

文章编号: D258-7106 (2009) 06-0838-12

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*

严加永^{1,2}, 吕庆田¹, 孟贵祥¹, 赵金花¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要 铜陵矿集区中酸性侵入岩与成矿关系密切, 区内几乎所有的内生金属矿均与侵入岩有关, 岩体周边和深部是主要的找矿方向, 发现和圈定隐伏及半隐伏岩体对本区新一轮深部找矿工作有着重要意义。本研究以铜陵矿集区 1:5 万航磁数据的 3D 反演成像为基础, 结合物性参数和地质信息, 选取适当的磁化率边界, 对矿集区岩体的空间分布进行了识别和圈定, 共确定了 33 个岩体, 并对其 3D 空间形态进行了定量分析, 大部分推测岩体与地表地质填图所得岩体吻合较好。依据“层位+岩体”的找矿模式, 以航磁反演推测岩体为基础, 结合其他成矿信息, 确定了本区圈定深部找矿远景区的 6 条基本原则, 圈定了 6 个深部找矿远景区, 对铜陵矿集区深部找矿具有重要的指示意义。

关键词 地质学; 铜陵矿集区; 中酸性岩体; 3D 反演成像; 航磁; 深部找矿

中图分类号: P627

文献标志码: A

Aeromagnetic 3D inversion imaging for intermediate-acid intrusive bodies and its indication significance of deep ore prospecting in Tongling ore concentration district

YAN JiaYong^{1,2}, LÜ QingTian¹, MENG GuiXiang¹ and ZHAO JinHua¹

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract

In the Tongling ore concentration district, the intrusions are closely related to metallogenic activities and almost all endogenic metallic ore deposits. It is hence of great significance to find and delineate concealed and semi-concealed intermediate-acid intrusive bodies in the new round of mineral exploration. The 3D inversion imaging technique was applied in Tongling based on 1:50 000 aeromagnetic data in order to detect intermediate-acid intrusive bodies. Based on the inversion result, the authors selected a suitable magnetic susceptibility boundary in combination with physical properties of the rocks as well as geological information, identified 34 intermediate-acid intrusive bodies and studied their 3D spatial shapes. Most of the intermediate-acid intrusive bodies are consistent with geological mapping results at surface. The inversion results not only reflect the distribution of the intermediate-acid intrusive bodies at surface but also indicate their 3D spatial shapes at depth. According to the “horizon + intrusive body” prospecting model in combination with other metallogenic information, 6 principles were established in search for ore prospect areas at depth based on rock bodies inferred by the aeromagnetic 3D

* 本文得到“十一五”国家科技支撑计划项目“立体地质填图、流体填图技术与深部成矿预测试验研究”(编号: 2006BAB01B01) 国家深部探测技术与实验研究专项第三项目“深部矿产资源立体探测技术与实验研究项目”(编号: Sinoprobe-03) 的联合资助

第一作者简介 严加永, 男, 1977 年生, 助理研究员, 在读博士研究生, 主要从事地球物理及找矿方法研究。Email: yanjy@163.com

收稿日期 2009-08-20; 改回日期 2009-09-30。李德先编辑。

inversion. 6 deep prospecting areas were delineated, and the data obtained provide important information for deep prospecting in the Tongling ore concentration district.

Key words: geology, Tongling ore concentration district, intermediate-acid intrusive body, 3D inversion imaging, aeromagnetic data, deep prospecting

铜陵矿集区是中国东部重要的铜多金属矿产基地,已经发现大中型矿床20余处。研究表明(常印佛等,1991),该区的矿床与燕山期中酸性侵入岩密切相关,无论是矽卡岩-斑岩型矿床,还是海西喷流沉积-燕山岩浆热液叠加改造型矿床,中酸性岩浆活动对成矿物质来源、富集成矿都具有十分重要的控制作用。“层位+岩体”不仅是对铜陵矿集区成矿规律的总结,也是下一步深部找矿的重要方向,系统研究该区隐伏及半隐伏岩体的空间分布对本区新一轮深部找矿工作具有重要的指导意义。

利用区域重磁数据推断岩体空间形态是地质勘查中除钻探之外的主要方法,它大致经历了定性、半定量和定量发展阶段,从上世纪80年代开始,国内外陆续有研究者利用重磁资料圈定和研究隐伏岩浆岩带、岩体及其成矿关系,取得了一定的效果。

采用重磁定性分析方法来研究岩体是地球物理识别岩体所有方法中应用最早且使用最多的一种方法(孙忠武,1983;秦葆璐,1985;麦广田,1990;钟寿华,1992;韩斗发,1992;张维宸等,2008;刘登明,2009;Lindrith等,1987;Hearst等,2001)。根据重磁场特征,采用“低重力”、“高磁力”组合异常、特征线提取、垂向一阶导零值线等手段对隐伏岩体进行了定性推断。随着2D和2.5D反演技术的发展,人们逐渐采用反演手段半定量识别和圈定岩体(段春生,2005;Vasanthi,2005)。对重磁数据进行了2D剖面反演,研究了隐伏岩体形态变化。金鑫等(2008)对地面高精度磁测数据进行2.5D剖面反演,推断出隐伏岩体的存在及其深部空间形态。随着计算机技术的发展,重磁3D反演和3D显示技术发展迅速,西方一些国家已开始采用3D反演技术定量地分析岩体分布形态,如Malehmir等(2009)在瑞典北部Kristineberg矿区开展了重磁3D反演,确定了矿区花岗岩、铁镁质基性岩和火山岩的3D空间形态。

前人(顾丰^①,1986)对铜陵矿集区岩体识别和圈定也做了很多工作,主要手段为区域重磁资料的定

性解释,处理方法包括常规的数据处理(如匹配滤波、求导、化极、场分离等)和少量剖面2.5D反演。受当时方法技术水平的限制,大部分工作仅限于地表范围内对岩体边界的推断,对3D空间的岩体形态未能给出相应的解释。近年来,重磁3D反演领域最突出的进展是3D物性反演成像(Li et al.,1996;姚长利等,2007),该技术可以利用网格磁测数据重建地下磁性场源的分布。本研究尝试采用该技术,对铜陵矿集区1:5万航磁数据进行了反演,结合岩体物性资料和地质资料,对铜陵矿集区岩体的3D形态进行了识别,并结合该地区成矿预测条件,圈定了深部找矿靶区,为本区深部找矿提供了丰富的信息。

1 航磁3D反演成像方法

1.1 基本原理

利用航磁3D反演成像方法识别岩体的基本思路是:首先对航磁资料进行化极处理,采用位场分离技术分离区域场与局部场,提取目标深度内的磁异常信息;然后将此异常信息作为反演的数据,进行3D成像反演,得到地下半空间磁化率分布的3D数据体;最后,根据研究区岩体与围岩的磁性参数差异,结合其他地质信息,确定圈定岩体的磁化率阈值,磁化率大于该阈值的部分即为岩体,通过3D可视化的交互分析,确定岩体的空间3D形态。

航磁异常3D反演的模型主要有形态模型和物性模型2类。物性模型反演是将场源区域划分成小的单元组合(主要是长方体或立方体单元),反演过程中,单元的形态不变,物性发生变化,通过反演所得物性变化勾画场源范围(Li et al.,1996);形态模型反演通常以多边形2D棱柱体或3D多面体模拟地质体为主,通过反演实现模型体形态的变化,以达到逼近地质体的目的,模型体的物性通常是给定不变的(Nagy,1966)。相对而言,由于3D物性反演具有模型物性易于操作、能模拟任意复杂地质体(取

① 顾丰. 1986. 安徽省铜陵地区物探化探遥感综合调查成果报告. 地矿部第1综合物探大队. 152-258.

决于模型单元大小,反演方法技术受限制条件较少、不涉及复杂的形态变化等特点,目前已成为航磁反演,尤其是 3D 反演的一个主要方向(姚长利等, 2003)。

据 Gribb(1976),磁源可以离散化为一系列的电源模型,它在空间某点引起的磁场值可以简化为如下关系:

$$F = GM \quad (\text{式 } 1)$$

式中, M 为磁化强度矢量, G 是磁性点源和观测点的几何参数决定的系数矩阵,写成分量形式则为:

$$F_i = \sum_{j=1}^m G_{ij} M_j \quad (\text{式 } 2)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m$, 为 m 个点源, $j = 1, 2, \dots, n$, 为 n 个场值,通过解 n 个方程的线性方程组,即可获得 m 个点源的磁化强度值。

通常,构建许多不同模型都能减小拟合差至同一期望水平,即反演中常说的多解性。为找到一个特定的模型,地球物理反演理论定义了一个关于磁化率的目标函数,使其最小化以符合实际情况。目标函数的细节取决于具体的问题,并且可以随着先验信息的改变而改变,但一般而言,目标函数应该具有一定的灵活性以使所构建的模型接近参考模型,并使产生的模型在 3D 空间是平滑的,磁法 3D 反演目标函数的定义如下:

$$\begin{aligned} \phi_m = & \alpha_s \int \omega_s \omega(z) (z) (\rho - \rho_0) dz + \alpha_x \int \omega_x \\ & \left(\frac{\partial \omega(z) (\rho - \rho_0)}{\partial x} \right)^2 dz + \alpha_y \int \omega_y \left(\frac{\partial \omega(z) (\rho - \rho_0)}{\partial y} \right)^2 dz + \\ & \alpha_z \int \omega_z \left(\frac{\partial \omega(z) (\rho - \rho_0)}{\partial z} \right)^2 dz \end{aligned} \quad (\text{式 } 3)$$

式中, ω_s , ω_x , ω_y 和 ω_z 为空间相关函数, α_s , α_x , α_y 和 α_z 为决定沿某个方向重要性的系数,如 α_x/α_s 的比值越大,模型沿 x 方向就越平滑。每个方向平滑程度可以通过以下 3 个参数定义: $L_x = \sqrt{\alpha_x/\alpha_s}$, $L_y = \sqrt{\alpha_y/\alpha_s}$, $L_z = \sqrt{\alpha_z/\alpha_s}$, L 值越大,反演所得的模型越平滑。

众所周知,重磁数据没有固有的确定的垂向分辨率,在模型构建过程中,直接表现为核函数随深度的衰减,由于其幅值随深度增加迅速衰减,地面的观测数据不足以产生具有深度分辨率的核函数。为此,反演需要引入深度加权方法来减少这种自然衰减对反演结果的影响。根据反演中离散化的要求,将深度加权函数定义如下:

$$\omega(\vec{r}_j) = \left[\frac{1}{\Delta z_j} \int \frac{dz}{(z + z_0)^2} \right]^{1/2}, j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{式 } 4)$$

$\vec{r}_j$ 是第 j 个网格单元与观测点的距离, Δz_j 是第 j 个单元的厚度,此加权函数是一个归一化的函数。

1.2 反演步骤与方法

航磁 3D 反演的基本流程和相关方法如下:

(1) 数据准备:航磁测量数据(如区域场分离、滤波等)的处理,保留反演拟达到深度范围内的信息;用以反演数据的误差估计,包括数据噪声估计,观测点定位误差等导致数据的误差;收集地质、构造、钻孔、物性资料等先验信息,为后续模型构建、权重函数设置、模型单元的物性(磁化率)边界范围选取提供有用的信息。

(2) 网格剖分:这个步骤实质是将模型离散化,将地下半空间剖分成若干合适的矩形体(代表地质体单元),组合形成 3D 模型区域(图 1)。在物性反演中,一旦确定了模型的剖分关系,其几何形态及与测点的相对关系将始终保持不变。网格剖分既需要考虑模型的精度,如多大的模型单元才能反映感兴趣地质体的分布,同时还要考虑计算量,在满足精度需求前提下控制模型单元的数量,从而减少反演所需的时间,实现快速反演。

(3) 定义反演过程所用到的参数:如何确定目标函数中的空间相关系数(式 3),深度加权函数等(式 4)是决定反演结果好坏的重要步骤之一。设置合适的拟合差,通常将其设置为测量数据的标准偏差。

(4) 执行反演:首先计算几何格架,然后对每个模型体进行扫描作正演计算,每扫描完一次后计算正演场与实测场的均方误差。

(5) 解的评价:从收敛性、地质解释的合理性对反演结果进行综合评价,如果不满足反演精度要求,

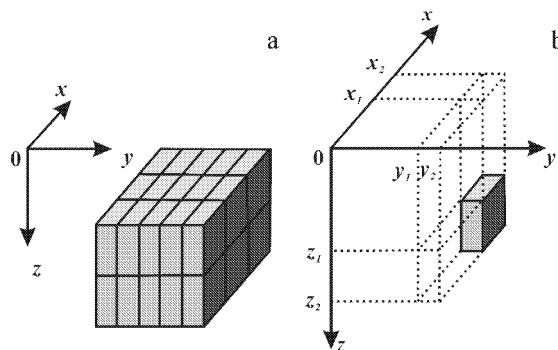


图 1 反演模型示意图(据姚长利等, 2002)

a. 组合模型; b. 任一模型单元

Fig. 1 Schematic inversion model(after Yao et al., 2002)

a. Combination model; b. Anyone model

进行迭代,重复步骤(4),直到反演结果满足精度要求,完成反演,输出反演结果。然后在 3D 可视化环境下与其他相关信息(地质、钻孔)综合集成,进行反演结果的解释。

2 磁参数 3D 反演及岩体圈定

2.1 数据及 3D 磁参数反演

航磁数据范围包括 1:5 万幅铜陵幅、戴家汇幅全部及南部的木镇幅和乔木湾幅部分,范围为东经 117°40′00″~118°15′00″,北纬 30°42′30″~31°00′00″。航磁测量飞机的飞行高度为 107~300 m,大部分区域测线间距为 500 m,局部区域为 2 000 m(西北角和东南角)。铜陵矿集区原始数据化极处理结果见图 2 所示,磁异常总体呈北东向分布,东北部为整体高磁异常区,在这个高背景上又叠加了戴公山-戴家汇、凤凰山、舒家店、牧家山等次级高磁异常区,狮子山磁异常和施家冲(图中岭头东部异常)磁异常

为高背景外围的异常,铜官山、西湖及插花山西异常为独立的高磁异常。

本研究拟对铜陵矿集区 5 000 m 深度范围内进行 3D 航磁成像反演。为消除深部磁性体的影响,保留 5 000 m 以浅磁源信息,对化极异常进行了区域场与局部场的分离。采用多项式拟合的方法,进行一阶、二阶和三阶多项式拟合,结合地质信息,经过对比后认为,二阶剩余异常(图 3)较好地保留了 5 000 m 以浅的磁源信息,故将其作为 3D 反演的数据。

网格剖分:1 000 m 深度范围内,网格单元长×宽×高=200 m×200 m×50 m;1 000~5 000 m 深度范围内,网格单元长×宽×高=200 m×200 m×100 m,网格单元总数(个)为 112×73×20=163 520。

磁化率边界设置为 0~1 SI,通过 14 次迭代计算完成反演,反演结果如图 4 所示。图中最上层是航磁化极异常,中间是地形地质图,底层为航磁 3D 反演结果立体图,从蓝色到红色的颜色渐变表示磁

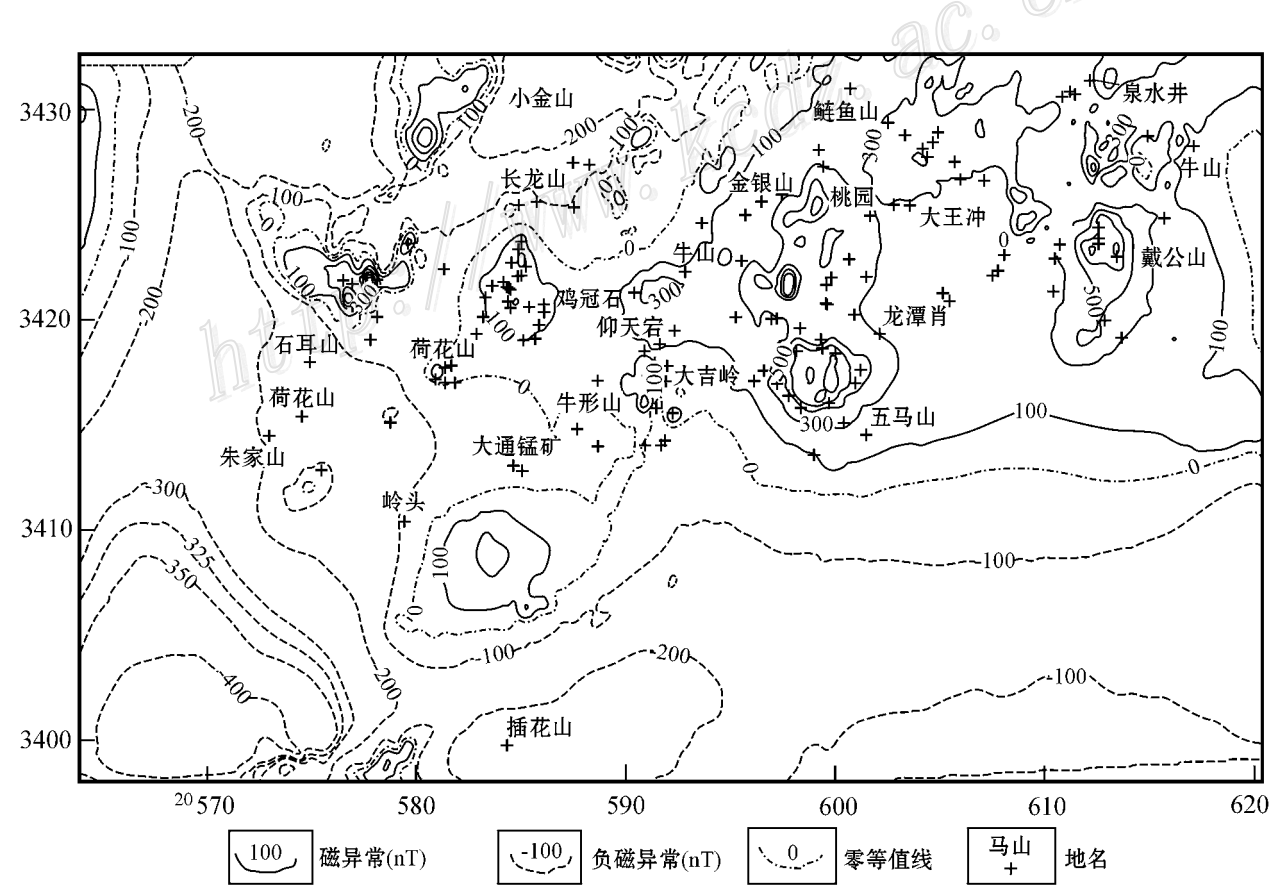


图 2 铜陵矿集区 1:5 万航磁化极异常

Fig. 2 1:50 000 aeromagnetic anomaly (reduction to the pole) in the Tongling ore concentration district

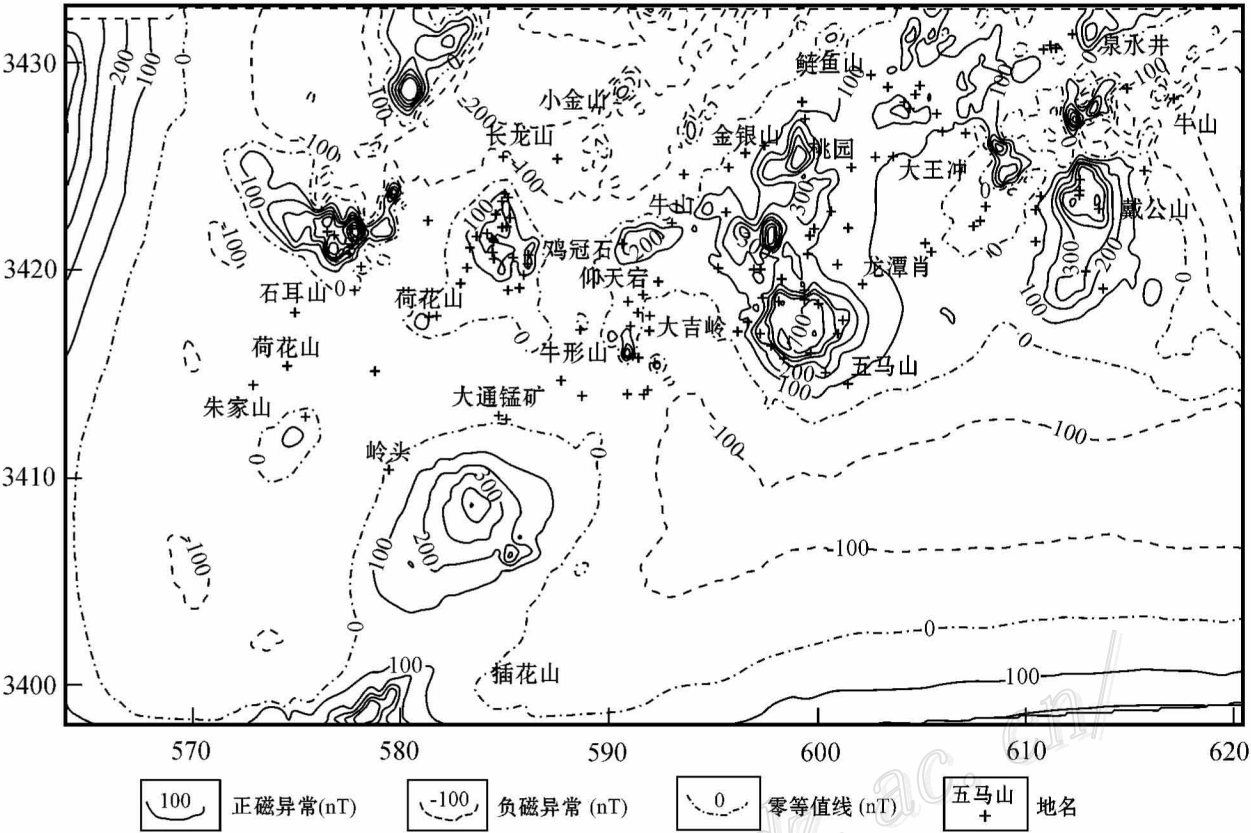


图 3 铜陵矿集区 1:5 万航磁化极二阶剩余异常

Fig. 3 1:50 000 second-order aeromagnetic residual anomaly (reduction to the pole) in the Tongling ore concentration district

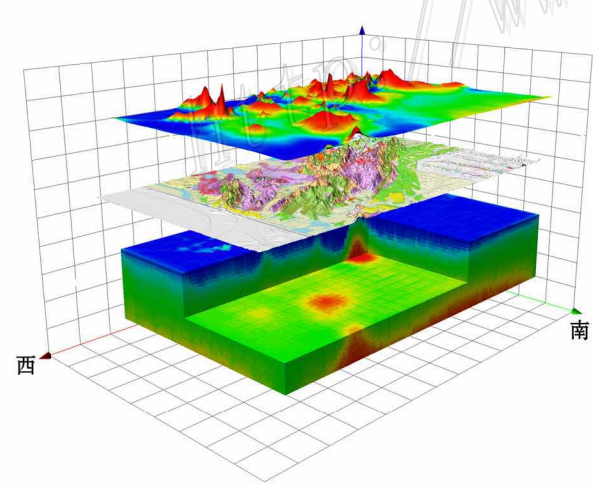


图 4 铜陵矿集区航磁 3D 反演成像结果

上层为航磁化极异常,蓝色到红色表示磁异常从低到高变化;中间层为地质图叠加于数字地形;下层为磁化率切片,蓝色到红色表示磁化率从低到高渐变

Fig. 4 3D aeromagnetic inversion imaging result of the Tongling ore concentration district

Upper: Aeromagnetic anomaly, color change from blue to red shows change of magnetic anomaly from low to high; Middle: Geological map overlaying DEM; Lower: Section of susceptibility, changes from blue to red shows the gradual change of susceptibility from low to high

表 1 铜陵矿集区岩矿石磁性参数表

Table 1 Statistics of magnetism of rocks(ores) in Tongling ore concentration district

岩(矿)石名称	磁化率 $k/10^{-6}$ SI	剩磁 $J_r/10^{-3}(A/m)$
闪长岩	16 336.27~30 159.26	60~200
石英闪长岩	47 752.17~72 884.89	130~280
花岗闪长岩	32 672.54~51 522.08	45~310
石英二长岩	5 026.54	200
闪长斑岩	3 015.93~45 238.90	0~360
辉绿岩	55 291.98	1 500
含铜矽卡岩	7539.82~1 130 972.40	150~2 700
含铜磁铁矿	$n \times 12.57 \times 10^3 \sim 2.51 \times 10^6$	$2 \times 10^3 \sim 10^5$
含铜赤铁矿	276 459.92	17 000
大理岩	<12 566.36	0
灰岩	<12 566.36	0

化率从低到高的变化。

2.2 岩体圈定依据及结果

根据物性测量结果(表 1),在铜陵矿集区,从奥陶系到第四系,沉积地层岩石磁化率均较小,一般小于 $12\,566 \times 10^{-6}$ SI,可视为无磁性,而各类侵入岩体、火山岩、矽卡岩和磁性矿石(如磁黄铁矿、磁铁矿等)的磁化率较地层磁化率至少高出 3~4 个数量

级,表明本区的航磁异常主要是由与岩浆活动相关的地质构造所引起的。而在矿集区尺度上,矿体规模远远小于岩体规模,引起磁异常的主要因素应为含磁性的岩体,航磁3D反演结果中的高磁化率部分主要反映了岩体分布情况。本区侵入岩磁化率变化范围为 $5\,026.54 \times 10^{-6} \sim 72\,884.89 \times 10^{-6}$ SI,均值为 $50\,265.44 \times 10^{-6}$ SI,因此,选择反演结果磁化率大于 $25\,132.72 \times 10^{-6}$ SI部分代表中酸性岩体分布范围,由此得出岩体3D分布图(图5,图中紫红色部分为推测岩体)。

将地质图与推测岩体结果在3D可视化环境中叠合在一起,截取不同深度水平切片,能够更加直观地反映岩体在不同深度的形态,便于分析矿床(点)与岩体分布之间的关系,为成矿研究和找矿分析提供丰富的信息。图6为-1 000 m深度岩体与地质图叠合到一起的3D透视图,从图中可以看出,航磁3D反演推测岩体与地质填图中岩体一一对应。

航磁3D反演成像推测所得岩体按其形态特征可以划分为以下3类:

(1) 地表出露各类小岩体、岩枝、岩脉,在深部连通形成一个大型岩体,此类岩体在本区占绝大多数。铜官山矿田中2号岩体和3号岩体以及未编号的小岩体,在700~1 000 m深度连为一体,其中2号

岩体主体部分为金口岭石英闪长岩体,北西向条带状分布,长约5 000 m,宽约1 000 m。金口岭地段岩体埋深在500 m以浅,向南东和北西侧顶面埋深逐渐增加至1 000 m深度。该岩体比地质填图所得岩体范围要大,向北西一直延伸到长江北岸。3号岩体对应虎山角闪闪长斑岩体,呈圆筒状,直径约600 m,岩体往深部逐渐变大,在700~1 000 m深度与2号岩体(金口岭岩体)连为一体,因此,该岩体是2号岩体的一个子岩体。地表出露的各类小岩枝、岩脉是该岩体的分支,即前人所谓的“母子式”或“兄弟式”岩体。岩体周边矿床(点)密集,铜官山矿田即在此岩体周边分布。狮子山矿田和焦冲下方的岩体在3 000 m深度也连为一体,其中4号岩体位于狮子山矿田,呈南北向椭球状分布,长约5 000 m,东西向最宽达2 500 m。此岩体是浅部的老鸭岭、冬瓜山、乌栗山等岩体的综合反映。鸡冠石—老鸭岭—冬瓜山一线岩体埋藏较浅,在700 m左右深度逐渐连为一体,形成一个较大的隐伏岩体。狮子山矿田如“众星捧月”般围绕此岩体分布,铜、硫、金矿床多分布于岩体隆起部位。5号岩体对应地表焦冲岩体,东西向分布,1 000 m深度范围内为一半径800 m左右的直立岩株,随着深度的增加,逐渐向东倾覆,在3 000 m深度与4号岩体连为一体。

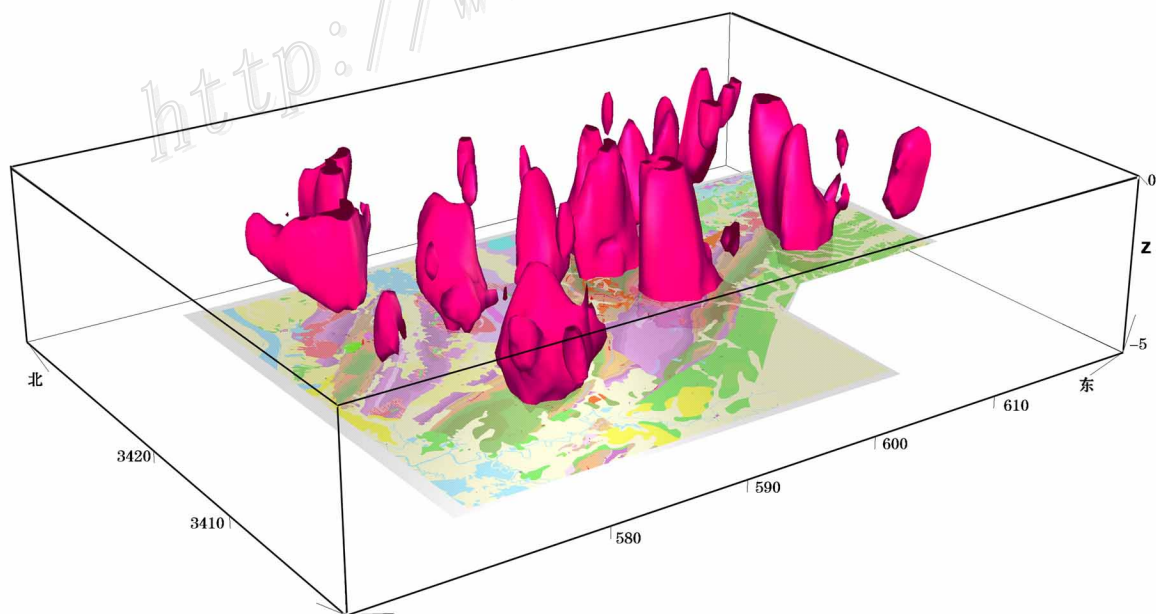


图5 航磁3D成像反演推测岩体图

Fig. 5 Inferred intermediate-acid intrusive bodies from aeromagnetic 3D inversion imaging

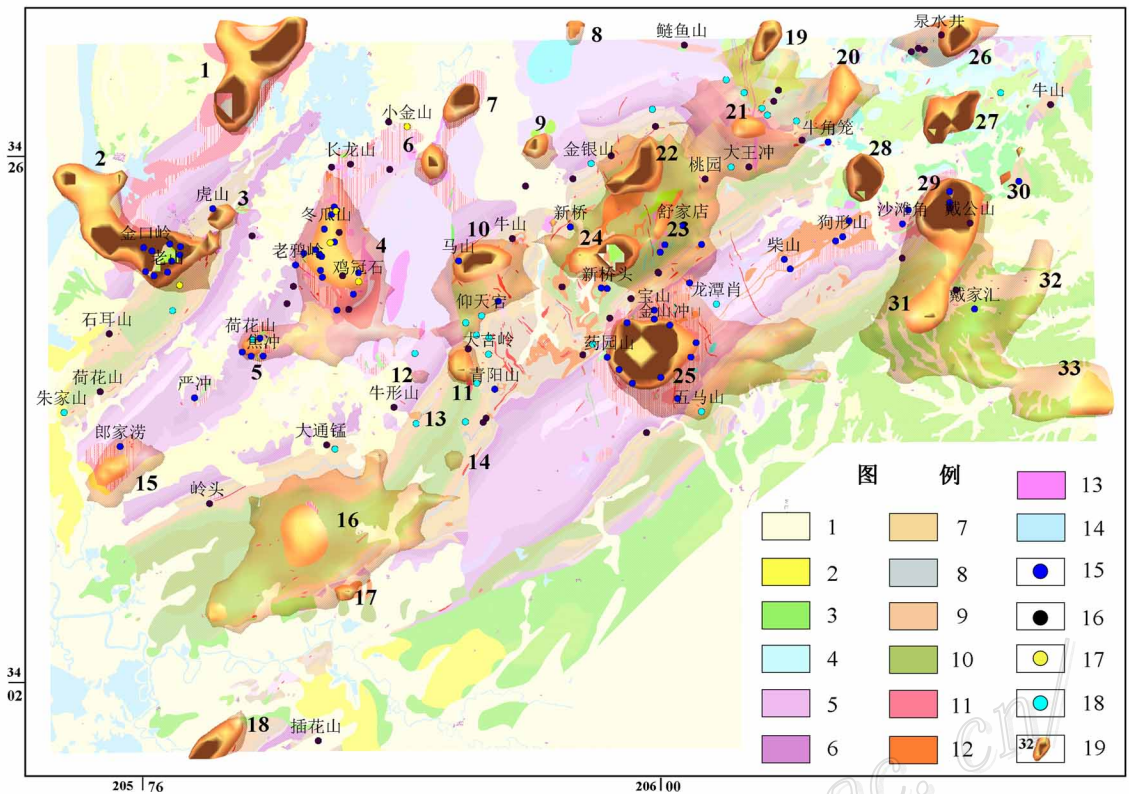


图 6 航磁 3D 反演推测岩体透视图(地质图置于 -1 000 m 深度,40% 透明度)

1—第四系;2—第三系;3—白垩系;4—侏罗系;5—三叠系(上统);6—三叠系(下统);7—二叠系;8—石炭系;9—泥盆系;10—志留系;11—花岗闪长岩;12—花岗闪长斑岩;13—石英二长闪长岩;14—水系;15—铜矿(点);16—铁矿(点);17—硫金矿(点);18—铅锌多金属矿(点);19—航磁反演推测岩体及其编号

Fig. 6 Perspective map of intermediate-acid intrusive bodies inferred from aeromagnetic 3D inversion imaging (geological map located at -1 000 m, 40% transparent)

1—Quaternary; 2—Tertiary; 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Upper Triassic; 6—Lower Triassic; 7—Permian; 8—Carboniferous; 9—Devonian; 10—Silurian; 11—Granodiorite; 12—Granodiorite porphyry; 13—Quartz diorite; 14—River; 15—Copper deposit; 16—Iron deposit; 17—Sulfur gold deposit; 18—Lead-zinc deposit; 19—Intermediate-acid intrusive body based on aeromagnetic inversion and its serial number

本区东北部的鲢鱼山东—牛角笼—舒家店—新桥头—宝山—凤凰山一线的 19~25 号岩体在 2 000 ~4000 m 深度范围内相互连通,形成本区最大的岩体。其中,19 号岩体地表出露多条流纹斑岩脉,在 700 m 深度附近形成长 1 200 m,宽 500 m 的条状岩体。20 号岩体位于牛角笼北,地表出露多条流纹斑岩脉,在 900 m 深度附近形成长 1 700 m,宽 500 m 的扁豆体;21 号岩体对应地表缪家石英二长闪长玢岩体,近东西向分布,呈东宽西窄带状蜿蜒,随深度增加,逐渐向北倾斜,在 1 000 m 深度,形态变为直径 400 m 的圆形;22 号岩体对应地表林家冲花岗闪长斑岩体,呈“J”状分布,总长约 1 800 m,在 1 300 m 深度与南侧的 23 号岩体(舒家店岩体)相连;23 号岩体对应舒家店复式岩体,北东向带状蜿蜒分布,在 1 250 m 左右与新桥头岩体(24 号)连为一体;24 号

岩体对应新桥头复式岩体,呈近等轴状多边形,地表多呈小岩株产出,深部则连为一体,在 1 000 m 深度,反演所得岩体较地表岩体偏向北侧,说明该岩体主体在北部,地表所见南侧岩体为深部岩浆在浅部形成的岩盖;25 号岩体对应凤凰山花岗闪长岩体,其地表出露为近圆形,周边则蜿蜒曲折,凤凰山矿田多围绕岩体边部分布,随着深度的增加,岩体规模加大,并逐渐向东隐伏,在 1 250 m 深度直径增大为 2 500 m,到 3 000 m 深度向东发展出 2 个长约 2 700 m 的分支,其北侧一支东部顶面埋深较浅(2 500 m 左右),南侧一支埋深较大(大于 4 500 m),在 4 500 ~5 000 m 深度,向北发展,与 19~24 号岩体连接,形成本区最大规模的深部岩体。

戴公山—沙滩角—戴家汇一带的 29~33 号岩体在深部也发展为同一岩体。其中,29 号岩体对应

地表出露的戴公山和沙滩角岩体,近圆形分布,当深度为500 m时,直径约为1 400 m,随着深度的增加,岩体规模增大,当深度达1 000 m时,向南与戴家汇岩体(31号)连通,30号岩体地表出露有大路方花岗闪长斑岩体,为一规模较小的岩株,31号岩体地表零星出露各类岩体(如犀牛山岩体),500 m深度为近圆形分布,随着深度逐渐变大,在1 000 m深度向北发展,与戴公山岩体(29号)连为一体,32号岩体地表为第四系和白垩系所覆盖,推测为一隐伏岩体,顶部埋深在1 250 m左右,近南北向条带状分布,长约2 400 m,宽约700 m;33号岩体地表为第四系和白垩系所覆盖,推测为一隐伏岩体,顶部埋深在1 000 m左右,近东西向条状分布,长约2 600 m,宽约1 500 m,在3 500 m深度向西北发展,与29号、31号和32号岩体连接,形成一个大岩体。

施家冲岩体地表出露面积较小,仅在施家冲(闪长岩)、大山门(闪长岩)、姚家塘(闪长斑岩)零星出露,但在深部16号和17号岩体形成一个近北东向的大岩体。其中,16号岩体地表出露面积较小。本次反演推测其深部有规模较大的岩体存在,随着深度的增大,岩体规模逐渐增大,在1 000 m深度时,为南北向长轴1 400 m的椭球状,到3 000 m深度时,变为北东向长轴长6 200 m的不规则条状,同时,在主体岩体上向北、东、南等方向发展出数个岩枝;17号岩体对应地表出露的姚家塘闪长斑岩体,在1 000 m深度,该岩体与北侧的16号岩体相连,因此,此岩体与17号岩体来源相同,为“兄弟式”岩体。

马山岩体(10号)和外郎坑岩体(11号)在3 000 m深度为同一岩体。其中,10号岩体对应地表马山花岗闪长斑岩体,500 m以浅北东东向窄条状分布,长800 m,宽400 m,随着深度的增加,岩体逐渐变大,到3 000 m深度,主体部分变为半径约1 800 m的圆形,并向南发展出一分支,与11号岩体相连;11号岩体对应地表的外郎坑花岗闪长岩体和田房北闪长岩体,两者在700 m左右深度连为一体,呈南北向分布,长1 000 m,宽650 m,深部向北发展,在3 000 m深度与10号岩体相连。

(2)地表有岩体出露,其深部仍为独立岩体,且规模较小。这类岩体包括以下几个:

1号岩体为花岗闪长岩体,位于铜陵县天井湖,呈北东向条状分布,长约3 200 m,宽1 200~2 000 m。在天井湖两头隆起出露地表,在湖中间下凹,深度至500 m左右。南西部围岩为三叠系南陵湖组,

北部为第四系覆盖,该岩体附近目前暂未发现金属矿床(点)。

6号岩体对应地表小金山闪长岩体,北东向椭圆状分布,地表为零星状出露,往深部逐渐加大,在1 250 m左右发展为长轴长1 000 m,短轴长约800 m的椭球体;7号岩体对应地表的顺安闪长岩体,北东向分布,浅部出露面积较小,在800 m左右深度逐渐增大为长约1 200 m,宽700 m。地质填图的6号与7号岩体在地表相连,而反演所得6号和7号岩体并未连为一体,推测可能是由于地表出露相连部分岩体厚度较薄,不能产生对应的磁异常的缘故。

9号岩体位于长冲附近,为辉长辉绿岩岩体,呈圆筒状往南倾,在700~1 000 m深度逐渐变大,长约900 m,宽约800 m。

15号岩体对应地表出露的五贵桥花岗闪长岩体(郎家涝南300 m),北东向条状分布,地表出露面积较小,随着深度的增加,岩体逐渐向南东侧倾覆且规模逐渐增大,到1 500 m深度时,长度增至1 900 m,宽度增至1 200 m左右。

18号岩体对应地表出露的盛公山二长花岗岩体,北东向带状分布,地表出露面积较小,在其南东部还出露二长花岗斑岩脉,随着深度的增加,岩体规模随之增大,在1 000 m左右深度发展为长1 480 m,宽400~700 m的条状岩体。

26号岩体位于泉水井附近,地表出露歪歪山石英二长岩,北东东向呈扁豆状分布,在500 m深度范围内规模较小,呈直径约500 m的圆形分布,随着深度的增大,岩体规模增大,当深度为1 500 m时长度增至1 800 m。

(3)地表无明显露头显示,为本次工作首次推测出的全隐伏岩体主要有以下几个:

8号岩体,位于鲢鱼山西,其顶部埋深大致在500~700 m之间,长约800 m;12~14号岩体在地表无明显出露,顶面埋深在1 000 m左右,形态为直径250~300 m的圆筒状直立岩体;27号岩体,推测深部存在向北倾的岩体,岩体顶面埋深在750 m左右;28号岩体深部存在南北向近似椭球形的岩体,在500 m深度,长轴约为1 100 m,短轴约为900 m。

3 深部找矿远景区圈定

3.1 远景区圈定的原则

根据铜陵矿集区地质和成矿特征,结合流体填

图、地球物理和地球化学探测结果,确定了以下几条圈定深部找矿远景区的原则。

(1) 岩浆活动条件

燕山期岩浆活动形成的中酸性侵入岩,尤其是辉石二长闪长岩和石英二长闪长岩,不仅是矽卡岩型矿床形成的必要条件,也是叠加改造型矿床形成的重要条件之一。岩体穿插块状硫化物层的部位,以及岩体的接触带,特别是几个岩枝之间的凹兜构造及半封闭构造是成矿的重要部位。因此,寻找隐伏岩体及其接触带是深部找矿的另一个主要方向。

(2) 容矿层位依据

铜陵矿集区内上石炭统为重要的容矿层位,其次是三叠系中下统各组和二叠系下统栖霞组和上统大隆组。其中,上石炭统黄龙组底部是大型-超大型块状硫化物矿床及叠加改造型铜矿床的主要产出层位,而其他各层位是层状矽卡岩型矿床的产出层位。因此,追踪容矿层位,特别是上石炭统黄龙组底部层位,是深部找矿的主要方向之一。

(3) 有利构造部位

褶皱构造翼部的层间破碎带和转折端部位的虚脱空间是层状矽卡岩型矿床成矿的有利部位,特别是在有北北东向、北西向断裂交叉的部位,更是控制厚、富矿体产出的重要因素。因此,背斜构造的核部和翼部是深部找矿的有利构造部位。

(4) 蚀变矿化显示

矽卡岩化是矽卡岩型矿床的特征蚀变标志,成分、结构复杂和经过退化蚀变的矽卡岩,或经层间扩散与渗滤交代形成的层状矽卡岩,是确定矽卡岩型或层控矽卡岩型矿床找矿靶区的重要依据。钾长石化、黑云母化、硅化、绢云母化、绿泥石化、高岭土化、碳酸盐化等的蚀变组合,是确定斑岩型和中低温热液型矿床找矿靶区的重要依据。

(5) 地球化学异常

地球化学异常是与成矿活动相伴随的产物,预示着成矿元素富集成矿的部位,是预测和深部找矿的重要依据。已知的矿区和矿田地球化学异常显示,矽卡岩型矿床具有 Cu、Au、Ag 异常组合,块状硫化物矿床具有 Ag、Pb、Zn 异常组合。

(6) 地球物理标志

地球物理异常能提供其他方法难以获取的深部信息,重力异常和磁异常能够反映地表及地下岩体的分布及形态产状。磁异常局部的高峰值异常往往直接指示磁性矿体的存在,而低缓异常则反映了侵

入岩体经历了与成矿相关的强烈蚀变作用;电法异常往往指示硫化物的富集部位。综合分析重、磁、电法异常是寻找深部的重要标志,特别是位于磁异常梯度带上的重力剩余异常,常常预示着不同深度内有隐伏的矿床(体)存在。

3.2 深部找矿远景区

根据上述原则,圈定了铜官山北、朱村-焦冲、小金山-西湖、凤凰山、沙滩脚-戴公山和丁桥北等6个深部找矿远景区(图7),其中朱村-焦冲、铜陵和凤凰山为最有利找矿远景区。

铜官山北找矿远景区 该区位于铜陵市周围,属铜官山矿田的北延部分,处于铜官山背斜北东倾伏端及西侧。地表出露的二叠系构成背斜的核部,三叠系分布于背斜两翼,具备有利的容矿层位和构造条件,特别是下伏的上石炭统底部处于海西期喷流沉积流体系统的铜官山-冬瓜山流体储集区,是与松树山和马山类似的块状硫化物层发育的有利部位。燕山期岩浆侵入活动强烈,形成来龙山、马山和金口岭等大量中酸性岩体,岩体接触带发育矽卡岩化,具备形成矽卡岩型矿床的条件。地球物理上呈现正高磁异常,低负重力剩余异常中局部分布正异常。地球化学上水系沉积物具有 Cu、Au、Zn、Hg 异常,土壤具有活动态 Cu、Mo、Au、Ag、As、Bi 异常。因此,该区具有形成矽卡岩型 Cu-Au-Fe 和叠加改造型 Cu-Au-S 矿床的条件,是寻找这2类隐伏矿床的远景区段。

朱村-焦冲找矿远景区 该区位于狮子山南侧,属狮子山矿田的南延部分,处于青山背斜和朱村向斜之间。地表出露地层主要为三叠系,下伏地层中具备有利的容矿层位和构造条件,其中上石炭统底部处于海西期喷流沉积流体系统的铜官山-冬瓜山流体储集区,是与冬瓜山类似的块状硫化物层发育的有利部位。燕山期岩浆侵入活动强烈,形成众多中酸性岩体,岩体接触带发育矽卡岩化,具备形成矽卡岩型矿床的条件。地球物理上呈现低缓背景上的正高磁异常和重力剩余异常。地球化学上水系沉积物具有 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 异常,土壤具有活动态 As、Hg、Bi 异常。因此,朱村-焦冲地区具有形成矽卡岩型 Cu-Au-Fe、叠加改造型 Cu-Au-S 和中低温热液型 Au-Ag 矿床的条件,是寻找这3类隐伏矿床的远景区段。

小金山-西湖找矿远景区 该区位于狮子山北东侧,属狮子山矿田的北东延伸部分,处于青山背斜

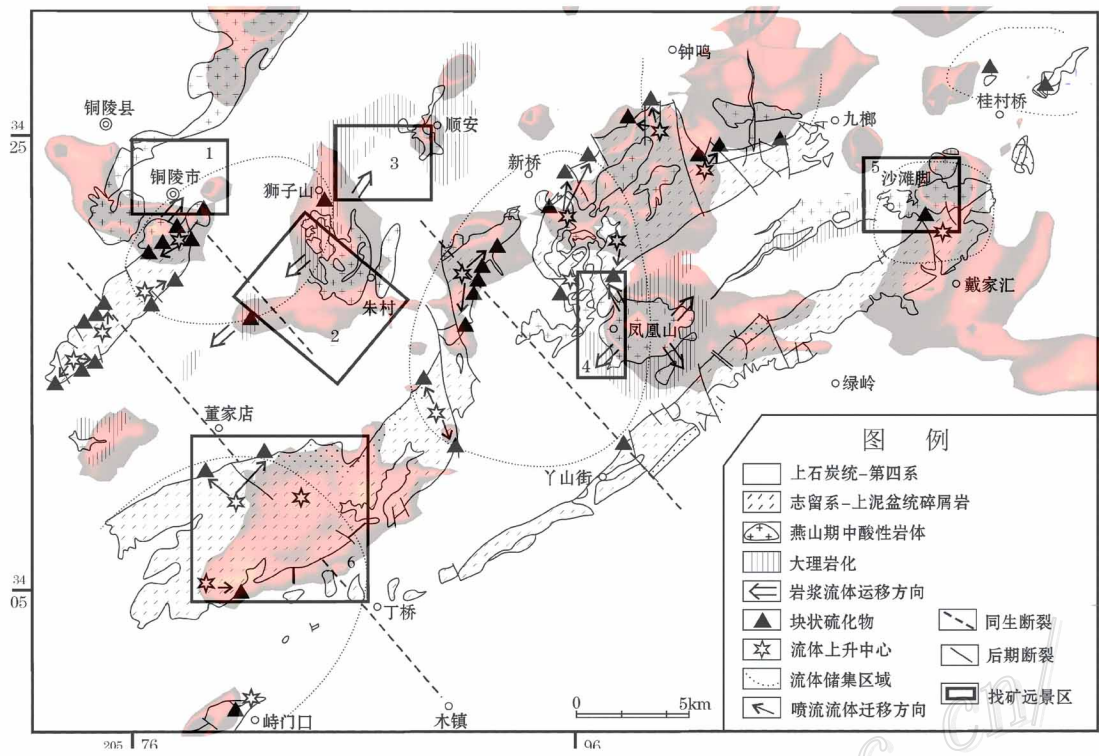


图 7 铜陵矿集区深部找矿远景区(彩色背景为岩体分布)

1—铜陵找矿远景区；2—朱村-焦冲找矿远景区；3—小金山找矿远景区；4—凤凰山找矿远景区；5—沙滩脚-戴公山找矿远景区；6—丁桥北找矿远景区

Fig. 7 Deep prospect areas in the Tongling ore concentration district

1—Tongling prospect area; 2—Zhucun-Jiaochong prospect area; 3—Xiaojingshan prospect area; 4—Fenghuangshan prospect area; 5—Shatanjiao-Daigongshan prospect area; 6—Dingqiao North prospect area

北东端。地表出露地层主要为三叠系,下伏地层中具备有利的容矿层位和构造条件。燕山期岩浆侵入活动强烈,形成众多中酸性小岩株,岩体接触带发育矽卡岩化,具备形成矽卡岩型矿床的条件。地球物理上呈现低缓背景上的正高磁异常和重力剩余异常。地球化学上水系沉积物具有弱的 Ag 、 Pb 、 Zn 、 Hg 异常,土壤具有活动态 Hg 异常和弱的 Au 、 Pb 、 Zn 、 As 异常,显示远端元素组合特征。因此,小金山一带深部可能具有形成矽卡岩型矿床的条件。

凤凰山找矿远景区 该区位于凤凰山南北两侧,属凤凰山矿田的西部,处于舒家店背斜和新屋里复向斜之间,凤凰山岩体西接触带附近。地表出露地层北部为上泥盆统一二叠系,南部为三叠系,具备有利的容矿层位和构造条件,特别是上石炭统底部处于海西期喷流沉积流体系统的新桥流体储集区的南东侧,是发育类似新桥块状硫化物层的有利部位。燕山期岩浆侵入活动形成凤凰山中酸性岩基,岩体

内发育钾长石化、绢云母化、绿泥石化等,接触带发育矽卡岩化,具备形成矽卡岩型和斑岩型矿床的条件。地球化学上水系沉积物具有 Cu 、 Au 、 Ag 、 W 异常和弱的 Pb 、 Zn 异常,土壤具有活动态 Cu 、 Mo 、 Au 、 Ag 、 Pb 、 Zn 、 W 、 Bi 、 Ba 异常和弱的 As 、 Sb 、 Hg 异常,显示多种成矿类型的元素组合异常。因此,凤凰山一带在岩体接触带已找到矽卡岩型 Cu - Au - Fe 矿床,在岩体内具有形成斑岩型 Cu - Mo 矿床的条件,在岩体外围具有形成叠加改造型 Cu - Au - S 矿床的条件,远离岩体具有形成喷流沉积型 S - Fe - Cu 矿床的条件,是寻找多种类型隐伏矿床的远景区段。

沙滩脚-戴公山找矿远景区 该区位于矿集区东部九榔和戴家汇之间,属沙滩脚矿田,处于新屋里复向斜与丫山背斜之间。自北西向南东,地表出露地层由三叠系到上泥盆统,具备有利的容矿层位和构造条件,其中上石炭统底部发育薄的块状硫化物层。燕山期岩浆侵入活动强烈,形成众多中酸性岩

体,岩体接触带发育矽卡岩化,具备形成矽卡岩型矿床的条件。地球化学上水系沉积物具有弱的 Cu、Au、Ag、Hg、W 异常,土壤具有活动态弱的 Au、Ag、Pb、Hg、Ba 异常。因此,沙滩脚-戴公山一带具有形成矽卡岩型 Cu-Au 和叠加改造型 Cu-Au-S 矿床的条件,是寻找这 2 类隐伏矿床的远景区段。

丁桥北找矿远景区 该区位于青阳县丁桥镇北施家冲-姚家塘一带,岩体地表出露面积较小,仅在施家冲(闪长岩)、姚家塘(闪长斑岩)零星出露,施家冲一带岩体与砂岩接触带见明显硅化,姚家塘一带岩体北侧为三叠系灰岩。从岩体推断图发现,其深部有规模较大的岩体存在,说明其深部热流体活动强烈,流体填图也证明此处为流体上升中心,且靶区大部分区域为流体储集区域。靶区位于永村桥背斜南西段,区内褶皱构造发育,其中呈被北东向分布的占主导地位,东西向较少。区内断层构造也十分发育,以北东向高角度冲断层为主,并且成组出现。北西、北东向和东西向断层次之,后者往往截断前者。区内见铁帽及铁帽开采后的遗迹多处,居民开挖吃水井时曾挖出 2 m 厚的黄铁矿,证明了本区硫化物比较发育。因此,丁桥北深部具有寻找矽卡岩型和斑岩型 Cu-Au 矿床的前景。

4 结 论

(1) 在中酸性岩体与围岩之间存在一定磁性差异的地区,航磁 3D 反演成像技术是一种行之有效的岩体识别手段,通过对反演所得磁化率分布情况的分析,可识别、圈定隐伏或半隐伏岩体,并可定量获取岩体 3D 形态特征,如顶部埋深、界面起伏、空间形态等,从而为寻找与中酸性侵入岩体有关的矿产提供指示信息。

(2) 在航磁 3D 反演推测岩体基础上,根据铜陵矿集区地质和成矿特征,结合流体填图、地球物理和地球化学探测结果,确定了圈定深部找矿远景区的原则,并圈定了铜官山北、朱村-焦冲、小金山-西湖、凤凰山、沙滩脚-戴公山和丁桥北等 6 个深部找矿远景区。

References

Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River [M]. Beijing: Geol.

Pub. House. 379p (in Chinese).

Duan C S. 2005. Comprehensive research on the distribution and occurrence of intrusive rock [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 35(6): 777-782 (in Chinese with English abstract).

Gribb J. 1976. Application of the generalized Linear inversion of static potential data [J]. Geophysics, 41: 1365-1369.

Han D F. 1992. Characteristics of gravity-magnetic field and relationship between geological structure, magmatic rocks and endogenetic deposits in Nanjing-Zhenjing area [J]. Geology of Jiangsu, 6(3): 228-234 (in Chinese with English abstract).

Hearst R B and Morris W A. 2001. Regional gravity setting of the sudbury structure [J]. Geophysics, 66(6): 1680-1690.

Jin X, Jia L G, Sun Z R and Gao F. 2008. Inference of hidden rock bodies by magnetic measurement data in 1:50000 mineral resources survey [J]. Geology and Resources, 17(1): 65-68 (in Chinese with English abstract).

Li Y G and Douglas W O. 1996. 3-D inversion of magnetic data [J]. Geophysics, 61(2): 394-408.

Lindrith C and Daniel H. 1987. Knepper Aeromagnetic images: Fresh insight to the buried basement, Rolla quadrangle, southeast Missouri [J]. Geophysics, 52(2): 218-231.

Liu D M. 2009. Application of geophysical prospecting technologies to volcanic rock identification and reservoir prediction: Examples from Songliao basin and Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 30(1): 109-113 (in Chinese with English abstract).

Mai G T. 1990. On evolution distribution and emplacement of granites based on the regional gravitational-magnetic field in Guangxi [J]. Geology of Guangxi, 3(1): 15-23 (in Chinese with English abstract).

Malehmir A, Thunehed H and Tryggvason A. 2009. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits [J]. Geophysics, 74(1): 9-22.

Nagy D. 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism [J]. Geophysics, 31: 361-371.

Qin B H. 1985. A geological interpretation on the regional gravity and magnetic anomalies in Nanling area [J]. Geology of Hunan, 6(1): 1-15 (in Chinese with English abstract).

Sun Z W. 1983. The relationship between character linement of gravity-magnetic field and distribution of basic and ultrabasic rock [J]. Geology of Jilin, 9: 51-57 (in Chinese with English abstract).

Vasanthi K M. 2005. Bouguer gravity anomalies and occurrence patterns of kimberlite pipes in Narayanpet-Maddur Regions, Andhra Pradesh, India [J]. Geophysics, 70(1): 13-24.

Yao C L, Hao T Y and Guang Z L. 2002. Restrictions in gravity and magnetic inversions and technical strategy of 3D properties inversion [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 26(4): 253-256 (in Chinese with English abstract).

Yao C L, Hao T Y, Guang Z L and Zhang Y W. 2003. High-speed computation and efficient storage in 3D gravity and magnetic inver-

- sion based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(2):252-258 (in Chinese with English abstract).
- Yao C L, Zheng Y M and Zhang Y W. 2007. 3D gravity and magnetic inversion for physical properties using stochastic subspaces[J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(5):1576-1583 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W C, Liu J F, Xie L W, Li X P and Hao Y S. 2008. Inferring concealed and semi-concealed terrain by using aeromagnetic data[J]. Journal of East China Institute of Technology (Nature Science Edition), 31(4):349-456 (in Chinese with English abstract).
- Zhong S H. 1992. 1:5 million gravity measurements in Mengzi County in search of buried white cow plant the effect of granite[J]. Geology of Yunnan, 11(1):101-103 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社. 379页.
- 段春生. 2005. 侵入岩的分布与赋存规律的综合研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 35(6):777-782.
- 韩斗发. 1992. 宁镇地区重磁场特征及其与地质构造、岩浆岩和内生矿产的关系研究[J]. 江苏地质, 16(3):228-234.
- 金鑫, 贾立国, 孙中任, 高飞. 2008. 1:5万矿产调查磁测资料对隐伏岩体的推断及意义[J]. 地质与资源, 17(1):65-68.
- 刘登明. 2009. 应用物探技术识别和预测火山岩储集层——以松辽盆地和准噶尔盆地为例[J]. 新疆石油地质, 30(1):109-113.
- 麦广田. 1990. 从区域重磁资料试论广西花岗岩的发育展布和定位方式[J]. 广西地质, 3(1):15-23.
- 秦葆瑚. 1985. 南岭区域重磁异常的地质解释[J]. 湖南地质, 4(1):1-15.
- 孙忠武. 1983. 吉林东部山区重磁场特征线与基性超基性岩的分布关系[J]. 吉林地质, 9:51-57.
- 姚长利, 郝天珧, 管志宁. 2002. 重磁反演约束条件及三维物性反演技术策略[J]. 物探与化探, 26(4):253-256.
- 姚长利, 郝天珧, 管志宁, 张聿文. 2003. 重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术[J]. 地球物理学报, 46(2):252-258.
- 姚长利, 郑元满, 张聿文. 2007. 重磁异常三维物性反演随机子域方法技术[J]. 地球物理学报, 50(5):1576-1583.
- 张维宸, 刘建芬, 谢连文, 李小平, 郝跃生. 2008. 利用航磁数据推断隐伏(半隐伏)岩体[J]. 东华理工大学(自然科学版), 31(4):349-456.
- 钟寿华. 1992. 1:5万重力测量在蒙自县白牛厂地区寻找隐伏花岗岩的效果[J]. 云南地质, 11(1):101-103.