

# 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区 复杂地壳结构形态\*

吕庆田\*\* 侯增谦 赵金花 史大年 吴宣志 常印佛 裴荣富

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

黄东定 匡朝阳

(华东石油局南京第六物探大队, 南京 210009)

**摘要** 穿过铜陵矿集区的深地震反射剖面揭示出其下具有异常地壳结构. 剖面北部下地壳 (4-11s, TWT) 呈现多组倾向相反的“层状”强反射, 解释为伸展环境下玄武岩浆多次底侵的结果. 剖面南部扬子克拉通中地壳呈现较强的水平反射, 显示清晰的双层地壳结构. 铜陵隆起上地壳出现复杂的弧形反射, 解释为褶皱、冲断和侵入构造, 复杂弧形反射下方的反射透明区揭示巨型岩基的存在; 存在于上、下地壳之间(4-7s, TWT)且向南倾斜的巨型强反射带指示二者之间存在拆离. 拆离面为岩浆侵入创造了空间条件, 使矿集区下形成巨型穹隆状岩基. 扬子克拉通具有清晰的莫霍面反射, 铜陵隆起下为弱莫霍面反射, 而剖面北部莫霍面反射之下还有反射出现, 莫霍面在短距离(60 km)内的巨大变化表明构造岩浆活动的复杂性.

**关键词** 成矿带 矿集区 深地震反射剖面 地壳结构

自 20 世纪 70 年代中期美国大陆深反射(COCORP)计划实施以来, 深地震反射技术一直是探测和研究大陆地壳结构的主要方法<sup>[1,2]</sup>. 在过去的几十年里, 这项技术被广泛用于各种地质环境地壳结构的研究: 如美国的阿巴拉契亚、西欧的莱茵地堑和中国的青藏高原<sup>[3-6]</sup>. 近年, 澳大利亚地球动力学研究中心(AGCRC)已将该技术应用在金属成矿带地壳结构的研究, 将成矿学研究纳入地球动力学研究的框架之下, 取得了令人振奋的成果<sup>1)</sup>. 在我国, 深地震反射技术主要集中在造山带地壳结构探测研究中<sup>[7-10]</sup>, 而在大型成矿带、矿集区还不多见.

长江中下游是我国东部重要的成矿带, 分布有 200 余个铜多金属矿床, 素有东部“工业走廊”之称<sup>[11,12]</sup>. 从该成矿带总结的成矿模式广泛用于指导其他地区的地质勘查工作<sup>[11,13,14]</sup>. 铜陵矿集区位于成矿带的中部, 在构造上位于扬子克拉通与前陆的过渡地带, 成矿作用以矽卡岩型、斑岩型为典型. 长期以来, 铜陵矿集区的许多基础地质问题都与深部地壳结构有关, 一直是争论的焦点. 比如是否存在近东西向的基底断裂控制铜陵-戴家汇岩浆岩带的分布<sup>[11]</sup>? 控制几个大型矿床的凤凰山岩体是否有深部的巨型侵入岩体与之相连<sup>[15]</sup>? 等等. 地壳的精细结

2002-07-17 收稿

\* 国土资源部科技专项研究计划(批准号: 20010103)和国土资源部“百名优秀青年科技人才计划”资助

\*\* E-mail: lqt@cags.cn.net

1) Australian Geodynamics Cooperative Research Center. Annual Report 1998/1999

构对回答上述问题和理解成矿作用过程十分重要。

由国土资源部资助, 在铜陵矿集区开展了深部地壳结构与成矿作用过程的研究, 实施了一条穿过矿集区的深地震反射剖面。主要目标是: 揭示铜陵矿集区的地壳细结构; 探测深部岩体的形态及其与地表岩体的关系; 探索地壳结构对成矿的约束作用。本文介绍深地震反射剖面获得的初步结果。

## 1 研究区地质概况

研究区位于扬子克拉通与前陆拗陷的过渡带, 由北向南可分为四个次级构造单元(见图 1), 北部为繁昌火山岩盆地, 其南为强变形的铜陵隆起, 二者以钟鸣-南陵隐伏深断裂( $F_3$ )为分界。丁桥-戴家汇深断裂( $F_2$ )将铜陵隆起与宣城-南陵拗陷分离。进一步向南是扬子克拉通, 以阳新-常洲深断裂( $F_1$ )与宣南拗陷分离。

区域地层主要由古生代-早中生代浅海-深海碳酸盐岩沉积和早中生代-新生代陆相碎屑岩及火山沉积岩组成<sup>[11]</sup>。研究区出露地层从志留系到第四系, 总厚度约 4800 m。志留系为浅-深海沉积的粉砂岩和页岩互层; 泥盆系为陆相准磨拉石和湖泊沉积相, 岩性为砂岩和细砂岩互层; 石炭系为浅海-海陆交互相沉积的碳酸盐岩和页岩及砂岩; 二叠系为深海沉积的硅质页岩, 硅质岩夹海陆交互相的页岩及砂岩; 三叠系为浅-半深海沉积的碳酸盐岩及页岩、泥岩、砂岩; 侏罗系为火山-次火山沉积岩, 主体分布在繁昌火山岩盆地中; 白垩系为紫红色砂砾岩夹火山角砾岩; 第三、第四系主要为砂砾岩和粘土<sup>1,2)</sup>。

受扬子板块与华北板块早中生代碰撞的影响, 研究区发生了广泛的褶皱变形、断裂作用和岩浆活动<sup>[11,16]</sup>。褶皱以轴向 NE 和 NNE 的宽缓背斜、向斜为特征。铜陵隆起由若干背斜、向斜和复向斜组成, 由北西到南东依此为铜官山背斜、青山背斜、朱村向斜、永村桥-舒家店背斜和凤凰山复向斜。从卷入褶皱的最新地层推测, 褶皱形成于燕山期。区内断裂主要有 4 组: E-W, NE, S-N 和 NW 向。E-W 向断裂为基底隐伏断裂(如铜陵-南陵断裂( $F_4$ )), 控制区内岩浆岩分布<sup>[11,15]</sup>。NE 向断裂主要形成于印支时期, 为一组与褶皱同期形成的压剪性断裂。S-N 向断裂形成于印支运动以后, 错断了 NE 向的地层分布(如  $F_5$ )。NW 向断裂以挤压破碎带为特征, 常错断地层, 规模一般较小。

研究区岩浆岩发育, 地表出露岩体约 76 个, 构成近东西向展部的铜陵-戴家汇岩浆岩带<sup>[11]</sup>。岩浆活动起始于中晚三叠世, 侏罗-白垩纪活动强烈, 多沿背斜、向斜轴部侵入。主要岩性为花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗岩、石英二长闪长岩等。侵入岩对研究区的矿床分布有很强的控制作用。

## 2 地震数据采集和处理

地震剖面呈近南北向穿过研究区 4 个地质单元(图 1), 剖面北起繁昌火山岩盆地, 经过铜陵隆起、宣南拗陷, 延伸到扬子克拉通, 全长 60 km。野外深地震反射数据采集由华东石油局南京第六物探大队于 2001 年 3~4 月完成。使用法国生产的 SN388 24 位数字地震仪, 接收道数 360~478。震源为爆炸震源, 药量 20~30 kg 不等; 炮点间距为 400 m, 检波点距 40 m, 叠加次

1) 安徽地质矿产局. 铜陵幅区域地质矿产调查报告(1:20万). 1969

2) 安徽地质矿产局. 宣城幅区域地质矿产调查报告(1:20万). 1974

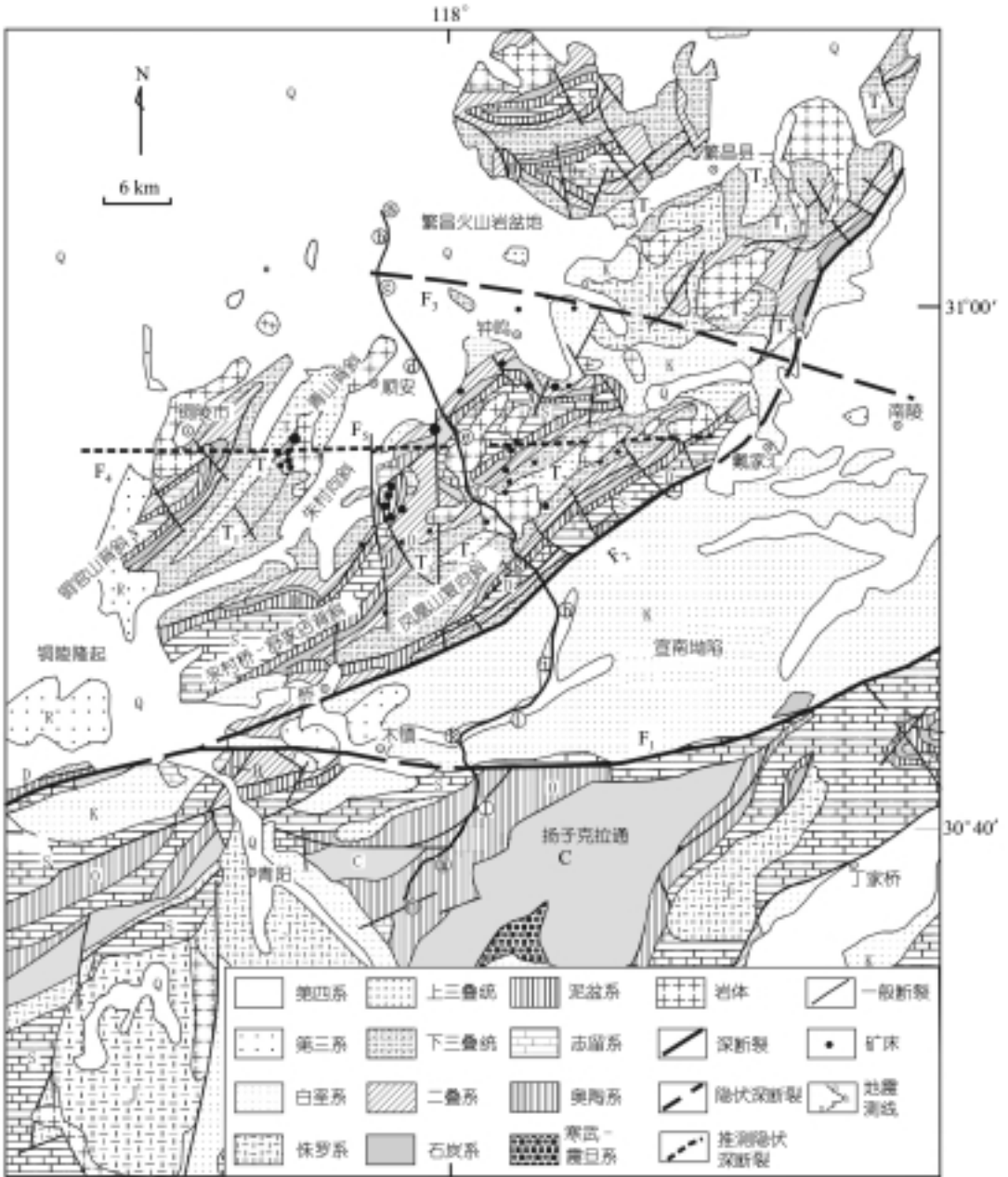


图 1 铜陵矿集区地质简图及深地震反射测线位置(据 1 : 20 万地质图简化)

数: 15~42, 记录长度 16 s, 采样间隔 1 ms. 为获得铜陵矿集区浅部信息, 在矿床密集分布的铜陵隆起, 将炮间距缩小为 200 m(即在两个大炮之间放一小炮, 药量 3~9 kg). 野外数据采集前进行了一系列参数试验, 采集过程实施现场质量监控, 对当天采集的资料进行初步处理, 发现问题, 及时补炮, 保证了数据采集的质量.

数据处理主要使用 PROMAX 交互处理系统, 在 SUN 工作站上完成. 处理流程包括: 真振

幅恢复、初至切除、地表一致性、仿阵列滤波、F-X 去噪、动校(NMO)、静校、叠加、偏移及叠后去噪(F-X 去噪等). 由于工区为人口密集的老矿区, 而且地表地震地质条件十分复杂, 而造成部分原始记录信噪比较低, 能量差异较大, 绕射波发育. 因此, 处理中重点考虑了这些因素的影响, 开展了处理参数的选择试验研究和特殊处理工作, 保证处理的质量.

### 3 主要反射特征及地质解释

#### 3.1 主要反射特征

深地震反射叠加剖面的主要特征可总结如下(图 2(a)):

(1) 莫霍层反射不连续出现在下地壳底部, 在扬子克拉通、宣南拗陷和繁昌火山岩盆地较为清晰, 铜陵隆起(CDP 点 1002~1602)下莫霍面反射减弱. 莫霍面起伏从南到北稍有抬升, 剖面南侧深度在 11 s (TWT), 北侧抬升到 10.5 s(TWT). 按地壳平均速度 6 km/s 计算, 莫霍面深度在 30~33 km, 与其他方法推断的本区莫霍面深度一致<sup>[17]</sup>.

(2) 剖面北部(CDP 点 0-902)表现为强反射的“层状”下地壳(4~11 s, TWT), 出现 4 组强反射 R1, R2, R3 和 R4(图 2(a)), 每组反射厚约 0.5~1 s; 上部两组反射(R1, R2)向南倾, 下部两组(R3, R4)略向北倾, 组成楔状反射体. 其中反射波组 R1 最强, 倾角变化最大, 由南到北从近水平(CDP 点 802-1402)变化到向南倾  $15 \pm 2^\circ$ (CDP 点 0-802), 这组强反射表明上、下地壳之间存在拆离带. 下地壳这种反射特征非常类似于西欧的莱茵地堑和美国的盆岭地区<sup>[2,4]</sup>, 不同之处是本剖面上地壳仍然有复杂的反射, 没有出现典型的“双峰”(透明上地壳/层状下地壳)反射模式<sup>[2]</sup>.

(3) 剖面北部的上地壳(CDP 点 302-1402)呈现复杂的反射特征, 出现 3 组不很强但可识别的弧形反射(UR1, UR2, UR3)和一系列连续反射, 后者可能对应古生代地层. 弧形反射从北到南依此交叉重叠, 其下方到 R1 之间为无反射区, 常称为透明反射区, 除了一些零星弱反射外, 没有可追踪的反射.

(4) 剖面南部(CDP 点 1902-2802)中地壳(TWT, 6~7 s)出现强反射层, 略向北倾, 构成一明显的台阶. 沿剖面向北反射渐弱, 到铜陵隆起南侧反射几乎消失, 继续向北可与强反射 R1 对应. 从中地壳反射与清晰的莫霍层反射可以看出, 研究区地壳具有完整的双层结构. 剖面南部上地壳(CDP 点 2302-2802)除 1~3 s 之间有一些弱反射外, 几乎没有可追踪的反射.

(5) 宣南拗陷(CDP 点 1502-2302)上地壳出现一系列倾向相反的反射, 反射的几何特征显示了地堑型盆地的形态, 盆地底部近水平, 略向北倾, 最深到 4 s (TWT).

#### 3.2 地质解释

叠加剖面的反射特征清晰地揭示了研究区的双层地壳结构和壳内构造变形的动力学特征, 现将主要反射特征的构造地质意义讨论如下:

(1) 强反射“层状”下地壳 下地壳“层状”强反射的成因一直是争论的问题. 流行的解释有镁铁质岩浆侵入(岩床), 伸展作用形成的剪切带<sup>[2,4,18]</sup>, 深部流体圈闭以及早期沉积地层遗迹等<sup>[19]</sup>. 根据区域构造演化和地球物理资料, 我们认为出现在剖面北部下地壳的强反射层是岩浆强烈底侵作用的结果. 底侵(垫)作用(underplating)可能与早白垩世(120~130 Ma)岩石圈或下地壳的拆沉有关<sup>[20]</sup>. 拆沉作用导致软流圈上涌, 产生玄武岩浆侵入, 并逐层底垫在下地壳底部, 形成强反射层. 上述解释可以从岩石的同位素地球化学和其他地球物理资料得到佐证.

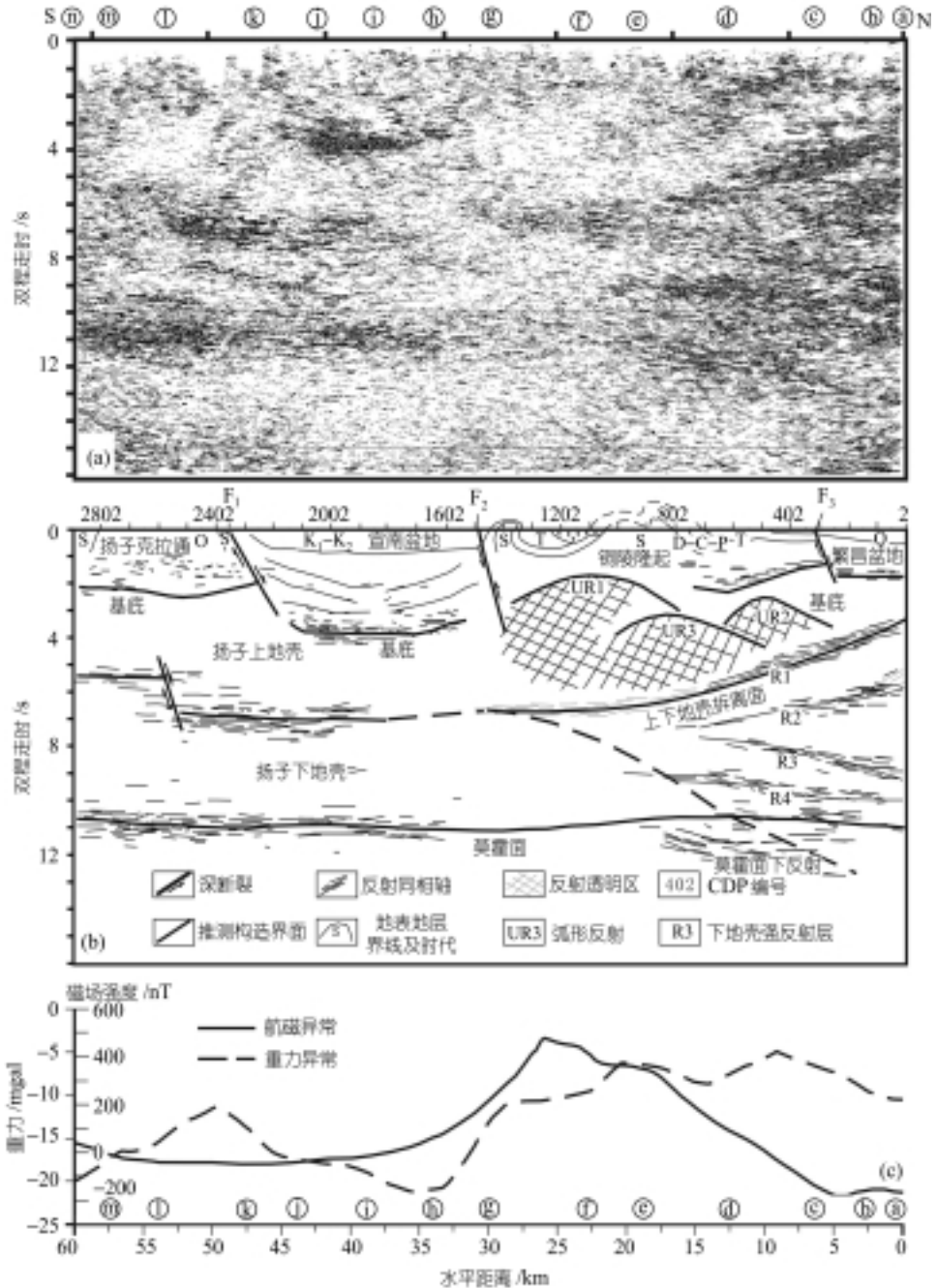


图 2 (a) 铜陵深反射叠加地震剖面, (b) 地震反射同向轴线条图及地质解释剖面, (c) 对应叠加剖面的布格重力和航磁( $\Delta Z$ )异常

研究表明<sup>[21, 22]</sup>, 铜陵及周边地区中酸性侵入岩具有与埃达克质(adakite-like)岩石类似的地球化学特征, 表明该区下地壳曾发生玄武岩浆的底侵作用. 剖面北段广泛出露的侏罗-白垩纪火山岩, 表明存在广泛的岩浆活动. 此外, 研究区的北部江苏地区 Pn 地震各向异性研究显示<sup>[23]</sup>,

岩石圈地幔存在近南北向剪切流变, 说明上地幔曾发生过可能与拆沉有关的流动变形。

在“层状”强反射地壳的莫霍面以下仍有反射存在, 它可能与新近构造活动有关, 也可能是最晚期的岩浆底侵活动留下的痕迹。

(2) “透明”的上地壳 对“透明”反射的解释有多种, 如深部物质没有波组差异、复杂构造引起的地震波散射或地震波能量不足等<sup>[2]</sup>。良好的野外数据采集质量和长排列可以排除能量不足的因素。铜陵隆起透明反射区之上出现的弧形反射说明构造因素造成的散射不足以解释透明反射的成因。没有波组差异意味着物质均匀, 均匀物质通常与大型花岗质侵入体联系在一起。根据地表地质、物探资料, 常印佛等<sup>[11]</sup>推测铜陵隆起下面存在巨大中酸性岩基, 但没有指出准确的深度和形状。航磁资料支持这种推测(图 2(c)), 因为铜陵地区物性测量表明, 中酸性岩体是主要的磁性源<sup>1)</sup>。因此, 可以认为“透明”反射区为中酸性岩基(图 2(b)), 它对铜陵矿集区的形成具有重要的控制作用, 并为矿床的形成提供物质来源。

岩浆从源区上侵必须满足两个条件: 驱动力和能够容纳岩浆的空间<sup>[24]</sup>。什么原因导致铜陵隆起上地壳下部形成空间来容纳大量岩浆呢? 研究认为, 它与上、下地壳之间的拆离有关(上、下地壳之间的强反射 R1 说明拆离的存在)。可能的形成过程是: 随着扬子与华北板块晚二叠-中三叠世的碰撞, 位于扬子前陆的铜陵地区(整个下扬子地区)上地壳发生褶皱、断裂, 下地壳增厚, 同时上、下地壳拆离, 为岩浆上侵创造了空间条件。由于岩石圈拆沉作用导致构造体制由挤压变为伸展, 玄武岩浆上侵并底垫在下地壳底部。随着温度的增高, 下地壳发生部分熔融, 熔融的岩浆通过断裂上侵并沿拆离面堆积, 逐渐形成巨大岩浆房, 同时加强盖层隆升, 形成铜陵隆起。上述解释可以说明为什么长江中下游侵入岩多沿裂谷带的次级隆起分布。

(3) 扬子与前陆的地壳结构 常印佛等<sup>[11, 25]</sup>已注意到扬子克拉通与前陆具有统一的盖层, 但具有不同的基底, 其分界线可能位于铜陵隆起下方。这意味着扬子克拉通与前陆在盖层形成之前存在不同的演化历史和地壳结构。从反射叠加剖面上很容易看到这一点。以丁桥镇-戴家汇断裂(F<sub>2</sub>)为界, 南北显示出不同的地壳结构和变形特征(图 2(a), (b))。F<sub>2</sub>以北上地壳复杂的反射可以解释为褶皱、冲断和侵入构造, 表明地壳发生了强烈挤压变形; 下地壳出现复杂的楔形反射, 反映出岩浆活动对下地壳进行了物质的和结构的强烈改造, 并使下地壳明显增厚。F<sub>2</sub>以南地壳总体上呈现出清晰的双层结构, 上地壳出现类似盆地的反射特征则是伸展作用下稳定沉积的结果; 下地壳较弱的反射表明物质相对均匀, 没有经过强烈构造变动的影响, 表现出典型的克拉通反射特征。上地壳 F<sub>2</sub> 断裂南北变形特征的差异指示, 研究区曾经经历了挤压和伸展两期主要构造变形。由于卷入褶皱的最新地层时代为中三叠世, 可以推测挤压变形主要发生在中三叠世以前, 晚二叠-早三叠世扬子板块与华北板块碰撞以后。伸展作用则发生在中三叠世以后, 侏罗、白垩纪最为强烈, 形成了研究区的宣南拗陷和繁昌火山岩盆地。

从下地壳反射特征看, 正对应铜陵隆起的下方, 无论是中地壳的强反射层, 还是莫霍反射层, 都出现了间断(无反射)和反射减弱, 这很有可能是岩浆作用, 或是流体和热的作用导致地壳混合岩化, 物质趋于均匀所致。

## 4 结论

深地震反射叠加剖面揭示了研究区具有清晰的双层地壳特征, 但大致以 F<sub>2</sub> 断裂为界, 南

1) 冶金部地球物理探矿公司. 安徽省铜陵芜湖地区航空磁测报告. 1974. 1~62

北表现出不同的地壳构造活动特征。北部下地壳经历了强烈岩浆底侵改造, 形成楔状强反射体, 对应地表的繁昌火山岩盆地的形成可能与之有成因联系; 南部下地壳几乎没有受构造岩浆作用的影响, 具有典型的克拉通地壳反射特征。克拉通与前陆的深部分界线在丁桥-戴家汇断裂之下, 而地表以阳新-常州断裂( $F_1$ )为界。

铜陵隆起总体上处于两类具有不同反射特征地壳的过渡带, 是构造、岩浆活动强烈的地区。上地壳出现复杂的弧形反射组合, 可以解释为褶皱、冲断和侵入构造, 表明上地壳发生了强烈挤压变形。上地壳弧形反射下面的反射透明区, 指示存在巨型岩基。上、下地壳之间(4~6 s, TWT)的巨型强反射层说明二者之间存在滑脱和拆离。拆离面为岩浆侵入和聚集创造了空间条件, 使矿集区下形成巨型岩基, 为成矿提供了物质来源。

扬子克拉通具有清晰的莫霍面反射, 具典型的克拉通反射特征; 对应铜陵隆起下方莫霍面反射减弱, 可能由于混合岩化作用使物质趋于均匀所致; 而剖面北部莫霍面反射之下还有反射出现, 可以解释为最晚期岩浆底侵活动的痕迹。莫霍面在短距离(60km)内的巨大变化表明构造岩浆活动的复杂性。

**致谢** 项目执行期间得到了国土资源部国际合作与科技司黄宗理司长、崔岩副司长、高平处长等领导的支持和关心; 刘士毅、肖庆辉、刘福田、姜枚、吴宣志、高锐参与了多次研究方案讨论并具体指导。华东石油局第六物探大队 4 分队完成了野外数据采集工作。高锐研究员、李秋生研究员、曾普胜博士指导并参与了野外数据采集工作。成文后作者曾与高锐研究员、董树文研究员等进行了广泛的交流与探讨, 作者受益匪浅。特别需要提到的是, 论文审阅者提出了非常宝贵的意见, 使论文更加充实完善。在此, 向上述所有人员表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Allmendinger R W, Nelson K D, Potter C J, et al. Deep seismic reflection characteristics of the continental crust. *Geology*, 1987, 15: 304~310
- 2 Brown L D. A new map of crustal terranes in the United States from COCORP deep seismic reflection profiling. *Geophys J Int*, 1991, 105: 3~13
- 3 Cook F, Brown L, Kaufman S, et al. COCORP seismic reflection profiling of the Appalachian orogen beneath the Coastal Plain of Georgia. *Geol Soc Amer Bull*, 1981, 92: 738~748
- 4 Brun J P, Wenzel F. ECORS-DEKORP Team. Crustal-scale structure of the southern Rhinegraben from ECORS-DEKORP seismic reflection data. *Geology*, 1991, 19: 758~762
- 5 Zhao W J, Nelson K D. Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 1993, 366: 557~559
- 6 Nelson K D, Zhao W J. Project INDEPTH Team. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results. *Science*, 1996, 274: 1684~1688
- 7 高 锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面. *科学通报*, 2001, 45(17): 1874~1879
- 8 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等. 郯城-涟水综合地球物理剖面. *地球物理学报*, 1999, 42(2): 206~217
- 9 Wang C Y, Zeng R S, Mooney W D, et al. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling. *J Geophys Res*, 2000, 105: 10857~10869
- 10 吴宣志, 吴春玲, 卢 杰, 等. 利用深地震反射剖面研究北祁连-河西走廊地壳细结构. *地球物理学报*, 1995, 38(增刊 II): 29~35

- 11 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 1~379
- 12 Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15: 177~242
- 13 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 等. 再论矿床的成矿系列问题. *地质论评*, 1983, 29(2): 127~139
- 14 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1992. 1~123
- 15 刘文灿, 高德臻, 储国正, 等. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测. 北京: 地质出版社, 1996. 1~131
- 16 Okay A I, Sengör A M C, Satir M. Tectonics of an ultra-high pressure metamorphic terrane: the Dabieshan/Tongbaishan orogen, China. *Tectonics*, 1993, 12: 1320~1334
- 17 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京: 地质出版社, 1999. 1~287
- 18 Brown L, Barazangi M, Kaufman S, et al. The first decade of COCORP:1974-1984. In: Barazangi M, Brown L, eds. *Reflection Profiling: A Global Perspective, Geodynamics Series*. American Geophysical Union, Washington D C, 1986, 13: 107~120
- 19 Oliver J. COCORP and fluids in the crust. In: *The Role of Fluids in Crustal Processes*. Washington D C: National Academy Press, 1990
- 20 李曙光, 黄方, 李晖. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. *科学通报*, 2001, 46(17): 1487~1491
- 21 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. *岩石学报*, 2001, 17(4): 505~513
- 22 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 2001, 30(4): 353~362
- 23 王良书. 下扬子江苏地区 Pn 残差与上地幔波速各向异性. *地球物理学报*, 1990, 33(2): 174~185
- 24 Sawyer E W. Melt segregation in the continental crust. *Geology*, 1994, 22: 1019~1022
- 25 常印佛, 董树文, 黄德志. 论中-下扬子“一盖多底”格局与演化. *火山地质与矿产*, 1996, 17(1-2): 1~14