

doi:10.3799/dqkx.2014.023

南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征

陈国雄^{1,2}, 刘天佑^{3*}, 孙劲松³, 欧 洋³, 刘 双³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 利用小波多尺度分解方法分离不同深源尺度花岗岩侵入体的重力异常信息, 结合视密度填图方法划分了 5 km、15 km 及 25 km 深花岗岩体分布特征, 并综合地震成像和大地电磁测深资料, 对南岭花岗岩侵入体的赋存侵位、诱发热源以及成因模式等问题进行初步探讨。研究表明, 以茶陵—郴州断裂为界, 区内重力场和岩体构造呈明显分区, 东南区岩体局部重力异常幅值较小, 地表出露岩体较薄, 岩浆沿着小通道上涌形成岩盖; 西北区岩体局部重力异常幅值较大, 侵位深度较深; 区内大多数岩体侵位深度不超过 25 km; 深部地球物理资料还揭示诸广山和猫儿岭地区 15~25 km 附近存在大规模低密度、低速特征的陆壳重熔区; 诸广山地区上地幔顶部存在低速、低阻熔体特征的软流圈上涌通道, 推测来自软流圈的玄武岩浆底侵造成该区中下地壳岩石部分熔融, 并为其周围大规模成岩成矿提供热源和物质来源。

关键词: 布格重力异常; 花岗岩侵入体; 岩体边界识别; 陆壳重熔; 数据处理; 南岭成矿带。

中图分类号: P631 **文章编号:** 1000-2383(2014)02-0240-11 **收稿日期:** 2013-05-17

Characteristics of Multi-Scale Gravity Field and Deep Structures in Nanling Metallogenic Belt

Chen Guoxiong^{1,2}, Liu Tianyou^{3*}, Sun Jinsong³, Ou Yang³, Liu Shuang³

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper, the multi-scale wavelet decomposition method was applied to separate the Bouguer gravity anomalies of Nanling region to obtain the local anomalies of granites at different depth scales. The granite distribution is delineated at 5 km, 15 km and 25 km respectively by 3D density mapping technique. We discuss some hot issues of Nanling granitic intrusions, including their geological and geophysical model, induced heat source and genetic model, by integrating and analyzing the seismic imaging and magnetotelluric data. The results show that the gravity anomalies and granitic intrusions have apparent partition features marked by Chaling-Chenzhou fault. The local gravity anomalies in southeast region with lower amplitude indicate shallow emplacement depth of granitic intrusions, and the magma intrude into the near-surface along the small channel to form rock cover, whereas the local gravity anomalies in northwest region with higher amplitude suggest deeper emplacement depth. Most of granites' emplacement depths are no more than 25 km. The large-scale low-density and low-speed region in Zhuguangshan and Maoerling area exists near the depth range of 15-25 km. The low-speed and low-resistance region also appears at the top of mantle in Zhuguangshan area, suggesting the upwelling channel of high-temperature asthenosphere lava. Therefore, the basaltic magma underplating may cause the protolith partial melting in middle-lower crust, which also provides the heat and material sources for the large-scale mineralization in Nanling region.

Key words: Bouguer gravity anomaly; granitic intrusion; edge detection; partial melting; data processing; Nanling metallogenic belt.

基金项目: 南岭地区燕山期深部岩浆活动与大规模成矿复杂性研究(No.1212011121101).
作者简介: 陈国雄(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事事位场数据处理及地球物理资料综合解释. E-mail: chengxhg@163.com
* 通讯作者: 刘天佑, E-mail: liuty@cug.edu.cn

0 引言

南岭地区是世界上有色金属、稀有金属、稀土、铀等成矿作用最典型且最为集中的地区之一,全区保有钨、锡资源储量分别占全国的83%和63%(王登红等,2007)。区内分布有大型—超大型钨、锡多金属矿床,如骑田岭钨锡矿、西华山钨矿、大吉山钨矿、柿竹园钨锡钼铋多金属矿等。以往丰富的地质研究成果认为该区成矿条件优越,矿产资源丰富,这得益于地壳深部的壳幔作用(陈毓川,2007;於崇文和彭年,2009)。近20年来,深部过程对成矿的控制作用逐渐成为矿床地质学家关注的热点(胡瑞忠等,2007,2008;侯增谦,2009)。2010年我国启动了科技专项——深部探测技术与实验研究(SinaProbe),该项目将重要成矿带与深部结构探测相结合,来探索大型矿集区和巨型矿床的深部构造背景、动力学过程对成矿系统形成及演化的影响(董树文等,2011;吕庆田等,2011a),并取得重大进展(严家永等,2009;张季生等,2010;吕庆田等,2011b;刘国兴等,2012;史大年等,2012)。在资源枯竭问题日趋明显的南岭矿产基地,迫切需要查明深部控矿规律和构造背景,SinaProbe项目有关南岭地区的部分研究工作也在开展(董树文等,2011;吕庆田等,2011),但相关成果尚未见文献报道。

在研究区地震和大地电磁资料缺少的条件下,重力勘探一直以来是研究低密度、负异常特征花岗岩的主要手段,前人已经做了很多相关地球物理研究工作。秦葆瑚(1984,1987)研究了湘南一些大型—特大型内生多金属矿田的区域重、磁异常特征,指出大矿田位于高磁区附近或重力梯度带上,且往往有局部航磁异常以及明显的局部重力负异常伴生;朱自强和黄国祥(1996)利用拟神经网络BP算法,对千里山岩体及其邻区做了三维重磁反演,给出了岩体的空间形态及侵位,并依此进行找矿靶区预测。饶家荣等(2006)根据南岭地区地质地球物理资料,研究了南岭中段主要深断裂和隐伏花岗岩带的分布特征,指出大义山—郴州—大宝山北西向隐伏构造带控制着大型—超大型矿床,并提出以地球物理和地球化学资料为基础,创建具有“重低磁高”或重磁变异特征的半隐伏—隐伏花岗岩带的构造岩浆系列矿床成矿模式,对指导和开展南岭地区深部找矿具有重要意义。杨文采(2003)根据大别苏鲁地区的深部地球物理资料,认为岩石圈的减薄作用造成了中国东部广泛而强烈的岩浆岩侵位与底侵,指出在深

反射地震剖面上岩浆拱弧组构揭示了由于软流圈上涌(上地幔热物质上升)而诱发莫霍面附近岩浆的底侵,并因为地幔热流上涌的热传导,可以触发中上地壳的岩石失水与原岩部分熔融和分异,促使花岗质岩浆向上地壳侵位。

相关研究成果丰富了对南岭花岗岩侵入体的地质地球物理认识,但是受到数据资料质量、范围以及丰富程度的限制,南岭地区花岗岩侵入体的深部侵位特征、诱发热源及成因模式等问题有待进一步探讨,本文收集了更小比例尺的布格重力异常数据,结合小波多尺度分解与视密度填图方法来揭示研究区三维密度分布,应用于研究区不同深源尺度花岗岩体的边界识别,并结合部分大地电磁测深和地震资料,综合地质地球物理认识成果,对南岭花岗岩诱发热源、成因模式等基本问题进行初步探讨。

1 地质地球物理背景

1.1 地质构造背景

南岭地区位于滨太平洋构造域与特提斯构造域的交汇部位,横跨华夏板块与扬子板块,经历多期次岩浆—构造—成矿作用,区内构造以断块运动为主,发育深大断裂,从而形成众多的隆、陷地块,奠定了本区目前的构造格架基础。区内北东向和东西向断裂构造带与北西向构造带交汇复合部位,控制着花岗岩和矿产的分布以及沉积构造等(於崇文等,2009)。

南岭地区花岗岩从四堡期至燕山期皆有出露,出露面积约为5万km²,占本区总面积的1/5;区内发育最多、分布最广的为燕山期花岗岩,约占区内出露花岗岩总面积的55.5%(於崇文等,2009)。南岭花岗岩带分为南带、北带以及中带,岩体常受断裂和褶皱构造控制。花岗岩类总体具有北西时代较早—南东时代较新的递变规律(舒良树等,2006)(图1)。岩石圈厚度从北西侧滇东北的180~200 km到长沙的140 km再到沿海的110 km,减薄厚度达到90 km(朱介寿,2005)。

南岭花岗岩类主要属于地壳部分熔融—侵位的产物(毛景文等,1995;沈渭洲和凌洪飞,1996;肖红全等,2003),也有部分壳幔混合成因的岩体(赵振华等,2000;朱金初等,2005;付建明等,2006),国内学者对花岗岩的成因提出了板块俯冲加玄武岩底侵的模式(周新民和李武显,2000;王德滋等,2003);并认为南岭金属大规模成矿现象受控于地壳深部的壳幔作用(陈毓川,2007),地幔物质有可能通过东侧武夷

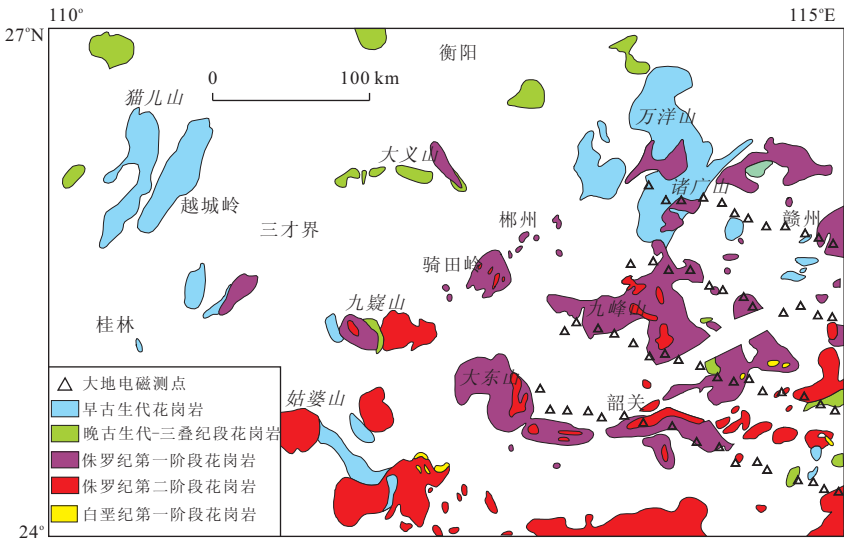


图 1 南岭地区花岗岩分布

Fig.1 The distribution of granite rocks in Nanling region

构造带与其旁侧的南岭地区中、下地壳以热能与气相物质的方式渗透、影响,使其熔融并向西推进;在这种长期过程中,成矿元素有可能得到分异富集并相对集中,并随花岗质岩浆的上侵而成岩成矿。

1.2 岩石物性及布格重力异常特征

根据饶家荣等(2006)所做的物性统计工作得知,南岭地区分布的碳酸盐岩密度大于砂页岩密度,灰岩平均密度为 2.70 g/cm³,页岩平均密度为 2.53 g/cm³;大理岩化灰岩、白云岩密度值为 2.73~2.75 g/cm³。岩浆岩的密度较低,侵入到沉积岩和变质岩地层中,表现为负异常特征;其中浅源重熔型花岗岩密度常见值为 2.6 g/cm³,比一般围岩低,有-0.05~-0.10 g/cm³ 的密度差,而深源同熔型花岗岩其密度常见值为 2.72 g/cm³,与围岩无明显的密度差。

据南岭地区 1:20 万布格重力异常平面等值线显示,在诸广山和越城岭地区分别存在醒目的圈闭负异常,极小值分别为-94 mGal 和-109 mGal,可能与莫霍面凹陷及花岗岩岩基有关;衡阳盆地重力值达到最大,约为-23 mGal,显示地壳相对较薄;区内不同规模的花岗岩体及一些构造隆起区都出现明显的重力负异常,一般比周围低 30~50 mGal,异常变化急陡,形成北东向为主,北西向和东西向次之的重力梯度带,并交织在一起,对应着南岭“米”字型构造特征。区内分布着北东、北西及东西向交汇的重力梯级带,反映了断裂构造分布特征,如茶陵-郴州北东向重力梯级带、城步一大东山北西向重力梯级带等。

2 方法原理

2.1 小波多尺度分析原理

小波多尺度分析又称多分辨分析,对于离散序列信号 $f(n) \in L_2(R)$,其离散小波变换定义为信号 $f(n)$ 与小波函数 φ 的卷积,即:

$$W_f(j,k) = a_0^{-\frac{j}{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) \varphi(a_0^{-j}n - kb_0), \quad j,k,n \in Z, \tag{1}$$

式中: a_0 为尺度参数; b_0 为位移参数。

令 $\varphi_{j,k}(n) = \varphi(a_0^{-j}n - kb_0)$,可以证明 $\{\varphi_{j,k}(n)\}$ 构成 $L^2(R)$ 空间的一组标准正交基,相应的小波变换为(秦前清和杨宗凯,1994):

$$f(n) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} W_f(j,k) \varphi_{j,k}(n), \quad j,k,n \in Z. \tag{2}$$

近几年,小波多尺度分析方法在位场资料分离领域得到了广泛应用(侯遵泽和杨文采,1997;杨文采等,2001),它可将重磁异常分解到不同空间尺度;重力场被分解为逼近部分 A 和细节部分 D ,可表示为:

$$f(x,y) = A_j f(x,y) + \sum_{j=1}^J D_j f(x,y). \tag{3}$$

基于公式(3),可以根据尺度 $j=J$ 时的逼近部分和 $j=1,2,\dots,J$ 的细节部分进行重构,图 2 为重力场信号 S 的 3 层多尺度分析结构图。

2.2 帕克视磁密度填图

Parker(1973,1974)首次利用连续模型的算法,并提出了频率域重磁场正反演的理论公式.利用大

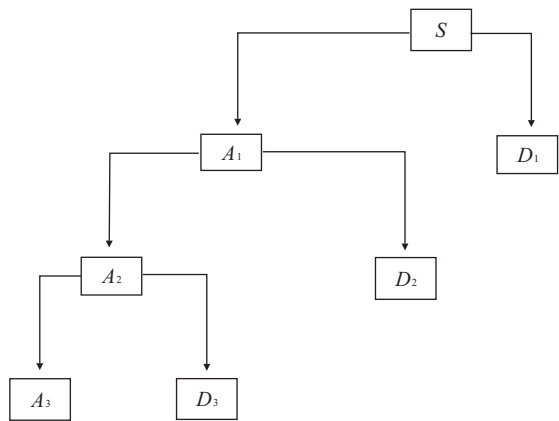


图 2 3 层多尺度分析结构
Fig.2 Multi-wavelet analysis structure

面积布格重力异常进行视密度填图,以此可以划分岩性,确定具有密度与磁性差异岩体的边界,划分地质构造单元,用于解决区域地质研究、油气勘探等领域中的地质构造问题.Parker 法重力异常快速正反演公式为:

$$\tilde{\Delta g}(u,v)=-2\pi f\sigma\left[e^{-HS}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-S)^{n-1}}{n!}(\tilde{h}^n)\right],(4)$$

式中: $\tilde{\Delta g}$ 为重力异常 Δg 的傅里叶变换, σ 为上下界面的密度差, f 为万有引力常数, H 为界面平均深度, $\tilde{h}$ 为平均深度上界面起伏的傅里叶变换, S 为径向频率.把密度也看作为平均密度及它们的变化量组成:

$$\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma,$$

把物性平均值与变化值分开:

$$\tilde{\Delta g}=\tilde{\Delta g}_0+\tilde{\Delta g}_{\Delta},$$

其中:

$$\tilde{\Delta g}_0(u,v)=-2\pi f\sigma_0\left[e^{-HS}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-S)^{n-1}}{n!}(\tilde{h}^n)\right],(5)$$

$$\tilde{\Delta g}_{\Delta}(u,v)=-2\pi f\left[e^{-HS}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-S)^{n-1}}{n!}(\tilde{\Delta\sigma}h^n)\right].(6)$$

$\tilde{\Delta g}_0$ 是取平均密度 σ_0 时重力异常的傅里叶变换,在视密度填图的反演计算中是不变的,可以在计算视密度之前先减去该平均值得到 $\tilde{\Delta g}_{\Delta}$,即可由公式(7)式来反演,并由 $\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma$ 得视密度.

$$\tilde{\Delta\sigma}^{i+1}(u,v)=\frac{e^{HS}}{-2\pi f}\tilde{\Delta g}_0+\sum_{n=2}^{\infty}(\tilde{\Delta\sigma}_ih^n(i))\cdot\frac{(-S)^{n-1}}{n!}.$$

(7)

3 基于重力异常的多尺度边界识别

3.1 重力场小波多尺度分解

小波多尺度分解能够把重力场分解到不同的尺度空间,不同阶小波细节能反映不同深度地质体引起的重力异常,低阶细节代表浅源地质体异常,高阶细节代表深源地质体异常,逼近成分则是区域场的反映,但是小波分解不能建立各阶数据对应的深度概念.为了赋予小波各阶细节具体的深度信息,国内很多学者利用功率谱分析法来计算各阶细节成分所代表的场源近似深度(杨文采等,2001;刘天佑等,2007;姜文亮和张景发,2012),取得良好的应用效果;该方法最早是由 Spector and Grant(1970)提出来,借助重磁异常的对数功率谱的斜率来确定场源深度,详细原理见文献(Bhattacharyya and Leu, 1975),需要注意的是所反映的只是场源近似深度.表 1 列出了本次小波分解的重力各阶细节所对应的场源近似深度.本文将重点对布格重力异常的 1~5 阶细节成分所揭示的深部构造特征及花岗岩岩体侵位信息进行分析.

图 3a 为布格重力异常 1 阶细节,异常零星分布,主要反映了浅表出露的密度不均匀体产生的局部重力异常,引起局部负异常的主要因素是浅部密度不均匀的花岗岩体、岩体边界及断裂构造带等,分布在大岩体周围的孤立局部负异常往往反映了规模较小的岩株,如王仙岭岩体、东坡岩体及香花岭岩体等,这些小岩体往往是成矿的有利地带(李洪昌等,1988;庄锦良等,1988),应该引起注意.

图 3b 为布格重力异常 2 阶细节,根据功率谱法计算该阶细节的场源近似深度为 3 km,主要反映了浅表出露或者半隐伏花岗岩体产生的重力异常,从 2 阶细节图上可以看出局部重力场分区特征明显,以茶陵—郴县断裂为界,北西部位局部负异常较之南东要大,推测可能是因为南东部位出露花岗岩体的整体较薄,而北西部位出露花岗岩体的岩基较深;结合南岭花岗岩带分布(图1),可以得知,北西部位

表 1 小波细节场源近似深度

Table 1 Approximate source depths reflected by wavelet details	
阶次	场源近似深度(km)
2 阶细节	3
3 阶细节	8
4 阶细节	15
5 阶细节	25
2+3 阶细节	5

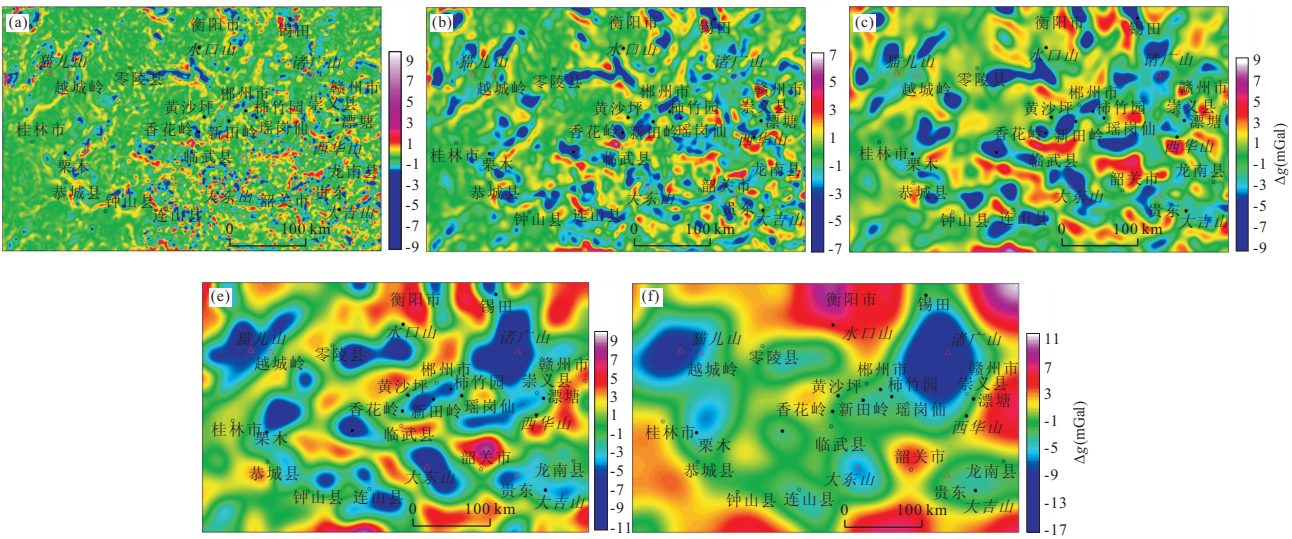


图 3 南岭地区布格重力异常小波多尺度分解

Fig.3 Wavelet multi-scale decomposition of the Bouguer gravity anomaly in Nanling region
a.1 阶细节;b.2 阶细节;c.3 阶细节;d.4 阶细节;e.5 阶细节

花岗岩岩体出露位置与 2 阶细节局部负异常区域大致吻合,但是南东部位如九峰山、贵东以及大东山等局部负异常较出露岩体规模要小得多,推测岩体在深部变窄,其形态符合深部岩浆通过小的通道侵入后而在浅部形成岩盖的模式。

图 3c 为布格重力异常 3 阶细节,根据功率谱分析计算该细节的场源似深度为 8 km,该结果反映了在中地壳部位深部花岗岩的分布,可以看出,研究区一些小岩体及岩株产生的局部异常趋于消失,如王仙岭、千里山及瑶岗仙岩体等,它们在 3 阶细节图上连为一体,推测例如王仙岭、千里山及瑶岗仙岩体在地下 8 km 部位深部岩体是相连的;也因此可以清晰看出本区呈现北东向为主,北西向和东西向次之的交织的重力负异常带,反映了花岗岩侵入及分布主要受到北东—北西—东西向深大断裂的控制。

图 3d 为布格重力异常 4 阶细节,根据功率谱法计算该细节的场源近似深度为 15 km,揭示了中地壳的密度结构,主要反映了深部隐伏花岗岩体的分布,从图中可以看出,在该深度部位负异常连为一体的范围进一步扩大,如千里山—骑田岭—香花岭—万洋山—诸广山岩体、猫儿岭—越城岭岩体以及都庞岭—花山—姑婆山—金鸡顶岩体等;此外,研究区南东和北西部位的四阶细节局部负异常未出现明显分区,规模和幅值相当,全区花岗岩体出露范围明显小于负异常范围,大岩体在深部中地壳位置皆存在较大规模的隐伏岩体。

图 3e 为布格重力异常 5 阶细节,局部异常消

失,特征趋于简单,根据功率谱分析计算出该细节的场源近似深度为 25 km,揭示了下地壳的密度结构,主要反映了深源花岗岩基的分布.从图 3e 中可以看出,大岩体如诸广山、九嶷山以及大东山等皆形成封闭的负异常,表明这些大岩体在深部下地壳位置皆存在较大规模的岩基,可能为陆壳重熔形成的岩浆房;此外,湘东南诸广山及桂东北猫儿岭地区叠加了 2 个醒目的负异常中心,并且研究区所有局部负异常有最终归于这两个负异常中心的趋势,推测上述两地为陆壳重熔的中心位置,越城岭和猫儿山岩体是桂东北岩浆房横向迁移并上升的结果,骑田岭、九峰山以及大东山等岩体则属于诸广山岩浆房横向迁移和上升的分支。

3.2 岩体边界识别

在研究本区花岗岩体边界时,由浅到深、从半隐伏—隐伏—深源岩体多尺度边界信息对研究花岗岩空间侵位特征以及指导不同空间层次找矿预测意义重大.为了揭示不同深源层花岗岩体边界,利用小波多尺度分解和视密度填图方法相结合的处理解释思路:首先通过重力异常小波多尺度分解获得不同深度花岗岩体局部重力异常信息(可以适当重组构),然后利用 Parker 法视密度填图对重力各阶小波细节进行密度反演计算,最后根据各阶细节视密度填图结果,依次划分不同深度层次的花岗岩体边界.研究区布格重力异常 1 阶细节主要代表了浅部出露的密度不均匀地质体的分布,本文重点对小波分解 2~5 阶细节进行计算,并展开以下分析。

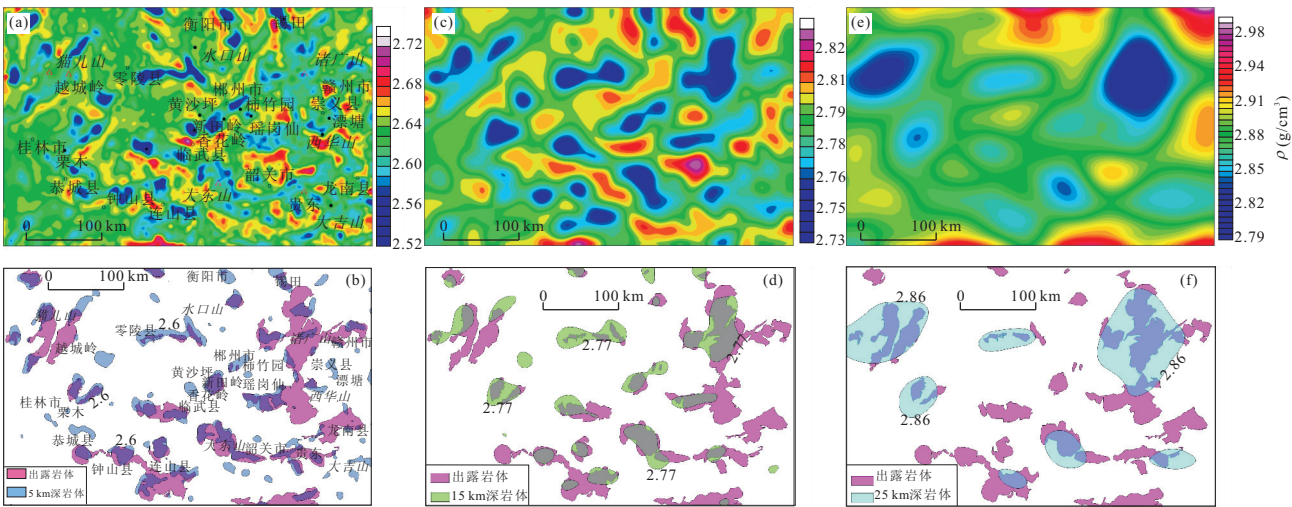


图 4 研究区三维密度结构及不同深源层花岗岩分布

Fig.4 3D density structure and different depth layer granite distribution in study area

a.2+3 阶细节视密度填图;b.5 km 深花岗岩体分布;c.4 阶细节视密度填图;d.15 km 深花岗岩体边分布;e.5 阶细节视密度填图; f.25 km 深花岗岩体分布

图 4a~4b 为 2+3 阶小波细节视密度反演结果和半隐伏花岗岩体边界推断图,其中 2+3 阶细节反映的场源近似深度为 5 km(表 1),根据朱介寿等(2005)提供的湘黔桂构造带岩石圈不同深度密度资料,此层位围岩密度取 2.66 g/cm³,岩体密度为 2.60 g/cm³,研究区半隐伏岩体分 3 类:(1)地表未见出露岩体或仅出现小岩株,而半隐伏岩体很大,这类岩体有三才界、香花岭、钟山珊瑚等地,这类隐伏岩体往往是成矿的重点区域;(2)半隐伏与地表出露岩体一致或局部扩大,如骑田岭、瓦屋塘、萌诸岭一海洋山、阳明山一大义山等,此类岩体一般剥蚀较浅,侵位较深;(3)半隐伏岩体比地表出露岩体范围较小,这种情况比较普遍,尤其以南东部位较多,如大东山、贵东、金鸡顶、诸广山以及越城岭一猫儿山等,推测这类岩体在深部范围缩小,为岩浆入侵的通道,这类模式符合深部岩浆通过小的通道侵入,在浅部形成岩盖.图 4c~4d 为 4 阶小波细节视密度反演结果和隐伏花岗岩体边界推断图,此层位围岩密度取 2.82 g/cm³,岩体密度为 2.77 g/cm³,4 阶细节反应的场源似深度为 15 km,揭示了中地壳位置密度结构,研究区隐伏岩体规模急剧缩小,大岩体深部皆存在一定规模的隐伏岩体,如骑田岭一千里山、诸广山、九嶷山以及大东山等岩体.图 4e~4f 为 5 阶小波细节视密度反演结果和深源花岗岩体边界推断图,5 阶细节反应的场源似深度为 25 km,此层位围岩密度取为 2.91 g/cm³,岩体密度为 2.86 g/cm³,揭示了下地壳位置密度结构,深源岩体范围进一步缩小,千

里山一骑田岭、九嶷山、瓦屋塘等岩体在此深度不存在深源花岗岩基,诸广山、猫儿山一越城岭以及阳明山一大义山等深部对应花岗岩基存在,尤其以诸广山、猫儿山一越城岭两处规模最大,与地表出露的规模相当,推测为陆壳重熔的中心位置,壳源花岗岩的发源地;千里山一骑田岭岩体可能为诸广山深部岩浆库通过上涌通道(茶陵一郴州断裂)横向迁移并上升侵位的结果.

4 深部构造特征

在前人研究成果的基础上(朱介寿,2005;陈毓川,2007;江为为等,2007;杨明桂等,2009;刘国兴等,2012),综合地质地球物理资料,尝试探讨南岭地区岩石圈结构构造、花岗岩成因以及诱发花岗岩热源等一系列地质问题,主要从以下 3 个方面展开.

4.1 南岭地区岩石圈结构

根据江为为等(2007)利用地震层析成像反演得到的包括南岭部分地区在内的地壳和上地幔顶部三维速度扰动图像,将地壳分为 3、13、23 和 36 km 4 个层速度界面,地幔顶部分包括 71 和 120 km 2 个层速度界面.其中,3 和 13 km 的速度分布反映了上地壳的物性特征和构造差异,可以看出衡阳和茶陵一永兴中生代断陷盆地为低速异常区,研究区在赣州以西、桂林以东和衡阳以南表现为高速异常区;23km的速度分布反映了中地壳的物性特征和

构造差异,图中南岭地区低速区扩大,异常值减小,在诸广山—万洋山地区和越城岭—猫儿山地区最为明显;研究区 36 km 速度扰动图和23 km类似,反映了中地壳的物性特征和构造差异;这一结果与黑水—泉州爆破地震测深结果反映的茶陵—永兴地区 15~30 km 左右存在壳内低速带结果一致(朱介寿, 2005);上述结果揭示诸广山—万洋山和越城岭—猫儿山地区深部 23~36 km 可能存在大面积的低速陆壳重熔区域.71 和 120 km 的速度分布结果反映了上地幔顶部的速度分异和物性特征,衡阳盆地低速异常收缩,进一步变为高速区,研究区只剩下诸广山和越城岭地区低速区,并在 71 km 处速度达到最低,推测为软流圈上涌形成的低速熔体.

4.2 深部岩浆房是否存在

南岭地区深部是否存在岩浆房、壳源花岗岩发源地在哪等问题一直是地学界关注的热点和争论的焦点(邓晋福等, 2000; 吴福元等, 2003; 万天丰和赵庆乐, 2012),但是受制于缺乏有力证据,始终未能达成共识.针对上述问题,以深部地球物理资料为依

据,研究发现诸广山和越城岭—猫儿山地区深部存在大规模岩浆房的证据,并展开相关讨论分析:

4.2.1 诸广山岩浆房 推断依据:(1)视密度填图确定的深源花岗岩体范围和地震层析成像的低速异常显示在该地区中下地壳位置存在大面积的陆壳重熔区域;(2)地震层析成像结果揭示,在诸广山地区 71~120 km 处的上地幔顶部存在低速熔融体;(3)大地电磁反演结果(图 5)显示,位于赣州西部诸广山岩体 40 km 以下深部有一个规模较大的高温低阻区,其下部一直延伸至软流圈,形成一个与软流圈连通的柱状体,此高温低阻区的上部是诸广山岩体群,推测此高温低阻区是由于软流圈高温物质随着地壳岩石圈裂解出来的通道而上侵所造成的.综合分析,笔者认为诸广山地区深部的上地幔顶部存在软流圈上涌形成的残留岩浆房(图 6),这个残留岩浆为下地壳原岩部分熔融提供热源,并形成以诸广山为中心的陆壳重熔区,为周围中生代岩浆大爆发的发源地,也为该地区大规模区域成矿作用提供了矿源和热源,形成以千里山—骑田岭为中心的南岭

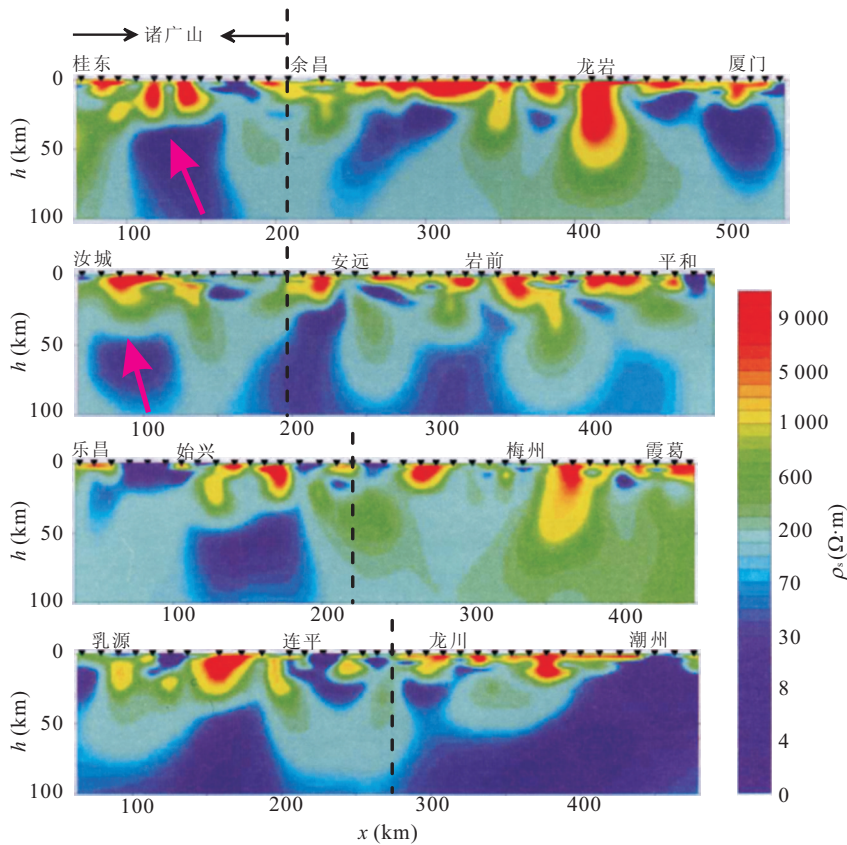


图 5 华南大地电磁测深二维反演结果

Fig.5 2D MT inversion results in South China

图中数据据高锐等, 2011; 深部探测技术与实验研究专项年报(2011)深部探测技术实验与集成; 大地电磁测深大剖面观测实验与壳幔三维电性研究

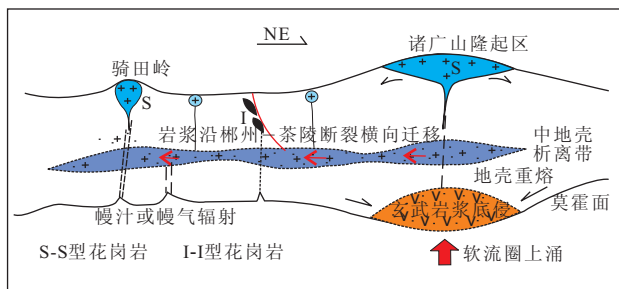


图6 湘南地区燕山期深部地壳作用模式(据杨明桂,1996修改)

Fig.6 Action model of the deep crust in Yanshan period

深部矿集区的最佳场所。

4.2.2 猫儿山—越城岭岩浆房 推断依据:(1)地震层析成像结果揭示,在该地区 23~36 km 的下地壳存在低速异常带,推测为陆壳重熔区域;(2)视密度填图确定的深源花岗岩体范围显示在该地区 25 km 存在大规模的岩浆房;(3)地震层析成像结果揭示在诸广山地区,71~120 km 处的上地幔顶部存在低速熔融体。综上分析,笔者推测猫儿山—越城岭地区中下地壳位置亦存在大规模陆壳重熔区,71~120 km 处的低速熔融体可以认为是软流圈上涌的直接证据,故其诱发热源的模式同诸广山地区可能类似。

4.3 南岭花岗岩成因模式

综合以上地质地球物理认识,对南岭地区花岗岩的成因模式(图6)得到以下初步认识:(1)根据重力和大地电磁测深反演得到的花岗岩侵入体的深部延深、赋存等结果,揭示了大多数岩体侵位深度不超过 25 km,并在中下地壳存在壳源花岗岩的发源地—陆壳重熔区,证实了南岭地区花岗岩成因以陆壳重熔为主。(2)南岭地区燕山运动早期太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中,岩石圈减薄,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二者相结合导致原岩的部分熔融而形成燕山早期的“南岭花岗岩带”(陈毓川,2007);其中诸广山地区软流圈上涌柱深度为 40 km,热烘烤使得中下地壳原岩部分重熔形成壳源型 S 型花岗岩,柱头内热浮物质也可以熔穿上部岩石圈注入地壳(壳幔混熔),形成 I 型花岗岩,在研究区以后者为主。

5 结论与认识

本文基于南岭地区 1:20 万布格重力异常资料,利用小波多尺度分解和视密度填图方法来研究花岗岩侵入体的侵位特征,并对结果进行分析评价,

同时结合地震和大地电磁测深结果,综合地质地球物理认识,对研究区花岗岩边界、诱发热源及成因模式等问题进行了初步探讨,得到了以下结论:(1)三维视密度反演和不同深源层岩体边缘识别得到了深部 5、15 及 25 km 花岗岩侵入体的分布模式,揭示了东南区深部岩浆沿着小通道上涌形成岩盖,出露岩体较薄,北西区岩体较厚,侵位深度较大,剥蚀较浅。(2)南岭花岗岩侵入体西厚东薄,厚度一般为 6~15 km,少数岩体深部侵位达到 25 km,进一步证实了该地区花岗岩成因以陆壳重熔为主的地质推论。(3)在燕山运动早期太平洋板块向欧亚板块的俯冲过程中,造成软流圈上涌、玄武岩浆底侵,为壳幔物质交换提供的热源,并导致原岩的部分熔融而形成燕山早期的“南岭花岗岩带”;大地电磁测深资料揭示了诸广山地区存在软流圈上涌通道,并在上地幔顶部形成残留岩浆房,为下地壳原岩部分熔融提供热源,也为该地区大规模区域成矿作用提供了物源和热源,形成以千里山—骑田岭为中心的南岭深部矿集区的最佳场所。(4)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二者相结合导致原岩的部分熔融,形成以诸广山为中心的陆壳重熔区,为周围中生代岩浆大爆发的发源地;此外,猫儿山—越城岭地区中下地壳位置可能也存在大规模陆壳重熔区。

致谢:本文得到项目组於崇文院士、张德会教授及刘宁强博士等人的指导和帮助,同时评审专家对本文提出了中肯的建议,在此一并表示诚挚的感谢。

References

- Bhattacharyya, B. K., Leu, L. K., 1975. Spectral Analysis of Gravity and Magnetic Anomalies due to Two Dimensional Structures. *Geophysics*, 40(6): 993—1013. doi: 10.1190/1.1440593
- Chen, Y. C., 2007. Chinese Mineralization System and Assessment of Regional Mineralization. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deng, J. F., Zhao, G. C., Zhao, H. L., et al., 2000. Yanshanian Igneous Petrotectonic Assemblage and Orogenic-Deep Processes in East China. *Geological Review*, 46(1): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. W., Li, T. D., 2011. SinoProbe Group. Sinoprobe Team Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe). *Acta Geoscientica Sinica*, 32(s): 3—23 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. M., Xie, C. F., Peng, S. B., et al., 2006. Geochemistry and

- Crust-Mantle Magmatic Mixing of the Qitianling Granites and Their Dark Microgranular Enclaves in Hunan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(6): 557—569 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., 2009. The Continental Geological Processes and Mineralization. Science Press, Beijing, 305—309 (in Chinese).
- Hou, Z. Z., Yang, W. C., 1997. Wavelet Transform and Multi-Scale Analysis on Gravity Anomalies of China. *Journal of Geophysics*, 40(1): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Hu, R. Z., Bi, X. W., Peng, J. T., et al., 2007. Some Problems Concerning Relationship between Mesozoic-Cenozoic Lithospheric Extension and Uranium Metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2): 139—152 (in Chinese with English abstract).
- Hu, R. Z., Mao, J. W., Bi, X. Y., et al., 2008. Several Developing Directions of Relationship between Continental Geodynamics and Mineralization. *Geochimica*, 37(4): 344—352 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W. L., Zhang, J. F., 2012. Fine Crustal Structure beneath Capital Area of China Derived from Gravity. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 1646—1661 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W. W., Hao, T. Y., Xu, Y., et al., 2007. Comprehensive Geological and Geophysical Study in Middle Southern Region of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(1): 171—183 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. C., Tang, X. L., Tang, J. M., 1988. Characteristics of Acidic and Medium Acidic Small Igneous Bodies Relating to Lead-Zinc Deposits and Occurring in Nanling and Its Vicinity. *Hunan Geology*, 7(2): 31—42 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. X., Han, K., Han, J. T., 2012. Lithosphere Electrical Structure in Southeast Coastal Region, South China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 536—544 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T. Y., Wu, Z. C., Zhan, Y. L., et al., 2007. Wavelet Multi-Scale Decomposition of Magnetic Anomaly and Its Application in Searching for Deep-Buried Mineral in Crisis Mines: A Case Study from Daye Iron Mines. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 135—140 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Q. T., Chang, Y. F., SinoProbe-03 Team, 2011a. Crustal Structure and Three-Dimensional Deep Exploration Technology for Mineral Resources: An Introduction to SinoProbe-03 Project. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(S1): 49—64 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Q. T., Shi, D. N., Tang, J. T., et al., 2011b. 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 Geoscientica Sinica*, 32(3): 257—268 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Li, H. Y., et al., 1995. Nd-Sr Isotopic and Petrogenetic Studies of the Qianlishan Granite Stock, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 14(3): 235—242 (in Chinese with English abstract).
- Parker, R. L., 1973. The Rapid Calculation of Potential Anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4): 447—455. doi: 10.1111/j.1365—246X.1973.tb06513.X
- Parker, R. L., Huestis, S. P., 1974. The Inversion of Magnetic Anomalies In the Presence of Topography. *Journal of Geophysical Research*, 79(11): 1587—1593.
- Qin, B. H., 1984. The Interpretation of Regional Gravity and Magnetic Anomalies and Their Application of Mineralogical Progenoses in Southern Hunan. *Hunan Geology*, 3(2): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Qin, B. H., 1987. A Geological Interpretation on the Regional Gravity and Magnetic Anomalies in Nanling Area. *Hunan Geology*, 6(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Q. Q., Yang, Z. K., 1994. Practical Wavelet Analysis. Xi'an University of Electronic Science and Technology Publishing House, Xi'an (in Chinese).
- Rao, J. R., Jin, X. Y., Zeng, C. F., 2006. Ore-Controlling Regularities of Deep Structure Magma and Seeking Mineral Orientation on the Northern Margin of the Middle Segment of Nanling. *Land & Resources Herald*, 3(3): 31—36 (in Chinese).
- Shen, W. Z., Ling, H. F., 1996. Isotopic Geochemical Characteristics and Material Sources of Tin-bearing Granite Porphyry in Yanbei and Tishan. *Acta Geoscientica Sinica*, 17(1—2): 117—123 (in Chinese with English abstract).
- Shi, D. N., Lü, Q. T., Xu, W. Y., et al., 2012. Crustal Structures beneath the Mid-Lower Yangtze Metallogenic Belt and Its Adjacent Region 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).
- Shu, L. S., Zhou, X. M., Deng, P., et al., 2006. Principal Geological Features of Nanling Tectonic Belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251—265 (in Chinese with English abstract).
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical Models for Interpre-

- ting Aeromagnetic Data. *Geophysics*, 35(2): 293—302. doi:10.1190/1.1440092
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the Lithosphere Thinning in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., Zhao, Q. L., 2012. The Genesis of Tectono-Magmatism in Eastern China. *Sci. China Earth Sci.*, 42(2): 155—163 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Shen, W. Z., 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209—220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Shen, W. Z., Liu, C. S., et al., 1994. Geochemical Characteristics and Origin of the Volcanic-Intrusive Complex in Yanbei, Jiangxi Province. *Science in China (Series B)*, 24(5): 531—538 (in Chinese).
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Chen, Z. H., et al., 2007. Assessment on Mineral Resource in Nanling Region and Suggestion for Further Prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 882—890 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, H. Q., Zhao, K. D., Jiang, S. Y., et al., 2003. Lead Isotope Geochemistry and Ore-Forming Age of Jinchuantang Sn-Bi Deposit in Dongpo Ore Field, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 22(3): 264—270 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., Peng, N., 2009. Regional Ore Zonality of the Nanling Region (Spatio-temporal Synchronization in Complex Ore-Forming System). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yan, J. Y., Lü, Q. T., Meng, G. X., et al., 2009. Aeromagnetic 3D Inversion Imaging for Intermediate-Acid Intrusive Bodies and Its Indication Significance of Deep Ore Prospecting in Tongling Ore Concentration District. *Mineral Deposits*, 28(6): 838—849 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. G., Huang, S. B., Lou, F. S., et al., 2009. Lithosphere Structure and Large-Scale Metallogenic Process in Southeast China Continental Area. *Geology in China*, 36(3): 528—543 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., 2003. Layered Mantle Reflectors in Dabie-Sulu Area and Their Interpretation. *China Journal of Geophysics*, 46(2): 191—196 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Shi, Z. Q., Hou, Z. Z., et al., 2001. Discrete Wavelet Transform for Multiple Decomposition of Gravity Anomalies. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(4): 534—541 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. S., Cai, X. L., Cao, J. M., et al., 2005. The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhu, J. C., Zhang, H., Xie, C. F., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology, Petrology and Geochemistry of Zhujianshui Granite, Qitianling Pluton, Southern Hunan Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 335—342 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. Q., Huang, G. Q., 1996. 3D Inversion of Gravity and Magnetic Data and Metallogenic Prediction in Shizhuyuan Region. *Mineral Resources and Geology*, 10(1): 66—72 (in Chinese).
- Zhao, Z. H., Bao, Z. W., Zhang, B. Y., et al., 2000. The Crust-Mantle Interaction Geodynamics Setting of Shizhuyuan Super-Large W Polymetallic deposit. *Science in China (Series D)*, 30(S): 161—168 (in Chinese).
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks of Southern China: Implication for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magma. *Progress of Natural Science*, 10(3): 240—247 (in Chinese).
- Zhang, J. S., Gao, R., Li, Q. S., et al., 2010. Characteristics of Gravity and Magnetic Field of Luzong Volcano Basin and Its Periphery. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2613—2622 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, J. L., Liu, Z. W., Tan, B. X., et al., 1988. Relation of the Small Rock Bodies in Southern Hunan to the Formation of Ore Deposits and Prognosis of Concealed Deposits. *Hunan Geology*, 4(S): 1—198 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈毓川, 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等, 2000. 中国东部燕山期火山岩构造组合与造山—深部过程. 地质评论, 46(1): 41—48.
- 董树文, 李廷栋, SinaProbe 团队, 2011. 深部探测技术与实验研究 (SinaProbe). 地球学报, 32(s): 3—23.
- 付建明, 谢才富, 彭松柏, 等, 2006. 湖南骑田岭花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学与壳幔岩浆的混合作用. 地球学报, 27(6): 557—569.
- 侯增谦, 2009. 大陆地质过程与大陆成矿作用. 北京: 科学出版社, 305—309.
- 侯遵泽, 杨文采, 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. 地球物理学报, 40(1): 85—95.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等, 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀矿成矿关系研究的若干问题. 矿床地

质,26(2):139—152.

胡瑞忠,毛景文,毕献武,等,2008.浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势.地球化学,37(4):344—352.

姜文亮,张景发,2012.首都圈精细地壳结构——基于重力场的反演.地球物理学报,55(2):1646—1661.

江为为,郝天珧,胥颐,等,2007.中国中南地区综合地质地球物理研究.地球物理学报,50(1):171—183.

李洪昌,唐先礼,唐建美,1988.南岭及其邻区与铅锌矿床有关的酸、中酸性小岩体特征.湖南地质,7(2):31—42.

刘国兴,韩凯,韩江涛,2012.华南东南沿海地区岩石圈电性结构.吉林大学学报(地球科学版),42(3):536—544.

刘天佑,吴招才,詹应林,等,2007.磁异常小波分析及危机矿上的深部找矿——以大冶铁矿为例.地球科学——中国地质大学学报,32(1):135—140.

吕庆田,常印佛,SinaProbe-03 项目组,2011a.地壳结构与深部矿产资源立体探测技术实验——SinaProbe-03 项目介绍.地球学报,32(S1):49—64.

吕庆田,史大年,汤井田,等,2011b.长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测——Sinaprobe-03 年度进展综述.地球学报,32(3):257—268.

毛景文,李红艳,裴荣富,1995.湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究.矿床地质,14(3):235—242.

秦葆瑚,1984.湘南区域重磁异常的地质解释及其在成矿预测中的应用,湖南地质,3(2):1—14

秦葆瑚,1987.南岭区域重磁异常的地质解释.湖南地质,6(1):1—15.

秦前清,杨宗凯,1994.实用小波分析.西安:西安电子科技大学出版社.

饶家荣,金小燕,曾春芳,2006.南岭中段北段深部构造—岩浆岩控矿规律及找矿方向.地质勘查,3(3):31—36.

沈渭洲,凌洪飞,1996.岩背和塌山含锡花岗斑岩的同位素地球化学特征和物质来源.地球学报,17(1—2):117—123.

史大年,吕庆田,徐文艺,等,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.

舒良树,周新民,邓平,等,2006.南岭构造带的基本地质特征.地质评论,52(2):251—265.

吴福元,葛文春,孙德有,等,2003.中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题.地学前缘,10(3):51—60.

万天丰,赵庆乐,2012.中国东部构造—岩浆作用的成因.中国科学(D 辑),42(2):155—163.

王德滋,沈渭洲,2003.中国东南部花岗岩成因及地壳演化.地学前缘,10(3):209—220.

王德滋,沈渭洲,刘昌实,等,1994.江西岩背火山侵入杂岩的地球化学特征和成因.中国科学(B 辑),24(5):531—538.

王登红,陈毓川,陈郑辉,等,2007.南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究.地质学报,81(7):882—890.

肖红全,赵葵东,蒋少涌,等,2003.湖南东坡矿田金船塘锡铋矿床铅同位素地球化学及成矿年龄.矿床地质,22(3):264—270.

於崇文,彭年,2009.南岭地区区域成矿分带性—复杂性成矿系统中的时—空同步化.北京:地质出版社.

严加永,吕庆田,孟贵祥,等,2009.铜陵矿集区中酸性岩体航磁 3D 成像及对深部找矿方向的指示.矿床地质,28(6):838—849.

杨明桂,黄水保,楼法生,等,2009.中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用.中国地质,36(3):528—543.

杨文采,2003.大别苏鲁地区层状地幔反射体及其解释.地球物理学报,46(2):191—196.

杨文采,施志群,侯遵泽,等,2001.离散小波变换与重力异常多重分解.地球物理学报,44(4):534—541.

朱介寿,蔡学林,曹家敏,等,2005.中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化.北京:地质出版社.

朱金初,张辉,谢才富,等,2005.湘南骑田岭竹视水花岗岩的锆石 SHRIMP 年代学和岩石学.高校地质学报,11(3):335—342.

朱自强,黄国祥,1996.柿竹园矿田重磁资料的三维反演解释及成矿预测.矿产与地质,10(1):66—72.

赵振华,包志伟,张伯友,等,2000.柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景.中国科学(D 辑),30(S):161—168.

周新民,李武显,2000.中国东部晚中生代火成岩成因:岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式.自然科学进展,10(3):240—247.

张季生,高锐,李秋生,等,2010.庐枞火山盆地及其外围重磁场特征.岩石学报,26(9):2613—2622.

庄锦良,刘钟伟,谭必祥,等,1988.湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测.湖南地质,4(S):1—198.