

# 大陆科学钻探选址与钻探实验

杨经绥<sup>1)</sup>, 许志琴<sup>1)</sup>, 汤中立<sup>2)</sup>, 刘嘉麒<sup>3)</sup>, 戚学祥<sup>1)</sup>, 张泽明<sup>1)</sup>,  
吴才来<sup>1)</sup>, 薛怀民<sup>1)</sup>, 张金昌<sup>4)</sup>, 张晓西<sup>5)</sup>, 姜 枚<sup>1)</sup>, 曾载淋<sup>6)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037;

2) 长安大学, 陕西西安 710054;

3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4) 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

5) 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074;

6) 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 江西赣州 341000

**摘 要:** 围绕中国大陆动力学基础地质研究的重大关键问题——板块汇聚边界的深部动力学、重要的矿产资源集聚区的成矿背景、成矿条件和深部找矿前景、盆山结合带对油气资源制约以及火山地质灾害预防等方面开展地质、地球物理研究、大比例尺地质调查科研填图和科学钻探选址预研究。在此基础上, 运用不同技术方案在条件成熟的选区实施 7 口先导孔的科学钻探; 开展“科学超深井钻探技术方案预研究”, 提出一整套深孔和超深孔钻探技术方案; 完成 2~3 个不同深度级别、不同应用场合及地层条件的科学钻孔的总体设计。

**关键词:** 大陆动力学; 科学钻探; 深部探测

中图分类号: P542.5; P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.s1.06

## Continental Scientific Drilling: Site Selection and Pilot Holes

YANG Jing-sui<sup>1)</sup>, XU Zhi-qin<sup>1)</sup>, TANG Zhong-li<sup>2)</sup>, LIU Jia-qi<sup>3)</sup>, QI Xue-xiang<sup>1)</sup>,  
ZHANG Ze-ming<sup>1)</sup>, WU Cai-lai<sup>1)</sup>, XUE Huai-min<sup>1)</sup>, ZHANG Jin-chang<sup>4)</sup>,  
ZHANG Xiao-xi<sup>5)</sup>, JIANG Mei<sup>1)</sup>, ZENG Zai-lin<sup>6)</sup>

1) Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;

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

4) Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;

5) College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

6) South Jiangxi Geological Survey Party of JBEDGMR, Ganzhou, Jiangxi 341000

**Abstract:** Geological and geophysical investigations and large-scale geological mapping will be carried out for site-selection of the pilot holes. The project is focusing on the key problems related to continental dynamics in China, such as deep dynamics along the convergent plate boundaries, geological background of major mineral resource regions, metallogenetic conditions and deep ore-prospecting, basin-range junction belt and its restriction on the formation of oil and gas resources, and prevention of volcanic disasters from a geological view. Seven 2000~3000 m deep pilot holes will be drilled for this new scientific drilling project, aimed at future site-selection of deep holes (over 10000 m deep) and preparation of deep drilling technique. Advanced techniques will be used for the 7 pilot holes and, on the basis of the achievements gained in “the pilot-research on deep scientific drilling technique”, two or three scientific drill sites with different depths, geological backgrounds and technical condi-

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-05)资助。

收稿日期: 2010-09-28; 改回日期: 2010-12-21。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 杨经绥, 男, 1950 年生。研究员, 博士生导师。主要从事青藏高原和造山带的岩石大地构造研究。E-mail: yangjing-sui@yahoo.com.cn。

tions will be designed for an integral plan of deep drilling in future.

**Key words:** continental dynamics; scientific drilling; SinoProbe

科学钻探是人类目前获得地球内部信息最直接有效的途径。通过数千米甚至上万米的大陆科学钻探,能解决一系列重大基础科学问题,包括揭示大陆地壳的物质组成与结构构造,校正地球物理方法对地球深部的遥测结果,探索地球深部流体系统、地热结构,监测地震活动,揭示地震发生规律,研究全球气候变化及环境变迁,探索地下微生物的分布及发育条件,预防环境及地下水污染,有效处理核废料,长期观察地球变化等等。因此,大陆科学钻探工程被形象地誉为“伸入地球内部的望远镜”,是“入地”之门的钥匙。

国际大陆科学钻探实施 40 多年来,已在全球形成宏伟的整合计划,正在实施的国际大陆科学钻探项目有 20 余项,主要研究领域包括板块构造、火山与地震活动、全球环境与气候变化、陨石撞击与灾变事件、地热与流体系统和大陆与地幔动力学等,并与国际大洋科学钻探联手,表明一个探测地球的新时代的来临(苏德辰等, 2010; 张金昌等, 2010)。

中国作为一个地质大国,以及国际大陆科学钻探委员会发起国之一,应从全球的视野,瞄准国际地学前沿和高端关键技术。根据国际大陆科学钻探计划的研究主题、中国大陆地质关键问题,特别是结合当前中国经济发展与社会需求,提出了中国大陆科学钻探工程 10 年长期规划的研究主题:复合沉积盆地和油气资源、矿床成因、大型活动断裂与火山地震灾害、汇聚板块边界与超高压变质带、地史时期的生物灭绝与环境变化,以及湖泊、冰川与气候等。提出要从国家加强地质工作的大局出发,谋划中国大陆科学钻探工作,推进中国地质科学和大陆科学钻探事业的发展,促进我国地球科学研究与资源开发、环境保护、灾害预报与预防的紧密结合,促进国家中长期科学和技术发展规划纲要中提出的地球深部钻探计划的实现,提高我国的可持续发展能力。科学超深孔钻探技术是为了配合地球科学研究而产生并发展的(董树文等, 2011),为地学研究提供地下实物资料和测试通道,是进行地球科学研究的重要手段,因而对地球科学研究目标能否实现将起到决定性作用。

本项目根据中国大陆地质关键问题,特别是结合当前中国经济发展与社会需求,提出围绕中国大陆动力学基础地质的重大关键问题——板块会聚边

界的深部动力学、重要的矿产资源集聚区的成矿背景、成矿条件和深部找矿前景、盆山结合带对油气资源制约以及火山-地热资源等方面开展地质、地球物理研究、大比例尺地质调查填图和科学钻探选址预研究。在此基础上,运用不同技术方案在条件成熟的选区实施 7 口先导孔的科学钻探实验,为大陆科学超深钻探的选址提供依据。与此同时,开展超深孔钻探技术方案预研究,为实施大陆科学超深钻探提供钻探技术准备(图 1)。

## 1 金川铜镍硫化物矿集区科学钻探选址预研究

### 1.1 科学意义

镁铁-超镁铁质岩浆岩中的 Ni-Cu-PGE 资源在世界上占有重要地位,其中镍金属储量的 34%,开采量的 60%来自岩浆硫化物矿床;世界铂族金属资源 90%以上来自镁铁-超镁铁质岩中的硫化铜镍型和铬铁矿型矿床。我国镍矿储量的 86%,铂族元素储量的 95%,铜矿储量的 11.9%来自与镁铁-超镁铁质岩有关的岩浆硫化物矿床。另一方面,镁铁-超镁铁质岩石是人们认识深部地质作用、地幔物质组成、壳幔岩浆作用、大陆动力学等方面的重要工具。因



图 1 大陆科学钻探选址预研究与钻探实验钻孔位置图

Fig. 1 Drilling sites of pre-research for continental scientific drilling project

此,对镁铁-超镁铁质杂岩体的研究一直是地学界的热点,这一研究不仅会给社会带来巨大的经济效益,而且为研究壳幔相互作用、地球深部动力学等提供了窗口。

甘肃金川矿集区是目前我国最大的镍、铜、钴、铂族金属基地,也是世界巨型矿集区之一,累计探明镍 550 万吨,铜 343 万吨,钴 16 万吨,铂族金属 200 吨。金川的镍占全国的 62%,铜占全国储量的 13%,钴占全国的 28%,铂族金属占全国的 57%。其产量镍占全国的 88%,钴占全国的 33%,铂族占全国的 90%以上。全球约 4000 万吨硫化镍金属储量,其实就集中在全世界不足 10 个矿床(田)之中,金川矿床 Ni 金属总储量排名世界第三,但单个岩体或矿床的金属储量位居世界第一。

金川超大型铜镍(铂族)硫化物矿床的一个重要特征是容矿岩体很小,面积仅 1.34 km<sup>2</sup>。小岩体型(或通道型)岩浆硫化镍矿床已普遍受到世界关注(Lightfoot et al., 1997; Wolfgan et al., 2001; Li, 2004),并取得一定找矿突破(如 Noril'sk, Voisey's Bay 等矿床)。寻找金川型岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床已成为全球找镍公司的梦想。

金川铜镍硫化物矿集区是我国铜、镍、钴、铂族元素等多金属矿产资源的重要产地,也是我国最具潜力的进一步寻找超大型有色、稀有和贵金属矿产的重要基地,更是解决我国矿产资源瓶颈的首选靶区。在今后相当长的时期内,金川资源能否可持续开发利用,在很大程度上决定了我国的镍、铜、钴、铂族资源的可持续开发利用前景。因此,开展金川铜镍硫化物矿集区科学钻探选址,在该区进行大陆科学深钻井研究,是解决金川矿床的成矿背景、成矿条件、深部成矿过程等科学问题的重要手段,对于我国的镍、铜、铂族金属资源的可持续开发利用有重大意义。在我国最大的镍、铜、钴、铂族金属基地——金川矿集区开展大陆科学深井钻探研究工作,不仅可以解决华北板块西南边缘地壳结构、物质组成、幔源岩浆演化与成矿过程等基础地球科学问题,而且也能为该矿集区深部资源潜力进行初步评价和验证,为解决铜、镍、铂族硫化物岩浆矿床的深部成矿过程、成矿构造背景、成矿条件等成矿基本问题起着至关重要的作用,对丰富成矿理论具有重大意义。

## 1.2 地质背景

金川铜镍硫化物矿集区位于华北板块西南缘的龙首山地区。该区从北而南各构造单元为:龙首山陆缘带、河西走廊边缘海盆、北祁连缝合带、中祁

连离散型岛弧地体、南祁连弧后盆地、柴达木陆块。

金川镍矿床的围岩为白家嘴子组深变质岩(AnZ),这套变质岩系的变质程度多在角闪岩相或更深,主要岩石类型有花岗片麻岩、片岩、混合岩、混合花岗岩、变粒岩、蛇纹石或条带状大理岩和斜长角闪岩等,属于华北地台西南缘阿拉善地块基底的一部分。一些地质学家认为白家嘴子组的部分地层的年代很可能是太古代,其地表露头与新地层呈断层接触。

金川镍矿床的矿石量大约为 5 亿 2 千万吨,平均品位:镍 1.05%,铜 0.68%,是与基性-超基性侵入体有关的岩浆硫化物矿床。容矿岩体总体走向 NWW-SEE,长约 6.5 km,东、西两端(III、IV 矿区)被第四系覆盖,在地表出露长度约为 4.5 km,宽 20~550 m,不整合侵位于白家嘴子组变质岩中,倾向 SW,延深数百米至大于 1100 m。矿体(Ni>0.5%)占整个岩体体积约 43%。金川岩体的平均化学成分非常接近于二辉橄榄岩的成分,主要岩石类型有二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、纯橄岩、橄榄二辉岩等。岩体经受了不同程度的蛇纹石化、绿泥石化、透闪石化、滑石-碳酸盐化,仅有 30%~40%的二辉橄榄岩和纯橄岩未发生蚀变,但岩体的火成岩结构仍普遍保留。岩体与大理岩、花岗片麻岩、混合岩及斜长角闪岩等深变质岩直接接触。主要矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、马基诺矿和方黄铜矿,少量白铁矿、黄铁矿、紫硫镍矿、针镍矿、墨铜矿和自然铂等。主要矿石类型有:块状矿石,特富矿, Ni 品位>7%;稠密浸染状(海绵陨铁状)矿石,富矿, Ni 品位 1%~3%;稀疏浸染状矿石,贫矿, Ni 品位≥0.05%。最好的矿体赋存于地表 400 m 以下。金川容矿岩体大致以 10°交角不整合侵位于前长城系白家嘴子组中,岩体直接与大理岩、条带-均质混合岩和片麻岩接触。现存岩体长约 6500 m,宽 20~527 m,延伸数百米至 1000 余米,最大延深超过 1100 m。岩体东、西两端被第四系覆盖,中部出露地表,上部已遭剥蚀,揭去覆盖,岩体基岩的面积约 1.34 km<sup>2</sup>。岩体走向为北西 50°,倾向南西,倾角 50~80°。岩体受北东东向压扭性断层错断,由西向东分为 4 段,依次编号为 III、I、II、IV 矿区(图 2)。

## 1.3 科学目标和研究内容

金川铜镍硫化物矿集区科学钻探选址预研究是围绕中国大陆动力学基础地质研究的重大关键问题之一,重要的矿产资源集聚区的成矿背景、成矿条件和成矿前景等方面开展地质、地球物理的预研究、大比例尺地质调查填图和科学钻孔选址;在此基础



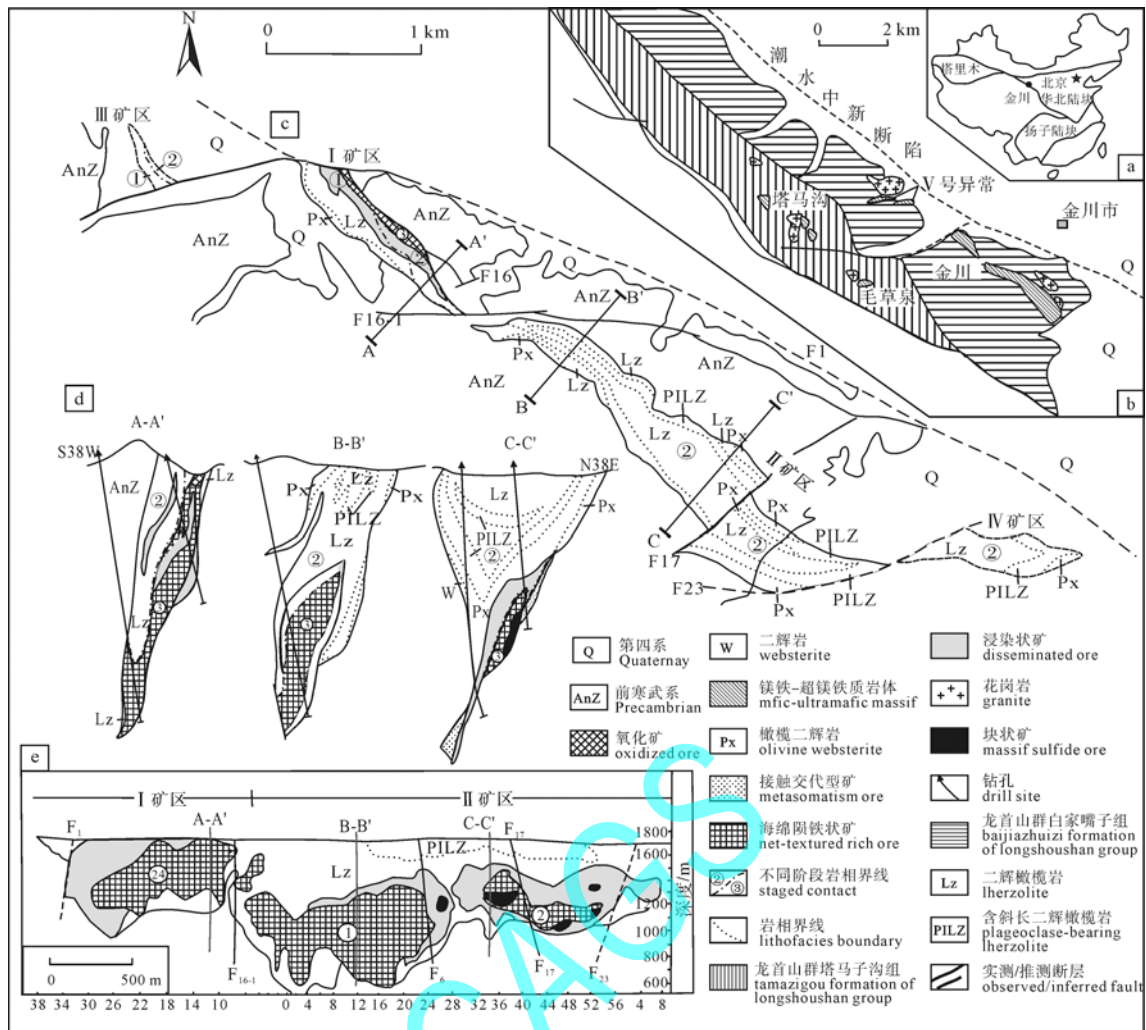


图 2 金川镍铜(铂族)矿床位置(1、2)平面(3)剖面(4)及纵投影图(5)

Fig. 2 Location of the Jinchuan Ni-Cu(Pt group) ore deposit(1, 2), plan(3); geological section(4); vertical projection diagram(5)

上, 选择确定合适地质地理位置, 布置和实施一口先导孔的科学钻探。通过科学深钻研究, 建立具有我国理论知识体系和创新性的镁铁-超镁铁岩铜、镍硫化物矿床的成矿机制与成矿过程以及成矿模式; 探讨该区壳幔物质演化、大陆动力地质演化对成矿物质的聚集与分异的控制作用。通过金川铜镍硫化物矿集区科学钻探选址预研究, 解决与镁铁-超镁铁岩铜镍硫化物有关的铜、镍硫化物多金属矿床的成矿背景、成矿条件及成矿前景等重大地质问题。为在龙首山地区开展深井钻探(>5000 m), 查明岩带和金川岩体的深部情况奠定基础, 为论证其必要性、可行性、确定钻井位置及钻孔设计提供资料, 为实施大陆科学超深钻探奠定基础。

尽管金川铜镍矿床是我国最大世界第三大的矿床, 但目前钻探深度仅 1000 m, 并已见矿。岩体的深部延伸和含矿性是解决和验证成矿理论的关键。

国外与国内关于岩浆铜镍硫化物矿床成矿理论有一定的分歧, 即是金属硫化物的即时熔离还是存在中间(或高位)岩浆房, 而查明深部岩体的岩石化学成分、物理化学和流体特征是解决成矿过程、成矿条件的关键。

拟通过地表地质调查、地球物理探测和一口深度 2000~3000 m 的先导孔科学钻探研究, 探测我国现有的最大的金川 Ni-Cu-Co-Pt 矿床的成矿深度和深部的资源潜力; 探索金川岩体的深部岩浆房, 研究岩浆硫化物矿床成矿的深部过程和成矿机制等, 以及金川岩体所在的龙首山超镁铁岩带形成的构造背景; 评价金川岩体外围的超镁铁岩的资源潜力和潜在的钻探靶区; 为在龙首山地区开展深井钻探(>5000 m), 查明岩带和金川岩体的深部情况奠定基础, 为论证其必要性、可行性、确定钻井位置及钻孔设计提供资料。具体的科学目标为: (1) 探查我国

最大的(世界第三)Ni-Cu-Co-Pt 矿集区的成矿深度及其深部和外围的资源潜力;(2)探索可能存在的深部岩浆房,研究金川 Ni-Cu-Co-Pt 岩浆硫化物矿床成矿的深部过程(源区,原始岩浆,硫源,同位素年代学,深部岩浆房与现存矿床以及围岩之间的物质递变和成矿机制等);(3)打穿F1断层,确定它对地质或成矿的控制意义。

拟通过科学钻探获取连续岩心样品,开展金川岩浆型铜镍硫化矿床成矿过程及成矿条件理论研究;通过与世界最大的三个同类型矿床——俄罗斯西伯利亚 Noril'sk 矿床、加拿大 Sudbery 矿床以及 Voisey's Bay 矿床进行成因对比,确定成矿岩浆起源、分异演化、成矿物质来源等成矿环境,建立矿床成因模型;通过开展巨量金属堆积机理研究,探讨 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床形成的机理、金属元素堆积过程与壳幔相互作用及地质背景间的关系,特别是流体在这一过程的作用;开展幔源岩浆作用与成矿作用关系研究(特别是矿浆与硅酸盐岩浆的分离控制因素,成矿流体特征等);运用岩石探针、地球物理、地球化学、构造地质学、同位素地质学及流体包裹体方法等,进一步探讨岩石圈-软流圈,壳幔之间物质与能量的交换过程,探索金川矿床成因与深部作用过程,建立一个更具典型性和科学性的金川模式(包括成矿模式和找矿模式)为矿区深部和外围找矿提供科学依据。

## 2 西藏罗布莎铬铁矿区科学钻探选址预研究

### 2.1 科学意义

铬铁矿是生产不锈钢不可替代的原材料。目前,中国是世界上最大的不锈钢消费国,铬铁矿一直是我国的短缺矿种,几乎完全依靠进口。世界上原生铬铁矿床有两种类型:一类为层状型铬铁矿床,它主要产于古老地台的层状镁铁-超镁铁杂岩中。另一类为豆荚型铬铁矿床,主要产在显生宙蛇绿岩中。

层状型铬铁矿床以矿层稳定,规模较大为特点。这类矿床以 Bushveld, Stillwater, Great Dyke 等铬铁矿床为代表。层状铬铁矿床及含矿杂岩产于稳定大陆地台区的岩浆分凝矿床,我国目前没有发现此类铬铁矿床。

豆荚状铬铁矿(podiform chromite)产于蛇绿岩造山带内,被认为是蛇绿岩特征性的矿产之一。豆荚状铬铁矿主要产在喜马拉雅-阿尔卑斯造山带、地中海周围、中东、东南亚、古巴、北美西部等地的

显生宙蛇绿岩内。目前已知哈萨克斯坦的肯皮尔赛铬铁矿床(>3 亿吨远景储量)和俄罗斯极地乌拉尔拉依兹矿床(6 亿吨远景储量)等巨型铬铁矿床全部为蛇绿岩型铬铁矿(Melcher et al., 1997, 1999; Makeyev, 1992),其他还有一些规模较大的同类型矿床。

我国西藏、新疆和内蒙古均产有蛇绿岩型铬铁矿,其中,西藏的蛇绿岩铬铁矿规模最大,但探明储量不到 1000 万吨。西藏的蛇绿岩与世界上其他蛇绿岩在形成条件和铬铁矿的含矿性方面是否存在可比性,是一个十分重要的、值得研究的问题。

最近,西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的地幔矿物群研究获得了重要进展(杨经绥等, 2008; 徐向珍等, 2008; Xu et al., 2009)。发现呈斯石英假象的柯石英和锆铪矿中发现金刚石包裹体(Yang et al., 2007),并发现四种新矿物(Bai Wen-ji et al., 2006; Fang et al., 2009)。金刚石与锆铪矿共生,表明形成于高温(>2000℃)高压环境。斯石英的形成压力大于 9 GPa,表明罗布莎铬铁矿可能形成于地幔深部(>300 km 深度)。尤其,从俄罗斯乌拉尔铬铁矿中再次发现大量微粒金刚石等超高压矿物(杨经绥等, 2007a),表明罗布莎并不是一个特例,其形成条件与乌拉尔的大型铬铁矿床存在可比性。深入开展罗布莎蛇绿岩铬铁矿的研究,有可能揭示地幔物质赋存和运移的规律,不仅仅对探讨蛇绿岩的成因、铬铁矿的成矿机理和深部地幔动力学具有创新性意义,并对铬铁矿找矿前景具有现实意义。

### 2.2 地质背景

西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带是喜马拉雅特提斯洋壳和地幔的残余,呈近 EW 向断续延伸约 2000 km。带中发育较为完整的蛇绿岩层序,蛇绿岩以洋中脊型(MOR)岩石组合为主,代表中白垩世喜马拉雅特提斯海的最后闭合带,被认为是中生代冈瓦那板块裂解再拼合的一条缝合带(王希斌等, 1987; 肖序常, 1984)。最近报道测得 MOR 型地幔和辉长岩墙 Sm-Nd 等时线年龄为  $177 \pm 33$  Ma(Zhou et al., 2002),辉绿岩锆石 SHRIMP 年龄为  $163 \pm 3$  Ma(钟立峰等, 2006),测得具俯冲带(SSZ)性质蛇绿岩的锆石 SHRIMP 年龄  $126 \pm 2$  Ma(Malpas et al., 2003)。该蛇绿岩带的罗布莎岩块中产有我国目前最大的铬铁矿床(矿石储量约 500 万吨)(王恒升等, 1983; 张浩勇等, 1996; Zhou et al., 1996)。

罗布莎蛇绿岩块主要由地幔橄榄岩和堆晶岩组成,以及少量被肢解的火山岩和硅质岩作为混杂岩出露在堆晶岩的北侧(图 3)。岩块与南侧三叠系呈断

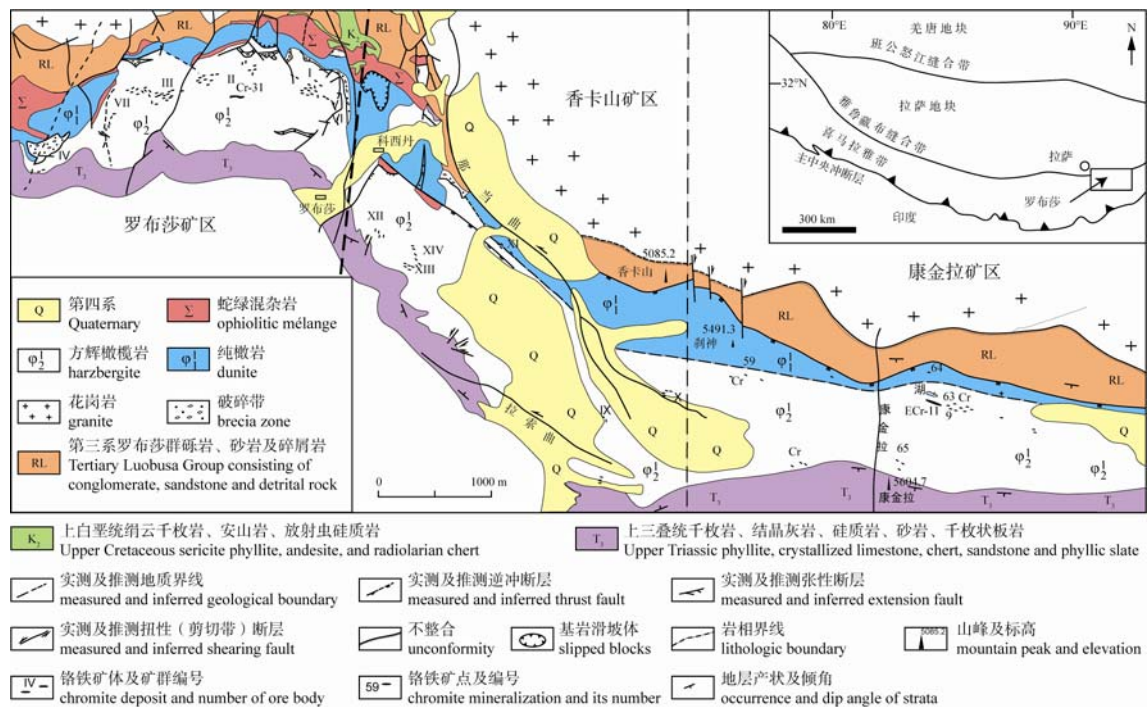


图 3 西藏罗布莎蛇绿岩地质图(据徐向珍等, 2008 修改)

Fig. 3 Geological map of the Luobusha ophiolite (after Xu et al., 2008)

层关系、北侧被第三系不整合覆盖。地幔橄榄岩主要为方辉橄榄岩和纯橄岩, 少量二辉橄榄岩; 堆晶岩主要由异剥橄榄岩、辉石岩、纯橄岩和辉长岩组成(王希斌等, 1987)。铬铁矿体产在方辉橄榄岩中, 呈长透镜状, 为典型的阿尔卑斯型, 即蛇绿岩铬铁矿床(王恒升等, 1983; 王希斌等, 1987)。铬铁矿石结构包括层状、浸染状、豆状和反豆状。矿体边缘一般具有一层薄的纯橄岩外壳, 矿体和纯橄岩之间不属断层接触, 但岩性界线清楚。铬铁矿具成群分布、成带集中的特点。最大矿体长 250 m, 宽度 100 m, 厚 5 m。前人将罗布莎铬铁矿床分为 3 个矿区, 罗布莎矿区在西边, 面积 7 km<sup>2</sup>, 香卡山矿区在中间, 面积 14 km<sup>2</sup>, 及康金拉矿群, 面积 15 km<sup>2</sup>。据现有地质资料, 该地区罗布莎矿区和香卡山矿区仍然具有找矿前景, 康金拉地段也是一个找矿的远景区。

### 2.3 科学目标和研究内容

西藏罗布莎铬铁矿床是我国目前最大的铬铁矿床, 是进一步开展深部找矿和解决我国铬铁矿资源匮乏和找矿突破的首选靶区, 也是研究铬铁矿成因的关键地区。拟通过地表地质调查、地球物理探测和一口深度 2000~2500 m 的先导孔科学钻探实验, 探测西藏罗布莎超镁铁岩铬铁矿床的成矿深度和深部资源潜力; 查明铬铁矿在该超镁铁岩体中分布特征和赋存规律, 探讨铬铁矿的成矿条件和成矿机制;

查明铬铁矿赋矿岩体超镁铁岩的岩体特征、成因和构造背景, 探讨铬铁矿与超镁铁岩的成因关系; 评价罗布莎超镁铁岩体的资源潜力和潜在勘探靶区; 为开展西藏雅鲁藏布江缝合带中超镁铁岩体的可能深井钻探和资源评价奠定基础。

尽管罗布莎是我国目前最大的铬铁矿床, 但前人钻探没有超过 800 m 深度, 并缺乏含铬铁矿岩体的深部地球物理资料。本课题将探讨的两个主要问题是: (1)罗布莎超镁铁岩体的深部延伸和矿体的赋存状态; (2)铬铁矿的成因和赋矿岩体的构造背景。这两个问题的解决, 对罗布莎岩体的深部找矿和外围找矿十分关键。其中关键问题和拟开展的工作有: (1)查明不同类型铬铁矿的矿物组合、形成条件; (2)查明铬铁矿和容矿围岩的成因联系; (3)开展地幔超高压矿物的结构和形成条件的研究; (4)开展高温高压实验, 模拟深部地幔矿物形成的物理化学条件。

## 3 云南腾冲火山-地热构造带科学钻探选址预研究

### 3.1 科学意义

地处印度板块与欧亚大陆碰撞前缘的腾冲地块是青藏高原东南缘构造最复杂、岩浆活动最活跃、矿产资源丰富、地热异常最高的地区, 也是中国西南唯一具有潜在火山灾害的地区。前人从不同角度



对腾冲地块构造演化、岩浆活动和成矿作用进行了研究,从总体上勾勒出腾冲地块在青藏高原形成演化过程中的构造角色,以及在三江地区构造格局中的位置。但是,由于该区经历了多期构造运动的改造,岩浆活动和成矿作用具有多期次、多阶段的特点,地质条件十分复杂,加之地形变化大、交通条件较差、植被覆盖率高等因素的影响,地质研究程度总体较低。如腾冲地块内构造变形样式及其演化,岩浆活动特征及其与冈底斯花岗岩带的成因联系,火山岩盆地的形成机制,火山喷发旋回及其与新生代构造活动的关系,导致地块内以锡为主的多金属成矿带与冈底斯岩浆岩带中以斑岩铜矿为主的多金属成矿带明显不同的内在因素、以及高热异常区的成因等方面的研究都比较薄弱,极大地制约了揭示该区在青藏高原构造演化过程中的动力学机制和青藏高原东南缘壳-幔动态演变过程。由此可见,腾冲地区处于印度板块与欧亚大陆挤压碰撞带的前缘地带,经历了中特提斯洋和新特提斯洋俯冲闭合、地块旋转、逃逸等大规模构造运动及相应的岩浆活动和成矿作用改造,形成了集大型走滑构造、岩浆活动、地热和大型有色金属成矿作用于一体的构造变形域,是研究青藏高原物质向东南流动和逃逸动力学机制及新生代火山活动和成矿作用的最理想地区,是实施科学钻探工程的首选地区之一。

### 3.2 地质背景

西南“三江”(金沙江,澜沧江,怒江)构造带位于冈瓦纳古陆与欧亚古陆的挤压碰撞带,特提斯与环太平洋两个巨型造山带的结合部,是古特提斯洋(澜沧江洋、哀牢山-金沙江洋)和新特提斯洋(怒江洋)相继俯冲碰撞促使兰坪—思茅地块、保山—孟连地块和腾冲地块于燕山晚期相互拼合(从柏林等, 1993)形成的复杂构造带。在喜山运动期间,印度板块向北俯冲碰撞导致青藏高原东南缘块体发生大规模旋转和逃逸(Tapponnier et al., 1982),块体之间发生大规模走滑作用(罗照华等, 2006a),形成由总体走向近南北,向北收敛、向南撒开的三条大型走滑构造带和三个地块组成的构造格局。

腾冲地块(包括向西南延伸至缅甸境内部分)位于三江构造带西部,夹于怒江和缅甸东部密支那缝合带之间,是经历怒江洋(170~100 Ma, 莫宣学等, 2006)和密支那(或雅鲁藏布)洋(150~65 Ma, 莫宣学等, 2006)消亡、印度板块向北俯冲碰撞而发生大规模旋转、逃逸、走滑形成的青藏高原东南缘构造变形域的一部分。在大地构造上,怒江缝合带是班公

湖—怒江缝合带的南延部分,缅甸东部密支那缝合带则向北与雅鲁藏布江缝合带相连,因而腾冲地块与拉萨地块相对应,腾冲地块东部侏罗—白垩纪岩浆岩带与念青唐古拉岩浆岩带连接,腾冲地块西缘盈江岛弧性质的同碰撞花岗岩带与西藏著名的冈底斯岩浆岩带可归属为同一个构造单元(季建清, 2000)。

腾冲地块内部的构造变形十分醒目。东部以近南北向怒江大型走滑构造带(又称高黎贡走滑构造带)与保山—孟连地块相连,西部以南北向那帮大型走滑构造带为界,在两个走滑构造带之间还出露有不同尺度、不同层次的近南北向韧性走滑剪切带,如槟榔江韧性走滑剪切带等,它们均以右旋走滑运动为主。同位素年代学研究表明,槟榔江韧性走滑剪切带形成于 56 Ma,怒江大型走滑作用主要发生于 22~24 Ma(季建清, 2000)和 11~14 Ma(Ding Lin et al., 1993),那帮右行走滑构造带也有 19~23 Ma 和 13 Ma 两期大规模走滑作用(季建清等, 2000)。因此,槟榔江构造带的形成时代可与印度—欧亚大陆主碰撞期(65~45 Ma, 莫宣学等, 2003)相对应,怒江和那帮构造带的大规模走滑作用时期与东部的哀牢山—金沙江构造带的走滑作用时代 19~24 Ma(Zhong Da-lai et al., 1989; 王江海等, 2001)一致。展示出腾冲地块内的构造变形域是对青藏高原东南部两大陆碰撞作用发生块体运动的响应,对于揭示印度—亚洲大陆碰撞过程中的构造效应具有重要的意义。

中、新生代岩浆活动频繁,夹持于怒江和那帮两条边界性构造带之间的腾冲地块先后经历了燕山期怒江洋闭合、腾冲地块与保山—孟连地块碰撞和喜山期印度板块向北俯冲而发生旋转、逃逸的两次大规模构造运动,致使宽仅 100 km 的腾冲地块内爆发了燕山期和喜山期两次大规模的岩浆活动,形成约占全区面积 50% 的中生代和新生代花岗岩及分布于盈江—梁河—腾冲北北东—近南北向盆地中的新生代火山岩(图 4)。腾冲地区的花岗岩呈走向近南北的带状分布。自西向东依次可分为东河、古永和槟榔江三个花岗岩带,形成时代依次为晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世和古近纪。前两个花岗岩带分别与燕山期怒江洋壳俯冲、腾冲地块与保山—孟连地块碰撞有关,代表了怒江洋壳向腾冲地块俯冲、闭合过程中的岩浆响应(杨启军等, 2006); 槟榔江花岗岩带内的岩浆活动主要经历了 65~59 Ma、54~52 Ma 和 43~41 Ma 三个高峰期(董方浏等, 2006),分别与印度板块与欧亚大陆对接碰撞(65 Ma)、主碰撞

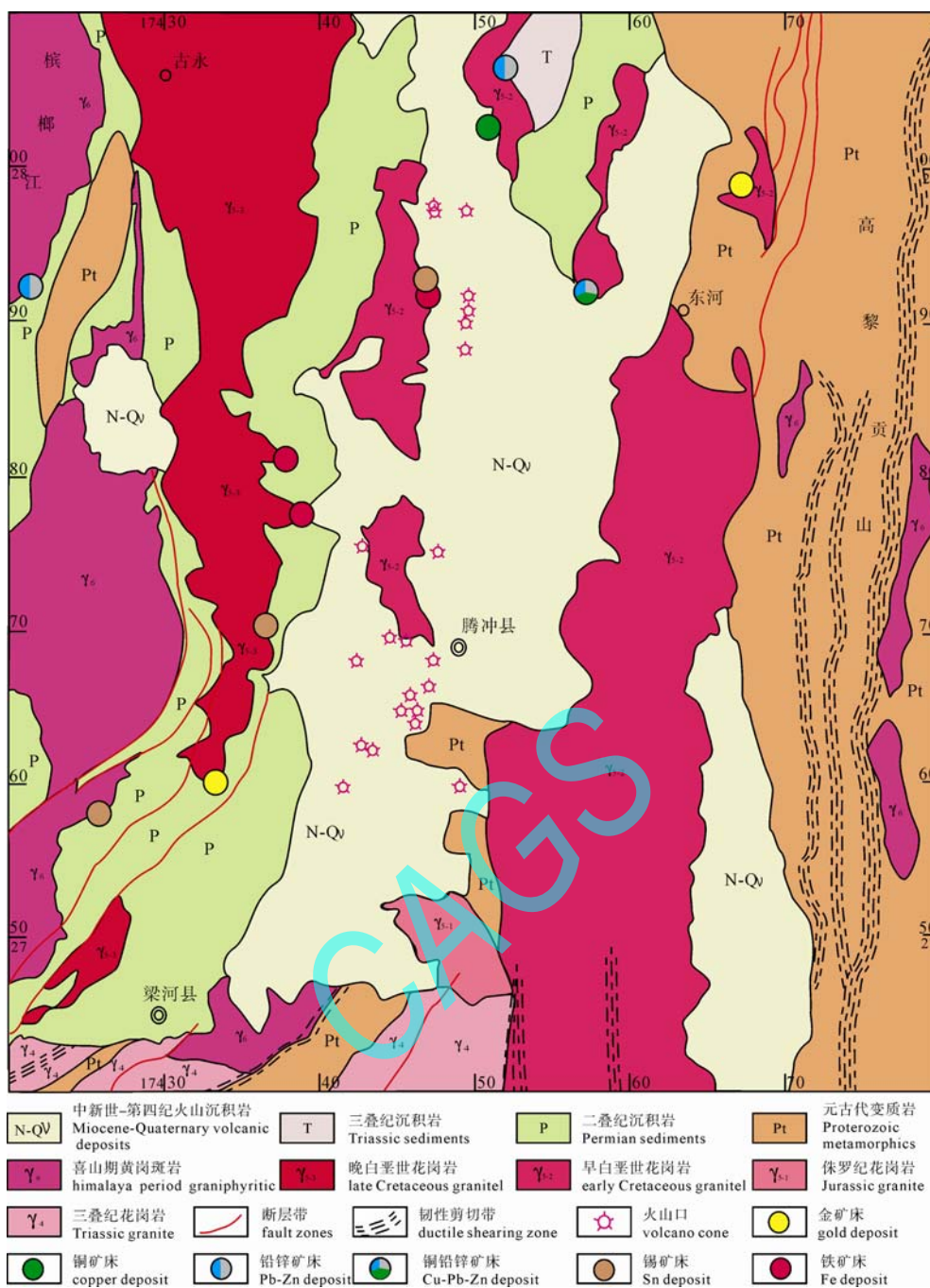


图 4 腾冲地块构造-岩浆岩-成矿带地质略图

Fig. 4 Geological sketch map of the tectonic-magmatic rock-mineralogical zone in Tengchong block

(65~45 Ma)和后碰撞(<45 Ma)(Mo et al., 2002; 莫宣学等, 2005)相对应。总体来看, 腾冲地块东部的花岗岩与怒江洋壳的俯冲碰撞有关, 西部花岗岩带的形成是对密支那洋壳俯冲碰撞的反映。花岗岩类的组合特征是区域构造背景的指示器, 其侵位机制依岩浆体的规模大小不同而有别, 因而花岗岩体的构造特征及其形成时间尺度是再造区域构造演化的重要基础之一。

腾冲地块中的火山岩分布于狭窄的北东-北北

东向的弧形盆地中。在东西宽 50 km, 南北长 90 km 的范围内分布有 68 座火山口(图 4), 火山熔岩分布面积 792 km<sup>2</sup>, 主要为玄武岩类和安山岩类, 属于高钾钙碱性岩系列。火山活动始于中新世, 喷发活动延续至全新世(17.8~0.09 Ma, 穆治国等, 1987; 姜朝松等, 1998), 具有明显的多期活动性质, 从盆地中部向东、西两侧由新逐渐变老的特点: 第一期火山活动以东部陇川断裂带附近最强, 向西减弱, 以熔岩溢出为主; 第二期火山活动受大盈江-古永弧型



断裂带控制,中心腾冲一带活动较强;第三期火山活动分布于腾冲南北一线第二期火山活动范围内,是区内火山活动强度最弱的一期;第四期火山活动位于腾冲以北至固东街一带,呈南北向串珠状分布。腾冲火山被归属为有活动迹象的火山(洪汉净等, 2007),具有潜在的喷发危险(姜朝松等, 2004),其危险性仅次于长白山天池火山。因此,火山灾害预测成为一个面临的挑战。

中、新生代大规模成矿作用强烈,腾冲地块中的以锡为主的有色金属成矿带是著名的东南亚锡矿带的北延部分。他们的形成与中、新生代构造-岩浆活动关系密切,如早白垩世东河岩体群花岗岩与铅-锌(锡)矿化关系密切(董方浏等, 2005),晚白垩世古永岩体群和早第三纪槟榔江岩群花岗岩与锡-钨及稀有金属矿化关系密切(毛景文, 1988)。根据裴荣富(1995)的统计,大多数内生金属矿床都与火成岩有关,且成矿作用往往是一种岩石圈灾变过程(邓晋福等, 1999),具有很短的时间尺度(罗照华等, 2006b)。因此,深刻揭示腾冲地区花岗岩类的形成机制及其与成矿作用的关系,不仅有助于理解该区的地质历史,对于发展西部经济也具有现实的意义。

与火山活动有关的地下热泉丰富,腾冲地区地下流体出露广泛,热水活动强烈。特别是腾冲西南热海一带,高温热泉随处可见,现已发现温泉 139 处,其中大部分为高温热泉,展示出腾冲地区蕴藏着巨大的地热能开发潜力,将是我国环保能源、绿色能源开发的重要基地。同时也显示出腾冲地区现今构造运动活跃,并暗示可以据此研究深部气体对现今气候环境的影响。

当前,尽管不同分支学科的学者在各自的领域取得了丰硕的成果,但仍存在一些重大问题有待解决,如班公湖-怒江缝合带经过东构造结后如何向南延伸,腾冲中、新生代花岗岩带与冈底斯花岗岩带除形成时代一致外,形成的构造背景及有关金属矿床方面仍存在较大差异,腾冲地块内火山岩盆地的形成与大型走滑作用的关系等。所有这些问题的出现展示出地球科学的复杂性和开展学科间的交叉、渗透与综合研究的必要性,以及获取地壳深部信息的重要性。腾冲地区因其复杂的地质演变历程及特殊的构造位置而展露其成为研究青藏高原隆升、块体旋转、逃逸机制不可替代的综合地质科研基地选区。腾冲火山地热构造区是我国大陆地区唯一确认与近代火山活动有直接成因联系的高温地热区,地表水热活动规模宏大,水热蚀变现象强烈,

钙华、硅华、硫华随处可见。构造区具有明显的高热流背景(汪缉安等, 1990; 徐青等, 1997),钻孔实测热流值平均大于  $90 \text{ mWm}^{-2}$ ,大大高于中国大陆地区  $65 \text{ mWm}^{-2}$  左右的区域背景热流值(黄少鹏, 1989; 胡圣标等, 2001),而且地幔热流远大于地壳岩石放射性生热的热流贡献(徐青等, 1992a, b),热岩石圈厚度小。这一地区的高热流和深部热结构特征是与该地区自新生代以来持续经历强烈的地壳运动和火山活动的热构造演化历史以及存在上地壳岩浆囊的多方面资料一致的。

地球物理和地球化学资料表明,腾冲火山地热构造区上地壳存在岩浆囊,但不同的方法给出的岩浆囊位置和深度有所不同。大地电磁测深(MT)资料表明(白登海等, 1994),腾冲热海至热水塘一带地下  $7 \sim 27 \text{ km}$  存在一个岩浆囊。三维地震速度地壳层析成像(王椿镛等, 2002)显示岩浆囊的深度可能在  $5 \sim 12 \text{ km}$  的深度范围。根据多年流动数字地震台网观测到的震群分布和震源机制分析,有学者判断在深度  $14 \text{ km}$  内存在 2 个岩浆囊体(叶建庆等, 2003)。而赵慈平等根据温泉化学温标数据分析则认为区内存在 3 个岩浆囊(赵慈平等, 2006)。激光测距(黎炜等, 1998)和 GPS 监测(李成波等, 2007)也表明这一带地下有岩浆活动。王椿镛等的层析成像结果还表明,区内除上地壳呈低速异常外,上地幔也呈低速异常,因此推测地壳内岩浆来源于上地幔,岩浆囊的温度估计不低于  $500^\circ\text{C}$ (上官志冠, 2000)。

地球深部蕴藏着巨大的能量。目前普遍认为,腾冲地热区的地热能主要来源于与上地壳岩浆囊相关的高温岩体,地壳岩石中放射元素蜕变和区内新生代强烈的构造活动引发的断层摩擦也可能有一定的热贡献。印度板块与欧亚板块两个大陆板块碰撞在这一地区地下形成了一系列深大断层,在地表造就了高山地貌。深大断裂为地下水深循环提取深部热能提供了通道,高山地貌则为地下水循环提供了水动力条件。腾冲位于热带和亚热带季风气候区,雨量充沛,年降雨量  $1480 \text{ mm}$ ,为地热循环系统提供了必要的水源。地下热水在地壳浅层储存形成地热储,在地表大面积出露则为地热田。

目前腾冲火山高温地热构造区内最具开放潜力的地热区是热海热田。该热田基底岩层为元古界高黎贡山群变质岩,下部是燕山期以来的花岗岩,上部有第三系不整合沉积。再上为第四系火山岩覆盖(上官志冠, 2000)。根据各种地球化学温标估计,热海热田的热储温度可能高达  $250$  以上,并呈东高西

低分布(廖志杰等, 1999)。热海地区的热泉水温都在 100℃左右, 近年的水热活动似有增强趋势, 发生过多次水热爆炸事件(廖志杰等, 1999)。1976 年, 在热海硫磺塘施工钻孔时, 在浅层 13 m 处发生 3 次大井喷, 水柱高 25 m, 气柱高 36 m, 水温达 145℃。根据云南省电力部门测算, 热海热田面积 8.5 km<sup>2</sup>。热田天然流量 2.8379 万千卡/秒, 可满足建设 10 万千瓦装机容量的地热电站的热能需求。腾冲火山地热区集火山遗迹、地热景观及宜人的气候条件和秀美奇异的山川风光构成重大旅游资源, 已经被国土资源部列为“火山地热国家地质公园”。

### 3.3 科学目标和研究内容

通过对腾冲地块东、西两侧的怒江和那帮韧性走滑剪切带及地块内部主要走滑剪切带的变形特征、性质、变形序次的几何学、运动学的研究, 同构造花岗岩的微构造要素、形成时限的确定, 阐明大型韧性走滑剪切带的走滑过程及其对青藏高原物质向东南的流动和逃逸的贡献, 以及对地块内新生代火山岩盆地的制约; 通过深部地质地球物理探测、高分辨率定量红外遥感技术和先导孔实验查明盆地内火山岩区的三维地质结构和中、新生代花岗岩的空间分布、岩石地球化学特征及锡多金属成矿作用机制, 查明地热异常区的分布及其与构造运动和岩浆活动的关系; 通过构造地质学、岩石学、矿床学、同位素地质学和地球化学对比, 查明腾冲地块与冈底斯岩浆岩带中岩浆活动的构造背景联系, 确定腾冲地块在青藏高原隆升过程中的动力学响应; 通过实施 1~2 口钻探实验, 查明火山喷发旋回、岩浆演化序列及其与大规模走滑作用的内在联系, 为高热异常区实施钻探工程提供各种地质地球物理参数, 论证该区进行深孔科学钻探的必要性和可行性, 为在腾冲地区及类似地热异常区开展科学深钻做可行性技术准备。

## 4 山东莱阳盆地科学钻探选址预研究

### 4.1 科学意义

位于山东半岛的莱阳盆地地处华北与扬子板块边界, 是形成在晚中生代的陆相火山-沉积盆地。莱阳盆地作为发育于苏鲁造山带北缘的盆地, 并且形成于碰撞造山的后期, 盆地沉积地层必然记录了造山带后期的构造演化、巨量超高压变质岩剥露过程乃至盆地南北边缘的构造属性。然而, 关于造山带构造演化与盆地发育之间的耦合关系、盆地沉积物示踪分析除少量学者进行了研究外(李双应等, 2008), 目前没有被引起足够重视。关于该领域的研

究在与苏鲁造山带相对应的大别造山带取得了重要进展, 对揭示大别超高压变质地体剥露过程和初始剥露时间提供了重要地质证据和基础资料(刘少峰等, 2001a, b)。关于莱阳盆地的成因一般认为与碰撞造山带增厚地壳或岩石圈的重力垮塌和岩石圈拆沉的响应有关, 与沿 NNE 向郯庐断裂带的右旋走滑活动及其拉分作用有关, 但是主体与何种构造作用相关还存在疑问和不明确。由此可见, 研究莱阳盆地基本构造格架、控盆构造和演化对揭示苏鲁造山带后造山过程及莱阳盆地构造对南、北板块边界构造的叠加和改造关系具有重要意义。将莱阳盆地沉积过程与盆缘构造控制作用结合分析, 盆地沉积物物源与造山带剥露过程结合分析, 盆地沉降与造山带隆升结合分析, 对全面认识苏鲁造山带造山过程、超高压变质地体折返和剥露过程、盆地边缘构造属性、确定缝合带位置均具有重要意义。莱阳盆地的成因与演化历史、相关的油气资源和金成矿作用, 南、北中国板块边界及其对接的时空过程, 以及大陆板块会聚边界的物质组成、结构、流变学与动力学都是有待解决的重大科学问题。通过浅孔科学钻探和综合地质学研究, 将为探索上述重大科学问题提供有效的途径。因此, 本课题的研究不仅具有重大的理论意义, 也具有重大的经济意义。

### 4.2 地质背景

莱阳盆地位于山东半岛中部, 构造上位于苏鲁造山带北部。盆地北界与胶北隆起呈超覆接触关系, 南部以五莲—青岛—烟台断裂(WQYF)与超高压变质带(胶南隆起)相邻, 西与郯庐断裂带相接, 东北部延伸入黄海以千里岩断裂和千里岩隆起相连(图 5)。莱阳盆地是一个白垩纪陆相盆地, 由火山-沉积岩组成。莱阳盆地是发育在苏鲁碰撞造山带之上的伸展盆地, 经历了多期构造演化, 盆地总体构造格架为一个受北北东向和近东西向断裂控制的拉分盆地(廖远涛, 2002; 唐华风等, 2003; 翟慎德, 2003; 张岳桥等, 2008)。研究表明, 莱阳盆地具有油气勘探潜力(李桂群等, 1994; 翟慎德, 2003; 吴智平等, 2004)。盆地的演化过程、沉积格局控制着油气资源的分布。研究表明显示, 莱阳盆地油气显示丰富, 经历了油气的生成过程, 且储层、区域性盖层发育。莱阳凹陷中东部莱阳组覆盖区具有良好的生储盖组合和保存条件, 是本区油气勘探最有利的区域。胶东半岛是我国重要产金基地, 多年来已在胶北隆起找到破碎带蚀变岩型(焦家)和石英脉型(玲珑)金矿近千吨。近年来又在莱阳盆地东北缘找到了蓬家乔和发云乔金矿床。蓬家乔金矿床产于具有滑脱拆离



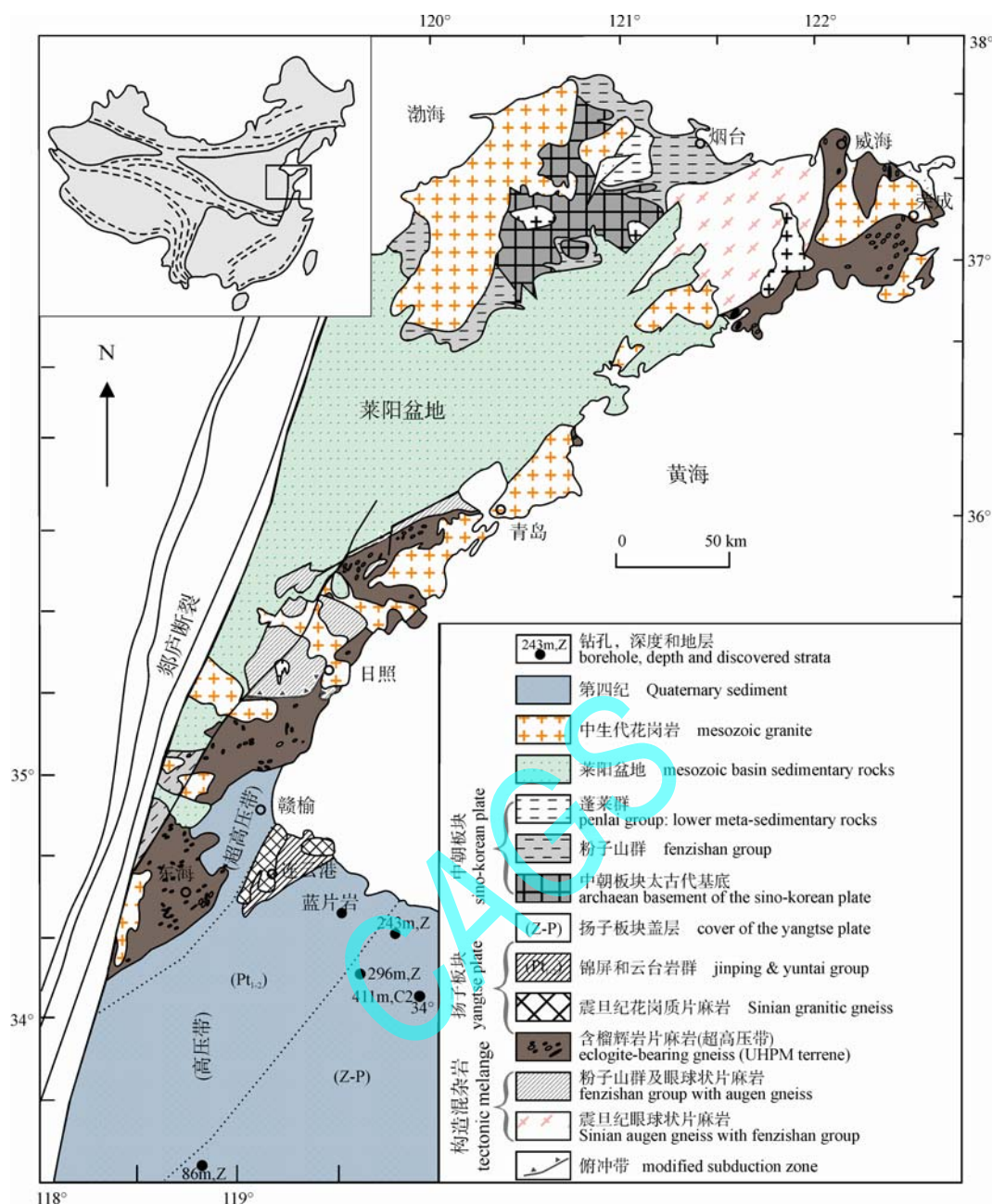


图 5 苏鲁超高压变质带及莱阳盆地地质简图

Fig. 5 Geological sketch map of the Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt and the Laiyang Basin

性质的盆缘断裂中,发云金矿床则产于盆缘断裂上盘的莱阳群砾岩层间(刘玉强等, 1999; 刘玉强, 2003)。初步的研究认为,胶东地区的焦家式、玲珑式、蓬家式和金矿是在早白垩世同一区域构造应力场下的产物,它们可能属同一矿床组合(徐贵忠等, 2004)。综合信息分析表明,整个莱阳盆地周边的控盆盆缘断裂和盆内砾岩广大分布地区普遍具有金矿化,因此推断莱阳盆地本身及其周边一定范围具有巨大的找矿前景(张竹如等, 1999; 杨金中等, 1999; 徐贵忠等, 2004)。

莱阳盆地南部是大别—苏鲁造山带,是北中国(华北)与南中国(扬子)板块俯冲—碰撞作用的产物。现有的研究证明,大别—苏鲁造山带超高压变质岩的形成年代在 220~250 Ma(Ames et al., 1993; Li et al., 1993, 2000; Rowley et al., 1997; Hacker et al., 1998, 2000; Maruyama et al., 1998; Rumble et al., 2002; Ayers et al., 2002; Faure et al., 2003; Yang et al., 2003; Zheng et al., 2003, 2006; Liu et al., 2004, 2006; Cosca et al., 2005; Wan et al., 2005; Zhao et al., 2006),而超高压变质岩的原岩形成年代在新元古代(Ames et al., 1993; Li et al., 1993; Rowley et al., 1997; Rum-



ble et al., 2002; Zheng et al., 2006)。中国大陆科学钻探工程 5000 m 主孔和多个浅钻孔的实施, 使我们在世界上第一次从三维空间揭示出超高压变质带及大陆造山带深部的物质组成、结构和构造, 连续岩心样品的综合地质学研究取得了重要的科学成果(许志琴等, 2004, 2007; 刘福来等, 2004; 杨经绥等, 2007; 张泽明等, 2004, 2007; Liu et al., 2004; Zhang et al., 2000, 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2008; Liu Y et al., 2008; Xiao et al., 2006; Zhao et al., 2006, 2007a, 2007b; Chen et al., 2007a, 2007b, 2007c)。目前, 大别—苏鲁造山带已经成为世界上已知的最大的超高压变质带, 是研究大陆深俯冲及动力学的天然实验室。

莱阳盆地基底为前寒武纪变质岩系, 包括太古界胶东群、下元古界荆山群、粉子山群及上元古界蓬莱群。以五莲—青岛—烟台断裂为界, 可将胶东地块分为东部地区和西部地区两部分, 二者在前寒武纪变质岩结晶基底的成因和演化等方面有着明显差别。多数学者认为胶东地块西部归属于华北板块, 而胶东地块东部属于扬子板块。扬子板块超高压变质岩与华北板块基底变质岩直接相连, 所以胶东地区是研究板块缝合线的理想位置(翟明国等, 1999)。但由于胶东西部和东部地区的主体岩石均为前寒武纪正片麻岩, 二者岩性相似, 而且后期中生代岩浆和构造活动叠加强烈, 给研究确定板块缝合线的位置带来了相当大的难度, 所以目前对板块缝合线的具体位置尚无统一认识, 可归纳为以下几种主要观点: (1) 五莲—青岛—荣成断裂(曹国权等, 1990); (2) 五莲—青岛—烟台断裂(凌贤长, 1998; Wallis et al., 1999); (3) 海阳所—威海蛇绿岩带(王仁民等, 1995; 倪志耀等, 2001); (4) 昆嵛山混杂岩带(Zhai et al., 2003); (5) 米山断裂(苏尚国等, 1996; 张希道等, 1996)。

随着对大别—苏鲁造山带研究的深入, 近些年来已有部分学者陆续对胶东地块西部归属华北板块这一传统观点提出了质疑, 并且通过岩石学、古生物学、构造地质学、同位素年代学等方面的研究, 指出胶东地块西部应当归属于扬子板块(杨志坚, 1992; Yin et al., 1993; Zhang, 1997; Faure et al., 2001, 2003)。唐俊等(2004)研究认为, 胶东地块西部新元古代岩浆活动、印支期变质时代和氧同位素亏损事件的存在, 表明其可能属于扬子板块, 对应于扬子板块北缘新元古代裂谷岩浆侵位时裂谷肩部的北翼古老围岩, 而且在印支期陆壳俯冲过程中, 整个胶东地块西部可能并没有俯冲到地幔深度。由此可见

胶东地块西部板块归属问题对大别—苏鲁造山带研究具有重要意义, 它是研究板块缝合线位置前必须要解决的一个关键问题。

许志琴等(2006)的研究表明, 苏鲁超高压变质带由两个不同时代的变质基底组成。南苏鲁变质基底形成在新元古代的被动大陆边缘裂谷环境, 是罗迪尼亚超大陆裂解事件的响应(Zheng et al., 2003; Zhang et al., 2006a, 2006b)。而北苏鲁属于北中国板块胶辽朝地块的一部分, 原岩形成时代为 2400 Ma, 并经历了约 1800 Ma 的变质作用。由于在南、北变质基底中都获得了印支期高压或超高压变质作用的岩石学和年代记录, 因此提出了陆—陆碰撞俯冲剥蚀新模式, 即在印支期扬子板块的深俯冲作用中拽动上部胶辽朝板片的一部分老变质基底岩石向下俯冲至大于 100 km 的深度, 并形成楔形俯冲剥蚀体, 之后又与南苏鲁俯冲板片一起快速折返上来, 使胶辽朝地块的楔形俯冲剥蚀体经历了高压—超高压变质作用和折返退变质作用。

近年来, 有的研究认为盆地变质基底的部分岩系很可能是中生代的超高压和高压变质岩石, 即大别—苏鲁超高压变质带的一部分(林伟等, 2003)。在构造上, 胶东半岛通常表现为 NE-SW 走向的脆性正断层和晚期左行的脆性断层。在这些断裂中, 烟台—青岛—五莲断裂分隔了具有片麻岩、大理岩、角闪岩和混合岩的胶东地体和具高压—超高压变质岩石出露的苏鲁地体。因而, 通常被认为是南、北中国板块, 即扬子板块和华北板块的缝合带。据岩石的变质相、变形特征和构造层位上表现的几何关系, 可将白垩纪沉积前的韧性变形体分为以下 5 个构造单元: (1)板岩—砂岩单元, 主要由原称的“蓬莱群”组成, 它构成了胶东半岛构造堆叠体系的最上部。未变质—弱变质的蓬莱群仅出露于胶东半岛的北部蓬莱市附近及其北部的一系列岛屿中。(2)高压片麻岩—石英岩单元, 由原称的“海州群”组成, 这套变质岩系分布于江苏的连云港地区, 岩性为片麻岩和石英岩, 其中已发现高压矿物如蓝闪石、蓝晶石和多硅白云母等, 指示了该变质单元经历了高压变质作用。(3)大理岩—角闪岩单元, 由原称的“五莲群”和“粉子山群”组成。在胶东半岛的北部, 蓬莱群以拆离断层的形式与这套变质岩系(粉子山群)相接触。其上的高压片麻岩—石英岩单元(海州群)由于构造作用而缺失。大理岩中广泛发育有白云母、夕线石和橄榄石。尽管这个构造单元做了大量的岩石学工作, 但从未见发现榴辉岩相变质作用的迹象, 可以认为该构造单元从未经历过超高压的变质作用。胶

南地区发育大片的糜棱岩,它与下伏的超高压变质单元间被 1~2 km 的构造糜棱岩带分隔。(4)超高压变质单元,该单元位于大理岩-角闪岩单元之下,由正片麻岩、副片麻岩、石英岩、大理岩和数米或近百米镁铁质岩-超镁铁质岩块体组成,曾被称为“胶南群”。由于该单元发育有含柯石英的榴辉岩而被认为其经历了超高压的变质作用。由五莲到青岛,从该超高压变质单元的面理组合上看,该单元构成一个完整的 NE-SW 向的背斜。近来的研究表明榴辉岩的围岩与榴辉岩体一样也经历了超高压的变质作用。(5)片理化的混合岩单元,该单元出露于胶东半岛中生代莱阳盆地的北部栖霞地区和东部的荣成地区,主要由片麻岩构成,它具有典型的混合岩特点。这种混合岩在构造上是归属是扬子板块,还是华北板块的变质基底还存在较大争议。

横穿诸城凹陷的南北向反射地震剖面揭示,苏鲁造山带北侧边界的中上地壳中存在着三层结构,即上部的胶莱盆地沉积盖层、中部的苏鲁楔状地体和下部代表华北板块的胶北地体;诸城凹陷边缘和内部断裂均显示同沉积正断层性质,苏鲁楔状地体中发育一组向北仰起的叠瓦状逆冲断层;而胶北地体显示了向南俯冲的态势。由此而论,可能存在着华北板块与扬子板块相向俯冲于苏鲁地体之下的陆陆碰撞机制,苏鲁地体可能具有与大别地体相似的花状造山带结构(吴冲龙等,2006)。

胶东半岛的几何学和运动学的研究对郯庐断裂以东地区地南、北中国板块的界线问题提出了新的认识。有人认为,完整的几何形态和一致性的运动学特征表明胶东地体与苏鲁地体有相同的板块动力学机制,也就是说,烟台—青岛—五莲断裂不可能作为板块间的缝合带。因而,苏鲁地区南、北中国板块的界线的位置与对接时空过程,对于认识我国东部及东亚地区板块构造格局和动力学有着十分重要的意义。

#### 4.3 科学目标和研究内容

莱阳盆地位于南、北中国板块的会聚边界、盆山结合带,而且具有潜在的油气和黄金资源。本课题主要任务是围绕南、北中国板块位置、对接的时空过程与动力学,大陆造山带的深部物质组成和结构开展地表地质调查、浅孔科学钻探、地球物理勘探和综合地学研究,并在此基础上对在莱阳盆地及南、北中国板块边界开展超深孔科学钻探的必要性和可行性,及其钻孔选址进行论证。因此,在莱阳盆及周缘进行大陆科学钻探选址与钻探实验研究的总体目标是是通过基础地质调查、深部地球物理探测、

科学实验钻探和综合地学研究,重塑莱阳盆地的形成历史及其与巨量超高压变质岩石剥露的耦合关系,揭示莱阳盆地变质基底的构造属性,南、北中国板块会聚边界的位置与结合时限,研究大陆碰撞造山带的深部物质组成、结构与动力学,探索大陆造山带与盆地的成矿作用。在此基础上,对在莱阳盆地进行深孔科学钻探的必要性和可行性进行科学论证,提出合适的超深孔科学钻探选区。

### 5 东部矿集区科学钻探选址预研究

#### 5.1 科学意义

矿集区是地壳浅层金属巨量堆积的特殊地质单元,通常是不同构造交汇部位和岩浆活动频繁的场所。据统计,世界上约 80% 的金属矿床和资源量集中在大型矿集区内。因此,大型矿集区不仅是找矿的主要目标,而且研究大型矿集区的成矿作用也成为发展成矿理论的关键。随着我国经济的飞速发展和经济的全球化,矿产资源的紧缺越来越成为制约经济增长的瓶颈因素,尤其是在我国东部地区,通过近几十年的勘探和大规模的开采,地表和浅部的找矿潜力已消耗殆尽,需求与供给之间的矛盾更为突出。在已知的矿集区加强深部勘探,寻找“第二成矿空间”不仅是找矿工作面临的现实要求,也是突破找矿瓶颈的有效途径。但现有的勘探深度普遍较浅,大多在 500 m 范围内,因而对“第二成矿空间”的特征及其与“第一成矿空间”的关系等知之甚少。理论的缺失,制约了深部找矿的实际效果。因此,在矿集区实施深钻探测是了解“第二成矿空间”的存在与否及其特征的必由手段,对于提高找矿和勘探效率,创立立体成矿模型也具有重要意义。

本研究包括铜陵、庐枞和赣于三个矿集区。其中,铜陵矿集区科学钻探选址预研究,主要是通过铜陵矿集区的成矿背景、成矿条件和成矿前景的研究,特别是区内岩浆作用的深部过程及其与成矿关系的研究,确定合适的钻探位置,以期寻找出深部可能存在的大型、超大型矿床。庐枞矿集区科学钻探选址预研究,主要是通过对庐枞盆地的火山地质、火山-侵入杂岩、矿化蚀变分带、典型矿床成矿地质条件的剖析和成矿综合模型的建立,配合地球物理的研究成果和局部地区大比例尺的地质填图,确定深部找矿最有利的靶区,为大陆科学超深钻探的预导孔选择孔址;通过对该预导孔岩芯的详细研究,获得 3000 m 深度范围内的系列剖面柱(包括岩性剖面、构造剖面、地球化学剖面和同位素年代谱),验证矿集区的地球物理探测成果,论证在庐枞盆地

开展深孔科学钻探的必要性和可行性。

东西向南岭成矿带和北东向武夷成矿带为华南两大重要成矿带, 而于都—赣县矿集区处在两者的交接部位上, 两者在成矿时间上、成矿空间上、成矿作用上、成矿物质组成上存在着一定程度的差异, 但是否存在着关系? 即制约两者形成机制的深部构造背景(壳幔相互作用、成矿岩浆演化)如何? 这是本次开展矿集区深部探测研究需要着重解决的一个科学问题。于都—赣县矿集区以往深部钻探多在千米以内, 本课题拟通过地球物理探测, 3000 m 深孔钻探验证, 研究本矿集区成矿的空间分布, 探索浅部盖层中贵金属、多金属矿化之下是否存在基底地层中与花岗岩有关的钨等有色、稀有矿化(深部第二成矿空间), 探讨上、下层矿化形成的控矿因素、时间及相互关系。上述科学问题, 不仅是于都—赣县矿集区的科学问题, 更是南岭成矿带和武夷山成矿带的科学问题, 通过本课题的实施, 在这些问题上取得一定的进展, 为下一步的超深钻探工作奠定一定的基础和积累解决问题的经验。

## 5.2 地质背景

### (1) 铜陵矿集区

铜陵地区位于长江中下游成矿带安徽省境内的长江南岸, 是我国最重要的有色金属基地之一。区内出露 70 多个中生代酸性侵入岩体, 大多数岩体的出露面积为 0.5~3 km<sup>2</sup>, 所有这些岩体均分布在宽约 20 km、长约 40 km 的东西向构造—岩浆—成矿带上(常印佛等, 1991)。研究表明, 区内的铜矿床与中酸性侵入岩关系十分密切, 因此, 多年来, 许多研究者(如: 常印佛等, 1991; 邢凤鸣等, 1996; 周珣若等, 1993; 等等)从不同的角度研究侵入岩。区内的侵入岩存在两个系列, 即橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列(吴才来等, 2003; 2008)。橄榄安粗岩系列岩石占全区侵入岩的 20%, 岩体呈 NW 和 NE 向的岩墙状, 与三叠系碳酸盐岩围岩具明显的侵入接触关系, 围岩主要发育大理岩化, 其次为方柱石化、矽卡岩化, 岩体边部斜长石平行于接触带作定向排列。岩体中不但含有大量的角闪岩、大理岩和矽卡岩包体, 而且还含有大量的深源包体如尖晶石辉石岩包体和角闪岩包体。部分岩体沿高钾钙碱性侵入岩与围岩的接触带侵位。区内的金矿床或金矿化与该系列侵入岩关系密切, 并伴随有银、铅、锌等多金属矿化。该系列侵入岩黑云母的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年龄变化于 136.8 Ma 到 135.6 Ma 之间(Wu et al., 2000), 锆石 SHRIMP 年龄变化于 138 Ma 到 142 Ma(吴才来等, 2008)。高钾钙碱性系列岩石占全区侵

入岩的 80%, 岩体呈 NE 向的岩株, 围岩为志留纪粉砂岩、石炭纪白云质灰岩、二叠纪和三叠纪碳酸盐岩。碳酸盐岩地层发育强烈的矽卡岩化, 形成矽卡岩型铜矿或矽卡岩层控型铜矿床(常印佛等, 1983)。这些铜矿床主要分布在背斜的核部或近核部的翼部或两组不同方向断裂交汇部位。在该系列侵入岩中, 存在大量的微粒闪长质混杂岩包体、闪长质冷凝边包体和富云母包体。岩体的 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 年龄变化于 139.8 Ma 到 133.6 Ma 之间, (Wu et al., 2000), 锆石 SHRIMP 年龄变化于 139 Ma 到 146 Ma 之间(吴才来等, 2008), 表明该系列岩浆比橄榄安粗岩系列岩浆开始活动的时间早, 持续的时间长。然而, 两个系列侵入岩之间有何成因关系? 岩浆作用的深部过程与成矿的关系是什么? 它们与壳幔相互作用的关系是什么? 这些问题目前尚未开展深入的研究。此外, 研究中至少有 2 个问题没有很好地解决, 其一是两个系列岩浆的源区究竟是什么? 其二是在熔融过程中发挥重要作用的流体性质是什么? 因为, 岩石圈本身的含水量(流体)是不饱和的, 那么来自大洋板块脱水形成的流体如何穿过岩石圈而到达熔融区? 对于远离大洋板块俯冲带的铜陵地区来说, 流体来自何处?

研究表明, 铜陵地区的铜矿类型为矽卡岩型(矽卡岩层控型), 其次为斑岩型, 但斑岩型铜矿的规模不大。地球物理资料表明, 铜陵地区深部存在一个巨大的隐伏侵入岩基, 它不仅为区内的成矿提供了大量的成矿物质, 而且还提供了巨大的成矿能量(热能), 同时, 它本身也具有较大的成矿潜力(如形成斑岩型铜矿)。因此, 本区在寻找大型和超大型斑岩型铜矿方面具有较大的潜力。然而, 要了解深部的成矿信息, 研究岩体中的包体是最好的途径之一。因此, 包体岩石学研究成为地质科学研究的前沿课题之一。花岗岩中的岩石包体被地质学家视为地壳深部的天然样品, 是人们了解地球深部的“探针”。对它的研究, 不仅有助于解决花岗岩类岩浆起源、演化及其动力学环境问题, 而且对于揭示地壳深部结构、成分性状, 探讨花岗岩与成矿的关系以及指导找矿均具有重要的意义。不同成因类型的花岗岩中所含的岩石包体不同。一般来说, S 型花岗岩中多以富云包体为主, 并被视为地壳部分熔融的耐熔残余物; 而 I 型花岗岩特别是钙碱性系列花岗岩中的岩石包体则多以暗色闪长质微粒包体为主, 且被视为岩浆混合的产物(Didier, 1991; Castro, 1991)。Castro 等(1990, 1991)通过对西班牙 Iberia 地区海西期褶皱带中花岗岩的野外地质关系、显微结构(如岩



浆混合带、包体与寄主岩的关系、具受熔蚀的斜长石核心等)以及岩石化学和同位素地球化学(如 Sr、Nd、O 同位素比值变化范围较大等)研究,指出许多造山带花岗岩的形成都包含了岩浆混合作用,并提出了 H 型花岗岩的概念。国内不少学者对花岗岩中的包体也进行了深入的研究,并提出了包体成因分类(王德滋等, 1992; 徐夕生等, 1993; 杜杨松, 1994),并对部分类型包体的地球化学特征、形成的物理化学条件等作了深入研究(周珣等, 1993)。本区橄榄安粗岩系列侵入岩中的包体与高钾钙碱性系列侵入岩中的不同,前者以各种类型的堆积岩包体(尖晶石辉石岩、角闪辉石岩、金云母角闪石岩包体等)为主,后者以富云包体和暗色闪长质微粒包体(成分具有一定的变化范围)为主。作者试图在已往研究的基础上,对区内侵入岩及其包体开展新一轮的研究工作,以此来探讨两个系列岩浆作用的深部过程与成矿的关系,最后确定科学钻的位置。

## (2) 庐枞矿集区

通过近 30 年的研究,对庐枞盆地内火山活动的时代、旋回、火山构造、火山-侵入杂岩的系列、成

矿机制和成矿模式等方面都已有了框架性的认识,为综合成矿地质条件的研究和深部找矿靶区的确定提供了良好的背景资料。但这方面的研究工作大多数集中在上世纪的 80 年代和 90 年代初,以后仅有些零星的有关岩石学和地球化学方面的研究。因而对整个盆地的研究虽然已较深入,但也存在着明显的不足。

对于庐枞盆地内的中生代火山活动,前人已根据火山喷发的先后分为龙门院旋回、砖桥旋回、双庙旋回和浮山旋回(图 6)。每个旋回火山活动的末期都有相应的潜火山岩的侵入。岩浆成分从早至晚有碱性演化的趋势,这种演化趋势是深部复杂的构造和岩浆过程在浅部的反映,但这方面的研究到目前为止几乎还没有涉及到。

庐枞盆地内中生代火山岩为一套别具特色的偏碱富钾的中基性-中性岩石组合, Cong et al.(1977)曾将它归为钾玄岩系列,或橄榄玄粗岩系列(shoshonite)。但盆地西缘的沙溪地区出现了一套高 K 钙碱性系列的岩石,其地球化学性质在很多方面类似于埃达克质岩石,并与铜矿化关系密切,总体

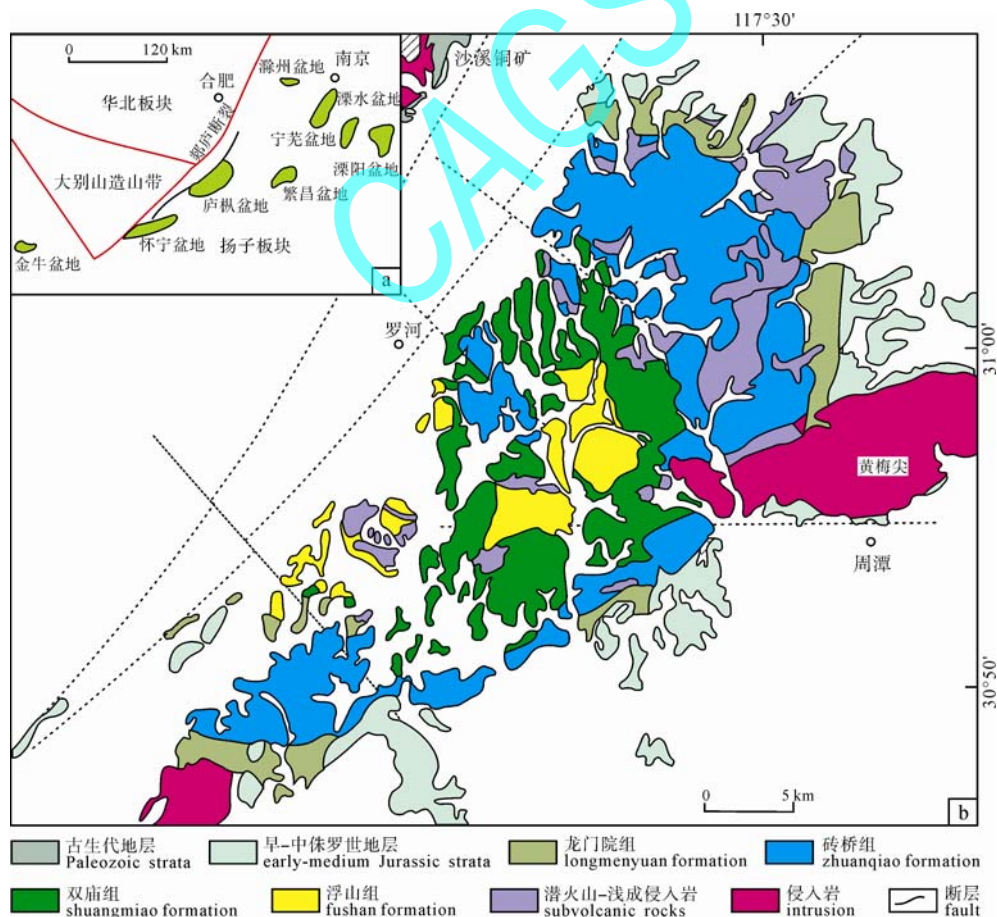


图 6 庐枞盆地地质简图

Fig. 6 Geological sketch map of the Luzhong Basin

类似于铜陵地区的侵入岩与矿化特征。对于盆地西缘的这套(与铜成矿有关的)埃达克质侵入岩与盆地内部(与铁成矿有关的)橄榄玄粗岩系列火山岩、潜火山岩之间的关系,到目前的研究还鲜有涉及,但这关系到盆地的深部是否有寻找到“铜陵式”矿床的可能性,因而具有重要的意义。

盆地内火山岩的成因,前人虽已作了较多的研究,但分歧仍较大。刘洪等(2002)基于火山岩具富碱、富钾、富轻稀土及大离子亲石元素和贫高场强元素等特点,及 Sr 和 Nd 的同位素组成( $I_{Sr}$  值介于 0.7057~0.7065 之间,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值介于 -5~-10 之间),认为火山岩形成时没有明显的地壳物质混染,其岩浆来源于 EM I 型富集地幔的部分熔融;而 Chen et al.(2001)认为,该地区中生代的地幔可能是亏损的软流圈地幔(DMM)和富集的岩石圈地幔(EM II)的混合体;闫峻等(2003, 2005)基于长江中下游中生代相对偏基性岩石的 Pb 同位素组成,认为原始岩浆来自以 EM II 特征为主的富集岩石圈地幔;Zou et al.(2000)对扬子地块新生代玄武岩的研究也表明,其物源区有残留的 EM II 的信息,是亏损地幔和 EM II 混合的产物;谢智等(2007)认为,庐枞地区的火山岩在形成过程中虽然没有明显的软流圈物质信息,但其形成时代反映着扬子陆下岩石圈地幔伸展、软流圈地幔上涌以及随后带来的岩石圈地幔地球化学性质置换的开始时间;Wang et al.(2004, 2006)认为,白垩纪以前,中国东部存在加厚的地壳和岩石圈地幔,在侏罗纪-白垩纪中国东部的拉张环境下,下地壳拆沉进入受到热的软流圈的影响发生熔融的岩石圈地幔,形成橄榄安粗岩浆。

对于盆地内中生代火山岩的形成时代,虽然已有较多的资料积累,但这些年龄以 K-Ar 为主,部分  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄和 Rb-Sr 等时线年龄,年龄跨度大,同一地质体不同学者获得的年龄差别很大。如对于砖桥组的火山岩,刘洪等(2002)测得全岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为  $141\pm 1$  Ma;王松山(1982)测定砖桥组上段黑云母粗安岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为  $131\pm 1$  Ma;Wang & McDougall(1980)测得砖桥组全岩的 K-Ar 年龄为  $131\pm 1$  Ma、黑云母 Ar-Ar 年龄为  $130.8\pm 1.4$  Ma;周涛发等(2008)测得其中锆石的 LA-ICP-MS 年龄为  $134.1\pm 1.6$  Ma。对于浮山组的粗面岩,刘洪等(2002)测得 Ar-Ar 坪年龄为  $126.0\pm 3.4$  Ma;Wang & McDougall 用 K-Ar 法测得  $123.0\pm 1.1$  Ma 和  $127.4\pm 1.2$  Ma;周涛发等(2008)测得其中锆石的 LA-ICP-MS 年龄为  $127.1\pm 1.2$  Ma。另外,对于双庙组的火

山岩,全岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $125.5\pm 0.8$  Ma;周涛发等测得其中锆石的 LA-ICP-MS 年龄为  $130.5\pm 0.8$  Ma。

对于盆地内及其附近的次火山岩和侵入岩,任启江等(1993a, b)测得巴家滩岩体和矾山—石马滩岩体的 Rb-Sr 等时线年龄分别为  $150\pm 1$  Ma 和  $129.6\pm 1.1$  Ma,并认为巴家滩岩体与砖桥组的火山岩为同源异相,代表火山的根部相,并据此推测砖桥组的火山岩也形成于约 150 Ma。对于盆地西北缘的沙溪斑岩铜矿,徐文艺等(1999)测得其中石英闪长斑岩的全岩-单矿物 Rb-Sr 等时线年龄为  $143\pm 5$  Ma,钾化蚀变岩的  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $123.6\pm 0.7$  Ma;徐兆文等(1999)测得成矿岩体-石英闪长斑岩的 Rb-Sr 等时线年龄为  $127.9\pm 1.6$  Ma;傅斌等(1997)测得石英闪长斑岩中黑云母的  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $126.8\pm 1.0$  Ma。对于盆地东南缘的黄梅尖岩体,翟建平(1989)测得全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $133.1\pm 2.5$  Ma;郑永飞等(1995)从主体相中分离了 6 个锆石样品进行常规 U-Pb 同位素分析,其单阶段演化的等时线与一致曲线的交点年龄为  $125\pm 4$  Ma;另外,郑永飞等(1995)还分别测定了该岩体中角闪石、黑云母、全岩和正长石的 K-Ar 年龄分别为 124 Ma、119 Ma、97 Ma 和 85 Ma。

由此可见,盆地内火山-侵入作用的时代还比较混乱,不同学者获得的年龄数据差别较大,岩浆活动时代的不确定,客观上制约了对区域构造-岩浆演化和成矿规律的认识。

现有的研究表明,庐枞盆地内的矿床具有“成群分布,分段集中”的特点,矿化蚀变大多受火山机构的控制。已发现的矿床主要集中在两个地区,即黄屯-何家小岭矿区和罗河-大鲍庄矿区。自“玢岩铁矿”模式建立以后,宁芜盆地和庐枞盆地内的铁矿、硫铁矿及一些硬石膏矿床多被统一于该模式之中(张荣华, 1981)。但胡文瑄等(1992)从矿床层控特点、矿体形态产状、矿石沉积组构、矿物组合及其生成顺序、矿化分带、包裹体及同位素地球化学等诸方面,证明它们具显著的火山喷气沉积成因特征,并受到后期热液叠加改造。提出了大鲍庄式陆相火山喷气沉积-热液叠加改造型硫铁矿的成矿模式。尽管目前人们仍往往用“玢岩铁矿”模式来解释庐枞盆地内铁、硫矿床的成因,但盆地内与成矿有关的岩体多为正长岩而不同于宁芜盆地的闪长玢岩。因此,有关庐枞盆地内铁、硫矿床的成矿机制与成矿模式是否符合“玢岩铁矿”模式尚需进一步探讨。

另外, 由于受当时条件的限制, 在同位素示踪研究方面严重不足, 因而对岩浆作用深部过程缺乏有效的地球化学尤其是同位素方面的制约。对于盆地内火山岩、次火山岩、浅成侵入岩以及各种类型的矿床在火山机构内的空间配置关系也不明晰, 有必要进行系统的研究, 以确定盆地内深部流体(尤其是地幔流体)上升的主要通道和深部成矿最有利的部位。

### (3) 于都—赣县矿集区

于都—赣县矿集区位于江西省南部的赣州市中部, 范围主要涉及南岭成矿带东段与于山成矿带交汇部位的中段, 地理坐标为东经  $115^{\circ} \sim 116^{\circ}$ 、北纬  $25^{\circ}20' \sim 26^{\circ}40'$ , 面积约 1.0 万平方公里, 为南岭成矿带的一个重要组成部分。该区区域上大面积出露南华系—寒武系, 其次为泥盆系、石炭系, 二叠系、白垩系、第三系零星分布。岩浆活动以加里东期和燕山期为主, 其中以燕山期大规模的岩浆活动最为重要, 形成了极其丰富的钨、锡、铌、钽及稀土等矿产, 产出盘古山、黄沙、画眉坳等著名的钨矿床, 以及兴国留龙、于都柳木坑等赣南仅有的中型金、银矿床, 是中国最重要的黑钨矿、锡多金属矿产地之一, 江西最重要的贵多金属矿产地之一。

于都—赣县矿集区地层明显分为基底(AnZ-O)、盖层(D-T)、断陷盆地沉积(K-T)三个构造层(1-2), 以广泛出露早古生代基底岩系为特征。南华系—寒武系出露面积较广, 为一套以变质砂岩、板岩为主的类复理石建造, 间夹大透镜状结晶灰岩; 泥盆系—石炭系以碳酸盐岩为主, 间夹碎屑岩; 白垩系—第三系为杂色—红色湖盆沉积, 散布于全区的断陷盆地内。不同的构造层的成矿具有不同的特征, 基底主要与钨锡钼等一套高温热液矿床组合的成矿关系密切, 也是赣南地区主要的赋矿层位, 代表性矿床有盘古山钨矿、黄沙钨矿、上坪钨矿、画眉坳钨矿等。而盖层(D-T)则主要与金、银、铜、铅锌矿等一套中低温热液矿床成矿关系密切, 如桥子坑银金多金属矿、桥背坑银金多金属矿、柳木坑银铅矿、老虎头银铅矿、营脑锰多金属等中小型矿床。这两种成矿组合主要位于矿集区的中部盘古山—黄沙地区、东北部银坑—青塘地区。虽然赣南地区的地质工作程度较高, 但是勘探深度都比较浅, 均小于 500 m。因此, 矿集区深部的成矿地质特征和成矿地质规律还是不清楚的, 非常有必要在本区开展深部的探测研究。银坑—青塘矿区地区是于都—赣县矿集区一个重要的成矿区, 该区出露了基底(AnZ-O)、盖层(D-T)、断陷盆地沉积(K-T)三个构造层, 是本矿集区的一个

代表性的研究区, 成矿地质特征是不仅有燕山期花岗岩岩基 + 基底(AnZ-O)的成矿组合, 也有盖层(D-T)中的成矿组合, 因此本区在垂向上是否存在一套中低温的成矿组合 + 一套中高温的成矿组合, 这两种不同的成矿组合在空间上、时间上、成因上有没有联系? 是否属于一个成矿系列的还是属于不同成矿系列的? 岩浆岩在本区各种成矿组合中的贡献多大? 本区分布的岩浆岩的来源? 本区的推覆构造对成矿是起到什么作用, 是成矿前、成矿期还是成矿后的, 其在深部的分布? 因此在本区开展深部探测研究十分重要, 而如何能够获得本区深部的地质结构、岩浆岩的展布、成矿作用, 迫在眉睫的则是开展深部钻探工作, 只有通过钻探的施工, 取得深部的地质特征, 才能够为上述的各种疑问的解答提供有利的证据。

### 5.3 科学目标和研究内容

围绕矿产资源集聚区成矿地质背景及深部找矿前景, 分别在铜陵矿集区和庐枞矿集区开展科学钻探预研究。通过对矿集区侵入岩、火山地质、地球化学、蚀变矿化的热液系统等的预研究, 配合地球物理的研究成果和局部地区大比例尺的地质填图, 确定深部找矿最有利的靶区, 实施 3000 m 的科学钻井。通过钻孔岩芯的物性研究, 直接验证综合地球物理异常, 建立异常解释的“标尺”, 同时研究矿集区金属矿床的垂向分布规律, 建立区内成矿模式, 进行深部成矿预测。

对铜陵矿集区, 拟通过以下方面的研究, 确定 3000 m 科学钻探预导孔的位置。①已有深部钻孔资料和物化探资料的再开发; ②岩浆热场的分布范围及岩体侵位的时序: 在全面研究各岩体与围岩接触关系和岩相学基础上, 用不同测年方法, 确定相同岩类岩体精确年龄, 进而探讨岩浆侵位的时序。③岩浆源区物源性质及其对成矿的贡献。④岩浆来源深度及岩体侵位结晶深度的研究, 有效再现岩浆从源区到地表浅处的热状态变化过程。⑤岩浆作用的深部过程及其与成矿的关系: 通过岩浆作用的动力学环境以及花岗岩类系列与成矿之间的关系分析, 确定侵入岩系列的形成、演化与壳幔相互作用之间的关系及其与成矿的关系, 建立中生代花岗质岩浆作用的深部过程及其成矿的动力学模型。

对庐枞矿集区, 主要围绕火山岩盆地的演化与大规模成矿的地质背景和深部找矿这个主题, 开展盆地内各火山旋回的岩石学、地球化学、年代学及成矿特征研究; 已有深部钻孔资料和物化探资料的再开发; 修编 1:5 万火山构造—岩相图, 建立盆地内



火山构造-岩相的立体模型和不同类型矿床的空间配置模型, 圈定深部岩浆-流体上升的主要通道, 预测深部找矿最有利的靶区。结合地球物理的探测结果, 优选中国大陆科学钻探超深孔的预导孔位置; 对预导孔岩芯进行详细的研究, 建立多学科的综合剖面, 验证矿集区的地球物理探测成果, 为深孔钻探选区、选址提供依据。

于都-赣县矿集区科学钻探选址预研究, 通过在矿集区银坑地区通过大比例尺的地质填图和 3000 m 的科学钻孔岩芯详细编录与物性研究, 建立岩性剖面柱、构造剖面柱、地球化学剖面柱、年代谱, 获得矿集区深部地质条件、物性和矿化的数据, 构建地壳结构模式; 验证综合地球物理异常和研究深部物性分布规律, 建立地球物理解释“标尺”; 通过综合研究揭示矿集区矿产分布规律, 建立成矿模式, 进行深部成矿预测, 进而为更深层次(5~50 km)地球物理探测提供地质、地球物理、地球化学参数和确定科学超深钻提供依据。

## 6 科学超深井钻探技术方案预研究

### 6.1 科学意义

世界各国近百年地球科学观测实践表明, 要想揭开大陆地壳演化奥秘, 更加有效的寻找资源、保护环境、减轻灾害, 必须提高对地球深部的认识水平。目前, 世界主要发达国家都已经将“地壳探测”计划作为实现可持续发展的国家科技发展战略。

随着社会经济长期快速发展, 我国面临日益突出的资源、能源、环境问题, 急需发展深部探测及相关技术, 为深部矿产资源评价与减灾防灾提供必要的科技支撑。我国要开展地壳探测工程, 必须首先要攻克科学超深井钻探技术, 探索开发一整套适用于高温高压高应力地层的科学超深井钻探技术, 包括钻进设备、机具及工艺技术, 为将来开展的科学超深井钻探工程奠定技术和人才基础。本课题共包含了三个方面的内容: 科学超深井钻探技术方案研究、科学钻探钻井设计软件系统和物探爆破孔快速程控技术研究。

### 6.2 科学超深井钻探技术方案研究

科学超深井钻探技术是配合地球深部探测科学研究而形成并发展起来的一门新兴技术领域, 其作用是为地学研究提供真实而丰富的地下实物资料、信息测试通道和地球物理解释标尺, 是进行地球科学研究必不可少的重要手段, 对地球科学研究目标能否实现起到决定性作用。但是由于坚硬地壳的阻隔和地球深部高温高压的环境条件, 使得科学超深

井钻探成为世界上最为艰难的大科学工程之一, 它是一个国家经济实力、科技实力、人才实力和工业基础的集中体现, 世界上只有发达国家进行过这项大科技工程的探索。科学超深井钻探是为特定的目标尽最大的努力而实施的, 是对当时钻探技术和工业技术的一次综合实力的反映, 其难度堪比人类的外太空探索。

我国要开展地壳探测工程, 必须首先要攻克科学超深井钻探技术, 探索开发一整套适用于高温高压高应力地层的科学超深井钻探技术, 包括钻进设备、机具及工艺技术, 为将来开展的科学超深井钻探工程奠定技术和人才基础, 因此它应成为地壳探测工程先期启动的培育性专项的关键技术之一。

然而科学超深井钻探也是投资巨大、风险巨大的实体工程技术, 其工程设计必须要结合具体的项目目标和实施条件方能完成, 不可能一开始就投入巨大的人力物力进行实物的研究制造, 在工程尚没有最终落实的情况下, 应当首先对国内外已有的各种科学超深井钻探技术进行对比研究, 结合我国国情提出一整套具有普适性的施工方案, 并对其中部分关键技术进行必要的室内实验研究, 以指导方案设计。因此, 应尽早地组织开展科学超深井技术研究和方案准备, 为相关地学研究工程的开展奠定技术基础。通过课题的研究还可培养造就一批中青年技术与管理人才, 促进地球科学与多学科的联合与交叉, 为发展新学科生长点提供机遇, 为我国经济和社会发展带来巨大效益。科学超深井钻探技术研究将会为我们获得新的地学基础理论和钻探技术知识, 建立地球科学知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知识应用系统做出重大贡献。

### 6.3 科学目标和研究内容

根据深部探测与科学研究需求, 提出一整套 12000 m 以深科学超深井钻探技术方案及需要深入开展研究的主要关键技术问题; 开发一套专用的科学钻探钻井设计软件; 为实施地壳探测工程超深井作好必要的研究队伍和技术准备, 奠定知识和智力基础。研发适用于复杂地形及各种破碎坚硬地层、钻深能力 30~50 m 的地震探测爆破孔快速钻进及成孔成套设备和工艺技术。

“深部探测技术与实验研究专项”是为“地壳探测计划”做关键技术准备, 对关键技术难点进行攻关的前期培育性项目。其中几个重要的项目都需要采用钻探的方法来获取第一手实物资料, 由于要求不同, 钻探的深度也不同, 有些浅钻和一般的钻孔利用现有技术基本可以解决。但是多数钻孔是在比

较复杂的地区、比较坚硬的地层施工,又有特殊的要求。特别是万米以上的科学超深井,技术难度巨大,没有成熟的经验可以借鉴。从钻井设备、钻杆柱、碎岩工具、取心取样方法、井身轨迹控制、钻井液到井壁保护、钻井数据采集等等都需要开展全新的技术探索。每一项任务都是需要结合具体工程做出具体对策的,又都是需要投入巨大人力、物力进行实物研究的。因此本专题当前的主要任务是在一定实验数据的基础上先期进行一些方案探索性研究,对超深钻提出总体的设计方案,以指导今后对各个具体方面的研制工作。同时,对地球物理方面涉及的特种地震探测爆破孔所使用的钻探设备和工艺器具和工艺方法,将开展具体的研制工作。

## 7 综合研究和预期成果

### 7.1 研究内容

《大陆科学钻探选址与科学钻探实验》项目设置的 7 个科学钻探选址,属于板块边界的科学钻探有西藏罗布莎铬铁矿区、云南腾冲火山-地热构造带和山东莱阳盆地;属于板块内部的科学钻探有金川铜镍硫化物矿集区、华南于都-赣县多金属矿集区和铜陵-庐枞矿集区(图 7)。综合研究的主要内容包括不同板块边界的构架以及深部结构对浅部响应的对比、扬子华南中酸性火山岩岩浆岩多金属矿集区的矿床成因对比、不同类型陆相火山岩的成因对比、钻孔脆性变形及构造应力场和不同类型地幔岩的成因和地幔流变学的对比。拟开展科学钻探选址关键科学问题的综合对比和集成研究总结,包括重要的矿产资源集聚区的成矿背景、成矿条件和成矿前景以及火山地质灾害预防、板块汇聚边界的深部动力学方面。

西藏罗布莎铬铁及相邻矿区的科学钻探的主要科学问题是:新特提斯洋盆的形成,地幔矿物及动力学和铬铁矿形成及前景(图 8)。综合课题拟开展的

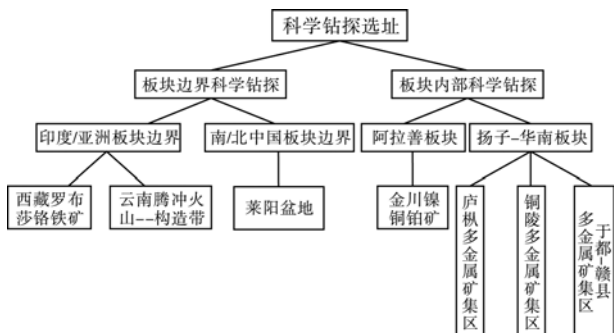


图 7 七个预导孔科学选址的大地构造背景

Fig. 7 Tectonic setting for the seven pilot holes of scientific drilling

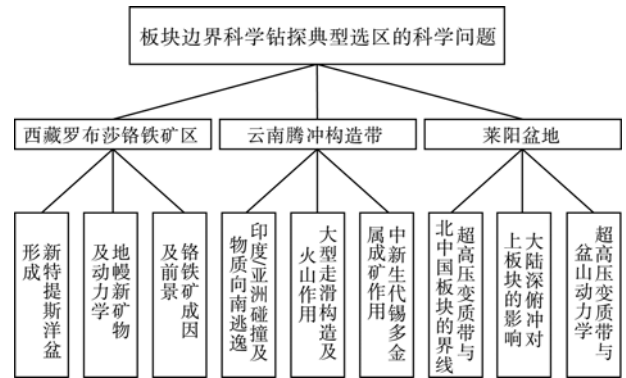


图 8 板块边界科学钻探典型选区的科学问题示表

Fig. 8 Scientific problems of the drilling sites at the margin of the plate

研究内容包括西藏罗布莎铬铁矿区横穿预选区的地震反射剖面、天然地震层析剖面和大地球磁剖面;开展雅鲁藏布江蛇绿岩带的构造背景的研究;罗布莎蛇绿岩中含深部地幔矿物岩石的流变学研究,包括地幔矿物的微构造、组构学(EBSD)以及岩石物性的测定和分析,探明大洋深地幔条件环境下的流变学特征及动力学条件。

甘肃金川铜镍硫化物矿集区科学钻探的科学问题包括大陆地幔作用与地幔动力学、超基性岩成矿理论和我国最具潜力的超大型贵金属矿产的前景(图 9)。综合课题拟开展的研究内容包括金川铜镍硫化物矿集区横穿预选区的地震反射剖面、天然地震层析剖面和大地球磁剖面;开展超基性岩石中含地幔矿物的流变学研究,包括地幔矿物的微构造、组构学(EBSD)以及岩石物性的测定和分析,探明陆内地幔条件环境下的流变学特征及动力学条件。开展金川地幔岩和罗布莎地幔岩对比的研究。金川铜镍硫化物矿集区和西藏罗布莎铬铁矿区形成于不同时期和不同构造环境,前者可能生成于元古代陆内裂谷环境,后者为新特提斯洋的地幔环境的产物,此

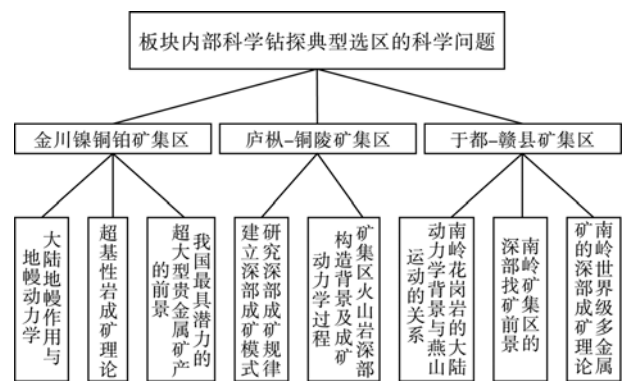


图 9 示板块内部科学钻探典型选区的科学问题

Fig. 9 Scientific problems of the drilling sites within the plate

两项科学钻探的综合研究和对比涉及不同类型地幔岩石的成因和流变学特征及其动力学意义。

云南腾冲火山-地热构造带的科学问题包括印度、亚洲碰撞, 物质向南逃逸, 大型走滑构造及火山作用和中新生代锡多金属成矿作用(图 2)。拟开展云南腾冲火山-地热构造带横穿预选区的地震反射剖面、天然地震层析剖面和大地球磁剖面, 选择科钻位置, 建立科钻的深度预剖面。查明腾冲新生代火山岩盆地的大地构造背景。腾冲火山岩与莱阳火山岩具有不同的动力学背景, 前者为位于走滑断裂上的高碱钙碱性, 腾冲火山岩所处的特殊构造位置使其成为解决印度板块楔入亚洲大陆重大科学问题的切入点。莱阳盆地中的白垩纪青山群碱性火山岩则形成于著名的苏鲁超高压变质带折返后期的伸展环境中, 也是一个至关重要的窗口。对于走滑和伸展环境下生成的这两类火山岩的形成深度、通道以及与深部热场的关系等关键问题的综合对比, 是大陆动力学研究的新课题。

山东莱阳盆地中国南北板块边界的科学问题有超高压变质带与中国北板块的界线、大陆俯冲对板上的影响和超高压变质带与盆山动力学(图 2)。重点围绕板块汇聚边界的深部动力学好油气资源与金矿床成因开展综合地质学研究, 在开展地表地质调查、大比例尺科研填图、浅部地质勘探及综合地质学研究基础上, 研究莱阳盆地物质来源与巨量超高压变质岩剥露及苏鲁造山带隆升的耦合机制, 以及南北中国板块会聚边界的位置。

庐枞-铜陵矿集区的科学问题包括研究深部成矿规律、建立深部成矿模式和矿集区火山岩深部构造背景及成矿动力学过程(图 3)。于都-赣县矿集区的科学问题包括南岭花岗岩的大地动力学背景与燕山运动的关系、南岭矿集区的深部找矿前景和南岭世界级多金属矿的深部成矿理论(图 3)。重点通过板内岩浆作用的动力学环境以及两个系列花岗岩类与成矿之间的关系分析, 对比两个系列侵入岩的形成、演化与壳幔相互作用之间的关系及其与成矿的关系, 确定两个系列侵入岩的形成、演化与壳幔相互作用之间的关系及其与成矿的关系, 最后建立中生代火山-花岗质岩浆作用的深部过程及其成矿的动力学模型。查明地下 1000 m 以上侵入体、矿体的空间分布特征, 选择深部成矿可能性大, 并具有重要的物化探异常的地带, 实施 1 口 2000~3000 m 的科学钻井。通过钻孔岩芯的物性研究, 直接验证综合地球物理异常, 确定深部大岩基的位置及揭示基底岩石。探测深部(1000 m 以下)地层的含矿性, 建

立异常解释的“标尺”, 为研究矿集区金属矿床的垂向分布规律, 建立区内铜、金等矿床的成矿模式, 进行深部成矿预测打好基础。

## 7.2 预期成果

大陆科学钻探选址与钻探实验项目预期在以下几方面取得进展。

(1) 对金川矿集区的钻探实验研究不仅仅有可能发现深部的矿体, 促进和解决成矿条件, 丰富与完善现代成矿理论; 培育一批超镁铁岩浆矿床方面的人才队伍, 并且对指导我国深部资源勘查具有重要的现实意义;

(2) 对罗布莎矿集区的钻探实验研究不仅仅有可能发现深部的铬铁矿矿体, 为解决我国铬铁矿瓶颈问题作出贡献, 并对指导我国深部资源勘查具有重要的现实意义; 雅鲁藏布江缝合带中不同地区的选址研究将为在该区开展深孔科学钻探的必要性和可行性做出论证;

(3) 腾冲地区开展的钻探实验研究不仅对查明该区新生代火山作用、中新生代花岗岩和成矿作用与构造活动关系, 而且对阐明大型韧性走滑剪切带走滑过程及其对青藏高原物质向东南的流动和逃逸的响应, 以及对地块内新生代火山岩盆地的制约非常关键; 同时为高热异常区钻探试验的各种地质、地球物理参数, 为该区及相似地区进行深孔科学钻探的必要性和可行性提供依据;

(4) 莱阳盆地处于中国东部关键的大地构造位置, 是研究南、北中国板块边界及其对接时空过程, 板块会聚边界的深部物质组成、结构、流变学与动力学的重要天然实验室。胶东地区有超大型金矿床, 是我国最重要的金产区。在莱阳盆地边缘不仅发现了原生金矿, 也是寻找金矿的重要远景区。同时, 莱阳盆地也有良好的油气资源潜力。因此, 通过系统的科学钻探、综合地球物理探测和多学科地学研究来解决重大地学问题, 为寻找油气和黄金资源提供新的途径, 不仅具有重大的理论意义, 也具有巨大的潜在经济效益;

(5) 对铜陵、庐枞和于都-赣县矿集区的钻探实验研究不仅仅能解决矿集区深部地质结构、深部成矿环境等关键科学问题, 揭示典型矿集区不同类型矿床的主要控矿层、含矿岩体的空间分布, 圈定一批深部成矿靶区, 对指导我国深部资源勘查具有重要的现实意义; 为研究深部成矿理论提供全新的深部背景, 提高对我国东部成矿背景、成矿动力学过程的认识。

(6) 超深孔钻探是为实施特定的目标, 是对当



时钻探技术和工业技术的一次综合实力的反应。本项目的研究过程将对相关钻探工艺技术进行调研评估,从而促进其发展完善,为科学钻探超深孔的实施奠定扎实的技术基础。为我国地壳探测工程和相关地球科学研究的成功实施提供保障。通过本项目的实施,可培育起一批超深孔钻探技术人才队伍,提高我国在科学超深孔钻探技术领域的研究水平。其技术推广之后还可促进我国钻探技术水平的整体提高。

致谢:文章是参考了7个课题的设计书,准备过程中得到刘志强、许翠萍、徐向珍、刘飞、刘钊等人的帮助,对此,表示诚挚的感谢。

## 参考文献:

- 白登海,廖志杰,赵国泽,王绪本. 1994. 从MT探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源[J]. 科学通报, 39(4): 344-347.
- 曹国权,王致本,张成基. 1990. 山东胶南地体及其边界断裂五莲—荣成断裂的构造意义[J]. 山东地质, 6(1): 1-15.
- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京:地质出版社: 1-379.
- 常印佛,刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床 - 以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 2(1): 11-20.
- 从柏林,吴根耀,张旗,张儒媛,翟明国,赵大升,张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J]. 中国科学(B辑), 23(11): 1201-1207.
- 从柏林,张雯华,郑学正. 1977. 我国东部中生代火山岩岩石化学及其地质意义[J]. 中国科学(A辑), 3: 245-259.
- 邓晋福,莫宣学,罗照华,赵海玲,赵国春,曹永清,于学政. 1999. 火成岩构造组合与壳-幔成矿系统[J]. 地学前缘, 6(2): 259-271.
- 董方浏,侯增谦,高永丰,曾普胜,蒋成兴,杜安道. 2005. 滇西腾冲大铜厂铜-铅-锌矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素定年[J]. 矿床地质, 24(6): 663-669.
- 董方浏,侯增谦,高永丰,曾普胜,蒋成兴. 2006. 滇西腾冲新生代花岗岩:成因类型与构造意义[J]. 岩石学报, 22(4): 927-937.
- 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.
- 杜杨松. 1994. 论酸性-中酸性火成岩中包体的分类与命名[J]. 现代地质, 8(2): 127-132.
- 傅斌,任启江,邢凤鸣,徐兆文,胡文瑄. 1997. 安徽沙溪含铜斑岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年及其地质意义[J]. 地质论评, 43(3): 310-316.
- 洪汉净,吴建平,王庆良,李克,赵慈平,上官志冠,杨清福,张恒荣,刘国明. 2007. 中国火山危险性等级与活动性分类[J]. 地震地质, 29(3): 447-459.
- 胡圣标,何丽娟,汪集旻. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5): 611-626.
- 胡文瑄,徐克勤. 1992. 论安徽庐枞盆地大鲍庄式喷气沉积-叠加改造型硫铁矿床[J]. 地质科学, 3: 213-224.
- 黄少鹏. 1989. 中国大陆地区热流数据的分析及其初步分析[J]. 地震地质, 11(3): 17-26.
- 季建清,钟大赉,张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学、及对青藏高原东南部块体运动的意义[J]. 地质科学, 35(3): 336-349.
- 姜朝松,周真恒,赵慈平. 2004. 腾冲火山区地壳及上地幔结构特征[J]. 地震研究, 27(增刊): 1-6.
- 姜朝松. 1998. 腾冲新生代火山分布特征[J]. 地震研究, 21(4): 309-320.
- 黎伟,刘玉权. 1998. 腾冲火山区水平形变初探[J]. 地震研究, 21(4): 362-373.
- 李成波,施行觉,刘苏苏,赵慈平,施发奇,邵德晟,姜朝松. 2007. 腾冲火山区的 GPS 形变特征[J]. 地球物理学进展, 22(3): 765-770.
- 李桂群,范德江,任景民. 1994. 胶莱盆地发育演化及其油气前景探讨[J]. 青岛海洋大学学报, 24(3): 413-419.
- 李双应,孟庆任,万秋,孔为伦,何刚. 2008. 长江中下游地区二叠纪碳酸盐斜坡沉积及其成矿意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1733-1744.
- 廖远涛. 2002. 胶来盆地的盆地样式及构造演化[J]. 新疆石油地质, 23(4): 345-347.
- 廖志杰,赵平. 1999. 滇藏地热带-地热资源和典型地热系统[M]. 北京:科学出版社.
- 林伟, FAURE M, 王清晨. 2003. 胶东半岛中生代构造演化的几何学和运动学[J]. 地质科学, 38(4): 495-505.
- 凌贤长. 1998. 鲁东造山带基本特征及其边界确定[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 31(5): 116-121.
- 刘福来,许志琴,杨经绥,张泽明,薛怀民,李天福. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. 岩石学报, 20(1): 9-26.
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文黎,王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. 地球化学, 31(2): 129-140.
- 刘少峰,刘文灿,戴少武,黄思骥,陆五云. 2001a. 合肥盆地沉积物源分析及其对边缘山带逆冲剥露过程的限制[J]. 地质学报, 2: 220-231.
- 刘少峰,张国伟,张宗清,苏尚国. 2001b. 合肥盆地花岗岩砾石的同位素年代学示踪[J]. 科学通报, 46(9): 748-753.
- 刘玉强,杨东来,黄太岭,李军,史辉. 1999. 山东胶来盆地金矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 18(3): 195-207.
- 刘玉强. 2003. 胶来盆地地质解译及金矿床地质-地球物理-地球化学背景[J]. 矿产与地质, 17(96): 191-197.
- 罗照华,莫宣学,侯增谦,邓万明,王江海,赵志丹,喻学惠,李建平. 2006a. 青藏高原新生代形成演化的整合模型-来自火成岩的约束[J]. 地学前缘, 13(4): 196-211.
- 罗照华,魏阳,辛后田,詹华明,柯珊,李文韬. 2006b. 造山后脉岩组合的岩石成因-对岩石圈拆沉作用的约束[J]. 岩石学报, 22(6): 1672-1684.
- 毛景文. 1988. 云南腾冲地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列的初步研究[J]. 地质学报, 4: 343-352.
- 莫宣学,董国臣,赵志丹,周肃,王亮亮,邱瑞照,张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281-290.
- 莫宣学,潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成:构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 13(6): 43-51.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J].

- 地学前缘, 10(3): 135-148.
- 穆治国, 佟伟, CURTIS G H. 1987. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源问题[J]. 地球物理学报, 30(3): 261-270.
- 倪志耀, 王仁民, 袁建平. 2001. 胶东海阳所堆晶辉长岩的变质反应结构、石榴石形成及 P-T 演化[J]. 高校地质学报, 7(3): 316-328.
- 裴荣富, 李进文, 梅燕雄. 1995. 大陆边缘成矿[J]. 大地构造与成矿, 29(1): 24-34.
- 任启江, 王德滋, 徐兆文, 董火根, 潘龙泉, 杨荣勇, 方长泉, 胡进安. 1993a. 安徽庐枞火山—构造洼地的形成、演化及成矿[J]. 地质学报, 67(2): 131-145.
- 任启江, 徐兆文, 刘孝善, 杨荣勇, 孙冶东. 1993b. 安徽庐枞地区中生代火山岩系的时代及其意义[J]. 地层学杂志, 17(1): 46-51.
- 上官志冠. 2000. 腾冲热海地热田热储结构与岩浆热源的温度[J]. 岩石学报, 16(1): 83-90.
- 苏德辰, 杨经绥. 2010. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报, 84(6): 873-886.
- 苏尚国, 赖兴运, 张春林. 1996. 胶东海阳所、葛家集基性麻粒岩 P-T 演化及成因意义[J]. 现代地质, 10(4): 455-460.
- 唐华风, 程日辉, 白云凤, 孔庆莹. 2003. 胶莱盆地构造演化规律[J]. 世界地质, 22(3): 246-251.
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 周建波. 2004. 胶东地块东部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究[J]. 岩石学报, 20(5): 1039-1042.
- 汪缉安, 徐青, 张文仁. 1990. 云南大地热流及地热地质问题[J]. 地震地质, 12(4): 367-377.
- 王椿镛, 楼海, 吴建平, 白志明, 皇甫岗, 秦嘉政. 2002. 腾冲火山地地区地壳结构的地震学研究[J]. 地震学报, 24(3): 231-242.
- 王德滋, 周新民, 徐夕生, 姚玉鹏. 1992. 微粒花岗岩包体的成因[J]. 桂林冶金地质学院学报[J]. 12(3): 235-241.
- 王恒升, 白文吉, 王炳熙. 1983. 中国铬铁矿床及成因[M]. 北京: 科学出版社: 1-336.
- 王江海, 尹安, HARRISON T M, GROVE M, 周江羽, 张玉泉, 解广轰. 2001. 青藏东缘新生代高钾岩浆活动的热年代学制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 231-233.
- 王仁民, 安家桐, 赖兴运. 1995. 胶东蛇绿岩套的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 11(增刊): 221-227.
- 王松山. 1982. 应用  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年技术研究某些火山岩及陨石样品的受热历史[J]. 地质科学, 2: 226-234.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明. 1987. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报, 24(1): 41-48.
- 吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, WOODEN J L, MAZADAB F K, MATTINSON C. 2008. 铜陵狮子山地区酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 24(8): 1801-1812.
- 吴冲龙, 张善文, 毛小平, 柳忠良, 宋立军, 佟彦明. 2006. 苏鲁造山带北侧构造演化的几何学运动学特征[J]. 地球化学—中国地质大学学报, 31(6): 817-822.
- 吴智平, 李凌, 李伟, 周瑶琪. 2004. 胶来盆地莱阳期原型盆地的沉积格局及有利油气勘探区选择[J]. 大地构造与成矿学, 28(3): 330-337.
- 肖序常, 王方国. 1984. 中国蛇绿岩概论[J]. 中国地质科学院院报, 9: 19-30.
- 谢智, 李全忠, 陈江峰, 高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. 高校地质学报, 13(2): 235-249.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996. 安徽铜陵地区高钾钙碱性侵入岩[J]. 地球化学, 25(1): 29-38.
- 徐贵忠, 蔡燕杰, 周瑞, 余宏全, 王艺芬, 宋明春, 李兵. 2004. 山东胶莱盆地形成的动力学条件及其与金成矿作用的相关性讨论[J]. 现代地质, 18(1): 8-16.
- 徐青, 汪缉安, 汪集旸, 张文仁. 1992a. 云南大地热流及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 16(3): 285-299.
- 徐青, 汪缉安, 汪集旸. 1992b. 大陆碰撞造山带复合叠加型岩石圈热结构—以云南三江地区为例[J]. 地质论评, 38(6): 540-545.
- 徐青, 徐翠华, 汪缉安, 陈墨香. 1997. 云南地热资源—以腾冲地区为重点进行解剖[J]. 地质地球化学, (4): 77-84.
- 徐文艺, 徐兆文, 任启江, 傅斌, 牛翠祎. 1999. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床成岩成矿热历史探讨[J]. 地质论评, 45(4): 361-367.
- 徐夕生, 周新民, 王德滋. 1993. 中酸性岩浆岩中岩石包体研究的新进展[J]. 地球科学进展, 8(4): 54-58.
- 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 陈松永, 方青松, 白文吉. 2008. 雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石[J]. 岩石学报, 24(7): 1453-1462.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 曾令森, 刘福来, 梁凤华, 唐哲民, 蔡志慧. 2006. 苏鲁高压—超高压变质地体的陆—陆碰撞深俯冲剥蚀模式[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 31(4): 623-634.
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 20(1): 1-8.
- 许志琴. 2007. 深俯冲和折返动力学: 来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约[J]. 岩石学报, 23(12): 3041-3053.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 杨刚, 喻钢, 钱卉. 2005. 长江中下游地区晚中生代蝌蚪山玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约[J]. 地球化学, 34(5): 455-469.
- 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 钱卉, 周泰禧. 2003. 长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据[J]. 高校地质学报, 9(2): 195-206.
- 杨金中, 赵玉灵, 沈远超, 刘铁兵, 李光明. 1999. 胶来盆地与金矿成矿[J]. 黄金, 20(9): 1-6.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 孟繁聪, 陈松永, 张仲明, 戎合. 2007b. 极地乌拉尔蛇绿岩铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. 中国地质, 34(5): 950-952.
- 杨经绥, 李天福, 梁凤华, 吴才来, 陈松永. 2007a. 中国大陆科学钻探工程主孔(CCSD-MH)石榴石橄榄岩: 一个经历了深俯冲作用的古生代超镁铁质侵入体[J]. 岩石学报, 23(12): 3153-3170.
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 李兆丽, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 白文吉, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物[J]. 岩石学报, 24(7): 1445-1452.
- 杨启军, 黄小龙, 徐义刚. 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(4): 817-834.
- 杨志坚. 1992. 胶东地块研究取得新进展[J]. 中国区域地质, 1: 43-50.

- 叶建庆, 蔡绍平, 刘学军, 王绍晋, 蔡明军. 2003. 腾冲火山地震群的活动特征[J]. 地震地质, 25(B12): 128-137.
- 翟建平. 1989. 昆山、城山和大龙山岩体的锶同位素特征及其成因研究[J]. 地球化学, (3): 202-209.
- 翟明国, 丛柏林, 郭敬辉, 刘文军, 李永刚, 王清晨. 1999. 苏鲁造山带东北端石榴辉石麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学及其大地构造含义[J]. 地质科学, 34(3): 301-310.
- 翟慎德. 2003. 胶来盆地莱阳凹陷构造特征及演化[J]. 石油实验地质, 25(2): 137-142.
- 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 莫宣学, 薛君治. 1996. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究[M]. 西藏: 西藏人民出版社.
- 张金昌, 谢文卫. 2010. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 84(6): 887-894.
- 张荣华. 1981. 长江中下辨地区玢岩铁矿和块状黄铁矿的物理化学条件[J]. 地质论评, 27(1): 25-37.
- 张希道, 王来明. 1996. 胶东威海-乳山麻粒岩相岩石的发现及初步分析[J]. 中国区域地质, (3): 213-221.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 董树文, 袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪-古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J]. 地质学报, 82(9): 1230-1257.
- 张泽明, 沈昆, 刘勇胜, 游振东, 石超, 王金丽. 2007. 南苏鲁造山带毛北超高压变质岩体的成因与成矿作用[J]. 岩石学报, 23(12): 3095-3115.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 游振东, 沈昆, 杨经绥, 李天福, 陈世忠. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050 m)榴辉岩岩石化学研究[J]. 岩石学报, 20: 27-42.
- 张竹如, 陈世桢. 1999. 胶东金成矿域胶来盆地中超大型金矿床找矿远景[J]. 地球化学, 28(3): 03-212.
- 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 2006. 由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊[J]. 岩石学报, 22(6): 1517-1528.
- 郑永飞, 傅斌, 龚冰. 1995. 安徽黄梅尖岩体热历史及其与成矿关系: 同位素证据[J]. 地质学报, 69(4): 337-348.
- 钟大赉, TAPPONNIER P, 吴海威, 张连生, 魏少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, SCHAEERER U, LACASSIN R, LEIQU P. 1989. 大型走滑断层—碰撞后陆内变形的重要形式[J]. 科学通报, 34(7): 526-529.
- 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 张玉泉, 王冉, 韦栋梁, 杨之青. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. 地质论评, 52: 224-229.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, COOKE D, MEFFER S, 赵国春. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(11): 1342-1353.
- 周珣若, 吴才来, 黄许陈, 张成火. 1993. 铜陵酸性侵入岩中同源包体及岩浆动力学[J]. 岩石矿物学杂志, 12(1): 20-31.
- hai(Hot Sea) Field of Tengchong from the Result of Magnetotelluric Sounding[J]. Chinese Science Bulletin, 39(4): 344-347(in Chinese).
- BAI Wen-ji, SHI Ni-cheng, FANG Qing-song, LI Guo-wu, XIONG Ming, YANG Jing-sui, RONG He. 2006. Luobusaite: A New Mineral[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 656-659.
- CAO Guo-quan, WANG Zhi-ben, ZHANG Cheng-ji. 1990. Jiaonan terrane in Shandong Province and the tectonic significance of the Wulian-Rongcheng fracture[J]. Geology of Shandong, 6(1): 1-15(in Chinese).
- CASTRO A, DELA ROSA J D, STEPHENS W E. 1990. Magma mixing in the subvolcanic environment: Petrology of the Grerna interaction zone near Seville, Spain[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 105: 9-26.
- CASTRO A, MORENO-VENTAS I, DELA ROSA J D. 1991. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature[J]. Earth-science Reviews, (31): 237-253.
- CHANG Yin-fo, LIU Xue-gui. 1983. On strata-bound skarn deposits[J]. Mineral deposits, 2(1): 11-20(in Chinese).
- CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Yangtze River[J]. Beijing: Geological Press: 1-379(in Chinese).
- CHEN J F, YAN J, XIE Z, XU X, XING F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in Eastern China: constraints on Sources[J]. Phys. Chem. Earth(A), 26: 719-731.
- CHEN R X, ZHENG Y F, GONG B, ZHAO Z F, GAO T S, CHEN B, WU Y B. 2007a. Origin of retrograde fluid in ultra-high-pressure metamorphic rocks: Constraints from mineral hydrogen isotope and water content changes in eclogite-gneiss transitions in the Sulu orogen[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71: 2299-2325.
- CHEN R X, ZHENG Y F, GONG B, ZHAO Z F, GAO T S, CHEN B, WU Y B. 2007b. Oxygen isotope geochemistry of ultra-high-pressure metamorphic rocks from 200-4000 m core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Chemical Geology, 242: 51-57.
- CHEN R X, ZHENG Y F, ZHAO Z F, TANG J, WU Y B, LIU X M. 2007c. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for contrasting origin of bimodal protoliths for ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Journal of Metamorphic Geology, 25: 873-894.
- CONG Bo-lin, ZHANG Wen-hua, ZHENG Xue-zheng. 1977. Petrochemistry of Mesozoic volcanic rocks in east China and its geological significance[J]. Science in China(A Series), 3: 245-259(in Chinese).
- CONG Bo-lin, WU Gen-yao, ZHANG Qi, ZHANG Ru-yuan, ZHAI Ming-guo, ZHAO Da-sheng, ZHANG Wen-hua. 1993. Petrological and tectonic evolution of Paleotethys tectonic belt in western Yunnan, China[J]. Science in China (B Series), 23(11): 1201-1207(in Chinese with English abstract).
- COSCA M A, GIORGIS D, RUBMLE D, LIOU J G. 2005. Limiting effects of UHP metamorphism on length scales of oxygen, hydrogen, and argon isotope exchange: an example from the Qinglongshan UHP eclogites, Sulu terrain, China[J]. Interna-

## References:



- tional Geology Review, 47: 716-749.
- DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, ZHAO Hai-ling, ZHAO Guo-chun, CAO Yong-qing, YU Xue-zheng. 1999. Igneous petroectonic assemblage and crust mantle metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 6(2): 259-271(in Chinese with English abstract).
- DIDIER J, BARBARIN B. 1991. Enclaves and Granite Petrology[M]. Amsterdam: Elsevier.
- DING Lin, ZHONG Da-lai. 1993. The characterics of deformation in Gaoligong strike-slip fault[M]. Beijing: China Ocean Press, Advances in Geoscience, (2): 82-92.
- DONG Fang-liu, HOU Zeng-qian, GAO Yong-feng, ZENG Pu-sheng, JIANG Cheng-xing, DU An-dao. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Datongchang copper-lead-zinc deposit in Tengchong area, western Yunnan[J]. Deposit Geology, 24(6): 663-669(in Chinese with English abstract).
- DONG Fang-liu, HOU Zeng-qian, GAO Yong-feng, ZENG Pu-sheng, JIANG Cheng-xing. 2006. Cenozoic granitoid in Tengchong, western Yunnan: Genesis type and implication for tectonics[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 927-937(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.
- DU Yang-song. 1994. Classification and nomenclature on the enclaves in acidic-intermediate acidic igneous rocks[J]. Geoscience, 8(2): 127-132(in Chinese with English abstract).
- FANG Qing-song, BAI Wen-ji, YANG Jing-sui, XU Xiang-zhen, LI Guo-wu, SHI Ni-cheng, XIONG Ming, RONG He. 2009. Qu-songite (WC): A new mineral[J]. American Mineralogist, 94: 387-390.
- FAURE M, LIN W, BRETON N L. 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China[J]. Geology, 29: 119-122.
- FAURE M, LIN W, SCHARER U, SHU L S, SUN Y, ARNAUD N. 2003. Continetal subduction and exhumation of UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabie-shan(East China)[J]. Lithos, 70: 213-241.
- FU Bin, REN Qi-jiang, XING Feng-ming, XU Zhao-wen, HU Wen-xuan. 1997.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of copper(gold)-bearing porphyry in Shaxi, Anhui province and its geological significance[J]. Geological Review, 43(3): 310-316(in Chinese with English abstract).
- HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L, IRELAND T, WALKER D, SHUWEN D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. Earth Planetary Science Letter, 161: 215-230.
- HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L, MCWILLIAMS M O, IRELAND T, CALVERT A, DONG S W, WENK H R, CHATEIGNER D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing[J]. Journal of Geophysics Research-Solid Earth, 105: 13339-13364.
- HONG Han-jing, WU Jian-ping, WANG Qing-liang, LI Ke, ZHAO Ci-ping, SHANGUAN Zhi-guan, YANG Qing-fu, ZHANG Heng-rong, LIU Guo-ming. 2007. Volcanic threat levels and classification of volcanic activity in China[J]. Seismology and Geology, 29(3): 447-459(in Chinese with English abstract).
- HUANG Shao-peng. 1989. The distribution of heat flow data in the continental area of China and its preliminary studies[J]. Seismology and Geology, 11(3): 17-26(in Chinese).
- HU Sheng-biao, HE Li-juan, WANG Ji-yang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area(3rd edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611-626(in Chinese with English abstract).
- HU Wen-xuan, XU Ke-qin. 1992. Study on dabaozhuang-type pyrite deposits-exhalation-sedimentation-superimposition-transformation sulfide deposits in the Lujiang-zungyang basin, Anhui province[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 3: 213-224(in Chinese).
- JI Jian-qing, ZHONG Da-lai, ZHANG Lian-sheng. 2000. Kinematics and Dating of Cenozoic strike-slip faults in the Tengchong area, west Yunnan: Implications for the block movement in the southeastern Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 35(3): 336-349(in Chinese with English abstract).
- JIANG Chao-song. 1998. Distribution characteristics of Tengchong volcano in the Cenozoic Era[J]. Journal of Seismological Research, 21(4): 309-320(in Chinese with English abstract).
- JIANG Chao-song, ZHOU Rui-qi, ZHAO Ci-ping. 2004. The Structural Characteristics of the Crust and Upper Mantle in the Area of Tengchong Volcano[J]. Journal of Seismological Research, 27(s1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- LIAO Yuan-tao. 2002. The pattern and tectonic evolution of jiaolai basin[J]. Xinjiang petroleum Geology, 23(4): 345-347(in Chinese with English abstract).
- LIAO Zhi-jie, ZHAO Ping. 1999. Geothermal belt of Yunnan and Tibet: geothermal resources and geothermal systems typically[M]. Beijing: Science press(in Chinese).
- LI C, XU Z H, DE WAAL S A, RIPLEY E M, MAIER W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis[J]. Mineralium Deposita, 39: 159-172.
- LI Cheng-bo, SHI Xing-jue, LIU Su-su, ZHAO Ci-ping, SHI Fa-qi, SHAO De-sheng, JIANG Chao-song. 2007. Research on the character of the GPS deformation in the Tengchong volcano area[J]. Progress in Geophysics, 22(3): 765-770(in Chinese with English abstract).
- LIGHTFOOT P C, CHRIS J H, OLSHEFSKYK. 1997. Geochemistry of Tertiary tholectes and picrites from Qeqertarsuaq (Disko Island) and Nuussuaq, west Greenland with implications for the mineral potential of comagmatic intrusions[J]. Contrib. Mineral Petrol, 128: 139-163.
- LI Gui-qun, FAN De-jiang, REN Jing-min. 1994. The evolution features of the Jiaolai basin and study of its prospective old and gas deposits[J]. Journey of Ocean University of Qingdao, 24(3): 413-419(in Chinese with English abstract).
- LI S G, XIAO Y L, LIU D L, CHEN Y Z, GE N J, ZHANG Z Q, SUN S S, CONG B L, ZHANG R Y, HART S R, WANG S S. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes[J].

- Chemical Geology, 109: 89-111.
- LI S G, JAGOUTZ E, CHEN Y Z, LI Q L. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 1077-1093.
- LI Shuang-ying, MENG Qing-ren, WAN Qiu, KONG Wei-lun, HE Gang. 2008. Deposition of carbonate slope and ore-forming in Permian strata in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, east China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1733-1744(in Chinese with English abstract).
- LI Wei, LIU Yu-quan. 1998. Primary study of horizontal deformation in Tengchong volcano area[J]. *Journal of Seismological Research*, 21(4): 362-373(in Chinese with English abstract).
- LIN Wei, MICHELLE Faure, WANG Qing-chen. 2003. Mesozoic geometry and kinematics in the Jiaodong peninsula and its tectonic evolution[J]. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 495-505(in Chinese with English abstract).
- LING Xian-chang. 1998. Basic Characteristics and Boundaries of Ludong Orogenic Belt[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 31(5): 116-121(in Chinese with English abstract).
- LIU F L, XU Z Q, XUE H M. 2004. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane(eastern China): SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons[J]. *Lithos*, 78: 411-429.
- LIU Fu-lai, XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, ZHANG Ze-ming, XUE Huai-min, LI Tian-fu. 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9-26(in Chinese with English abstract).
- LIU Hong, QIU Jian-sheng, LUO Qing-hua, XU Xi-sheng, LING Wen-li, WANG De-zi. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui province: geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129-140(in Chinese with English abstract).
- LIU Shao-feng, LIU Wen-can, DAI Shao-wu, HUANG Si-ji, LU Wu-yun. 2001. The Analysis of Sediment Source in Hefei Basin and the Limit of the Thrust Exhumation Process in its Basin Margin Mountain Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2: 220-231(in Chinese).
- LIU Shao-feng, ZHANG Guo-wei, ZHANG Zong-qing, SU Shang-guo. 2001. Tracer isotope chronology of Granite gravel, in Hefei Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(9): 748-753(in Chinese).
- LIU Yu-qiang, YANG Dong-lai, HUANG Tai-ling, LI Jun, SHI Hui. 1999. Geological characteristics and ore prospecting targets in gold deposits of Jiaolai basin, Shangdong province[J]. *Mineral Deposits*, 18(3): 195-207(in Chinese with English abstract).
- LIU Yu-qiang. 2003. Geological explanation of Jiaolai basin and geological-geophysics -geochemical background of gold deposits[J]. *Mineral resources and Geology*, 17(96): 191-197(in Chinese with English abstract).
- LIU Y S, GAO S, ZONG K Q. 2008. Geochemistry of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese Continental Scientific Drill: insights into lower crustal growth associated with basaltic underplating[J]. *Chemical Geology*, 247: 133-153.
- LUO Zhao-hua, WEI Yang, XIN Hou-tian, ZHAN Hua-ming, KE Shan, LI Wen-tao. 2006. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex Constraints to lithosphere delamination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(06): 1672-1684(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhao-hua, MO Xuan-xue, HOU Zeng-qian, DENG Wan-ming, WANG Jiang-hai, ZHAO Zhi-dan, YU Xue-hui, LI Jian-ping. 2006. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: constraints from igneous rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 196-211(in Chinese with English abstract).
- MALPAS J, ZHOU M F, ROBINSON P T, REYNOLDS P H. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung-Zangbo ophiolites, Southern Tibet[J]. [London]Special Publication, Ophiolites in Earth history: Geological Society, 218: 191-206.
- MAO Jing-wen. 1988. The igneous rock series and the Tin polymetallic minerogenetic series in the Tengchong area, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 343-352(in Chinese).
- MAKEYEV A B. 1992. Mineralogy of the Alpine-type ultrabasic rocks in Polar Ura[M]. Science Press, St. Petersburg Publication Branch. St. Petersburg: 1-195(in Russian).
- MARUYAMA S, NUTMAN A P, MORIKAWA H, LIOU J G. 1998. SHRIMP U-Pb geochronology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks of the Dabie Mountains, Central China[J]. *Continental Dynamics*, 3: 72-85.
- MELCHER F, GRUM W, SIMON G. 1997. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan; a study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. *Journal of Petrology*, 38(10): 1419-1458.
- MELCHER F, GRUM W, THALHAMMER T V. 1999. The giant chromite deposits at Kempirsai, Urals: constraints from trace element(PGE, REE) and isotope data[J]. *Mineralium Deposita*, 34: 250-272.
- MO Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, DENG Jin-fu, DONG Guo-chen, ZHOU-Su, GUO Tie-ying, ZHANG Shuang-quan, WANG Liang-liang. 2003. Response of Volcanism to the India-Asia Collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- MO Xuan-xue, DONG Guo-chen, ZHAO Zhi-dan, WANG Liang-liang, ZHAO Rui-zhao, ZHANG Feng-qin. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281-290(in Chinese with English abstract).
- MO Xuan-xue, PAN Gui-tang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43-51(in Chinese with English abstract).
- MU Zhi-guo, TONG Wei, GARNISS H C. 1987. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, west Yunnan province[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 30(3): 261-270(in Chinese with English abstract).
- NI Zhi-yao, WANG Ren-min, YUAN Jian-ping. 2001. Corona

- texture, garnet formation and P-T evolution of gabbroic cumulate from haiyangsuo area eastern Shandong province, China[J]. Geological Journal of China Universities, 7(3): 316-328(in Chinese with English abstract).
- PEI Rong-fu, LI Jin-wen, MEI Yan-xiong. 2005. Metallogeny of continental margin[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 29(1): 24-34(in Chinese with English abstract).
- REN Qi-jiang, WANG De-zi, XU Zhao-wen, DONG Huo-gen, PAN Long-quan, YANG Rong-yong, FANG Chang-quan, HU Jin-an. 1993a. Formation and development of the Mesozoic Lujiang-Zongyang volcanic-structural depression in Anhui province and their relation to mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 67(2): 131-145(in Chinese with English abstract).
- REN Qi-jiang, XU Zhao-wen, LIU Xiao-shan, YANG Rong-yong, SUN Ye-dong. 1993b. Age of the Cenozoic volcanic rock series in the Luzong area of Anhui and its significance[J]. Journal of Stratigraphy, 17(1): 46-51(in Chinese).
- ROWLEY D B, XUE F, TUCKER R D, PENG Z X, BAKER J, DAVIS A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the Central Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology[J]. Earth Planetary Science Letter, 151: 191-203.
- RUMBLE D, GIORGIS D, IRELAND T, ZHANG Z M, XU H F, YUI T F, YANG J S, XU Z Q, LIOU J G. 2002. Low  $^{18}\text{O}$  zircons, U-Pb dating, and the Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66: 2299-2306.
- SHANGGUAN Zhi-guan. 2000. Structure of geothermal reservoirs and the temperature of mantle derived magma hot source in the Rehai area, Tengchong[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(1): 83-90(in Chinese with English abstract).
- SU De-chen, YANG Jing-sui. 2010. Advances of International Continental Scientific Drilling Program[J]. Acta Geologica Sinica, 84(6): 873-886(in Chinese with English abstract).
- SU Shang-guo, LAI Xing-yun, ZHANG Chun-lin. 1996. P-T evolution of granulites and their petrogenetic significance in Haiyangsuo and Gejiaji areas, Jiaodong[J]. Geoscience, 10(4): 455-460(in Chinese with English abstract).
- TANG Hua-feng, CHENG Ri-hui, BAI Yun-feng, KONG Qing-ying. 2003. Tectonic Evolution of the Jiaolai Basin[J]. World geology, 22(3): 246-251(in Chinese with English abstract).
- TANG Jun, ZHENG Yong-fei, WU Yuan-bao, ZHOU Jian-bo. 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of high-grade metamorphic rocks in the eastern part of the Shandong Peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(5): 1039-1042(in Chinese with English abstract).
- TAPPONNIER P, PELTZRE G, LE DAIN A Y, ARMIJO R, COBBOLD P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10: 611-616.
- WAN Y, LI R, WILDE S A, LIU D, CHEN Z, YAN L, SONG T, YIN X. 2005. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69: 4333-4348.
- WALLIS S, ENAMI M, BANNO S. 1999. The Sulu UHP Terrane: A Review of the Petrology and Structural Geology[J]. International Geology Review, 41: 906-920.
- WANG Chun-yong, LOU Hai, WU Jian-ping, BAI Zhi-ming, HUANG Pu-gang, QIN Jia-zheng. 2002. Seismological study on the crustal structure of Tengchong volcano-geothermal area[J]. Acta Seismologica Sinica, 24(3): 231-242(in Chinese with English abstract).
- WANG De-zi, ZHOU Xin-min, XU Xi-sheng, YAO Yu-peng. 1992. On geneses of microgranitoid enclaves[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 12(3): 225-240(in Chinese).
- WANG Heng-sheng, BAI Wen-ji, WANG Xi-bin. 1983. Chromite Deposits and Their Genesis in China[M]. Beijing: Science Press: 1-336(in Chinese).
- WANG Jiang-hai, YIN An, HARRISON T M, GROVE M, ZHOU Jiang-yu, ZHANG Yu-quan, XIE Guang-hong. 2001. Thermochronological Constraints on the Timing of Cenozoic High-Potassic Magmatism in Eastern Tibet[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 20(4): 231-233(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-an, XU Qing, ZHANG Wen-ren. 1990. Heat flow data and some geologic- geotheromal problems in Yunnan province[J]. Seismology and Geology, 12(4): 367-377(in Chinese with English abstract).
- WANG Q, XU J F, ZHAO Z H. 2004. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent[J]. Geochem. J., 38: 417-434.
- WANG Q, WYMAN D A. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province(eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. Lithos, 89(3-4): 424-446.
- WANG Ren-min, AN Jia-tong, LAI Xing-yun. 1995. The discovery of an ophiolite suite in eastern part of Shangdong peninsula and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(s1): 221-227(in Chinese with English abstract).
- WANG S S, MCDUGALL I. 1980. K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on Mesozoic volcanic rocks from the Lower Yangtze volcanic zone, southeastern China[J]. J. Geol. Soc. Aus., 27: 121-128.
- WANG Song-shan. 1982. The study of thermal history on some samples of terrestrial materials and meteorites by  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating technique[J]. Chinese Journal of Geology, 2: 226-234(in Chinese).
- WANG Xi-bin, BAO Pei-sheng, DENG Wan-ming. 1987. Tibetan ophiolite[M]. Beijing: Geological press(in Chinese).
- WOLFGAN D M, LI C, SYBRAND, WHYAAL D. 2001. Why are there no major Ni-Cu sulphide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusions?[J]. Canadian Mineralogist, 39: 547-556.
- WU Cai-lai, CHEN Song-yong, SHI Ren-ding, HAO Mei-ying. 2003. Origin and Features of the Mesozoic Intermediate-acid Intrusive in the Tongling Area, Anhui, China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 21(4): 41-48(in Chinese with English abstract).
- WU Cai-lai, DONG Shu-wen, GUO He-ping, GUO Xiang-yan, GUO Qian-ming, LIU Liang-gen, CHEN Qi-long, LEI Min,



- JOSEPH L W, FRANK K M, CHRIS M. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks from Shizishan, Tongling and the deep processes of magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801-1812(in Chinese with English abstract).
- WU C L, WANG Z H, QIAO D W, LI H B, HAO M Y, SHI R D. 2000. Types of Enclaves and their Features and origins in intermediate-acid intrusive rocks from Tongling District, Anhui, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74 (1): 54-67.
- WU Chong-long, ZHANG Shan-wen, MAO Xiao-ping, LIU Zhong-liang, SONG Li-jun, TONG Yan-ming. 2006. Geometry and Kinematics of tectonic evolution in northern part of Sulu orogenic belt[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 31(6): 817-822(in Chinese with English abstract).
- WU Zhi-ping, LI Ling, LI Wei, ZHOU Yao-qi. 2004. Sedimentary pattern of prototype basin in the deposition period of Laiyang formation and the advantageous areas for oil and gas exploration of Jiaolai basin[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 28(3): 330-337(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xu-chang, WANG Fang-guo. 1984. An Introduction to the ophiolite of China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 9: 19-30(in Chinese).
- XIAO Y L, ZHANG Z M, HOEFS J, VAN D K. 2006. Ultra-high-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project: II Oxygen isotope and fluid inclusion distributions through vertical sections[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 443-458.
- XIE Zhi, LI Quan-zhong, CHEN Jiang-feng, GAO Tian-shan. 2007. The Geochemical Characteristics of the Early-Cretaceous Volcanics in Luzhong Region and Their Source Significances[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235-249(in Chinese with English abstract).
- XING Feng-ming, XU Xiang. 1996. High-potassium Calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area, An'hui province[J]. *Geochemistry*, 25(1): 29-38(in Chinese with English abstract).
- XU Gui-zhong, CAI Yan-jie, ZHOU Rui, SHE Hong-quan, WANG Yi-fen, SONG Ming-chun, LI Bing. 2004. Discussion on the dynamic conditions of formation of Jiaolai basin and its relation to gold mineralization[J]. *Geoscience*, 18(1): 8-16(in Chinese with English abstract).
- XU Qing, WANG Ji-an, WANG Ji-yang, ZHANG Wen-ren. 1992a. Terrestrial heat flow and its tectonic significance in Yunnan, China[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 16(3): 285-299(in Chinese).
- XU Qing, WANG Ji-an, WANG Ji-yang. 1992b. A compound and superimposed thermal structure of the lithosphere in the continental collision orogens-A case study of the Sanjiang region of Yunnan[J]. *Geological Review*, 38(6): 540-545(in Chinese).
- XU Qing, XU Cui-hua, WANG Ji-an, CHEN Mo-xiang. 1997. Geothermal resources in Tengchong region, Yunnan province[J]. *Geology-Geochemistry*, (4): 77-84(in Chinese with English abstract).
- XU Wen-yi, XU Zhao-wen, REN Qi-jiang, FU Bin, NIU Cui-wei. 1999. Heat evolution from intrusion to mineralization in Shaxi porphyry Copper(Gold) deposits, Anhui province[J]. *Geological Review*, 45(4): 361-367(in Chinese with English abstract).
- XU Xiang-zhen, YANG Jing-sui, BA Deng-zhu, CHEN Song-yong, FANG Qing-song, BAI Wen-ji. 2008. Diamond discovered from the Kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1453-1462(in Chinese with English abstract).
- XU Xiang-zhen, YANG Jing-sui, CHEN Song-yong. 2009. An unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr-11 in the Luobusa ophiolite of the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Journal of Earth Science*, 20(2): 284-302.
- XU Xi-sheng, ZHOU Xin-min, WANG De-zi. 1993. Advances of research on enclaves in intermediate-acidic magmatic rocks[J]. *Advance in Earth Sciences*, 8(4): 54-58(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, QI Xue-xiang, YANG Jing-sui, ZENG Ling-sen, LIU Fu-lai, LIANG Feng-hua, TANG Zhe-min, CAI Zhi-hui. 2006. Deep subduction Erosion model for continent-continent collision of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 31(4): 623-634(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin. 2007. Continental deep subduction and exhumation dynamics: Evidence from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP metamorphic terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3041-3053(in Chinese with English abstract).
- YAN Jun, CHEN Jiang-feng, YU Gang, QIAN Hui, ZHOU Tai-xi. 2003. Pb Isotopic Characteristics of Late Mesozoic Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region: Evidence for Enriched Mantle[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 195-206(in Chinese with English abstract).
- YAN Jun, CHEN Jiang-feng, XIE Zhi, YANG Gang, YU Gang, QIAN Hui. 2005. Geochemistry of Late Mesozoic basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze regions: Constraints on characteristics and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Geochimica*, 34(5): 455-469(in Chinese with English abstract).
- YANG J S, WOODEN J L, WU C L, LIU F L, XU Z Q, SHI Y D, KATAYAMA I, MARUYAMA S. 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 551-560.
- YANG Jing-sui, LI Tian-fu, LIANG Fu-hua, WU Cai-lai, CHEN Song-yong. 2007a. Garnet peridotite in CCSD-MH in the Sulu UHPM belt: a deep subducted Paleozoic ultramafic intrusion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3153-3170(in Chinese with English abstract).
- YANG Jing-sui, BAI Wen-ji, FANG Qing-song, MENG Fan-cong, CHEN Song-yong, ZHANG Zhong-ming, RONG He. 2007b. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. *Geology in China*, 34(5): 950-952(in Chinese).

- YANG J S, LARISSA D, BAI W J. 2007. Diamond-and coe-site-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 35(10): 875-878.
- YANG Jing-sui, ZHANG Zhong-ming, LI Tian-fu, LI Zhao-li, REN Yu-feng, XU Xiang-zhen, BA Deng-zhu, BAI Wen-ji, FANG Qing-song, CHEN Song-yong, RONG-He. 2008. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1445-1452(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-zhong, ZHAO Yu-ling, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, LI Guang-ming. 1999. Gold mineralization and Jiaolai Basin[J]. *Gold*, 20(9): 1-6(in Chinese with English abstract).
- YANG Qi-jun, XU Yi-gang, HUANG Xiao-long, LUO Zhen-yu. 2006. Geochronology and geochemistry of granites in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan: Tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 817-834(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhi-jian. 1992. New progress in the study of the Jiaodong Block[J]. *Regional Geology of China*, 1: 43-50(in Chinese).
- YE Jian-qing, CAI Shao-ping, LIU Xue-jun, WANG Shao-jin, CAI Ming-jun. 2003. Characteristics of earthquake cluster activity in Tengchong volcanic area[J]. *Seismology and Geology*, 25(B12): 128-137(in Chinese with English abstract).
- YIN A, NIE S. 1993. An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, east China[J]. *Tectonics*, 12: 801-813.
- ZHAI Jian-ping. 1989. Sr isotopic characteristics and geneses of Kunshan, Chengshan and Dalongshan igneous bodies[J]. *Geochimica*, (3): 202-209(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo, CONG Bo-lin, GUO Jing-hui, LIU Wen-hui, LI Yong-gang, WANG Qing-chen. 1999. Sm-Nd Geochronology and Petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region and their geotectonic implication[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3): 301-310(in Chinese with English abstract).
- ZHAI M G, SHAO J A, HAO J, PENG P. 2003. Geological signature and possible position of the North China block in the Supercontinent Rodinia[J]. *Gondwana Research*, 6:171-183.
- ZHAI M G, LIU W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. *Precambrian Research*, 122: 183-199.
- ZHAI Shen-de. 2003. Structural characteristics and evolution in the Laiyang depression of the Jiaolai basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 25(2): 137-142(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hao-yong, BA Deng-zhu, GUO Tie-ying, MO Xuan-xue, XUE Jun-zhi. 1996. Study of Luobusa Chromite Deposit in Qusong County, Tibet[M]. Tibet: People Publishing House of Tibet(in Chinese).
- ZHANG Jin-chang, XIE Wen-wei. 2010. Advances of International Continental Scientific Drilling Program[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 887-894(in Chinese with English abstract).
- ZHANG K J. 1997. North and South collision along the eastern and southern North China margins[J]. *Tectonophysics*, 270: 145-156.
- ZHANG Rong-hua. 1981. On physico-chemical conditions for porphyrite iron deposits and massive pyrite deposits in the middle-lower Changjiang(Yangtze) valley[J]. *Geological Review*, 27(1): 25-37(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xi-dao, WANG Lai-ming. 1996. The discovery and preliminary study of granulite facies rocks in the Weihai Rushan region, eastern Shandong[J]. *Regional Geology of China*, (3): 213-221(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yue-qiao, LI Jin-liang, ZHANG Tian, DONG Shu-wen, YUAN Jia-yin. 2008. Cretaceous to Paleocene Tectono-Sedimentary Evolution of the Jiaolai Basin and the Contiguous Areas of the Shandong Peninsula(North China) and Its Geodynamic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 9: 1230-1257(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ze-ming, XU Zhi-qin, LIU Fu-lai, YOU Zhen-dong, SHEN Kun, YANG Jing-sui, LI Tian-fu, CHEN Shi-zhong. 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole(100~2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 27-42(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ze-ming, SHEN Kun, LIU Yong-sheng, YOU Zhen-dong, SHI Chao, WANG Jin-li. 2007. Petrogenesis and mineralization of the Maobei complex from the southern Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3095-3115(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhu-ru, CHEN Shi-zhen. 1999. Superlarge gold deposit exploration perspective in Jiaolai Basin of Jiaodong gold met-allogenic domain[J]. *Geochimica*, 28(3): 03-212(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Z M, XU Z Q, XU H F. 2000. Petrology of ultra-high-pressure eclogite from the ZK703 drillhole in the Donghai, eastern China[J]. *Lithos*, 52: 35-50.
- ZHANG Z M, RUMBLE D, LIOU J G, XIAO Y L, GAO Y J. 2005. Oxygen isotope geochemistry of rocks from the Pre-Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project(CCS-D-PPH1)[J]. *American Mineralogist*, 90: 857-863.
- ZHANG Z M, XIAO Y L, HOEFS J, XU Z Q, LIOU J G. 2005. Petrogenesis of UHP Metamorphic Crustal and Mantle Rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Pre-pilot Hole 1, Sulu Belt, Eastern China[J]. *International Geology Review*, 47: 1160-1177.
- ZHANG Z M, XIAO Y L, HOEFS J, LIOU J G, SIMON K. 2006a. Ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project: I. Petrology and geochemistry of the main hole(0~2050 m)[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 152: 421-441.
- ZHANG Z M, LIOU J G, ZHAO X D, SHI C. 2006b. Petrogenesis of Maobei rutile eclogites from the southern Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 727-741.
- ZHANG Z M, SHEN K, XIAO Y L, HOEFS J, LIOU J G. 2006c. Mineral and fluid inclusions in zircon of UHP metamorphic rocks from the CCS-D-main drill hole: A record of metamorphism and fluid activity[J]. *Lithos*, 92: 378-398.
- ZHANG Z M, SHEN K, SUN W D, LIU Y S, LIOU J G, SHI C, WANG J L. 2008. Fluid in deeply subducted continental crust:

- Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 3200-3228.
- ZHAO Ci-ping, RAN Hua, CHEN Kun-hua. 2006. Present-day magma chambers in Tengchong volcano area inferred from relative geothermal gradient[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1517-1528(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Z F, ZHENG Y F, GAO T S, WU Y B, CHEN B, CHEN F K, WU F Y. 2006. Isotopic constraints on age and duration of fluid-assisted high-pressure eclogite-facies recrystallization during exhumation of deeply subducted continental crust in the Sulu orogen[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 687-702.
- ZHAO Z F, CHEN B, ZHENG Y F, CHEN Y X, WU Y B. 2007a. Mineral oxygen isotope and hydroxyl content changes in ultrahigh-pressure eclogite-gneiss contacts from Chinese Continental Scientific Drilling Project cores[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 165-186.
- ZHAO Z F, ZHENG Y F, CHEN R X, XIA Q X, WU Y B. 2007b. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 5244-5266.
- ZHENG Yong-fei, FU Bin, GONG Bing. 1995. The thermal history of the Huangmeijian intrusion in Anhui and its relation to mineralization: isotopic evidence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 337-348(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Y F, FU B, GONG B, LI L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime[J]. *Earth Science Review*, 62: 105-161.
- ZHENG Y F, ZHAO Z F, WU Y B, ZHANG S B, LIU X M, WU F Y. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 231: 135-158.
- ZHONG Da-lai, TAPPONNIER P, WU Haiwei, ZHANG Lian-sheng, JI Shao-cheng, ZHONG Jia-you, LIU Xiao-han, SCHAEERER U, LACASSIN R, LEI OUP P. 1989. Large-scale strike-slip faults: The major structure of intracontinental deformation after collision[J]. *Chinese Science Bulletin*, 34(7): 526-529(in Chinese).
- ZHONG Li-feng, XIA Bin, ZHOU Guo-qing, ZHANG Yu-quan, WANG Ran, WEI Dong-liang, YANG Zhi-qing. 2006. SHRIMP Age Determination of the Diabase in Luobusa Ophiolite, Southern Xizang (Tibet)[J]. *Geological Review*, 52: 224-229(in Chinese with English abstract).
- ZHOU M F, ROBINSON P T, MALPAS J, LI Z. 1996. Podiform chromitites in the Luobusa Ophiolite(southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 3-21.
- ZHOU S, MO M X, MAHONEY J J, ZHANG S Q, GUO T J, ZHAO Z D. 2002. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusa Ophiolite, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 143-146.
- ZHOU Tao-fa, FA Yu, SONG Ming-yi, YUAN Feng, LU San-ming, SHANG Shi-gui, COOKE D, MEFFRE S, ZHAO Guo-chun. 2008. Chronology of the Bajiatan intrusion in the Luzong basin, Anhui, and its significance[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 38(11): 1342-1353(in Chinese).
- ZHOU Xun-ruo, WU Cai-lai, HUANG Xu-chen, ZHANG Cheng-huo. 1993. Characteristics of Cognate Inclusions in Intermediate-Acid Intrusive Rocks of Tongling Area and Their Magmatic Dynamics[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 22(1): 20-31(in Chinese with English abstract).
- ZOU H B, ZINDLER A, XU X S. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance[J]. *Chem. Geol.*, 171(1-2): 33-47.