

长江中下游及邻区的地壳密度结构与深部成矿背景探讨——来自重力学的约束*

张永谦¹ 吕庆田¹ 滕吉文² 王谦身² 徐涛²

ZHANG YongQian¹, LÜ QingTian¹, TENG JiWen², WANG QianShen² and XU Tao²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, MLR, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2013-11-08 收稿, 2014-02-07 改回.

Zhang YQ, Lü QT, Teng JW, Wang QS and Xu T. 2014. Discussion on the crustal density structure and deep mineralization background in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas; Constraints from the gravity inversion. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):931–940

Abstract To further understand the deep tectonic background and the magma activities as well as the deep mineralization processes in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt, we construct the 2D crustal density structure model based on the gravity data collected along the Lixin-Yixing geophysical profile in direction of NW-SE. We discuss the deep tectonic framework and mineralization processes on the view points of Moho undulation, characteristics of densities distribution and exist of low-density zones in crust based on the density model we got. The research results show that: the density structure varies strongly beneath the Lixin-Yixing profile; the Moho interface shallows by 3km beneath the Ningwu ore concentration area and shows an uplift form; there exists low-density zone beneath Ningwu ore concentration area. The underplating of magma from upper mantle and MASH (melting, assimilation, storage and homogenisation) process can provide reasonable explanation for such structure and tectonic framework and the existence of magma and minerals on ground surface. Upwelling of the materials from the lithospheric mantle results not only in the uplift of the Moho interface, but also in the formation of low density zone beneath the Ningwu ore concentration area. Meanwhile, the extensional faults in the brittle upper crust have provided theoretical environment for the upward movement of magmas and the formation of mineral resources.

Key words The Middle-Lower Yangtze metallogenic belt; Ningwu ore concentration area; Gravity field; Density structure; Deep mineralization background

摘要 长江中下游成矿带是我国最重要的矿产资源生产基地之一。为了深入理解和认识此成矿带形成的深部构造背景及其岩浆活动与成矿作用过程, 本文利用NW-SE向利辛-宜兴地球物理探测剖面的重力场资料构建了跨越长江中下游成矿带地域的二维深部地壳密度结构模型。并在结合其他已有研究成果的基础上, 从Moho界面的展布形态、密度分布特征与壳内低密度区的存在等方面探讨了该区的深部构造格局与成矿作用过程。研究表明: 长江中下游成矿带地域下方的地壳密度结构与其两侧地域存在显著差异; 在宁芜矿集区下方的Moho界面呈上隆形态, 矿集区存在密度值略低于两侧地域的低密度异常区。幔源岩浆的上涌底侵与MASH成矿作用可较好地解释该区的结构与构造形态以及在地表所见到的岩浆广泛存在和矿产资源富集的特征。岩石圈地幔物质在宁芜矿集区下方的上涌导致了Moho界面的抬升, 而脆性上地壳中的伸展断裂则为岩浆的向上运移与矿产资源的形成提供了有利场所与环境。

* 本文受国家“深部探测技术与实验研究”专项课题(SinoProbe-03-02)和国家自然科学基金项目(40930418, 41204063, 90914012)联合资助。

第一作者简介: 张永谦, 男, 1983年生, 助理研究员, 主要从事人工源宽角反射/折射地震测深与重力学研究, E-mail: zyq_imr@163.com

关键词 长江中下游成矿带;宁芜矿集区;重力场;密度结构;深部成矿背景

中图法分类号 P541; P631

1 引言

近代大陆岩石圈深部地球物理探测、地质调查、地球化学研究以及大陆科学钻探等研究成果揭示,大陆岩石圈与简单的大洋刚性块体不同,是一个不均一、不连续、具有多层结构和复杂流变学性质的复合体,因此大陆的流变学结构和演化过程比大洋的更加复杂(许志琴等,2010)。中国大陆的形成源于不同构造块体之间多期次的碰撞,包括三叠纪时期(250~220Ma)华北与华南块体的碰撞,晚侏罗(165±5Ma)到早白垩时期东亚大陆的多方向汇聚,以及新生代时期印度-欧亚块体之间的碰撞(Dong *et al.*, 2008; Yin, 2010; Yin and Harrison, 2000; 任纪舜, 1994; 董树文等, 2000; 张国伟等, 2004)等。中生代中国大陆构造格局的形成是由于诸多陆块碰撞拼接所致,与其相联系的重大地质事件包括华北与扬子克拉通碰撞造成陆壳深俯冲(100km深),发生超高压变质作用,并形成大别-苏鲁超高压变质带(240~220 Ma)以及超高压岩石折返(220~180Ma)(张长厚等, 1998; 匡少平等, 1999)等。

长江中下游地区位于扬子克拉通北缘,大别-苏鲁超高压变质带的前陆地域,其北西以襄樊-广济断裂和郟庐断裂为界,南东以阳新-常州断裂为界,总体上呈现出北西狭窄、北东宽阔的“V”字型构造特征(常印佛等, 1991; 吕庆田等, 2004)。特殊的构造位置、区域动力学背景与深层岩浆活动过程造成了该区特有的火山岩分布与金属矿产聚集格局。目前已在长江中下游地区发现包括宁镇、宁芜、铜陵、庐枞、安庆-贵池、九瑞、鄂东南等7个主要矿集区和超过200种的多金属矿种(常印佛等, 1991; Mao *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2003)。已有研究认为侏罗纪、白垩纪之交的东亚板块的汇聚导致了东亚构造体制发生了重大转换,西伯利亚板块向南、太平洋板块向西、印度洋板块向北东的同时向中朝板块汇聚,形成了以陆内俯冲和陆内多向造山为特征的“东亚汇聚”构造体系(董树文等, 2009)。在这一过程中,晚侏罗世大陆汇聚导致岩石圈急剧增厚,随之引发早白垩世岩石圈垮塌和大规模火山岩浆作用,从而产生了矿产资源的“大爆发”(史大年等, 2012)。而针对白垩纪火成岩的形成与多种矿物质起源的机制,许多地球科学家们从各自的专业视角出发提出了不同的动力学模式,主要包括(1)增厚的下地壳熔融(张旗等, 2001, 2002);(2)拆沉的下地壳熔融(侯增谦等, 2007; Wang *et al.*, 2004, 2006);(3)底侵的玄武岩下地壳熔融(王强等, 2001);(4)太平洋板块洋中脊的俯冲(Ling *et al.*, 2009)。而基于这些不同模式的地球动力学演化过程则会在现今的深部岩石圈结构与构造格局、Moho界面形态、以及物质组成中保存下不同的演化痕迹(吕庆田等, 2004; Shi

et al., 2013)。

随着我国快速工业化过程中矿产资源日趋紧张和浅部找矿难度越来越大,寻找深部隐伏矿床,开展“第二深度空间”矿产资源形成与聚集的深层动力学过程和深部成矿背景研究(滕吉文等, 2007, 2009; 吕庆田等, 2007)已成为摆在在中国地球科学家面前的一项紧迫任务。近年来,针对长江中下游地区矿产富集的原因与成矿机制开展了许多深部研究工作,研究结果(王强等, 2001, 2002; 许继峰等, 2001; Xu *et al.*, 2002)表明在长江中下游地区存在的诸多中酸性侵入岩具有与埃达克岩(adakite)类似的地球化学特征,直接指示存在强烈的壳幔相互作用。然而,关于该区深部动力学背景和岩浆活动与作用过程的认识绝大多数源自地球化学证据,其它学科,尤其是深部地球物理资料还很缺乏(史大年等, 2012)。且在过去为数不多的地球物理研究中(滕吉文等, 1985; 吕庆田等, 2004),受限于其资料的精度与数量,难以获得该区深部地壳与岩石圈尺度的精细结构与物性参数,进而影响了对其深部动力学背景与成矿过程的深化认识和理解。

为了更好地理解长江中下游成矿带地域岩浆活动过程及其成矿作用的深部构造背景和动力学机制,国土资源部“深部探测技术与实验研究专项”(Dong *et al.*, 2013)在该地区实施了一条横穿宁芜矿集区的多学科综合地球物理深部探测剖面(吕庆田等, 2014)。主要探测手段包括人工源宽角反射/折射地震(徐涛等, 2014),近垂直反射地震(Lü *et al.*, 2013; 梁锋等, 2014),宽频带天然地震流动台站(史大年等, 2012; Shi *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2013; 江国明等, 2014)和大地电磁测深(强建科等, 2014; 张昆等, 2014)等,并在主要矿集区开展了上地壳精细结构与变形及三维地质建模和岩性填图研究(严加永等, 2014; 祁光等, 2014)。本文利用沿利辛-宜兴综合地球物理探测剖面采集的高精度重力数据,通过构建其深部地壳的密度结构模型研究该区的深部地壳结构与构造特征,以资为进一步深化研究该区大陆地壳的形成与演化过程及其成矿机制与动力学背景提供一些重力学方面的约束与参考。

2 数据与方法

2.1 重力剖面位置与数据来源

为了可与其它地球物理探测结果进行有效对比,重力数据的采集剖面与人工源宽角反射/折射地震探测剖面(徐涛等, 2014)位置重合,该剖面东南起自扬子克拉通北缘的江苏省宜兴市,向北西方向穿过宁芜矿集区和郟庐断裂带,终止于华北块体南部的安徽省利辛县境内(图1)。

本研究中所使用的重力数据资料来源于国土资源调查1:20万比例尺的重力调查数据库。野外实际重力测量的平

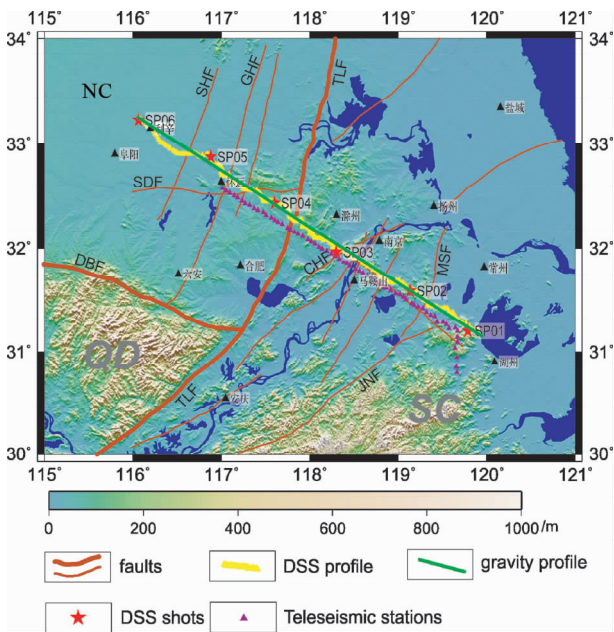


图1 长江中下游地区综合地球物理探测剖面位置与基本构造格局

TLF-郯庐断裂; DBF-大别山北侧断裂; SDF-寿县-定远断裂; SHF-寿县-霍邱断裂; GHF-固镇-怀远断裂; CHF-滁河断裂; MSF-茅山断裂; JNF-江南断裂; NC-华北地体; SC-华南地体; QD-秦岭-大别地体. 图2、图3、图4中缩写含义同此图. 断裂信息来源于马杏垣(1989)

Fig. 1 Location of the gravity profile in the Mid-Lower Yangtze metallogenic belt

TLF-Tancheng-Luijiang fault; DBF-fault on the north margin of the Dabie mountain; SDF-Shouxian-Dingyuan fault; SHF-Shouxian-Huoqiu fault; GHF-Guzhen-Huaiyuan fault; CHF-Chuhe fault; MSF-Maoshan fault; JNF-Jiangnan fault; NC-North China block; SC-South China block; QD-Qinling-Dabie block. Abbreviations in Fig. 2, Fig. 3 and Fig. 4 are the same as those in this figure. The faults information is from Ma (1989)

均测点间距为2km左右。对每一处测点的重力数据进行了如下改正:(1)固体潮改正;(2)正常场改正(1901年赫尔德特正常重力值计算公式);(3)高度改正;(4)中间层改正(中间层密度取为 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$);(5)地形改正(改正范围 $0\sim 166.7\text{km}$,改正密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$)。考虑到测量中的仪器观测精度、地形测量精度以及后续各项改正中的累积计算误差,最终得到的布格重力异常总精度为 0.5mGal 。

2.2 剖面沿线高程与布格重力异常特征

由图2a可见,沿整条重力探测剖面的地形高程在 $0\sim 250\text{m}$ 之间变化,起伏较为平缓,与中国西部地区剧烈的地形变化形成鲜明对比。在合肥盆地内部的地形高程变化范围为 $0\sim 50\text{m}$;而在郯庐断裂带(TLF)两侧地域,即固镇-怀远断裂(GHF)与滁河断裂(CHF)之间地域的地形则相对较高,在

$50\sim 150\text{m}$ 之间起伏;再向东南进入宁芜矿集区地带,其地势海拔在整体较为平缓($0\sim 30\text{m}$)的基础上则存在一些局部小隆起,但隆起的范围和高度均不大,呈现出锯齿状的地形特征;而在剖面最东南端,即千米号为 $400\sim 450\text{km}$ 范围地域的地形则陡然上升,变化较为剧烈。

与地形高程变化较为平缓的形态不同,剖面沿线的布格重力异常则呈现出剧烈起伏变化的特征。由图2b可见,在剖面西北端,即固镇-怀远断裂(GHF)西北侧地域,虽然地形变化较为平缓,但相应的布格重力异常却变化剧烈,由 0km 处的 -35mGal 迅速升至近 -10mGal ,随即又迅速降低,并在千米号为 $30\sim 50\text{km}$ 的地段呈现出“W”状的小幅抖动;之后又迅速抬升,并在千米号为 90km 附近地域升至 0mGal 左右。自千米号 90km 处向东南方向的布格重力异常呈现出阶梯状缓慢下降的趋势,并在 135km 处陡然降低至 -20mGal (降幅约 10mGal);之后直至郯庐断裂附近的重力场变化均较为平缓;越过郯庐断裂后,布格重力异常又迅速升高并呈现出较高频抖动。在宁芜矿集区的主体地域,即千米号 $275\sim 350\text{km}$ 地段的布格重力异常形态呈现出较为平缓抬升的势态,由 275km 处的 -5mGal 缓慢抬升至 350km 处的 7mGal 左右。在剖面东南端的茅山断裂(MSF)以东南地域,布格重力异常则由 7mGal 陡然下降至 -20mGal ,且随后剧烈起伏并呈现出一个较为宽缓的“W”状形态。

2.3 地壳密度模型构建方法

在本研究工作中,采用2.5D多边形棱柱体模型组合,即组合二度半体重磁异常人机交互正反演技术进行重力异常的正演计算与拟合,以获得剖面辖区的二维地壳密度结构模型。在实际正演模拟计算中,将地质构造在空间中的基本形态与物性特征以多边形棱柱体的方式展示,并将实际地质构造中各种复杂的地质构造现象抽象为空间的点、线、面等几何图元的集合。通过对组成模型空间的所有多边形棱柱体进行重力异常场的正演计算,将计算得到的重力异常值与实测重力异常值进行对比拟合,经过多次重复计算拟合,当计算值与观测值之差达到预期目标时,即可停止计算并求得满意的最终地壳密度模型。

3 研究区的地壳密度结构

3.1 初始密度模型的构建

地球物理学的研究是一个由已知的异常数据来反演未知的地下介质属性与结构的过程,而任何反演问题均离不开初始模型的提取。初始模型提取的好与坏在很大程度上决定了最终所得到的反演结果的可信度,若提取的初始模型不合理则必然会导致最终反演结果的不合理甚至完全错误。这里我们根据由人工源宽角反射/折射地震探测所得到的二维地壳速度结构模型作为地壳密度结构建模的初始依据,利用目前国际上较为流行的P波速度与介质密度之间的经验

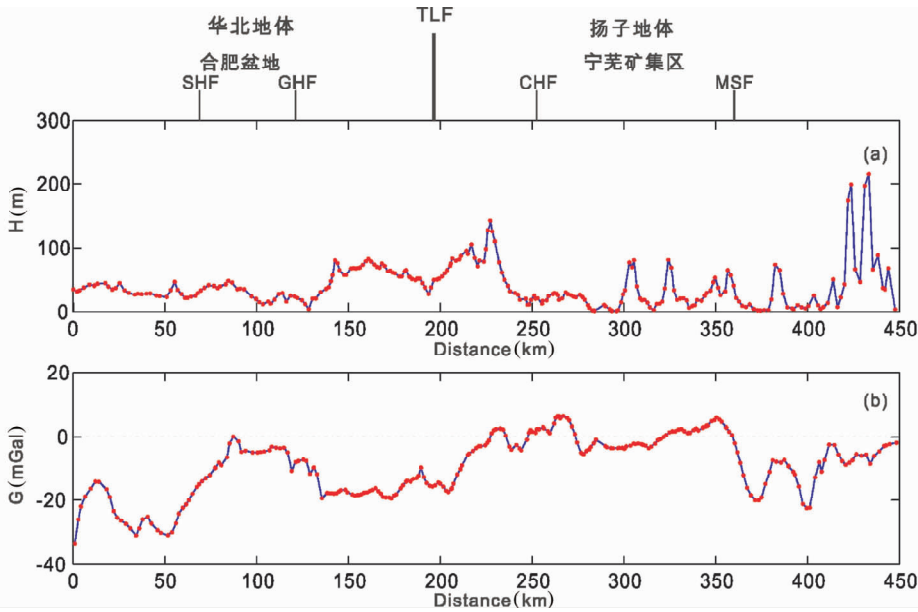


图2 利辛-宜兴剖面的地形高程(a)与布格重力异常(b)分布特征

Fig. 2 Topography (a) and Bouguer gravity anomalies (b) measured along the Lixin-Yixing profile

关系式(Ludwig *et al.*, 1970; Christensen and Mooney, 1995; Brocher, 2005; Dong *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013),并参考连云港-满都拉地学断面的波速-密度关系(冯锐等, 1986),有如下关系式:

$$\rho = \begin{cases} 2.78 + 0.56(v_p - 6.0) \cdots \cdots (v_p \leq 6.0) \\ 3.07 + 0.29(v_p - 7.0) \cdots \cdots (6.0 < v_p \leq 7.5) \\ 3.22 + 0.20(v_p - 7.5) \cdots \cdots (v_p \geq 7.5) \end{cases} \quad (1)$$

利用该式将由人工源宽角反射/折射地震探测所得到的二维速度结构转化为该剖面地壳与上地幔二维块状密度结构的初始模型(图3b)。

通过对所建立的二维地壳密度结构模型进行重力场正演计算以求得其在地表产生的重力场值的大小,并与沿剖面实测所得到的布格重力异常值进行对比,可以从一定程度上直观地判断所得地壳介质的密度结构是否可靠。由图3b可见,依据二维速度结构模型并经由P波速度-密度关系公式(公式1)转换得到的剖面辖区的二维地壳初始密度结构模型(图3b)在不同构造域是有差别的,且由该初始密度模型计算得到的理论布格重力异常值与实测布格重力异常值形态在趋势上基本一致(图3a),但仍存在较大的差异(图3c)。此即说明我们给出的初始密度模型在整体上是可概略性地反映整个剖面大的构造域之间的重力场差异的。由于该初始模型仅为由二维速度结构经过一定的经验关系计算而得并在模型建立过程中经过了一定程度的简化,所以并不能等同于深部壳、幔介质的实际密度结构,因此仍会存在一定程度的偏差。但尽管如此,该模型作为反演工作中的初始模型却可以认为是合理的,适宜用于进行密度结构的反演计算。

3.2 最终所得的地壳密度结构

沉积岩的密度主要取决于物质成分和孔隙度,且随着岩石年龄的由老至轻,其密度总体表现为递减趋势。岩浆岩的密度主要取决于暗色矿物含量的多少,由酸性至基性逐渐增大。花岗岩类的平均密度约为 $2.56 \sim 2.62 \text{ g/cm}^3$,中酸性侵入岩约 $2.60 \sim 2.70 \text{ g/cm}^3$,基性-超基性岩约 $2.82 \sim 3.23 \text{ g/cm}^3$ 。且深成侵入岩密度普遍要大于浅成岩和喷出岩类。而变质岩的密度变化则与其原岩关系密切,且普遍具有大于原岩的特点(王建伟等,2010)。

在长江中下游地域开展的最新地震学研究成果表明,在长江中下游成矿带地域下方的Moho界面呈现上隆的形态,近垂直反射地震的探测表明来自该地域下方Moho界面的反射波双程走时较其两侧地域小约 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ (Lü *et al.*, 2013),意味着该地域的Moho界面埋藏深度比其两侧地域约浅 $1.6 \sim 3.3 \text{ km}$ (取Moho面附近下地壳的平均速度 6.6 km/s (徐涛等,2014)进行计算);天然源地震接收函数研究结果(Shi *et al.*, 2013)显示该剖面地域Moho界面的平均埋藏深度约在 32 km 左右起伏,且由剖面东南端的 33 km 向北西方向逐渐抬升,在宁芜矿集区下方约为 29 km ,随后向北西侧的郟庐断裂方向逐渐加深至 35 km 左右;宽角反射/折射地震探测结果(徐涛等,2014)亦显示在宁芜矿集区下方偏北西侧的地壳厚度相对较小。

在此基础上,参考了该研究区的区域构造格局与地层层序特征以及沿剖面辖区的断裂分布情况(马杏垣,1989),根据所建立的地壳密度模型正演计算产生的重力异常与实测布格重力异常的拟合情况对所建立的密度模型不断进行调整,最终所得的长江中下游矿集区及其邻近地域的二维地壳

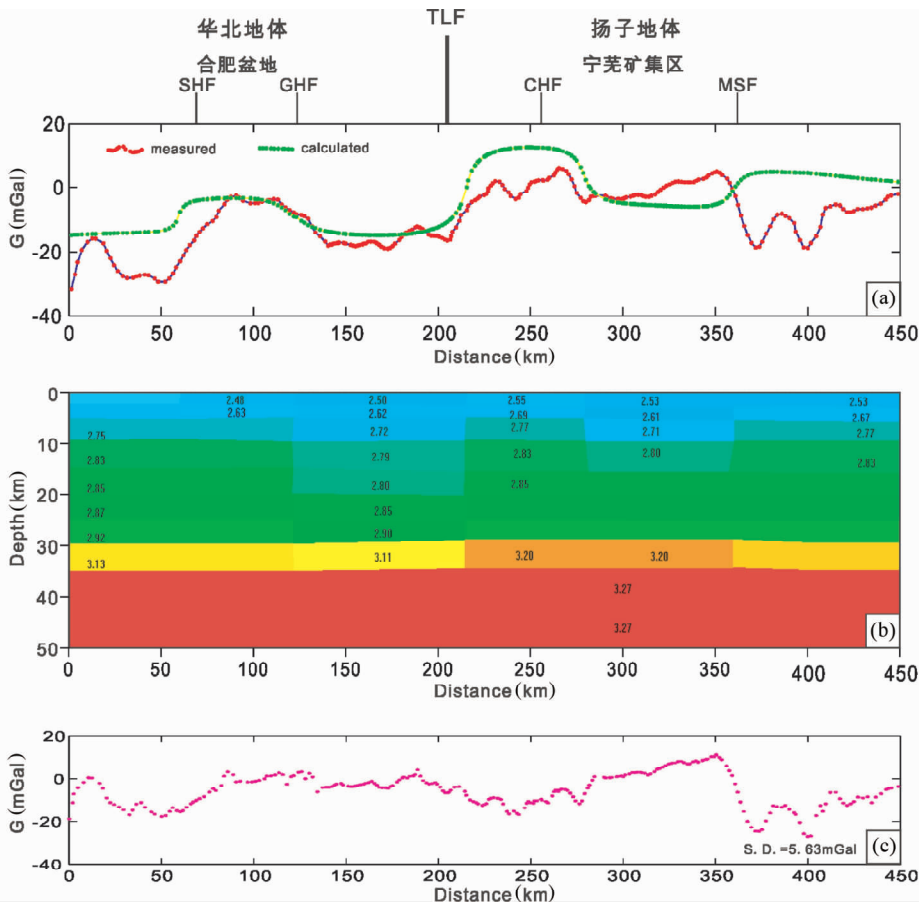


图3 利辛-宜兴剖面的初始地壳密度模型示意图

(a)-计算重力异常与实测重力异常拟合情况;(b)-初始地壳密度模型,模型内部数值代表不同块体单元的密度值,单位 g/cm^3 ;(c)-计算重力异常与实测重力异常的拟合差

Fig. 3 Initial density model of the crust-mantle structure beneath the Lixin-Yixing profile based on P-wave velocity

(a)-measured Bouguer gravity anomalies (blue line with red dots) and calculated anomalies (yellow line with green dots) along the profile; (b)-initial density model for the profile; (c)-differences between the measured Bouguer gravity anomalies and the calculated anomalies from the initial density model, and the standard deviation is 5.63mGal for the initial model. Numbers in plot (b) are density values in unit of g/cm^3

密度结构模型示于图4。

由经过多次迭代调整后所得到的最终地壳密度结构模型(图4b)计算而得的理论重力异常曲线与实测的重力异常值拟合良好(图4a),拟合均方差为 0.86mGal (图4c)。由图4b可见,在郟庐断裂带及其两侧的扬子克拉通与华北克拉通地域,其地壳的密度结构特征无论是在横向还是在纵向均差异显著。

在垂向方向上,在剖面辖区的结晶地壳之上覆盖了厚度约 $3\sim 7\text{km}$ 的沉积盖层(徐涛等,2014),其沉积物的密度随着深度的加深由 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 逐渐增加至 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 。在沉积盖层底界面上、下两侧存在一密度差可达 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 左右的密度突变界面,其下方的地壳介质平均密度均在 $2.73\text{g}/\text{cm}^3$ 以上,且密度的垂向变化梯度亦明显小于沉积盖层内的垂向密度梯度。在沉积盖层之下的结晶地壳部分,随着围岩压力的增大,地壳岩石介质内部的孔隙逐渐闭合,压实固结程度

趋好,由此导致岩石的密度变化在垂向方向不如浅部明显。地壳底部 Moho 界面之上的密度值在横向上差别不大,约在 $2.91\sim 2.93\text{g}/\text{cm}^3$ 之间变化;而 Moho 界面下方上地幔的密度值为 $3.25\sim 3.27\text{g}/\text{cm}^3$,即在 Moho 界面的上下两侧密度差为 $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,呈现出明显的一级间断面特征。

从横向来看,地壳密度模型在不同构造区块内呈现出了不同结构与物性特征,并存在有两处横向展布与延伸深度规模均较大的低密度区。如在郟庐断裂(TLF)西北侧直至固镇-怀远断裂(GHF)附近存在一大规模的低密度区:从形态上看,该低密度区自浅而深贯穿整个地壳,且横向展布范围可达 60km 之宽,在该低密度区下方的 Moho 界面呈西北浅而东南略深的斜向起伏;从密度参数值来看,该区在地壳表层 $0\sim 2\text{km}$ 深度范围内的密度值在 $2.48\sim 2.54\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,与其两侧地域的密度值相差并不明显,但随着深度的逐渐加深,其密度值与两侧地域的差异则随之增大,在上地壳范围内比

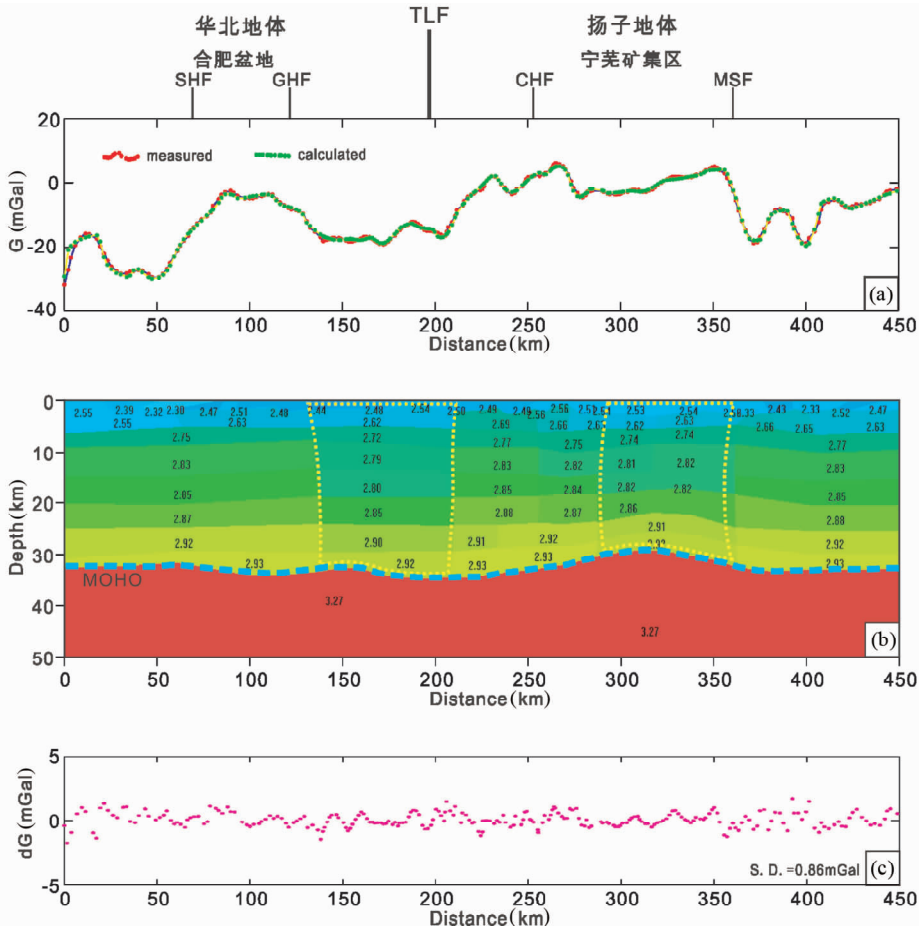


图4 利辛-宜兴剖面的2D地壳密度结构模型示意图

(a)-计算重力异常与实测重力异常拟合情况;(b)-最终得到的地壳密度模型,模型内部数值代表不同块体单元的密度值,单位 g/cm^3 ;黄色虚线区域为低密度区,蓝色粗虚线表示 Moho 界面;(c)-计算重力异常与实测重力异常的拟合差

Fig. 4 Final density model of the crust-mantle structure beneath the Lixin-Yixing profile

(a)-measured Bouguer gravity anomalies (blue line with red dots) and calculated anomalies (yellow line with green dots) along the profile; (b)-final density model for the profile; (c)-differences between the measured Bouguer gravity anomalies and the calculated anomalies from the final density model, and the standard derivation is 0.86mGal for the final model. Numbers in plot (b) are density values in unit of g/cm^3

其两侧地域约低 $0.05 \sim 0.07 \text{g}/\text{cm}^3$ 左右,而在下地壳深度范围内,由于伴随着围岩压力增大而产生的压实作用,其密度值与两侧的差异则不如上地壳部分明显,约在 $0.01 \sim 0.03 \text{g}/\text{cm}^3$ 之间。由于该规模巨大的低密度区在,导致在地表观测到的布格重力异常曲线在郟庐断裂(TLF)与固镇-怀远断裂(GHF)之间地域呈现出广泛的低异常特征。究其原因,我们推测应是由于自晚三叠(231 ~ 213Ma)时期以来华南扬子块体成反“L”形与华北块体斜向碰撞过程(Yin and Nie, 1993; 吕庆田等,2004)中以郟庐断裂带为主要接触边界所产生的侧向走滑力系在接触带地域造成的介质剪切破碎或强度降低所致。在扬子地体内部的宁芜矿集区下方亦存在一低密度区,关于该处低密度区的特征及其与长江中下游成矿带的关系将在4.2节中详细论述。而剖面辖区小尺度的重力异常变化,如在30 ~ 50km范围的重力低异常以及350 ~ 430km范围内呈现的“W”状高频抖动特征且计算重力异常与实测

重力异常拟合程度相对较差,则主要是由于本研究中基于深部地壳结构所构建的模型尺度较大,难以反应浅部尺度较小且具有强烈不均一性的上地壳精细结构与物性特征所致。

4 讨论

4.1 Moho 界面起伏与岩浆的底侵作用

Moho 界面作为地壳与岩石圈之间的一级间断面,其性质、形态、以及两侧的物性特征均是大陆地壳的演化历史和深层动力学过程在结构与形态上的体现。为此,针对 Moho 界面的研究一直是地球科学界所关注的热点。通过构建研究区的二维地壳密度结构模型,则可从重力学与密度组成的角度分析 Moho 界面的形态与性质,并在结合其它地球物理探测研究成果的基础上对其与岩浆活动及成矿过程的关系

作以探讨。

由图 4b 可见,在利辛-宜兴长 450km 的综合地球物理探测剖面下方, Moho 界面呈现出了深浅不一的展布形态,而其两侧的密度值也有一定差异。从整体来看, Moho 界面在深度为 30~35km 的范围内呈缓波浪状起伏,此结果与人工源近垂直反射地震探测(吕庆田等, 2011; Lü *et al.*, 2013)、宽角反射/折射地震探测(徐涛等, 2014)以及天然地震体波接收函数(史大年等, 2012; Shi *et al.*, 2013)等研究所得结果均较为接近,可互相印证,这亦从侧面进一步证明了本文所得地壳密度结构模型的可信度。Moho 界面顶部的地壳平均密度值为 $2.91 \sim 2.93 \text{ g/cm}^3$ 左右;而 Moho 界面下方上地幔的密度值为 $3.25 \sim 3.27 \text{ g/cm}^3$,即在 Moho 界面的上下两侧密度差为 0.35 g/cm^3 左右。在剖面所经过的郟庐断裂带附近(千米号 $200 \pm 30 \text{ km}$ 范围内)地域下方的 Moho 界面呈明显下凹的形态,其埋深可达 35km 左右。在扬子地体内部宁芜矿集区(千米号 270~330km 范围内)下方的 Moho 界面形态在主体上呈轻微上隆形态。近垂直反射地震测深研究结果认为这样的 Moho 界面展布形态仅存在于北西-南东方向,并将矿集区下方 Moho 界面上隆的产生机制归结于基型或超基型岩浆上涌并在壳幔边界处与下地壳发生的底侵作用(吕庆田等, 2004; Lü *et al.*, 2013)。从本文依据该区重力探测数据所得到的地壳密度结构模型来看,在长江中下游地区存在岩浆底侵作用的解释是合理的,即在地壳底部 Moho 界面附近的底侵作用发生于矿集区下方,且与该区大规模矿产资源的形成与富集密切相关(图 4b、图 5)。

4.2 矿集区下方的地壳结构与深部成矿背景

宁芜矿集区作为长江中下游成矿带地域七个主要矿集区之一,其深部地壳的结构与介质参数亦存在其特有的性质。从利辛-宜兴综合地球物理探测剖面辖区的 2D 密度结构模型(图 4b)可见,在宁芜矿集区下方存在一低密度异常区。该异常区在沿测线方向的展布宽度约为 60~70km,在

上地壳浅部 5km 以上部分,其密度值与两侧地域在同一深度处的密度值相当,或略小;随着深度逐渐增加,该异常区的密度值比两侧地域约低 $0.02 \sim 0.03 \text{ g/cm}^3$,且 Moho 界面附近下地壳底部的地层界面亦呈现为向上轻微拱起的特征。此外,在宁芜矿集区 Moho 界面之下的上地幔盖层中,其地震波速度比剖面北西段部位的地震波速度低约 $0.1 \sim 0.15 \text{ km/s}$ (徐涛等, 2014),相应的岩石平均密度则比北西段地域低约 0.02 g/cm^3 (图 4b)。这样的岩石圈结构与物性特征暗示着在宁芜矿集区下方的深部物质发生了某种程度或形式的运移,其可能之一即为来自软流圈热物质的上涌导致在岩石圈底部的物质被加热弱化,从而引起所探测到的低速与低密度特征。

MASH(melting, assimilation, storage and homogenisation)成矿作用过程(王强等, 2001, 2002; 许继峰等, 2001; Xu *et al.*, 2002)可以较好地解释宁芜矿集区下方的异常地壳结构形态(史大年等, 2012)。来源于岩石圈拆沉与软流圈物质上涌产生的幔源玄武质熔融物侵入到壳幔边界附近的下地壳底部即形成底侵作用,这些岩浆与上覆的地壳物质之间通过 MASH 过程相互作用,并在地壳底部形成了高密度的熔融物质(Lü *et al.*, 2013),且经过 MASH 过程而形成的岩浆热液会在区域伸展体制下向相对压力较低的浅部运移。而在脆性的上地壳中,伸展背景的区域变形作用(张岳桥等, 2012)造成了张性断裂的形成与平均密度的降低,这为来源于深部的岩浆物质向上渗透运移提供了场所,决定了岩浆岩在地壳中分异、上升与侵位的形态,并因此形成了良好的成矿环境与浅部岩浆房(Lü *et al.*, 2013)。宁芜矿集区下方良好的区域伸展构造背景和断层分布为深层岩浆热液的上升提供了良好的通道,这不仅有利于其在垂向上的向上运移,亦为其在浅部地壳内沿着断层通道和构造方向的水平运移创造了条件,并因此形成了宁芜矿集区众多的火山岩分布和矿产资源聚集(图 5)。

5 结论

本文利用沿 NW-SE 方向跨越长江中下游成矿带地域的利辛-宜兴地球物理探测剖面沿线的重力测量数据,以沿同一剖面的人工源宽角反射/折射地震探测结果为基本依据构建了地壳的初始密度模型,并在人工源近垂直反射地震探测和天然源地震接收函数研究结果的约束下,通过正、反演拟合得到了剖面辖区深部地壳的 2D 密度结构模型。这一研究结果表明在长江中下游成矿带及其南北两侧地域的地壳密度结构存在着显著差异。剖面下方的 Moho 界面呈宽缓的波浪状起伏形态, Moho 界面的埋藏深度约在 30~35km 之间。剖面辖区的地壳密度模型中存在两处规模较大的低密度区,其一为郟庐断裂带北西侧与固镇-怀远断裂带之间地域,该低密度区规模较大,可贯穿整个地壳,且在郟庐断裂下方的 Moho 界面深度最深可达 35km;而宁芜矿集区下方则存在剖

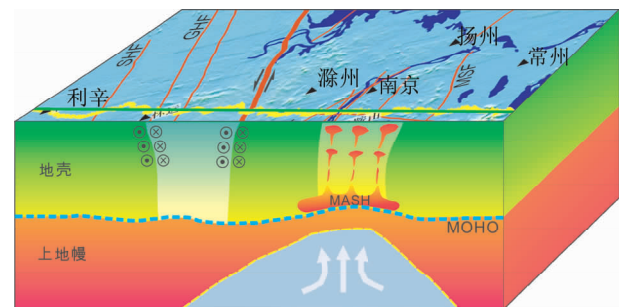


图 5 长江中下游地区深部动力学过程与成矿背景示意图

Fig. 5 Cartoon to illustrate the deep geodynamic process and the mechanism for the formation of the metallogenic belt in the Middle-Lower Yangtze area

面辖区的另一处低密度异常区,且在该地域下方的 Moho 界面上呈隆形态,推测应是岩浆底侵与 MASH 成矿作用的源区。在参考了研究区已有其他地球物理研究成果的基础上,本文亦从所得到的 2D 地壳密度结构模型出发,对长江中下游成矿带的深层动力学过程与区域成矿背景进行了探讨,并认为本文所得研究结果支持岩浆底侵与 MASH 成矿过程。

以上仅为作者根据本研究区的重力场资料进行的一些初步分析与探讨,更深入的认识尚有待更多资料的积累和多种方法的综合研究与分析。

致谢 感谢史大年研究员为本文提出的许多宝贵意见并提供了天然地震接收函数研究的成果资料;感谢各位评审专家对本文的认真评阅并提出许多有价值的修改意见及建议。并对参加本研究所用数据野外采集和后期处理工作的同志们致以诚挚的感谢。

References

- Brocher TM. 2005. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(6): 2081–2092
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1–379 (in Chinese)
- Christensen NI and Mooney WD. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6): 9761–9788
- Dong SW, Wu XH, Wu ZH, Deng JF, Gao R and Wang CS. 2000. On tectonic seesawing of the East Asia continent: Global implication of the Yanshanian Movement. *Geological Review*, 46(1): 8–13 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Wang T, Hu JM and Chen XH. 2008. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the “Yanshan Movement”. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 334–347
- Dong SW, Li TD, Zhong DL, Sha JG and Chen XH. 2009. Recent progress and perspective of the research on J-K East Asian multi-direction convergent tectonics. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 23(5): 281–286 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Li TD, Lü QT, Gao R, Yang JS, Chen XH, Wei WB, Zhou Q and SinoProbe team. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe. *Tectonophysics*, 606: 1–13, doi: 10.1016/j.tecto.2013.05.038.
- Feng R, Tan HF and Zhang RS. 1986. Fast inverse method of 3D potential field and the program design. *Acta Geologica Sinica*, (4): 390–402 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Pan XF, Yang ZM and Qu XM. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits not related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings. *Geoscience*, 21(2): 332–351 (in Chinese with English abstract)
- Jiang GM, Zhang GB, Lü QT, Shi DN and Xu Y. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics. *Tectonophysics*, 606: 36–47, doi: 10.1016/j.tecto.2013.03.026.
- Jiang GM, Zhang GB, Lü QT, Shi DN and Xu Y. 2014. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 907–917 (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- Kuang SP, Ling WL and Zhang BR. 1999. Discussions on mafic-ultramafic rocks and eclogites in Dabie orogen, central China. *Geological Review*, 45(6): 584–595 (in Chinese with English abstract)
- Liang F, Lü QT, Yan JY and Liu ZD. 2014. Deep structure of Ningwu volcanic basin in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River: Insights from reflection seismic data. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 941–956 (in Chinese with English abstract)
- Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB, Zartman RE, Yang XY and Sun W. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River belt, eastern China. *Economic Geology*, 104(2): 303–321
- Lü QT, Hou ZQ, Zhao JH, Shi DN, Wu XZ, Chang YF, Pei RF, Huang DD and Kuang CY. 2004. Deep seismic reflection profiling reveals complex crustal structure of Tongling ore district. *Science in China (Series D)*, 47(3): 193–200
- Lü QT, Yang ZS, Yan JY and Xu WY. 2007. The metallogenic potential, prospecting idea and primary attempt in depth of the ore belt of the Middle and Lower Reach of the Yangtze River: A case study of Tongling ore district. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 865–881 (in Chinese with English abstract)
- Lü QT, Shi DN, Tang JT, Wu MA, Chang YF and SinoProbe-03-CJ team. 2011. Probing on deep structure of Middle and Lower Reaches of the Yangtze metallogenic belt and typical ore concentration area: A review of annual progress of SinoProbe-03. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(3): 257–268 (in Chinese with English abstract)
- Lü QT, Yan JY, Shi DN, Dong SW, Tang JT, Wu MA and Chang YF. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Yangtze Metallogenic Belt: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district. *Tectonophysics*, 606: 60–77, doi: 10.1016/j.tecto.2013.04.006.
- Lü QT, Dong SW, Shi DN, Tang JT, Jiang GM, Zhang YQ, Xu T and SinoProbe-03-CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of the Middle and Lower Reaches of Yangtze metallogenic belt: A review from SinoProbe. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 889–906 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig, WJ, Nafe JE and Drake CL. 1970. Seismic refraction. In: Maxwell AE (ed.). *The Sea*, Vol. 4. New York: Wiley-Interscience, 53–84
- Ma XY. 1989. *Lithospheric Dynamics Atlas of China*. Beijing: China Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 29(3–4): 307–324
- Qi G, Lü QT, Yan JY, Wu MA, Deng Z, Guo D, Shao LS, Chen YJ, Liang F and Zhang S. 2014. 3D geological modeling of Luzong ore district based on priori geological information. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): in press (in Chinese with English abstract)
- Qiang JK, Wang XY, Tang JT, Pan W and Zhang QJ. 2014. The geological structure along Huainan-Liyang magnetotelluric profile: Constraints from MT data. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 957–965 (in Chinese with English abstract)
- Ren JS. 1994. The continental tectonics of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 15(3–4): 5–13 (in Chinese with English abstract)
- Shi DN, Lü QT, Xu WY, Yan JY, Zhao JH, Dong SW and Chang YF. 2012. Crustal structure beneath the Mid-Lower Yangtze metallogenic belt and its adjacent regions in Eastern China: Evidences from P-wave receiver function imaging for a MASH metallization process? *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 389–399 (in Chinese with English abstract)
- Shi DN, Lü QT, Xu WY, Yan JY, Zhao JH, Dong SW, Chang YF and SinoProbe-03-02 Team. 2013. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. *Tectonophysics*, 606: 48–59, doi: 10.1016/j.tecto.2013.03.026.

- tecto. 2013. 01. 012.
- Sun WD, Xie Z, Chen JF, Zhang X, Chai ZF, Du AD, Zhao JS, Zhang CH and Zhou TF. 2003. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China. *Economic Geology*, 98(1): 175 - 180
- Teng JW, Sun KZ, Xiong SB, Yao H, Yin ZX, Cheng LF, Xue CS, Tian DS, Hao TY, Lai MH and Wu MC. 1985. Explosion seismological study for velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Maanshan to Qidong of the southern parts of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 28(2): 155 - 169 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yang LQ, Yao JJ, Liu HC, Liu C, Han LG and Zhang XM. 2007. Deep discover ore exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation. *Progress in Geophysics*, 22(2): 317 - 334 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Yang LQ, Liu HC, Yan YF, Yang H, Zhang HS, Zhang YQ and Tian Y. 2009. Geodynamical responses for formation and concentration of metallic minerals in the second deep space of lithosphere. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(7): 1734 - 1756 (in Chinese with English abstract)
- Wang JW, Li RH, Hu KY, Zhang JS and Liao SZ. 2010. Basic physical features of regional rocks in Anhui Province. *Geology of Anhui*, 20(2): 112 - 116 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplating basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakite sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353 - 362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Li XH, Xiong XL, Bao ZW and Liu YM. 2002. The Adakite-like rocks and mineralization in the eastern part of Yangtze block during the Yanshan Period. *Science in China (Series D)*, 32(Suppl. 1): 127 - 136 (in Chinese)
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Bao ZW, Xu W and Xiong XL. 2004. Cretaceous highpotassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of East China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38(5): 417 - 434
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3-4): 424 - 446
- Xu JF, Wang Q, Xu YG, Zhao ZH and Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576 - 584 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111 - 1114
- Xu T, Zhang ZJ, Tian XB, Liu BF, Bai ZM, Lü QT and Teng JW. 2014. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from an active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 918 - 930 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Ji SC, Zhang ZM, Li HB, Liu FL, Zhang JX, Wu CL, Li ZH and Liang FH. 2010. On the continental tectonics and dynamics of China. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 1 - 29 (in Chinese with English abstract)
- Yan JY, Lü QT, Chen XB, Qi G, Liu Y, Guo D and Chen YJ. 2014. 3D lithologic mapping test based on 3D inversion of gravity and magnetic data: A case study in Luzong ore district, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1041 - 1053 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Nie SY. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801 - 813
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211 - 280
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488(1-4): 293 - 325
- Zhang CH, Chai YC, Song HL and Wu ZW. 1998. The role of extensional tectonics in the exhumation of high- and ultrahigh-pressure rocks in northern Jiangsu and southeastern Shandong. *Geological Review*, 44(3): 225 - 232 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Cheng SY, Guo AL, Dong YP, Lai SC and Yao AP. 2004. Mianlue paleo suture on the southern margin of the Cretal Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 846 - 853 (in Chinese with English abstract)
- Zhang K, Yan JY, Lü QT, Wei WB, Shao LS, Wang HF and Yang ZW. 2014. The crust-mantle conductivity structure of the Nanjing (Ning)-Wuhu (Wu) in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River: Broadband magnetotelluric sounding research. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 966 - 978 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 - 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu W and Wang YL. 2002. Adakite: Its characteristics and implications. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431 - 435 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Dong SW, Li JH, Cui JJ, Su JB and Li Y. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257 - 279 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Teng JW, Wang QS and Hu GZ. 2013. Density structure and isostatic state of the crust in the Longmenshan and adjacent areas. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2013.08.018

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1 - 379
- 董树文, 李廷栋, 钟大赉, 王成善, 沙金庚, 陈宣华. 2009. 侏罗纪、白垩纪之交东亚板块汇聚的研究进展和展望. *中国科学基金*, 23(5): 281 - 286
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造突变——燕山运动的全球意义. *地质论评*, 46(1): 8 - 13
- 冯锐, 严惠芬, 张若水. 1986. 三维位场的快速反演方法及程序设计. *地质学报*, (4): 390 - 402
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. *现代地质*, 21(2): 332 - 351
- 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 史大年, 徐晓. 2014. 长江中下游地区成矿深部动力学机制: 远震层析成像证据. *岩石学报*, 30(4): 907 - 917
- 匡少平, 凌文黎, 张本仁. 1999. 大别造山带中镁铁质-超镁铁质岩石和榴辉岩有关问题的讨论. *地质论评*, 45(6): 584 - 595
- 梁锋, 吕庆田, 严加永, 刘振东. 2014. 长江中下游宁芜火山岩盆地深部结构特征——来自反射地震的认识. *岩石学报*, 30(4): 941 - 956
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束. *中国科学(D*

- 辑), 34(9): 783-794
- 吕庆田, 杨竹森, 严加永, 徐文艺. 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. 地质学报, 81(7): 865-881
- 吕庆田, 史大年, 汤井田, 吴明安, 常印佛, SinoProbe-03-CJ 项目组. 2011. 长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测——SinoProbe-03 年度进展综述. 地球学报, 32(3): 257-268
- 吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛, SinoProbe-03-CJ 项目组. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述. 岩石学报, 30(4): 889-906
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社
- 祁光, 吕庆田, 严加永, 吴明安, 邓震, 郭冬, 邵陆森, 陈应军, 梁锋, 张舒. 2014. 基于先验信息约束的三维地质建模: 以庐枞矿集区为例. 地质学报, 88(4): 出版中
- 强建科, 王显莹, 汤井田, 潘伟, 张钱江. 2014. 淮南-溧阳大地电磁剖面与地质结构分析. 岩石学报, 30(4): 957-965
- 任纪舜. 1994. 中国大陆的组成、结构、演化和动力学. 地球学报, 15(3-4): 5-13
- 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 严加永, 赵金花, 董树文, 常印佛. 2012. 长江中下游成矿带及邻区地壳结构——MASH 成矿过程的 P 波接收函数成像证据? 地质学报, 86(3): 389-399
- 滕吉文, 孙克忠, 熊绍柏, 姚虹, 尹周勋, 程立芳, 薛长顺, 田东生, 郝天珧, 赖明惠, 伍明储. 1985. 中国东部马鞍山-常熟-启东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究. 地球物理学报, 28(2): 155-169
- 滕吉文, 杨立强, 姚敬金, 刘宏臣, 刘财, 韩立国, 张雪梅. 2007. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程. 地球物理学进展, 22(2): 317-334
- 滕吉文, 杨立强, 刘洪臣, 闫亚芬, 杨辉, 张洪双, 张永谦, 田有. 2009. 岩石圈内部第二深度空间金属矿产资源形成与集聚的深层动力学响应. 地球物理学报, 52(7): 1734-1756
- 王建伟, 李仁和, 胡开勇, 张劲松, 廖圣柱. 2010. 安徽省区域岩石物性基本特征. 安徽地质, 20(2): 112-116
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001. 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, 30(4): 353-362
- 王强, 赵振华, 许继锋, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿. 中国科学(D 辑), 32(增刊): 127-136
- 徐涛, 张忠杰, 田小波, 刘宝峰, 白志明, 吕庆田, 滕吉文. 2014. 长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构: 来自利辛-宜兴宽角地震资料的约束. 岩石学报, 30(4): 918-930
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. 岩石学报, 17(4): 576-584
- 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 张泽明, 李海兵, 刘福来, 张建新, 吴才来, 李忠海, 梁风华. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报, 84(1): 1-29
- 严加永, 吕庆田, 陈向斌, 祁光, 刘彦, 郭冬, 陈应军. 2014. 基于重磁反演的三维岩性填图试验——以安徽庐枞矿集区为例. 岩石学报, 30(4): 1041-1053
- 张长厚, 柴育成, 宋鸿林, 吴正文. 1998. 苏北-鲁东南高压、超高压变质带剥露过程中伸展构造作用. 地质论评, 44(3): 225-232
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23(9): 845-853
- 张昆, 严加永, 吕庆田, 魏文博, 邵陆森, 王华峰, 杨振威. 2014. 长江中下游南京(宁)-芜湖(芜)段深部壳幔电性结构——宽频大地电磁测深研究. 岩石学报, 30(4): 966-978
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 21(7): 431-435
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257-279