

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

高 锐^{1,2)}, 王海燕^{1,2)}, 张忠杰³⁾, 李秋生^{1,2)}, 陈 凌³⁾, 金 胜⁴⁾,
刘国兴⁵⁾, 贺日政^{1,2)}, 张贵宾⁴⁾, 卢占武^{1,2)}, 曾令森¹⁾, 许惠平⁶⁾

1) 中国地质科学院地质研究所岩石圈研究中心, 北京 100037;

2) 中国地质科学院深部探测与地球动力学重点开放实验室, 北京 100037;

3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4) 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

5) 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026;

6) 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

摘 要: 本文简要介绍国家科技专项“深部探测技术实验研究”第二项目“深部探测技术实验与集成”(SinoProbe-02)的研究目标、国际趋势与国内需求、主要研究内容、技术路线与研究方法等, 着重介绍拟聚焦研究的关键科技问题。预期通过本项目的实施, 实验并集成可行的深部探测方法技术组合和综合解释方法技术平台; 项目实施的深部探测实验剖面将切开实验区的地壳上地幔, 精细了解中国大陆典型地域自地表到深部的三维结构与地球动力学过程, 揭示岩石圈与软流圈等层圈与更深部地幔之间的相互作用, 为资源勘查、减轻灾害和保护环境提供新的科学依据。为深部探测能够带动地球科学进步和人类和谐发展提供例证, 推动“中国地壳探测工程”进程。

关键词: 深部探测; 方法技术; 大陆深部结构; 资源环境效应; 关键科学问题

中图分类号: P542.5; P95 **文献标志码:** A **doi:**10.3975/cagsb.2011.s1.03

“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

GAO Rui^{1,2)}, WANG Hai-yan^{1,2)}, ZHANG Zhong-jie³⁾, LI Qiu-sheng^{1,2)}, CHEN Ling³⁾,
JIN Sheng⁴⁾, LIU Guo-xing⁵⁾, HE Ri-zheng^{1,2)}, ZHANG Gui-bin⁴⁾, LU Zhan-wu^{1,2)},
ZENG Ling-sen¹⁾, XU Hui-ping⁶⁾

1) *Lithosphere Research Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *Key Laboratory of Earthprobe and Geodynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

3) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;*

4) *School of Geophysics and Geoinformation Systems, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

5) *College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026;*

6) *School of Marine Geology and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092*

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-02)、中国地质调查局项目(编号: 121010711813)和国家基金项目(编号: 40830316)联合资助。

收稿日期: 2010-11-05; 改回日期: 2010-12-31。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 高锐, 男, 1950年生。研究员, 博士导师。从事地球物理与深部构造研究。通讯地址: 100037, 北京市百万庄大街 26 号。电话: 010-68999730。E-mail: gaorui@cags.ac.cn。

Abstract: This paper deals with the research object, international trend and domestic demand, technical line and research methods of “Integration for Deep Exploration Techniques” (SinoProbe-02), which is the second program of “the Exploration of the Deep Interior beneath China’s Continent” (SinoProbe), with emphasis placed on the key science and technique problems. The aim is to experiment and integrate the available deep exploration methods, technical assemblies and the comprehensive interpretation technique platform. The deep exploration profiles to be implemented in this program will cut the crust and the upper mantle of the study area and probe in detail into the three-dimensional structure from the surface to the depth of the typical regions beneath China’s continent and the geodynamic process, so as to reveal the interaction between the lithosphere and the asthosphere, even the deeper mantle, and to provide new prediction and evaluation in such aspects as resource exploration, geological hazards reduction and environmental protection. SinoProbe-02 can also provide examples of deep exploration which can promote the progress of geosciences and the harmonious development of human beings, and accelerate the course of the project “SinoProbe”.

Key words: deep exploration; methods and techniques; deep structure of the continent; resource effect; key science problem

世界各国地球科学研究实践表明, 要想揭开大陆演化的奥秘, 获得其对资源、环境、灾害之影响的新认识, 必须进行深部探测。我国正面临资源、灾害和环境多重压力, 为了保障国家经济社会可持续发展, 顺应国际地球科学发展趋势, 参与全球科学竞争, 国务院在 2006 年《加强地质工作的决定》中提出实施“中国地壳探测工程”。先期启动了“深部探测技术实验研究”专项(英文简记 SinoProbe), 拉开了我国国家深部探测规划的帷幕。该专项实验并发展现代深部探测方法技术体系, 有效推动我国地壳探测方法技术准备和“中国地壳探测工程”规划的进程, 探测中国大陆典型地区的深部结构, 解决若干重大的关键的地球科学问题, 为油气、矿产等资源战略开发、减轻地质灾害等国家重大问题提供新的支撑。

“深部探测技术实验研究”专项首要任务是进行探测方法技术实验, 其中深部地球物理探测是主要依赖的现代高新方法技术, 具有重要作用, 是其他学科无法替代的。专项设置了以实验深部地球物理探测方法技术为核心的“深部探测技术实验与集成”项目(高锐, 2008), 是该专项的第二个项目, 编号: SinoProbe-02。深部探测技术实验与集成(SinoProbe-02)项目将采用高新的方法技术, 精心设计、严密组织、实地实施, 通过一系列方法技术实验, 将多种高新方法技术组合集成起来, 形成核心方法技术体系。建立能够穿透不同深度, 精确萃取地球内部结构与物理性质的关键探测方法技术组合, 以及探测数据的处理、成像、解释等技术平台。并通过对典型地区地球深部的探测, 切开地壳上地幔, 揭露内部结构, 解决关键的疑难地球科学问题和资源、环境效应相关问题。因而, 深部探测技术实验与集成(SinoProbe-02)项目是“深部探测技术与实验研究”

专项的重要内容之一。

本文简要介绍深部探测技术实验与集成项目(SinoProbe-02)的目标、国际趋势与国内需求、任务、主要研究内容、技术路线、工作部署等, 着重介绍拟聚焦研究的关键科学问题。关于深部探测意义已有专文论述(董树文等, 2009, 2011), 故本文不再赘叙。深部探测技术实验与集成项目的关键方法技术问题与技术难点及其创新研究途径是本项目研究的另一个重点, 内容较多, 将另行成文予以专门介绍。

1 战略需求-国际趋势与国内需求

1.1 开发深部资源——资源战略需求

进入 21 世纪, 人们更加认识到开发资源、减轻灾害、保护与利用环境对社会和谐持续发展的重要性, 特别是将探测地球内部结构、组成, 揭示整个地球系统演变的地球动力学过程与资源、环境的联系作为带动经济持续发展的重要战略。这些对于我国更显特别急需, 特别重要。温家宝总理近日对我国科技界发表讲话, 要大胆探索空间、海洋和地球深部, 努力提高地球深部资源探测水平, 充分挖掘和利用好各种资源(温家宝, 2009)。与发达国家相比, 我国资源勘查程度低深度浅, 开展地球深部结构探测与地球动力学研究, 勘查深部资源是快速提高资源储量的必行之路。

1.2 减轻灾害、保护环境——环境战略需求

地球科学研究的目的是认识地球、利用地球、保护地球。自 20 世纪末, 人们已经认识到并开始从向地球索取资源为主, 向资源开发与环境保护并重、实现科学开发利用和科学保护地球的方向转变。

地球动力学过程改变地球环境在上个世纪 90 年代就已被认识。青藏高原是一个全球示范例子。事实已经说明高原的抬升影响了全球的环境变化

(Kutzbach et al., 1993)。印度季风的明显加强, 大气中二氧化碳的明显减少, 气候变暖, 这些变化既可能是青藏高原隆起的影响又可能是其相互作用的结果。这种影响及相互作用实质体现出地球圈层的相互作用(高锐等, 2009)。

地球动力学过程引发地质灾害早已为人类感知。地球内部是一个动力系统, 自形成以来, 不断以对流的方式释放能量, 并引起火山、地裂、地震等现象。虽然经过数十年的探讨, 一些现象形成的机制已被确认, 但仍有许多难题未解, 需要结合更精细的探测, 揭露地球深部层圈结构与动力学过程, 以期达到减轻灾害, 保护环境的目的。

1.3 理论创新——科学需求与战略重点

地球深部层圈如何运转并以怎样的地球动力学过程影响地表, 是 21 世纪地球科学面临挑战的重要科学问题(杨孝文, 2008)。尽管板块构造学说已经相当完善和成熟, 但人们很少知道地幔对流系统与大陆岩石圈板块形成和演化关系, 尤其是古大陆克拉通根如何形成? 如何与对流相互作用? 怎样的过程控制他们的稳定性? 这些问题的回答依赖于人们对岩石圈和深部地幔之间的物理和化学作用的认知程度(Tackley, 2000)。

软流圈与岩石圈的相互作用被国际岩石圈计划列为优先深入的前缘问题(Tommasi et al., 2007)。地幔行为, 特别是揭示地幔对流如何驱动板块运动是理论发展的关键。精确描述这些运动与相互作用的时空行为, 计算、对比它们之间的联系, 近而从全球尺度, 在时间与空间范畴, 自地表到深部地幔, 建立起表征大陆的结构和地球动力学过程的基础框架是地球科学创新的基本需求。

近些年来, 为了解大陆地球动力学过程而实施的深部地球物理探测已经使人类大大获益, 促进了理论创新, 并发现新问题。例如, 虽然大洋板块俯冲并沉入地幔是地幔对流驱动板块运动最明显的记录, 但新近的研究发现了俯冲板块的后退现象及俯冲板块与下伏地幔流可能是脱耦的(Thoraval et al., 2006)。为适应理论发展需求, 提高探测精度和理论实验研究是探索和建立深部层圈相互作用与地球动力学过程的重要战略, 这已经成为全球地球科学家的共识。共同的利益需要深部观测以广泛合作的形式长期开展。

因此, 迎接 21 世纪地球科学理论发展面对的挑战, 首要战略就是使用高精度的地球物理和地球化学探测技术对地球深部层圈进行更精细探测与理论模拟, 揭露其内部结构、成分与物理化学性质, 阐明

岩石圈和深部地幔间复杂的物理-化学作用, 揭示岩石圈形成与改变的物理-化学过程, 恢复演变过程完整图象。不仅是欧洲的深部探测强国俄罗斯(Lipin et al., 2007)、北美的加拿大(Cloues, 2005), 而且亚洲的日本和澳洲都在实施新的探测与研究计划(Tohoku University, 2003; Hood, 2007)。所以说, 无论是从进一步深化板块构造理论还是从发展地球动力学新体系出发, 都有必要把探测地球深部层圈结构, 作为当前和今后一段时期内我国地球科学发展的战略重点之一。

2 项目目标和任务

2.1 项目目标

2.1.1 实验方法技术, 集成可行的方法技术组合

针对中国大陆复杂地质条件和深部探测对象, 实验深部地球物理精细探测高新方法技术、数据监控处理技术与特殊精细处理技术、以及构造地球物理互动综合解释技术。通过在实验剖面的实际应用检验, 建立并集成可行的方法技术组合, 制定有关方法技术规范(或规定), 为进一步的工作提供方法技术准备。

2.1.2 完成长剖面探测, 为科学研究与资源评价提供深部依据

通过实验剖面的探测成果, 精细揭示中国大陆典型地域的深部结构, 了解地壳/岩石圈/软流圈等层圈及其更深部地幔之间的相互作用, 促进解决重大地质问题; 对比亚洲相邻地区和世界其他大陆, 建立自地表到深部的结构框架与地球动力学过程。了解它们对资源矿产、地质灾害和生态环境的影响, 提供新的预测与评价依据。

2.1.3 培养人才, 形成基地

在实验研究过程培养人才, 将优秀的年青专家推举到第一线, 承担课题重要研究任务, 形成若干技术体系的研究团队, 建立和发展数据融合、综合解释方法技术等技术平台与技术实验基地。

2.1.4 科普服务, 促进实施“中国地壳探测工程”

在方法技术试验与解释地壳结构同时, 形成关于深部地球物理探测的科普媒介, 服务于公众。将把分散的技术成果集合起来, 用来解释探测远景、任务和所有的目的和战略。使公众真正知道深部地球物理探测是在给地球做 CT。回答公众经常问到如下的一些基本问题: “我们为什么需要 SinoProbe?”, “我们怎么使用 SinoProbe?”。为深部探测能够带动地球科学发展和人类和谐发展提供效果例证, 促进实施“中国地壳探测工程”。

2.2 项目主要任务

2.2.1 主动源探测技术实验与集成

包括被国际学者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。针对中国大陆青藏高原、西部造山带与前陆盆地、东北平原深层、华南山区结晶岩等复杂地质条件和深部物性特点, 实验研究探测不同类型地区的深部精细结构与物性变化的探测技术。在典型地区取得成效和经验后, 实验研究区域长剖面探测技术, 实验反射与折射主动源联合探测技术, 集成进行深部精细探测的技术组合和数据约束处理、数据成像等高新技术。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与数据处理技术。揭露实验研究区地壳精细结构、壳幔界面变化与深部构造格架。

2.2.2 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”。针对青藏高原、中部山地、东南沿海等特殊自然条件和深部物性特点, 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。实验移动宽频地震观测和大地电磁测深观测的技术及数据相互约束反演解释技术, 集成接收函数、各向异性与速度层析成像、电性层析成像等技术, 建立可视性描述深部壳幔精细结构与物性变化的技术组合。配合主动源探测技术实验, 建立实验研究区岩石圈、软流圈等深部圈层的物性结构与状态。

2.2.3 多尺度区域成像技术实验与集成

针对亚洲大陆地壳上地幔深部物性特点, 实验研究多尺度区域非均匀性连续介质地球物理反演技术, 对中、东亚各国及俄罗斯区域主动源和被动源地震观测数据进行多尺度区域速度成像研究, 以此为约束, 实验研究区域重力数据深部成像技术。实验集成描述地壳/地幔界面、岩石圈/软流圈界面和上地幔物性变化的物理参数成像技术。

2.2.4 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

在上述技术实验研究同时, 针对深部探测技术创新性和探测有效性进行集成与检验研究。为使实验探测剖面具有应用价值, 要完成与地震反射剖面长度相当的区域构造长剖面研究。研究连接地表到深层的深部断面地球物理解释技术, 综合集成多种地球物理方法探测剖面、构造长剖面等实验成果, 发展多信息相互约束、浅部-深部联动的互动解释技术。实现对浅部-深部变形、断裂性质与流体运移通道的描述, 从深部理解深层构造与表层构造的关系,

构建综合解释地壳演化及其与资源环境效应的断面图像。

3 技术路线与研究方法

3.1 技术路线

优先实验并集成国际最先进的探测技术, 既地震学探测技术。包括被国际学者称为深部探测技术先锋的“近垂直深反射地震剖面法”, 传统的中坚技术“宽角反射与折射地震剖面法”(也称: 深地震测深), 和近十年快速发展的“宽频带数字地震移动台站法”。

配套实验其他探测技术, 如大地电磁测深、高精度地面重力和磁力、航空重力和磁力测量、以及大地热流等方法进行辅助研究。从解释意义来说, 这些方法对地壳内部结构的垂向分辨能力较弱, 但在用于岩石圈物性横向比较和综合研究方面, 各有独到之处。

主动源与被动源结合探测。发挥主动源精细探测的技术优势, 在地壳尺度进行精细探测; 同时运用被动源探测深度大、对地球深部物质各向异性具有分辨能力, 对地幔进行多尺度成像; 实施主动源与被动源结合探测, 约束反演, 互为印证的技术研究路线, 以获取能够反映更为真实的地壳与上地幔结构及其动力学状态。

实验青藏高原冻土区与西部前陆构造带砾石区深井有效爆破技术和可控震源激发的技术。改装钻进技术和引进超大功率可控震源作为解决、提高青藏高原腹地巨厚地壳及盆地结合带深部地震勘探激发能量、抗干扰能力的技术途径。

技术集成与创新的国内外合作途径: 作为一种技术路线, 项目将集中国内外优秀专家和引进、开发、发展先进技术进行技术实验研究。项目组的骨干技术将主要由国内知名专家担任。聘请国际深部探测与地球动力学著名学者和青年学者参加项目研究, 引进先进的技术方法, 参与和承担数据精致处理与特殊处理, 互动解释地壳断面和浅表-深部地球动力学过程。

3.2 研究方法

在剖面上, 实验采用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”, 配合进行大地电磁方法, 同时在一个剖面使用。实验研究和改进不同类型地貌地质条件地区深部地震探测技术, 实验研究长剖面探测技术, 实验集成地震反射与折射主动源联合进行深部精细探测的技术组

合和数据约束处理、数据成像、互动解释等高新技术;

区域上,实验使用多尺度地幔层析成像技术,在骨干格架剖面约束下,共同揭示整个深部结构图像与变化,追踪地质过程演化。实验研究同时获取浅深地壳高分辨信息地震探测技术和浅深数据集成处理与联动解释技术,空间数据融合等技术,建立连接 TOP-DEEP 断面地球物理综合解释技术平台。以反射剖面作为骨架,支撑、建立和描述地壳变形的几何模型,运用数值模拟方法模拟地球动力学过程。运用位置重合反射剖面的精细构造地质恢复技术与地震剖面进行互动解释,实现对浅部-深层地质与变形描述,确定褶皱相对时序与断裂性质,地壳断面图像的最终综合解释等。

4 工作部署与计划工作量

4.1 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)以深地震反射剖面方法为技术先锋,不同方法联合探测,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技术体系。

(3)以实验示范为突破口,剖面与区域结合,建立典型地域的深部构造格架与地球动力学。

(4)国内外与多部门专家合作,坚持高起点、高水平设计、构造物理高端综合的集成路线,实现技术组合创新、重大科学发现、带动资源评价并举目标。

4.2 总体部署

遵循“兼顾已有基础部署区域长剖面,逐步形成贯穿盆地与山脉的综合探测剖面,促进基础研究,服务于资源勘查”的总体部署精神。与专项的矿集区、大地电磁标准网、地球化学基准网、科学钻探等项目实验结合。与石油天然气、金属矿等工业公司和地方单位合作,延伸剖面,增加探测精度,服务于资源远景研究。

拟以形成四条区域长剖面贯穿实验区域的盆地与山脉,剖面分布见图 1。

(1)青藏高原腹地剖面(①号剖面):分段跨越雅鲁藏布江缝合带与冈底斯构造带、怒江缝合带带、羌塘地体等,总长约 500 km。实验深地震反射/折射地震/宽频地震/等探测方法技术,带动青藏高原地学断面等原有资料的重新解释;

(2)青藏高原东北缘-华南剖面(②号剖面):自阿拉善地块南缘,向南跨越东昆仑/西秦岭造山带、松

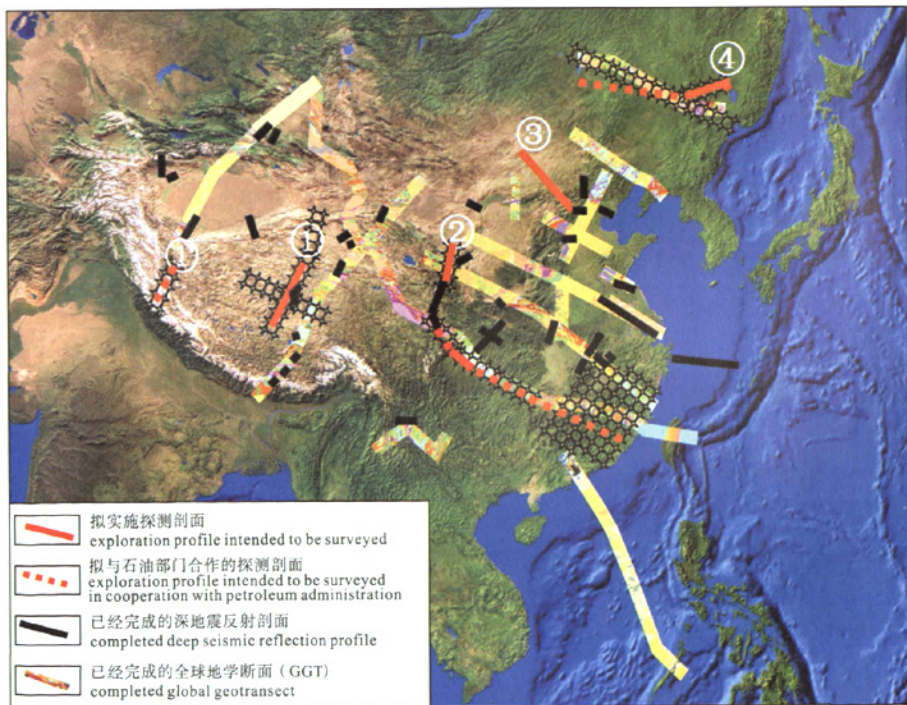


图 1 深部探测实验剖面分布示意图

Fig. 1 Diagrammatic map showing the distribution of deep exploration experimental profiles

潘地块、龙门山造山带、四川盆地、华南造山带, 抵达东南沿海。全长约 2500 km。其中西秦岭造山带-松潘地块-临夏盆地的 400 km 深地震反射剖面已经完成(高锐等, 2005, 2006a, 2006b; 王海燕等, 2007);

(3) 中亚造山带东段-华北剖面(③号剖面): 北起中亚造山带东段的兴蒙造山带, 向南跨越燕山造山带、到达华北北部。全长约 630 km。向南可以衔接已经完成的华北平原南部穿越郯庐断裂的 600 km 全地壳反射剖面。美国、德国等国的学者积极提议, 拟实施的穿越欧亚大陆到太平洋的地学大断面经过这里。

(4) 松辽盆地剖面(④号剖面)。拟与大庆油田和中国地质调查局合作, 实施横过松辽盆地, 并向西连接大兴安岭-海拉尔盆地, 向东延伸过三江盆地-虎林盆地的深部多目标探测剖面。全长约 1250 km。

上述剖面合计约 5000 km, 本项目拟完成 3000 km, 其余拟与有关部门合作完成。

5 关键科学问题

上述探测试验剖面不仅穿过中国大陆不同的构造单元, 适应探测方法技术实验, 而且跨越了我国重要的造山带与盆地。围绕上述剖面经过的典型地区, 本项目将聚焦研究以下 10 个关键科学问题。

5.1 青藏高原腹地剖面(①号剖面)

揭露印度板块与亚洲板块碰撞的时空行为与深部过程, 是令全球地球科学界着迷的大科学问题, 是当前国际青藏高原地球动力学研究的竞争焦点。

(1) 印度板块与欧亚板块南北汇聚与相互作用的深部过程

闻名于世的雅鲁藏布江缝合带标志着印度板块与欧亚板块自 60 Ma 前后的汇聚碰撞, 形成亚洲统一的大陆(尹安, 2001; 高锐等, 2004)。之后, 印度板块持续的向北俯冲与亚洲板块相互作用使青藏高原隆升。近百年来, 人们一直在寻找印度板块如何向北俯冲并与亚洲板块相互作用的证据, 并试图揭开印度板块与亚洲板块相互作用通过怎样的过程使青藏高原隆起的这个世界之谜(高锐, 1997)。近十几年来, 深部地球物理高新技术的探测已经获得印度板块与亚洲板块相向俯冲, 可能在青藏高原腹地羌塘地体下碰撞交锋的一些重要线索(高锐等, 1998, 2001; Shi et al., 2004; Zhang et al., 2005; 郑洪伟等, 2007), 成为构筑青藏高原隆升理论发展的重要支柱(Gao et al., 2005; 高锐等, 2010b)。但是目前发现的这些证据还不足以构建印度与亚洲陆-陆碰撞的时空行为与深部过程, 一些结果甚至相互矛盾(卢占武

等, 2006)。然而, 必须看到, 国际国内学者在青藏高原的实践, 已经接近获得打开陆-陆碰撞过程奥秘的钥匙, 实现这一过程的时限已经不远。

(2) 青藏高原腹地东西伸展的深部过程及其对资源影响

潜在的主体隐伏于羌塘地体之下的巨型南北走向伸展构造, 可能为建立陆-陆碰撞过程新机制带来机遇。我国学者得天独厚。新编的青藏高原航磁异常图(熊盛青等, 2001)显示出高原中部存在一条南北向低磁异常带, 主体在羌塘地体, 沿东经 89°~90°展布。经匹配滤波和重力小波变换等处理(贺日政等, 2007), 该低磁异常带醒目, 向北延伸进入巴颜喀拉-可可西里地体, 向南跨越怒江缝合带, 被拉萨地体的革吉-改则南-措勤北-申扎断裂和申扎-嘉黎断裂(高锐等, 1990)截断。高分辨率的全球 P1200 模型层析成像图像(Zhou et al., 2005)显示青藏高原中北部出现一规模巨大的近南北向区域性低速异常, 位置与低磁异常带相吻合。其延深至少在 120 km。Zhou 和 Murphy(2005)解释, 区域性低速异常可能是岩石圈拆沉作用引起的。郑洪伟等(2007)汇总青藏高原的远震宽频地震台站数据, 重新反演得到羌塘地体的 P 波层析成像图像, 发现羌塘地体下近南北向的低速异常自地壳 50 km 深处向下延伸至少到 200 km 深处。

这些证据表明, 羌塘地体下隐伏着一个南北向伸展构造, 规模巨大。形成背景可能源自印度与亚洲板块的汇聚作用, 即汇聚前缘岩石圈增厚, 向下发生断离, 引起软流圈对流, 形成伸展构造, 使高原腹地岩石圈跨塌。显然, 巨型南北向伸展构造会强烈影响到高原的隆升过程与资源配置、环境变化, 是当前青藏高原地球动力学研究不能不重视的大问题。

青藏高原腹地的羌塘盆地是我国唯一没有取得油气突破的海相盆地, 列为我国油气战略选区的重点攻关地区之一。其中, 油气盆地在高原隆升过程中是否很好的保存是取得油气战略发现必须面对的具有重要影响的基础问题。显然, 通过深部探测了解主体隐伏于羌塘地体之下的巨型南北向伸展构造的规模及其对油气盆地保存的影响可以为解决这一问题提供关键依据。在前人工作基础上(Ross et al., 2004), 初步实验获得结果(卢占武等, 2009)展示出可喜的前景。

本项目针对青藏高原腹地复杂而独特的岩石圈结构和巨厚的地壳, 穿越雅鲁藏布江缝合带、怒江缝合带和羌塘地体实施深地震反射剖面、宽角反射

与折射地震剖面、宽频地震的联合观测,结合 MT 探测试验,揭露深部精细结构和深部过程细节。

5.2 青藏高原东北缘-华南剖面(②号剖面)

(3) 中国大陆-古生代南北大陆汇聚的深部过程

板块汇聚(也称缓慢碰撞)是板块构造理论十分重要的内容,也是最基本的支点之一。美国地调局(U.S. Geological Survey, 1999)⑦根据岩石圈板块相关性质分出三种类型汇聚作用:大洋-大陆、大洋-大洋、大陆-大陆。并以印度板块向青藏高原南部俯冲表达大陆-大陆的汇聚作用。

然而,由于大陆的流变性质,全球大陆板块之间汇聚样式与深部过程视地域与时代不同而不同,表现出复杂性,因而是大陆动力学前沿科学问题。人们除了通过揭示新生代印度板块如何与欧亚板块汇聚来认识大陆汇聚之深部过程,还在追踪认识不同时期不同地点的大陆汇聚作用与大陆动力学过程。西秦岭造山带正处于古特提斯消亡中国大陆南北汇聚碰撞的构造部位(李春昱等, 1982; 王鸿祯, 1985; 刘训等, 1992), 特殊的构造位置使其成为研究古特提斯演化(黄汲清等, 1987)、古生代-中生代中国大陆南北汇聚的关键地域(任纪舜等, 1999)。它在中国大陆南北汇聚过程中,所起的作用及其本身发生的变化记录着中国大陆形成演化丰富的大陆动力学信息(张国伟等, 2002)。

(4) 陆内构造转换、盆山深部关系和成矿带、地震带深部结构

大陆板块汇聚后,大陆转为陆内复合变形过程。由于大陆历史久远,大陆的变形叠加了多期构造作用,复杂的复合改造关系使人们认识陆内过程遇到极大挑战。因此,揭露陆内复合变形过程也是大陆动力学重要的科学问题。青藏高原东北缘可能至少经历过早古生代(西秦岭北部-祁连山)和晚古生代-早中生代(西秦岭南缘)多次的洋盆消亡大陆汇聚和陆内变形,最终于二叠纪末-早三叠纪转为陆内过程(刘训等, 1992)。新生代青藏高原的隆升又强烈的改变了原有构造面貌。多期板块的集聚,多次复合的陆内过程使青藏高原东北缘一些重要地质问题长期争论,存留许多疑难问题没有解决(张国伟等, 2004)。

西秦岭又处于中央造山带向祁连山造山带转折的部位。随着青藏高原的抬升,祁连山再度崛起,与西秦岭一起成为青藏高原东北边界山脉。但两者的交接关系并不清楚。西秦岭南部与东昆仑的航磁特征明显不同,说明两者基底性质可能不同(高锐等, 2006a, b)。地球化学的研究结果也显示西秦岭与东

昆仑基底构造性质不同(张宏飞等, 2005)。这也许是中央造山带在西秦岭向祁连山转折的一种表现。祁连山向东延伸与贺兰山南北向构造带交合在一起。南北构造带如何过秦岭也是个谜(尹安, 2001)。所以,西秦岭又处于分割中国大陆东西的南北构造带转换域的边缘。因此,许多学者将西秦岭造山带称为中国大陆动力学研究的构造结,预言它是大陆动力学理论发展得天独厚的生长点(张国伟等, 2004)。

青藏高原东北缘的西秦岭造山带与两侧盆地是我国未来油气战略接替远景区,剖面向北经过白银、金川特大型矿集区,剖面还经过黄河急剧转弯处,地壳强烈活动,地质灾害频发地区,历史上曾经发生大地震。实验剖面将探测地壳的精细结构,揭示其陆内转换的深部过程,揭露盆山深部关系和成矿带深部结构,带动资源勘查的突破。理解地壳活动的背景,为预测和减轻地质灾害提供基础依据。

(5) 大陆造山带地壳变形-青藏高原东北缘隆升与扩展之深部过程

Molnar(1989)曾指出青藏高原通过地壳增厚方式向东北方向扩展,并认为地壳增厚是高原隆升的重要途径。也就是说青藏高原东北缘地壳生长最新,岩石圈结构记录着青藏高原向北增厚、隆升扩展的深部过程。

在国家自然科学基金和中石化联合资助下,我们完成了跨越处于青藏高原东北缘的松潘地块北缘与西秦岭造山带南部合作-唐克的深地震反射剖面(高锐等, 2006a),目的之一是试图揭露青藏高原东北缘的地壳厚度与地壳增厚过程。唐克-合作深地震反射剖面发现青藏高原东北缘地壳并不厚,若尔盖盆地-西秦岭造山带南部 Moho 深度平均 51 km(王海燕等, 2007)。在相近反射剖面位置先后实施的宽角反射和折射地震探测结果也反映出类似的结果(王椿镛等, 2003; 赵金仁等, 2005)。而且特别令人困惑的是,作为青藏高原边缘造山带,西秦岭理应具有较厚的地壳厚度,具有山根。然而,横过松潘地块与西秦岭造山带,平均 51 km 的 Moho 深度没有什么显著变化,几乎平平的。也就是说,从高原内部盆地到边缘造山带,本应加厚的地壳厚度却被减薄了。对应祁连山的结果(崔作舟等, 1995),这里起码减薄了 10 km。对照青藏高原其他边缘造山带陡峻的构造地貌,青藏高原东北缘宽阔的地貌可能与其下方平坦的 Moho 形态有关。因而,我们有理由相信,青藏高原东北缘地壳经历了高原隆升后强烈的伸展减薄作用。所以说,青藏高原东北缘地壳结构经历了高原地壳从增厚到减薄的变形过程,是研究大陆造

山带地壳变形之深部过程的大陆动力学天然实验室。

青藏高原东北缘新生代地壳变形强烈, 地震活动频繁, 野外构造变形填图发现青藏高原东北缘晚新生代通过一系列逆冲断裂、褶皱变形、左旋走滑及其伴随的山脉隆起和盆地消亡等方式向外扩展(张培震等, 2006), 构造变形以逆冲作用和地壳缩短为主要特征(袁道阳等, 2007), 可能反映了地壳加厚行为。第四纪晚期以来西秦岭北缘构造带断裂活动则主要表现为左旋走滑运动方式, 逆冲断裂活动向北迁移到阿拉善地块南缘的海原断裂和中卫—同心断裂(王志才等, 2006), 大范围的平缓构造迁移可能与深部伸展过程有关。

(6) 华南陆内变形深部过程及其对成藏成矿的影响

华南陆块经历了多期的板块聚散和陆内构造过程, 如早期超级大陆的形成与裂解、古生代-中生代的广泛岩浆作用与强烈变形, 以及新生代台湾造山带的形成, 等。华南是我国最重要的油气和金属矿工业基地之一, 不言而喻, 华南岩石圈结构及其成矿效应受到国内外广泛研究与长期关注, 称华南是研究陆内构造形成、演化过程及其资源效应的良好基地(张国伟, 2009)。

然而, 学者对华南的陆内变形过程存在比较大的分歧。对早期华南大陆的形成已经基本取得共识, 即华南陆块由扬子克拉通和华夏陆块在 9 亿年前后拼合而成(Ye et al., 2007; Li et al., 2008; Zhai W X et al., 2008)。比较突出的分歧是何时开始陆内变形? 经历了几期变形? 陆内变形的标志是什么? 陆内变形的机制是什么? 是板块体制, 还是存在有别于板块体制的大陆内部构造变形机制? 如果存在, 其变形的深部过程又是什么? 怎样从岩石圈尺度描述大陆内部构造变形的深部过程?

板块构造学说认为变形发生在板块的边缘, 板内基本不变形。华南陆块内部无论古生代还是中生代岩浆活动均十分强烈、分布广泛, 地层发生缩短卷入褶皱变形。过去的解释但是现在受到很大争议的看法认为华南陆块拼合后又发生裂解, 在重新拼合过程中由于板块的俯冲碰撞作用导致了广泛的岩浆作用与构造变形。经历多年的调查研究, 有较多文献报道华南陆块拼合后发生过裂解(Li et al., 2008; 张世红等, 2008; Zhai Z X et al., 2008)。争议的焦点是裂开的规模, 是否裂开出现大洋? 在华南内部, 到目前没有发现公认的古生代板块缝合带及其配套的沉积建造。越来越多的学者认为, 华南大陆形成后, 发生在其内部的若干地质事件均属陆内构造过程。

特别值得研究的是华南大面积分布的中生代岩浆岩形成机制, 以往流行的看法认为形成于中生代太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲。李正祥和李献华(Li, et al., 2007)又提出了太平洋板块低角度俯冲模型来解释从大陆边缘到大陆内部大面积分布的, 时代新老交替变化的中生代岩浆岩的成因。但是地震波层析成像研究显示(Lallemand, 2001; Wang et al., 2006), 沿台湾碰撞带, 太平洋板块并不向欧亚大陆下俯冲, 恰恰相反, 欧亚板块正向台湾造山带下高角度俯冲, 两个板块汇聚在台湾造山带下。若这种岩石圈板块汇聚图像可以向前推演到中生代, 那么华南大片的中生代岩浆岩的形成机制就须另外思考。

本项目将实施的探测实验大剖面横过华南, 以深地震反射剖面为先导、配合宽角反射与折射地震剖面、宽频地震观测、大地电磁观测, 深入探测华南岩石圈的精细结构和构造特征, 揭示大陆变形的时空行为, 建立浅表现象与深部地壳上地幔过程之间的联系, 如, 寻找可能存在的汇聚边界, 厘定其性质(板块缝合带? 大陆岩石圈断裂?), 揭露岩浆岩岩体延伸和可能存在的岩浆通道及地幔羽结构, 等等。不仅会促进大陆内部构造弥散变形机制和大陆构造演化新理论体系研究, 而且对我国重要矿产与油气资源的勘探和开发, 减少地震的危害性等方面具有现实意义。

(7) 东南沿海与台湾海峡地壳构造与地震活动性

台湾海峡处于全球构造的特殊部位, 台湾岛是一个全球最活跃的大陆板块与大洋板块碰撞形成的造山带范例(Wu et al., 1997), 是研究洋陆板块碰撞/俯冲过程的野外实验室。菲律宾海板块(太平洋板块一部分)以每年约 8 cm 的速率向西北方向运动, 与欧亚大陆碰撞, 使得台湾岛抬升(王锦华等, 2005)。台湾造山带属西太平洋岛弧系的一环, 向西凸出, 它与中国东南沿海大陆之间没有边缘海, 也没有深海沟相伴随, 也就是说, 台湾海峡及其两侧的东南沿海和台湾的大部分同属一个大陆地壳, 台湾岛抬升与台湾海峡下沉是板块构造体制下相互联系的响应。台湾海峡及两侧邻区频繁发生的地震活动与地质灾害, 表现出台湾海峡及邻区地壳构造的强烈活动性。台湾 1999 年集集大地震和福建泉州 1604 年 8 级大地震(丁学仁等, 2005)都曾给海峡两岸人民造成巨大的生命财产损失。

然而, 至今人们还未能掌握海峡两岸地震发生的机制及其规律, 对该地区地壳结构构造的复杂性、演变规律及其动力学过程都知之甚少。必须从探测海峡两岸的地壳精细结构入手揭示地壳的活动

规律与地震发生机制。

由于众所周知的原因,目前还不能横过台湾海峡实施海上地壳结构的直接探测。本项目将试验在东南沿海摆放宽频地震仪,接收近震与远震事件,试验接收海上气枪震源。配合大地电磁测深,运用先进的技术方法反演东南沿海至台湾海峡的深部结构,探讨板块相互作用与地震活动性。

5.3 中亚造山带东段-华北剖面(③号剖面)

(8)中亚造山带(东段)造山动力学与华北克拉通陆内裂谷形成深部过程

在固体地球科学领域,华北地区有许多举世瞩目的地质现象和重大地质难题:例如①关于地台基底和巨厚盖层组成、演化和克拉通破坏:从本世纪初开始,人们较普遍接受华北地块有一个~18 亿年前稳定下来的、由更古老的不同的陆核拼贴而成的结晶基底(翟明国等, 2000; Zhao, 2001; Lu et al., 2008)。但是我们对这些基底碎块的差异、界线、拼贴或碰撞方式以及这些陆核和世界其他克拉通陆核结构、物质成分之间的对比关系了解很少,对华北克拉通演化与世界其他古大陆或超大陆演化之间的关系了解也很少(张世红等, 2002; 王鸿祯等, 2002; Zhao et al, 2002; Zhang et al, 2006)。今天的“克拉通”破坏(吴福元等, 2008; 嵇少丞等, 2008)从深部构造的角度理解就是一种“去根”作用,古老的克拉通的深部被新生的岩石圈地幔置换掉了。这一科学命题的提出主要基于岩石学、地球化学的“点观察”。目前的当务之急就是要寻找更连续、更广泛的深部构造的证据以了解是整个克拉通范围发生了“去根”作用,还是局部地、有选择地发生了这种作用。如果是局部的现象,这种作用是受古老基底不同的构造单元控制还是受新体制下大陆边缘不同构造部位控制?人们已经普遍认识到深部探测是解决这些问题的必要途径。同时,需要的是浅部构造分析和深部探测结果的联合解释。②燕山地区在中生代发育强烈地岩浆活动和大规模的构造变形,但这一地区远离当时的大陆边缘,基于这些特征,中国学者提出了板内造山带的概念(例如,宋鸿林, 1999),也受到国际学术界的重视。但对这一造山带的解剖却不能搬用经典的俯冲造山或碰撞造山模式。燕山造山带浅部推覆变形的研究已经有相当好的基础,将其和岩石圈深部探测的成果联合解释,有望建立板内造山带的构造模型。③上世纪的最后的二十年里,人们曾经将大型伸展构造和华北岩石圈减薄在地球动力学范畴里重点研究,那时还没有“华北克拉通破坏”的概念。现在许多学者将伸展构造、火山活动与

克拉通破坏研究联系起来(王涛等, 2007; 刘俊来等, 2008)。事实上,大型伸展构造活动的时间和范围都大大超过目前认识的克拉通破坏的范围。华北及其邻区中新生代盆地拥有绝对优势数量的油气资源,而且深部已经开始显示良好的勘探前景。对盆地区实施深部探测具有科学和实用的双重意义。④郯庐断裂是中國大陸最著名的陆内走滑断裂之一,有国际学者将其与美国大陆圣安德列斯断层同等看待。美国深部探测计划“Earthscope”的“SAFOD”项目近期在过去大量深部探测的基础上,沿圣安德列斯断层特殊设计了一系列大陆科学钻井,近水平地穿切其深部以获得运动学资料(详见 ICDP 网站)。我们的深部探测项目(SinoProbe-02)近期横穿被认为是郯庐断裂北延的依兰-依通断裂,完成了约 600 km 的全地壳地震反射剖面,发现了该断裂之下地幔上涌大规模的证据。显然,松辽盆地的形成受到这种地幔大规模作用的影响。联系到郯庐断裂穿过的渤海湾盆地,它是于新生代华北克拉通北缘发生的含油气大型裂谷盆地。已有的资料发现这里可能是华北克拉通岩石圈最薄的地方,其下可能存在着地幔柱。有理由相信,郯庐断裂带自华北盆地穿过渤海湾盆地、下辽河盆地到松辽盆地,形成了一条地幔上涌活动带,影响和控制地壳活动,形成大规模的资源会聚带。因此,郯庐断裂带的作用应受到新的重视,是何种原因使这里岩石圈减薄,地幔上升,发生陆内大型裂谷,是缘由郯庐断裂的陆内走滑剪切作用吗?深部探测剖面为这类研究无疑增加一个难得的机遇。与之相联系的,渤海湾盆地与燕山陆内造山带的接合关系涉及油气盆地的北延以及陆内变形的联系,也是许多学者多年想了解的重要问题。深地震反射剖面经过渤海湾盆地北缘,将揭露岩石圈尺度的山盆关系和盆地深部结构,促进上述问题的解决。⑤太行山地区是中生代岩浆活动剧烈的地段,也是现代地貌的一条重要分界,大兴安岭-太行山重力梯度带是最引人注目的地球物理现象之一。许多学者推测,大兴安岭-太行山梯度带是克拉通破坏的西界,但缺少确切的地质地球物理深部证据。⑥关于中亚造山带地区构造单元划分方面的主要深部构造科学问题有:所谓槽台边界的构造属性是什么?地台北缘元古代裂谷的深部还有没有迹象?需要进一步研究的还包括蛇绿岩带的深部构造特征、现在推测的几条缝合线的可靠性及其区域展布特征等等。晚古生代二连盆地可能是与松辽盆地连为一体的海相沉积盆地(张兴洲等, 2008; 王成文等, 2008, 2009),之前两者可能属于统一的大陆地块,

即佳-蒙地块。近来, 在二连盆地的古生界打出油气显示。深地震反射剖面穿过二连盆地, 可能揭示盆地的基底构造属性与古生界状态。

上面所举例的均是近年来国际学术界关注的热点或前沿地质问题。能够反映学术界和社会发展对华北地区开展深部探测的迫切需求和研究动向。华北地区连接欧亚大陆腹地, 国际岩石圈委员会和欧美学者提出和倡导的欧亚地学断面设计达到了中亚地区, 如能和华北剖面衔接, 中国学者在国际合作的地球深部探测中将发挥更重要作用。

5.4 松辽盆地剖面(④号剖面)

(9) 陆内大型油气盆地深部结构与形成的深部过程

松辽盆地是目前世界上已发现的油气资源最为丰富的非海相沉积盆地, 是我国石油天然气的重要工业基地。经地震探测与钻井揭露, 盆地内发育沉积厚度超过 10000 m。数十年的勘探开发工作取得了令人瞩目的成果, 对中国乃至世界大型陆内油气盆地形成的科学研究产生了深远的影响。由于近 50 年的开发, 松辽盆地主要含油层系资源量逐渐减少, 如何在松辽盆地深部和外围寻找新的资源是百年大庆建设的急需。近年来, 大庆油田在深层火山岩中发现天然气藏, 展示了深层油气勘探的喜人前景。但也存在以下一些关键的科学问题需要深部探测剖面予以精细揭露和深入研究。

①盆地基底构造属性(基底性质、叠合关系、连通性等); ②盆地间晚古生界结构比较、赋存空间规模与变形行为; ③陆内走滑断裂的席卷规模与成藏效应; ④下地壳结构特征、性质与深部过程; ⑤Moho、上地幔反射特征与地球动力学。

(10) 金属成矿带深部结构与成矿深部过程

深部探测实验剖面将跨过东北地区的主要岩浆岩构造带, 它们也是重要的金属成矿带。例如, 兴蒙成矿带、小兴安岭成矿带、张广才岭成矿带, 或它们的延伸部分, 等。虽然深部探测不一定能够直接找矿, 但是, 揭示成矿带的深部结构, 诸如, 隐伏的控矿断裂及其产状, 确定隐伏成矿岩体的顶面起伏与深部延伸, 地壳流体状态, 以及可能的地幔岩浆上涌通道(高锐等, 2010a), 等等, 对认识成矿深部过程, 提高深部探矿能力, 具有不可替代的作用。

6 方法技术难点与创新性(提纲, 详细将另文介绍)

6.1 方法技术难点问题

在探测方法技术实验方面, 本项目将针对主动源探测和主动源与被动源结合探测两方面的 5 类方

法技术难点问题进行实验研究。

(1)复杂地貌地质条件和不同类型深部物性结构地区的深地震反射剖面采集与数据处理的方法技术问题;

(2)深反射地震与折射地震联合探测的方法技术问题;

(3)主动源与被动源结合的探测技术与相互约束解释的方法技术问题;

(4)多尺度地球物理地幔成像的方法技术问题;

(5)地球浅部-深部互动解释的方法技术问题。

6.2 关键方法技术与创新性

针对上述 5 类探测方法技术难点问题, 拟聚焦以下 10 个关键技术进行实验研究。受篇幅所限, 每个关键技术具体研究方法与创新性途径将在另文详述。

(1)青藏高原巨厚地壳精细结构的深地震反射剖面采集与数据处理探测技术;

(2)中国不同类型前陆构造带(前陆冲断型、逆冲走滑型、断陷伸展型)深地震反射探测技术;

(3)华南花岗岩与火山岩地带主动源和被动源组合探测技术;

(4)克拉通盆地岩石圈尺度深反射地震精细探测技术;

(5)区域长剖面深反射地震与折射地震主动源同时采集与约束处理的探测技术;

(6)岩石圈/软流圈边界主动源与被动源探测技术;

(7)多尺度非均匀性连续介质地震波成像与密度成像技术;

(8)地幔成像可视化技术;

(9)透视 0~5 km 地壳精细结构与构造延伸解释技术;

(10)深部断面构造地球物理综合解释技术与数据融合技术。

参考文献:

- 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 尹周勋, 刘宏兵. 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造[J]. 地球物理学报, 38(增): 15-28.
- 丁学仁, 吴绍祖, 陈琳. 2005. 1604 年泉州海外大地震史料新析[J]. 华南地震, 25(2): 30-36.
- 董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe)[J]. 地球学报, 32(S1): 3-23.
- 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.
- 高锐, 李朋武, 李秋生, 管烨, 史大年, 孔祥儒, 刘宏兵. 2001.

- 青藏高原北缘碰撞变形的深部过程——深地震探测成果之启示[J]. 中国科学: D 辑, 31(B12): 66-71.
- 高锐, 李廷栋, 吴功建. 1998. 青藏高原岩石圈演化与地球动力学过程[J]. 地质论评, 44(4): 389-395.
- 高锐, 刘宏兵, 谭捍东, 金振民, 丁志峰, 朱介寿, 李秋生, 张贵宾, 李朋武, 贺日政. 2004. 青藏高原深部结构与碰撞动力学过程[M]//郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社: 57-116.
- 高锐, 卢占武, 刘金凯, 匡朝阳, 鄯少英, 李朋武, 张季生, 王海燕. 2010a. 庐-桐金属矿集区深地震反射剖面解释结果——揭露地壳精细结构, 追踪成矿过程[J]. 岩石学报, 26(9): 2643-2652.
- 高锐, 马永生, 李秋生, 朱铨, 张季生, 王海燕, 李鹏武, 卢占武. 2006b. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系——深地震反射剖面的揭露[J]. 地质通报, 25(12): 1361-1367.
- 高锐, 马永生, 朱铨, 李秋生, 张季生, 李仲远, 政天发, 李朋武, 王海燕, 朱海华. 2005. 松潘地块-西秦岭造山带岩石圈结构基本特征——深地震反射剖面揭露与位场多尺度分析[R]. 中国地球物理第二十一届年会论文集.
- 高锐, 孟令顺, 李莉. 1990. 青藏高原亚东—格尔木条带布格重力异常数字图象处理与地壳现代构造[J]. 中国地质科学院院报, 11(z1): 162-173.
- 高锐, 王海燕, 马永生, 朱铨, 李秋生, 李朋武, 匡朝阳, 卢占武. 2006a. 松潘地块若尔盖盆地与西秦岭造山带岩石圈尺度的构造关系——深地震反射剖面探测成果[J]. 地球学报, 27(5): 411-418.
- 高锐, 张国伟, 陈运泰. 2009. 地球层圈相互作用与地球动力学, 21 世纪中国地球科学发展战略报告, 中国科学院地学部地球科学发展战略研究组[M]. 北京: 科学出版社: 58-68.
- 高锐, 张忠杰, 王椿镛, 魏文博, 赵俊猛, 丁林, 王二七, 侯增谦. 2010b. 青藏高原的岩石圈与地球动力学, 青藏高原研究学科发展报告[R]. 北京: 中国科学技术出版社: 61-84.
- 高锐. 1997. 青藏高原岩石圈结构与地球动力学的 30 个为什么? [J]. 地质论评, 43(5): 460-469.
- 高锐. 2008. 深部探测技术实验与集成(SinoProbe-02)项目实施方案.
- 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 张季生. 2007. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析及其构造启示[J]. 地球物理学报, 50(4): 1131-1140.
- 黄汲清, 陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社: 1-78.
- 嵇少丞, 王茜, 许志琴. 2008. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J]. 地质学报, 82(2): 174-193.
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图及说明书[M]. 北京: 地图出版社.
- 刘俊来, GREGORY A-D, 纪沫, 关会梅, 白相东. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束[J]. 地学前缘, 15(3): 72-80.
- 刘训, 傅德荣, 姚培毅, 刘桂芳, 王乃文. 1992. 青藏高原不同地体的地层、生物区系及沉积构造演化史[M]. 北京: 地质出版社: 1-169.
- 卢占武, 高锐, 李秋生, 管焯, 张季生, 贺日政, 黄立言. 2006. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958—2004)[J]. 地球物理学报, 49(3): 753-770.
- 卢占武, 高锐, 李秋生, 贺日政, 匡朝阳, 侯贺晟, 熊小松, 管焯, 王海燕, KLEMPERER L S. 2009. 横过青藏高原羌塘地体中央隆起区的深反射地震试验剖面[J]. 地球物理学报, 8: 2008-2014.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[J]. 北京: 地质出版社.
- 宋鸿林. 1999. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨[J]. 地学前缘, 6(4): 309-316.
- 王成文, 金巍, 张兴洲, 马志红, 迟效国, 刘永江, 李宁. 2008. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 32(2): 119-136.
- 王成文, 孙跃武, 李宁, 赵国伟, 马小琴. 2009. 中国东北及邻区晚古生代地层分布规律的大地构造意义[J]. 中国科学 D 辑, 39(10): 1429-1437.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海. 2003. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学 D 辑, 33(增): 181-189.
- 王海燕, 高锐, 马永生, 朱铨, 李秋生, 匡朝阳, 李鹏武, 卢占武. 2007. 若尔盖与西秦岭地震反射岩石圈结构和盆山耦合[J]. 地球物理学报, 50(2): 154-161.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社.
- 王鸿祯, 张世红. 2002. 全球陆壳基底构造及新元古代大陆再造[J]. 地球科学, 27(5): 467-481.
- 王锦华. 2005. 九二—集集大地震(绪论)[M]//王乾盈, 宋国城, 辛在勤等编辑. 九二—集集大地震.
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 董英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义[J]. 地质通报, 26(9): 1154-1166.
- 王志才, 张培震, 张广良, 李传友, 郑德文, 袁道阳. 2006. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动——兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, 13(4): 119-135.
- 温家宝. 2009. 让科技引领中国可持续发展[N]. 人民日报, 2009-11-4(1)[2009-12-12].
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-74.
- 熊盛青, 周伏洪, 姚正照, 薛典军, 刘振军, 张永军. 2001. 青藏高原中西部航磁概查取得重要成果[J]. 中国地质, 28(2): 21-24.
- 杨孝文. 2008. 21 世纪地球科学十大挑战: 生命起源仍是谜[OL/EB]. [2008-03-14]. <http://www.sina.com.cn>.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 22(3): 193-230.
- 袁道阳, 张培震, 方小敏, 王志才, 宋春晖, 郑德文. 2007. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程[J]. 地学前缘, 14(1): 243-250.
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古

- 元古代末-中元古代裂解[J]. 中国科学, 30 卷(增刊): 129-137.
- 张国伟(执笔修改). 2009. 关于华南大陆重大研究计划的初次研讨会议纪要.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 2002. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考[J]. 中国地质, 29(1): 7-13.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23-32.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, HARRIS N, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学 D 辑, 35(10): 914-926.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广良, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 26(1): 5-13.
- 张世红, 蒋干清, 董进, 韩以贵. 2008. 吴怀春华南板溪群五强溪组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层学意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(12): 1496-1503.
- 张世红, 王鸿博. 2002. 古大陆再造研究的回顾与展望[J]. 地质论评, 48(2): 198-213.
- 张兴洲, 周建波, 迟效国, 王成文, 胡大千. 2008. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 38(5): 719-725.
- 赵金仁, 李松林, 张先康, 杨卓欣, 张成科, 刘宝峰, 张建狮, 潘素珍. 2005. 青藏高原东缘莫霍界面的三维空间构造特征[J]. 地球物理学报, 48(1): 78-85.
- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 赵大鹏, 贺日政. 2007. 印度岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震 P 波层析成像证据[J]. 地球物理学报, 50(5): 1418-1426.
- dynamic study of crust and upper mantle in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Episodes, 28(4): 263-273.
- GAO Rui, LI Peng-wu, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, SHI Da-nian, KONG Xiang-ru, LIU Hong-bing. 2001a. Deep process of the collision and deformation in northern Tibetan plateau—implications from deep seismic sounding results[J]. Science in China (Series D), 31(Suppl.): 66-71(in Chinese).
- GAO Rui, LI Ting-dong, WU Gong-jian. 1998. Lithospheric evolution and geodynamic process of the Qinghai-Tibet plateau: an inspiration from the Yadong-Golmud-EJIN geoscience transect[J]. Geological review, 44(4): 389-395(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, LIU Hong-bing, TAN Han-dong, JIN Zhen-min, DING Zhi-feng, ZHU Jie-shou, LI Qiu-sheng, ZHANG Gui-bin, LI Peng-wu, HE Ri-zheng. 2004. THE deep structure and collision dynamic process of the Qinghai-Tibet plateau[M]. //ZHENG Du, YAO Tan-DONG edited: Uplifting of TibeTAN plateau with its enviromental effects. Beijing: Science Press: 57-116(in Chinese).
- GAO Rui, LU Zhan-wu, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, HE Ri-zheng, HUANG Li-yan. 2005. Geophysical Probe and Geodynamic Study of the Crust and Upper Mantle in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. China, Episodes, 28(4): 263-273.
- GAO Rui, LU Zhan-wu, LIU Jin-kai, KUANG Chao-yang, Feng Shao-ying, LI Peng-wu, ZHANG Ji-sheng, WANG Hai-yan. 2010a. 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[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2543-2552.
- GAO Rui, MA Yong-sheng, LI Qiu-sheng, ZHU Xuan, ZHANG Ji-sheng, WANG Hai-yan, LI Peng-wu, LU Zhan-wu. 2006b. Structure of the lower crust beneath the Songpan block and West Qinling and their relation as revealed by deep seismic reflection profiling[J]. Geological Bulletin of China, 25(12): 1361-1367(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, MENG Ling-shun, LI Li. 1990. THE imagery processing of gravity anomaly in the Yadong-Golmud strip on Qinghai-Xizang plateau and its recent crustal structure[J]. Bulletin of the Academy of Geological Sciences, 11(z1): 162-173(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, WANG Hai-yan, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, LI Peng-wu, Kuang Chao-yang, LU Zhan-wu. 2006a. Tectonic relationships between the Zoige basin of the Songpan Block and the West Qinling orogen at lithosphere scale: results of deep seismic reflection profiling[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(5): 411-418(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, ZHANG Guo-wei, CHEN Yun-tai. 2009. the interaction of the layered structure in the interior of the earth and the geodynamics, Geosciences development stragery research

References:

- CLOWES R M. 2005. THE Evolution of a Continent Revealed 2002-03 to 2004-05 Final Report for NSERC[OL/EB]. [2010-10-10]. <http://www.litho.ualgary.ca/atlas/index1.html>.
- CUI Zuo-zhou, ZHAI Qiu-sheng, WU Chao-dong, YIN Zhou-xun, LIU Hong-bing. 1995. THE crustal and deep structures in Golmud-EJIN Qi Ggt[J]. Chinese J. Geophys, 38 (Suppl. II): 15-28(in Chinese with English Abstract).
- DING Xue-ren, WU Shao-zu, CHEN Lin. 2005. New explanation of the historical data about the macroquake occurred in the sea near QuanZHOU in 1604[J]. South China Journal of Seismology, 25(2): 30-36(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group. 2011. Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(S1): 3-23.
- 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(in Chinese with English abstract).
- GAO R, LU Z W, ZHAI Q S. 2005. Geophysical survey and geo-

- group, the 21 century China's geosciences development report[R]. Beijing: Science Press: 58-68(in Chinese).
- GAO Rui, ZHANG Zhong-jie, WANG Chun-yong, WEI Wen-bo, ZHAO Jun-meng, DING Lin, WANG Er-qi, HOU Zeng-qian. 2010b. Report on advances in Tibetan Plateau research[R]. Beijing: Sciences and Tecnology publishing company in China: 61-84(in Chinese).
- GAO Rui, ZHU Hai-hua, LU Zhan-wu, GUAN Ye, BAI Jin, ZHENG Hong-wei, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, ZHANG Ji-sheng, LI Zhong-yuan, LI Peng-wu, WANG Hai-yan. The basic character of the lithosphere structure beneath the Song-Pan block- west Qinling orogenic belt-revealed by the deep seismic reflection and multi-scale analysis to the potential field[R]. The 21th annual meeting of the Chinese Geophysical Society(in Chinese).
- GAO Rui. 1997. Thirty problems of the lithospheric structure and geodynamics in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Geological Review, 43(5): 460-464(in Chinese with English abstract).
- HE Ri-zheng, GAO Rui, ZHENG Hong Wei, ZHANG Ji-sheng. 2007. Mathec-filter annalysis of aeromagnetic anomoly in mid-western Tibetern TibeTAN Plateau and its tectonic implications[J]. Chinese J. Geophys, 50(4): 1131-11140(in Chinese).
- HOOD L. 2007. National Grid and applications[R].
- HUANG Ji-Qing, CHEN Bing-Wei. 1987. The Evolution of the Tethys in China and AdjacentRegions[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ji Shao-cheng, WANG Qian, XU Zhi-qin. 2008. Break-up of the North China craton through lithospheric thinning[J]. Acta Geologica Sinica, 82(2): 174-193(in Chinese with English abstract).
- KUTZBACH J E, PRELL W L, RUDDIMAN W F. 1993. Sensitivity of Eurasian Climate to surface uplift of the TibeTAN Plateau[J]. Journal of Geology, 101: 177-190.
- LALLEMAND S. 2001. New insights on 3-D plates interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 335(3-4): 229-253.
- LI Chun-yu, WANG Quan, LIU Xue-ya, TANG Yao-qing. 1982. Explanatory notes to the tectonic map of Asia[M]. Beijing: Geological Publishing house(in Chinese).
- LI Z X, LI X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. Geology, 35(2): 179-182.
- LI X H, LI W X, LI Z X, LIU Y. 2008. 850-790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia[J]. Lithos, 102(1-2): 341-357.
- LIPIN A V, PETROV O V, ANISKIN A L, MYASNIKOV F V, KASHUBIN S N, ERICHEK Y M. 2007. Deep Seismic Studies Of Russia-Rusults and Problems, In A.V.Lipilin, O.V. Petrov eds, Modles Of THE Earth's Crust And Upper Mantle[M]. Papers of THE International Symposium on IGCP project: 474, 85-90.
- LIU Jun-lai, DAVIS G A, JI Mo, GUAN Hui-mei, BAI Xiang-dong. 2008. Crustal detachment and destruction of the North China craton: constraints from late Mesozoic extensional structures[J]. Earth Science Frontiers, 15(3): 72-81(in Chinese with English abstract).
- LIU Xun, FU De-rong, YAO Pei-yi, LIU Gui-fang, WANG Nai-wen. 1992. THE stratiraphy, paleobiogeography and sedimentary-tectonic development of Qihai-Xizang(Tibet) plateau in light of terrane analysis[M]. Beijing: Geological Publishing Horse(in Chinese with English abstract).
- LU S N, ZHAO G C, WANG H M, HAO G J. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: a review[J]. Precambrian Research, 160(1-2): 77-93.
- LU Zhan-wu, GAO Rui, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, HE Ri-zheng, HUANG Li-yan. 2006. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau(1958-2004)[J]. Chinese J. Geophys, 49(3): 753-770(in Chinese with English abstract).
- LU Zhan-wu, GAO Rui, LI Qiu-sheng, HE Ri-zheng, KUANG Chao-yang, HOU He-sheng, XIONG Xiao-song, GUAN Ye, WANG Hai-yan, KLEMPERER L S. 2009. Testing deep seismic reflection profiles across the central uplift of the Qiangtang terrane in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Physics. J., 8: 2008-2014(in Chinese with English abstract).
- MOLNAR P, LYON CAENT H. 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins[J]. Geophysical Journal International, 99(1): 123-154.
- REN Ji-shun, WANG Zuo-xun, CHEN Bing-wei, JIANG Chun-fa, NIU Bao-gui, LI Jin-yi, XIE Guang-lian, HE Zheng-jun, LIU Zhi-gang. 1999. THE Tectonics of China from a Global View(A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions)[J]. Beijing: Geol. Publ. House(in Chinese).
- ROSS A, BROWN L, PASSAKORN P. 2004. Deep reflection surveying in central Tibet: lower-crustal layering and crustal flow[J]. Geophysical Journal International, 156(1): 115-128.
- SHI D N, ZHAO W J, BROWN L. 2004. Detection of southward intracontinental subduction of TibeTAN lithosphere along the Bangong-Nujiang suture by P-to-S converted waves[J]. Geology, 32(3): 209-212.
- SONG Hong-lin. 1999. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts and a discussion on its dynamics[J]. Earth Sciences Frontier, 6(4): 309-316 (in Chinese with English abstract).
- TACKLEY P J. 2000b. Mantle convection and plate tectonics; toward an integrated physical and chemical theory[J]. Science,

- 288: 2002-2007.
- Tohoku University. 2003. The 21st Century COE program: Advanced Science and Technology Center of the Dynamic Earth(EASTEC)[OL/EB]. [2010-09-20]. <http://www.21coe.geophys.tohoku.ac.jp/>.
- THORVAL C, TOMMASI A, DOIN M P. 2006. Plume-lithosphere interactions beneath a fast-moving plate[J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L01301.
- TOMMASI A, GARRIDO C, KENDALL J M. 2007. International Lithosphere Program, Task Force 3: Lithosphere-Asthenosphere Interaction, Annual Report[OL/EB]. [2010-10-10]. <http://www.scl-ilp.org/>.
- U.S. Geological Survey. 1999. Understanding plate motions, This dynamics Earth, USGS[OL/EB]. [2010-09-20]. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/tectonics.html>.
- WANG Cheng-wen, SUN Yao-wu, LI Ning, ZHAO Guo-wei, MA Xiao-qin. 2009. Tectonic implications of Late Paleozoic stratigraphic distribution in Northeast China and adjacent region[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 39(10): 1429-1437(in Chinese).
- WANG Cheng-wen, JIN Wei, ZHANG Xing-zhou, MA Zhi-hong, CHI Xiao-guo, LIU Yong-jiang, LI Ning. 2008. New understanding of the late Paleozoic tectonics in northeastern China and adjacent areas[J]. *Journal of Stratigraphy*, 32(20), 119-136(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-yong, WU Jian-ping, LOU Hai, ZHOU Min-du, BAI Zhi-ming. 2003. P Wave Crustal Velocity Structure in Western Sichuan and Eastern TibeTAN Region[J]. *Science in China (Series D)*, 33(Suppl): 254-265(in Chinese).
- WANG Hai-yan, GAO Rui, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, KUANG Chao-yang, LI Peng-wu, LU Zhan-wu. 2007. Basin-Range Coupling and Lithosphere Structure between the Zoige and the Set Qinling[J]. *Chinese J. Geophys*, 50(2): 472-481(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-zhen, ZHANG Shi-hong. 2002. Tectonic pattern of the world Precambrian basement and problems of Paleocontinent reconstruction[J]. *Earth Science*, 27(5): 467-481(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-zhen. 1985. Atlas of the paleogeography of China and its prospect[M]. Beijing: Map Publishing house(in Chinese).
- WANG Tao, ZHENG Ya-dong, ZHANG Jin-jiang, WANG Xin-she, ZENG Ling-sen, TONG Ying. 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1154-1166(in Chinese with English abstract).
- WANG Z, ZHAO D, WANG J, KAO H. 2006. Tomographic evidence for the Eurasian lithosphere subducting beneath south Taiwan, *Geophys[J. Res. Lett.*, 33: L18306.
- WANG Zhi-cai, ZHANG Pei-zhen, ZHANG Guang-liang, LI Chuan-you, ZHENG De-wen, YUAN Dao-yang. 2006. Tertiary tectonic activities of the north grontal fault zone of the west Qinling mountains: implications for the growth of the northeastern margin of the Qinghai-TibeTAN plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 119-135(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-Yuan, XU Yi-gang, GAO Shan, ZHENG Jian-ping. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174(in Chinese with English abstract).
- WU T F. 1997. Taiwan orogeny: thin-skinned or lithospheric collision?[J]. *Tectonophysics*, 274: 191-220.
- XIONG Sheng-qing, ZHOU Fu-hong, YAO Zheng-xu, XUE Dian-jun, LIU Zhen-jun, ZHANG Yong-jun. 2001. Some important achievements were aquired from the generalized aeromagnetic survey in the middle and western Tibet[J]. *Geology in China*, 28(2): 21-24(in Chinese).
- YE M F, ZHAI X H, ZHAI W X. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block[J]. *Gondwana Res*, 12: 144-156.
- YIN An. 2001. Geologic evolution of the Himalayan-TibeTAN orogen in the context of phanerozoic continental growth of asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 193-230(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zhen, FANG Xiao-min, WANG Zhi-cai, SONG Chun-hui, ZHENG De-wen. 2007. Late Cenozoic tectonic deformation of the Linxia basin, northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 243-250(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, BIAN Ai-guo. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaeon and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 30(supp.): 129-137(in Chinese).
- ZHAI W X, ZHAI X H, ZHAI Z X. 2008. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Gondwana Res*, 13: 288-301.
- ZHAI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis[J]. *Precambrian Res*, 160: 179-210.
- ZHANG Guo-wei, DONG Yun-peng, YAO An-ping. 2002. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts[J]. *Geology in China*, 29(1): 7-13(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, YAO An-ping. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23-32(in

- Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-fei, JIN Lan-lan, ZHANG Li, NIGEL H, ZHOU Lian, HU Sheng-hong, ZHANG Ben-ren. 2005. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 35(10): 914-926(in Chinese).
- ZHANG Pei-zhen, ZHENG De-wen, YIN Gong-ming, YUAN Dao-yang, ZHANG Guang-liang, LI Chuan-you, WANG Zhi-cai. 2006. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the TibeTAN plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5-13(in Chinese with English abstract).
- ZHANG S H, LI Z X, WU H C. 2006. New Precambrian palaeomagnetic constraints on the position of the North China Block in Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 144: 213-238.
- ZHANG Shi-hong, JIANG Gan-qing, DONG Jin, HAN Yi-gui, WU Huai-Chun. 2008. New SHRIMP U-Pb age from the Wu-qiangxi formation of Banxi group: implications for rifting and stratigraphic erosion associated with the early Cryogenian(Sturtian) glaciation in South China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(12): 1496-1503(in Chinese).
- ZHANG Shi-hong, WANG Hong-zhen. 2002. A perspective of paleocontinental reconstruction[J]. *Geological Review*, 48(2): 198-213(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xing-zhou, ZHOU Jian-bo, CHI Xiao-guo, WANG Cheng-wen, HU Da-qian. 2008. Late Paleozoic tectonic-sedimentation and petroleum resources in northeastern China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 38(5): 719-725(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Z J, KLEMPERER S L. 2005. West-east variation in crustal thickness in northern Lhasa block, central Tibet, from deep seismic soundING data[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 110(B9): B09403.
- ZHAO G C, CAWOOD P A, WILDE S A, SUN M. 2002. A review of the global 2.1-1. 8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth Science Review*, 59: 125-162.
- ZHAO G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton[J]. *Geol. Mag.*, 138: 87-91.
- ZHAO Jin-ren, LI Song-lin, ZHANG Xian-kang, YANG Zhuo-xin, ZHANG Cheng-ke, LIU Bao-feng, ZHANG Jian-shi, PAN Su-zhen. 2005. Three dimensional Moho geometry beneath the northeast edge of the Qianghai-Tibet plateau[J]. *Chinese J. Geophys.*, 48(1): 78-85(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Hong-wei, LI Ting-dong, GAO Rui, ZHAO Da-peng, HE Ri-zheng. 2007. Teleseismic P-wave tomography evidence for the Indian lithospheric mantle subducting northward beneath the Qiangtang terrane[J]. *Chinese J. Geophys.*, 50(5): 1223-1232(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Hua-wei, MURPHY M A. 2005. Tomographic evidence for wholesale underthrusting of India beneath the entire TibeTAN plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(3): 445-457.