

长江中下游庐江 - 枞阳矿集区 地壳结构探测与深部地质

◎ 董树文 项怀顺 高 锐 等著

地质出版社

长江中下游庐江—枞阳矿集区地壳 结构探测与深部地质

董树文	项怀顺	高 锐	李建设	张荣华
陆三明	张季生	战双庆	薛怀民	汪启年
吴才来	陈社教	陈宣华	毛思斌	马立成
孙传文	卢占武	李 明	侯贺晟	刘协来

著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以长江中下游成矿带庐江—枞阳火山岩盆地铁多金属矿集区为例,进行了深部找矿的多学科联合与方法技术实验,结合长江中下游铁铜成矿带的深部成矿背景和控矿条件,在地球动力学和火山岩成矿理论指导下,运用地质、地震、重力、磁力等综合方法,探测成矿集中区的地壳精细结构,查明成矿深部构造控制背景,提出不同深度探矿地质因素和条件,探讨中生代大规模成矿深部作用和动力学过程,预测成矿有利部位。

本书可供从事矿产勘查的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

长江中下游庐江—枞阳矿集区地壳结构探测与深部地质 / 董树文等著. —北京:地质出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-116-07711-9

I. ①长… II. ①董… III. ①长江中下游—成矿区—地壳构造—地下物探②长江中下游—成矿区—深部地质
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 121661 号

CHANGJIANG ZHONGXIAYOU LUJIANG—ZONGYANG KUANGJILU
DIQIAO JIEGOU TANCE YU SHENBU DIZHI

责任编辑:祁向雷 白 峰

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:889mm×1194mm 1/16

印 张:25.25

字 数:700 千字

版 次:2012 年 10 月北京第 1 版

印 次:2012 年 10 月北京第 1 次印刷

定 价:98.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07711-9

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

长江中下游是我国东部著名的铁铜多金属成矿带，多种矿产资源的开发利用在长三角区域经济建设和社会发展中发挥了巨大的作用。当前，长江中下游多金属成矿带浅表的金属资源开采量已不能满足日益增长的工业发展需求，而形成生产力发展的桎梏。因此，开辟深部“第二找矿空间”势在必行，一旦突破深部找矿技术方法，将会推动矿产资源勘查技术进步和找矿勘探的重大突破。根据地质背景和成矿条件对比，专家预测长江中下游地区深部存在第二找矿空间，安徽铜陵矿集区深反射地震层析成像揭示了深部成矿直接界面的空间产状，已初步证实深部找矿具有广阔的远景，而如何在地质工作高程度地区获得深部找矿的新信息成为探测“第二找矿空间”的关键。由中国地质科学院和安徽省国土资源厅领导的科研团队选择庐江-枞阳铁多金属矿集区进行深部找矿的多学科联合与方法技术集成，结合庐江-枞阳矿集区外围无为盆地、铜陵铜多金属矿集区的深部构造、成矿背景及岩浆演化信息和数据，综合研究了长江中下游地区铁铜成矿带的深部成矿背景和控矿条件。本书以火山岩成矿理论为指导，以区域成矿背景研究为先导，结合遥感与数字高程数据与地壳构造格局、区域空间数据融合分析，运用高分辨率反射地震、重力、磁力、地球化学和构造变形等综合方法，在探测庐江-枞阳矿集区的地壳精细结构的基础上，查明成矿控制背景，提取出不同深度控矿地质条件和影响因素，预测成矿有利部位，具有十分重要的实际找矿意义和找矿理论创新性，具有在东部地区深部勘查的示范性。

在长江中下游多金属成矿带典型矿集区内开展深部构造及地壳精细结构探测综合研究在国内尚属首次，而且取得了丰硕的成果。在成矿基础条件研究方面通过野外地质调查结合测试分析提出中生代庐江-枞阳火山岩盆地基底存在印支期、燕山期两期褶皱叠加，火山岩盆地基底侏罗系地层可能为新的赋矿层位，龙桥含矿层位可能为罗岭组上段。盆地北部地区深部可能为一大的隐伏岩体。总结了区内8种矿床类型和4个成矿系列，探讨了区内成矿带带性规律，提出了区内有四个明显的铁铜铅锌硫成矿带。庐江-枞阳矿集区深反射地震探测实验取得了跨越性进步，150km长的深反射地震剖面不仅获得复杂火山岩型矿集区自上而下由地表至莫霍面的全地壳有效反射信息，数据处理方法技术实验获得了较好的效果，而且首次揭示了庐江-枞阳火山岩型矿集区成矿深部控制背景，初步查明庐江-枞阳火山岩盆地深部轮廓，总体弱反射特征圈定出火山岩盆地的空间范围，火山岩盆地底部最深达4000m以上，火山岩厚度平均2000~2800m。证实罗河断裂以西不存在另一半早白垩世火山岩盆地。在罗河铁矿中下地壳，发现弱反射状似岩浆上涌活动的通道，通道两侧地壳中部发育向通道相向倾斜的层状强反射，通道上方存在反映岩浆活动的弧状强反射。通道下方莫霍面错断，现今保留有大约3km的错断。全地壳反射剖面展现出岩浆活动的内幕与深部过程，地幔岩浆从莫霍面错断处上涌，顺罗河断裂到达上地壳，形成多层蘑菇状结构。庐江-枞阳火山岩盆地明显受断裂控制，火山岩喷发是向东侧非对称性的，形成单向的弧状的火山岩盆地。

为结合反射地震剖面探测，部署了平行地震剖面的大地电磁和重磁高精度联合测量，区域电、重、磁场获得高精度数据，实现了重磁电震联合反演。在进行探测实验的地球物理剖面区域，进行同比例尺的地质构造填图和地球化学研究及其化学过程。重力异常模拟结果展示了反映岩浆通道与莫霍面错断的模型。重、磁定量计算结果响应了深反射识别出的受断裂控制火山岩喷发是非对称性的现象。重力定量计算的结果表明，地下密度体呈多层局部向上隆起。这种地层的多处不连续，以及密度由强变弱，是造成重力异常较为快速降低的主要原因。

本书在庐江-枞阳矿集区内岩浆活动与成矿关系及年代学研究方面,得到了火山岩盆地深部的正长辉长岩-辉石二长岩和正长岩岩石组合,是盆地火山岩石-钾玄岩-粗安岩-粗面岩系的对应深部地幔来源的岩浆源岩石的新认识。产于正长辉长岩-辉石二长岩-正长岩中的铁矿,是深部岩浆里的铁矿成矿作用的来源。水-岩反应实验发现,在近临界态和临界区水溶液与岩石反应的速率变化较大,跨越临界温度会引起金属矿石沉淀。SHRIMP U-Pb 年代学研究表明,庐江-枞阳火山岩活动期约 5Ma,时间较短,盆地内四个旋回火山岩的喷发时代及潜火山岩和浅成侵入岩的侵位时代集中在 133~127Ma,是在较短的时间段定位的,它们与地壳物质的混染有关外,岩浆源区具有富集型地幔的特点。

本书在庐江-枞阳矿集区外围深部构造研究方面,通过收集和处理庐江-枞阳矿集区北东侧燕山运动晚期发展起来的中新生代无为盆地的地震资料,获取上地壳的精细结构,描述了地层构造组合及空间关系,揭示可能的滑脱构造深度及与上覆与成矿相关的构造薄弱层面的关系。同时,在铜陵矿集区岩浆作用与深部过程的研究中取得了重要进展,锆石 SHRIMP 定年结果表明,狮子山地区白芒山辉石二长闪长岩、鸡冠山和大团山石英二长闪长岩、胡村花岗闪长岩的结晶年龄分别为 $138.2 \pm 0.6\text{Ma}$ 、 $139.8 \pm 0.8\text{Ma}$ 、 $139.8 \pm 1.0\text{Ma}$ 和 $141.0 \pm 0.9\text{Ma}$ 。根据锆石特征和定年数据认为,狮子山地区岩浆活动可能持续了 15Ma,岩浆属脉动式多次侵位,后期岩浆侵位的热使早期尚未固结的岩体结晶出新的锆石或使早期已结晶的锆石发生熔解、重结晶,这种热流体可能是成矿溶液,时代可代表成矿时代。

本书不仅对庐江-枞阳矿集区的深部找矿及综合研究提供不可多得的重要基础资料,而且科学的工作思路和技术方法及技术路线在找矿勘探研究领域具有开拓性和代表性,将对长江中下游地区、甚至东部地区的深部找矿工作具有实际指导意义,同时具有重要的科学价值。衷心祝愿本书的出版,能在实际工作中发挥更大的作用,为国家找寻更多的矿产资源。

常印佛

二〇一二年九月七日

前 言

《长江中下游庐江-枞阳矿集区地壳结构探测与深部地质》是财政部 2005 年“矿产资源深部探测实验”项目（预算科目编号：104102）与安徽省财政专项共同支持的成果集成，探索中国东部长江中下游成矿带复杂地质条件和成矿背景的火山岩型矿集区深部矿产资源探测技术实验研究。项目设计时限 2006~2008 年，项目承担单位为中国地质科学院和安徽省国土资源厅。项目负责人董树文、项怀顺、高锐，常印佛院士为顾问。

众所周知，能源、重要矿产资源已成为我国经济社会发展的重大瓶颈，严重制约我国小康社会战略目标的顺利实现，威胁着国家与民族安全。尽快改变能源与重要矿产的紧缺局面，建立国家资源安全保障体系成为当务之急，刻不容缓。

我国是一个资源大国，已发现 170 余种矿产，矿产资源年开采量超过 70 亿吨，是世界第一大矿业大国。我国矿产资源勘查取得了辉煌的成就，独立自主支撑了我国 50 年社会主义经济建设和工业化发展，使中国的综合国力跃居世界第二。然而，随着我国工业化进程的加快，经济建设进入持续高速发展阶段，资源需求急剧增长，矿产开发力度不断加大，资源储备直线下降。由于地质找矿难度越来越大、勘探深度不断加深、勘查成本日趋增大，矿床发现率逐年下降，已勘探的能源和固体矿产资源对工业化的保证程度日见下滑，资源的供需矛盾突显。2010 年，我国原油进口 $2.46 \times 10^8 \text{t}$ ，对外依存度达 54.8%；铁矿石进口 $6.19 \times 10^8 \text{t}$ ，对外依存度 53.6%；铜精矿和精炼铜进口分别为 $614 \times 10^4 \text{t}$ 和 $318 \times 10^4 \text{t}$ ，对外依存度均超过 70%；钾肥对外依存度超过 80%。2009 年我国进口煤炭 $1.66 \times 10^8 \text{t}$ （国土资源部信息中心，2010）。由于我国正处于工业化中期阶段，对矿产资源的需求在未来 15~20 年仍将居高不下，资源压力相当一段时期难以缓解。从国家安全出发，矿产资源对外依存度必须保持在安全临界线以内，而增加国内资源供应和提高保障度是惟一的、积极的策略。

中国及东亚大陆是世界上地质内容最丰富、活动性最强的大陆，有最厚的青藏高原地壳，有最薄的东部岩石圈，有稳定的前寒武纪克拉通，也有现代仍在活动的新生代造山带，地质构造复杂，矿产资源丰富，地质灾害频繁，环境问题突出，地球动力学过程多样化。成矿成藏作用演化的时空过程久远，自显生宙以来的各地质时期，都有大型矿床形成。新生代地质作用对过去地质过程的改造尤为强烈，现今中国大陆上绝大多数山脉都是新生代隆起成山的。虽然我国西北部金属矿产主要成矿期为古生代，东部滨太平洋成矿期主要为中生代，但新生代的再造山作用改变了矿床的分布和就位空间与环境。矿产资源再造与移位需要深部探测对其重新定位。

我国资源面临的状况与世界发达资源大国 20 年前的情况相当，我国找矿勘探的面积只占陆地面积的一半，另一半为盆地、覆盖区和高山区，而盆地的石油勘探程度仅为 28%，天然气勘探程度仅 6%。未勘探地域由于勘查难度大、工作条件差、技术要求高等因素，成为找矿勘查的“处女地”。发达的资源大国在 20 世纪 80 年代前后陆续启动了深部探测计划，逐步揭开覆盖层和盆地充填物，把视线延伸到深部，开辟了找矿的新大陆。阿巴拉契亚山脉下的油田，造山带前陆盆地的金属-油气资源，覆盖层下的奥林匹克坝超大型矿床等的发现突破了找矿的理念，拓展了找矿的空间。中国的盆地和覆盖区约占 1/2 的陆地蕴藏着巨量的固体矿产资源和油气资源，只有揭开“半壁天下”的面纱，才能开辟一个找矿新天地。我国矿床勘探深度平均约 400m，而世界主要国家都超过了 1000m，开采深度超过 2000m 的矿山比比皆是，甚至 4000m 也不鲜

有。只要把勘探深度加大,评价 2000m 以上的资源量,将会在很大程度上改变中国的资源潜力。

长江中下游是我国东部著名的铁铜多金属成矿带和沿江工业走廊,选择该地域作为深部探测的实验区具有重要的意义,长江中下游多金属成矿带和沿江工业走廊的接续资源基地已经迫在眉睫,开辟深部第二成矿带势在必行,一旦突破深部找矿的技术方法,将会推动矿产资源勘查技术进步和找矿突破。长江中下游目前平均勘查深度为 500m,开采深度平均 400m。根据地质背景和成矿条件对比,专家预测在 500~1000m,甚至到 2000m 深度范围可能存在第二找矿空间(常印佛,2007,合肥深部找矿会议讲稿),安徽铜陵冬瓜山 1000m 以下发现了大型铜矿初步证实了深部找矿的远景(常印佛等,1983)。关键问题是如何在地质工作高程度地区获得深部找矿的新信息,这取决于高精度探测技术的突破和数据集成与解释。2001~2003 年中国地质科学院在国土资源部的支持下,在铜陵地区开展了“大型矿集区深部探测技术研究”,运用深反射地震技术探测下地壳和壳幔边界的结构,采用高密度地震层析成像技术揭示了铜陵 3000m 以内多层成矿构造图像,特别是精确探测到成矿直接界面(D3 标志层)的空间产状,获得了高精度的精细勘查信息,研究工作取得重要成果(吕庆田等,2004)。本项目将在铜陵工作的基础上,选择庐江-枞阳火山岩盆地铁多金属矿集区进行深部找矿的多学科联合与方法技术集成,结合矿集区外围、铜陵铜多金属矿集区的深部数据和资料综合研究整个长江中下游铁铜成矿带的深部成矿背景和控矿条件。在庐江-枞阳地区以火山岩成矿理论为指导,运用地震、重力、磁力等综合物化探方法,探测成矿集中区的地壳精细结构,查明成矿控制背景,提取出 10km,2km 等不同深部控矿地质因素和条件,预测成矿有利部位。经过 3 年的努力,发挥产学研结合优势,圆满地完成实验任务,并取得主要成果与进展如下:

(一) 深化了区域地质认识程度,提高了对成矿控制关键因素的认识水平

1) 在 1:5 万地质图总结的基础上,编制了庐江-枞阳地区 1:10 万地质图;通过 4 个旋回典型火山岩剖面的观察,结合 LA-ICP-MS 精确同位素定年,确定了庐江-枞阳盆地 4 个火山岩旋回的时限,并阐述了区内地层的含矿性,且于城山地区发现磨山组中有工业意义的铜矿体。

2) 探讨了盆地两期褶皱叠加的构造样式,并结合物探成果解释,推断了庐江-枞阳盆地主要基底断裂,同时对盆地 J_1-2 和 K_1-2 的两次演化过程进行了研究。通过地震剖面廊带地质填图,对火山岩各旋回界面进行了调查,界面总体产状较缓,为地震解释提供了相关信息。

3) 重新确认了大包庄岩侵型火山机构的形态为两隆两凹,为在罗河南东矾母山地区找矿提供了信息,识别出寨基山火山机构。确定了各旋回火山岩和侵入岩岩石演化特征和成岩构造背景,对侵入岩划分出两阶段、六期次,并对与成矿有关的岩体及其含矿性进行了分析。结合近期勘探成果,提出火山岩厚度中心部位为 1~1.5km,庐江-枞阳盆地北部地区深部可能为一大的隐伏岩体。

4) 通过物探异常处理,划分了 5 个磁场区带,重点对庐江-枞阳火山岩盆地复杂异常区中与成矿有关的 4 个异常带进行了推断解释,对区内岩浆岩盆地边界、线形构造、环形构造、深部构造及隐伏岩体等成矿背景进行了探讨。从构造角度提出了龙桥含矿层位可能为罗岭组上段,分析了龙桥含矿层位的地球化学特征与罗岭组有类似性。

5) 总结了区内 8 种矿床类型和 4 个成矿系列,探讨了区内成矿分带性的规律,认为区内不存在杨桥-黄屯-龙桥-罗河-城山大型基底隆起带。在综合分析的基础上提出了区内有 4 个明显的铁铜铅锌硫成矿带,这也是今后找矿的重点方向。

(二) 矿集区深反射地震探测实验取得了重要进步

1. 实验获得复杂火山岩型矿集区从地表到莫霍面的全地壳有效反射信息

150km 长地震实验剖面使用长排列进行接收,在矿集区内采用 10m 道距接收,得到了矿区浅部信号,激发的最佳井深不低于 18m。为保证得到浅、中、深不同层次的反射波,在同一测线上,采用不同尺度的激发药量,矿区内药量小于 10kg,矿区外药量为 18~20kg,大炮为 96kg。通过缩小炮距、提高叠加次数,可有效提高地震数据质量。在数据采集过程中,使用的各种先进设备,如进口超级检波器、无线中继传输设备等,为资料的采集提供了有利保障。

本项目同时收集了庐江-枞阳矿集区北东侧无为盆地的地震资料。无为盆地是在燕山运动晚期发展起来的中新生代小盆地,面积 2500km²,盆地内主要为古近-新近系沉积,特别是古近系较发育。已有的 5 条地震测线资料,道间距为 50m,总长度约为 600km,进行地震处理,获取上地壳的精细结构,描述地层构造组合及空间关系,揭示可能的滑脱构造深度及与上覆与成矿相关的构造薄弱层面的关系。

2. 数据处理方法技术实验获得了较好的效果

1) 分频提高信噪比的处理技术,较好地压制了面波、低频干扰、高频噪音干扰。叠前线性干扰滤除技术在 $t-x$ 域实现了线性干扰波的压制,与 $F-K$ 滤波相比具有保持振幅、波形不畸变和无蚯蚓化现象等特点。

2) 无射线层析成像静校正技术,应用有限差分方法正演模拟地震波的首波初至,通过多次迭代反演获得近地表速度结构,从而进一步计算静校正量。它克服了地形起伏变化大,折射层不稳定的难题,更适应于横向速度变化大及高差变化大的地区,可以得到更准确的静校正量。

3) 高精度交互速度分析及 STACK-POWER 剩余静校正循环有利于提高数据处理的质量。高精度交互速度分析在时间方向上考虑了反射同相轴能量的强弱,在空间方向上考虑了构造的横向变化,所以能够较为直观准确地拾取叠加速度。STACK-POWER 剩余静校正技术,其核心是在用户选定的时窗内最大限度地获取道时移量,从而得到剩余静校正量。二者多次循环进行,是矿集区资料处理好的重要保障。

4) 基于起伏地表地震数据资料的叠前时间偏移技术 (PSG-MIG) 在庐江-枞阳地区的应用效果明显。在庐江-枞阳这种地表起伏大的地区,PSG-MIG 能够做到更好地使绕射波收敛,断层更清楚,断点干脆。与常规处理软件的叠前时间偏移模块 (如 CGG 等) 相比,优势明显。

3. 首次揭示火山岩型矿集区成矿深部控制背景

1) 初步查明庐江-枞阳火山岩盆地深部轮廓:总体弱反射特征圈定出火山岩盆地的空间范围,横向展布约 22km (1100 个 CDP)。火山岩盆地底部深达 2s TWT,以表层平均速度 4000m/s 估算,最大深度达 4000m (加上处理基准面,深度为 4100m),剔除侏罗系地层,火山岩厚度为 2000~2800m,证实罗河西侧孔城红层盆地之下不存在火山岩盆地的另一半。

2) 发现岩浆通道与莫霍面错断:在罗河铁矿中下地壳发现了中强反射层中的弱反射区似岩浆上涌活动的通道,通道两侧地壳中部发育向通道相向倾斜的层状强反射,通道上方存在反映岩浆活动的弧状强反射。通道下方莫霍面错断,目前保留有大约 3km 的错断。

3) 揭示出多层蘑菇状岩浆活动结构:全地壳反射剖面展现出岩浆活动的内幕与深部过程,地幔岩浆从莫霍面错断处上涌,顺通道到达上地壳,形成多层蘑菇状结构。受断裂控制火山岩喷发是向东侧非对称性的,形成单向的弧状的火山岩盆地。庐江-枞阳火山岩盆地明显受断裂控制,紧靠罗河断裂向东发育。

(三) 区域电、重、磁面场获得高精度数据,对地震数据解释进行约束

结合反射地震剖面探测,部署了平行地震剖面的大地电磁和重磁高精度联合测量。

1) 平行地震剖面完成 150km 长的 MT、高精度重磁测量,重力异常总精度达到了 $\pm 28 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$,磁异常总精度达到了 $\pm 1.1 \text{nT}$ 。取得了精度高、质量好的野外采集数据,为揭示地震剖面和地壳结构,提供了重要的约束参数。

2) 确定了剖面电性、地质结构特征与电性层的空间展布,在此基础上查明了剖面位置构造层发育情况及火山岩盆地盖层的发育厚度等,并根据相应的电性层展布进行了地质分层;查明剖面上主要断裂的位置,并对断裂性质及发育特征进行了描绘。

3) 通过剖面资料解释,认为区内在 5km 和 20km 左右深处存在两个电性界面,并结合地震资料对此深部电性面进行了探讨。

4) 确定了剖面处地层的密度、磁性展布特征,推断了引起重磁异常的地质体的性质,通过反演计算,推断地层结构特征。计算了庐江-枞阳地区深部密度界面——莫霍面的深度,认为庐江-枞阳地区为下扬子区莫霍界面隆起带罗河隆起区,它对内生铁铜矿床的成矿是有利的。

5) 利用罗河矿集区重磁加密测量资料分离出与罗河铁矿关系密切的重磁异常,正演计算表明,罗河磁铁矿具有明显的重磁同高组合异常的特征,当某些地段的重磁场具有这些特征时,应是本区寻找罗河式铁矿的重要地段。

6) 庐江-枞阳地区磁构造线显示的盆地边界大致与出露地表火山岩的范围相对应。沿地震 1 线剖面重、磁定量计算结果表明:盆地宽度为 21~22km。庐江-枞阳盆地厚 6~7km,由 3 层组成,上层厚约 2km,主要为早白垩世的火山岩;中层为三叠系至侏罗系碎屑岩,中间有火成岩侵入;底层为晚中生代碳酸盐岩,中间有火成岩侵入。

(四) 庐江-枞阳矿集区深部探测技术集成

1. 以区域成矿背景研究为先导,研究矿床产出环境和构造格局,为部署深部探测实验剖面奠定基础

1) 多尺度高精度区域地球物理场与地壳构造格局综合研究。

- 多尺度高精度磁场和区域磁场数据研究。先后利用 1:5 万、1:10 万高精度磁场和 1:100 万比例尺区域磁场数据,确定控制庐江-枞阳矿集区的火山岩盆地与成矿带分布。

- 多尺度高精度重力数据的研究。先后利用 1:5 万、1:10 万高精度重力数据研究和确定控制庐江-枞阳矿集区的火山岩盆地分布。建立矿集区地壳立体密度模型。

2) 遥感与数字高程数据与地壳构造格局综合研究。利用数据融合分析平台,使遥感与高程数据融为一体,进行立体空间分析,识别地壳构造格局。

3) 与区域地质结合,进行地壳构造格局与矿床产出环境综合研究。收集矿集区地层、断裂、岩浆活动等涉及控制成矿作用的地质资料,与区域地球物理资料融合分析,研究地壳构造格局与矿床产出环境。

4) 区域空间数据融合分析。利用数据融合分析平台,将多元多尺度的重磁数据、遥感与数字高程数据以及矿床地质资料等,统一比例尺,建立数据空间,综合分析矿床产出环境和构造格局,为部署深部探测实验剖面奠定基础。

2. 剖面地球物理联合观测与约束反演

1) 同剖面的地球物理学各方法联合观测。沿深反射地震剖面同时进行了大地电磁测深、地面重力、地面磁力测量;为揭示深部地壳地球物理多种参数(密度、磁性、电性、反射率等)结构与物性变化打下了基础。

2) 同剖面的地球物理学各方法约束反演。以反射地震剖面作为约束,进行同剖面的大地电磁测深、重力测量、磁力测量资料的联合反演,提高了地球物理学各方法解释的相互约束能力和

解释分辨能力。充分利用这些非震方法的横向分辨能力，以及不同参数的地质属性。例如，在庐江-枞阳矿集区，火山岩与灰岩均呈高电阻特征，但是灰岩磁性弱，两者结合就可提高分辨能力。

3. 配合进行地质填图与地球化学研究

在进行探测实验的地球物理剖面区域，进行同比例尺的地质构造填图和地球化学研究，特别是利用地震炮钻孔岩心与碎样，研究覆盖层下控矿因素、成矿时代及其化学过程。

图 0-1 为庐江-枞阳矿集区深部探测实验技术方法体系的综合框图。各个方法的技术细节可见各方法实验说明。

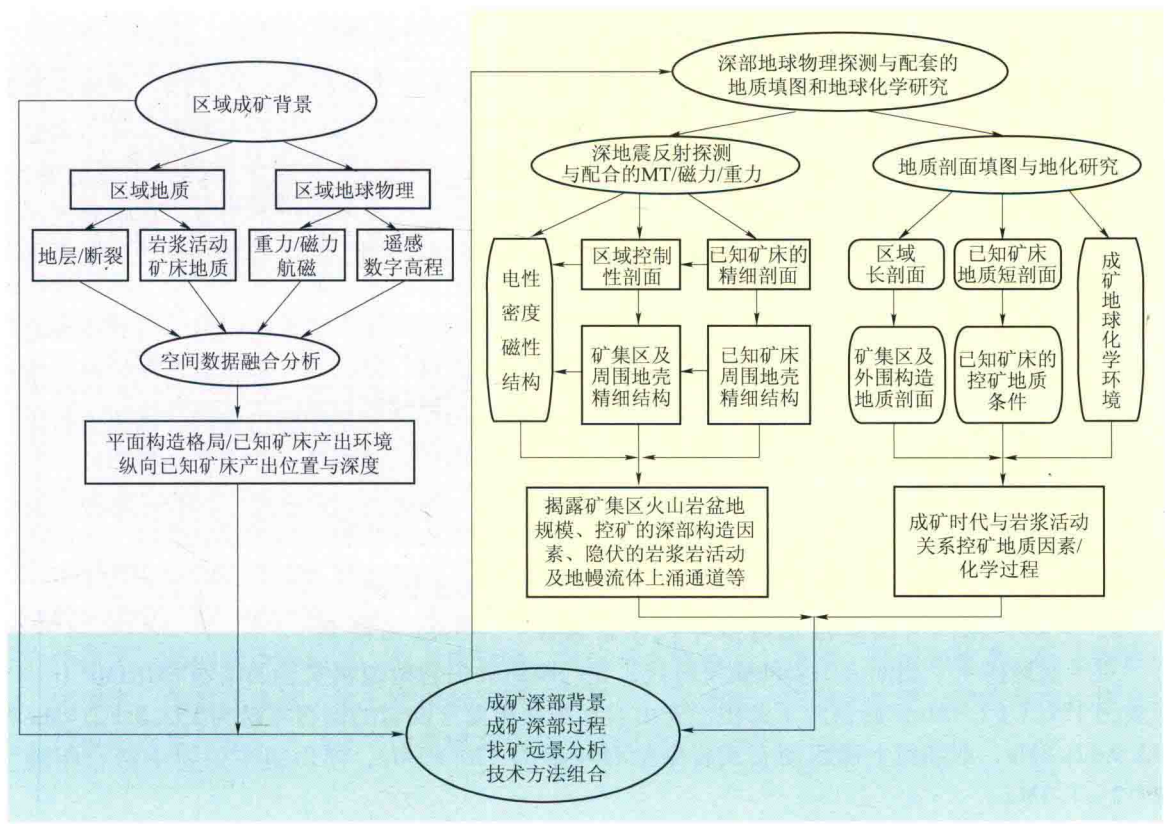


图 0-1 庐江-枞阳矿集区深部探测实验技术方法体系框图

(五) 庐江-枞阳火山岩矿集区岩浆作用与成矿认识得到新发展

1. 火山岩盆地基底和深部岩石地球化学研究

庐江-枞阳火山岩盆地深部的正长辉长岩-辉石二长岩和正长岩岩石组合，是盆地火山岩——钾玄岩-粗安岩-粗面岩系对应深部地幔来源的岩浆源岩石，也是近地壳的岩浆室的岩石。钾玄岩-粗安岩-粗面岩系对应深部的岩浆源——正长辉长岩-二长岩-正长岩系岩浆演化引起深部成矿过程的变化。深部成矿作用和岩浆活动的详细对比研究表明罗河地区的深部岩石钾玄岩和杨山矿区的正长辉长岩具有相似的 REE 特征（接近霞石玄武岩石和碱性玄武岩）-不相溶元素特征（低 Nb-Ti 等），它们应是来源最深的岩石。

2. 深部成矿作用

产于正长辉长岩-辉石二长岩-正长岩中的铁矿，实际上是深部岩浆里的铁矿成矿作用的来源。深部成矿作用可以划分为：盆地深部火山岩层内的矿床——罗河式铁矿（泥河、矾母（毛）山、牛头山）；火山岩之下与二长正长岩体接触带的矿床——何家小岭式铁矿床（何家大岭铁

矿);火山岩与正长岩的接触带矿床——云英岩-电气石-硅化带矿床;盆地基底火山岩和侏罗纪黄马青页岩与二长正长岩接触带矿床——龙桥式铁矿;盆地深部正长辉长岩/辉长岩-二长正长岩体内矿床——杨山式铁矿(马口铁矿)。

3. 深部岩石-水反应动力学

选择玄武岩和二长-正长岩研究岩石与水/低浓度 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 的反应。实验发现,在近临界态和临界区水溶液与岩石反应的速率变化较大,大批造岩元素和成矿元素在 $300\sim 435^\circ\text{C}$ 有最大的溶解速率。这将证明中地壳的水岩相互性质。同时,跨越临界温度(低于这一点温度范围)会引起金属矿石沉淀。实验证明,大量成矿元素可以来自玄武岩(Fe 、 Ti 、 V 、 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Ag 、 Ni),而一批金属元素来自二长正长岩(Cu 、 Zn 、 Ni 、 Mo)。

4. 中地壳和深部地球物理探测的解释

假定地壳里普遍存在的水占1%(体积),中地壳的流体处于 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 范围,在由亚临界态进入超临界区的演化过程中,在跨越临界温度时水的性质发生剧烈变化,如密度、介电常数等热力学参数。这一变化会引起水/岩相互作用的反应动力学涨落,会导致中地壳岩层硅的淋失、硅酸盐矿物解体、岩石崩塌。同时压力($23\sim 35\text{MPa}$)引起反应速率变化不明显。在临界区水的性质会产生强烈变化,如水的电导率、迁移性质等,这会影响中地壳的一些物理性质,如中地壳高导层和低速层的出现。

5. 深部找矿方向

应在罗河的北西方向,罗河和罗岭之间和罗岭附近寻找第二成矿带。矿床类型的空间分带值得注意,浅部的浅色蚀变作用的黄铁矿和深部深色蚀变作用的铁矿是配套出现的。潜火山岩体与火山喷发和沉积岩石的接触带和潜火山岩体内为铁矿化作用。在更深处,在正长辉长岩石-二长岩石的层状岩体中还有铁矿床。在庐-枞盆地北部在黄屯-马鞭山川北发现了类似大小岭、龙桥的深部岩浆穹窿构造,应是值得验证的靶区。

(六) 庐江-枞阳火山岩盆地的岩浆作用与深部过程新认识

1. 庐江-枞阳火山岩活动时限年代学新数据: $\sim 5\text{Ma}$ 活动期

对于盆地内4个旋回火山岩的喷发时代,龙门院组火山岩角闪粗安岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $131.1\pm 1.1\text{Ma}$; 砖桥组下部粗面安山岩和中部粗面玄武岩的锆石年龄为 $132.8\pm 2.4\text{Ma}$ 和 $132.9\pm 0.8\text{Ma}$, 双庙组上部粗面玄武岩中锆石年龄为 $130\pm 1\text{Ma}$, 浮山组粗面岩中锆石年龄为 $127.2\pm 1.3\text{Ma}$ 。

对于盆地内及其附近的潜火山岩和浅成侵入岩的侵位时代,焦冲正长斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $131.5\pm 1.6\text{Ma}$, 黄梅尖石英正长岩的锆石年龄为 $129.9\pm 0.9\text{Ma}$ 。由此可见,庐江-枞阳盆地内火山-侵入岩系是在较短的时间段(约 $127\sim 133\text{Ma}$) 定位的。

2. 庐江-枞阳盆地中生代火山岩的成因

盆地内火山-潜火山岩表现出富集轻稀土元素和略亏损重稀土元素,轻、重稀土元素的分馏程度强的特征,除与地壳物质的混染有关外,说明 Sr 和 Nd 同位素特征反映的主要是岩浆源的情况。它们的负 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、略高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 说明源区属富集型的地幔。

火山-潜火山岩中分离结晶过程中缺少斜长石的参与,意味着分离结晶作用是在斜长石稳定压力之下($< 1.5\text{GPa}$)发生的。 K_2O 与 SiO_2 之间强的正相关也表明岩浆在高压($> 1.5\text{GPa}$)下发生过分离结晶作用。因此,庐江-枞阳盆地内的 shoshonitic 岩浆形成后所经历过的分离结晶作用主要是在地下深处($> 1.5\text{GPa}$)发生的,在上升过程中受地壳物质的影响较小。

3. 岩浆作用的机制

庐江-枞阳盆地所处的长江中下游地区位于大别山造山带的前陆地区,火山岩盆地沿 NE 向的长江断裂带分布,并靠近庐断裂带,上涌的软流圈地幔发生减压熔融并底侵到壳幔过渡带附

近,导致下地壳的底部发生部分熔融,形成沙溪的埃达克(adakitic)质岩浆。随着拆沉规模的扩大和拆沉深度的变浅,陆下富集型地幔岩石圈发生熔融,所形成的岩浆和部分软流圈地幔减压熔融所形成的岩浆混合构成橄榄玄粗质岩浆。随着岩浆作用的进行,软流圈地幔所占的比例越来越高。随着火山活动由早到晚,岩浆的 Zr 饱和温度呈增加的趋势也说明了这一点。

(七) 铜陵矿集区岩浆作用于深部过程的新进展

1. 岩浆作用的时限和分期精确定年: 岩浆活动持续 15Ma

锆石 SHRIMP 定年结果表明,狮子山地区白芒山辉石二长闪长岩、鸡冠山和大团山石英二长闪长岩、胡村花岗闪长岩的结晶年龄分别为 $138.2 \pm 0.6\text{Ma}$ 、 $139.8 \pm 0.8\text{Ma}$ 、 $139.8 \pm 1.0\text{Ma}$ 和 $141.0 \pm 0.9\text{Ma}$ 。根据锆石特征和定年数据认为,狮子山地区岩浆活动可能持续了 15Ma,岩浆属脉动式多次侵位,后期岩浆侵位的热使早期尚未固结的岩体结晶出新的锆石或使早期已结晶的锆石发生熔解、重结晶。CL 图像显示,部分锆石可能受到岩浆期后的热流体的影响,发生了 Pb 的丢失,这种热流体可能是成矿溶液,时代可代表成矿时代。

2. 岩浆作用的深部过程

本区的岩浆作用过程大致为:来源于地幔的碱性玄武质岩浆上升到莫霍面附近形成深位岩浆房,并发生同化作用和分异结晶作用(53%~78%),同时形成堆积岩包体。岩浆房中热量和结晶潜热引起中上地壳发生部分熔融(63%~78%),形成具有残余体的花岗闪长质浅位岩浆房。伴随着断裂构造作用,浅位岩浆房中的花岗闪长质岩浆侵位。同时,含堆积岩的辉石二长闪长质岩浆从深位岩浆房上升,部分注入到浅位岩浆房并与花岗闪长质岩浆混合,形成微粒闪长质混杂岩包体,部分直接上升到地壳浅处形成辉石二长闪长岩侵入体。最后,混合的石英二长闪长质岩浆侵位。因此,橄榄安粗岩系列岩浆是一种被地壳混染的幔源基性岩浆分异的产物,而高钾钙碱性系列岩浆是由辉石二长闪长质岩浆(60%)和花岗闪长质岩浆(40%)混合后形成。岩浆作用的结果,最终导致本区深部莫霍面界线的消失。

本书是在各课题报告汇总的基础上经反复修改、提炼、补充后形成的,各章节分工是:前言由董树文执笔,第一章由陆三明、李建设执笔,第二章由高锐、卢占武执笔,第三章由毛思斌、汪启年执笔,第四章由陈社教、战双庆执笔,第五章由孙传文、李明、刘协来执笔,第六章由高锐、张季生、侯贺晟执笔,第七章由张荣华、薛怀民、吴才来、陈宣华执笔,第八章由董树文执笔,结束语由董树文执笔。全书由董树文、马立成统稿。

目 录

序

前言

第一章 庐江-枞阳矿集区成矿地质背景与控矿条件	1
第一节 区域构造	1
第二节 地层	2
一、地层及地层沿革	4
二、含矿地层	9
第三节 构造	10
一、基底褶皱构造特征	10
二、盆地构造与演化	13
三、基底断裂构造	13
四、主要地层界面调查	16
第四节 火山构造及控矿作用	17
第五节 火山岩岩石地球化学特征	23
一、岩石化学特征	23
二、微量元素特征	24
三、火山岩构造背景	26
第六节 侵入岩	28
一、侵入岩期次、时空分布及岩石学特征	28
二、侵入岩地球化学特征	32
三、岩石成因	36
四、关于岩岩基础地质问题的讨论	38
第七节 地球物理特征	39
一、区域地球物理场特征	39
二、航磁异常解释推断	40
三、地球物理场反映的地质构造信息	46
第八节 区域成矿规律分析	52
一、区域矿床类型及矿床系列	53
二、典型矿床成矿地质条件	54
三、区域成矿规律	71
本章小结	73
第二章 庐江-枞阳矿集区深地震反射剖面探测	75
第一节 概述	75
一、深反射地震数据采集	75
二、地震地质条件	76
三、数据采集的难点与对策	77
第二节 地震数据处理试验	92

一、区域长剖面的常规处理	93
二、区域长剖面精细处理试验	105
三、矿区剖面的特殊处理试验	120
四、处理试验小结	132
第三节 反射地震剖面解释	133
一、基本地质构造概况	133
二、地震剖面反射特征与解释	135
三、相关问题讨论	138
本章小结	139
一、数据采集方法技术实验方面	139
二、数据处理方法技术实验方面	139
三、揭示矿集区成矿深部背景方面	140
第三章 庐江—枞阳矿集区大地电磁测深剖面	142
第一节 概况、工作量及质量	142
一、剖面位置	142
二、工作量及资料质量	143
第二节 野外工作方法	143
一、作业依据	143
二、仪器性能试验及仪器标定	144
三、MT 野外工作方法	144
四、GPS 定位测量工作方法	144
五、资料质量保证措施	144
第三节 物性特征	145
一、电阻率特征	145
二、密度及磁化率特征	146
三、综合物性特征	147
第四节 资料处理	147
一、技术路线	147
二、资料处理	148
第五节 综合地质解释	149
一、解释的基础和原则	149
二、LZAB1 剖面	149
三、LZCD2 剖面、M02、M03 剖面	154
本章小结	158
第四章 庐江—枞阳矿集区高精度重磁特征综合解释	159
第一节 概况	160
一、任务部署	160
二、地球物理特征	160
第二节 野外工作方法	164
一、仪器试验和基础工作	164
二、测地工作方法	166
三、重力工作方法	168

四、磁力工作方法	171
第三节 资料的处理与解释	171
一、资料处理	171
二、成矿区深部构造背景分析	172
三、重磁场特征分析	174
四、剖面地质解释	180
五、罗河、龙桥铁矿的重磁异常特征分析	181
本章小结	184
第五章 庐江-枞阳矿集区外围地震资料与深部成矿研究	185
第一节 概况	185
一、剖面基本情况	185
二、矿集区外围地质背景	186
第二节 原始地震资料收集与分析	186
一、野外采集方法及参数	186
二、地震资料处理及效果分析	191
三、处理参数及流程	201
第三节 下扬子地区地层构造组合及其空间关系	212
一、下扬子地区构造演化	212
二、下扬子地区显生宙以来沉积盆地类型的转换	212
本章小结	214
第六章 庐江-枞阳矿集区深部勘查技术集成	215
第一节 庐江-枞阳火山岩铁多金属矿集区地球物理综合解释	215
一、地球物理特征	215
二、重、磁数据处理	218
三、重、磁异常的定量计算	221
四、庐江-枞阳地区深部构造栅状图	230
第二节 庐江-枞阳矿集区地震波层析成像实验研究	232
一、初至波走时层析成像方法简介	232
二、层析成像实验计算过程	232
三、庐江-枞阳矿集区层析成像结果的特征与初步解释	233
第七章 庐江-枞阳矿集区岩浆作用的深部过程	238
第一节 庐江-枞阳地区深部岩石地球化学研究与实验	238
一、火山岩盆地基底深部岩石地球化学过程	239
二、深部成矿作用	246
三、玄武岩与流体相互作用	252
四、中地壳条件下正长岩与水反应动力学	265
五、深部高温水-岩相互作用与中地壳物理性质	280
第二节 庐江-枞阳盆地岩浆作用的深部过程研究	289
一、庐江-枞阳盆地中生代火山-潜火山岩系的年代学研究	289
二、火山-潜火山岩系的地球化学特征与岩浆作用过程	313
三、讨论	318
第三节 铜陵地区岩浆作用与深部过程研究	321

一、区域地质背景	321
二、岩石系列及岩石地球化学特征	327
三、锆石特征及 SHRIMP U - Pb 定年	333
四、包体岩石学	347
五、岩石成因	355
六、岩浆作用深部过程	358
第八章 庐江 - 枞阳火山岩矿集区地壳结构与成矿深部作用	360
第一节 庐江 - 枞阳矿集区地壳结构总貌与成矿特征	360
一、地震、电、磁、重力联合观测与约束反演	360
二、庐江 - 枞阳矿集区地壳结构的总体特征	361
第二节 庐江 - 枞阳矿集区深部作用与成矿	362
一、地幔通道控制火山岩盆地和矿集区	362
二、火山岩盆地侧向生长形成不对称盆地	363
三、郟庐断裂带贯通地壳控制长江中下游成矿作用	364
四、长江断陷带深部结构	365
五、地壳分层与特征	366
六、浅层地质构造与成矿预测	366
七、岩浆深部作用与时限	368
结束语	370
参考文献	372
致谢	387

第一章 庐江 - 枞阳矿集区成矿地质背景与控矿条件

第一节 区域构造

庐江 - 枞阳矿集区是早白垩世（燕山期）火山岩型铁、硫、铜富集区，火山岩盆地在区域构造上处于大别造山带前陆与郯城 - 庐江断裂带的交会部位，其北西侧紧邻张八岭 - 肥东变质构造带，南东侧为长江构造带（图 1-1）。

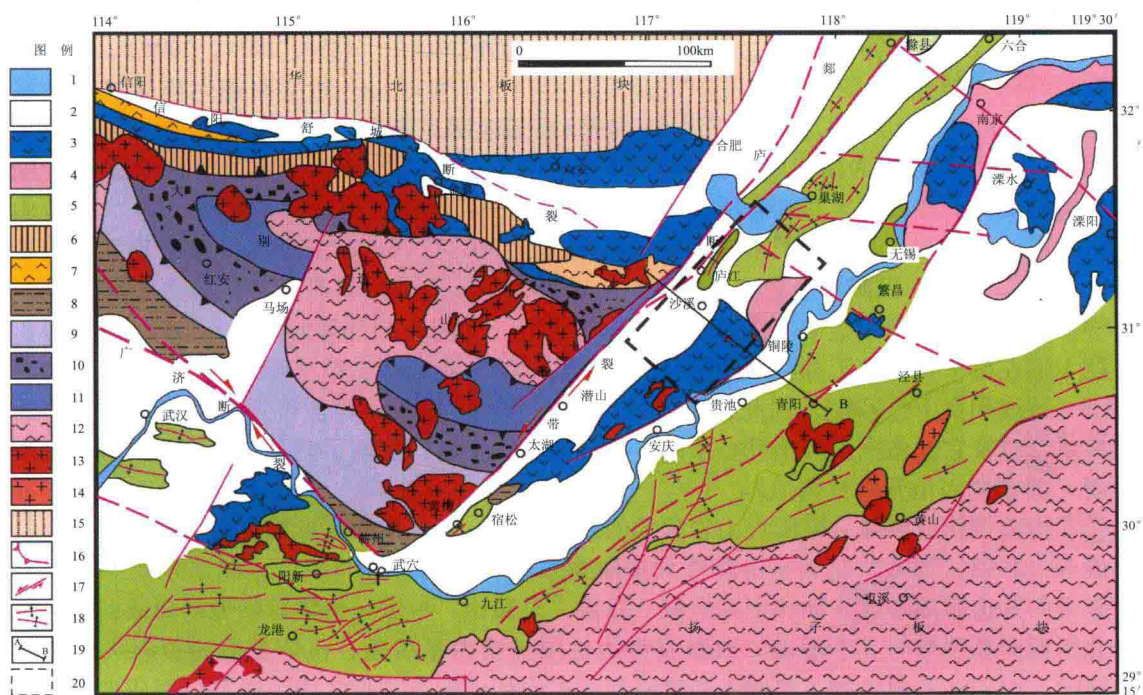


图 1-1 长江中下游地区构造地质简图

（据董树文等，2010）

1—河流及湖泊；2—第四纪 - 晚白垩世沉积；3—晚侏罗 - 早白垩世火山岩；4—早中侏罗世砂岩；5—寒武纪 - 早三叠世地层；6—大别造山带复理石建造；7—早古生代变质核杂岩；8—绿片岩带；9—角闪岩相；10—高压榴辉岩相地体；11—超高压榴辉岩相地体；12—元古宙变质基底；13—花岗岩；14—花岗闪长岩；15—华北板块；16—正断层；17—走滑断层；18—前陆褶皱逆冲带；19—剖面位置；20—庐江 - 枞阳矿集区

庐江 - 枞阳火山岩盆地向北东方向与巢湖 - 滁县古生代地层褶皱带相连，向南西方向与怀宁 - 宿松古生代地层褶皱带相接，在区域上形成北宽南窄的隆（以古生代地层褶皱为主体）凹（以中生代沉积火山岩盆地为主）相间的构造带。该带北西以滁州断裂为界，南东以和县断裂、头陂断裂为界，其中又被一系列 NWW 向断裂分割成隆凹相间，呈菱形块体分布的构造带，并与庐江浮祥山 - 桐城平坦航磁异常带，滁州 - 庐江构造带，共同构成扬子地块北东缘前陆褶皱带（可简称“三带”）。