

doi: 10.12029/gc20190407

罗凡, 严加永, 付光明, 王昊, 陶鑫, 罗磊. 2019. 华南地区地壳厚度变化及对成矿类型的制约: 来自卫星重力数据的约束[J]. 中国地质, 46(4): 759-774.

Luo Fan, Yan Jiayong, Fu Guangming, Wang Hao, Tao Xin, Luo Lei. 2019. Crust thickness and its apocalyptic of mineralization in South China: Constraint from Satellite Gravity data [J]. *Geology in China*, 46(4): 759-774(in Chinese with English abstract).

华南地区地壳厚度变化及对成矿类型的制约： 来自卫星重力数据的约束

罗凡^{1,2,3}, 严加永^{2,3}, 付光明^{1,2,3}, 王昊^{2,3}, 陶鑫^{1,2,3}, 罗磊^{1,2,3}

(1. 东华理工大学地球物理与测控技术学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;
3. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要: 华南地区是中国金属矿产资源的“大粮仓”, 分布有多个多金属成矿带。多金属成矿带的形成常伴随着地下特殊的深部背景和过程, 通过莫霍面深度的计算, 对华南地区的地壳厚薄变化所反映的壳幔耦合关系进行研究, 可为探索华南地区地下巨量金属资源的形成与演变过程提供参考。本文首先基于球坐标的重力解算方法对高阶卫星重力场模型 EIGEN-6C4 的数据进行校正, 得到华南地区的卫星布格重力异常。然后采用改进的 Parker-Oldenburg 方法进行变密度界面反演, 获得华南地区莫霍面起伏特征。最后结合区内不同成矿带的范围和前人发表的地质、地球化学等资料, 探讨华南地区不同成矿带的成矿物质来源与莫霍面起伏的关系。认为长江中下游和钦杭东段处于莫霍面隆起区域的成矿带, 幔源物质对其成矿作用起主导地位, 形成以铜、铁为主的多金属矿床; 南岭、武夷、钦杭西段及鄂西-湘西位于莫霍面隆-陷交替区域的成矿带, 成矿与壳、幔源物质的相互作用密切相关, 最终形成钨、锡、金、银、铅锌等多金属矿床。

关键词: 卫星重力数据; 球面重力校正; 变密度界面反演; 莫霍面深度; 华南地区
中图分类号: P631.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)04-759-16

Crust thickness and its apocalyptic of mineralization in South China: Constraint from Satellite Gravity data

LUO Fan^{1,2,3}, YAN Jiayong^{2,3}, FU Guangming^{1,2,3}, WANG Hao^{2,3}, TAO Xin^{1,2,3}, LUO Lei^{1,2,3}

(1. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China Deep Exploration Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Mineral resources in South China are abundant with the distribution of multiple polymetallic metallogenic belts. The formation of polymetallic metallogenic belts was often accompanied by a special deep background and the underground process.

收稿日期: 2018-12-16; 改回日期: 2019-05-20

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160082, DD20190012)、国家自然科学基金项目(41574133, 41630320)、国家重点研发计划(2016YFC0600201)及中国地质科学院基本科研业务费专项经费(YYWF201526) 联合资助。

作者简介: 罗凡, 男, 1994年生, 博士生, 从事勘探地球物理研究; E-mail: 272163111@qq.com。

通讯作者: 严加永, 男, 1977年生, 博士, 教授级高级工程师, 从事矿产资源勘查和深部探测研究; E-mail: yanjy@163.com。

Studying the crust–mantle coupling relationship reflected by the crustal thickness based on the Moho depth calculation can provide a reference for exploring the formation and evolution of underground massive metal resources in South China. In this paper, the data of high–order satellite gravity field model EIGEN–6C4 was corrected based on the gravity calculation method of spherical coordinates, and the satellite Bouguer gravity anomaly was obtained in South China. Then the modified Parker–Oldenburg method was used to perform the variable density interface inversion, and the characteristics of the Moho surface in South China were revealed. Finally, based on the ranges of different metallogenic belts in the area and the geological and geochemical data available, the authors investigated the relationship between the source of ore–forming materials and the formation mechanism of Moho surface undulations in different metallogenic belts in the study area. It is estimated that the middle and lower reaches of the Yangtze River and the eastern part of the Qinhang area are located in the metallogenic belt of the Moho surface uplift area. In addition, mantle source materials played a dominant role in its metallogenesis, forming a polymetallic deposit mainly composed of copper and iron. The Nanling, Wuyi, western section of Qinhang and western Hubei–Xiangxi are located in the metallogenic belt of the Moho facet–occlusion zone. The ore–forming process was closely linked to the interaction of the shell and mantle source, forming tungsten, tin, gold and silver, lead and zinc and other polymetallic deposits.

Key words: satellite gravity data; spherical gravity correction; variable density interface inversion; Moho depth; South China

About the first author: LUO Fan, male, born in 1994, doctor candidate, mainly engages in the study of exploration geophysics; E–mail: 272163111@qq.com.

About the corresponding author: YAN Jiayong, male, born in 1977, doctor, mainly engages in mineral resources exploration and deep exploration research; E–mail: yanjy@163.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Project (No. DD20160082, DD20190012); National Natural Science Foundation of China (No. 41574133, 41630320); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600201); Special Funds for Basic Scientific Research Operating Costs of the Chinese Academy of Geological Sciences (No. YYWF201526).

1 引 言

华南地区的地质现象特殊,矿产资源极为丰富,区内分布有多个多金属成矿带,是中国有色金属、黑色金属、贵金属等矿产资源的重要产地。资源富集区域的形成大多是地球深部巨量物质和能量聚集综合作用的结果,主要受地球深部动力系统所控制。要查明华南地区巨量资源形成与演变的根本原因,也即成矿系统中的“源区”,需要开展地壳深部结构探测。

区域重力资料解译一直是探测地球深部物质组成和结构的重要手段之一,通过地面、航空重力方法获取的区域重磁资料可有效揭示地下深部岩体、界面的空间分布情况,如Barberie et al.(1994)根据重、磁、火山学数据,获得Eolian arc地区的深部结构;Kadima et al.(2011)通过重、磁、震数据,对刚果盆地的深部结构和地质演化历史进行研究;骆迪等(2014)对中国东北部海域的1:100万重磁震资料进行解译,获得了研究区的火成岩分布特征及深部的构造形态;刘薇等(2018)基于重力和航磁资料对川西高原的深部孕震环境进行研究。自从

CHAMP、GRACE、GOCE 三颗位场卫星发射以来,卫星重力数据的精度和分辨率得到大幅提升,国内外众多的专家学者依托卫星重力数据对地球内部的圈层构造、地质界面等深部信息进行获取。黄宗理等(2016)和徐翰等(2016)对卫星重力数据与地面重力数据的对比试验表明,卫星重力数据解算出的布格重力异常精度相当于地面观测1:50万比例尺的布格重力异常。王万银等(2004)采用卫星重力、测高数据解算校正获得的布格重力异常数据,进行界面反演获得研究区内地下各圈层的厚度情况,然后再结合其他的地质、地球物理资料,对圈层厚度变化特征进行探讨,揭示了研究区深部的构造动力学状态。Oscar et al.(2014)通过卫星重力数据资料获取美洲中部的岩石圈三维模型及莫霍面结构变化情况。Young et al.(2015)根据GOCE卫星重力数据获得西藏地区的莫霍面起伏特征,对西藏地区的深部挤压构造过程进行研究。杨文采等(2016)应用小波多尺度分析方法对卫星重力资料进行提取和反演,获得中国及邻区的地壳密度结构。Steffen et al.(2017)对全球重力场模型EIGEN–6C4的重力数据进行重力校正和密度界面反演后,

得到了格陵兰岛的莫霍面分布特征。

根据上述关于国内外卫星重力数据的研究应用实例表明通过对卫星重力资料的解译及反演,可获取地球深部的结构及动力学状态等各种信息。

目前,对于华南地区深部成矿的各种认识大多是依据地表出露岩石和地质现象证据进行推理预测,缺乏深部地球物理证据证明。为了解华南地壳厚度的变化特征及其对矿产资源形成的深部制约,本文使用EIGEN-6C4的卫星重力资料对华南地区开展地球物理深部调查,查明研究区的莫霍面形态分布特征,再结合地质、地球化学等已知资料,对华南地区不同成矿带的资源富集和演变的深部原因进行分带探讨。

2 区域地质背景

华南板块整体处于太平洋、欧亚、印支三大板块的拼接位置,经历了新元古代、早古生代、中生代等多期复杂的构造演化运动,造就了华南地区现今构造的多样性和深部情况的复杂性(陈毓川等,2012)。华南板块的主体由扬子、华夏地块及中间的江南造山带三部分构成,其中扬子地块的北、西方向分别与华北板块、青藏高原东缘相邻;华夏地块东邻太平洋板块,南接印支板块(图1)。

根据岩浆、沉积、变质等不同作用发育的类型,可将华南地区的构造演化过程大致划分为6个构造时段(陈毓川等,2012):(1)新元古代早期,在扬子、

华夏地块拼合之前,两地块受到火山-沉积作用影响,尤以海相双峰式火山作用为块状硫化物矿床形成创造了条件。(2)新元古代早期末,扬子与华夏两地块进行拼合,形成板块缝合带,造成了强烈的造山作用。(3)从新元古代晚期至寒武纪,大部分区域广泛的发生陆缘沉积,局部发生火山沉积,形成了Ni-Mo-V-P-U五元素组合为特点的沉积型矿产。(4)早古生代时期,武夷-云开成矿带强烈的岩浆活动和区域性的变质作用,导致基底的岩石通过混合岩化形成再生岩浆岩。(5)晚古生代-早中生代时期,在陆缘和陆内拗陷带区域中受到沉积成矿作用,形成众多的沉积型矿床。(6)晚三叠世以来,印支-燕山期的造山运动剧烈,在构造-岩浆-成矿作用下由壳幔不同成矿物质来源形成丰富多样的矿产资源。

中生代时期,华南地区受到强烈而广泛的岩浆成矿作用,形成了长江中下游成矿带、南岭成矿带、钦杭成矿带以及武夷山成矿带等多个矿床成矿系列(徐志刚等,2008)。不同的矿床成矿系列对应不同的成矿构造背景,根据徐志刚、陈毓川等对华南地区构造-岩浆带和代表性矿床的研究表明(陈毓川等,2012,2014):(1)长江中下游成矿带的形成与燕山期中基性-中酸性壳幔源的火山-侵入岩密切相关,形成了铁、铜、金、铅锌等多金属矿床,其成矿的构造背景与长江深大断裂带有关。(2)南岭成矿带的形成与燕山期花岗岩有关,形成了有色、稀土、铀矿等矿床,其构造环境为叠加在加里东期褶皱基底上的中生代构造活化区。(3)钦杭成矿带东段的形成与长江中下游成矿带的形成类似,均与燕山期的中酸性火山-侵入岩有关,在此时期形成了铜、铅锌、金、银等多金属矿床,其成矿构造背景为扬子陆块与华南造山带之间的赣东北断裂带。(4)武夷山成矿带的形成与印支-燕山期的混合花岗岩、花岗岩有关,在此区域形成铌、钽、锡、金、银等多金属矿床,其成矿的构造背景为华南造山带中的构造变质带。

3 卫星重力及测高数据选取

国内外的各大研究机构(如德国地学中心:GFZ,国际重力场模型:ICGEM,欧洲航空局:ESA等)以三大专业重力卫星CHAMP、GRACE及GOCE获取的海量卫星重力数据为基础,结合常规

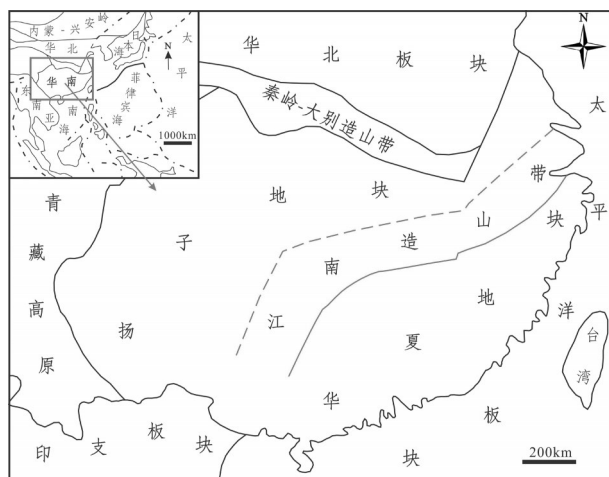


图1 华南基本构造格局(据舒良树,2012修改)
Fig.1 Basic geotectonic framework map of South China
(after Shu,2012)

测量方式的重力数据,建立了EIGEN、GGM及EGM等不同系列的地球重力场模型。

不同的地球重力场模型采用的数据来源不同,产生的重力数据的异常精度和空间分辨率亦不一样。根据球谐理论,球谐展开次数越高,数据的异常精度和分辨率越高。为选取重力异常精度和空间分辨率高的地球重力场模型的重力数据,对GFZ公开发布的超高阶(>1000阶)地球重力场模型的重力异常精度和空间分辨率进行对比(万晓云等,2017)。如表1所示,综合重力异常精度、空间分辨率、研究区大小及计算效率问题,本文选取高阶重力场模型EIGEN-6C4中重力观测数据(图2)和全球数字地形模型ETOPO1的地形高程数据(图3)作为解算卫星布格重力异常的数据。

罗凡等(2019)通过球坐标方法解算的卫星布格重力异常与地面实测的布格重力异常进行对比的试验表明,卫星布格重力异常的精度与地面实测1:50万的布格重力异常相当,适用于大尺度区域的研究。

4 基于球坐标的卫星重力解算

卫星重力观测数据是通过专业重力卫星的飞行轨道参数换算而来。卫星的飞行轨道高度面总是比地球表面要高,导致了在零或负高程观测面上的所获得的布格重力异常的地球物理意义不明确,故在对卫星重力数据进行地形校正的过程中需要将校正的基准面设置为大于地球表面的高度(杜劲松等,2012)。卫星重力数据的观测面可近似为同

表1 超高阶重力场模型的重力异常精度及空间分辨率

Table 1 Gravity anomaly accuracy and spatial resolution of ultra-high-order gravity field model

地球重力场模型	EGM08	EG-6C	EG-6C2	EG-6C3	EG-6C4	GECO
重力异常精度/(10^{-5}m/s^2)	9.03	5.86	5.63	4.29	2.73	8.41
空间分辨率/km	9	14	10	10	9	9

注:EG代表EIGEN。

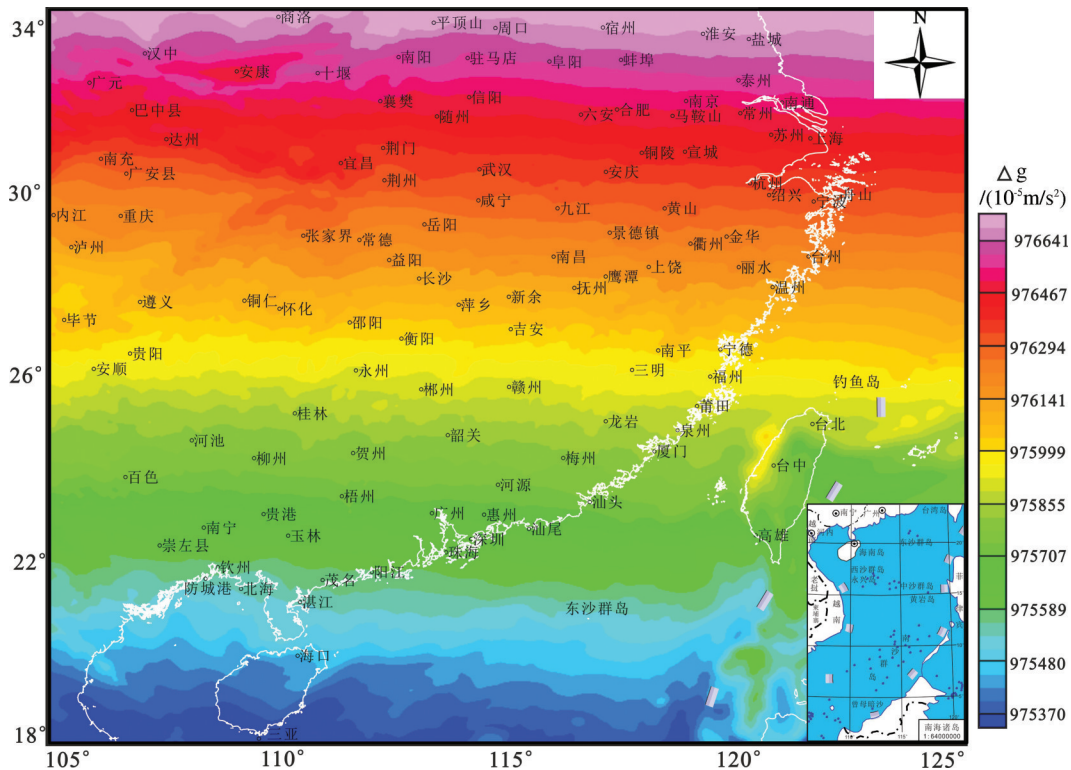


图2 原始卫星重力数据图

Fig.2 Satellite gravity raw data map

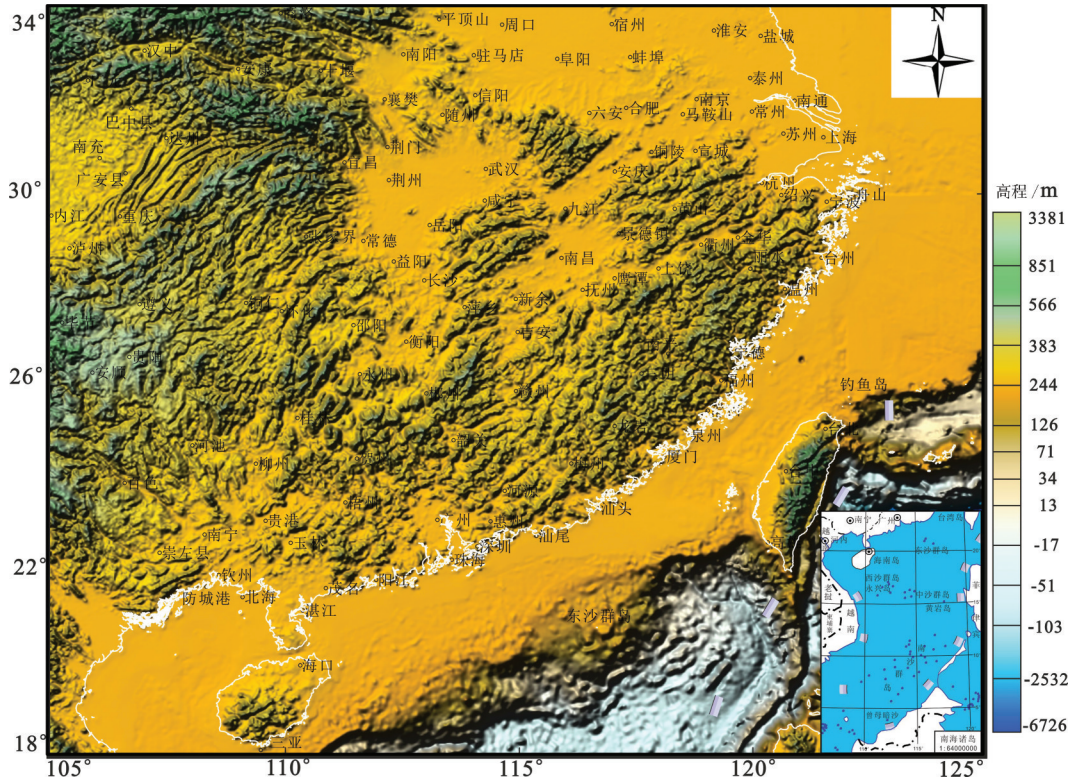


图3 华南地区地形图
Fig.3 Digital elevation model of South China

一个观测面,测点高度均可视为一致,根据中间层校正定义可知,在解算过程中可省略中间层校正。

为研究华南地区的深部情况,对华南地区(经度 105°~125°,纬度 18°~34°)的卫星重力、地形数据选取范围均为向外扩边 1°的数据,即经度 104°~126°,纬度 17°~35°范围内的重力数据进行校正。卫星重力数据校正由高度校正、正常场校正和球面地形校正三部分组成。

(1) 高度校正的重力计算公式(励宝恒, 1996)为:

$$\Delta g_h = 3.086H - 7.2 \times 10^{-7} H^2 \quad (1)$$

其中 H 单位为 m 。

(2) 在正常场校正过程中,将地球视为一个匀质椭球体,其重力异常的计算公式(郝晓光, 1996)为:

$$\Delta g_n = \frac{ag_e \cos^2 B + bg_p \sin^2 B}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} \quad (2)$$

其中, g_e 为赤道重力, g_p 为极点重力, B 为椭球地理纬度。

(3) 球面地形校正

球面地形校正将地球的椭球体近似为一个球体进行计算,计算观测点周围的起伏地形变化对该点的重力影响值。地形模型采用精度高、误差小、与地面地形吻合度高的经纬球面柱体(Tesseroïd)模型来计算地形重力影响值(Heck, 2007)。

对于大尺度区域重力解算研究,一般都包含陆域和海域两大区域,在进行球面地形校正过程中,将陆地区域的地形校正密度参数设置为 2670 kg/m^3 ,海洋区域的地形校正密度参数设置为 -1630 kg/m^3 (海水密度为 1040 kg/m^3 ,地壳密度为 2670 kg/m^3)。

计算点 $P=(r, \varphi, \lambda)$ 上单个经纬球面柱体模型所产生的引力场的计算公式(Grombein et al., 2013)为:

$$g_a(r, \varphi, \lambda) = G\rho \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{r'^2 \cos \varphi'}{l} dr' d\varphi' d\lambda' \quad (3)$$

其中的 $\alpha \in \{x, y, z\}$, ρ 为密度, G 为万有引力常量, φ 为纬度, λ 为经度, r 代表半径, l 为 Tesseroid 单元体的几何中心到计算点距离。

使用高斯勒让德函数积分公式(Asgharzadeh et al., 2007)对 Tesseroid 体进行累加求和计算地球表

面物质对观测点的重力响应值的公式如下所示：

$$\Delta g_r = \iiint_{\Omega} f(r', \lambda', \varphi') d\Omega \approx A \sum_{i=1}^{N^r} \sum_{j=1}^{N^\varphi} \sum_{k=1}^{N^\lambda} W_i^r W_j^\varphi W_k^\lambda f(r_i, \varphi_j, \lambda_k) \quad (4)$$

$$\text{其中: } A = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(\varphi_2 - \varphi_1)(r_2 - r_1)}{8} \quad (5)$$

公式4中 $W_i^r, W_j^\varphi, W_k^\lambda$ 代表观测点不同方向的权重系数; $N^r, N^\varphi, N^\lambda$ 代表观测点不同方向的积分节点数量。

卫星重力数据经过后系列校正后得到布格重力异常,其表达式为:

$$\Delta g_{Bg} = \Delta g_{gravity} - \Delta g_h - \Delta g_n - \Delta g_t \quad (6)$$

其中, Δg_{Bg} 为布格重力异常, $\Delta g_{gravity}$ 为实际观测的重力值, Δg_h 为高度校正值, Δg_n 为正常场校正值, Δg_t 为球面地形校正值。

卫星重力观测值经系列校正后获得的卫星布格重力异常(图4),华南地区的布格重力异常整体上呈现北东方向展布,范围为 $-243 \times 10^{-5} \sim 402 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,布格重力异常分布的总趋势为东南高、西北低两部分。图4中的东南角部分为我国东海区域,呈现

高值正异常区,范围为 $-13 \times 10^{-5} \sim 402 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;由东南角往西北角方向,异常逐渐从高值慢慢降低,华南地区异常幅值范围为 $-25 \times 10^{-5} \sim -243 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。从华南地区的布格重力异常图(图4)与地形图(图3)对比发现,地形值越大,布格重力异常值越小,布格重力异常与地形呈现近似的镜像关系,表明华南地区的地壳已达到较好的均衡状态。

5 变密度莫霍面深度反演

莫霍面不仅是下地壳与上地幔之间的分界面,更是壳幔物质交换和能量交换的动力界面,随着能量的不断变化而变化(滕吉文,2006),研究莫霍面的起伏变化对于认识地壳、地幔的形成演化规律及地球深部的动力学过程具有指导意义。变密度界面反演是对界面上、下介质之间的密度差进行反演,即将地下场源体均匀划分成规则可拼接的离散区域,给每个离散区域赋予一个密度差常数值,通过重力异常的计算公式及研究区的重力资料,求得研究区的密度界面分布特征。

布格重力异常数据中不仅包含莫霍面的重力

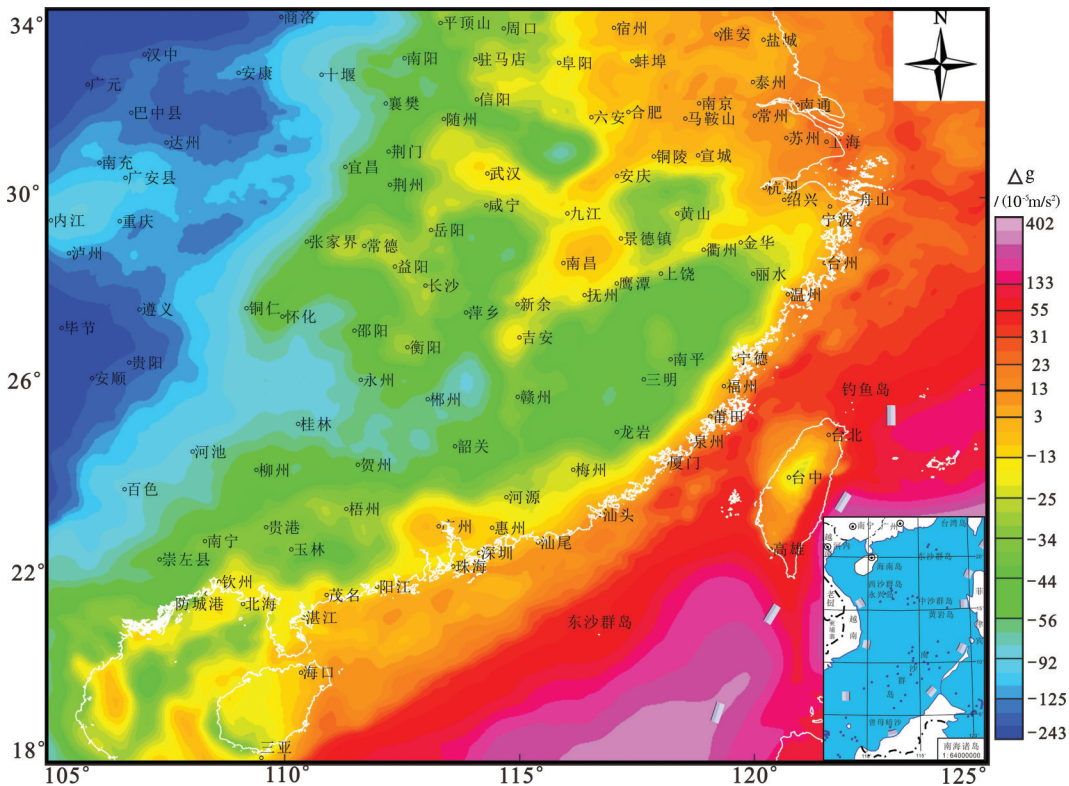


图4 基于球坐标解算的华南地区卫星布格重力异常图
Fig.4 Satellite Bouguer gravity anomaly in South China based on spherical coordinate solution

影响值,还包含地壳沉积层的影响值。在进行莫霍面的密度界面反演之前,需将地壳沉积层的重力影响值去除。根据全球地壳模型 Crust1.0 (Laske et al., 2013) 中的沉积层厚度和密度数据信息采用的经纬球面柱体重力计算公式可获得沉积层的正演响应,在布格重力异常数据中去除地壳沉积层的重力影响,求得华南地区仅反映莫霍面变化的卫星布格重力异常数据(图5)进行密度界面反演。

变密度界面反演的基础公式为 Parker-Oldenburg 公式。Parker (1972) 给出频率域内计算二维连续密度界面 $h(x,y)$ 在地表 z 平面内产生的重力异常公式:

$$F[\Delta g(r_0)] = -2\pi G \rho e^{-\left|\frac{\rho}{k}\right|z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left|\frac{\rho}{k}\right|^{n-1} \frac{1}{n!} F[\rho^{(r)} h^n(r)] \quad (7)$$

其中, Δg 为重力异常, $F[\cdot]$ 为对括号内的相应量的二维傅里叶变换, $F[\Delta g]$ 为重力异常谱, r_0 为观测点的空间矢量, k 为波数场的模值, G 为万有引力常数 $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}$, $\rho^{(r)}$ 为物质层的二维密度分布, ρ 为界面上下密度差, Z_0 为密度界面平均深度(参考地震

测深结果反映界面平均深度), h 为界面起伏值, ρ 为扰动源(计算点)坐标在 xy 平面的投影。

Oldenburg (1974) 根据 Parker 公式(7)的傅里叶级数展开, 提取出第一项, 得到密度界面反演的迭代形式:

$$F[h] = \frac{F[\Delta g] e^{k|z_0}}{2\pi G \rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} F[h(r)^n] \quad (8)$$

公式(8)中包含向下延拓因子 $e^{k|z_0}$, 将导致重力场高频分量的大大提高而损害反演收敛的稳定性。为提高反演计算的稳定性, 冯锐等(1986)对 Oldenburg 的迭代递推公式做出部分修改, 将反演界面的初值设置如公式(9)和(10)所示, 使用平移上界面和递推下界面修正量方法进行反演迭代计算。

$$H^{(1)}(\rho) = 0 \quad (9)$$

$$F[H^{(1)}(\rho)] = -\zeta \frac{F[\Delta g]}{2\pi G \rho} e^{kz_0^{(0)}} \quad (10)$$

公式(10)中的 ζ 是小于1的分配系数(一般设置 $\zeta=0.8\sim 0.95$), 目的是为了对 Oldenburg 迭代公式(8)中删去级数项的补充。 $z_0^{(0)}$ 为预置值, 对应的是反演界面的平均深度。

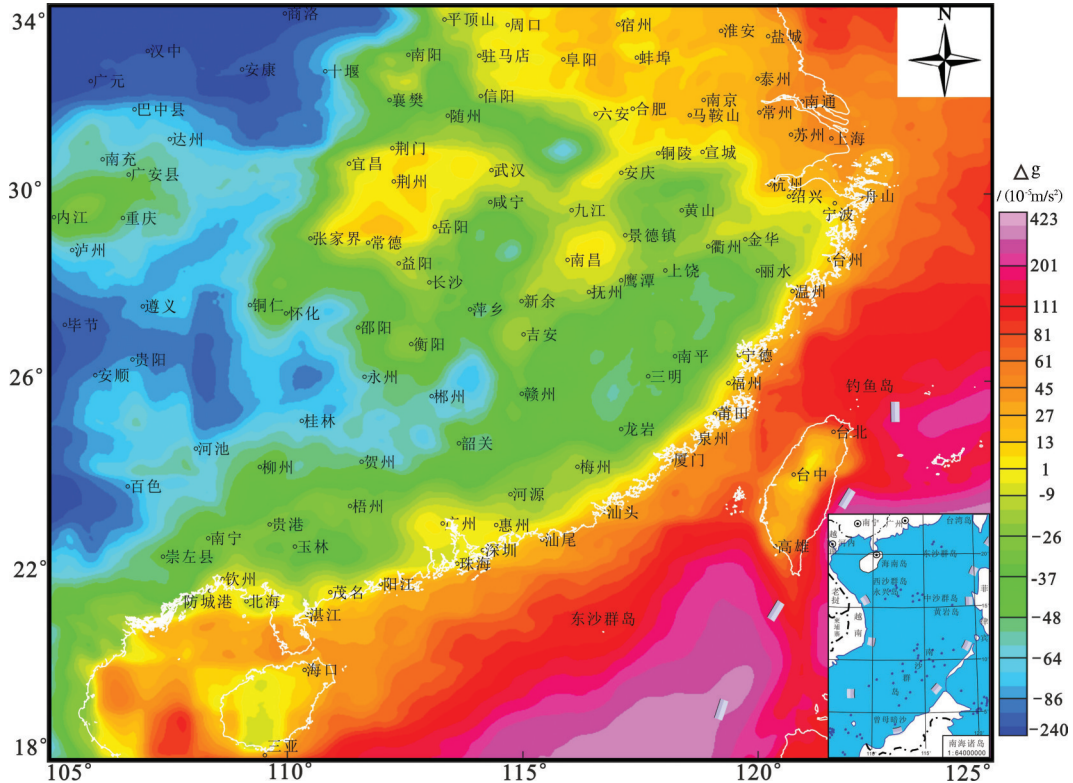


图5 华南地区仅反映莫霍面变化的卫星布格重力异常
Fig.5 The satellite Bouguer gravity anomaly of Moho variation in South China

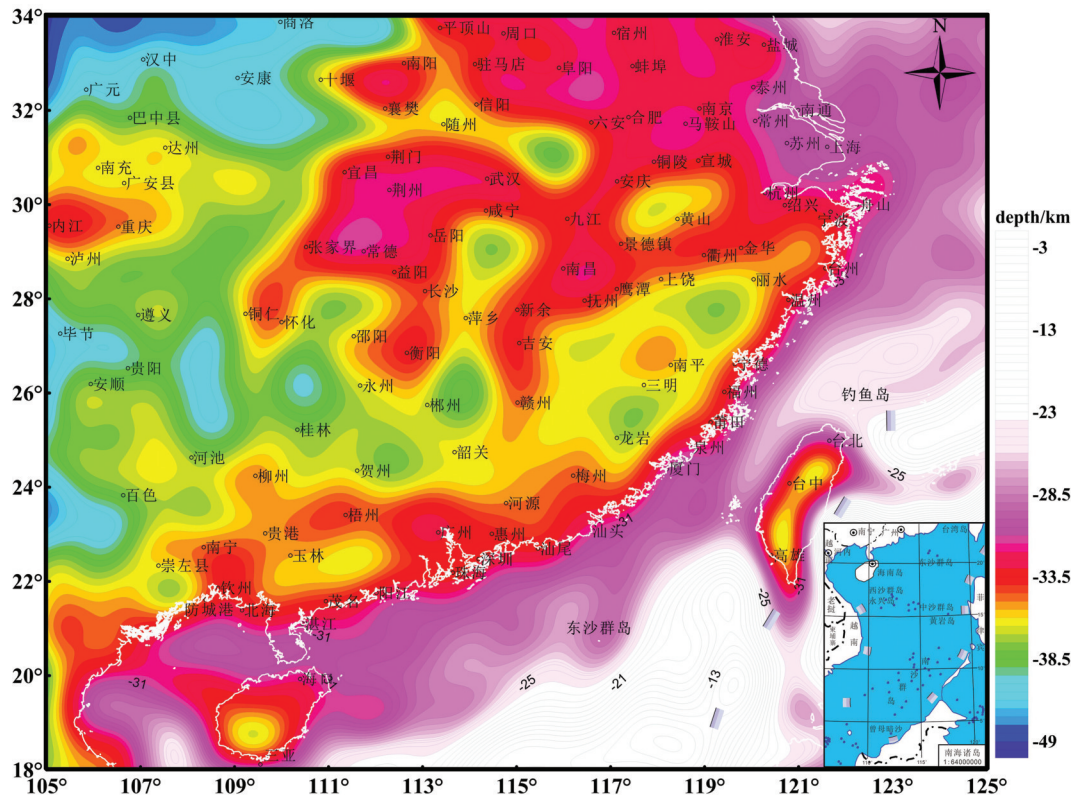


图7 变密度界面反演获得华南地区莫霍面深度图

Fig.7 Moho depth map in South China inverted by variable density interface

在进行莫霍面与成矿背景讨论之前,首先对本文的反演结果进行评价。长江中下游地区积累了较为丰富的人工源地震剖面资料,本文以长江中下游地区的地震探测结果对反演结果进行评价。吕庆田等(2015)在长江中下游地区布设的多条深反射地震剖面结果揭示长江中下游地区的莫霍面的界面深度为29~35 km;Shi et al.(2013)通过天然地震网格搜索法获得长江中下游地区莫霍面的深度变化为28~36 km。本文对卫星重力数据采用变密度界面反演方法获得的长江中下游地区莫霍面界面深度范围为31~34 km,与前人地震结果较吻合,表明本文采用卫星重力数据对华南地区进行变密度界面反演获得的莫霍面深度结果可靠。

6 莫霍面特征与成矿带分布

华南地区是中国热液金属矿床矿种最多、密度最大和有色金属产量最高的地区,其包含了分布广大、类型多样、元素组合复杂的不同成矿带(宋相龙等,2017)(如长江中下游成矿带、钦杭成矿带、南岭成矿带等)。莫霍面的形态既是深部构造类型之

一,又是综合地质作用的结果形式之一,与大地构造关系密切,对成矿的控制和生成起着重要的作用,探讨莫霍面与成矿带的关系,有助于深部构造与成矿关系的研究(黄瑞华,1994)。

将前文对华南地区进行变密度界面反演获得的莫霍面分布形态结果与2019年中国地质调查局厘定的华南地区成矿带边界进行匹配叠加,获得华南地区的莫霍面分布与成矿带位置对应图(图8)。通过分析华南地区不同成矿区带的莫霍面形态特征,以及结合地质、地球化学、矿产分布等资料,对华南地区不同成矿区带形成现今莫霍面形态和巨量金属矿床的深部原因进行分别探讨。

6.1 长江中下游成矿带

长江中下游成矿带的区域范围大致为黄石—九江—马鞍山,莫霍面分布总体呈现一个“V”字型的隆起特征。Moho面最深处位于“V”字型转折处的九江、宿松地区附近,向北东和北西两侧方向抬升,北东方向(东支)抬升的幅度和隆起规模较北西方向(西支)更大,尤其是在铜陵的北东方向Moho面的抬升幅度和隆起更为剧烈。成矿带内包

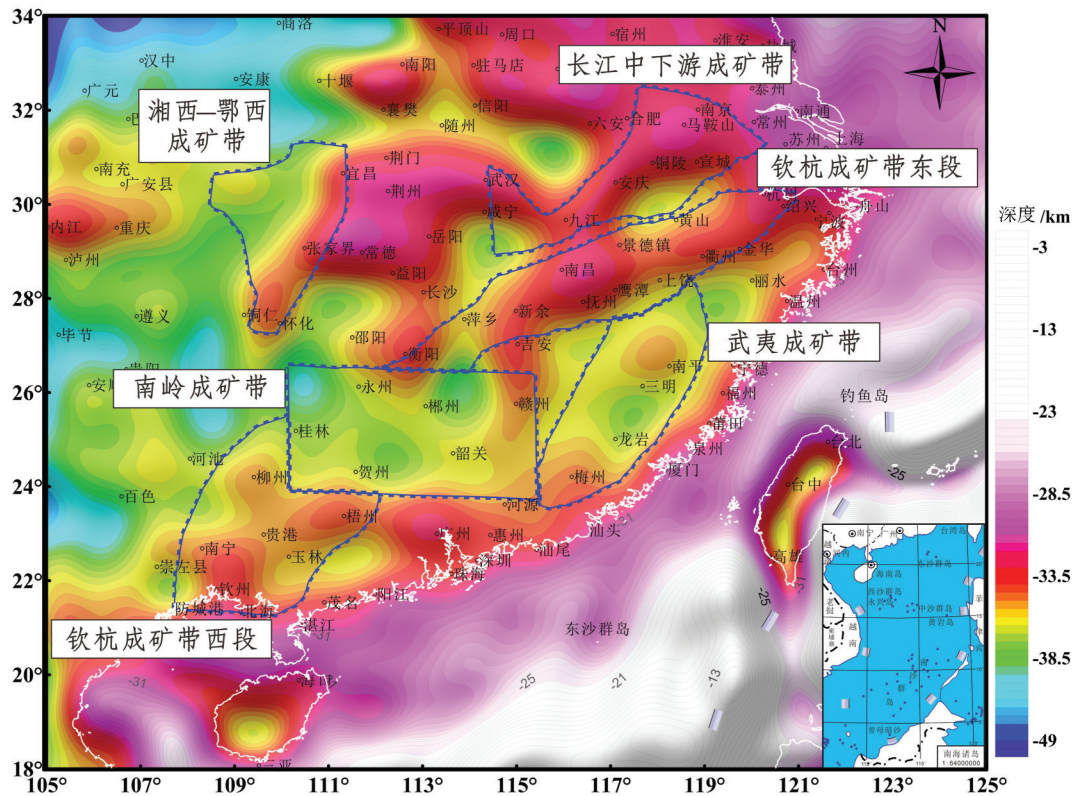


图8 莫霍面深度分布与成矿带分布

Fig.8 Map of Moho depth distribution and location of metallogenic belt

含了鄂东南、九瑞、庐枞等多个矿床聚集区,矿集区的主要大、中型矿床及其有关的中生代火山-侵入岩分布在地幔隆起带的脊部、南侧幔坡及隆凹过渡带上(常印佛,1991)。

从晚侏罗世开始,中国东部整体处于板块多向汇聚的动力学背景下,由于西太平洋伊泽纳崎板块的斜向俯冲作用,使得郯庐大断裂发生强烈的左行平移运动,造成了东西两侧的变形差异(常印佛等,1991)。早白垩世中期开始,长江中下游进入主伸展阶段,拉伸扩张,地壳减薄,并随着白垩纪的火山运动和大规模的岩浆入侵,形成了现今成矿带基底的“V”字形隆起和隆起区矿化的格局。

在古太平洋板块向欧亚大陆运动(152~135 Ma)和热活动(143~128 Ma)的综合持续作用下,成矿带下方的地壳反射发育引起的强烈底侵作用,导致地壳隆起,岩浆通过逆冲推覆断裂和滑脱等主要通道上涌。在上涌的过程中,同化了众多的硅铝质地壳元素,提高了岩浆的氧逸度,使得岩浆中的铜从硫化物状态中解脱出来,在深部和浅部形成含铜

流体岩浆房,最终在断隆或隆坳过渡带等有利位置形成铜金多金属矿床(常印佛等,1991;董树文等,2011)。而由上涌地幔流体以及不断加入的地壳物质混合而成的壳幔熔体沿深切地壳的郯庐断裂上升至拉分盆地,形成橄榄玄粗岩系潜火山岩。由于壳幔熔体在浅部的快速侵入和喷发(133~128 Ma),岩浆快速冷却,与早期形成的火山岩、地层相互作用,最终在接触带或岩体顶部等有利部位富集形成斑岩型铁矿床(杜建国等,2011;刘博等,2018)。

6.2 钦杭成矿带

钦杭成矿带位于华夏与扬子两个古陆块的碰撞拼接带区域,经历了燕山、加里东、晋宁等多期的成矿作用,形成了巨量的铜、金、钨、锡等多金属矿床,是中国重点成矿区带之一(倪培等,2017)。根据空间和成矿特点,钦杭成矿带可分为东、西、中三段,东段以铜金矿化为特征,发育有大中型、超大型的铜金多金属矿床;西段以Au、Ag等稀有金属矿化为特色,发育有大批的稀有金属矿床;中段与南岭成矿带位置大体一致,是世界著名的花岗岩区域和

重要的钨锡多金属矿源产地。

由于海西期的陆内裂隙作用,在宜丰—景德镇—歙县断裂、萍乡—广丰—绍兴断裂之间形成浙赣坳陷带(萍乡—钱塘坳陷带);印支期在陆内发生强烈的褶皱造山,形成武功山—天台山隆起;燕山期间的构造体制发生转换,由陆内造山向岩石圈伸展减薄转变,造就了现今钦杭成矿带东段莫霍面的“两隆夹一坳”的分布特征(吕劲松等,2017)。

东段区域在燕山早期早阶段(180~160 Ma)古太平洋板块向华南板块的俯冲过程中,大陆的边缘挤压应力在陆内形成远程效应,导致钦杭结合带陆内各块体的缝合带边界活化,造成增厚的下地壳熔融,并伴随拆沉作用,使得岩浆中混有更多的幔源物质,形成大量的I型花岗岩浆,为铜金多金属矿床提供物质来源。在燕山早期晚阶段至晚期早阶段(160~125 Ma),成矿带东段在该时期发生强烈的板片俯冲,随着俯冲角度的加大,华南整体的构造背景逐渐由挤压转换为伸展,大量的软流圈物质上涌,板片脱水引起地幔楔熔融形成底侵的玄武质岩浆,激发地壳大规模重熔形成S型花岗岩浆,为钨、钼、铌、钽等矿床提供物源(周新民,2003;刘磊,2015)。从燕山晚期早阶段末期至晚期晚阶段(136~100 Ma),板片俯冲的角度进一步增大,伸展作用持续进行,玄武质岩浆侵入到地壳浅部,与地壳岩浆房发生混合,亏损的幔源岩浆与其诱发的浅部地壳物质熔融形成的长英质岩浆混合后,进一步分异演化形成同时具有I、S型花岗岩成岩成矿特征的A型花岗岩,在有利位置富集形成矿床(梁锦等,2012,2015)。

钦杭成矿带的西段区域与东、中段区域相比,其边界问题存在有较大的争论。本文讨论的钦杭成矿带西段区域范围为南岭以南地区,即成矿带北纬24°以南地区。前文获得的莫霍面结果显示,其莫霍面的分布特征为“南隆北陷”。西段区域从新元古代以来经历了多旋回的开合构造运动。加里东运动时期,广西地槽褶皱回返,区域变质和断裂变质广泛发育,导致深断裂带的南东侧大面积抬升,逐渐形成西段的南部隆起。志留纪末期,大量的深部热流上升促使前期地层遭受低绿片岩相至高角闪岩相变质作用和强烈的混合岩化、花岗岩化作用,产生褶皱隆升。在海西期,东吴运动使得坳陷沉积区发生褶皱回返发生第二次隆起,与云开隆

起连成一体;在燕山期内,中国东部处于弧后活动大陆边缘,当太平洋板块向东亚大陆俯冲时,强烈的软流层蠕动使得整个云开地区总体抬升,接受侵蚀,形成了现今的云开隆起(周永章等,2012,2015,2017)。

燕山期的褶皱造山,发育了系列的脆-韧性剪切带和逆冲推覆构造,为岩浆活动提供通道,并使得两侧的岩石产生节理和裂隙。岩浆沿着断裂裂隙等构造上侵,与沿裂隙下渗的大气降水混合,在岩浆热能的驱动下,淋滤变质岩层和花岗岩,形成成矿热液,成矿热液使得所经过的裂隙围岩发生大规模的热液蚀变,造成岩石中的金、银等成矿元素发生活化、迁移和重新分配,最终形成金银等稀有多金属矿床(王祖伟等,2002;陈庆,2010)。

6.3 南岭成矿带

南岭成矿带位于华南地区的腹部,是中国乃至全世界最重要的钨锡矿集中分布区。本文根据中国地质调查局所厘定的南岭成矿带范围(东经111°~116°,北纬24°~27°)进行划分。由前文反演所获得的南岭成矿带莫霍面深度可知,成矿带的莫霍面深度范围为31~39 km,东西向构造带地壳较厚,为35~39 km,从南东往北西莫霍面呈现逐渐加深趋势,在向西北倾斜的总趋势中伴随着局部的幔隆和幔陷起伏。

燕山中期(160~150 Ma),南岭成矿带在岩石圈全面的伸展—拉张—减薄运动过程中,地幔物质上涌形成的玄武质岩浆发生底侵,引发地壳熔融,导致生成大量的以准铝质—弱过铝质黑云母二长花岗岩—黑云母钾长花岗岩—二(白)云母花岗岩为主的“陆壳重熔型花岗岩”(孙劲松,2013)。部分花岗质岩浆在演化后期发生了强烈的岩体—熔体相互作用,导致出现与高分异花岗岩有关的钨锡成矿作用。在135 Ma之后,燕山晚期的动力学背景分为先俯冲挤压和后走滑两个阶段,在后走滑的第二阶段,古太平洋板块改变运动方向,由向西北的斜向俯冲调整到几乎平行大陆边缘沿北东方向走滑,造成大陆岩石圈的大面积伸展,从而形成了大量的白垩纪走滑—拉张—裂陷盆地和变质核杂岩(郭春丽,2010)。在此期间,伴随着大规模的火山活动、花岗质岩浆的侵位和浅成低温热液铜金银矿化系统,形成了与花岗岩有关的钨锡多金属矿化和热液型铀矿。

成矿带在燕山运动早期太平洋板块向华夏板块

的俯冲过程中,岩石圈发生减薄,由地壳伸展引起的减压熔融和地幔楔玄武岩浆底侵提供的热源结合导致原岩部分熔融形成燕山早期的“南岭花岗岩带”(李建康等,2013)。在岩浆的多期次侵位活动中,早期岩浆活动开辟出上升通道,使得晚期岩浆上升到浅部(陈国雄等,2014),导致地幔的不均匀隆起,造就了南岭成矿带现今莫霍面的不均匀分布特征。

6.4 武夷山成矿带

武夷山Cu-Pb-Zn多金属成矿带是华夏地块内的重要成矿区域,北与钦杭成矿带的东段相邻,西与南岭成矿带东段相邻。该区深部独特的构造环境和长期复杂的构造-岩浆-成矿演化史造就了良好的成矿地质条件和丰富的矿产资源。上文对卫星重力数据进行的系列处理与反演,所获得的武夷山成矿带的莫霍面深度范围为32~34 km,根据隆陷的形态分布将其大致划分为北武夷幔隆区域(武夷山幔隆带)和南武夷幔陷区域(闽西南—粤东北拗陷带),在幔隆区域内又可进一步划分为若干个幔隆和幔陷区域。

梅州与龙岩之间的桃溪隆起是在中生代晚期经历了岩石圈加厚期的拆沉,软流圈物质上涌,通过断层或断裂带为含矿岩浆的运移提供通道。含铜金元素的地幔物质参与地壳的重熔,形成新生地壳,地壳的伸展和岩浆顶托作用造成桃溪基底岩石的隆起(陈世忠等,2010)。武夷山成矿带浙江段的莫霍面为一个幔陷区,根据板块重建的最新成果和海山K-Ar年龄证据表明,其在燕山晚期(145~100 Ma)古太平洋板块沿北西西向俯冲于中国东南部大陆岩石圈之下,在俯冲过程中大洋板片自身发生拆沉—回转—后撤过程中,地幔物质上涌通过深大断裂侵入进地壳,在下地壳低速体内熔融地壳物质后,又经过深大断裂侵入上地壳(纪世磊,2018)。表明武夷山成矿带的成岩成矿作用主要与壳幔物质的相互作用有关,壳源物质形成钨、稀土等矿物为主的矿床,幔源物质形成铜、金等多金属矿床。

成矿带下部莫霍面的深部演化历史可归纳为:在晋宁运动之后,宁化—南平沿线发生裂谷化作用,导致北武夷幔隆,南武夷幔陷,在早中寒武世形成与海相化学沉积作用有关的重晶石成矿系列。加里东运动结束后,武夷山成矿带的基底构造格局基本完成,南武夷幔陷区接受来自西侧海侵,在闽

西南—粤东北地区形成晚古生代陆表海盆地,于晚石炭世和早三叠世时期发生局部的海底拉张作用,形成与海相火山作用有关的铜铅锌多金属成矿系列。印支运动之后,成矿带总体进入陆内再造环境,受太平洋板块向西俯冲作用,发生了重要的构造-岩浆-成矿作用。在此时期的陆壳经历了拉张、挤压、挤压-拉张、拉张应力环境,幔源组分逐步加入到岩浆岩中,形成武夷山多金属成矿带。最后在晚白垩世,由于新特提斯造山作用的远程效应,以及中新世菲律宾海板块和欧亚大陆板块的碰撞作用,导致武夷山成矿带及相邻区域的整体隆升,形成了现今武夷山成矿带的莫霍面形态。

6.5 湘西—鄂西成矿带

湘西—鄂西成矿带分别位于扬子地台的东南缘和北缘,是中国重要的铅锌多金属成矿带之一(周云等,2014)。湘西—鄂西成矿带的莫霍面深度范围为33~38 km,莫霍面自西向东呈现逐渐抬升,按隆陷的相对分布,可分为“东隆西陷”两部分。成矿带中的铅锌矿矿床总体沿北东向的隆陷分界线断续展布,且矿体矿化与热液作用形成的方解石化、白云石化以及硅化的关系十分密切,表明湘西—鄂西成矿带的形成与莫霍面隆陷分布的岩浆作用密切相关。

在晋宁时期的武陵运动,由于华南古洋盆向雪峰山南侧俯冲,形成中元古代雪峰岛弧褶皱系。在此过程中,一方面地壳经历了强烈的缩短,挤压及深层剪切升温作用,导致地壳硅铝质部分熔融,生成改造型花岗岩;另一方面地幔物质沿着产生的深大断裂入侵形成基性、超基性岩带及一些玄武岩类,造成东部的莫霍面逐渐开始隆起(刘博,2009)。在加里东早期由于华南裂谷系的扩展,隆起以西地区处于扬子陆块的被动陆缘;晚期华南小洋盆向扬子板块发生俯冲、碰撞、拼贴作用,形成岛弧碰撞造山带,并排出烃类等含矿溶液,从盆地中由东向西运移并储存到东隆边缘的有利岩性和构造位置(叶霖等,2000)。容矿层中储存的烃类含矿溶液导致岩石中的硫酸盐还原成为还原硫,进一步促使成矿流体中的铅、锌等组分从结合物中分离、沉淀,最终大量堆积形成湘西—鄂西铅、锌多金属成矿带。由雪峰山南部隆起形成的北东向构造与北部近东西向构造联合,形成了东部隆起弧形构造

带的基本格架(邓大飞,2014),即现今湘西—鄂西成矿带莫霍面形态“东隆西陷”的相对格局。

7 结论

本文引入卫星重力数据对华南地区成矿带内莫霍面分布特征进行研究。基于前文的计算和分析结果,可以得到以下认识:

(1)卫星重力数据在进行相关校正处理后,再进行变密度界面计算,所得结果与实测的地震工作结果吻合较好,表明卫星重力数据可用于解决大区域的地质基础问题,对卫星重力数据的校正方法有效及变密度界面反演的计算结果可信。

(2)通过对华南地区内不同成矿带的莫霍面的起伏特征的研究表明,长江中下游成矿带和软杭成矿带东段的成矿物质来源主要是幔源物质,形成了以铜、铁、金等金属矿物为主的幔源特色成矿带;武夷、南岭、鄂西—湘西成矿带的成矿物质来源包含了壳、幔源物质,壳源物质主要形成钨、稀土等矿床,幔源物质形成了以铜、金、锡、铅锌等为主的多金属矿床。

(3)通过对不同成矿区带内莫霍面的起伏分布的形成过程研究,表明地幔隆起或凹陷的形成机制与当时区域或大陆的伸展环境、洋陆(或板块)的俯冲及岩石圈的拆沉或增厚关系有关,由此可能造成软流圈的上涌,底侵下地壳岩石,含矿岩浆通过深大断裂、构造等岩浆通道向上运移,含矿元素在合适的位置进行巨量堆积,最终形成巨型金属矿床。

致谢:合肥工业大学陈安国博士对变密度反演给予大力支持,匿名审稿专家和编辑老师对文章提出了建设性意见,在此一并表示感谢!

References

Asgharzadeh M, Von F R, Kim H, Leftwich T, Kim J. 2007. Spherical prism gravity effects by Gauss-Legendre quadrature integration[J]. *Geophysical Journal International*, 169(1): 1-11.

Barberi F, Gandino A, Gioncada A, LaTorre P, Sbrana A, Zenucchini C. 1994. The deep structure of the Eolian arc (Filicudi-Panarea-Vulcano sector) in light of gravity, magnetic and volcanological data[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 61(3/4): 189-206.

Bi Benteng, Hu Xiangyun, Li Qingli, Zhang Henglei, Liu Shuang, Cai Jianchao. 2016. Multi-scale analysis to the gravity field of the northeastern Tibetan plateau and its geodynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 59(2): 543-555

(in Chinese with English abstract).

Chang Yinbo. 1991. In the Middle-Lower Yangtze Copper-Ore Metallogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

Chen Guoxiong, Liu Tianyou, Sun Jinsong, Ou Yang, Liu Shuang. 2014. Characteristics of multi-scale gravity field and deep structures in Nanling metallogenic belt [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(2): 240-251 (in Chinese with English abstract).

Chen Jialian, Zhang Yi, Chen Chao. 2010. Satellite gravity anomalies and regional geological characteristics in the Guangxi area [J]. *Progress in Geophys.*, 25(4): 1233-1239 (in Chinese with English abstract).

Chen Qing. 2010. The evolution of Yunkai area and mineralization of precious metals[J]. *Sun YAT-SEN University(Natural Sciences, Medicine)*, 31(4): 68-72 (in Chinese and English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong. 2012. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*,36(3): 315-321 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu zhigan, Huang Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*,38(2): 219-229 (in Chinese with English abstract).

Chen Shizhong, Ma Ming, Chen Gang, Zhou Yan, Zhu Xiaoting, Qiu Jinliang, Mao Jianren. 2010. Taoxi uplift of Wuyi metallogenic belt, its tectonics, magmatism and metallogeny [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35 (6): 969-984 (in Chinese with English abstract).

Du Jinsong, Chen Chao, Liang Qing, Zhang Yi. 2010. Lunar gravity anomaly and its computational method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,37(11): 1370-1371 (in Chinese with English abstract).

Du Jianguo, Ma Xiaohong. 2011. Metallogeny of terrestrial volcanic ore deposits in ore belt along the Mid-Lower Yangtze River reach[J]. *Geology of Anhui*, 21(2): 131-137 (in Chinese and English abstract).

Drachev S, Johnson G, Laxon S, Mcadoo D, Kassens H. 1999. Main Structural Elements of Eastern Russian Arctic Continental Margin Derived from Satellite Gravity and Multichannel Seismic Reflection Data. *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic*[M]. Springer: 667-682.

Deng Dafei. 2014. Study on the Intracontinental Structure of the Enrichment of Marine Paleo-reservoirs in the Northern Margin of Jiangnan-Xuefeng Uplift, Southern China [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

Dong Shuwen, Ma Licheng, Liu Gang, Xue Huaiming, Shi Wei, Li Jianhua. 2011. On dynamics of the metallogenic belt of Middle-Lower Reaches of Yangtze River, Eastern China[J].*Acta Geologica Sinica*, 85(5): 612-625 (in Chinese and English abstract).

Feng Rui, Yan Huifeng, Zhang Ruoshui. 1986. The Rapia inversion of

- 3-D potential field and program design [J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(4): 390–403 (in Chinese with English abstract).
- Grombein T, Seitz K, Heck B. 2013. Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid [J]. *Journal of Geodesy*, 87: 645–660.
- Guo Chunli. 2010. Study on Mineralization- Related Mesozoic Granitoids in Chongyi- Shangyou Counties, South Jiangxi, and Comparison to Corresponding Granitoids in the Nanlin Region, South China[D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese and English abstract).
- Hao Xiaoguang. 1996. Modification of conception of latitude correction in gravity measurement [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 16(3): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Heck B, Seitz K. 2007. A comparison of the tesseroid, prism and point- mass approaches for mass reductions in gravity field modelling [J]. *J. Geodesy*, 81: 121–136.
- Huang Ruihua. 1994. The relationship between Moho surface morphology and rock gold deposits in China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 18(3): 191–198 (in Chinese).
- Huang Zongli, Wang Dian, Yan Jiayong, Zhang Huai. 2016. A huge deep fault system at the east edge of Eurasia: The new tectonic interpretation based on satellite gravity[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(01): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Roy L, David M, Karen M. 1994. Scotia Sea tectonics from high- resolution satellite gravity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 123: 255–268.
- Ji Shilei. 2018. Metallogeny in Zhejiang Section of Wuyi Metallogenic Belt under Paleo- Pacific Plate Subduction Mechanism during the Late Mesozoic[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract).
- Kadima E, Delvaux D, Sebagenzi S N, Tack L, Kabeya S M. 2011. Structure and geological history of the Congo Basin: an integrated interpretation of gravity, magnetic and reflection seismic data[J]. *Basin Research*, 23(5):499–527.
- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2012. CRUST1.0: An updated global model of Earth's crust[J]. *Geophys. Res. Abs.*, 14: 3743.
- Leonardo Uieda, Valeria C F. Barbosa, Carla Braitenberg. 2015. Tesseroids: Forward- modeling gravitational fields in spherical coordinates[J]. *Geophysics*, 81(5): F41–F48.
- Li Bao Hen. 1996. A Discussion on the selection of elevation system in altitude correction of gravity survey [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 20(01): 35– 39 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Liang Ting, Xu Yiming, Zhang Yijun, Liang Huaying, Lu Huanzhan, Zhao Bin, Qu Wenjun, Zhou Sichun, Wang Rucheng, Wei longming, Lin Jinfu. 2013. Progress of research on metallogenic regularity and deep exploration in Nanling Region and its indication for W- Sn exploration in Tibet [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 58–74 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhaoli, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Bi Xianwu, Li Xiaomin. 2006. Helium isotope composition of fluid inclusions and the origin of ore- forming fluids of Furong tin orefield in Hunan Province, China [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 31(1): 129–135 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jin, Zhou Yongzhang, Li Hongzhong, Yin Zhuizhui, Zhou Liuyu, Zeng Changyu and Yu Pengpeng. 2012. Geological characteristics and genesis of porphyry copper deposits in Qinzhou- Hangzhou suture zone, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3361–3372 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jin, Zhou Yongzhang and Li Hongzhong. 2015. Tectonic evolution of the Juncture between Yangtze craton and Cathaysian block: Its significance for mineralization of porphyry copper deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 144–159 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Li Sanzhong, Wang Pencheng, Liu Xin, Li Xiyao, Zhao Shujuan. 2018. Deep- seated structural styles and Mesozoic metallogenic dynamic model in the middle- Lower Yangtze Region, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 799– 812(in Chinese and English abstract).
- Liu Bo. 2009. Features and Evolution of Deep Structures in the Xuefeng Intracontinental Tectonic System [D]. Beijing: Ocean University of China (in Chinese and English abstract).
- Liu Lei. 2015. Late Mesozoic Episodic Volcanism in SE China: Response to Paleo- Pacific Subduction [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese and English abstract).
- Liu Wei, Shao Chanshen, Li Dahu, Gu Qiping. 2018. Application of gravity and aeromagnetic data to the study of deep seismogenic environment of the Muli- Yanyuan arc structure belt and its adjacent area in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Editon)*, 45(2): 250–256 (in Chinese and English abstract).
- Luo Di, Zhang Xunhua, Cai Feng, Liu Zhan, Zhang ZhiXun, Hou Fanghui, Du Runling, Wei Long. 2014. Integrated Gravity- Magnetic- Seismic Data inversion and interpretation and their application to underwater tectonics[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(6): 135–143 (in Chinese and English abstract).
- Luo Fan, Yan Jiayong, Fu Guangming, Luo Lei, Tao Xin, Wang Hao. 2019. Crust1.0 crustal model and its application: As exemplified by Middle- Lower Yangtze Metallogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica* (to be publish).
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Shi Danian, Tang Jingtian, Jiang Guoming, Zhang Yongqian, Xu Tao. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 889–906.
- Lü Qingtian, Liu Zhendong, Dong Shuwen, Yan Jiayong, Zhang Yongqian. 2015. The nature of Yangtze River deep fault zone: Evidence from deep seismic data [J]. *Chinese J. Geophys.*, 58(12): 4344–4359 (in Chinese with English abstract).
- Lü Jinsong, Zhang Xuehui, Sun Jiandong, Zhang Yong, Wu Bing, Luo Xuequan. 2017. Spatiotemporal evolution and metallogenic regularity of felsic rocks in the Yanshanian of the eastern segment Qinhang metallogenic belt, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3635–3658 (in Chinese and English abstract).

- Ni Pei, Wang Guoquan. 2017. Multiple episodes of Cu– Au mineralization in the northeastern section of the Qin– Hang metallogenic belt induced by reworking of continental crust [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3373– 3394 (in Chinese with English abstract).
- Nguyen N T, Lee S M, Que B C. 2015. Satellite Gravity Anomalies and Their Correlation with the Major Tectonic Features in the South China Sea [J]. *Gondwana Research*. 2(7): 407–424.
- Oscar H. L. 2014. Moho structure of Central America based on three– dimensional lithospheric density modelling of satellite– derived gravity data[J].*International Journal of Earth Sciences*, 7(103): 1733–1745.
- Oldenburg D W. 1974 .The inversion and interpretation of gravity anomalies [J]. *Geophysics*, 39(4): 526–536.
- Parker R L. 1972. The rapid calculation of potential anomalies [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31: 447–455.
- Shi Dalian, Lü Qingtian, Xu W Y, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Dong Shuwen, Chang Yinuo. 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 [J]. *Tectonophysics* , 606: 48–60.
- Shin Y H, Shum C, Braitenberg C, Lee S M, Na S H, Choi K S, Hsu H, Park Y S, Lim M. 2015. Moho topography, ranges and folds of Tibet by analysis of global gravity models and GOCE data [J]. *Scientific reports*, 5: 11681.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035–1053 (in Chinese and English abstract).
- Steffen R, Strykowski G, Lund B. 2017. High–resolution Moho model for Greenland from EIGEN–6C4 gravity data [J]. *Tectonophysics*, 706: 206–220.
- Song Xianglong, Xiao Keyan, Ding Jianhua, Fan Jianfu, Li Nan. 2017. Dataset of major mineralization belts of China’s key solid mineral resources[J]. *Geology in China*, 44(S1): 72– 81,204– 214 (in Chinese and English abstract).
- Sun Jingsong. 2013. Study on the Characteristics of Gravity and Magnetic Field in Nanling Metallogenic Belt [D]. Wu Han:China University of Geosciences (in Chinese and English abstract).
- Teng Jiwen. 2006. Research on layer– bundle fine structures and physical attributes of crust– mantle boundary in deep earth [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(1): 1–23 (in Chinese with English abstract).
- Wan Xiaoyun, Zhang Running, Sui Xiaohong, Chen Liang. 2017. Analysis of earth gravity field detection based on satellite data [J]. *Spacecraft Engineering*,26(2): 121– 129 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wanyin, Liu Jinlan, Qiu Zhiyun, Huang Yijian, Cai Dongsheng. 2004. A research on Mesozoic thickness using satellite gravity anomaly in the southern Yellow Sea [J].*China Offshore Oil and Gas*,16(3) : 151–156, 169 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zuwei, Zhou Yongzhang. 2002. Geological Characteristics and genesis of the pangxidong– Jinshan Ag– Au Deposit in Yunkai Terrain, South China [J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 26(2): 193–198 (in Chinese and English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong. 2008. Division Scheme of Metallogenic Belt in China [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–138 (in Chinese).
- Xu Han, Zhou Qiangbo. 2016. The accuracy of gravity anomaly derived from satellite gravity gradient [J]. *Science of Surveying and Mapping*,41(11): 17–24(in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Chen Zhaoxi, Hou Zunze. 2016. Crustal density structures around Chinese continent by inversion of satellite gravity data [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2167– 2175 (in Chinese with English abstract).
- Ye Ling, Liu Tiegeng, Shao Shuxun. 2000. Geochemistry of mineralizing fluid of Cd–rich zinc deposit: Taking Niujiaotang Cd–rich zinc deposit, Duyun, Guizhou for example [J]. *Geochemistry*, 29(6): 597–603 (in Chinese and English abstract).
- Zhang Rongqing, Lu Jianjun, Zhu Jinchu, Yao Yuan, Gao Jianfeng, Chen Weifeng, Zhao Zhanjie. 2010. Zircon U– Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Hehuaping granite porphyry, southern Hunan Province, and its geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(4): 436– 447 (in Chinese with English abstract).
- Zhou xingming. 2003. Thoughts on the Study of Granite in South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556–565 (in Chinese).
- Zhou Yongzhang, Zeng Changyu, Li Hongzhong, An Yanfei, Liang Jin, Lü Wenchao, Yang Zhijun, He Junguo and Shen Wenjie. 2012. Geological evolution and ore– prospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay– Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2/3): 486–491 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Zheng Yi, Zeng Changyu and Liang Jin. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay– Hangzhou Bay Metallogenic belt, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 1– 6 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Li Xingyuan, Zheng Yi, Shen Wenjie, He Junguo, Yu Pengpeng, Niu Jia and Zeng Changyu. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay– Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 667–681 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yun, Duan Qifa, Tang Juxing, Cao Liang, Li Fang, Huang Huilang, Gan Jinmu. 2014. The large– scale low– temperature mineralization of lead– zinc deposits in western Hunan: Evidence from fluid inclusions[J]. *Geology and Exploration*, 50(3): 515–532 (in Chinese and English abstract).

附中文参考文献

- 毕奔腾, 胡祥云, 李丽清. 2016. 青藏高原东北部多尺度重力场及其地球动力学意义[J]. *地球物理学报*, 59(2): 543–555.
- 常印佛. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社.

- 陈家联, 张毅, 陈超. 2010. 广西地区卫星重力异常与区域地质特征[J]. 地球物理学进展, 25(4): 1233-1239.
- 陈庆. 2010. 云开地区的演化及贵金属成矿效应[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学·医学版), 31(4): 68-72.
- 陈毓川, 王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题[J]. 大地构造与成矿学, 36(3): 315-321.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 219-229.
- 陈世忠, 马明, 陈刚, 周延, 朱筱婷, 邱金亮, 毛建仁. 2010. 武夷山成矿带桃溪隆起、岩浆侵入和区域铜多金属成矿作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 35(6): 969-984.
- 陈国雄, 刘天佑, 孙劲松, 欧洋, 刘双. 2014. 南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(2): 240-251.
- 杜劲松, 陈超, 梁青, 张毅. 2010. 月球重力异常及其计算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 37(11): 1370-1373.
- 杜建国, 马晓红. 2011. 长江中下游成矿带陆相火山岩型铁矿成矿规律[J]. 安徽地质, 21(2): 131-137.
- 邓大飞. 2014. 雪峰隆起北缘海相古油气巨量富集的陆内构造研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 董树文, 马立成, 刘刚, 薛怀民, 施炜, 李建华. 2011. 论长江中下游成矿动力学[J]. 地质学报, 85(5): 612-625.
- 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[J]. 地质学报, 4: 390-403.
- 郭春丽. 2010. 赣南崇义—上犹地区与成矿有关中生代花岗岩类的研究及对南岭地区中生代成矿花岗岩的探讨[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 郝晓光. 1996. 对重力测量纬度改正概念的修正[J]. 地壳形变与地震, 16(3): 8-13.
- 黄宗理, 王典, 严加永, 张怀. 2016. 欧亚大陆东缘存在一个巨型深断裂系统——基于卫星重力的新发现[J]. 地球学报, 37(1): 25-34.
- 黄瑞华. 1994. 中国莫霍面形态与岩金矿分布关系[J]. 大地构造与成矿学, 18(3): 191-198.
- 纪世磊. 2018. 晚中生代古太平洋板块俯冲机制下武夷成矿带浙江段成矿[D]. 杭州: 浙江大学.
- 励宝恒. 1996. 关于重力勘查的高度改正应采用何种高程系统的讨论[J]. 物探与化探, 20(1): 35-39.
- 李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 2013. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示[J]. 地球学报, 34(1): 58-74.
- 刘博, 李三忠, 王鹏程, 刘鑫, 李玺瑶, 赵淑娟. 2018. 长江中下游深部构造及其中生代成矿动力学模式[J]. 岩石学报, 34(3): 799-812.
- 刘博. 2009. 雪峰陆内复合构造系统: 深部构造特征及其动力学演化[D]. 北京: 中国海洋大学.
- 刘磊. 2015. 中国东南部晚中生代幕式火山岩浆作用及古太平洋板块俯冲机制[D]. 南京: 南京大学.
- 刘薇, 邵昌盛, 李大虎, 顾勤平. 2018. 利用重力、航磁资料研究木里—盐源弧形构造带及邻区的深部孕震环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(2): 250-256.
- 梁锦, 周永章, 李红中, 尹缀缀, 周留煜, 曾长育, 虞鹏鹏. 2012. 钦—杭结合带斑岩型铜矿的基本地质特征及成因分析[J]. 岩石学报, 28(10): 3361-3372.
- 梁锦, 周永章, 李红中. 2015. 扬子—华夏构造结合带的演化阶段及对斑岩铜矿形成的控制机制[J]. 地学前缘, 22(2): 144-159.
- 骆迪, 张训华, 蔡峰, 刘展, 张志珣, 侯方辉, 杜润林, 魏龙. 2014. 重磁震联合反演及综合解释在海域构造解释中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 34(6): 135-143.
- 罗凡, 严加永, 付光明, 罗磊, 陶鑫, 王昊. 2019. Crust1.0地壳模型及其应用: 以长江中下游成矿带为例[J]. 地质学报, 网络预出版.
- 吕庆田, 刘振东, 董树文, 严加永, 张永谦. 2015. “长江深断裂带”的构造性质: 深地震反射证据[J]. 地球物理学报, 58(12): 4344-4359.
- 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 张勇, 武彬, 骆学全. 2017. 钦杭成矿带东段燕山期中酸性岩浆活动时空演化与成矿规律[J]. 岩石学报, 33(11): 3635-3658.
- 倪培, 王国光. 2017. 大陆再造与钦杭带北东段多期铜金成矿作用[J]. 岩石学报, 33(11): 3373-3394.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 宋相龙, 肖克炎, 丁建华, 范建福, 李楠. 2017. 全国重要固体矿产重点成矿区带数据集[J]. 中国地质, 44(S1): 72-81, 204-214.
- 孙劲松. 2013. 南岭成矿带重磁场特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 滕吉文. 2006. 地球深部壳—幔边界的层束精细结构与物理属性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(1): 1-23.
- 万晓云, 张润宁, 睦晓虹, 陈良. 2017. 基于卫星观测数据的地球重力场探测技术发展趋势分析[J]. 航天器工程, 26(2): 121-129.
- 王万银, 刘金兰, 邱之云, 黄翼坚, 蔡东升. 2004. 利用卫星重力异常研究南黄海地区中生界厚度[J]. 中国海上油气, 16(3): 151-156, 169.
- 王祖伟, 周永章. 粤桂边境庞西垌—金山银金矿床特征与成因[J]. 2002. 大地构造与成矿学, 26(2): 193-198.
- 徐翰, 周强波. 2016. 卫星重力梯度数据重力异常的精度分析[J]. 测绘科学, 41(11): 17-24.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1-138.
- 叶霖, 刘铁庚, 邵树勋. 2000. 富镉锌成矿流体地球化学研究: 以贵州都匀牛角塘富镉锌矿为例[J]. 地球化学, 29(6): 597-603.
- 杨文采, 陈召曦, 侯遵泽. 2016. 从卫星重力资料看中国及邻区地壳密度结构[J]. 地质学报, 90(9): 2167-2175.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556-565.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦州湾—杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向[J]. 地质通报, 31(2/3): 486-491.
- 周永章, 郑义, 曾长育, 梁锦. 2015. 关于钦—杭成矿带的若干认识[J]. 地学前缘, 22(2): 1-6.
- 周永章, 李兴远, 郑义, 沈文杰, 何俊国, 虞鹏鹏, 牛佳, 曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J]. 岩石学报, 33(3): 667-681.
- 周云, 段其发, 唐菊兴, 曹亮, 李芳, 黄惠兰, 甘金木. 2014. 湘西地区铅锌矿的大范围低温流体成矿作用——流体包裹体研究[J]. 地质与勘探, 50(3): 515-532.