

地壳结构与深部矿产资源立体探测技术实验 ——SinoProbe-03 项目介绍

吕庆田¹⁾, 常印佛^{2, 1)}, SinoProbe-03 项目组*

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 安徽省国土资源厅, 安徽合肥 230088

摘要: 无论是成矿学研究, 还是资源勘查, 认识深部、精细了解深部十分重要。地壳、上地幔结构、物质和动力学过程是矿床形成和分布的一级控制因素, 是建立区域成矿理论的基础; 矿集区深部(0~10 km)结构、构造, 尤其是断裂、地层、岩浆岩的空间分布及相互关系是控制内生矿床形成的直接因素, 它们控制了成矿流体迁移、富集和沉淀过程; 矿田和矿区深部(0~2 km)精细结构是查明容矿、控矿构造深部延伸、进行深部成矿预测的关键, 对指导深部找矿具有重要意义。为了深入研究中国大陆成矿的构造背景、典型矿集区的成矿环境, 拓展深部找矿空间, 国家启动了《深部探测技术与实验研究(SinoProbe)》科技专项, 专项设立了“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”项目, 主要目标任务是: 选择我国东部南岭、长江中下游成矿带及典型矿集区: 铜陵、庐枞、于都-赣县, 开展三个层次(40~50 km、10 km 和 2 km)的立体探测和浅表 2 km 的示矿异常钻探试验, 揭示代表性矿集区形成的深部构造背景、动力学过程及其对成矿系统形成和演化的制约; 精细刻画矿集区 10 km 结构框架和物质组成, 揭示成矿系统结构; 追踪主要容矿、控矿构造、含矿岩体的深部延伸, 拓展资源勘查深度, 指明深部找矿方向。开展典型矿床的 3D 地球物理探测, 研究深部控矿规律, 建立深部成矿模式, 开展深部成矿预测。开展 2000 m 钻探, 直接验证重要异常和成矿靶区, 揭示地壳浅层金属垂向变化规律, 建立深部勘查地球物理异常解释“标尺”, 提高对深部成矿规律的认识。通过示范研究, 形成三个层次深部资源探测的技术方案, 攻克若干技术难题, 建立研究基地, 培养研究团队, 取得样板性成果, 为“地壳探测工程”的顺利实施奠定技术基础。

关键词: 成矿带; 矿集区; 地壳结构; 立体探测; 成矿模式

中图分类号: P542.5; P61 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.s1.04

Crustal Structure and Three-dimensional Deep Exploration Technology for Mineral Resources: An Introduction to SinoProbe-03 Project

LÜ Qing-tian¹⁾, CHANG Yin-fo^{2, 1)}, SinoProbe-03 Team

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Anhui Bureau of Land and Resources, Hefei, Anhui 230088

Abstract: In both mineralization study and resources exploration, the detailed understanding of the depth of the earth is very important. The structures, materials and dynamic processes of the Earth's crust and the upper mantle

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-03)资助。

收稿日期: 2010-11-05; 改回日期: 2011-01-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 吕庆田, 男, 1964 年生。研究员, 博士生导师。长期从事深部探测和金属矿勘查技术方法研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999091。E-mail: lqt@cags.ac.cn。

*SinoProbe-03 项目组成员还有: 陈毓川, 滕吉文, 董树文, 杨宝骏, 薛爱民, 王登红, 史大年, 徐文艺, 陈政辉, 吴明安, 汤井田, 杜建国, 谢文卫, 高文利, 张中杰, 孟小红, 张贵宾, 韩立国, 李桐林, 周涛发, 徐晓春, 邓居智等 60 余人。

are the first-order controlling factors in the formation of mineral deposits, and also constitute the foundation of the regional metallogenetic theory. The composition and structure of the deep part(0 ~ 10 km)of the ore concentration area, especially the spatial distribution and relationships of faults, strata and magmatic rocks are direct factors controlling the formation of endogenetic mineral deposits and govern the migration, enrichment and precipitation of the ore-forming fluids. The fine structures of the deep part of the orefield and ore district constitute the crux for finding out deep extension of the ore-hosting and ore-controlling structure and making deep ore prognosis, thus being of great significance in guiding deep ore-prospecting work. For the purpose of making a thorough study of the structural background of mineralization in China's mainland and the ore-forming environment of typical ore concentration areas as well as expanding ore-prospecting space in the depth, China has started the special technological project "Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)". Under this special project, the project "Three-dimensional Deep Exploration Technology and Experimentation for Mineral Resources" has been set up. The main targets and tasks of this project are as follows: Select Nanling, middle and lower Yangtze River metallogenetic belt and typical ore concentration areas (Tongling, Luzong, Yudu-Ganxian) in eastern China to conduct three-dimensional exploration at three levels ((40 ~ 50 km, 10 km and 2 km)as well as drilling test for shallow ore-indicating anomalies of 2 km so as to reveal deep structural background and dynamic process of the typical ore concentration area and their restricting role in the formation and evolution of the metallogenetic system; Depict structural framework and material composition of the ore concentration area in the depth range of 10 km so as to disclose the structure of the metallogenetic system; Trace deep extensions of main ore-hosting and ore-controlling structures and ore-bearing intrusive bodies so as to extend the depth of resources exploration and indicate ore-prospecting orientation in the depth; Carry out three-dimensional geophysical exploration of typical ore deposits so as to study deep ore-controlling regularity, establish deep metallogenetic model and conduct deep ore prognosis; Perform drilling to the depth of 2000 m so as to make direct verification of important anomalies and ore-forming targets, reveal vertical variation regularity of metals in the shallow part of the Earth's crust and establish the scale for deep exploration geophysical interpretation, and deepen the understanding of metallogenic regularity; Through demonstration study, form technological plan for deep resources exploration at three levels, solve a number of technological thorny problems, establish research base areas, train the research group and acquire model achievements, so as to lay the technological foundation for the successful implementation of the "Earth's Crust Exploration Engineering".

Key words: metallogenetic belt; ore concentration area; crustal structure; three-dimensional exploration; ore-forming model

近二十年,随着大陆成矿作用研究的兴起和深部找矿的迫切需求,大陆汇聚、裂解和陆内伸展背景的成矿作用、层圈相互作用对成矿的约束等成为新的研究前沿,重要成矿带成矿背景、成矿动力学过程和矿集区 3D 结构及成矿环境的综合探测成为新的研究切入点。矿床地质学家更加关注深部过程对成矿的控制作用研究,把成矿机理与壳幔相互作用等深部过程密切结合,成矿过程与重大地质事件的发生、发展和演化密切结合,寻找内在关联(胡瑞忠等, 2007, 2008; 侯增谦, 2009); 深部找矿思路发生重要变化,从模式类比向 3D 立体探测和成矿系统分析方向发展,深部成矿预测工作在查明矿集区精细结构的基础上进行;或直接追踪控矿构造的深部延伸,进行钻探验证,极大提高了深部找矿的成功率(Goleby, et al., 2004; Milkereit, et al., 2000; Malehmir, et al., 2009; 吕庆田等, 2007)。

地球物理探测(反射/折射和天然地震观测等)是获得地壳深部结构、物质状态、成分和动力学过程的主要手段,自 20 世纪 70 年代以来,西方发达国家相继实施了以反射地震为主的大陆深部探测计划,

比如,美国的大陆深反射计划 COCORP(董树文等, 2009, 2011; Brown et al., 1985; Brown, 1991)、法国的 ECORS(ECORS Pyrenees team, 1980)、德国的 DECOPE(Brun et al., 1991)、英国的 BIRPS(Klemperer et al., 1992)等,这些计划更多以探测地壳深部结构、提高对地球深部的认知、促进地球科学发展为目标(董树文等, 2009)。90 年代,矿业大国澳大利亚和加拿大分别实施了四维地球动力学计划(AGCRC)和岩石圈探测计划(Lithoprobe),与其它深部探测计划不同的是,这两个计划把重要成矿带和矿集区深部结构探测和成矿学研究密切结合,探索大型矿集区和巨型矿床形成的深部控制因素,还开展了不同构造环境下控矿构造、深部矿体的反射地震探测研究,开辟了成矿学研究和深部找矿的新思路,并取得了重大进展(吕庆田等, 2010)。澳大利亚的四维地球动力学计划通过高分辨率地震反射/折射技术、天然地震观测技术,重、磁 3D 反演和流体动力学模拟技术,获得了主要成矿带的地壳结构、成矿系统和矿集区热-变形-流体控制成矿的演化过程(Blewett et al., 2004; Sorjonen-Ward et al., 2002; MacCready et al.,

1998)。在西澳 Yilgarn 克拉通, 穿过东部金矿省 (Eastern Goldfields Province) 的反射地震剖面清晰地揭示出成矿系统所根植的地壳结构和控制成矿流体迁移、汇聚的断裂网络系统, 通过数值模拟成功预测出新的找矿远景区 (Goleby et al., 2004; Swager et al., 1997)。加拿大岩石圈探测计划 (Lithoprobe) 利用反射地震技术, 对各种构造环境下的矿集区深部结构开展了探测研究 (Clowes, 1997), 直接揭示控矿构造 (单元) 的空间形态和深部延伸, 甚至直接探测块状硫化物矿体。如, 在加拿大安大略和魁北克省 Abitibi 绿岩带的反射地震探测, 揭示出控矿构造的深部延伸, 并在深部矿体上发现了强反射。该绿岩带中火山成因的块状硫化物矿床占有相当重要的地位, 矿床受控于流纹岩-玄武岩界面, 穿过该绿岩带 Ansil 和 Bell Allard 矿床的反射地震剖面, 成功揭示出同火山沉积的断裂和“双峰”岩石组合的分布, 并在 Bell Allard 矿体上记录到地震强反射, 为寻找深部矿体指明了方向 (Calvert, et al., 1999, 2003)。在加拿大著名的萨德伯里 (Sudbury) 矿集区进行的反射地震探测, 证明在复杂地质条件下, 反射地震可以直接对控制大型块状硫化物矿床的构造进行成像, 甚至直接发现硫化物矿体 (Wu et al., 1995; Milkereit et al., 1996)。

我国是一个以大陆地质过程为主的国家, 在全球构造格局中, 中国大陆地位独特, 演化复杂。古生代受古亚洲洋和古特提斯构造域控制, 经历众多离散小陆块的多期汇聚、拼贴; 中生代陆块刚性基底遭受强烈的破坏改造; 新生代大陆再次活化, 东部遭受太平洋构造域叠加, 西部遭受印度大陆强烈碰撞 (侯增谦, 2009)。这种异常复杂的演化历史和多旋回式的长期活动, 决定了中国大陆矿产矿种繁多、类型多样、多源复合、破坏再生, 显示出十分鲜明的大陆成矿特色 (翟裕生, 2000)。中国大陆的这种地质与成矿特点, 不仅导致了经典板块构造成矿理论在中国大陆难以奏效, 而且大大增加了区域成矿规律的认识难度。深入探测研究这些构造演变的深部动力学背景以及与之密切相关的成矿过程, 不仅是建立大陆成矿理论的需要, 更是矿产勘查的迫切需求。随着我国资源勘查逐渐向深部拓展, 探测大型矿集区的精细结构, 查明深部控矿规律, 发展深部资源探测技术已经成为当前和今后矿产资源领域研究的首要任务。

为了解决我国日益严重的资源、环境和灾害问题, 深入研究中国大陆成矿的构造背景、典型矿集区的成矿环境, 拓展深部找矿空间, 国家启动了科

技专项《深部探测技术与实验研究 (SinaProbe)》, 作为《地壳探测工程》实施前的培育性研究计划。专项下设“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”项目 (SinaProbe-03)。项目的目标任务是: 选择我国东部南岭、长江中下游成矿带及典型矿集区: 铜陵、庐枞、于都-赣县, 开展三个层次 (40~50 km、10 km 和 2 km) 的立体探测和浅表 2 km 的异常钻探验证, 揭示代表性矿集区形成的深部构造背景、动力学过程及其对成矿系统形成和演化的制约; 精细刻画矿集区 10 km 结构框架和物质组成, 揭示成矿系统结构; 追踪主要容矿、控矿构造、含矿岩体的深部延伸, 拓展资源勘查深度, 指明深部找矿方向。开展典型矿床的 3D 地球物理探测, 研究深部控矿规律, 建立深部成矿模式, 开展深部成矿预测。开展 2000 m 钻探, 直接验证重要异常和成矿靶区, 揭示地壳浅层金属垂向变化规律, 建立深部勘查地球物理异常解释“标尺”, 提高对深部成矿规律的认识。通过示范研究, 形成三个层次深部资源探测的技术方案, 攻克若干技术难题, 建立研究基地, 培养研究团队, 取得样板性成果, 为“地壳探测工程”的顺利实施奠定技术基础。本文将详细介绍项目的目标任务、研究内容、技术思路和总体实施方案, 为开展类似研究提供参考。

1 目标与研究内容

1.1 项目目标

选择我国东部南岭、长江中下游成矿带及典型矿集区: 铜陵、庐枞、于都-赣县, 开展三个层次 (40~50 km、10 km 和 2 km) 的立体探测和浅表 2 km 的钻探验证。达到以下目标:

(1) 查明重要成矿带形成的深部构造背景、动力学过程和矿集区形成的深部控制因素, 预测未发现的矿集区;

(2) 揭示典型矿集区三维结构及主要控矿构造和地质体的空间分布, 阐明成矿元素迁移-富集机制及控制因素, 建立区域成矿模式, 预测新的深部找矿靶区;

(3) 建立典型矿床 (田) 3D 地质-地球物理模型, 总结典型矿床的成矿与深部找矿模式。验证地球物理异常, 了解矿集区元素垂向分布, 建立地球物理异常解释“标尺”;

(4) 形成三个层次深部结构探测和资源勘查的技术解决方案, 攻克火山岩区、花岗岩区、碳酸盐岩区反射地震采集、处理关键技术, 强干扰下电磁

观测、处理解释技术等,为“地壳探测工程”的顺利实施储备技术、人才和经验。

1.2 项目研究内容

项目包括三个方面的研究内容,即:“南岭、长江中下游成矿带深部成矿背景与探测技术方法研究”;“典型矿集区 3D 结构与立体探测技术集成研究”;“重要类型矿床(田)地质-地球物理模型与深部找矿技术方法研究”。项目紧密围绕解决深部成矿动力学过程和“第二找矿空间”控矿构造探测等关键问题,从不同尺度、不同方面入手开展研究,具体研究内容如下:

1.2.1 南岭、长江中下游成矿带深部成矿背景与探测技术方法研究

(1) 南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测研究

① 深部动力学背景和过程。成矿带岩石圈结构及与周边块体之间的关系;壳/幔相互作用及动力学过程;上地幔物质状态及变形方式等;

② 地壳结构及岩浆系统。成矿带地壳结构,主要断裂带的深部形态,壳内岩浆系统结构和演化动力学过程;

③ 深部岩浆过程与成矿作用。包括岩浆系统时空结构,岩浆起源与源区特征,岩浆演化与岩浆房特征,岩浆侵位与结晶冷凝特征,以及岩浆流体析出与成矿特征等;大规模成矿作用时限、强度及空间分布;建立岩浆作用过程与成矿模型。

(2) 长江中下游成矿带地壳结构与深部过程探测研究

① 成矿带深部动力学背景和过程。成矿带、华北和扬子地台岩石圈结构及动力学演化过程;壳/幔相互作用方式,上地幔物性参数、物质状态及变形方式与强度;

② 成矿带地壳结构及对成矿岩浆系统形成演化的制约。成矿带、华北和扬子古陆的地壳结构;地壳变形特征及主要断裂带的深部形态,壳内滑脱带的空间形态;壳内岩浆系统结构和演化动力学过程研究;

③ 深部岩浆过程与成矿作用。区域岩浆作用时空结构,岩浆起源与源区特征,岩浆演化与岩浆房特征,岩浆侵位喷发与结晶冷凝特征,以及岩浆流体析出与成矿特征研究,建立岩浆作用过程与成矿模型;大规模成矿时限,成矿流体析出与流体性状研究,成矿的物理条件与成矿环境研究,成矿过程与岩浆演化关系研究。

(3) 地壳及岩石圈结构探测数据采集、处理、解释关键技术研究

① 天然地震观测与数据处理解释技术。包括接收函数、层析成像、各向异性技术。

② 深地震反射/折射数据采集与处理解释关键技术。包括高精度静校正、去噪、叠前偏移技术;探索反射/折射联合层析成像技术等。

③ 长周期大地电磁观测、去噪及反演技术。

④ 各种地球物理数据的约束反演和地质解释技术。

1.2.2 典型矿集区 3D 结构与立体探测技术集成研究

(1) 于都-赣县矿集区立体探测与技术集成研究

① 花岗岩区重要成矿界面综合探测与 3D 结构模型。燕山期花岗岩、基底($AnZ-O$)和盖层($D-T$)结构综合探测,与成矿有关岩体的空间形态、规模,主要控矿断裂、地层的空间分布特征,建立矿集区 3D 结构模型。

② 花岗岩区深部结构探测关键技术。大面积花岗岩区的地震采集技术(激发技术)、弱信号提取技术、重震联合解释与多参数约束解释技术,MT/AMT 抗干扰技术与二维/三维反演技术和三维立体探测技术集成等。

(2) 庐枞火山岩盆地 3D 结构探测与技术方法集成研究

① 火山岩盆地结构综合探测和 3D 地质模型。火山岩盆地基底构造,火山盆地内部主要构造、岩性界面(硅质岩),火山机构、深部次火山岩体和正长岩综合探测研究,建立矿集区(10 km)3D 地质-地球物理模型。火山岩盆地地壳结构、变形历史和构造演化,盆地各火山旋回的岩石学、地球化学、年代学及成矿特征研究。

② 火山岩区深部结构探测关键技术。火山岩区高分辨率反射地震数据采集和处理技术,如高效激发接收技术、静校技术、去噪技术、偏移技术等,金属矿地震反演及属性提取技术与地质解释研究。研究矿集区电磁干扰特点,发展强干扰背景下大地电磁数据采集和去噪技术、二维/三维反演技术。开展有稀疏地质约束的重磁 3D 反演方法及应用研究,多参数关联反演技术研究等。

(3) 铜陵矿集区容矿控矿结构探测与技术方法研究

① 矿集区主要容矿层位及岩体空间结构探测。矿集区浅部主要容矿控矿地层(五通-黄龙组、奥陶系)、成矿有关岩体、断裂的综合探测研究,建立盖层 3D 地质-地球物理模型;矿集区地壳结构、深部

过程和构造演化历史, 矿集区岩石学、地球化学、年代学及成矿特征综合研究。

② 碳酸盐岩地区深部结构探测关键技术。研究碳酸盐岩地区地震采集、处理解释技术; 大面积灰岩地区和复杂起伏地形条件下, 开展立体探测的技术流程和技术方法集成。

1.2.3 重要类型矿床(田)地质-地球物理模型与深部找矿技术方法研究

(1) 于都-赣县矿集区成矿找矿模型与深部找矿技术方法

① 重要类型矿床成矿、找矿模型与深部找矿技术。选择石英脉型钨矿、矽卡岩钨矿或层控铅锌矿, 开展综合地球物理(CSAMT、AMT、TEM、SIP、高密度电法)探测研究, 建立典型矿床 3D 地球物理模型, 总结深部找矿方法技术组合; 开展矿集区钨锡钼铋矿-铜铅锌金银-铀矿的成矿规律与成矿模式研究, 成矿系列与成矿谱系研究, 完善主要矿床类型的成矿模式。

② 深部成矿预测。在典型矿床解剖的基础上, 开展深部成矿、找矿信息的提取、分析和判别, 建立主要矿床类型的综合信息找矿模式, 开展深部成矿靶区优选, 并进行综合地球物理查证。

(2) 庐枞矿集区成矿找矿模型与深部找矿技术方法

① 重要类型矿床成矿找矿模型与深部找矿技术。选择玢岩型铁矿、斑岩铜矿, 开展系统的岩石物性测量和重磁正演模拟研究, 开展 3D 综合地球物理(CSAMT、AMT、TEM、SIP(CR))探测研究, 建立玢岩型铁矿、斑岩型铜矿 3D 地球物理模型, 总结深部找矿方法技术组合。开展矿床的物质成分、蚀变特征、控矿要素、成矿时代和矿床地球化学研究, 建立与完善“玢岩铁矿”、“斑岩铜矿”成矿与找矿模式。探索正长岩与闪长玢岩的成因关系、侵位时代、成矿物质(磁铁矿)来源及对成矿的控制作用。

② 庐枞盆地深部成矿预测。在充分收集和补充测量大比例尺(1:5 万和 1:1 万)重、磁数据的基础上, 对数据进行位场分离、分量转换、梯度模计算、正反演模拟等处理解释, 研究异常形态, 判别异常性质, 按照玢岩铁矿和斑岩铜矿找矿模式, 开展外围成矿靶区圈定。在选定的靶区内, 开展 1:1 万剖面或 3D 综合探测, 优选成矿靶区。

(3) 铜陵矿集区成矿找矿模型与深部找矿技术

① 重要类型矿床成矿找矿模型与深部找矿技术。选择典型矽卡岩型、喷流沉积叠加改造型矿床(田), 开展 3D 立体探测(CSAMT、AMT、TEM、SIP)研究, 建立 3D 地球物理模型, 总结深部找矿方法技

术。研究矿集区成矿系统的类型, 时空分布, 各时期成矿系统之间的叠加与改造关系及成矿特征, 成矿期的构造、岩相古地理环境。探索奥陶系灰岩顶面成矿的可能性及成矿模式。

② 矿集区深部成矿预测。矿集区综合成矿信息的提取, 尤其是深部示矿弱信息的研究和识别, 在综合探测基础上, 按照“岩体+层位”的基本找矿规律, 进行深部成矿预测, 圈定深部找矿靶区, 并进行查证。

(4) 科学浅钻与金属垂向分布规律研究

在于都-赣县、庐枞、铜陵三个代表性矿集区综合地球物理探测、3D 建模和深部成矿预测研究的基础上, 选择深部成矿可能性大, 具有区域成矿代表性的重要异常, 实施 1 口 2000 米异常验证钻, 直接验证综合地球物理异常, 揭示异常性质; 研究钻孔金属垂向分布规律, 开展岩石物性、矿物学、岩石学、矿床学、地球化学等多学科的综合研究, 建立异常解释的“标尺”, 并开展综合地球物理测井研究。

1.3 关键科学问题

(1) 矿集区形成的关键科学问题。深部构造背景, 成矿岩浆形成的动力学过程, 壳幔结构对成矿岩浆形成的控制作用; 岩浆系统结构及对矿集区形成的控制作用, 断裂网络深部延伸及对岩浆流体运移的控制作用; 成矿岩浆在浅表如何受构造、盖层控制, 成矿物质沉淀与储存机制。

(2) 矿集区深部成矿预测关键科技问题。铜陵、庐枞和于都-赣县矿集区主要矿床类型的深部成矿模式和找矿信息模式; 主要矿床类型深部找矿勘查技术组合。

(3) 矿集区深部立体探测技术。花岗岩区、火山岩区、碳酸盐岩区反射地震数据采集技术和处理解释技术、强干扰条件下大地电磁数据处理、解释技术, 重震联合反演技术及有地质约束的三维重、磁反演技术, 起伏地形大地电磁二维/三维反演技术; 三维地质建模方法技术及可视化技术。

2 研究方案

2.1 研究思路

项目采取以地球物理探测为主的多层次、多学科综合研究的技术路线。第一层次(图 1): 跨成矿带地质断面综合地球物理探测研究。以跨过成矿带的地质廊带为研究对象, 在地质廊带实施宽频地震、大地电磁、深地震反射/折射、区域重磁等地球物理探测, 构建地质廊带 2D 地质模型, 分析地壳及岩石

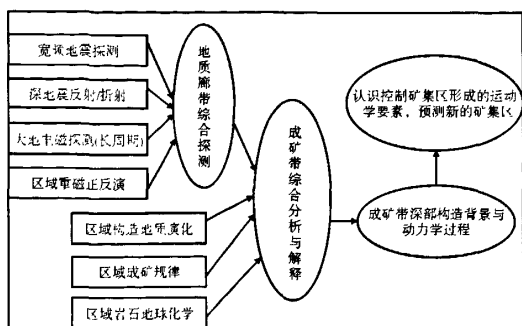


图1 跨成矿带地质断面综合地球物理探测技术路线图
Fig. 1 Workflow diagram for the Geological Transect detection

圈结构特征, 推断动力学演化过程; 结合区域构造、岩石和成矿规律, 综合分析成矿带深部构造背景, 认识矿集区形成的动力学要素, 预测新的矿集区。形成成矿带地壳及岩石圈结构构造和动力学过程探测的技术方案。

第二层次: 矿集区 3D 立体探测与建模(10 km)(图 2)。以穿过矿集区关键成矿单元的若干地质剖面为主要探测研究对象, 实施以高分辨率反射地震、大地电磁、重震联合反演为主的综合探测和解释, 建立矿集区骨架剖面的 2D 地质-地球物理模型。用综合解释模型为约束, 使用区域重磁位场三维反演技术, 构建矿集区三维结构模型, 揭示矿集区结构框架和主要容矿、控矿构造的空间分布, 认识成矿系统(源-运-储)形成机制, 预测深部成矿靶区。

第三层次: 重要类型矿床(田)综合探测与找矿模型(图 3)。通过在已知矿床上开展 3D 综合地球物理探测实验, 评估方法的有效性; 建立综合地质-地球物理模型, 形成针对不同矿床类型深部找矿方法技术; 开展深部成矿预测, 重要异常的钻探验证, 研究成矿元素在地壳浅表的富集规律, 建立深部勘

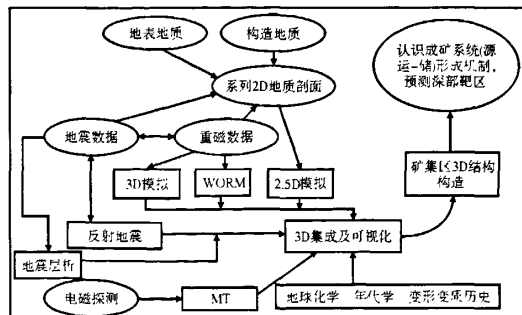


图2 矿集区3D立体探测与建模技术路线图(据 Henson, 2004 修改)

Fig. 2 Workflow diagram for the construction of a 3D map in the ore concentration area (after Henson, 2004)

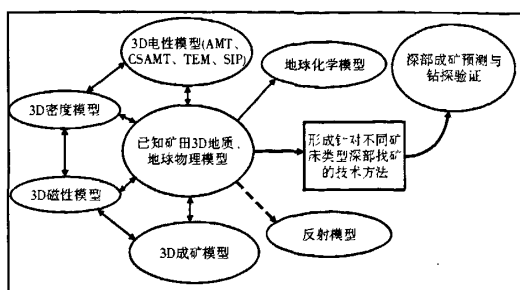


图3 重要类型矿床综合探测与找矿模型建立技术路线图

Fig. 3 Workflow diagram for the construction of the exploration model for typical ore deposit

查地球物理解释“标尺”。

2.2 课题分解

项目拟分解为 7 个课题。课题 1、南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验; 课题 2、长江中下游成矿带地壳结构与深部过程探测实验; 课题 3、南岭于都-赣县矿集区立体探测与深部成矿预测示范; 课题 4、庐枞矿集区立体探测与深部成矿预测示范; 课题 5、铜陵矿集区立体探测与深部成矿预测示范; 课题 6、重要异常的钻探验证与金属垂向分布规律研究; 课题 7、深部矿产资源立体探测技术与综合集成。各课题主要任务:

课题 1、南岭成矿带地壳、岩浆系统结构探测实验

目标任务: 通过部署跨越南岭成矿带不同构造单元的天然地震、深地震反射/折射、大地电磁和重、磁剖面的综合探测研究, 以及区域构造、岩浆岩和成矿学研究, 揭示以钨锡铋锑为主的成矿带形成的深部构造背景、成矿岩浆系统结构及源区特征, 岩石圈结构及动力学演化过程, 以及大型矿集区形成和巨量金属富集的深部控制因素, 预测新的矿集区。

课题 2、长江中下游成矿带地壳结构与深部过程探测实验

目标任务: 通过部署跨越长江中下游成矿带不同构造单元(华北地台、沿江断陷带、扬子古陆)的天然地震、深地震反射/折射、大地电磁和重、磁剖面的综合探测研究, 以及区域构造、岩浆岩和成矿学研究, 揭示以铁铜金为主的成矿带形成的深部动力学背景、成矿岩浆系统结构及源区特征, 岩石圈结构及动力学演化过程, 以及不同类型矿集区形成和巨量金属富集的深部控制因素, 预测新的矿集区。

课题 3、南岭于都-赣县矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范

目标任务: 在于都-赣县矿集区的银坑-青塘

和盘古山-黄沙重点工作区, 部署高精度重磁面积测量和骨干剖面的大地电磁、反射地震和 MT 等探测研究, 结合矿田构造、岩浆岩和成矿学研究, 揭示与成矿有关的岩体、地层、基底的空间分布, 成矿物质迁移-富集机制。开展典型矿床解剖和综合信息找矿模式研究, 开展深部成矿预测。

课题 4、庐枞矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范

目标任务: 在庐枞矿集区部署 5 条骨干剖面的高分辨率反射地震、大地电磁(MT)测量和重、磁面积测量等探测研究, 通过综合地球物理数据处理、反演和解释, 建立火山岩盆地 3D 地质模型。开展区域构造演化、矿田构造、岩浆岩和成矿学研究, 揭示与成矿有关的岩体、盆地内部结构、基底构造的空间分布, 阐明主要控矿要素。探索碱性岩对成矿的贡献; 开展典型矿床解剖、已知矿床的三维重、磁模拟研究和综合地球物理探测试验, 建立深部成矿/找矿模式, 开展深部成矿预测。

课题 5、铜陵矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范

目标任务: 在铜陵矿集区部署 4-5 条骨干剖面的高分辨率反射地震、大地电磁(AMT)测量和重、磁面积测量等探测研究, 通过综合地球物理数据处理、反演和解释, 建立矿集区 3D 地质模型。开展区域构造演化、矿田构造、岩浆岩和成矿学研究, 揭示与成矿有关的岩体、主要控矿层位(五通组顶板、奥陶系顶板)、盖层内部结构构造的空间分布, 阐明主要控矿要素。开展典型矿床解剖、成矿流体系统及海西期成矿专题研究, 建立深部成矿模式, 开展深部成矿预测。

课题 6、重要异常的钻探验证与金属垂向分布规律研究

目标任务: 在于都-赣县、铜陵、庐枞矿集区综合探测和成矿预测研究基础上, 选择重要异常或深部成矿有利区, 分别部署 1 口 2000 m 异常验证钻, 验证异常性质、获得矿集区深部地层、物性和金属垂向分布规律。开展井中地球物理探测和综合地球物理测井, 阐明矿集区垂向物性分布, 建立地球物理解释“标尺”。

课题 7、深部矿产资源立体探测技术与综合集成

目标任务: 开展成矿带、矿集区和矿床(田)三个层次探测关键技术研究, 重点开展花岗岩区、火山岩区和碳酸盐岩区反射地震采集、处理解释关键技术, 强干扰背景下大地电磁去噪技术研究; 各类电磁、重震反演技术研究, 形成三个层次的探测技术

方案; 开展南岭和长江中下游成矿带深部结构、动力学过程集成对比研究; 于都-赣县、铜陵、庐枞矿集区控矿要素对比和金属垂向分布规律研究; 主要矿床类型 3D 地质-地球物理模型对比; 编制“地壳探测工程”重要成矿带和矿集区综合探测研究方案, 推动“地壳探测工程”国家立项。

2.3 探测工作部署方案及研究方法

2.3.1 南岭、长江中下游成矿带深部成矿背景与探测技术方法研究

(1) 南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验。

在系统研究南岭成矿带区域地质、地球物理资料的基础上, 部署一条跨过成矿带不同构造单元的北西-南东向地质廊带, 在廊带内部署深反射/折射地震、宽频地震观测和大地电磁(周期到 10000 s)剖面等地球物理综合探测研究工作, 地质廊带的具体部署如下(图 4)。该廊带跨过扬子与华夏板块的缝合带, 中间跨越骑田岭、诸广山、大庾岭等南岭地区的代表性花岗岩体, 同时也穿过南岭柿竹园等世界级的钨锡钼铋矿集区, 廊带中心大致通过永州-郴州-韶关-(呈北西-南东向), 形成长约 300 km, 宽 15~20 km 的研究区域。该地质廊带可在下一阶段的工作中, 向西扩展跨越雪峰山造山带、向东扩展跨越武夷山造山带乃至跨越台湾海峡, 与太平洋板块俯冲带接起来, 对揭示整个华南的地壳结构也具有重要意义。

该地质廊带穿过的代表性矿床有: 湖南水口山多金属矿、柿竹园钨锡钼多金属矿、西华山钨矿、漂塘钨矿、黄沙坪铅锌矿、宝山铅锌矿等。在该走廊带还通过或毗邻极具找矿潜力的一些矿集区, 包括花岗岩大面积出露的骑田岭-诸广山地区和花岗岩少量出露的黄沙坪-宝山铜铅锌多金属矿田、后江桥矿田和于都-赣县矿集区等。

(2) 长江中下游成矿带地壳结构与深部过程探测实验。

沿长江中下游成矿带, 穿过宁芜矿集区部署一条跨过不同构造单元(华北陆块、长江中下游断裂带和扬子古陆)的地质廊带, 在廊带内部署深反射/折射地震、宽频地震观测和大地电磁(带宽: 400 Hz-10000 s)剖面等综合地球物理探测研究工作, 地质廊带的具体部署如下(见图 5): 地质廊带穿越宁芜矿集区中心部位, 北西进入华北板块, 南东进入扬子地台。穿过的主要矿床有陶村、凹山、吉山、姑山、梅山等。廊带中心大致经过善厚集-孙元堡-马鞍山-丹阳镇-博望镇-上沛镇-粟阳市, 呈北西南东向, 形成长约 300 km, 宽 15~20 km 的研究区域。

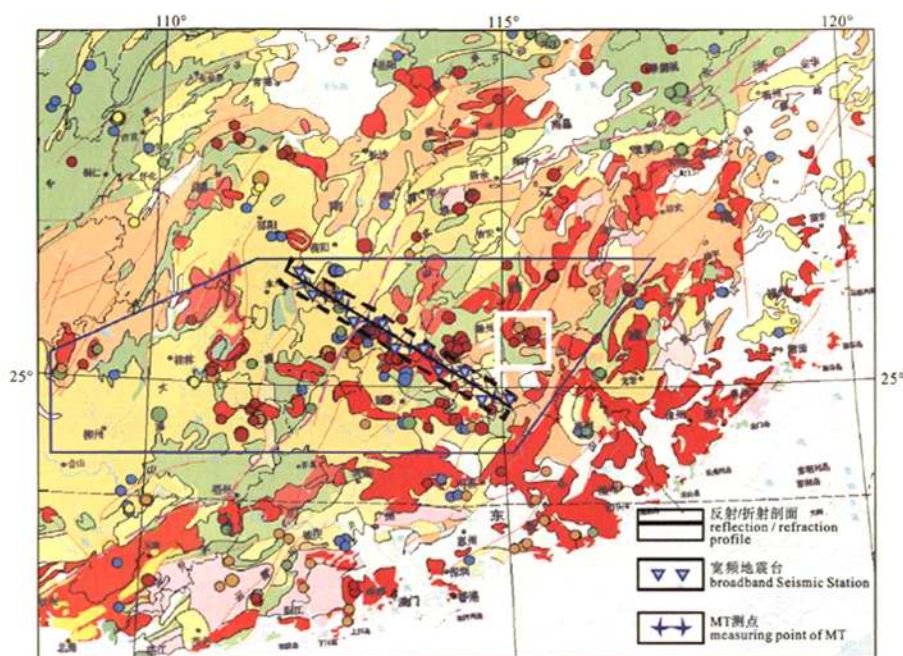


图4 南岭成矿带地质矿产简图及地质廊带位置示意图(具体廊带位置由课题组踏勘后确定)

Fig. 4 Simplified geological map of the Nanling metallogenic belt, showing the location of Geological Transect

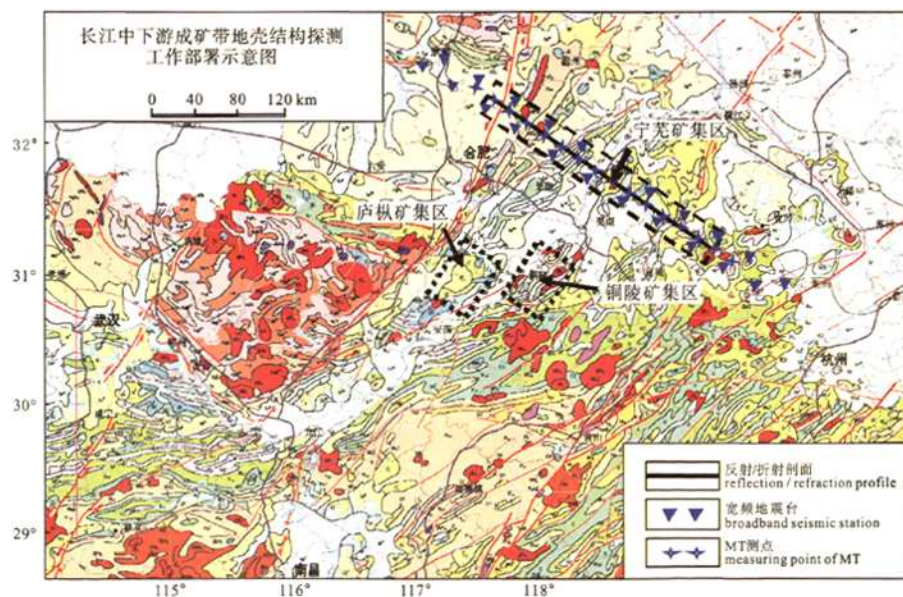


图5 长江中下游成矿带地质图及地质廊带位置示意图(具体位置由课题组踏勘后确定)

Fig. 5 Geological map of the middle and lower Yangtze metallogenic belt, showing the location of Geological Transect

(3) 成矿带岩石圈结构主要探测和研究方法

宽频地震观测: 重点采用层析成像、接收函数和各向异性反演技术获得岩石圈速度结构、主要速度界面深度和形态, 以及上地幔地震各向异性参数

(具体方法介绍略)。层析成像采用近震、远震联合反演的方法获得研究区域下方400 km的P速度异常和各向异性的分布。现今岩石圈的速度结构可以很好地反映中生代以来的重大地质过程, 如果有重大

地质事件发生,如岩石圈拆沉、底侵等,必然引起岩石圈内部速度的反转,速度异常的范围大致反映重大地质过程的范围。接收函数方法可获得研究区速度结构的横向变化。 S 波速度和岩石圈内部速度界面变化,可以很好反应壳幔结构和物质状态的变化,进而推断地质过程;速度各向异性是地幔动力学变形的方向和强度的反映,通过速度各向异性参数的计算可以推测地幔变形的方向和强度。

深地震反射/折射探测:反射地震可以获得地壳主要构造界面、岩性界面的空间分布;折射地震可以获得地壳的速度分布。地壳现今的结构和物质分布保留着其形成演化动力学过程的痕迹,这些痕迹在反射剖面上表现为不同的反射特征和模式,比如中上地壳的密集“叠瓦”式反射表明地壳曾经历了挤压变形,壳内弱反射或“透明”反射通常是均匀的岩体或巨型岩基的反映,而一些强反射“亮点”则代表现今的壳内熔融体;下地壳的密集水平反射是伸展环境下玄武岩底侵作用(Underplating)的结果等;下地壳速度升高代表有大量基性物质的加入,壳内高速体可能反映玄武岩浆的内侵作用(Intraplating)。通过地壳结构和物质的精细成像可以推演成矿带形成和演化的动力学过程。

大地电磁探测:使用长周期 MT 观测(10000 s)保障探测深度达到 40~50 km。目前可选择的仪器有四种,分别是加拿大凤凰公司的 V5-2000,乌克兰国家科学院及空间局空间研究所的 LEMI-417 M,德国 Metronix 公司的 GMS-07 和美国 EMI 公司的 MT-24。长周期 MT 观测点距为 5km,电偶极子长度根据信号强度选择,一般 50~300 m。测点的布设应充分考虑干扰、地形、交通等因素,尽力避开电线电缆、管道、城镇、矿区等干扰严重的地区,地形不应太复杂,尽量在交通方便和地形平坦处布点,并参照相关的技术规范布置传感器、屏蔽导线和主机。远参考技术是提高 MT 资料品质的重要手段,应尽量使用。

区域重磁处理解释新技术:使用近年发展起来的重磁位场新技术,如,小波分析、边缘检测、3D 场源参数反演成像(SPI)等对区域 1:20 万重磁数据进行反演解释。重点对断裂构造、岩浆岩的 3D 空间分布进行厘定。以地质廊带 2D 综合地质地球物理模型为基础,建立成矿带 3D 地质地球物理模型。

年代学和岩石“探针”技术:对地质廊带岩浆岩进行系统采样,利用微量元素地球化学、同位素地球化学、锆石 U-Pb、SHRIMP 定年及 LAICPMS 成分分析等综合技术手段示踪深部物质和深部过

程。重点利用岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学联合反演示踪,研究成矿岩浆的可能源区,揭示源区矿物相和源区地球化学;探索新生组分的可能来源、注入下地壳的可能方式;利用锆石示踪方法,限定和约束成矿岩浆的可能源岩类型和形成时限、深部岩浆房和浅位岩浆房的发育时限。

地球物理、岩石学、地球化学和成矿学的综合研究:①、地质廊带地球物理探测各方法之间的综合研究。重点开展地球物理参数之间(速度、密度、电阻率、反射界面)的相互约束反演,相互套合解释和相互验证,建立廊带统一的地质-地球物理模型。②、项目地质廊带综合探测结果与已有深部探测结果之间的相互对比研究,分析不同类型矿集区所根植的地壳结构特征和差异,研究深部过程和地壳结构对成矿系统类型的影响和制约。③、各学科之间综合。充分借鉴深部岩石物理性质和热力学研究成果,把地球物理探测结果、区域岩浆岩空间分布与地球化学示踪结果结合起来,进行时空对比分析、结果相互验证、综合集成。最终查明成矿带深部动力学背景和过程,以及对矿集区形成的制约。

2.3.2 典型矿集区 3D 结构与立体探测技术研究

(1)南岭于都—赣县矿集区立体探测与技术集成研究

在于都—赣县矿集区的银坑-青塘和盘古山—黄沙地区重点工作区分别部署 3~5 条高分辨率反射地震、大地电磁剖面的探测,同时开展两个重点工作区 1:5 万重、磁面积测量(图 6)。以 2D 反射地震解释剖面 and 大地电磁解释剖面为约束,开展区域重磁 3D 反演,精细刻画矿集区 10 km 立体精细结构和物质组成,查明岩体、基底(AnZ-O)和盖层(D-T)空间结构,建立地质-地球物理模型,阐明三者之间的空间关系,为开展深部成矿预测提供地质基础。开展以地质模型为目标的多种地球物理反演方法相互约束的反演建模方法研究,形成矿集区尺度立体探测的集成方法和流程。

(2)庐枞火山岩盆地结构探测与技术方法研究

以庐枞矿集区为综合探测试验区,部署相互交叉的综合地球物理剖面 5 条(L1 到 L5),剖面穿过火山岩分布区,两边进入盆地基底出露区(图 7),沿剖面开展高分辨率反射地震、大地电磁和地球化学测量。使用新技术开展骨干剖面的反射地震、大地电磁数据处理解释,以此作为区域重磁 3D 反演的初始模型,进行区域重、磁数据三维模拟,建立火山岩区三维结构模型。揭示盆地、基地和盆地内部岩体和火山岩层的结构框架。

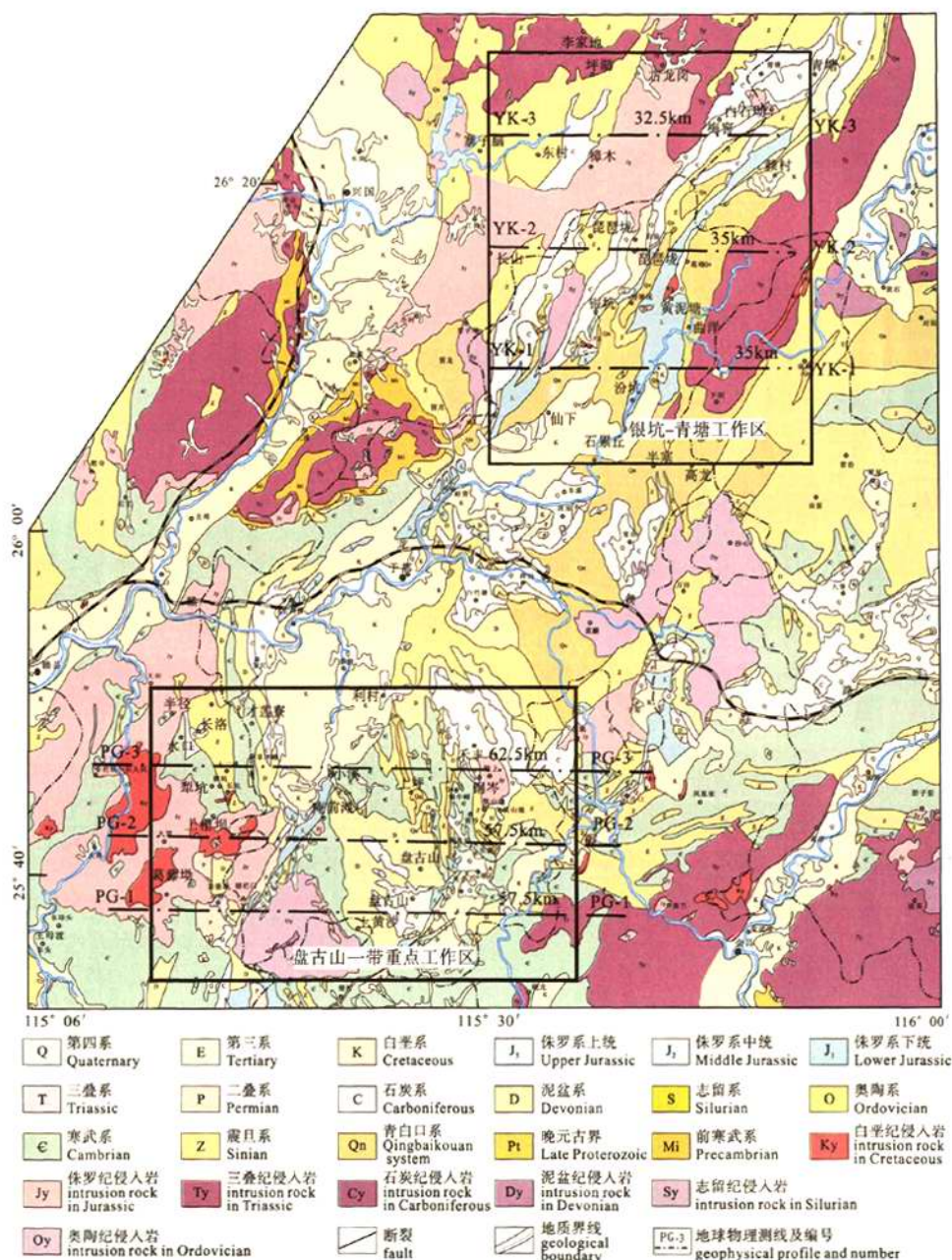


图6 于都-赣县矿集区地质图及综合地球物理探测剖面部署示意图(具体剖面位置由课题组踏勘后调整)
Fig. 6 Geological map of Yudu-Ganxian ore concentration area, showing the arrangement of geophysical profiles

(3) 铜陵矿集区容矿控矿结构探测与技术方法研究

在铜陵矿集区部署相互交叉的综合地球物理剖面5条,剖面穿过凤凰山复向斜、青山背斜、铜官山背斜、朱村向斜等主要构造,剖面南东进入宜南盆地(图8)。沿剖面开展高分辨率反射地震、大地电磁探测,

补充开展面积性高精度重力、磁力测量。使用新技术开展骨干剖面的2D高分辨率反射地震、大地电磁数据处理解释,以此作为区域重磁3D反演的初始模型,进行区域重、磁数据三维模拟,建立铜陵隆起区三维地质结构模型。揭示主要容矿、控矿层位“五通顶板”的空间分布和主要岩体的空间分布。

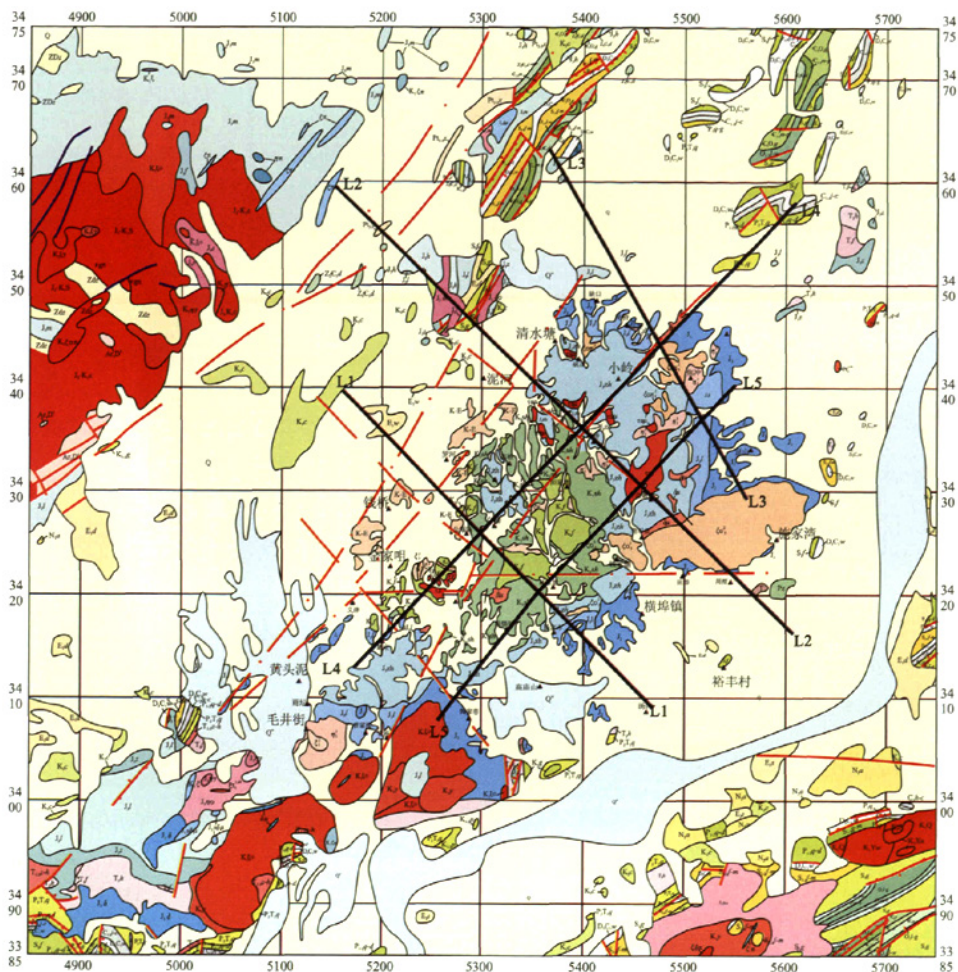


图 7 庐枞矿集区地质图及综合地球物理探测剖面位置图

Fig. 7 Geological map of the Luzong ore concentration area, showing the arrangement of geophysical profiles

(4)矿集区层次主要探测技术方法

高分辨率地震反射技术: 与深地震反射地震不同, 高分辨率反射在数据采集上以高密度检波、小炮距和高频激发为特征。近年, 金属矿集区(硬岩区或结晶岩区)反射地震研究取得了重大进展。Salisbury et al. (1996, 2003)详细研究了各种结晶岩石的波阻抗, 证明了酸性岩石和基性岩石之间的反射系数通常超过 6%, 这是能够产生强反射的最小值, 这和高变质结晶岩区的实际反射情况吻合; Juhlin et al. (2003)在花岗岩区进行了大量反射地震试验, 结果表明如果没有经过构造作用, 花岗岩通常是地震“透明”的, 但是花岗岩中的闪长岩床、塑性剪切或脆性断裂都可以形成强反射。Milkereit et al.(1992) 利用反射地震揭示出加拿大 Sudbury 火山杂岩区的深部精细结构; Roberts et al.(2003)在加拿

大安大略省的 Manitouwadge 绿岩带的反射地震试验进一步验证了该方法在高变质岩区的探测能力。上述研究为本项目在花岗岩区、火山岩区和碳酸盐岩区开展高分辨率反射地震探测主要控矿层位和岩体奠定了基础。

大地电磁探测: 矿集区层次的大地电磁探测在仪器选择和频率范围与成矿带探测略有区别, 拟选用周期为 1000~2000 s, 与 V5-2000(MTC-50)同类型仪器设备进行数据采集, 点距 500 m。矿区层次的大地电磁探测如何避开或处理矿区的强烈干扰是非常关键的, 尤其在低频段 0.1~10 Hz 的干扰。因此, 数据采集要合理选择测点位置, 了解矿山施工规律, 并开展有效去噪技术研究。

重磁测量及 3D 反演: 重磁观测严格按照相关规范进行, 开展高精度重力、磁力地形改正, 提高数

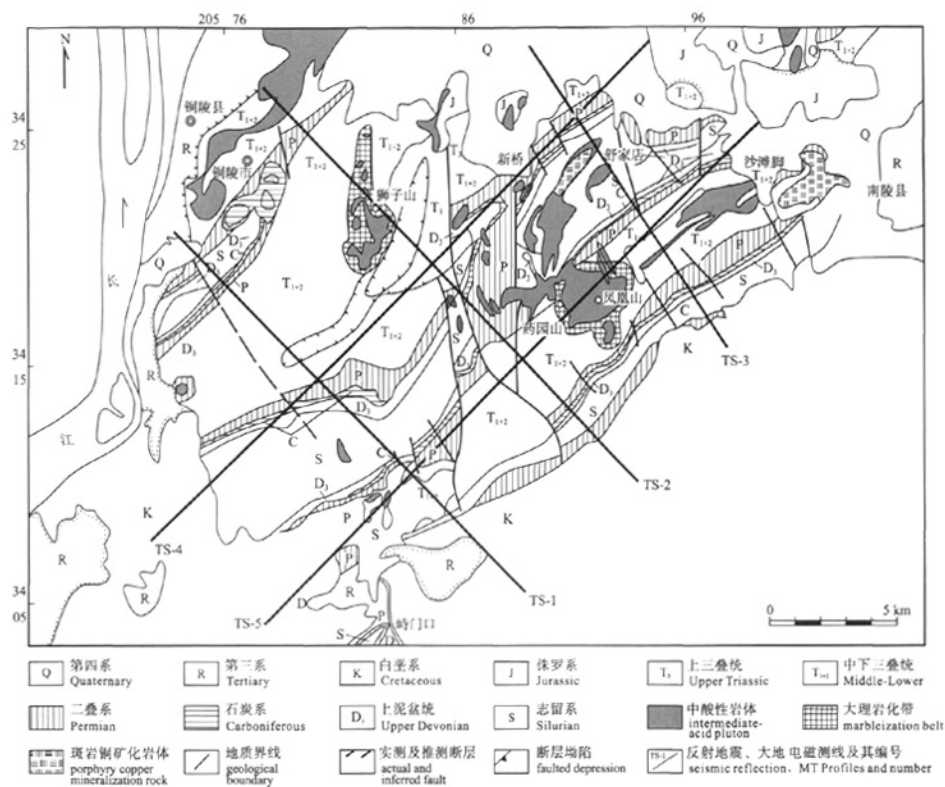


图8 铜陵矿集区地质图及综合地球物理探测剖面部署示意图(具体剖面位置由课题组踏勘后调整)

Fig.8 Geological map of the Tongling ore concentration area, showing the arrangement of geophysical profiles

1-第四系;2-第三系砂砾岩;3-白垩系砂岩、砾岩;4-侏罗系砂岩、火成岩;5-上三叠统砂岩、页岩;6-中下三叠统灰岩、白云岩;7-二叠系灰岩、硅质岩、页岩;8-石炭系页岩、灰岩;9-上泥盆统砂岩;10-志留系砂岩、页岩;11-中性岩体;12-大理岩化带;13-斑岩铜矿化岩体;14-地质界线;15-实测及推测断层;16-断层陷落;17-反射地震、大地电磁测线及其编号

据质量和精度。开展矿集区岩石物性测量研究;使用重磁三维交互反演(ModelVision Pro)、带地质约束的自动反演等解释新技术(SPI)开展重、磁数据处理和解释。对主要地质要素进行推断,包括:隐伏岩体、断裂构造、岩性单元划分等。

综合地质解释:系统收集整理矿集区已有钻孔资料,对各种地球物理探测结果进行地质、构造解释。重点建立反射地震标志层,开展重、震剖面联合解释和约束反演,精细揭示矿集区地壳深部及盖层的精细结构。

2.3.3 重要类型矿床(田)地质-地球物理模型与深部找矿技术方法

(1)于都-赣县矿集区成矿找矿模型与深部找矿技术方法

选择矿集区主要类型(石英脉型钨矿、矽卡岩型钨锡矿等)矿床(田),开展综合方法(CSAMT、AMT、TEM、SIP、高密度电法)探测试验及应用效果研究,对比各方法的一致性,研究各方法在探测深部石英

脉型矿体的能力,开展各类方法处理解释技术研究,形成针对石英脉型钨矿、矽卡岩型钨锡矿的深部找矿方法技术组合。以盘古山钨矿、黄沙钨矿、上坪钨矿、南坑山钨矿、画眉坳钨矿、桥子坑银金多金属矿、桥背坑银金多金属矿、柳木坑银铅矿、老虎头银铅锌、留龙金矿等矿田为重点,深入开展矿田构造和成矿作用特征研究,建立主要矿床深部成矿、找矿模式。在矿集区综合地球物理探测基础上,开展深部成矿、找矿信息的提取、分析和判别,在两个重点工作区开展深部成矿预测(图6)。

(2)庐枞矿集区成矿、找矿模型与深部找矿技术方法

选择沙溪斑岩铜矿、泥河(罗河)玢岩型铁矿,开展综合探测(CSAMT、AMT、TEM、SIP)及应用效果研究,对比各方法的一致性,研究各方法探测深部矿体的能力,开展各类方法处理解释技术研究,形成针对这斑岩铜矿、玢岩型铁矿的深部找矿方法技术组合。

以罗河、泥河、龙桥、岳山、沙溪、井边、大岭等典型矿床为研究重点, 深入研究矿床蚀变分带、物质成分、矿床地质地球化学、年代学特征; 探索深部正长岩与成矿作用的关系, 完善矽岩铁矿成矿模式。建立综合成矿、找矿模型, 总结深部成矿、控矿规律, 开展深部成矿预测。在庐枞盆地(图 7)开展 1: 5 万重、磁数据的位场分离、分量转换、正反演模拟等处理解释, 有效分离矿致异常, 提取深部示矿信息, 按照模式类比法, 开展区域深部成矿预测。通过地面地质和地球物理综合查证, 对成矿靶区进行筛选; 对优选出的深部成矿靶区, 开展必要的大深度地球物理查证。

(3) 铜陵矿集区成矿找矿模型与深部找矿技术方法

选择典型矽卡岩型、喷流沉积叠加改造型矿床(田), 开展综合方法(CSAMT、AMT、TEM、SIP)探测试验及应用效果研究, 对比各方法的一致性, 研究各方法探测矽卡岩型、喷流沉积叠加改造型深部矿体的能力, 开展各类方法处理解释技术研究, 形成针对矽卡岩型、喷流沉积叠加改造型的深部找矿方法技术组合。

针对存在争议的“喷流沉积叠加改造型”矿床类型, 选择铜官山、狮子山、冬瓜山、新桥、寺门口、黄狮涝等典型矿床, 进行详细野外观察和重点解剖, 室内通过显微观察和测试分析与测年, 查明不同类型矿床的矿体形态、物质组成、结构构造、成矿阶段、流体蚀变、成矿环境、控矿要素和成矿时代, 利用同位素地球化学示踪成矿物质和流体来源, 综合分析矿床成矿机制, 建立矿床的成因模型。开展矿集区综合成矿信息的提取, 尤其是深部示矿弱信息的研究和识别, 根据模式类比, 进行深部成矿预测, 圈定深部找矿靶区。

(4) 重要异常的钻探验证与金属垂向分布规律研究

在综合地球物理探测、立体建模和深部成矿预测研究的基础上, 在三个矿集区分别选择深部成矿可能性大, 具有区域成矿代表性的重要异常, 分别实施 1 口 2000 m 钻探, 直接验证综合地球物理异常, 揭示异常性质; 同时开展井中综合探测和测井, 主要包括电阻率、密度、 γ 能谱、三分量磁测井等; 尝试开展井地方式层析、井中大功率激电和井中电磁法等探测研究工作。开展系统的岩石物性测量, 主要包括密度、磁性参数、纵波速度、横波速度等。建立异常解释的“标尺”。

(5) 矿床(田)层次主要探测技术方法

可控源音频大地电磁法(CSAMT)测量: 开展 CSAMT 的主要目的有 2 个, 一是用来替代受矿山近源影响的 MT 频段(0.1 ~ 10 Hz)信号, 二是与 AMT 的电阻率异常相互印证。因此, CSAMT 的频率范围选 0.1 ~ 10 kHz, 并按 1.4 倍频率变化。为保证 CSAMT 信号强度, 采用接地电偶极子为场源, 长度 1 ~ 3 km, 并采取措施尽量减少接地电阻, 使发送电流达到 20 A 以上; 为保证远区测量, 收发距 15 km 以上。仪器可选用 V8, 应严格执行仪器操作规程, 并在每个点上同时测量电场和磁场, 而不采用多道电场共 1 道磁场的 CSAET 方式。CSAMT 点距 50 ~ 100 m, 并与 AMT 测点重合, 静态效应可采用 EMAP 方法处理。其它可按 CSAMT 相关技术规范的要求执行。

音频大地电磁法(AMT)测量: 使用 EH-4 仪器, 频率范围 10 Hz ~ 100 kHz, 每点连续采集时间 30 分钟。在矿区干扰小的地方, 可以考虑使用 V5-2000 的 MTC-30, 通频带为 0.3 Hz ~ 10 kHz、高频段略有不足, 低频段要好于 EH-4。

瞬变电磁法(TEM)测量: 大功率 TEM 测量可以使用 V8 或 PROTEM67, 后者是 TEM 专用仪器, 有很好的应用实例。可采用中心回线装置, 回线边长 400 ~ 800 m, 3-10 匝, 电流 20 A 以上。为达到 600 m 以上的勘探深度, 应保证晚期道的测量精度和分辨率, 具体的采样率、时窗和采样长度可根据仪器说明书选择。TEM 点距 50 ~ 100 m, 并应与 AMT 测点重合, 其它可按 TEM 相关技术规范的要求执行。

3 预期成果

3.1 预期成果

实施“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”项目, 首次提出了三个层次的探测目标, 从解决成矿理论的重大基础问题、矿集区精细结构探测到深部资源勘查, 进行一次系统的方法技术梳理和示范。预期将取得以下成果:

(1) 取得一批重大发现。在南岭、长江中下游成矿带深部构造背景、地壳结构、岩浆动力学过程以及对大型矿集区形成的控制作用等方面的取得一批重大发现, 提升对中国东部成矿的理论认识水平; 提交一批探测数据和系列成果图件, 包括各种地球物理探测剖面图及反演成果图, 综合地质解释图, 以及重磁处理解释成果图等。

(2) 取得一批应用成果。提交于都-赣县、庐枞和铜陵矿集区 10 km 地质-地球物理模型, 查明控矿构造、控矿岩体、赋矿层位空间分布及成矿模式; 提交深部成矿预测成果, 包括 6 ~ 10 处深部找矿靶区;

形成一批矿集区基础研究和成果图件,包括:综合地球物理探测断面图、地质解释图,矿集区三维地质图,区域航磁反演磁性体立体图,深部成矿预测图等。

(3)形成一批集成技术。提交典型矿床类型“玢岩型”铁矿、“矽卡岩型”铜铁矿和石英脉型钨锡矿等的深部找矿方法技术组合;形成火山岩区、花岗岩区和碳酸盐岩区深部 3D 探测的集成技术,突破一批关键技术,提高地壳深部探测和矿集区结构探测的技术水平。

(4)建设一个资源深部探测基地。形成一支专业结构合理、年龄层次优化、理论联系实际、国际化的深部资源探测研究团队,参与国际合作与竞争,为地壳探测工程提供人才储备。

3.2 效益分析

(1)有效促进我国深部资源勘查技术的进步。通过对深部矿产资源探测技术进行综合集成和试验研究,建立有效的深部资源探测技术体系,为拓展我国资源“第二空间”提供技术准备,对解决危机矿山找矿技术难题、缓解我国矿产资源紧张局面将发挥重要作用。

(2)为研究深部成矿理论提供全新的深部背景,较大幅度提高对我国东部成矿背景、成矿动力学过程的认识提高我国成矿理论研究的国际地位。

(3)提高南岭、长江中下游成矿带深部“第二成矿带”的认识水平,指明深部找矿方向,对全面部署两带的深部找矿工作具有重要指导作用。通过揭示三个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,圈定一批深部找矿靶区,对发现更多地深部资源具有很大的现实意义和经济价值。

4 结语

当前,我国正处于工业化、城镇化快速发展的关键时期,资源供需矛盾日益加剧,发现更多的资源、提高国家资源保障程度是地质工作者责无旁贷的历史使命。然而,我国大陆地质构造演化复杂,成矿类型多样,研究认识难度极大,这也是地质工作者面临的严峻挑战。我们必须创新思路,依靠新方法、新技术来认识如此复杂的大陆成矿规律,从而有效指导区域矿产勘查。从深部入手,通过对深部物质、结构和物理状态的精细探测,提高对深部的认知程度,是认识成矿规律、开展深部找矿的基本思路。常印佛院士在上世纪 80 年代就倡导通过开展“立体地质填图”进行深部找矿预测;2007 年在合肥深部找矿会议上,常印佛院士又提出开展成矿带

综合探测和矿集区立体填图工作。正是老一代矿床学家的不懈努力,本项目才得以立项实施。

在项目的立项过程中,很多专家都参与了项目思路的设计和研讨,他们是:陈毓川院士、滕吉文院士、翟裕生院士、裴荣富院士、叶天竺研究员、黄崇轲研究员、刘秉光研究员、刘士毅研究员、黄宗理研究员、肖庆辉研究员、董树文研究员、王瑞江研究员、柴育成研究员、魏文博教授、龙长兴研究员、高锐研究员等,在此一并表示感谢。

特别感谢长期支持、推动本项目立项的国土资源部科技司、规划司和财务司的领导,地质调查局科技外事部的领导,对他们的敬业精神和高度责任感表示崇高的敬意。

参考文献:

- 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.
- 胡瑞忠,毕献武,彭建堂,刘荣,钟宏,赵军红,蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139-152.
- 胡瑞忠,毛景文,毕献武,彭建堂,宋谢炎,钟宏,陶琰,谢桂青. 2008. 浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势[J]. 地球化学, 37(4): 344-352.
- 侯增谦. 2009. 大陆地质过程与大陆成矿作用[M]. //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编. 北京: 科学出版社: 305-309.
- 吕庆田,杨竹森,严加水,徐文艺,常印佛. 2007. 长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试—以铜陵矿集区为例[J]. 地质学报, 81(7): 865-881.
- 吕庆田,廉玉广,赵金花. 2010. 反射地震技术在成矿地质背景与深部矿产勘查中的应用: 问题与前景[J]. 地质学报, 84(6): 771-787.
- 翟裕生. 2000. 成矿系统及其演化—初步实践到理论思考[J]. 地球科学, 25(4): 333-339.

References:

- BROWN L D. 1991. A new map of crustal terranes in the United States from COCORP deep seismic reflection profiling[J]. Geophys J Int, 105: 3-13.
- BROWN L, BARAZANGI M, KAUFMAN S, OLIVER J. 1985. The first decade of COCORP: 1974-1984[M]// BROWN L.,and BARAZANGI M, eds. Reflection Profiling: A Global Perspective: American Geophysical Union Geodynamics Series: 13:107-120.
- BLEWETT R S, HITCHMAN A P. 2004. 3D Geological models of

- the eastern Yilgarn Craton -Final Report[R]. Predictive Mineral Discovery Cooperative Research Centre(*pmd**CRC), Unpublished Report.
- BRUN J P, WENZEL F, ECORS-DEKORP team. 1991. Crustal-scale structure of the southern Rhinegraben from ECORS-DEKORP seismic reflection data[J]. *Geology*, 19: 758-762.
- CLOWES R M. 1997. Lithoprobe Phase V Proposal - Evolution of a Continent Revealed[M]. Vancouver: The Lithoprobe Secretariat, The University of British Columbia.
- CALVERT A J, LI Y. 1999. Seismic reflection imaging over a massive sulfide deposit at the Matagami mining camp, Quebec [J]. *Geophysics*, 64: 24-32.
- CALVERT A J, PERRON G, LI Y. 2003. A Comparison of 2D seismic lines shot over the Ansil and Bell Allard mines in the Abitibi Greenstone belt. In D. W. Eaton., B. Milkereit, M. H. Salisbury, Eds[M]. *Hardrock Seismic Exploration*, Geophysical developments, 10: 164-177.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong. SinoProbe Group. 2011. Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)[J]. *Acta Geoscientia 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).
- ECORS Pyrenees team. 1980. Deep reflection seismic survey across an entire orogenic belt, the ECORS Pyrenees profile[J]. *Nature*, 306: 506-511.
- GOLEBY R, BLEWETT R S, KORSCH R J, CHAMPION D C, CASSIDY K F, JONES L E A, GROENEWALD P B, HENSON P. 2004. Deep seismic reflection profiling in the Archaean northeastern Yilgarn Craton, Western Australia: implications for crustal architecture and mineral potential[J]. *Tectonophysics*, 388: 119-133.
- HANSON P A. 2004. An integrated geological and geophysical 3D map for the EYC. // BLEWETT R S, HITCHMAN A P (editors), *pmd**CRC Final Report "3D Geological models of the eastern Yilgarn Craton": 39-89.
- HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, LIU Shen, ZHONG Hong, ZHAO Jun-hong, JIANG Guo-hao. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152(in Chinese with English abstract).
- HU Rui-Zhong, MAO Jing-wen, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, SONG Xie-yan, ZHONG Hong, TAO Yan, XIE Gui-qing, 2008. Several developing directions of relationship between continental geodynamics and mineralization[J]. *Geochimica*, 37(4): 344-352(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-qian. 2009. The continental geological processes and mineralization[M].// Strategic report:China's earth science development for 21st century. The geoscience developmental strategy development study team of division of earth sciences of Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press: 305-309(in Chinese).
- JUHLIN C and PALM H. 2003. Experiences from shallow reflection seismic over Granitic rocks in Sweden[M]. // EATON D W, MILKEREIT B, SALISBURY M H, Eds. *Hardrock Seismic Exploration*, Geophysical developments, 10: 93-109.
- KLEMPERER S L, HOBBS R. 1992. The BIRPS Atlas[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- LÜ Qing-tian, YANG Zhu-sen, YAN Jia-yong, XU Wen-yi. 2007. The Metallogenic Potential, Prospecting Strategy and Primary Attempt in Depth of the Middle and Lower Reach of Yangtze metallogenic belt—A Case Study of Tongling Ore District[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 865-881(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qing-tian, LIAN Yu-guang, ZHAO Jin-hua. 2010. The application of reflection seismic in studing of metallogenic geological background and deep mineral exploration: Status and Prospects[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 771-787(in Chinese with English abstract).
- MALEHMIR A, THUNEHEH H, TRYGGVASON A. 2009. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area,northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits[J]. *Geophysics*, 74(1): B9-B22.
- MACCREADY T, GOLEBY B R., GONCHAROV A, DRUMMOND B J, LISTER G S. 1998. A Framework of overprinting orogens based on interpretation of the Mount Isa deep seismic transect[J]. *Economic Geology*, 93(8): 1422-1434.
- MILKEREIT B, EATON D, WU J, PERRON G., SALISBURY M H, BERRER E K., MORRISON G. 1996. Seismic imaging of Massive sulfide Deposits: Part II: Reflection seismic profiling[J]. *Economic Geology*, 91(5): 829-834.
- MILKEREIT B, GREEN A, and Sudbury Working Group. 1992. Deep geometry of the Sudbury structure from seismic reflection profiling[J]. *Geology*, 20: 807-811.
- MILKEREIT B, BERRER E K, KING A R, WATTS A H, ROBERTS B, ADAM E, EATON D W, WU Jian-jun, SALISBURY M H. 2000. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits- A case history from the Sudbury basin, Canada[J]. *Geophysics*, 65(6): 1890-1899.
- ROBERTS B, ZALESKI E, PERRON G, ADAM E, PETRIE L, SALISBURY M. 2003. Seismic Exploration of the Manitouwadge Greenstone Belt, Ontario: A case history[M]. //EATON D W,

- MILKEREIT B, SALISBURY M H Eds. *Hardrock Seismic Exploration*, Geophysical developments, 10: 110-126.
- SORJONEN-WARD P, ZHANG Y, and ZHAO C. 2002. Numerical modelling of orogenic processes and gold mineralisation in the southeastern part of the Yilgarn Craton, Western Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49: 935-964.
- SWAGER C P, GOLEBY B R., DRUMMOND B J, RATTENBURY M S, WILLIAMS P R. 1997. Crustal structure of granite-greenstone terranes in the Eastern Gold-fields, Yilgarn Craton, as revealed by seismic reflection profiling[J]. *Precambrian Research*, 83(1-3): 43-56.
- SALISBURY M H, MILKEREIT B, BLEEKER W. 1996. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part I. Rock properties[J]. *Economic Geology*, 91(5): 821-828.
- SALISBURY M H, HARVEY C W, MATTHEWS L. 2003. The acoustic properties of ores and host rocks in hardrock terranes[M]. // EATON D W, MILKEREIT B, SALISBURY M H, Eds. *Hardrock Seismic Exploration*, Geophysical developments: 10: 9-19.
- WU J, MILKEREIT B, BOERNER D E. 1995. Seismic imaging of the enigmatic Sudbury structure[J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 4117-4130.
- ZHAI Yu-sheng. 2000. Metallogenic system and its evolution: from preliminary practice to theoretical consideration[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 333-339(in Chinese with English abstract).