为地壳探测工程的顺利实施提供装备保障。研制的 3 种地球物理仪器和 1 套移动平台地球物理综合处理与集成系统是地下资源与环境探测的关键仪器装备, 有关成果将为研制其他类型的地球物理仪器提供示范性的经验积累。对深部探测钻机的研究开发, 可以填补我国在超深孔、特深孔勘探钻机研发的空白, 全面提升钻机整机及钻机的关键部件的设计和加工水平, 培育一批钻机开发应用方面的人才队伍, 赶超世界先进水平。

(4)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。科学钻探直接揭示深部结构与组分, 获取重大科学发现。

参考文献:

- 董树文, 李廷栋. 2009. SinoProbe ——中国深部探测实验[J]. 地质学报, 83(7): 895-909.
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 吕庆田, 吴珍汉, 陈宣华, 周琦, 刘刚, 刘志强, 梅琳. 2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述[J]. 地质学报, 84(6): 743-770.

- 高锐, 王海燕, 张忠杰, 李秋生, 陈凌, 金胜, 刘国兴, 贺日政, 张贵宾, 卢占武, 曾令森, 许惠平. 2011. 切开地壳上地幔, 揭露大陆深部结构与资源环境效应——深部探测技术实验与集成(SinoProbe-02)项目简介与关键科学问题[J]. 地球学报, 32(S1): 34-48.
- 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[J]. 中国地质, 32(2): 177-182.
- 许志琴. 2004. 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, 20(1): 1-8.

References:

- BLUNDELL D, FREEMAN R, MUELLER E. 1992. A Continent Revealed The European Geotraverse[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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[J]. Science, 274: 220-221.
- BROWN L, BARAZANGI M, KAUFMAN S. 1986. The first decade of COCORP: 1974-1984[C].// Reflection Profiling: A Global Perspective, Barazangi M and Brown L, eds, Geodynamics Series, 13: 107-120, American Geophysical Union, Washington, D C.
- CARBONELL R, PÉREZ-ESTAUN A, GALART J, DIAZ J, KASHUBIN S, MECHIE J, STADTLANDER R, SCHULZE A, KNAPP J H, MOROZOV A. 1996. Crustal root beneath the Urals: wide-angle seismic evidence[J]. 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[M]. Springer, Berlin.743-770.
- COCORP. 1992. Tibetan trek: A time for reflection: COCORP targets 'last frontier'[C]. AAPG Explorer, 1: 15-19.
- CLOWES R M. 2005. The Evolution of a Continent Revealed, 2002-03 to 2004-05 Final Report for NSERC[R].
- CLOWES R M, PHILIP T C HAMMER, GABRIELA FERNANDEZ VIEJO, WELFORD J KIM. 2005a. Lithospheric structure in northwestern Canada from LITHOPROBE seismic refraction and related studies: a synthesis[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 42: 1277-1293.
- CLOWES R M, LI C. 2005b. LITHOPROBE Celebratory Conference Oral and Poster Presentations[M]. LITHOPROBE Secretariat, University of British Columbia, Vancouver, Canada, E-Publication No.5, 2 CDs.
- DAVID S, WILLAM P, MARK Z. 2002. EarthScope: Acquisition, Construction, Integration and Facility Management[R]. A Collaborative Proposal to NSF.
- DAVID S, MIKE J, MARK Z. 2008. EarthScope Facility Operation and Maintenance[R]. Report to NSF.
- DEKORP Research Group. 1990. Results of deep-seismic reflection investigations in the Rhenish Massif[J]. Tectonophysics, 173: 507-515.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong. 2009. SinoProbe: the Exploration of the Deep Interior Beneath the Chinese Continent[J]. Acta Geologica Sinica, 83(7): 895-909.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, GAO Rui, LÜ Qing-tian, WU Zhen-han, CHEN Xuan-hua, ZHOU Qi, LIU Gang, LIU Zhi-qiang, MEI Lin. 2010. International Progress in Probing the Earth's Lithosphere and Deep Interior: A Review[J]. Acta Geologica Sinica, 84(6): 743-770(in Chinese with English abstract).
- EUROBRIDGE Working Group, EUROBRIDGE'95. 2001. Deep seismic profiling within the East European Craton[J]. Tectonophysics, 339: 153-175.
- 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[J]. Science, 274: 224-226.
- GAO Rui, WANG Hai-yan, ZHANG Zhong-jie, LI Qiu-sheng, CHEN Ling, JIN Sheng, LIU Guo-xing, HE Ri-zheng, ZHANG Gui-bin, LU Zhan-wu, ZENG Ling-sen, XU Hui-ping. 2011. "Cutting" the Crust and the Upper Mantle and Revealing the Deep Structure of the Continent with the Resource Effect: An Introduction to the Project SinoProbe-02 of Experimentation, Deep Probing Techniques and Integration and a Discussion on Key Science Problems[J]. Acta Geoscientia Sinica, 32(S1): 34-48.
- GEE D G, STEPHENSON R A. 2006. European Lithosphere Dynamics[M]. Geological Society, London, Memoirs, 32.
- KNAPP J H, STEER D N, BROWN L D, BERZIN R, SULEIMANOV A, STILLER M, LÜSCHEN 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[J]. Science, 274: 226-228.
- KLEMPERER S L, HOBBS R. 1992. The BIRPS Atlas[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- MATTHEWS D H, SMITH C. 1987. Deep seismic reflection profiling of the continental lithosphere[J]. Geophys. J. Roy. Astr. Soc.: 89.
- OLIVER J E. 1978. Exploration of the continental basement by seismic reflection profiling[J]. Nature, 275: 485-488.
- OLIVER J E, COOK F A, BROWN L D. 1983. COCORP and the continental crust. J Geophys[J]. Res., 88: 3329-3347.
- PIFFNER O A, LEHNER P. 1997. Deep structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20[M]. Basel, Boston, Berlin: Birkhauser.
- SCHMID S M. 1997. Integrated cross section and tectonic evolution of the Alps along the Eastern Traverse. In Piffner O A[M]. Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20, Birkhauser, 289-304.
- WILSON J. 2003. LITHOPROBE: Dancing Elephants & Floating Continents - The story of Canada beneath your feet[M]. Key Porter Books.
- XU Zhi-qin. 2004. The scientific goals and investigation of the Chinese continental scientific drilling project[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, ZHANG Ze-ming, LIU Fu-lai, YANG Wen-cai, JIN Zhen-min, WANG Ru-cheng, LUO Li-qiang, HUANG Li, DONG Hai-liang. 2005. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project[J]. Geology in China, 32(2): 177-182(in Chinese with English abstract).

e)

(负责人:董树文研究员 技术负责人:李廷栋院士)

| 项目五 (SinoProbe-05) 大陆科学钻探选址与钻探实验 负责人:杨经绥研究员 承担单位:中国地质科学院地质研究所 | | 项目六 (SinoProbe-06) 地应力测量与监测技术实验研究 负责人:陈群策研究员、李宏研究员 承担单位:中国地质科学院地质力学研究所 | | 项目七 (SinoProbe-07) 岩石圈三维结构与动力学数值模拟 负责人:石耀霖院士 承担单位:中国科学院研究生院 | | 项目八 (SinoProbe-08) 深部探测综合集成与数据管理 负责人:董树文研究员 承担单位:中国地质科学院 | | 项目九 (SinoProbe-09) 深部探测关键仪器装备研制与实验 负责人:黄大年教授 承担单位:吉林大学 | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|---|---|--|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|--|-------------------------------------|---|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 金川铜镍硫化物矿集区科学钻探选址预研究 (SinoProbe-05-01) | 西藏罗布莎铬铁矿科学钻探选址预研究 (SinoProbe-05-02) | 云南腾冲火山“地热”构造带科学钻探选址预研究 (SinoProbe-05-03) | 山东莱阳盆地南北板块边界科学钻探选址预研究 (SinoProbe-05-04) | 东部矿集区科学钻探选址预研究 (SinoProbe-05-05) | 科学超深井钻探技术方案预研究 (SinoProbe-05-06) | 大陆科学钻探选址与钻探实验综合研究 (SinoProbe-05-07) | 地壳深部探测高性能数值模拟平台建设 (SinoProbe-07-01) | 岩石物理性质测试与实验研究 (SinoProbe-07-02) | 中国大陆主要岩石类型物性参数测试与数据库构建 (SinoProbe-07-03) | 中国大陆岩石圈热状态和流变性质研究 (SinoProbe-07-04) | 基于高性能数值模拟的华北克拉通及青藏高原动力学研究 (SinoProbe-07-05) | 深部探测数据集成与共享 (SinoProbe-08-02) | 探测技术支撑与实验基地建设 (SinoProbe-08-03) | 地壳探测系统工程研究 (SinoProbe-08-04) | 移动平台综合地球物理数据处理与集成系统 (SinoProbe-09-01) | 地面电磁勘探(SEP)系统研制 (SinoProbe-09-02) | 固定翼无人机航磁探测系统研制 (SinoProbe-09-03) | 无缆自定位地震勘探系统研制 (SinoProbe-09-04) | 深部大陆科学钻探装备研制 (SinoProbe-09-05) | 深部探测关键仪器装备野外实验与示范 (SinoProbe-09-06) |
| 汤中立 | 杨经绥 | 刘嘉麒 戚学祥 | 张泽明 吴元宝 | 吴才来 薛怀民 | 张金昌 | 许志琴 | 张怀 | 龙长兴 | 王红才 | 周元泽 | 石耀霖 | 管焯 | 郑元 李英康 | 陈宣华 吴珍汉 | 黄大年 | 底青云 | 郭子祺 | 林君 | 孙友宏 | 徐学纯 |
| 长安大学 | 中国地质科学院地质研究所 | 中国科学院地质与地球物理研究所 | 中国地质科学院地质研究所 | 中国地质科学院地质研究所 | 中国地质科学院地质研究所 | 中国地质科学院地质研究所 | 中国科学院研究生院 | 中国地质科学院地质力学研究所 | 中国地质科学院地质力学研究所 | 中国科学院研究生院 | 中国科学院研究生院 | 中国地质科学院 | 中国地质科学院 | 中国地质科学院 | 吉林大学 | 中国科学院地质与地球物理研究所 | 中国科学院遥感所 | 吉林大学 | 吉林大学 | 吉林大学 |