

长江中下游成矿带宣城矿集区重磁场特征 与找矿启示*

陈安国^{1,2}, 周涛发^{1,3**}, 刘东甲¹, 杜建国², 兰学毅⁴, 郭冬⁴

(1 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 3 安徽省矿产资源与
矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 4 安徽省勘查技术院, 安徽 合肥 230031)

摘 要 宣城矿集区位于长江中下游成矿带东段的安徽省南陵-宣城盆地, 是长江中下游成矿带新一轮找矿工作的重点勘查区。为查明成矿深部背景, 发掘成矿潜力, 亟待了解深部结构特征。本文使用地面测量 1:25 000 重力数据和 1:10 000 磁力数据, 通过重磁场分离和密度、磁化强度三维反演, 结合岩矿石的密度、磁化率等物性测量结果, 以及区域地质和矿床资料, 以期揭示深部构造及与成矿关系。研究表明, 新河庄背斜、陈家湾向斜、马山埠背斜和昆山向斜等褶皱构造横向上剩余密度正负差异显著呈相间分布的深部特征, 垂向上褶皱构造的最大深度约为 2 km; 在褶皱构造下方分布北西浅、往南东逐渐加深的低密度、低磁性层, 推测可能为研究区内茅山-九连山推覆构造的滑脱面。马山埠背斜轴部花岗闪长斑岩附近的重高磁高组合异常是铜山-荞麦山矽卡岩型矿床的找矿线索, 然而成矿岩体规模较小, 深部磁化强度弱, 马山埠背斜附近深部找矿潜力有限。茶亭矿区呈重高磁高组合异常特征, 同时成矿的石英闪长玢岩岩体与围岩灰岩、上覆火山岩磁性差异明显, 这些特征是重要的找矿线索。文章研究结果证实, 茶亭下方-400~1900 m 磁化强度正异常区域对应茶亭铜金矿床, 这为在研究区其他地点深部进一步寻找斑岩型、隐爆角砾岩型铜金矿床提供了地球物理依据。

关键词 地质学; 长江中下游成矿带; 重磁场分离; 重磁三维反演; 深部找矿; 宣城矿集区

中图分类号: P618.41; P618.51

文献标志码: A

Gravity and magnetic characteristics of Xuancheng ore concentration area along Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt: Implications to ore prospecting

CHEN AnGuo^{1,2}, ZHOU TaoFa^{1,3}, LIU DongJia¹, DU JianGuo², LAN XueYi⁴ and GUO Dong⁴

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2 Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 3 Anhui Provincial Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, Anhui, China; 4 Geological Exploration Technologies Institute of Anhui Province, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract

The Xuancheng ore concentration area, located in the Nanling-Xuancheng Basin in Anhui Province in eastern of the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, is one of the key exploration areas in this belt. In order to find out the background and potential of mineralization, it is necessary to study the characteristics of deep structure of this region. Based on the 1:25 000 ground gravity and 1:10 000 ground magnetic data as well

* 本文得到合肥市博士后基金、国家重点研发计划专项(编号:2016YFC0600209)和安徽省博士后基金(编号:2018B256)联合资助
第一作者简介 陈安国,男,1979年生,博士,高级工程师,主要从事重磁场分离和反演工作。Email: anguo-chen@163.com

** 通讯作者 周涛发,男,1964年生,教授,博士生导师,主要从事矿床学等方面的教学和科研工作。Email: tfzhou@hfut.edu.cn
收稿日期 2020-02-11; 改回日期 2020-08-12。秦思婷编辑。

as gravity and magnetic field separation and density, magnetization three-dimensional inversion, and regional geology, the authors tried to reveal the inner relationship between the deep structure and mineralization. The results show that positive and negative differences of residual density of the anticlines such as Xinhezhuang, Chenjiawan, Mashanbu and Kunshan in this region are significant, with features of alternative distribution in horizontal direction and the maximum depth of Ca. 2 km in vertical direction. The low-density and low-magnetic layer, which is distributed under the fold structure, is characterized by shallowing in the northwest and gradually deepening in the southeast, indicating that it may be the slip surface of Maoshan-Jiulianshan nappe structure in the study area. The high magnetism and high weight anomaly near the granodiorite porphyry in the axis of the Mashanbu anticline is a prospecting clue for the Tongshan-Qiaomaishan skarn deposit; however, the small scale ore-forming pluton and the weak magnetic intensity indicate a limited ore prospecting potential in this area. Together with the obvious magnetic differences between quartz-diorite porphyrite and surrounding limestone and the overlying volcanic rocks in the Chating mining area, the high magnetism and weight anomaly feature seems to be an important prospecting clue. It is proved that the top and edge of the positive magnetic intensity anomaly area from -400 m to -1900 m correspond to the Chating Cu-Au deposit, which will provide geophysical basis in search for porphyry, cryptoexplosive breccia and hydrothermal lead-zinc deposits in other regions.

Key words: geology, the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, regional-residual anomaly separation of gravity and magnetic data, three-dimensional inversion of gravity and magnetic data, deep prospecting, Xuancheng ore district concentration area

宣城矿集区位于长江中下游成矿带东段的安徽省南陵-宣城盆地,是长江中下游成矿带新一轮找矿工作的重点勘查区。为了进一步研究地壳精细结构与控矿背景,评价深部矿产资源潜力。国家重点研发计划项目“华南陆内成矿系统的深部过程与物质响应”在宣城地区开展了综合地球物理探测工作,实施多条反射地震剖面、大地电磁测深剖面和高精度重磁测量,开展典型矿床成矿模式研究。其中,对大比例尺的重磁观测数据开展位场分离与三维反演工作,是推动金属矿产资源 500~2000 m“第二深度空间”(滕吉文等,2007)找矿的较为经济有效的地球物理方法。

重磁异常是地下介质的不均匀分布的反映,观测的重磁异常数据中包含了从地表到深部的地下介质不均匀分布引起的各种响应。由实测重磁异常反演解释地下结构,首先必须从各种叠加异常中分离出目标地质体引起的异常,然而,从叠加重磁异常中分离出某个或多个地质体引起的异常,十分困难。传统的位场分离方法如多项式拟合法(Al-Zoubi et al.,2013)、延拓法(Jacobsen,1987; Pawlowski,1995)、最小曲率法(Briggs,1974; 纪晓琳等,2015)、匹配滤波法(Spector et al.,1970)等,一般是将位场二分为区域场和局部场,无法将位场进一步细分。近年来出现的小波多尺度分解(Fedi et al.,1998)、优化滤波

(郭良辉等,2012)等方法,突破了传统位场分离将异常场二分的局限。

通过重磁异常的三维反演技术对地质体的三维形态进行研究,目前主要是最优化反演法(Li et al.,1996;1998),通过位场分层分离技术(徐世浙等,2009)和改进的波数域迭代向下延拓方法(刘东甲等,2009)在重磁三维反演方面也取得了进展。重磁位场分离和三维反演技术在深部找矿和深部构造研究中,取得了显著的效果。Pawlowski(1994)使用格林等效层理论构建优选延拓因子,得到Paradox盆地的北西向盐丘褶皱构造。刘天佑等(2007)以大冶铁矿为例,将磁异常进行小波多尺度分解,结合谱分析解释深部盲矿体,经钻孔查验发现深部的磁铁矿体。严加永等(2014)对安徽沙溪地区的重磁资料开展位场分离和三维岩性反演,提出了寻找斑岩型铜金矿的有利地段。葛粲等(2017)使用重力异常分层分离的改进方法,研究了安徽五河地区的构造格架,揭示了五河断裂等深部产状。

在国家重点研发计划项目等经费资助下,宣城地区重要成矿区域已经完成了1:25 000的地面重力测量和1:10 000地磁测量。本文依据新的重、磁资料,通过解析延拓、匹配滤波、优化滤波等方法进行重、磁场分离,基于位场分离得到的局部异常场开展重磁三维反演,以揭示宣城矿集区3 km以浅

的结构特征,为深部找矿和深部构造研究提供信息和依据。

1 地质背景

宣城矿集区位于扬子陆块北缘的长江中下游成矿带内,处在下扬子长兴-广德拗陷褶皱断束即宣城-郎溪-广德盆地的东北缘,西北紧邻宁芜火山岩盆地(图1)。据安徽省地质调查院(2005),宣城地区地层属于下扬子地层区江南地层分区,志留系—第四系

均有出露,发育有以浅海相、滨海相碎屑岩为主的志留系和泥盆系,以碳酸盐岩为主的石炭系—三叠系,以及其后的陆相碎屑岩、火山碎屑岩系。

区域构造形迹总体呈北东向,表现为北东向展布的山脉和盆地相间分布,在区域中部,安徽境内的九连山和江苏境内的茅山连成一线,呈北东-北北东向“S”形展布,构成茅山-九连山山脉,山脉主体由志留系一下三叠统,山脉高100~400 m。山脉西侧及盆地中主要出露下白垩统火山岩系和上白垩统红色砂砾岩。茅山-九连山山脉自南往北依次由九连山背

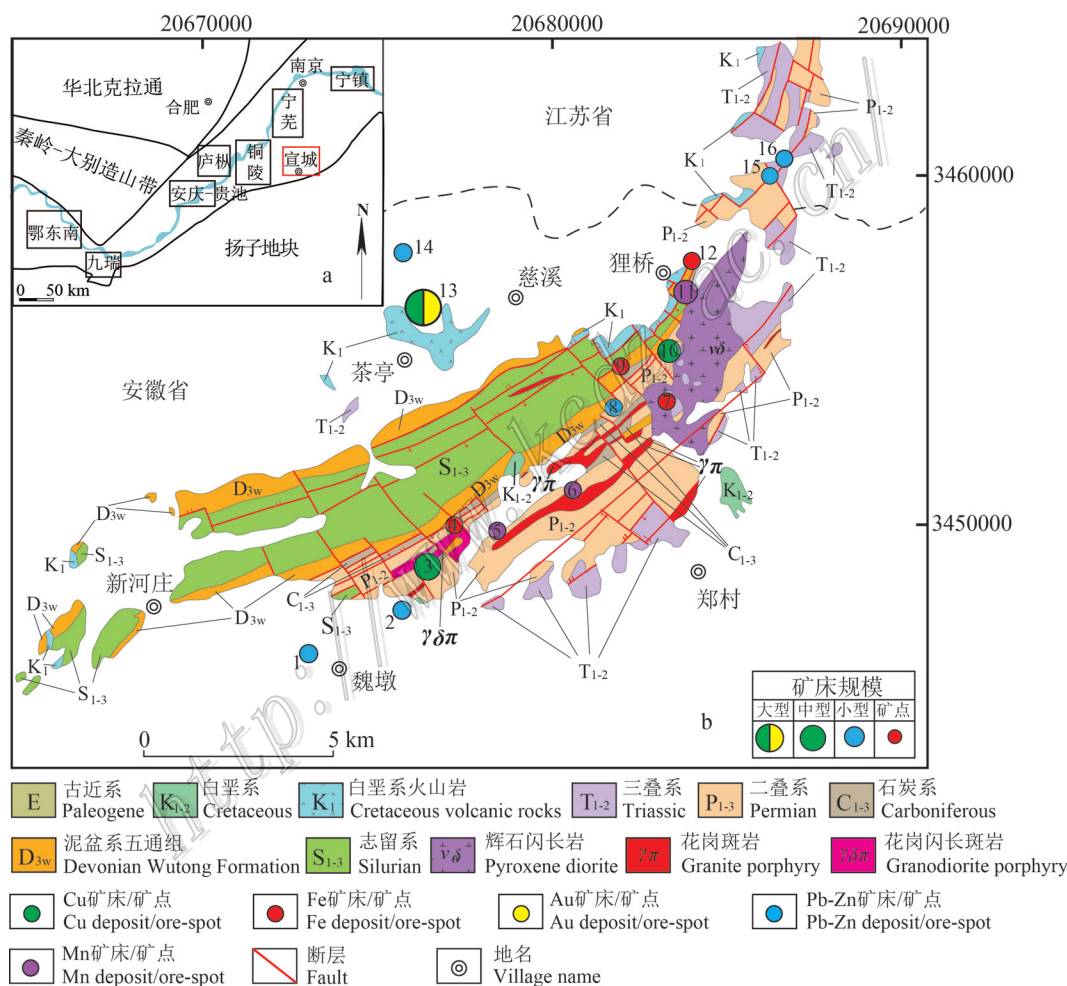


图1 宣城矿集区区域地质图(据安徽省地质调查院,2005)

- 1—魏墩 Pb-Zn 矿; 2—马尾山 Pb-Zn 矿; 3—铜山-荞麦山 Cu-Fe-S 矿(多个矿床); 4—荞麦山含锆 Fe 矿; 5—石门山 Mn 矿; 6—南门岭 Mn 矿;
7—小昆山 Fe 矿; 8—茶山 Pb-Zn 矿; 9—抬头山 Fe 矿; 10—狮子山 Cu 矿; 11—塔山 Mn 矿; 12—朱山 Fe 矿; 13—茶亭 Cu-Au 矿;
14—汤家咀 Pb-Zn 矿; 15—尖山 Pb 矿; 16—大花山 Pb 矿

Fig.1 Regional geological map of the Xuancheng ore concentration area(after Geological Survey of Anhui Province, 2005)

- 1—Weidun Pb-Zn deposit; 2—Maweshan Pb-Zn deposit; 3—Tongshan-Qiaomaishan Cu-Fe-S deposits; 4—Qiaomaishan Fe deposit; 5—Shimen-shan Mn deposit; 6—Nanmenlin Mn deposit; 7—Xiaokunshan Fe deposit; 8—Chashan Pb-Zn deposit; 9—Taitoushan Fe deposit; 10—Shizishan Cu deposit; 11—Tashan Mn deposit; 12—Zhushan Fe deposit; 13—Chating Cu-Au deposit; 14—Tangjiazui Pb-Zn deposit; 15—Jianshan Pb deposit; 16—Dahuashan Pb deposit

斜、新河庄背斜、茅山背斜3段组成,大致以狸桥、新河庄两地为界,为复背斜。本文的研究主体即为处于新河庄和狸桥之间的新河庄背斜。

区内岩浆岩发育(Zhou et al.,2015),主要出露一套陆相喷溢相-浅成侵入相中酸性岩石:喷溢相岩石主要有流纹岩、流纹英安岩、英安岩、安山岩、安山质凝灰岩、安山质角砾熔岩和火山角砾岩等,主要地层单元为中分村组、大王山组等;浅成侵入相岩石主要有花岗岩、花岗斑岩、闪长岩、闪长玢岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、辉石闪长岩等。

矿产资源主要有Cu、Fe、Au、Pb、Zn和Mn矿,矿床成因类型以矽卡岩型、热液型为主。近年来,深部找矿工作取得重大进展,新发现宣城茶亭铜金矿床,初步估算工业Cu金属量53万吨,平均品位0.52%;共生/伴生Au金属量79 t,平均品位0.77 g/t,已达到大型规模(杜建国等,2017;徐晓春等,2018)。

2 物性与重磁场特征

2.1 物性分析

查明地层和岩体的物性参数,是解读重磁场异常的前提和必要条件。根据安徽省勘查技术院《安徽1:5万湾沚镇、沈村、寒亭镇、宣城幅重力调查报告》对南陵-宣城地区采集的大量岩矿石标本的测量统计结果,宣城地区主要地层和岩体的密度统计如表1。

由表1可知,白垩系—第四系的密度低,属于形

成年代较新且广泛覆盖于地表的低密度层。志留系—侏罗系之间各层密度有显著的差异,二叠系孤峰组和龙塘组(P_2)具有偏低的密度值平均值为 2.37 g/cm^3 ,与之相邻的石炭系中上统($C_{2,3}$)和二叠系栖霞组(P_1)具有明显偏高的密度值平均值为 2.68 g/cm^3 ,是研究区内重要的赋矿地层。泥盆系五通组砂岩是接触交代热液型矿床的赋矿地层,密度平均值为 2.56 g/cm^3 。花岗闪长岩类是研究区内主要的含矿岩体,密度平均值为 2.65 g/cm^3 。

由统计表1结果可知,区内地层的磁化率变化范围不是很大,约 $0\sim 40\times 10^{-6}\text{SI}$,各地层磁性较弱;研究区内主要的花岗斑岩、花岗闪长岩和辉石闪长岩类具有明显高出两个数量级的磁化率,约 $1000\times 10^{-6}\sim 1800\times 10^{-6}\text{SI}$,研究区内主要的强磁异常由中酸性侵入岩体和磁性矿体形成,茶亭矿区还叠加了浅层中分村组火山岩的磁异常。

2.2 重磁场特征

本文研究数据来自于安徽省勘查技术院,重力数据为2014年采集的1:25 000测量数据,重力异常总精度达 $\pm 0.028\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;磁力数据为2014年采集的1:10 000测量数据,磁异常总精度达 $\pm 2.12 \text{ nT}$ 。

图2a是研究区的布格重力异常图,布格重力异常的高值分布在研究区域的中部和西北侧,研究区中部的布格重力高值异常在新河庄-狸桥以东呈现北东向的高-低-高-低相间展布,而在新河庄-狸桥以西的茶亭附近呈面状的高重力异常分布。研究区的西南和东南两侧重力低,是因为这两侧毗邻南漪湖水域。

根据IGRF12(Thébault et al.,2015)地磁场参考模型,本次以研究区中心坐标选择化极参数:磁倾角 47.47° ,磁偏角 -5.43° 。通过化极消除中低纬度的地磁斜磁化现象,得到垂直磁化异常,以精确研究矿床和异常的关系。化极后的磁异常显示(图2b),研究区内最大规模和强度的磁异常分布在狸桥的南东,与辉石闪长岩体(昆山岩体)的分布一致,荞麦山附近具有小规模分布的弱磁异常。茶亭附近呈现不连续的串状磁异常,该磁异常与白垩系中分村组火山岩分布区(图1b)对应。研究区西北部为宽缓分布的面状弱磁异常,其他区域以大面积分布的负磁异常为主。

3 重磁场分离

重磁异常是地下介质的不均匀分布的反映。重力异常是介质密度的响应,高低相间的布格重力异

表1 宣城地区地层或岩石密度和磁化率统计表
Table 1 Density and susceptibility statistics of strata or rocks in Xuancheng area

地层和岩体	代号	密度/(g/cm^3)	磁化率/(10^{-6}SI)
第四系	Q	1.78~1.93	19.9~99.5
古近系	E	2.21~2.49	10.7~30.3
白垩系	K	1.98~2.45	5.8~20.8
侏罗系	J_3	2.31~2.67	无磁性
	T_3	2.11~2.57	无磁性
	T_{1-2}	2.42~2.73	4.7~5.3
二叠系	P_2	2.13~2.60	9.5~28.7
	P_1	2.68~2.71	4.1~9.0
	C_{2-3}	2.53~2.73	0.6~8.8
石炭系	C_1	2.44~2.62	13.0~18.7
泥盆系	D	2.39~2.69	10.5~36.4
志留系	S_1	2.31~2.69	7.7~24.2
花岗斑岩	$\gamma\pi$	2.51~2.65	≈ 1000
花岗闪长岩	$\gamma\delta$	2.60~2.67	≈ 1000
辉石闪长岩	$v\delta$	2.61~2.70	≈ 1800

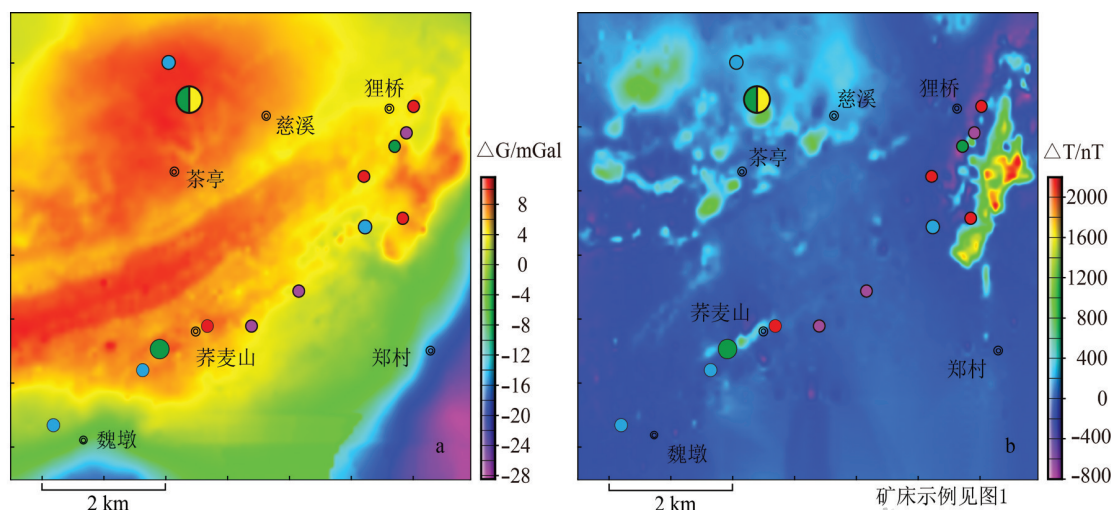


图2 宣城矿集区布格重力异常图(a)和地磁化极异常图(b)

Fig.2 Bouguer gravity anomaly map of Xuancheng ore concentration area (a) and reduction to pole magnetic anomaly map (b)

常为研究区域的褶皱、构造和基底结构研究提供了丰富的信息。磁异常是介质磁性的响应,它为研究岩体的分布,矿体与岩体关系提供了线索。重磁异常场是地下所有不均匀地质体的叠加信息,必须选择合适的重磁场分离方法得到可靠区域场和局部场。向上延拓方法(Pawlowski,1995;Fedi,2012;曾华霖等,2002;徐世浙等,2009;刘东甲等,2009)由于向上延拓因子具有收敛性,随延拓高度的增加向上延拓方法能稳定的分离得到区域场,进而计算得到局部场,本次研究选择向上延拓方法作为对比方法。匹配滤波方法(Spector,1976)的提出即应用在处理Cordillera山区的航磁,消除了火山岩覆盖的干扰,提取了与成矿有关的异常信息,本次研究区的茶亭大型铜金矿床同样位于早白垩世火山岩覆盖区,与匹配滤波方法的适用性一致,本次研究选择匹配滤波方法作为对比方法。优化滤波方法(Pawlowski,1994;1995;Meng et al.,2009;许德树等,2000;郭良辉等,2012)突破了向上延拓、匹配滤波等方法只能将位场二分的局限性,实现了对位场的多尺度分离,由多尺度分离结果可以组合重构局部异常场,本次研究选择优化滤波方法作为对比方法。通过重磁场分离研究区内的推覆构造、褶皱、基底等地质特征,总结异常与成矿关系。

3.1 重力位场分离结果

通过向上延拓不同高度对比,宣城矿集区1:25 000布格重力异常在上延3 km后,区域场相对稳定(图3a)。从布格重力异常中减去向上延拓3 km后的区域场,得到图3b中的重力局部异常场。

匹配滤波是通过将图3e的功率谱点线二分为深源场和浅源场,使用最小二乘法分别拟合深源场段和浅源场段的功率谱曲线,通过拟合的直线方程得到2条切线的斜率和截距,由公式(Spector,1976)计算分离得到重力区域场(图3c)和局部异常场(图3d)。

与匹配滤波将重力异常的对数功率谱曲线分成深源和浅源2段拟合切线方程不同,优化滤波是根据功率谱曲线的形态特征,特别是一些重要的转折端拐点坐标,将功率谱曲线分成多段。使用最小二乘法拟合每一个分段的直线方程,通过拟合直线方程的斜率计算各个分段的似深度,最终构建出目标层的优化滤波因子(郭良辉等,2012)。本文将重力异常的对数功率谱曲线分成五段(图3h),由于中-低波数段蕴含了丰富的地质体信号,而高波数段主要是浅部干扰或噪声信号,因此,在中-低波数段分段要更密一些。图3g是通过构建浅部四层的优化滤波因子分离出局部异常场,图3f是区域场。

从图3的重力局部异常结果可见,经过不同的位场分离方法处理后,重力局部异常都能更加突出浅部异常,使浅部的地质特征更为显著,位场分离取得了很好的效果。不同方法之间对比,可见匹配滤波局部异常中夹杂的区域场成分较多,茶亭附近的重力场仍然是大范围面状分布;向上延拓结果的局部场在茶亭附近要收敛得多;相对而言,优化滤波方法区域场和局部场得到了更好的分离,茶亭附近的重力局部异常比较集中。

本文以图3g的位场分离结果进一步分析重力

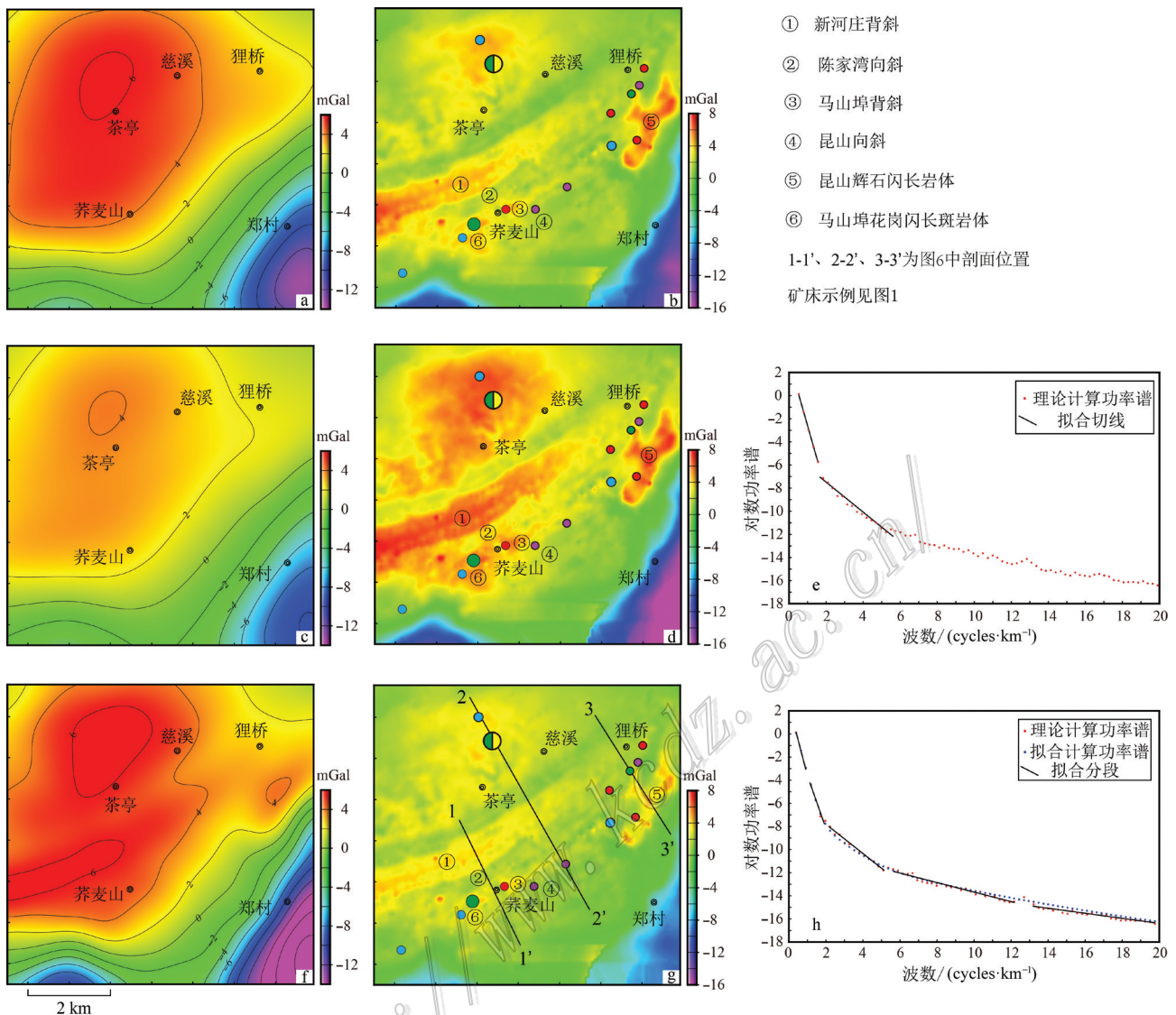


图3 不同位场分离方法得到的宣城矿集区重力异常分离结果

a. 向上延拓得到的区域场; b. 向上延拓得到的局部场; c. 匹配滤波得到的区域场; d. 匹配滤波得到的局部场; e. 匹配滤波拟合功率谱切线; f. 优化滤波得到的区域场; g. 优化滤波得到的局部场; h. 优化滤波功率谱分段与拟合

Fig.3 Maps of the Xuancheng ore concentration area after different anomaly separation

a. Regional field after upward continuation; b. Local field after upward continuation; c. Regional field after matched filtering; d. Local field after matched filtering; e. The power spectrum tangent if fitted by matched filter; f. Regional field after preferential filtering; g. Local field after preferential filtering; h. The power spectrum segmentation and fitting by preferential filtering

局部异常与地质体的关系。据区域地质资料,在新河庄、荞麦山至狸桥之间主要分布有新河庄背斜和昆山复向斜,新河庄背斜的核部是志留系茅山组。昆山复向斜自北西向南东又进一步划分为以二叠系龙潭组为核部的陈家湾向斜、以石炭系黄龙组或泥盆系五通组为核部的马山埠背斜、以及以三叠系殷坑组为核部的昆山向斜,在这一套褶皱中以马山埠倒转背斜为主要的控矿构造(洪大军等,2017;陶龙

季,2019)。重力局部异常很好的反映了新河庄背斜、陈家湾向斜、马山埠背斜和昆山向斜,它们在局部异常图中呈现出高一低一高一低的相间格局,都呈北东向分布,昆山向斜在重力局部异常中不如陈家湾向斜的低重力异常那样突出和集中,反映了昆山向斜分布可能宽缓。

从表1的物性测试结果可知,马山埠背斜的核部为石炭系黄龙组,密度为 2.68 g/cm^3 ,是研究区内

地层密度测试的最大值,是铜山-荞麦山铜、铁、含锆铁矿的主要赋矿地层,图1和图3的矿床分布结果也显示了已知的主要矿床都分布在马山埠背斜。表1显示,在志留系-侏罗系中,二叠系龙潭组、孤峰组具有最低的测试密度为 2.37 g/cm^3 ,该套地层构成了陈家湾向斜的核部。

昆山辉石闪长岩的密度在 $2.65\sim 2.70 \text{ g/cm}^3$,高于四周的地层,昆山岩体的规模也较大,因而在重力局部异常中呈现出比较显著的高重力异常,已知的

主要矿床都分布在昆山岩体与西北侧地层接触带附近。茶亭地区主要的赋矿岩体为石英闪长玢岩和闪长玢岩,根据邻近的构造环境比较类似的铜陵矿集区的测试结果(兰学毅等,2015),石英闪长玢岩和闪长玢岩的密度约为 $2.61\sim 2.69 \text{ g/cm}^3$,相对于被第四系覆盖的南陵盆地具有相对较高的密度,因而茶亭铜金矿床附近具有较高的重力局部异常。

3.2 磁异常分离结果

磁异常的位场分离计算处理同重力异常,简述

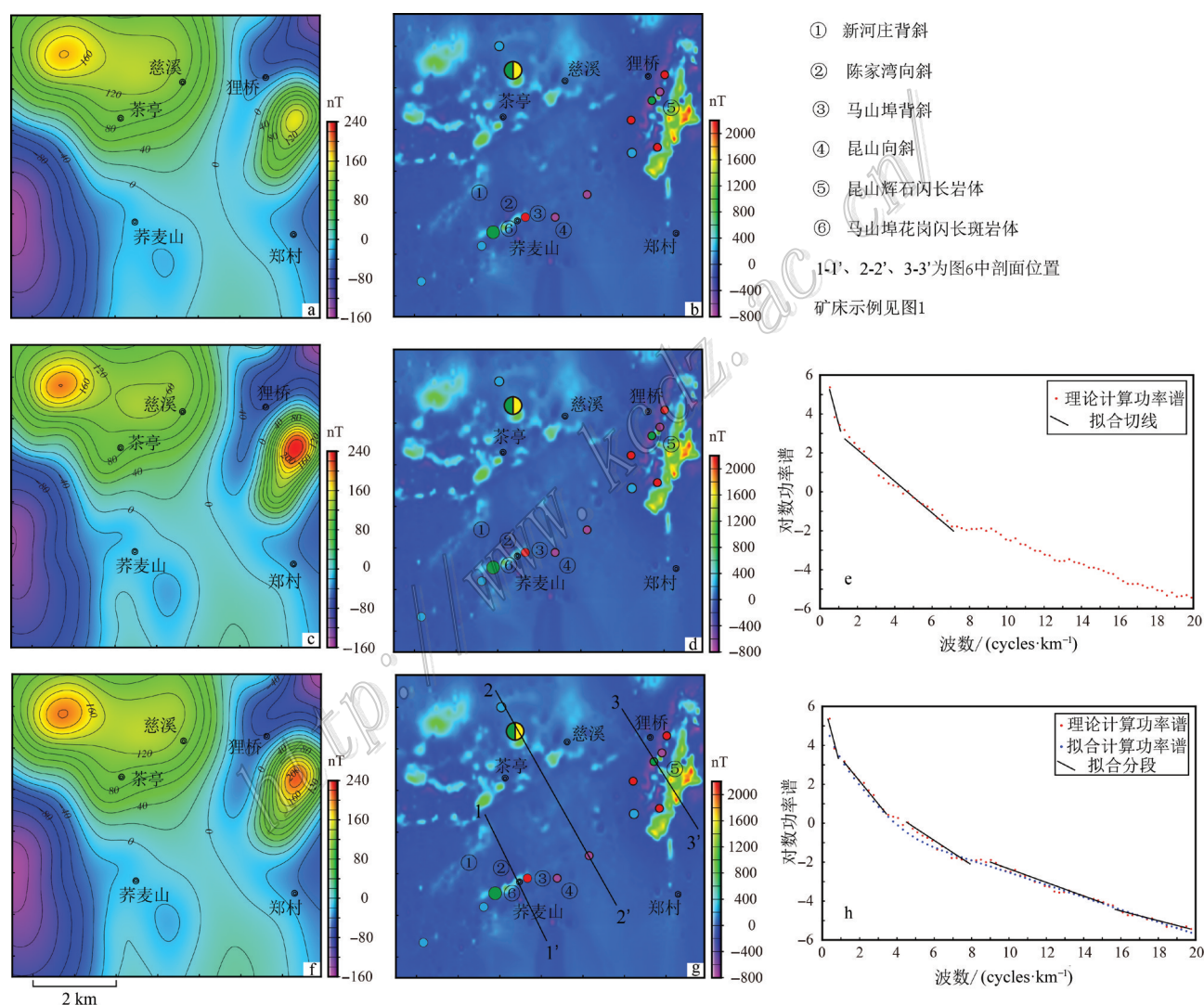


图4 不同位场分离方法得到的宣城矿集区地磁异常分离结果

a. 向上延拓得到的区域场; b. 向上延拓得到的局部场; c. 匹配滤波得到的区域场; d. 匹配滤波得到的局部场; e. 匹配滤波拟合功率谱切线; f. 优化滤波得到的区域场; g. 优化滤波得到的局部场; h. 优化滤波功率谱分段与拟合

Fig.4 Maps of the Xuancheng ore concentration area after separation of different anomalies

a. Regional field after upward continuation; b. Local field after upward continuation; c. Regional field after matched filtering; d. Local field after matched filtering; e. The power spectrum tangent if fitted by matched filter; f. Regional field after preferential filtering; g. Local field after preferential filtering; h. The power spectrum segmentation and fitting by preferential filtering

如下:图4b是从化极磁异常中减去向上延拓3 km后的区域场(图4a),得到的磁力局部异常场;图4d是匹配滤波方法分深源和浅源两段拟合图4c的功率谱点线,分离得到的磁力局部异常,图4c是相应的磁力区域场;图4h将磁力异常的对数功率谱曲线分成六段,通过构建浅部五层的优化滤波因子,分离出磁力局部异常场(图4g)和区域异常场(图4f)。多种方法都能较好的分离出浅层的局部异常,并且区域场也非常近似,并不像重力的区域场多种方法结果还存在比较明显差异,说明研究区内磁异常的位场分离结果更稳定可靠。

本文以优化滤波方法的位场分离结果(图4g)进一步分析磁力局部异常与地质体的关系。图中强度最大的磁性岩体为昆山辉石闪长岩体,分布面积也最广,异常呈北北东走向。据表1物性测试结果辉石闪长岩的磁化率为 1800×10^{-6} SI,比周缘的地层磁化率强度高出2个数量级,这是磁力局部异常呈现高值的原因。已知的热液矿床都分布在昆山岩体的西侧,主要的赋矿地层是以碳酸盐岩建造为主的二叠系—三叠系沉积地层,如昆山岩体附近的狮子山铜矿、茶山铅锌矿床等都具有矽卡岩型矿床形成的地质条件,主要矿体埋深分布在地表下300 m以浅(黄建满等,2013)。

在铜山-荞麦山附近有一片北东走向分布的正磁异常,该处异常位于马山埠背斜。据华东冶金地质勘查局综合地质大队《安徽省宣城市铜山-荞麦山铜硫矿深部勘探地质报告》,开采的铜山铜硫矿床、荞麦山东铜硫矿床等已知矿体都是赋存与燕山晚期花岗闪长斑岩与石炭系黄龙组、船山组灰岩接触带,以似层状为主,具有层控矽卡岩型矿床特征,主要矿体埋深分布在地表下400 m以浅。结合表1和图1,荞麦山附近的老地层磁性普遍弱,磁化率约 $0 \sim 40 \times 10^{-6}$ SI,而花岗闪长斑岩的磁化率约 1000×10^{-6} SI,该处局部磁异常主要对应花岗闪长斑岩体的分布,从异常规模和强度分析该处岩体规模不大。

茶亭地区主要的赋矿岩体为石英闪长玢岩和闪长玢岩的磁化率测试结果暂未知,根据邻近的构造环境比较类似的铜陵矿集区的测试结果(兰学毅等,2015),石英闪长玢岩和闪长玢岩的磁化率约在 $1800 \times 10^{-6} \sim 2400 \times 10^{-6}$ SI,白垩系火山岩的磁化率约在 200×10^{-6} SI。相对于周围地层的磁化率 $0 \sim 40 \times 10^{-6}$ SI,白垩系火山岩具有高出数倍的磁化率,而主要的赋矿岩体的磁化率则要高出几十至百倍。茶亭

地区磁力局部异常具有多处,异常往往独立分布,茶亭铜金矿床位于其中的一处磁力局部异常的西北边缘。

4 重磁三维反演

4.1 重磁三维反演方法

为使视密度(或视磁化强度)反演问题一般化,通常建立模型参数和各测点重力异常(或磁异常)观测值的线性方程组:

$$d = Gm \quad (1)$$

式中, $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ 表示 N 维观测数据向量; $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ 表示 M 维模型参数向量; $G_{N \times M}$ 表示 $N \times M$ 维矩阵, G_{ji} 表示地下第 j 个长方体在第 i 个测点产生的重力异常(或磁异常)。

由于观测数据的个数通常远小于模型参数的个数,即 $N \ll M$,因此,上述方程为一欠定方程。一些学者(Li et al., 1996; 1998)由方程(1)及正则化法构造目标函数,对模型参数向量 m 施加约束,并用最优化法求解,以获得地下视密度或视磁化强度的分布。

目标函数的定义如下式所示:

$$\begin{aligned} \varphi_m = & \alpha_s \int_V \omega_s \omega^2(z) (\rho - \rho_0)^2 dv + \alpha_x \int_V \omega_x \\ & \left(\frac{\partial \omega(z)(\rho - \rho_0)}{\partial x} \right)^2 dv + \\ & \alpha_y \int_V \omega_y \left(\frac{\partial \omega(z)(\rho - \rho_0)}{\partial y} \right)^2 dv + \\ & \alpha_z \int_V \omega_z \left(\frac{\partial \omega(z)(\rho - \rho_0)}{\partial z} \right)^2 dv \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\omega_s, \omega_x, \omega_y$ 和 ω_z 是空间相关函数, $\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y$ 和 α_z 是和方向有关的重要性系数。每个方向平滑程度可以通过以下3个参数定义: $L_x = \sqrt{\alpha_x / \alpha_s}, L_y = \sqrt{\alpha_y / \alpha_s}, L_z = \sqrt{\alpha_z / \alpha_s}$ 。

式(2)中的 $\omega(z)$ 函数是深度加权函数,该函数用于抵消核函数 G_{ij} 随深度的衰减,避免反演时使异常过于集中在浅表。

为确定测量的误差,用二范数来度量误差:

$$\varphi_d = \|W_d - d^{\text{obs}}\|^2 \quad (3)$$

假设测量数据中包含的噪声是独立的并且服从高斯分布,指定 W_d 是第 i 个元素 $1/\delta_i$ 的对角矩阵, δ_i 是第 i 个数据的均方误差, d^{obs} 是观测数据向量。 φ_d 为一具有 N 个自由度的随机变量, $E[\varphi_d] = N$ 提供了

反演中容许的拟合差。

反演问题解法思路是:根据数据的噪声水平,找出一个合适的密度分布使得 φ_m 和拟合差都达到最小化。为获得数值解,首先需要对目标函数 φ_m 进行离散化。

在实际工作中,以重力反演视密度为例,密度差往往局限于某一较小范围内变化,通常可以基于地质信息或者物性标本测定信息,确定模型密度差变化的上下边界,从而使反演结果更加收敛。反演解可以通过使下式最小化获得:

$$\text{最小化: } \varphi = \varphi_d - \mu \varphi_m$$

$$\text{限制于: } \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \quad (4)$$

式中, $\mu \in [0, \infty)$ 是一个控制数据拟合差 φ_d 与模

型目标函数 φ_m 之间谁更重要的规则化参数, $\rho_{\min}$ 和 $\rho_{\max}$ 是包含模型上下密度边界的矢量。

4.2 重磁三维反演结果

本文使用第3节优化滤波方法分离得到的重力局部场和地磁局部场,作为三维反演的输入数据。反演计算网格单元划分为长×宽×高=150 m×150 m×150 m,网格单元总数为100×98×21=205 800个。

重力异常数据反演,初始模型采用密度差为0的均匀半空间模型,深度加权系数 $\beta=2$, $z_0=600$ m,空间相关系数 ω_x , ω_y 和 ω_z 均取1,归一化正则化因子取0.56,设置密度差边界为-2~2 g/cm³。通过18次迭代计算完成反演,反演结果如图5a所示,从蓝色、绿色到红色的颜色渐变表示密度差从低到高的变化。

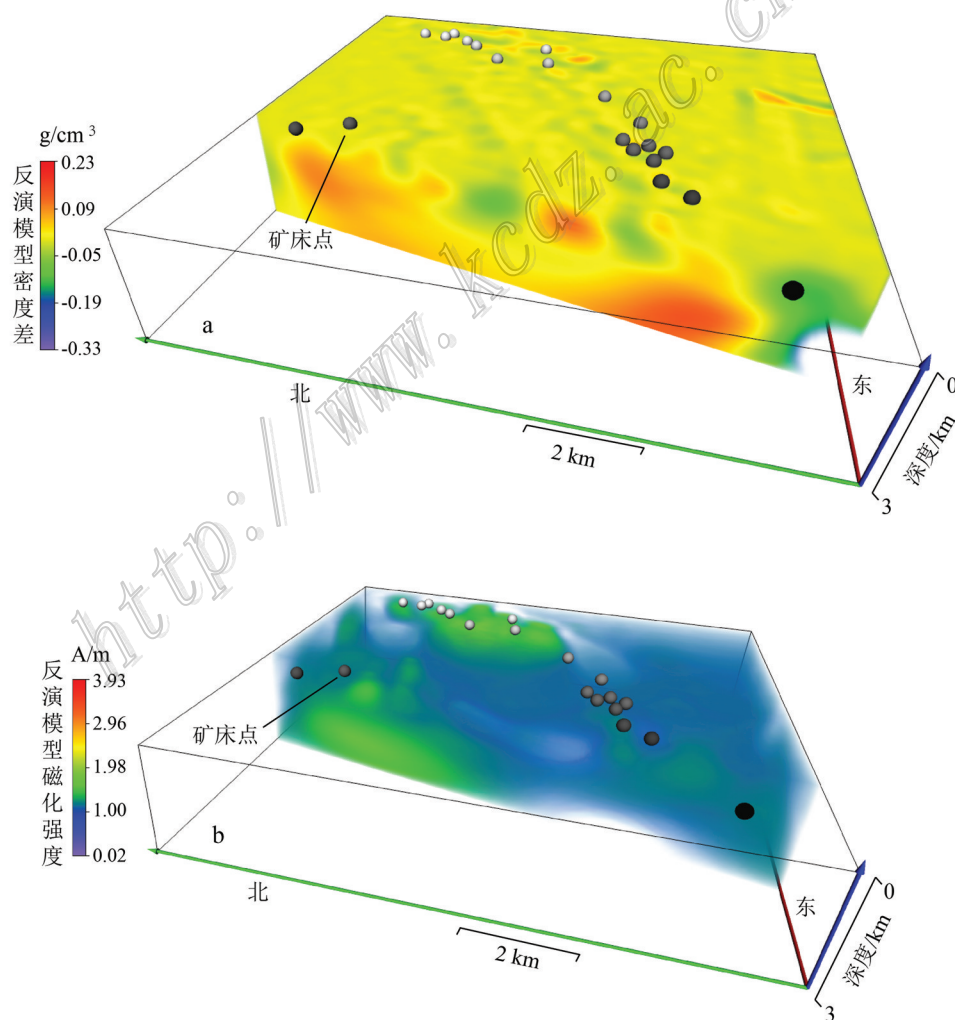


图5 宣城矿集区重力三维反演结果(a)和地磁三维反演结果(b)

Fig.5 Three-dimensional inversion results of gravity data (a) and magnetic data (b) in the Xuancheng ore concentration area

磁异常数据反演,初始模型采用磁化强度为0的均匀半空间模型,深度加权系数 $\beta=3$, $z_0=800$ m,空间相关系数 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 均取1,归一化正则化因子取0.48。通过16迭代计算完成反演,反演结果如图5b所示,从蓝色、绿色到红色的颜色渐变表示磁化强度从低到高的变化。

4.3 重磁三维反演结果分析

本节使用计算得到研究区的三维视密度和视磁化强度,通过沿主要构造单元走向切取垂向切片,研究主要地质体的深部结构特征。本次研究垂直于新河庄背斜、陈家湾向斜、马山埠背斜和昆山向斜的走向设置了1-1'、2-2'两条垂直切片,1-1'剖面处分布有铜山-荞麦山Cu-Fe-S矿床(多个矿床点)、2-2'剖面不仅切穿了褶皱构造,2-2'剖面的北西段还穿过茶亭铜金矿床区域,3-3'剖面垂直于昆山岩体的走向,附近有狮子山铜矿等热液矿床。3条垂直剖面位置见图3和图4,图6中左列为3条密度垂直切片图,

右列为对应位置的3条磁化强度垂直切片图。

图6中,左列为反演的密度差垂直切片,3条剖面使用统一的颜色色标。1-1'剖面清楚的揭示宣城研究区内的褶皱构造,新河庄背斜、陈家湾向斜、马山埠背斜和昆山向斜依次对应了图6a~d密度横向不均匀体,背斜为正的高密度异常,向斜为低的负密度异常,褶皱构造在垂向上的最大深度约为2 km,新河庄背斜的规模较大。将1-1'剖面两侧1 km以内的热液矿床投影到剖面上,前文统计了已知开采的铜山-荞麦山多金属矿床的主矿体深度在地表下400 m以浅,可知铜山-荞麦山Cu-Fe-S矿(含多个密集分布的矿床点)和荞麦山含锆Fe矿位于马山埠背斜的顶部。在浅部褶皱构造和深部正密度异常之间,存在一处低密度层过渡带,在2-2'剖面上褶皱构造下方的低密度层则十分明显,似乎在褶皱构造下方形成一组低密度层界面,将褶皱构造和深部的地质体区分为2组不同的地质单元。茶亭铜金矿床的矿体

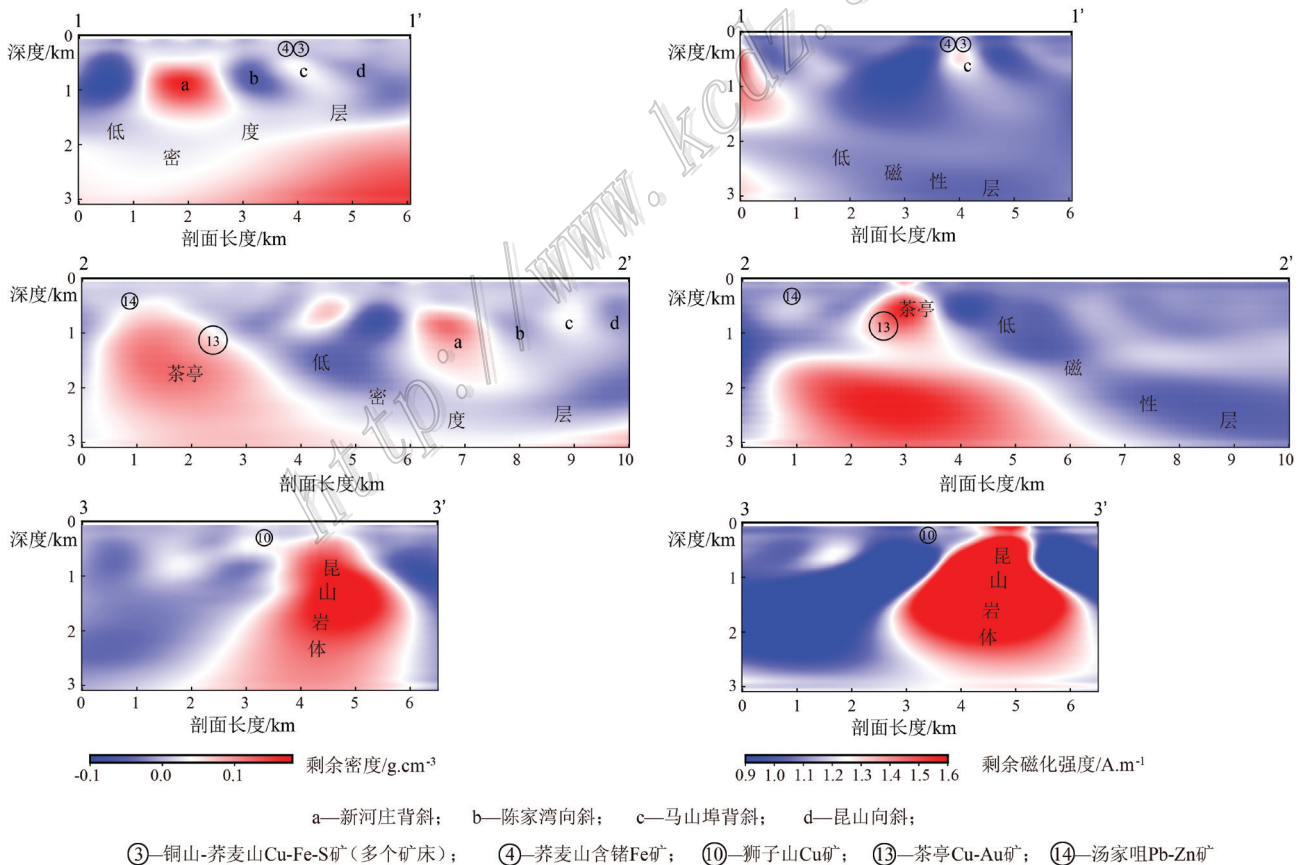


图6 3条垂直剖面的重磁异常特征与解译(左列为密度切片,右列为磁化强度切片)

Fig.6 Gravity and magnetic anomaly characteristics and interpretation of three vertical sections (the density sections are listed on the left and the magnetization sections are listed on the right)

自-1800~-300 m都有分布,分布在高密度体的边部。3-3'揭示了昆山岩体的深部特征,昆山岩体的南东侧比较陡立,北西侧相对倾缓,狮子山铜矿位于昆山岩体北西侧的缓倾部位上方,处于昆山岩体与古生代地层的接触带。

图6中右列为磁化强度垂直切片,3条剖面使用统一的颜色色标。1-1'剖面图反映马山埠背斜处的正磁化强度异常值较低、异常范围也较小,指示马山埠背斜处的花岗闪长斑岩体的规模不大,此处的铜山-荞麦山一带虽然矿床点较多,但皆为中小型规模。2-2'剖面显示新河庄复背斜这套褶皱构造对应的古生代地层具有微弱的正磁化强度异常,在褶皱构造下方,分布有一组低磁性层,形态和位置和低密度层基本对应。茶亭附近地下2 km以浅分布有局部的磁化强度正异常区域,与茶亭铜金矿床的赋矿岩体空间位置和深度有较好的契合。3-3'剖面昆山岩体的磁化强度异常形态、倾向等与密度异常一致,倾向北西,磁化强度异常显示昆山岩体的垂向深度近3 km。

5 讨论

5.1 重磁异常与地下结构

根据吕庆田等(2015)在长江中下游成矿带实施的反射地震NW-11-01剖面结果,茅山断裂至东南侧的江南断裂之间为一处上地壳自南东向北西方向的推覆构造,根据反射特征推测此处基底顶面深度约

10 km,上地壳的反射多终止在盖层与基底之间的滑脱面上。其他学者的地质剖面研究认为,茅山-九连山脉是自南东向北西方向的推覆构造,逆冲作用将盆地边缘褶皱推掩到晚侏罗世—早白垩世盆地沉积物之上(黄润生等,2010;李海滨等,2011)。据中石化江苏油田分公司在研究区实施的浅层反射地震剖面(图7)揭示的10 km以浅的构造特征,可知区内的推覆构造界面呈现北西浅、南东深的特点,推覆构造在新河庄背斜北西侧的界面深度接近出露地表,在新河庄背斜至昆山复向斜下方,推覆构造的界面深度平均约3~4 km,往南东约在8 km深度终止在主干断裂;新河庄背斜和昆山复向斜等褶皱构造的深度可达地表下2 km。

图6中1-1'剖面 and 2-2'剖面揭示在新河庄背斜至昆山复向斜这套褶皱下方有一处低密度和低磁性的介质层,北西测浅与新河庄背斜的北西翼相邻,往南东逐步加深。近年来,由中国地质调查局南京地质调查中心在宣城地区实施的多处页岩气深钻孔,在研究区南东侧的宣城至广德盆地施工的钻孔揭穿了推覆体,在推覆体的下方分布有早白垩世红层(据杜建国私人通讯)。结合反射地震剖面资料,本文推测研究区内褶皱构造下方的低密度和低磁性介质层可能是推覆构造界面下方的较新时代地层,是否是早白垩世红层有待于今后区内的深钻孔验证。

5.2 茶亭地区成矿规律

茶亭铜金矿床(江峰,2017;徐晓春等,2018; Xiao et al.,2019)是研究区内新发现的一处大型矿

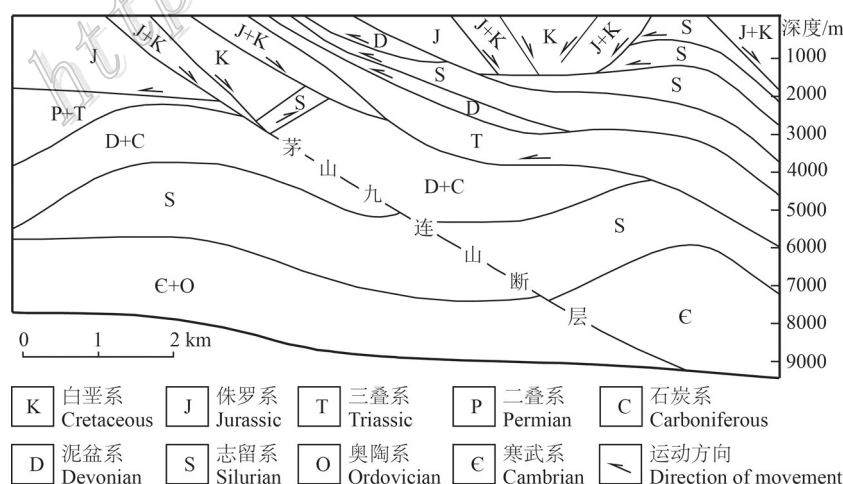


图7 研究区反射地震剖面解释图

Fig.7 Reflection seismic profile of the study area

床,矿区出露的地层主要有上白垩统赤山组陆相红色盆地沉积和火山碎屑堆积、下白垩统中分村组陆相火山岩,矿区位于新河庄背斜西北侧约2 km。茶亭铜金矿床的矿体主要赋存在石英闪长玢岩侵入体中,侵入体的围岩为下三叠统和龙山组、南陵湖组灰岩,接触带大理岩化。火山岩的活动要晚于成矿期,呈面状分布在矿区的浅地表层。

茶亭地区石英闪长玢岩和闪长玢岩的密度约在 $2.61\sim 2.69\text{ g/cm}^3$,含矿岩体的密度更大,围岩下三叠统灰岩的密度约在 2.66 g/cm^3 。成矿岩体和围岩的密度相对较高,因此在茶亭下方皆为高密度异常(图6),但是由于两者密度接近,在重力资料反演结果上,围岩和赋矿岩体密度差无法进一步区分。

茶亭地区石英闪长玢岩和闪长玢岩的磁化率约在 $1800\times 10^{-6}\sim 2400\times 10^{-6}\text{ SI}$,白垩系火山岩的磁化率约在 $200\times 10^{-6}\text{ SI}$,隐爆角砾岩呈无磁性或弱磁性(兰学毅等,2015)。从表1可知,围岩下三叠统灰岩的磁化率在 $4.7\times 10^{-6}\sim 5.3\times 10^{-6}\text{ SI}$,磁性弱。成矿岩体和围岩有显著的磁性差异,成矿岩体的磁性也明显高于上覆的火山岩地层。图6中茶亭下方约自-400~-1900 m磁化强度正异常区域与地质认识和物性资料吻合,正磁异常区域与勘探地质剖面揭示的茶亭铜金矿床的赋矿岩体空间位置和深度有较好的契合。

茶亭地区的浅地表层火山岩稍晚于成矿期,浅层的白垩系火山岩具有一定磁性,厚度通常有数百米,浅层火山岩的磁异常干扰对分离成矿岩体的磁异常和反演工作都比较不利,这是茶亭地区利用重磁找矿需要进一步解决的问题。

6 结 论

(1) 新河庄背斜、陈家湾向斜、马山埠背斜和昆山向斜等褶皱构造横向上剩余密度正负差异显著呈相间分布的深部特征,垂向上褶皱构造的最大深度约为2 km;在褶皱构造下方分布北西浅、往南东逐渐加深的低密度、低磁性层,推测可能为研究区内茅山-九连山推覆构造的滑脱面,滑脱面下方可能是白垩系陆相红色盆地沉积地层。

(2) 马山埠背斜轴部花岗闪长斑岩附近的重高磁高组合异常是铜山-荞麦山矽卡岩型矿床的找矿线索,然而成矿岩体规模较小,深部磁化强度呈弱异常,马山埠背斜附近深部找矿潜力有限。

(3) 茶亭矿区重高磁高组合异常是重要的找矿线索,成矿的石英闪长玢岩岩体与围岩灰岩、上覆火山岩磁性差异明显,反演得到的磁化强度异常与勘探地质剖面图的地质体特征吻合。研究结果证实茶亭下方-400~-1900 m磁化强度正异常区域对应茶亭铜金矿床,这为在研究区其他地点深部进一步寻找斑岩型、隐爆角砾岩型铜金矿床提供了地球物理方面预测的经验。

致 谢 感谢两位审稿专家的建议!文中图件主要由 Wessel & Smith 开发的免费作图软件 GMT 绘制!

References

- Al-Zoubi A, Eppelbaum L, Abueladas A, Ezersky M and Akkawi E. 2013. Removing regional trends in microgravity in complex environments: Testing on 3D model and field investigations in the eastern Dead Sea Coast(Jordan)[J]. *International Journal of Geophysics*, (2013-4-9):1-13.
- Briggs I. 1974. Machine contouring using minimum curvature[J]. *Geophysics*, 39(1):39-48.
- Du J G, Xu W, Wu L B, Hu H F, Lan X Y and Zhu W W. 2017. Research and application of potential prediction of important mineral resources in Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 534-552(in Chinese).
- Fedi M and Quarta T. 1998. Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies[J]. *Geophysical Prospecting*, 46(5):507-525.
- Fedi M. 2012. Understanding imaging methods for potential field data[J]. *Geophysics*, 77(1):13-24.
- Ge C, Ren S L, Li Y D, Shi Y H, Zhang J H, Li J H, You M, Li L M and Zhang Y. 2017. Improvement and application of the layered separation method for gravity anomalies: An example of the Wuhe area, Anhui Province[J]. *Chinese J. Geophys*, 60(12):4826-4839 (in Chinese with English abstract).
- Geological Survey of Anhui Province. 2005. 1:250 000 geological survey report on Xuancheng region[R]. Unpublished(in Chinese).
- Guo L H, Meng X H, Shi L and Chen Z X. 2012. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent[J]. *Chinese J. Geophys*, 55(12):4078-4088 (in Chinese with English abstract).
- Hong D J, Huang Z Z, Chan S W and Wang X H. 2017. Geological characteristics and exploration directions of the Cu-polymetallic ore deposits in the Magushan-Qiaomaishan areas in Xuancheng, Anhui Province[J]. *East China Geology*, 38(1):28-36 (in Chinese with English abstract).
- Huang J M, Yi H and Chen B X. 2013. Geological characters of Kun-

- shan Cu-polymetallic mineralization district in Xuancheng City, Anhui Province[J]. Journal of Hefei University of Technology, 36(2):217-223 (in Chinese with English abstract).
- Huang R S and Cao J Z. 2010. Analysis and study on Maoshan nappe tectonic zone in Jiangsu[J]. Journal of Geology, 34(1):6-9 (in Chinese with English abstract).
- Jacobsen B H. 1987. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps[J]. Geophysics, 52(8):1138-1148.
- Ji X L, Wang W Y and Qiu Z Y. 2015. The research to the minimum curvature technique for potential field data separation[J]. Chinese J. Geophys, 58(3):1042-1058(in Chinese with English abstract).
- Jiang F. 2017. Characteristics and genesis of magmatic rocks in the Chating Cu-Au ore district, Xuancheng City, Anhui Province (Master's dissertation)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 22-27(in Chinese with English abstract).
- Lan X Y, Du J G, Yan J Y, An M, Wan Q, Guo D, Liao M Q, Wang Y Y, Tao L, Zhang Q Y and Zhang S S. 2015. 3D gravity and magnetic interactive inversion modeling based on prior information: A case study of the Tongling ore concentration area[J]. Chinese J. Geophys, 58(12):4436-4449(in Chinese with English abstract).
- Li H B, Jia D, Wu L and Zhang Y. 2011. The Mesozoic-Cenozoic compressional deformation, extensional modification and their significance for hydrocarbon exploration in Lower Yangtze region[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3):770-778(in Chinese with English abstract).
- Li Y G and Oldenburg D W. 1996. 3-D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 61(2):394-408.
- Li Y G and Oldenburg D W. 1998. 3-D inversion of gravity data[J]. Geophysics, 63(1):109-119.
- Liu D J, Hong T Q, Jia Z H, Li J S, Lu S M, Sun X F and Xu S Z. 2009. Wave number domain iteration method for downward continuation of potential fields and its convergence[J]. Chinese J. Geophys, 52(6):1599-1605(in Chinese with English abstract).
- Liu T Y, Wu Z C and Zhan Y L. 2007. Wavelet multi-scale decomposition of magnetic anomaly and its application in searching for deep-buried minerals in crisis mines: A case study from Daye iron mines[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 32(1):135-140(in Chinese with English abstract).
- Lü Q T, Shi D N, Liu Z D, Zhang Y Q, Dong S W and Zhao J H. 2015. Crustal structure and geodynamics of the Middle and Lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114(4):704-716.
- Meng X H, Guo L H, Chen Z X, Li S L and Shi L. 2009. A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application[J]. Applied geophysics, 6(3):217-225.
- Pawlowski R S. 1994. Green's equivalent-layer concept in gravity band-pass filter design[J]. Geophysics, 59(1):69-76.
- Pawlowski R S. 1995. Preferential continuation for potential-field anomaly enhancement[J]. Geophysics, 60(2):390-398.
- Spector A and Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. Geophysics, 35(2):293-302.
- Spector A. 1976. Application of aeromagnetic data for porphyry copper exploration in areas of volcanic cover[A]. Geophysics. 8801 S Yale st, Tuisa, OK 74137: Soc Exploration Geophysicists, 41(2):376.
- Tao L, Zhang S S, Lan X Y, Tang Z J, An M, Yan J Y, Wang Y Y, Guo D, Ye L and Hong D J. 2019. Application of 1:50 000 gravity and magnetic exploration for mineral prospect in heavily covered area in Xuancheng, Anhui Province[J]. Geology in China, 46(4):894-905.(in Chinese with English abstract).
- Teng J W, Yang L Q, Yao J Q, Liu H C, Liu C, Han L G and Zhang X M. 2007. Deep discover ore exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation[J]. Progress in Geophysics, 22(2):317-334(in Chinese with English abstract).
- Thébault E, Finlay C C, Beggan C D, Alken P, Aubert J, Barrois O, Bertrand F, Bondar T, Boness A, Brocco L, Canet E, Chambodut A, Chulliat A, Coisson P, Civet F, Du A M, Fournier A, Fratter I, Gillet N, Hamilton B, Hamoudi M, Hulot G, Jager T, Korte M, Kuang W J, Lalanne X, Langlais B, L  ger J M, Lesur V, Lowes F J, Macmillan S, Manda M, Manoj C, Maus S, Olsen N, Petrov V, Ridley V, Rother M, Sabaka T J, Saturnino D, Schachtschneider R, Sirol O, Tangborn A, Thomson A, T  ffner-Clausen L, Vigneron P, Wardinski I and Zvereva T. 2015. International geomagnetic reference field: The 12th generation[J]. Earth, Planets and Space, 67-79.
- Xiao Q L, Zhou T F, Wang S W, Yuan F, White N C, Wang F Y, Xie Z J and Liu J. 2019. Genesis of Chating Cu-Au deposit in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt, eastern China: Implications from magnetite and biotite geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 106:113-133.
- Xu D S and Zeng H L. 2000. Preferential continuation and its application to Bouguer gravity anomaly in China[J]. Geoscience, 14(2):215-222(in Chinese with English abstract).
- Xu S Z, Yu H L, Li H X, Tian G and Yang J Y. 2009. The inversion of apparent density based on the separation and continuation of potential field[J]. Chinese J. Geophys, 52(6):1592-1598(in Chinese with English abstract).
- Xu X C, Ji K, Bai R Y, Qian S L, Yang Q G and Xie Z J. 2018. Modes of occurrence of gold and genetic connection between gold and copper in the ores from the Chating porphyry copper-gold deposit, Xuancheng City, Anhui Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(4):575-589 (in Chinese with English abstract).
- Yan J Y, L   Q T, Wu M A, Chen X B, Zhang K and Qi G. 2014. Prospecting indicator of Anhui Shaxi porphyry copper deposit based on regional gravity and magnetic 3D inversion[J]. Acta Geologica Sinica, 88(4):507-518 (in Chinese with English abstract).
- Zeng H L and Xu D S. 2002. Estimation of optimum upward continuation height[J]. Earth Science Frontiers, 9(2):499-504(in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Wang S W, Fan Y, Yuan F, Zhang D Y and White N C. 2015. A review of the intracontinental porphyry deposits in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 65: 433-456.

附中文参考文献

- 安徽省地质调查院. 2005. 1:25万宣城市幅区域地质调查报告[R]. 内部资料.
- 杜建国, 许卫, 吴礼彬, 胡海风, 兰学毅, 朱文伟. 2017. 安徽省重要矿产资源潜力预测研究与应用[M]. 北京:地质出版社. 534-552.
- 葛粲, 任升莲, 李永东, 石永红, 张金会, 李加好, 尤森, 李龙明, 张妍. 2017. 重力异常分层分离方法改进及应用:以安徽五河地区为例[J]. 地球物理学报, 60(12):4826-4839.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 陈召曦. 2012. 优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用[J]. 地球物理学报, 55(12):4078-4088.
- 洪大军, 黄志忠, 产思维, 王兴会. 2017. 安徽宣城麻姑山——荞麦山地区铜多金属矿地质特征及找矿方向[J]. 华东地质, 38(1):28-36.
- 黄建满, 易洪, 陈保汐. 2013. 安徽省宣城市昆山铜多金属矿化区的地质特征[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 36(2):217-223.
- 黄润生, 曹建忠. 2010. 江苏茅山推覆构造带的分析与研究[J]. 地质学刊, 34(1):6-9.
- 纪晓琳, 王万银, 邱之云. 2015. 最小曲率法位场分离方法研究[J]. 地球物理学报, 58(3):1042-1058.
- 江峰. 2017. 安徽宣城茶亭铜金矿区岩浆岩特征及成因(硕士学位论文文)[D]. 合肥:合肥工业大学, 22-27.
- 兰学毅, 杜建国, 严加永, 安明, 万秋, 郭冬, 廖梦奇, 王云云, 陶龙, 张启燕, 张莎莎. 2015. 基于先验信息约束的重磁三维交互反演建模技术——以铜陵矿集区为例[J]. 地球物理学报, 58(12):4436-4449.
- 李海滨, 贾东, 武龙, 张勇. 2011. 下扬子地区中-新生代的挤压变形与伸展改造及其油气勘探意义[J]. 岩石学报, 27(3):770-778.
- 刘东甲, 洪天求, 贾志海, 李建设, 陆三明, 孙晓峰, 徐世浙. 2009. 位场向下延拓的波数域迭代法及其收敛性[J]. 地球物理学报, 52(6):1599-1605.
- 刘天佑, 吴招才, 詹应林. 2007. 磁异常小波多尺度分解及危机矿山的深部找矿:以大冶铁矿为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(1):135-140.
- 陶龙, 张莎莎, 兰学毅, 汤正江, 安明, 严加永, 王云云, 郭冬, 叶林, 洪大军. 2019. 1:5万重磁勘查在安徽宣城覆盖区地质找矿中的应用探索[J]. 中国地质, 46(4):894-905.
- 滕吉文, 杨立强, 姚敬全, 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[J]. 地球物理学进展, 22(2):317-334.
- 许德树, 曾华霖. 2000. 优选延拓技术及其在中国布格重力异常图处理上的应用[J]. 现代地质, 14(2):215-222.
- 徐世浙, 余海龙, 李海侠, 田钢, 杨金玉. 2009. 基于位场分离与延拓的视密度反演[J]. 地球物理学报, 52(6):1592-1598.
- 徐晓春, 季珂, 白茹玉, 钱仕龙, 杨前国, 谢祖军. 2018. 安徽宣城茶亭斑岩铜金矿床金的赋存状态及金铜成因联系[J]. 岩石矿物学杂志, 37(4):575-589.
- 严加永, 吕庆田, 吴明安, 陈向斌, 张昆, 祁光. 2014. 安徽沙溪铜矿区域重磁三维反演与找矿启示[J]. 地质学报, 88(4):507-518.
- 曾华霖, 许德树. 2002. 最佳向上延拓高度的估计[J]. 地学前缘, 9(2):499-504.