

董树文,李廷栋,陈宣华等.我国深部探测技术与实验研究进展综述.地球物理学报,2012,55(12):3884-3901,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.002.

Dong S W, Li T D, Chen X H, et al. Progress of deep exploration in mainland China: A review. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12):3884-3901,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.002.

我国深部探测技术与实验研究进展综述

董树文¹,李廷栋¹,陈宣华¹,魏文博²,高 锐³,吕庆田⁴,杨经绥³,
王学求⁵,陈群策⁶,石耀霖⁷,黄大年⁸,周 琦¹

1 中国地质科学院,北京 100037

2 中国地质大学(北京),北京 100083

3 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

4 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037

5 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000

6 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

7 中国科学院研究生院,北京 100049

8 吉林大学,吉林长春 130026

摘 要 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe,2008—2012)是我国历史上实施的规模最大的地球深部探测计划.专项开展了全国 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 、华北和青藏高原 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的大地电磁阵列观测,建立了全国地球化学基准网(含78种元素),完成了青藏高原、华南—中央造山带、华北和东北等四条超长深地震反射剖面,部署了罗布莎、金川、腾冲、南岭、庐枞和铜陵等大陆科学钻探实验,开展了青藏高原东南缘和华北地区地应力监测;在我国东部长江中下游和南岭成矿带开展的矿集区立体探测卓有成效.同时,专项还开展了岩石圈三维结构与地球动力学数值模拟、大陆地壳结构与演化的综合研究.专项全面实施以来,已经完成约6000 km的深地震反射剖面,成功研究、实验了地壳与地幔深部探测的一系列技术方法,积累了丰富经验,极大地加快了我国深部探测的进度,在国内外产生了强烈的反响.专项实现了技术组合创新、技术进步与重大科学发现的并举,适应我国地质地貌条件和地壳/岩石圈结构特征,初步形成了具有不同层次、不同尺度、不同精度探测空间组合的深部探测技术方法体系,建立了若干各具地质特色的探测试验基地.专项实验已经取得了一系列重大突破与重要成果,深部探测关键仪器装备自主研发获得重大突破,为全面开展地壳探测工程的组织实施奠定了必要的技术基础.

关键词 中国深部探测,地壳结构,深地震反射,大地电磁,科学钻探,地应力监测

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.002

中图分类号 P541,P3

收稿日期 2012-04-06,2012-06-28 收修定稿

Progress of deep exploration in mainland China: A review

DONG Shu-Wen¹, LI Ting-Dong¹, CHEN Xuan-Hua¹, WEI Wen-Bo², GAO Rui³, LÜ Qing-Tian⁴,
YANG Jing-Sui³, WANG Xue-Qiu⁵, CHEN Qun-Ce⁶, SHI Yao-Lin⁷, HUANG Da-Nian⁸, ZHOU Qi¹

1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

5 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China

6 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

7 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

8 Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China

Abstract The SinoProbe is a multidisciplinary earth science research program of unprecedented

基金项目 国家深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-08)资助成果.

作者简介 董树文,男,1954年生,博士生导师,研究员.长期从事构造地质与成矿、深部构造与地质过程、深部探测实验研究. E-mail:swdong@cags.ac.cn

scope and scientific ambition in geosciences. The overall aim of the SinoProbe is to reveal the composition, structure and evolution of the continental lithosphere in China. The SinoProbe (2008—2012) has successfully conducted researches and experiments on crust and mantle exploration technologies, accumulated abundance of experiences, and significantly accelerated China's development on deep exploration. It has made some new understandings on the Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the mainland China. It has collected deep seismic reflection profiles in Tibet, South China, North China, and Northeast China for a length of ca. 6000 km, which accounts for the same length conducted previously in China. It have carried out national-wide geochemical baseline (with 78 elements) and magnetotelluric (MT) Array (by $4^{\circ} \times 4^{\circ}$, and $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ in North China and Tibet), 3D exploration in ore deposit districts in eastern China, several continental scientific drilling holes, regional in-situ stress monitoring networks, geodynamic modeling of the lithosphere underneath the continental China, and instrumentation development for deep exploration. For the first time, SinoProbe has obtained deep seismic reflection evidence for the thick-crust Moho surface in the Qinghai-Tibet Plateau and for the lithospheric mantle in Northeast China. The preliminary results from MT array observations of SinoProbe show an abnormal electric-conductivity structure of the lithosphere under the Ordos basin, providing important evidence for the evolution mechanism of the North China craton.

Keywords SinoProbe-deep exploration in China, Crustal structure, Deep seismic reflection, MT array, Scientific drilling, Stress monitoring

1 引言

上天、入地、下海是人类探索自然的三大壮举,将在人类发展上发挥重要的作用^[1]. 地球内部物质的物理属性、结构构造和深部过程及其动力学机制,是地球动力学研究的实质内涵^[2]. 深部物质分异、调整和运移的轨迹和深层过程与动力学响应,是理解成山、成盆、成岩、成矿和成灾过程的成因机制的核心^[3]. 大陆流变学研究已经成为发展板块构造理论、探索大陆动力学的核心问题^[4]. 地球深部探测作为当前大陆岩石圈探测与流变学研究的系统工程技术,充分应用科学最先进的技术手段、提取深部基础信息、逐步揭开地球深部奥秘,由此形成的全球性主流发展趋势,超越了板块构造学、大陆动力学和陆内造山理论,为解决能源、矿产资源可持续供应、提升灾害预警能力奠定了深部信息基础. 深部探测已经成为地球科学发展的最后前沿之一^[5-10].

深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe, 2008—2012;以下简称“专项”)是我国历史上实施的规模最大的地球深部探测计划. 专项在全国部署了“两网、两区、四带、多点”的探测实验^[7](图1). 专项全面实施以来,已经完成约 6000 km 的深地震反射剖面,成功研究、实验了地壳与地幔深部探测的一系

列技术方法,积累了丰富经验,极大地加快了我国深部探测的进度,在国内外产生了强烈的反响. 专项实现了技术组合创新、技术进步与重大科学发现的并举,适应我国地质、地貌条件和地壳岩石圈结构特征,初步形成了具有不同层次、不同尺度、不同精度探测空间组合的深部探测技术方法体系,建立了若干各具地质特色的探测试验基地. 专项实验已经取得了一系列重大突破与重要成果,深部探测关键仪器装备自主研发获得重大突破^[11],为全面开展地壳探测工程的组织实施奠定了必要的技术基础.

2 我国深部探测的地质构造背景

我国大陆是现今欧亚大陆的重要组成部分,在三维空间上呈现复杂的多层次镶嵌叠式和立交桥式结构^[12-13],先后长期与劳亚、冈瓦纳^[14]两大古陆和古亚洲、特提斯、太平洋三大构造动力学体系发生息息相关的联系,地壳组成与地质构造复杂特异,具有多造山带、多级盆山组合、多块体的拼合,陆块多而小且破碎,具长期多期活动性与非稳定演化状态,演化历史漫长^[15]. 它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、鄂霍茨克洋关闭(J_2-K_1)和印度—亚洲板块碰撞的大陆动力学过程^[4, 16-17]. 我国具有世界上少有

或独一无二的地质现象. 我国有稳定的、大于 38 亿年的前寒武纪克拉通和几个不同的古太古代一始太古代陆核^[18], 有大范围面积性超高压岩石剥露地表, 有世界上最广阔弥散的构造变形域, 密集分布的蛇绿混杂岩带(即板块缝合带), 广泛发育的火山弧与岩浆弧, 丰富而特殊的古生物群落和地壳、地幔化学组成与演变中的区域性过渡特征等^[4, 15]. 延伸超过 5000 km 的巨型中央造山带, 具有秦、祁、昆、松潘交接转换关系, 记录了泥盆纪、三叠纪两次碰撞造山和白垩纪以来陆内造山等复合造山的过程, 其地壳结构与深部过程是了解并认识中国大陆地质和大陆动力学的一个关键^[4, 15, 19-21]. 古特提斯洋盆^[22]的闭合导致了诸多的微块体于晚三叠世至中侏罗世(T_3 - J_2)碰撞, 形成东亚大陆南部巨型“T”型复合印支造山系, 大别—苏鲁高压—超高压变质带构成印支造山带的山根^[23-24], 同时也形成了中国西部晚三叠世—早侏罗世伸展构造环境与大型含油气盆地^[25-26]. 侏罗纪以来, 我国东部和东亚地区发育了典型的西太平洋沟-弧-盆构造体系. 华北克拉通破坏和岩石圈减薄作用, 造就了岩石圈最薄的中国东部大陆. 新生代以来印度—亚洲碰撞作用(始于 65 Ma, 完成于 45~40 Ma)^[27]引起的地壳加厚与急剧隆升, 造就了世界上最年轻的、最大的、最高的、地壳最厚的青藏高原和喜马拉雅山链^[16, 28-31], 也造就了我国东、西部巨大的阶梯状差异升降、地表地貌形态分异与复杂的地质现象^[31], 而且对亚洲乃至全球的碳循环、气候和环境变化都产生了重大影响(如冰室效应和新生代全球变冷问题)^[1]. 青藏高原成为一个现代仍在活动的新生代造山带, 是得天独厚的检验诸多地质构造理论天然实验室^[29]. 同时, 我国还是世界上强烈的地震区与新构造活动区. 这些世界独有的地质“奇观”和构造特征, 经历了复杂的地球动力学过程, 具有特殊的地幔动力学成因, 是世界地球动力学和大陆地质研究的热点地域. 随着板块构造“登陆”遇到的诸多科学难题, 世界地球科学家已经把研究大陆形成、演化的地球动力学过程视为地球科学的前沿, 竞相开展大陆动力学研究. 大陆动力学研究是当代地球科学发展的主要前沿领域之一, 造山带则是大陆动力学研究的重要内容^[15]. 我国具有先天的地域优势, 因此, 开展以深部探测为主的多学科综合研究计划, 揭示大陆的本质、特性、行为、增生、消减、保存、演化与成因, 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质基础学科的发展与进步.

中国和东亚大陆属于冈瓦纳与劳亚两个巨型大陆之间的转换构造域^[32], 其主体是印支期(250~220 Ma)以来由诸多微陆块碰撞、拼接而成的联合陆块或复合大陆^[12, 19, 33-34], 具有复杂的地质构造特征和地壳/岩石圈结构^[34-35], 是解决许多地球科学一级难题的关键所在. 近年来一系列新的构造地质研究成果与精确同位素定年数据的积累, 以及东亚深部探测数据的揭示, 使我们对发生在中国东部、甚至亚洲东部的侏罗纪-白垩纪之交的构造变动及其动力学机理有了新的认识. 中国中东部三叠纪华南、华北陆块碰撞-拼合后, 形成新的中国大陆, 近东西向特提斯构造体制控制着大陆的变形, 直到中、晚侏罗世各陆块的古地磁动力学趋于统一. 随着大西洋和太平洋中脊拉开、特提斯洋关闭、印度洋扩张^[14]和蒙古—鄂霍茨克洋关闭, 东亚大陆开始汇聚, 晚侏罗世太平洋板块向西俯冲, 形成濠西太平洋沟-弧-盆系统和东亚北北东向构造体系(新华夏系). 同时, 西伯利亚板块向南运动, 蒙古—鄂霍茨克洋关闭; 印度大陆脱离澳大利亚板块, 向北漂移, 拉萨地块拼贴于亚洲大陆, 出现了受控于东亚深部动力学过程的多板块向东亚汇聚的运动格局^[17]. 这种起始于 165±5 Ma 的多个板块向东亚的极性运动, 以及产生的变形图像与深部响应, 被称之为“东亚汇聚”, 由此形成以陆内俯冲和陆内造山为特征的晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系.

东亚汇聚的变形特征, 表现为自中、晚侏罗世(165±5 Ma)以来, 我国东南沿海地区出现向西或西北方向的挤压, 蒙古地块向南推覆, 拉萨地块向北-北东拼贴, 导致了中国大陆腹地鄂尔多斯地块和四川地块构成了汇聚构造体系的两个核心地块^[36-37]. 东亚汇聚引起了我国东部中生代大规模成矿作用^[38]、东亚地区中生代陆相化石群——热河生物群的演化^[39]、东亚岩石圈巨量减薄(160~150 Ma)、山根垮塌及其新生代东亚地形地貌的翘变等过程^[33, 40]. 从晚侏罗世到早白垩世(约 135 Ma), 东亚发生了由挤压向伸展构造的转换^[36].

那么, 中国大陆各个块体之间究竟存在怎么样的深部构造关系, 如何通过岩石圈结构的深度-时间等关系追溯多块体拼合、增生、分裂、保存、演化、壳幔相互作用与构造体制转换的过程, 现今地壳活动性、现今构造与古构造之间的关系, 以及资源、环境与灾害效应, 成为中国大陆构造研究目前尚未解决的重大科学问题, 急需深部探测为之提供深部地质、地球物理和地球化学依据.

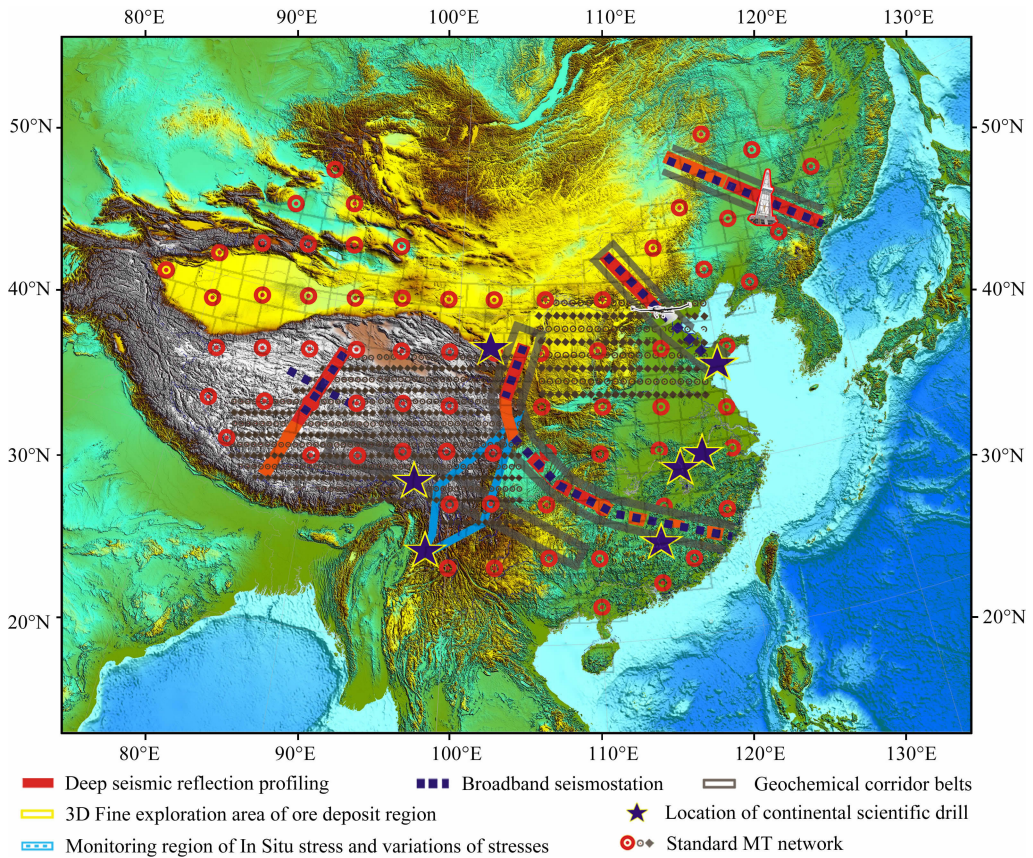


图1 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe 2008—2012)工作部署

Fig.1 Deployment map of the initial phase of the SinoProbe during 2008—2012

3 深部物性结构探测

3.1 地球深部物性结构探测技术渐趋成熟

大地电磁测深(MT)是探测地球内部导电性结构,研究地壳及上地幔构造特征,间接了解其热结构、物质成份和状态,以及流变学特征的重要途径^[41-44].专项通过研究大陆地壳和上地幔尺度综合性物性成像方法,建立了阵列式、大陆电磁参数“标准网”观测方法和规范化的数据处理及反演技术,达到国际先进水平.

目前,大陆电磁参数“标准网”完成了全国 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ “标准网”控制格架及华北实验区、青藏高原实验区 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ “标准网”的实验观测;建立了由“十”字型短剖面构成“面元”观测的“标准点”阵列式大陆电磁参数“标准网”构建方法^[42,44],总结了规范化的大地电磁测深“标准点”数据处理方法,包括基于S变换的数据处理^[45]、多站远参考数据处理和基于遗传算法的阻抗张量分解等技术;融合了大地电磁测深一维、二维和三维反演技术,探讨了二维反演方法求解

复杂电性结构的适应性问题^[46],实现了大地电磁测深“标准点”面元数据集反演方法;从而获取各“标准点”地下体积单元的深度-电阻率加权平均值+标准差数据体,建立大陆岩石圈导电性结构“标准模型”.通过一维和二维大地电磁反演试验,给出了褶皱退化模型的正确性,以及盲反褶皱增强算法的有效性^[47].通过正演模拟方法,分析和总结了近海地区(如近渤海地区)海水深度和海底地形变化等海岸效应对大地电磁测深数据畸变的影响^[48].

岩石物性是地质与地球物理之间的纽带^[49],而重力场和地磁场资料是了解地壳物性结构特征的重要依据.由于众多异常的叠加和反演固有的多解性,区域磁异常图的准确解释是非常困难的^[50].专项发展了区域重磁异常精细处理、异常多尺度分离、构造信息提取与增强和基于相关成像GPU并行算法的位场三维物性反演技术,为大数据体区域位场反演奠定了方法技术基础.

此外,还研发实现了低纬度变倾角磁异常化极技术,用于透明地壳研究的低纬度化极或变纬度化极、基于优化滤波思想的位场分离均取得了重要的

实用化进展^[51-53];建立了卫星重力、磁力资料的解算、编辑和校验技术,实现了基于 GPU 并行的重力、重力梯度三维正演快速计算方法^[54],针对 EGM2008(卫星重力)中固有的高频噪声提出了利用重力异常分离的优选向上延拓去噪的处理方法^[55];系统开展了中亚—东亚重、磁数据收集、整理与处理。

结合大地电磁法(MT)和可控源音频大地电磁法(CSAMT)的优点,专项发展了大功率人工源电磁法,自主研发了地面电磁探测系统(SEP)。SEP 系统已经在核心技术上取得了重大突破,掌握了磁芯材料和低频微弱信号检测等磁传感器关键技术,研制出感应式宽频带磁传感器原理样机,性能指标与国外同类产品相当^[11]。同时,开展了大功率发射、数据采集、数据处理等部件的攻关研究,均取得了重要进展。大功率电磁法发射技术^[56]、宽频带磁传感器技术、低功耗采集站阵列技术和数据传输与集成等重点攻关方向也呈现良好发展势头。

3.2 华北与青藏高原岩石圈物性结构的新认识

华北地区 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 大地电磁(MT)“标准网”观测结果显示,现今的华北岩石圈是由东部的鲁—辽高阻块体和黄淮海低阻块体、中部的太行—吕梁高阻块体、西部的鄂尔多斯低阻块体和北部的燕山高阻块体、内蒙高阻块体等多个块体拼合而成的。高阻块体大致与区内造山带、构造褶皱带相对应,表现为“刚性”岩石圈结构特点;低阻块体则与盆地发育区相吻合,可能反映了较强的“塑性”岩石圈结构。华北岩石圈变形的相当一部分能量(作用)来源于上地幔深层的热状态和热流体,地壳的变形、演化可能受上地幔盖层变形的调制作用。

鄂尔多斯地块北部的岩石圈由沉积建造与结晶基底、上地壳、下地壳和上地幔顶部 4 层正速度梯度层构成,从南向北,基底和壳内界面逐渐上隆, Moho 界面逐渐加深^[57]。而大地电磁测深数据的三维反演结果则显示,古老的鄂尔多斯岩石圈具有异常的导电性结构,鄂尔多斯地块岩石圈总体上为良导电性的块体,普遍存在大规模的壳内和幔内高导体,及其多组产状陡倾的上地幔盖层高导通道,以北纬 37.5° 为界,鄂尔多斯地块可划分为南、北两个块体,北部块体导电性明显高于南部。鄂尔多斯地块(特别是北部)的低阻特征,与古老稳定地块的岩石圈电性结构特征不相符合,推测可能存在大量深部热流体,可能与正在进行的岩石圈减薄和折沉作用有关,这为研究鄂尔多斯北部天然气田成因以及华北克拉通演化机理提供了重要依据。由固定台站数据记录的大量

远震体波波形资料的处理结果,给出了鄂尔多斯地块东南缘 Moho 深度变化特征:东缘 Moho 深度介于 $20.3 \sim 45$ km 之间,南缘 Moho 深度介于 $31 \sim 53.1$ km 之间,具有明显的分块特征^[58]。

青藏高原大陆动力学研究在东亚乃至全球地球动力学研究中占有重要地位^[59]。INDEPTH-MT 在喜马拉雅—西藏南部地区曾完成 6 条超宽频带大地电磁深探测剖面研究,说明西藏巨厚的地壳中确实存在部分“熔融体”和“热流体”^[43,60]。SinoProbe 专项在青藏高原 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ MT“标准网”观测的初步结果给出了电性结构的总体特点。在雅鲁藏布江缝合带以南,低阻体主要分布在 20 km 以浅。而在雅鲁藏布江缝合带以北,低阻体主要分布深度大于 20 km,且分布并不连续,低阻区域可能和南北向裂谷带相关。在 $E94^{\circ}$ 以东的不同深度并未发现大规模低阻体,这与普遍认为的青藏高原“下地壳隧道流”存在一定的矛盾。大地电磁测深剖面给出了青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构,存在着低阻的青藏高原中下地壳与高阻的扬子地壳之间的电性转换^[61],也支持了青藏高原东部“下地壳隧道流”受阻的观点。青藏高原东北缘合作一大井剖面的大地电磁探测结果,给出了该区域的地壳电性结构呈明显的纵向分层、横向分块的特点,中、下地壳普遍存在高导层^[62]。在青藏高原中北部,五道梁—绿草山大地电磁深探测剖面的二维非线性共轭梯度反演,得到了高原二维电性结构模型,并推测了主要断裂的位置、产状和切割深度等信息^[63]。

3.3 基于卫星重、磁数据研究华北与青藏东北缘密度的进展

在区域位场研究方面,专项解算编辑了基于 EGM2008 的中国大陆 $1' \times 1'$ 卫星重力和 $30'' \times 30''$ 的卫星遥感地形数据,以及 $3' \times 3'$ 卫星磁异常数据;并对数据进行整理和网格化拼图。

在此基础上,专项通过对中国大陆卫星重力资料采用不同方法、不同滤波器进行噪声滤波处理、地形和中间层改正,获得消除系统噪声的卫星空间重力异常和布格重力异常;对卫星磁异常进行低纬度化极或变纬度化极;同时分别对卫星布格重力和磁异常进行了断裂信息提取、异常分离、莫霍面反演和三维约束密度反演等处理,构建了华北岩石圈结构初始密度分布、青藏东北缘及邻区莫霍面等深度图,取得了初步结果。

初步结果表明,密度横向不均匀性广泛分布于华北克拉通内不同的地质单元,而且三个主要地质单元

的密度和深度扩展模式显著不同. 这表明,不同的构造机制已经控制着不同地区在显生宙时期的演化过程.

从青藏东北缘及邻区莫霍面深度的变化可看出,研究区地壳厚度从青藏高原东北缘 47 km~63 km(平均约为 55 km)向鄂尔多斯西南缘 33 km~42 km(平均约为 37 km)逐渐减薄. 地表的断裂与莫霍面形态有很多地方吻合得很好,如莫霍面等深线梯度带从河西走廊张掖经武威、景泰到海原由北西向西向转到天水、成县近西南方向;这与龙首山断裂、天景山断裂、祁连山断裂和海原—六盘山断裂的分布基本一致;这也说明本区的许多断裂可能是超壳断裂,只是在莫霍面上呈现出断距和产状的差异. 布格重力异常三维约束密度反演结果发现六盘山地区下地壳为坚硬的高密度块体,它可能阻挡了青藏高原东北缘下地壳物质向鄂尔多斯盆地的“流动”.

这些都证明了利用卫星布格重力和磁异常对中国大陆上地幔顶部密度结构和构造特征进行研究,可为深部动力学过程提供一种可行的途径.

4 地壳精细结构探测

4.1 地壳精细结构探测技术集成实验全面进步

近垂直深地震反射技术已经成为探测地壳精细结构、揭示地壳变形与大陆动力学过程的先锋^[28, 64-65]. 超浅超高分辨率地震反射成像成为活动断裂带地震灾害与危险性评估的关键手段^[66]. 天然地震层析成像是窥探地球深部结构的一个窗口; P/S波波速扰动地震层析成像,产生较准确的地幔波速结构,为了解地幔构造和动力学作用提供了新的地球物理制约^[67]. 天然地震台阵与主动源探测技术的结合是地球深部探测的重要发展方向.

通过实验研究,专项初步建立了适应我国大陆地质背景和条件的深部探测技术体系,如共震源深地震反射和宽角反射与折射地震同时接收的联合采集探测技术,改进低频检波器并接在采集站上、带头研发宽角反射与折射地震仪,实现低频/高频信号同时拾取,为同时获取速度信息提供基础数据;完善了地震探测孔快速钻进成孔技术,反射地震大井深(如 50 m 深井)、大药量和超长记录实验取得成功,形成了适合硬岩地区反射地震数据采集和处理的集成技术^[68]. 在天然地震观测方面,完善了双差分远震层析成像、P 波 S 波接收函数与各向异性分析等技术,形成了主动与被动源地震技术和电磁技术组合. 针对信噪比差的远震波形资料,还提出了一种计算远

震相对走时残差数据的快速方法,并应用于长江中下游地区远震波形资料的处理^[69].

专项实验获得了青藏高原腹地巨厚地壳的莫霍面反射,突破了青藏高原巨厚地壳深地震反射探测技术的瓶颈;建立起花岗岩与变质岩地带被动源地震与大地电磁组合探测技术. 华北北缘多重地震联合探测实验获得高分辨、高精度的单分量深地震反射、三分量宽角反射与折射数据,为揭示古亚洲洋的构造演化和深部资源勘查提供了可靠深部资料. 深地震反射剖面揭示了西南天山—塔里木盆地结合带现今岩石圈尺度的深浅构造,反映了挤压体制下陆内俯冲的盆山耦合关系^[70]. 在深地震反射数据处理方面,发展了无射线层析成像静校正、起伏地表叠前时间偏移、长排列剖面无拉伸动校正、分频去噪等数据处理的特殊技术. 此外,中国大陆及邻区上地幔 P 波各向异性结构,显示了中国大陆上地幔变形主要受印度板块和太平板块向中国大陆俯冲的影响^[71].

专项自主研发的无缆自定位地震勘探系统,实现了关键技术的重大突破,在高精度地震数据采集、GPS 定位、仪器整机的小型化、低功耗、低频检波器和出力 1 万牛顿的电磁可控震源等方面都取得了显著的研究成果^[11].

4.2 青藏高原深部结构研究获重大发现,为建立高原隆升动力学机制提供了新的可靠证据

青藏高原具有巨厚地壳,地壳结构与莫霍面形态复杂,深度变化很大^[3, 28, 60, 72]. 青藏高原及其腹地的地壳精细结构令世界地球科学家瞩目,是检验青藏高原隆升动力学机制的关键. INDEPTH-1 项目第一次深地震反射试验(TIB-1 剖面)曾揭示藏南地壳中部的强反射带,代表了印度下地壳俯冲到藏南之下;莫霍面深度在 72~75 km^[28]. SinoProbe 专项首次实现了世界上首次跨越喀喇昆仑和喜马拉雅带跨越雅鲁藏布缝合带进入到冈底斯带的深地震反射剖面,实验得到来自地壳深部和 Moho 的反射资料,品质较高. 剖面显示了下地壳向北的强反射,以及冈底斯岩浆岩带底部的地震强反射. 藏南狮泉河剖面浅部显示喀喇昆仑断层的花状反射结构.

专项获得青藏高原腹地巨厚地壳下地壳和莫霍面深地震强反射. 应对青藏高原巨厚地壳的下地壳和莫霍面反射的巨大挑战,以往各国科学家的尝试尚缺少非常成功的实例. 专项青藏高原腹地羌塘深地震反射剖面探测获得了下地壳和莫霍面强反射,精细处理结果确认了羌塘地体的 Moho 反射出现在 20 s 左右(约 60 km 深度),比两侧地体浅 10 km 左

右,为建立青藏高原中部地壳垮塌、减薄作用的动力学模型提供了基础。剖面显示下地壳北倾的强反射,可能是拉萨地体早期向北俯冲的反映。班公—怒江缝合带在 20 Ma(?)以来转变为挤压体制,形成多条逆冲断裂^[73]。专项深地震反射剖面揭示了横过班公—怒江缝合带 Moho 存在约 10 km 的错断,为古老缝合带后期重新活动提供了证据。

横过西秦岭造山带及其两侧盆地的深地震反射剖面精细处理结果,揭示了青藏高原东北部岩石圈变形的细节与高原隆升的深部动力学过程,对国际流行的“下地壳隧道流”模式提出了挑战^[65,74]。深地震反射剖面显示了上地壳双重构造、下地壳近水平拆离断层和地幔卷入的 Moho 错断、叠瓦逆冲与双重构造,也显示了若尔盖盆地下地壳曾整体向西秦岭造山带俯冲的深地震反射证据。深地震反射剖面显示的地壳变形与地幔过程的脱耦现象,与“下地壳隧道流”模式极不协调。深地震反射剖面也揭示了青藏高原东北缘海原断裂带的深部几何形态、两侧地壳上地幔细结构与变形特征^[68]。

4.3 华北深地震反射剖面揭露板块汇聚、大陆地壳增生的深部过程

华北深地震反射剖面(约 630 km)自南向北跨越了许多令人瞩目的构造单元与边界断裂,如传统的华北地台与内蒙地槽的边界、“索伦缝合带”及其位于两侧的造山带等。长期以来,沿索伦缝合带发生的大洋板块消亡、大陆板块汇聚,大陆地壳增生等地质作用引起人们的广泛兴趣。然而,由于缺乏精细的岩石圈结构资料,人们对这些地质作用与深部动力学过程的认识颇为分歧。本次探测实验成功获得地壳和上地幔顶部的精细结构,整个剖面显示了自浅到深部地壳变形的踪迹和样式,从而可以追溯板块汇聚、地壳伸展、岩浆侵入与逆冲推覆/地壳增生的深部过程。剖面上 Moho 起伏较大,以燕山地区的 Moho 为最深,局部出现多组 Moho 反射叠置现象,在化德附近花岗岩出露区为最浅。

4.4 获得东北岩石圈地幔的深地震强反射

东北松辽盆地—虎林盆地反射地震剖面,采用了深井、高能量激发和超长记录(达 50 s)技术,在获得地壳和 Moho 界面清晰反射的同时,连续获得了上地幔的强反射,最深达到 39 秒记录深度,估计深约 100 km。虽然,文献^[75]曾指出过在 Montana 大平原之下存在可能的地幔反射。但是,如此深达地幔盖层底界的连续地震反射,打破了长期以来认为地幔反射透明的传统认识,令科学家震撼、兴奋。这是

大陆深部探测极为罕见发现,具有重大的地质科学意义。正如文献^[76]指出的,许多不连续的上地幔反射均可能是下地壳的碎片。文献^[77]则认为,地幔反射是岩石圈地幔变形(如地幔断裂或地幔剪切带)的表现。同时,深地震反射剖面探测揭示,在张广才岭与佳木斯地区之间存在着一个已经向西以低角度俯冲消减掉的洋壳,并且这一洋壳的俯冲深度可能已经超过岩石圈底界。这为地球科学界长期争论的古太平洋板块的存在与否提供了最直接的证据。

4.5 华南复杂地区(松潘—龙门山—四川盆地)深地震反射剖面实验取得成功

专项克服艰苦的施工环境,完成了华南复杂地区松潘—龙门山—四川盆地—井冈山—武夷山深地震反射实验剖面(共约 2280 km,简称“华南剖面”),试验研究了复杂地形环境深地震反射与折射地震联合施工、数据获取及数据处理相关技术,为揭示复杂地貌单元下地壳和地幔的精细结构与深部构造提供了精细资料。

华南大陆的板内造山作用是一个复杂的过程,涉及扬子地块与华夏地块之间的分界和关系问题^[78]。专项采集和初步处理的华南剖面显示,松潘地块 Moho 深度自若尔盖盆地的 50 km 左右,与下地壳一起向东(向岷山之下)倾斜,与岷山山前向西倾斜的下地壳反射形成相向倾斜的汇聚样式,据此可以确定松潘地块与岷山造山带的接触关系和边界。自岷山向东,下地壳反射减弱,近乎透明。进入龙门山东部山前,向西倾斜(即向龙门山下倾斜)的 Moho 面反射并不清楚;取而代之的是从龙门山山前开始、一直延续到四川盆地的平坦型 Moho 面,为清晰的强反射, Moho 面深度明显浅于龙门山地区。这种 Moho 面的突变加深(错断)暗示,龙门山山前断裂可能为切割深度很大的地壳或岩石圈尺度的走滑大断裂,为建立龙门山地震活动模型、精确确定汶川地震发生机制和地震断层分布与延伸提供了新的关键约束。在四川盆地东部, Moho 面显示明显的向东倾斜,可能代表了一个古老的俯冲带的残留,类似于文献^[76, 79]在加拿大揭示的残留俯冲带信息。深地震反射剖面揭示的信息,将为华南大陆的再造提供新的、关键的深部构造证据。

5 地下物质成分探测

5.1 地下物质成分探测技术取得新进展

专项开展的地壳全元素探测技术与实验示范项

目,首次按照国际标准建立了一个覆盖全国的地球化学基准网^[80-81],建立了全国地球化学基准值样品库,为了解过去地球重大地质事件、预测未来全球环境气候变化、揭示巨量成矿物质聚集的地球化学背景奠定了基础。地壳全元素探测项目发展了4种地球化学探测技术,包括地壳中所有天然元素的精确分析技术、中下地壳物质成分识别技术、穿透性地球化学探测技术、海量地球化学数据和图形显示技术。专项在国际上首次建立了一套81个指标(含78种元素)的地壳全元素精确分析系统,分析测试指标达到国际领先水平^[81]。“化学地球”软件为全球海量地球化学数据的管理与展示提供了基础平台^[81,83]。

盖层下方隐伏矿成矿及伴生元素如何穿透覆盖层到达地表,是深穿透地球化学迁移机理研究的热点^[84]。地气流可能以微气泡形式携带超微细金属颗粒或纳米金属微粒到达地表,一部分微粒仍然滞留在土壤气体里,另一部分卸载后被土壤地球化学障所捕获^[85]。通过在隐伏矿地表采样、在室内建立装有不同矿石的迁移柱的定期观测实验,穿透性地球化学探测深度延伸至500 m以深,为覆盖区矿产勘查提供了地球化学勘探技术^[81,84-86];首次同时观测到矿石、土壤、气体介质中具有继承性关系的纳米金属微粒;在隐伏金属矿上方发现纳米级铜金属微粒,并观测到其有序晶体结构,为深穿透地球化学提供直接微观证据,使得迁移机理研究取得重要进展,含矿信息精确分离提取技术得到显著提高。

5.2 首次发现我国楚雄—兰坪盆地白垩纪/古新纪(K/T)界面铀异常,可能提供小行星撞击造成恐龙灭绝的证据

以不同时代岩石代表性样品建立的一致性全球尺度原生和次生岩石圈地球化学基准或基线,是认识地球的演化和全球变化的重要参照标尺^[81]。云南禄丰龙产地楚雄—兰坪盆地白垩纪/古新纪(K/T)界面发现铂族元素高含量异常,所采集的凝灰质灰岩、凝灰质泥岩样品铂族元素含量是上、下地层的3~20倍,铀含量是上、下地层的10到20倍。这一发现可能提供小行星撞击地球、造成恐龙灭绝的重要证据,是过去重大地质事件的重要地球化学响应^[81]。K/T界面铀异常的发现,是岩石地球化学基准值建立的重要应用成果^[81]。

6 大陆科学钻探与地球深部物质研究

6.1 大陆科学钻探技术装备取得长足进步

大陆科学钻探被认为是深入地球内部的望远镜,也为“深时”研究提供良好的、高分辨率的地质记录^[1]。大陆科学钻探(图2)直接获取地球深部物质样品,同时获得地下岩石和流体各种物理、化学和生物参数,发现了一系列深部地幔物质,并得到了高温高压实验岩石学的证实,取得了巨大成功^[87-89]。同时,针对我国大陆科学钻探的目标与特点,大陆科学超深井钻探技术方案得到不断完善,在钻杆柱使用、

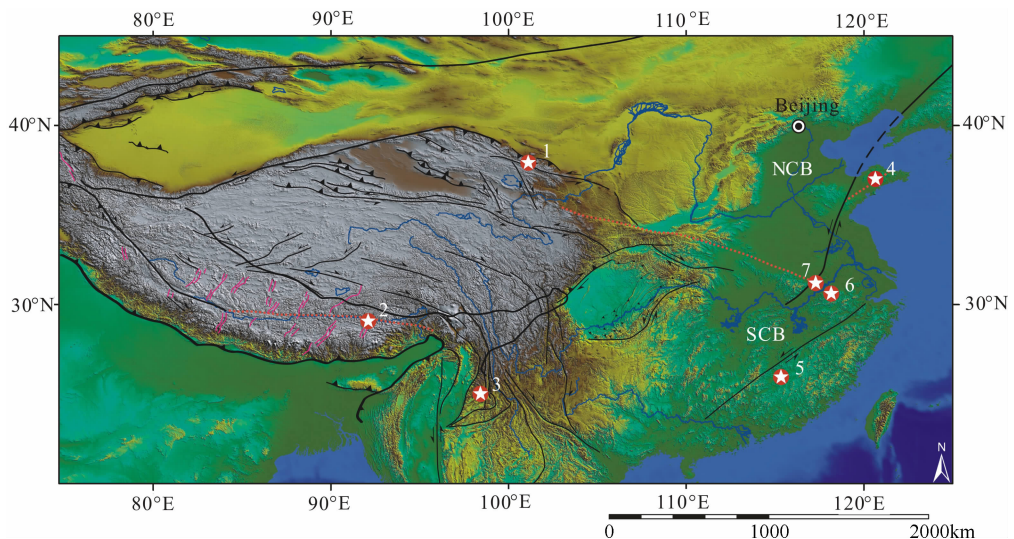


图2 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe 2008—2012)部署的大陆科学钻探实验孔位置
科学钻探选址与钻探实验(2000~3000 m):1—金川铜镍硫化物矿集区;2—罗布莎铬铁矿集区;3—腾冲火山地热构造带;
4—中国南北板块边界带(莱阳盆地);5—南岭矿集区;6—铜陵矿集区;7—庐枞矿集区。

Fig. 2 Locations of pilot holes of continental scientific drilling and experiments of SinoProbe 2008—2012

事故预防与处理、深孔取心钻进驱动、碎岩方法与工具、抗高温高压泥浆配方试验与优选、套管与高温固井、钻进自动化控制、数据采集传输与处理等方面,均进行了经济性与可行性研究分析,为开展了科学超深井钻探奠定了基础。

专项与企业合作研制生产的我国第一台万米大陆科学钻探钻机、也是亚洲钻进能力最深的大陆科学钻探装备主体平台,在四川广汉竣工下线,万米大陆科学钻探钻机研制获重大突破^[11]。该钻机具有数字化控制、自动化操作、交变变频无级调速、大功率绞车、高速大扭矩液压顶驱、五级固控系统等特点,处于国际先进水平。在关键技术方面,完成了钻杆自动处理装置的设计加工调试和液压顶驱的多轮设计。进一步的配套取芯工艺研究工作也已经全面展开。该重型装备已启动远程投送并将投入使用,成为深部探测装备研发引领性的亮点工程,受到国内外关注。

6.2 雅鲁藏布江缝合带发现含特殊深地幔矿物的超基性岩群,预示了铬铁矿找矿的良好前景

深部探测专项在西藏罗布莎、甘肃金川、云南腾冲和东部南岭、庐枞和铜陵矿集区等地部署了大陆科学钻探选址与钻探实验(图 2)。其中,大陆科学钻探在西藏罗布莎直接获取地球深部物质样品,发现了一系列深部地幔物质。沿着雅鲁藏布江板块缝合带,相继在罗布莎蛇绿岩型铬铁矿中发现金刚石等深地幔矿物^[87, 90],在普兰、东波、当穷、日喀则、泽当、缅甸密支那(170 Ma)等地又发现含金刚石等特殊矿物的超基性岩体群^[88-89],在普兰岩体和东波岩体中发现块状铬铁矿石,为在雅鲁藏布江西段寻找大型、特大型铬铁矿提供科学依据^[88]。同时,提出了金刚石成因分类的第三种类型:蛇绿岩型金刚石^[87]。罗布莎地区包裹在块状铬铁矿内的氧化氮和金属含有指示极高温高压和极低 fO_2 形成环境的信息,形成深度至少超过 300 km、压力超过 10 GPa,为了解深部地幔及氮在地球内的分布提供了窗口。首次厘定了普兰和东波 MOR 型蛇绿岩的形成时代为 130 Ma 左右(早白垩世)。雅鲁藏布江缝合带罗布莎蛇绿岩具有 MOR 型(侏罗纪,约 170 Ma)和 SSZ 型两个阶段的演化历史^[91],而缅甸密支那地区侏罗纪时为 SSZ 型蛇绿岩^[89]。

7 矿产资源立体探测

7.1 矿集区“透明化”与矿产资源勘查技术日臻完善

地面浅表处所见的金属矿产资源,如大型、超大

型矿床和多金属矿集区的形成,均是地球内部在地史期间深部物质与能量的交换所致,第二深度空间(500~2000 m)存在着找到大型与超大型矿床的巨大潜力^[3, 92]。传统的金属矿勘查大多依赖重、磁、电法等技术,随着勘探深度的不断增加,高分辨率反射地震在精细揭示金属矿控矿构造、追踪含矿层、甚至直接发现深部(大于 1000 m)矿体方面逐渐显示出巨大的优势,成为 1000 m 以深金属矿勘查最有前景的技术^[93]。矿集区立体探测实验示范,使用以反射地震为主导的现代地球物理探测技术,在长江中下游成矿带庐江—枞阳铁、铜矿集区部署立体探测实验,完善、创新和应用了一些关键探测技术,初步形成了成矿带、矿集区和矿田 3 个层次立体探测的技术方案与技术体系。通过实验,提出了矿集区综合探测、多参数地质约束和全三维反演的三维结构探测与建模技术流程,以及适合强干扰地区的形态滤波电磁去噪新技术。实验形成了适合“玢岩”型铁矿、“斑岩”型铜矿、热液型铅锌矿和石英脉型钨矿的深部勘查技术组合,初步实现了矿集区深度 3000~5000 m 的“透明化”,总结了在复杂矿集区深部探测技术试验,为全面开展三维矿集区立体探测和实现矿集区透明化奠定了技术基础^[94]。

应用于矿集区立体探测的无人机航磁探测系统,在低磁无人机制作、高可靠性自动驾驶仪研制、氦气泵航空磁力仪与超导航空磁力仪研制以及配套的数据预处理系统开发方面均取得了重大阶段性成果^[11]。智能化、可靠性、多分量的航磁张量探测技术研究以及系统联调进展顺利,成为无人机航磁探测系统的突破性亮点。

7.2 东部大型矿集区立体探测取得重要进展

远震层析成像显示在长江中下游成矿带存在低速异常体软流圈,揭示出岩石圈拆沉、软流圈物质上升导致幔源岩浆底侵的地震学证据,同时也证实了多级岩浆活动系统的存在,诠释了巨型成矿带成岩、成矿的动力学成因^[95]。深地震反射剖面探测揭示了成矿带地壳精细结构和变形历史,包括上地壳具有多重滑脱层的逆冲—褶皱构造系统,明确了郟庐断裂、长江构造带等重要构造带的性质。

庐枞矿集区是一个极为复杂的火山岩盆地矿集区^[96-97],地壳厚度在 30 km 左右,火山岩层厚度平均在 800 m 左右^[95]。通过深地震反射剖面、大地电磁和高精度重磁测量的联合探测^[93-94, 98]、精细处理和构造解析,构建了庐枞矿集区上地壳 10 km 的 3D 结构框架模型,探测到铁、铜矿构造和赋矿构造框架,基本实现了矿集区三维透明化。区域重磁位场分

离、边缘检测和 3D 反演试验,初步揭示了庐枞矿集区不同深度的重磁结构构造框架、磁性体和密度体的空间分布,并将重力异常分离实验应用于泥河铁矿矿区矿体异常和背景场的分离^[99]。同时,运用反射地震初至波层析成像方法,反演得到了庐枞盆地 1200 m 以浅的地壳速度结构,准确刻画了地下隐伏侵入岩体的空间分布形态^[100]。探测实验发现了盆地西侧直达 MOHO 的地幔流体和岩浆上涌、喷发的通道,证实庐枞火山岩盆地为向东喷发的不对称盆地,否定了西侧红层之下可能存在另一半火山盆的推断^[94, 97-98]。火山岩盆地四周与基底接触关系复杂,在 E 和 SE 侧呈断裂接触,在 N 和 NE 侧呈整合接触。同时,对火山岩层基底有了新认识,为庐枞矿集区深部寻找“铜陵式”矿床提供了初步的依据。深地震反射剖面探测实验还揭示了早白垩纪以前的挤压变形和晚早白垩纪以后伸展变形之间的相互关系,并支持下地壳拆沉模型^[95]。

在铜陵砂卡岩型铜矿集区,开展了深地震反射、大地电磁联合探测,建立了区域构造格架。根据铜陵矿集区 1800 km² 重、磁场源参数反演(0~5 km 范围),推断了岩浆岩和高密度体的空间展布特征,建立了典型矿床(如舒家店斑岩型铜矿,姚家岭热液型铅-锌-铜矿)的综合地球物理探测技术与 3D 地球物理模型,为深部成矿预测提供了重要信息。在九瑞矿集区,已有重磁资料的重新处理结果,厘定了控矿断裂构造系统的展布位置,获得了矿集区地层结构及与成矿相关岩浆岩的三维空间形态特征^[101]。在宁芜矿集区及其西缘,2 条大地电磁测深剖面探测,获得了 10 km 以浅的地壳电性结构^[102]。

在南岭成矿带于都—赣县矿集区开展的地球物理综合探测,获得矿集区三维结构,揭示了地壳岩浆系统结构,发现一批重磁电异常。我国目前最深的 3000 m 资源科学钻探在南岭开钻,初步揭示金属矿化的垂直分带规律,发现了深部矿化线索。

8 地应力测量与地壳活动性监测

8.1 地壳活动性和地应力测量与监测技术日趋成熟

固体地壳的应力状态是地壳的最重要的性质之一。地壳表面和内部发生的各种构造现象及其伴生的各种地质灾害都与地壳应力的作用密切相关^[103]。地应力测量与监测不仅为深入认识地震的孕育和发生机制,进而为强震预测提供重要的科学依据,而且也是地球动力学基础研究的重要组成部分

分;此外,还将为国家重大工程建设,如深埋隧道、水电工程、深部能源开采、核废料处置场地的选址等深部地下工程的勘测设计提供重要的技术支撑^[103]。把握在地球内力作用下的地壳活动的“脉搏”,已经成为大陆动力学研究和探索的核心所在^[2,7]。

专项完成了新型深孔压磁应力解除测量系统和应力应变监测系统的研制与定型,最大安装测量深度达到孔深 213 m,处于国际领先水平。专项取得了高质量的深井地应力测试数据,初步得到原地应力随深度的变化规律;揭示了现今应力场与活动断裂之间的相互作用关系;建立了青藏高原东南缘 12 个地应力监测台站,实现了监测数据的无线远程传输、实时监控和自动分析;初步建成北京温泉应力应变监测对比综合实验场^[103]。

8.2 地应力测量与监测为建立区域地应力场提供了重要的基础数据

中国大陆现今实测地应力场的状态与板块构造环境、活动断裂带分布、地形地貌以及地壳结构呈现一定相关性^[104]。专项建立的青藏高原东南缘地应力监测台网,确定了该地区相关测点处最大水平主应力的作用方向,给出了现今构造应力场的基本图像,反映了现今地应力作用强度沿龙门山断裂呈现出分段和分区的基本特征^[105],是迄今为止该地区较为系统的地应力测量成果,对于地球动力学基础研究和地质灾害的预测预警具有重要的意义和作用。同时,基于汶川地震序列震源机制解对龙门山地区构造变形模式进行了初步探讨^[106-107]。分析表明,龙门山断裂带东北段地质构造特征和地应力状态有利于区内逆断层活动,汶川地震和多次余震的发生并没有完全释放所聚集的能量^[108]。

专项在山西盆地南北两端 4 个地区共计 13 个深钻孔中进行了水压致裂地应力测量,获得了现今地应力的大小、方向和分布规律^[109]。专项建立的北京平谷地应力监测台站,成功记录到 2011 年日本特大地震(里氏 9.0 级)前后地应力的连续变化曲线及水位变化信息,获得了重要科学发现,为深入开展地震预测预警研究提供了宝贵的基础资料,为地应力综合监测方法的广泛应用指示出良好前景。

9 深部探测数据处理与地球动力学模拟

9.1 深部探测数据处理、地球三维结构和动力学模拟技术能力得到提升

地壳与地幔精细结构的刻划,重、磁、电、震、热

等地球物理的综合响应将是地球动力学深化研究的必然,高精度重磁地震数据的联合反演与解析日益成为深部地球物理勘探的发展趋势^[2, 110]. 因此,以三维地质目标模型为中心的地球物理综合研究一体化集成分析平台,通过“红蓝军”(引进和自主研发平台)两条路线同时推进,完善高端平台功能联合,强化研发和应用两类人员的系统化训练,提高经验积累的效率,初步建成拥有自主知识产权的接近国外同类产品的“处理-分析-管理”一体化大型软件工作平台,加速了跟进国外软件发展的步伐.

模拟与仿真已经成为科学研究的第三种方法. 地球模型是地球物理场定性解释与定量解释之间的桥梁^[49],是地球动力学的基础之一^[2]. 专项实现了全球、区域、局部尺度的三维地球动力学模拟的跨越,建立了深部探测数值模拟平台,具备上千万结构化和非结构化网格划分能力,对关键部位可以任意加密网格,实现了在并行计算平台上亚洲岩石圈数百万至三千万三维有限单元网格的数值模拟,这不仅是我国规模最大、也是世界上少有的岩石圈动力学模拟平台,从而为建立超级地球模拟器搭建了初步框架.

9.2 地球动力学数值模拟加深了对深部地质过程及其浅表响应的认识

大陆岩石圈的流变结构对岩石圈动力学过程有很大的影响,因此对岩石圈等效粘度的估计是大陆动力学研究中基础和重要的问题^[111]. 专项利用并行计算岩石圈动力学模拟平台,将层析成像结果转化为初始温度,计算了全球对流图像. 同时,也对含湿孔隙岩石的有效导热系数进行了数值分析^[112].

大地震发生后,估计后续地震发展趋势是人们关心的问题. 强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和环境与其深层动力过程乃是厘定强烈地震成因的关键所在^[113]. 为此, SinoProbe 专项修正了传统的库仑应力计算中沿地震破裂面滑动方向计算剪应力变化的近似方法^[114],对 2011 年日本东北大地震和海啸可能造成的影响及时进行了模拟^[115],对 2008 年汶川地震^[116]孕育发生的动力学背景、紫坪铺水库加载产生的应力变化^[117]和台湾复杂动力学环境下的三维粘弹性变形等不同尺度问题进行了三维动力学模拟,取得了较好的效果. 2008 年汶川大地震与 2001 年昆仑山地震激发的地球自由振荡频谱的数值模拟与对比分析表明,汶川地震具有逆冲一走滑特性,昆仑山地震具有水平左行走滑特征^[118]. 华北盆地三维粘弹性数值模拟结果,给出了

历史地震空间分布与构造应力积累速率之间的关系,以及地壳分层流变性质对应力积累的影响^[119].

深部过程控制了地表和浅表的响应并造就了大陆地貌特征^[120]. 深部过程主要通过板块构造和重力势等因素产生了对地应力状态的深远影响. 数值模拟分析表明,整体上,中国大陆构造应力场的分布特征与活动构造的展布密切相关,是在板块构造环境控制下,整个地壳岩石黏弹特性长期演化和活动断裂无震蠕动的结果;而伴随地震发生的断层滑动引起的地应力场的瞬时或短期调整,可参考完全弹性分析的结果^[104]. 线弹性有限元数值模拟结果表明,龙门山断裂带附近相同位置的最大水平主应力值在 2008 年汶川大地震前后分别呈现出高度集中和大幅降低现象;大震发生约 1 年后,断裂带附近北川、江油地区地壳浅表层构造应力场的优势方向为 NE—NEE 向,与震前相比,逆时针偏转了约 39°.

10 结 论

深部探测技术与实验研究开启地学新时代,成为我国地球科学研究领域的一个重要发展趋势. 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe 2008—2012)实现了覆盖大陆的大地电磁探测阵列网,完成了约 6000 km 的深地震反射剖面,初步建立起适应中国大陆地质地貌条件和岩石圈结构特征的深部地震反射、折射与宽频带联合探测技术体系,矿集区三维“透明化”技术日臻完善. 专项首次按照国际标准建立了一个覆盖全国的地球化学基准网,在国际上首次建立了一套 81 个指标(含 78 种元素)的地壳全元素精确分析系统. 专项大陆科学钻探在西藏罗布莎直接获取地球深部物质样品,发现了一系列深部地幔物质. 专项针对地壳活动性规律研究的应力测量技术也得到完善,有助于了解现今地震、地质灾害等发生的成因. 成功研制的我国首台自主研发和生产的万米超深科学钻探装备,标志着专项取得了又一个里程碑式的进展. 专项致力于深部探测的技术创新和技术进步,取得了一系列重大进展与重要发现,为地壳探测工程的正式启动与组织实施奠定了坚实的基础.

致 谢 国家深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)由中国地质科学院组织实施、国土资源部归口管理,得到了财政部、科技部、教育部、中国科学院、中国地震局和国家自然科学基金委的大力支持. 以国土资源部张洪涛原总工程师和钟自然总工

程师为首的两届专项领导小组(含办公室),由李廷栋、孙枢、马宗晋院士等组成的专项专家委员会,为专项的高端综合与顶层设计做出了卓越的贡献,把握了专项主要研究方向和关键科学技术问题。来自各个部门的两千多名科技人员参加了专项研究,组成了强大的深部探测科研团队,他们精诚合作、团结奋战、刻苦钻研,为专项成功运行和成果的取得做出了巨大的贡献。在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 孙枢,王成善.“深时”(Deep Time)研究与沉积学. 沉积学报, 2009, 27(5): 792-810.
Sun S, Wang C S. Deep time and sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2009, 27(5): 792-810.
- [2] 滕吉文,皮娇龙,杨辉等. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. 地球物理学报, 2012, 55(3): 851-862.
Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 851-862.
- [3] 滕吉文. 中国地球深部物理学和动力学研究 16 大重要论点、论据与科学导向. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 801-829.
Teng J W. The research of deep physics of Earth's interior and dynamics in China: The sixteen major thesis evidences and scientific guide. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(3): 801-829.
- [4] 张国伟,郭安林,董云鹏等. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. 地学前缘, 2011, 18(3): 1-12.
Zhang G W, Guo A L, Dong Y P, et al. Continental geology, tectonics and dynamics. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2011, 18(3): 1-12.
- [5] 董树文,李廷栋. SinoProbe——中国深部探测实验. 地质学报, 2009, 83(7): 895-909.
Dong S W, Li T D. SinoProbe: the exploration of the deep interior beneath the Chinese continent. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2009, 83(7): 895-909.
- [6] 董树文,李廷栋,高锐等. 地球深部探测国际发展与我国现状综述. 地质学报, 2010, 84(6): 743-770.
Dong S W, Li T D, Gao R, et al. International progress in probing the Earth's lithosphere and deep interior: A review. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, 84(6): 743-770.
- [7] 董树文,李廷栋, SinoProbe 团队. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe). 地球学报, 2011, 32(z1): 1-23.
Dong S W, Li T D, SinoProbe Group. Deep exploration technology and experimentation (SinoProbe). *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(z1): 1-23.
- [8] 董树文,吴珍汉,陈宣华等. 深部探测综合集成与数据管理. 地球学报, 2011, 32(z1): 137-152.
Dong S W, Wu Z H, Chen X H, et al. The integration and data management of deep exploration. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(z1): 137-152.
- [9] Dong S W, Li T D, Gao R, et al. A multidisciplinary earth science research program in China. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2011, 93(38): 313-314.
- [10] Dong S W, Willemann R, Wiersberg T, et al. Recent advances in deep exploration: Report on the international symposium on deep exploration into the lithosphere. *Episodes*, 2012, 35(2): 353-355.
- [11] 黄大年,于平,底青云等. 地球深部探测关键技术装备研发现状及趋势. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1485-1496.
Huang D N, Yu P, Di Q Y, et al. Development of key instruments and technologies of deep exploration today and tomorrow. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2012, 42(5): 1485-1496.
- [12] 任纪舜. 中国大陆的组成、结构、演化和动力学. 地球学报-中国地质科学院院报, 1994, 15(z2): 5-13.
Ren J S. The continental tectonics of China. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 1994, 15(z2): 5-13.
- [13] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚等. 新一代中国大地构造图. 中国区域地质, 1997, 16(3): 225-230, 248.
Ren J S, Wang Z X, Chen B W, et al. A new generation tectonic map of China. *Regional Geology of China* (in Chinese), 1997, 16(3): 225-230, 248.
- [14] Chen X H, Jiang R B, Wan J L, et al. Cenozoic exhumation of Larsemann Hills, East Antarctica: Evidence from apatite fission-track thermochronology. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2010, 84(2): 306-320.
- [15] 张国伟,董云鹏,姚安平. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考. 中国地质, 2002, 29(1): 7-13.
Zhang G W, Dong Y P, Yao A P. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts. *Geology in China* (in Chinese), 2002, 29(1): 7-13.
- [16] 许志琴,李海兵,杨经绥. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型. 地学前缘, 2006, 13(4): 1-17.
Xu Z Q, Li H B, Yang J S. An orogenic plateau—the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(4): 1-17.
- [17] Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the “Yanshan Movement”. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2008, 82(2): 334-347.
- [18] 刘敦一,万渝生,伍家善等. 华北克拉通太古宙地壳演化和最古老的岩石. 地质通报, 2007, 26(9): 1131-1138.
Liu D Y, Wan Y S, Wu J S, et al. Archean crustal evolution and the oldest rocks in the North China craton. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, 26(9): 1131-1138.
- [19] 张国伟,程顺有,郭安林等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 2004, 23(9): 846-853.
Zhang G W, Cheng S Y, Guo A L, et al. Mianlue paleo-

- suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2004, 23(9): 846-853.
- [20] 许志琴, 杨经绥, 李海兵等. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. *地质学报*, 2006, 80(12): 1793-1806.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. The early palaeozoic terrane framework and the formation of the high-pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2006, 80(12): 1793-1806.
- [21] 杨经绥, 许志琴, 马昌前等. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题. *中国地质*, 2010, 37(1): 1-11.
- Yang J S, Xu Z Q, Ma C Q, et al. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China. *Geology in China* (in Chinese), 2010, 37(1): 1-11.
- [22] Chen X H, Gehrels G, Yin A, et al. Paleozoic and Mesozoic basement magmatism of eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-Tibet Plateau: LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and its geological significance. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2012, 86(2): 350-369.
- [23] Dong S W, Li Q S, Gao R, et al. Moho-mapping in the Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen, central China. *American Journal of Science*, 2008, 308(4): 517-528.
- [24] 许志琴, 杨经绥, 李化启等. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1697-1709.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H Q, et al. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2012, 28(6): 1697-1709.
- [25] Chen X H, Yin A, Gehrels G E, et al. Two phases of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2003, 22(5): 1053, doi: 10.1029/2001TC001336.
- [26] 陈宣华, 党玉琪, 尹安等. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化. 北京: 地质出版社, 2010: 1-365.
- Chen X H, Dang Y Q, Yin A, et al. Basin-Mountain Coupling and Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Adjacent Orogenic Belts. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese), 2010: 1-365.
- [27] 莫宣学, 赵志丹, 周肃等. 印度—亚洲大陆碰撞的时限. *地质通报*, 2007, 26(10): 1240-1244.
- Mo X X, Zhao Z D, Zhou S, et al. On the timing of India—Asia continental collision. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, 26(10): 1240-1244.
- [28] 赵天津, Nelson K D, 徐中信, 等. 深反射地震揭示喜马拉雅地区地壳上地幔的复杂结构. *地球物理学报*, 1996, 39(5): 615-628.
- Zhao W J, Nelson K D, Xu Z X, et al. Deep seismic reflection in Himalaya region reveals the complexity of the crust and upper mantle structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, 39(5): 615-628.
- [29] 赵天津. 岩石圈深部探测与青藏高原研究. *中国工程科学*, 2003, 5(2): 1-15.
- Zhao W J. Deep exploration for lithosphere with special reference to Qinghai-Tibet Plateau. *Engineering Science* (in Chinese), 2003, 5(2): 1-15.
- [30] 许志琴, 杨经绥, 李海兵等. 印度—亚洲碰撞大地构造. *地质学报*, 2011, 85(1): 1-33.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. On the tectonics of the India—Asia collision. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(1): 1-33.
- [31] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 2010, 488(1-4): 293-325.
- [32] 任纪舜, 邓平, 肖黎薇等. 中国与世界主要含油气区大地构造比较分析. *地质学报*, 2006, 80(10): 1491-1500.
- Ren J S, Deng P, Xiao L W, et al. Petroliferous provinces in China and the world: A comparison from tectonic point of view. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2006, 80(10): 1491-1500.
- [33] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉等. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义. *地质论评*, 2000, 46(1): 8-13.
- Dong S W, Wu X H, Wu Z H, et al. On tectonic seesawing of the East Asia continent—Global implication of the Yanshanian Movement. *Geological Review* (in Chinese), 2000, 46(1): 8-13.
- [34] Li T D. The principal characteristics of the lithosphere of China. *Geoscience Frontiers*, 2010, 1(1): 45-56.
- [35] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元. *中国地质*, 2006, 33(4): 700-710.
- Li T D. Lithospheric tectonic units of China. *Geology in China* (in Chinese), 2006, 33(4): 700-710.
- [36] Zhang Y Q, Shi W, Dong S W. Changes of Late Mesozoic tectonic regimes around the Ordos Basin (North China) and their geodynamic implications. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1254-1276.
- [37] Shi W, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 46(2): 20-38.
- [38] 毛景文, 谢桂青, 张作衡等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 2005, 21(1): 169-188.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2005, 21(1): 169-188.
- [39] 季强. 论热河生物群. *地质论评*, 2002, 48(3): 290-296.
- Ji Q. On the Mesozoic Jehol Biota of China. *Geological Review* (in Chinese), 2002, 48(3): 290-296.
- [40] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化. *地学前缘*, 2007, 14(3): 39-46.
- Liu G D. Geodynamical evolution and tectonic framework of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, 14(3):

- 39-46.
- [41] 魏文博, 邓明, 温珍河等. 南黄海海底大地电磁测深试验研究. *地球物理学报*, 2009, 52(3): 740-749.
Wei W B, Deng M, Wen Z H, et al. Experimental study of marine magnetotellurics in southern Huanghai. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 740-749.
- [42] 魏文博, 金胜, 叶高峰等. 中国大陆岩石圈导电性结构研究——大陆电磁参数“标准网”实验(SinoProbe-01). *地质学报*, 2010, 84(6): 788-800.
Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. On the conductive structure of Chinese continental lithosphere—Experiment on "standard monitoring network" of continental EM parameters (SinoProbe-01). *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, 84(6): 788-800.
- [43] Wei W B, Jin S, Ye G H, et al. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in southern Tibet inferred from super-broadband magnetotelluric sounding. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, 2010, 53(2): 189-202.
- [44] 杨文采, 魏文博, 金胜等. 大陆电磁参数标准网实验研究——SinoProbe-01 项目介绍. *地球学报*, 2011, 32(z1): 24-33.
Yang W C, Wei W B, Jin S, et al. Experimental study of the continental standard grid of electromagnetic parameters: An introduction to project sinoprobe-01. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(z1): 24-33.
- [45] 景建恩, 魏文博, 陈海燕等. 基于广义 S 变换的大地电磁测深数据处理. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4015-4022.
Jing J E, Wei W B, Chen H Y, et al. Magnetotelluric sounding data processing based on generalized S transformation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4015-4022.
- [46] 董浩, 魏文博, 叶高峰等. 大地电磁测深二维反演方法求解复杂电性结构问题的适应性研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4003-4014.
Dong H, Wei W B, Ye G F, et al. Study of two dimensional magnetotelluric inversions of complex three dimensional structures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4003-4014.
- [47] 左博新, 胡祥云, 韩波. 基于褶积模型的地球物理反演模型增强研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4058-4068.
Zuo B X, Hu X Y, Han B. The geophysical model enhancement researching based on convolution model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4058-4068.
- [48] 张帆, 魏文博, 金胜等. 海岸效应对近海地区大地电磁测深数据畸变作用研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4023-4035.
Zhang F, Wei W B, Jin S, et al. Ocean coast effect on land-side magnetotelluric data in the vicinity of the coast. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4023-4035.
- [49] 刘光鼎. 中国海地球物理场与油气资源. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1229-1237.
Liu G D. Geophysical fields and hydrocarbon resources of China seas. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2007, 22(4): 1229-1237.
- [50] 杨文采, 王家林, 钟慧智等. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1278-1287.
Yang W C, Wang J L, Zhong H Z, et al. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1278-1287.
- [51] Guo L H, Meng X H, Shi L. 3D correlation imaging of the vertical gradient of gravity data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(1): 6-12.
- [52] Guo L H, Shi L, Meng X H. 3D correlation imaging of magnetic total field anomaly and its vertical gradient. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(2): 287-293.
- [53] Chen Z X, Meng X H, Guo L H, et al. GICUDA: a parallel program for 3D correlation imaging of large scale gravity and gravity gradiometry data on graphics processing units with CUDA. *Computers and Geosciences*, 2012, 46: 119-128.
- [54] 陈召曦, 孟小红, 刘国峰等. 基于 GPU 并行的重力、重力梯度三维正演快速计算. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4069-4077.
Chen Z X, Meng X H, Liu G F, et al. Three-dimensional fast forward modeling for large scale gravity and gravimetry data based on GPU. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4069-4077.
- [55] 郭良辉, 孟小红, 石磊. 中国卫星重力数据的优选向上延拓去噪实验. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4078-4088.
Guo L H, Meng X H, Shi L. Denoising experiments of the satellite-derived gravity data of China by preferential upward continuation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4078-4088.
- [56] 付长民, 底青云, 许诚等. 电离层影响下不同类型源激发的电磁场特征. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3958-3968.
Fu C M, Di Q Y, Xu C, et al. Electromagnetic fields for different type sources with effect of ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3958-3968.
- [57] 滕吉文, 王夫运, 赵文智等. 阴山造山带—鄂尔多斯盆地岩石圈层、块速度结构与深层动力过程. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 67-85.
Teng J W, Wang F Y, Zhao W Z, et al. Velocity structure of layered block and deep dynamic process in the lithosphere beneath the Yinshan orogenic belt and Ordos Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(1): 67-85.
- [58] 任泉, 徐志国, 杨辉, 等. 鄂尔多斯地块东南缘地带 Moho 深度变化特征研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4089-4096.
Ren X, Xu Z G, Yang H, et al. Moho depth distribution character beneath the Ordos Block's southeastern marginal areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4089-4096.
- [59] 滕吉文, 张洪双, 孙若味等. 青藏高原腹地东西分区和界带的地球物理场特征与动力学响应. *地球物理学报*, 2011, 54(10): 2510-2527.

- Teng J W, Zhang H S, Sun R M, et al. Geophysical field characteristics and dynamic response of segmentations in East-West direction and their boundary zone in central Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(10): 2510-2527.
- [60] 赵文津, 吴珍汉, 史大年等. 国际合作 INDEPTH 项目横穿青藏高原的深部探测与综合研究. *地球学报*, 2008, 29(3): 328-342.
- Zhao W J, Wu Z H, Shi D N, et al. Comprehensive deep profiling of Tibetan Plateau in the INDEPTH Project. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2008, 29(3): 328-342.
- [61] 张乐天, 金胜, 魏文博等. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4126-4137.
- Zhang L T, Jin S, Wei W B, et al. Electrical structure of Crust and Upper Mantle across the eastern margin of the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4126-4137.
- [62] 金胜, 张乐天, 金永吉, 等. 青藏高原东北缘合作一大井剖面地壳电性结构研究. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3979-3990.
- Jin S, Zhang L T, Jin Y J, et al. Crustal electrical structure along the Hezuo-Dajing profile across the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3979-3990.
- [63] 谢成良, 叶高峰, 魏文博, 等. 藏北高原主要断裂带电性结构特征. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3991-4002.
- Xie C L, Ye G F, Wei W B, et al. Electrical features of the main faults in Northern Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3991-4002.
- [64] Mooney W D, Brocher T M. Coincident seismic reflection/refraction studies of the continental lithosphere: A global review. *Reviews of Geophysics*, 1987, 25(4): 723-742.
- [65] 高锐, 王海燕, 王成善等. 青藏高原东北缘岩石圈缩短变形——深地震反射剖面再处理提供的证据. *地球学报*, 2011, 32(5): 513-520.
- Gao R, Wang H Y, Wang C S, et al. Lithospheric deformation shortening of the northeastern Tibetan Plateau: Evidence from reprocessing of deep seismic reflection data. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(5): 513-520.
- [66] Kaiser A E, Green A G, Campbell F M, et al. Ultrahigh-resolution seismic reflection imaging of the Alpine Fault, New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B11306, doi: 10.1029/2009JB006338.
- [67] 杨文采, 于常青. 从亚洲 S 波波速结构看地幔流体运动特征. *地质学报*, 2011, 85(9): 1399-1408.
- Yang W C, Yu C Q. Movement features of mantle fluid flows based on the S-wave velocity structure of Asia. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(9): 1399-1408.
- [68] 王海燕, 高锐, 尹安等. 深地震反射剖面揭示的海原断裂带深部几何形态与地壳形变. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3902-3909.
- Wang H Y, Gao R, Yin A, et al. Deep geometry structure feature of Haiyuan Fault and deformation of the crust revealed by deep seismic reflection profiling. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3902-3909.
- [69] 江国明, 张贵宾, 徐晓. 远震相对走时数据快速计算方法及应用. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4097-4105.
- Jiang G M, Zhang G B, Xu Y. A fast method for calculating relative residuals of teleseismic data and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4097-4105.
- [70] 侯贺晟, 高锐, 贺日政等. 西南天山—塔里木盆地结合带岩石圈尺度的构造关系——深地震反射剖面的揭露. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4116-4125.
- Hou H S, Gao R, He R Z, et al. Lithospheric-scale tectonic relationship for the junction belt of western part of South Tianshan and Tarim basin—Revealed from deep seismic reflection profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4116-4125.
- [71] 郭颢, 刘启元, 陈九辉等. 中国大陆及邻区上地幔 P 波各向异性结构. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4106-4115.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. P-wave anisotropy of upper-mantle beneath China mainland and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4106-4115.
- [72] 高锐, 熊小松, 李秋生等. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度. *地球学报*, 2009, 30(6): 761-773.
- Gao R, Xiong X S, Li Q S, et al. The Moho depth of Qinghai-Tibet Plateau revealed by seismic detection. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2009, 30(6): 761-773.
- [73] 赵文津, 刘葵, 蒋忠锡等. 西藏班公湖—怒江缝合带——深部地球物理结构给出的启示. *地质通报*, 2004, 23(7): 623-635.
- Zhao W J, Liu K, Jiang Z T, et al. Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet—a suggestion given by deep geophysical structure. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2004, 23(7): 623-635.
- [74] Wang C S, Gao R, Yin A, et al. A mid-crustal strain-transfer model for continental deformation: A new perspective from high-resolution deep seismic-reflection profiling across NE Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 306(3-4): 279-288.
- [75] Best J A. Mantle reflections beneath the Montana Great Plains on consortium for continental reflection profiling seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B3): 4279-4288.
- [76] Cook F A, Vasudevan K. Are there relict crustal fragments beneath the Moho? *Tectonics*, 2003, 22(3): 1026, doi: 10.1029/2001TC001341.
- [77] Vauchez A, Tommasi A, Mainprice D. Faults (shear zones) in the Earth's mantle. *Tectonophysics*, 2012, 558-559: 1-27.
- [78] Zhang Z J, Xu T, Zhao B, et al. Systematic variations in

- seismic velocity and reflection in the crust of Cathaysia; New constraints on intraplate orogeny in the South China continent. *Gondwana Res.*, 2012, doi:10.1016/j.gr.2012.05.018.
- [79] van der Velden A J, Cook F A. Relict subduction zones in Canada. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110; B08403, doi: 10.1029/2004JB003333.
- [80] Xie X J, Yao W S. Outlines of new global geochemical mapping program. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(3): 441-453.
- [81] 王学求, 谢学锦, 张本仁等. 地壳全元素探测——构建“化学地球”. *地质学报*, 2010, 84(6): 854-864.
Wang X Q, Xie X J, Zhang B R, et al. China geochemical probe: Making "geochemical Earth". *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, 84(6): 854-864.
- [82] 王学求. 全球地球化学基准: 了解过去, 预测未来. *地学前缘*, 2012, 19(3): 7-18.
Wang X Q. Global geochemical baselines: Understanding the past and predicting the future. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2012, 19(3): 7-18.
- [83] Xie X J, Wang X Q, Cheng H X, et al. Digital Element Earth. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1): 1-16.
- [84] 王学求, 张必敏, 刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查. *地学前缘*, 2012, 19(3): 101-112.
Wang X Q, Zhang B M, Liu X M. Nanogeochemistry: Deep-penetrating geochemical exploration through cover. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2012, 19(3): 101-112.
- [85] 王学求, 叶荣. 纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据. *地球学报*, 2011, 32(1): 7-12.
Wang X Q, Ye R. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep-penetrating geochemistry. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(1): 7-12.
- [86] Wang X Q, Xu S F, Zhang B M. Deep-penetrating geochemistry for sandstone-type uranium deposits in the Turpan—Hami basin, north-western China. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(12): 2238-2246.
- [87] 杨经绥, 徐向珍, 李源等. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3171-3178.
Yang J S, Xu X Z, Li Y, et al. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2011, 27(11): 3171-3178.
- [88] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林等. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3207-3222.
Yang J S, Xiong F H, Guo G L, et al. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2011, 27(11): 3207-3222.
- [89] 杨经绥, 许志琴, 段向东等. 缅甸密支那地区发现侏罗纪的SSZ型蛇绿岩. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1710-1730.
Yang J S, Xu Z Q, Duan X D, et al. Discovery of a Jurassic SSZ ophiolite in the Myitkyina region of Myanmar. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2012, 28(6): 1710-1730.
- [90] Yang J S, Dobrzhetinskaya L, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, 2007, 35(10): 875-878.
- [91] Xu X Z, Yang J S, Ba D Z, et al. Petrogenesis of the Kangjinla peridotite in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 553-568.
- [92] 滕吉文. 强化第二深度空间金属矿产资源探查, 加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化. *地球物理学进展*, 2010, 25(3): 729-748.
Teng J W. Strengthening exploration of metallic minerals in the second deep space on the crustal interior; Accelerated research, development and industrialization for geophysical new technology and instrumental equipments. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(3): 729-748.
- [93] 吕庆田, 廉玉广, 赵金花. 反射地震技术在成矿地质背景与深部矿产勘查中的应用: 现状与前景. *地质学报*, 2010, 84(6): 771-787.
Lu Q T, Lian Y G, Zhao J H. Application of reflection seismic technology in metallogenic geological background and deep mineral exploration: Status and prospects. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, 84(6): 771-787.
- [94] 吕庆田, 韩立国, 严加永等. 庐枞矿集区火山气液型铁、硫矿床及控矿构造的反射地震成像. *岩石学报*, 2010, 26(9): 2598-2612.
Lu Q T, Han L G, Yan J Y, et al. Seismic imaging of volcanic hydrothermal iron-sulfur deposits and its hosting structure in Luzong ore district. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, 26(9): 2598-2612.
- [95] 吕庆田, 史大年, 汤井田等. 长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测——SinoProbe-03年度进展综述. *地球学报*, 2011, 32(3): 257-268.
Lu Q T, Shi D N, Tang J T, et al. Probing on deep structure of Middle and Lower Reaches of the Yangtze metallogenic belt and typical ore concentration area: A review of annual progress of SinoProbe-03. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011, 32(3): 257-268.
- [96] 董树文, 马立成, 刘刚等. 论长江中下游成矿动力学. *地质学报*, 2011, 85(5): 612-625.
Dong S W, Ma L C, Liu G, et al. On dynamics of the metallogenic belt of Middle-Lower Reaches of Yangtze River, eastern China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(5): 612-625.
- [97] 董树文, 项怀顺, 高锐等. 长江中下游庐江—枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. *岩石学报*, 2010, 26(9): 2529-2542.
Dong S W, Xiang H S, Gao R, et al. Deep structure and

- ore formation within Lujiang-Zongyang volcanic ore concentrated area in Middle to Lower Reaches of Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, 26(9): 2529-2542.
- [98] 高锐, 卢占武, 刘金凯等. 庐一枞金属矿集区深地震反射剖面解释结果——揭露地壳精细结构, 追踪成矿深部过程. 岩石学报, 2010, 26(9): 2543-2552.
Gao R, Lu Z W, Liu J K, et al. A result of interpreting from deep seismic reflection profile: Revealing fine structure of the crust and tracing deep process of the mineralization in Luzong deposit area. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, 26(9): 2543-2552.
- [99] 刘彦, 严加永, 吴明安等. 基于重力异常分离方法寻找深部隐伏铁矿——以安徽泥河铁矿为例. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4181-4193.
Liu Y, Yan J Y, Wu M A, et al. Exploring deep concealed ore bodies based on gravity anomaly separation methods: A case study of the Nihe iron deposit. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4181-4193.
- [100] 刘振东, 吕庆田, 严加永等. 庐枞盆地浅表地壳速度成像与隐伏矿靶区预测. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3910-3922.
Liu Z D, Lü Q T, Yan J Y, et al. Tomographic velocity structure of shallow crust and targets prediction for concealed ore deposit in Luzong basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3910-3922.
- [101] 邓震, 吕庆田, 严加永. 九江—瑞昌矿集区的 3D 结构及对区域找矿的启示. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4169-4180.
Deng Z, Lü Q T, Yan J Y. The three-dimension structure and the enlightenment to the regional prospecting of the Jiujiang-Ruichang district. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4169-4180.
- [102] 杨振威, 严加永, 张昆等. 宁芜矿集区深部结构初探. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4160-4168.
Yang Z W, Yan J Y, Zhang K, et al. A preliminary study on deep structure in Ning-Wu ore-district. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4160-4168.
- [103] 陈群策, 李宏, 廖椿庭等. 地应力测量与监测技术实验研究——SinoProbe-06 项目介绍. 地球学报, 2011, 32(z1): 113-124.
Chen Q C, Li H, Liao C T, et al. An experimental study of the technique for in-situ stress measurement and monitoring: An introduction to the project SinoProbe-06. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2011, 32(z1): 113-124.
- [104] 范桃园, 龙长兴, 杨振宇等. 中国大陆现今地应力场黏弹性球壳数值模拟综合研究. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1249-1260.
Fan T Y, Long C X, Yang Z Y, et al. Comprehensive modeling on the present crustal stress of China mainland with the viscoelastic spherical shell. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1249-1260.
- [105] Wu M L, Zhang Y Q, Liao C T, et al. Preliminary results of in-situ stress measurements along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(4): 746-753.
- [106] 崔效锋, 胡幸平, 俞春泉等. 汶川地震序列震源机制解研究. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(6): 1063-1072.
Cui X F, Hu X P, Yu C Q, et al. Research on focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake sequence. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2011, 47(6): 1063-1072.
- [107] 胡幸平, 崔效锋, 宁杰远等. 基于汶川地震序列震源机制解对龙门山地区构造变形模式的初步探讨. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2561-2574.
Hu X P, Cui X F, Ning J Y, et al. Preliminary study on tectonic deformation models in the Longmenshan region based on focal mechanism solutions of the Wenchuan earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(8): 2561-2574.
- [108] 陈群策, 丰成君, 孟文等. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3923-3932.
Chen Q C, Feng C J, Meng W, et al. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3923-3932.
- [109] 陈群策, 安其美, 孙东生等. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析. 地球学报, 2010, 31(4): 541-548.
Chen Q C, An Q M, Sun D S, et al. Current in-situ stress state of Shanxi Basin and analysis of earthquake risk. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2010, 31(4): 541-548.
- [110] 张交东, 杨晓勇, 刘成斋等. 大别山北缘深部结构的高精度重磁地震解析. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2292-2306.
Zhang J D, Yang X Y, Liu C Z, et al. The fine deep structure of the northern margin of the Dabie Orogenic Belt from gravity-magnetic-electrical-seismic combination survey. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2292-2306.
- [111] 石耀霖, 曹建玲. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. 地学前缘, 2008, 15(3): 82-95.
Shi Y L, Cao J L. Effective viscosity of China continental lithosphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, 15(3): 82-95.
- [112] 刘善琪, 李永兵, 田会全等. 含湿孔隙岩石有效导热系数的数值分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4239-4248.
Liu S Q, Li Y B, Tian H Q, et al. Numerical simulation on thermal conductivity of wet porous rock. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4239-4248.
- [113] 滕吉文, 刘财, 韩立国等. 汶川—映秀 M_s 8.0 地震的介质破裂与深部物质运移的动力机制. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 559-583.
Teng J W, Liu C, Han L G, et al. The dynamical mechanism for medium rupture and motion of deep matter on

- Wenchuan-Yingxiu $M_s 8.0$ Earthquake, 2008. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2009, 39(4): 559-583.
- [114] 石耀霖, 曹建玲. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 102-110.
- Shi Y L, Cao J L. Some aspects in static stress change calculation—Case study on Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(1): 102-110.
- [115] Liu C, Zhu B J, Shi Y L. Coseismic stress variation and numerical analysis of 2011 Japan—Honshu 9.0 earthquake. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2011, 55(2): 118-130.
- [116] Dong S W, Zhang Y Q, Wu Z H, et al. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards growth of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(5): 938-948.
- [117] 孙玉军, 张怀, 董树文等. 利用三维孔隙弹性模型探讨紫坪铺水库对汶川地震的影响. *地球物理学报*, 2012, 55(7): 2353-2361.
- Sun Y J, Zhang H, Dong S W, et al. Study on effect of the Zipingpu reservoir on the occurrence of the 2008 Wenchuan earthquake based on a 3D-poroelastic model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2353-2361.
- [118] 严珍珍, 张怀, 范湘涛等. 汶川与昆仑山强烈地震激发的地球自由振荡频谱的对比分析. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4218-4230.
- Yan Z Z, Zhang H, Fan X T, et al. Comparative analysis on the characteristics of low-frequency energy released by the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4218-4230.
- [119] 柳畅, 石耀霖, 郑亮等. 三维黏弹性数值模拟华北盆地地震空间分布与构造应力积累关系. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3942-3957.
- Liu C, Shi Y L, Zheng L, et al. Relation between earthquake spatial distribution and tectonic stress in North China basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3942-3957.
- [120] Cloetingh S, Thybo H, Faccenna C. TOPO-EUROPE: Studying continental topography and Deep Earth—Surface processes in 4D. *Tectonophysics*, 2009, 474(1-2): 4-32.

(本文编辑 刘少华)