

皖南乌溪多金属矿区综合电磁法数据集

林方丽¹, 王光杰^{2*}, 杨晓勇³

1. 河南师范大学电子与电气工程学院, 新乡 453007; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘要: 乌溪矿区介于长江中下游多金属成矿带与华南成矿带之间。作者为了研究该矿区深部成矿机制, 2011年3-11月、2012年10-11月分别对该区域进行了综合电磁法勘探。初次考察过程中, 采集了区域出露的主要岩石类型, 然后在实验室开展了岩石的物性测定。综合勘探阶段选用3种电磁方法——地面高精度磁法、双频激电法和可控源音频大地电磁法 (Controlled Source Audio Magnetotelluric Method, CSAMT), 选择垂直于主断裂的北西45°作为测线方向, 将测网布设为200 m×25 m, 从而获得关于磁化率、极化率和电阻率等的空间分布数据。其中, 地面高精度磁测数据是基于PM-2质子磁力仪采集到的原始磁场数据基础上, 进行了日变改正、高度改正和场值平滑处理; 激发极化数据是利用双频激电仪选取2 Hz与2/13 Hz频率计算得到的视幅频率值; 深部视电阻率数据是基于凤凰公司的V6A系统采集到的不同频率的电磁场数据, 进行一维最小二乘反演; 对反演得到的数据再次进行正演计算, 将计算得到的电磁场数据与采集到的原始数据进行拟合对比, 以验证反演结果的准确性。皖南乌溪多金属矿区综合电磁法实验数据集包括: (一) 实地测量和实验室分析得到的数据: (1) 岩石物性测量数据; (2) 实地测量的线与点的GPS数据; (3) 地面高精度磁测得到的原始磁场数据和改正后的磁场数据; (4) 双频激电法得到的平面视幅频率与视电阻率数据; (5) CSAMT测量的野外施工班报和每天采集到的原始数据。(二) 剖分数据: (1) 地面高精度磁测法得到的磁场改正数据的剖分结果; (2) 双频激电法得到的视幅频率剖分数据; (3) CSAMT法获得的各测线深部视电阻率数据的剖分结果。不同方法采集得到的数据经过剖分处理均可达到25 m×25 m×25 m的空间分辨率。数据集存储为.xls、.grd、.cmd、.cms、.cmr、.csv、.csr和.pdf格式, 数据量为31.4 MB (压缩为1个文件, 6.86 MB)。该数据集的分析研究成果发表在《地球物理学报》2016年第59卷第11期。

关键词: 综合电磁法; 乌溪多金属矿; CSAMT; 双频激电法; 地面高精度磁测法

DOI: 10.3974/geodp.2018.02.10

1 前言

乌溪矿区介于长江中下游多金属成矿带与华南成矿带之间, 是江南造山带上的一个找矿新区。分析该区域的深部电磁特性分布特征, 对于乌溪矿区深部成矿机制的研究具有重

收稿日期: 2018-02-04; 修订日期: 2018-06-22; 出版日期: 2018-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2016YFC0600507); 河南师范大学博士科研启动金 (5101239170002); 联合基金项目 (U704134)

*通讯作者: 王光杰 C-4555-2018, 中国科学院地质与地球物理研究所, gjwang@mail.iggcas.ac.cn

数据引用方式: [1] 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 皖南乌溪多金属矿区综合电磁法数据集[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(2): 184-189. DOI: 10.3974/geodp.2018.02.10.

[2] 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 皖南乌溪多金属矿区综合电磁法实验数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.03.08.V1.

要意义。同时若能确认乌溪矿区是斑岩型矿床，则可以进一步印证华南成矿带与俯冲作用形成的成矿带具有相似性，从而推动整个华南地区的成矿地质研究^[1-3]。

2 数据集元数据简介

皖南乌溪多金属矿区综合电磁法数据集^[4]名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、时间分辨率、空间分辨率、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 皖南乌溪多金属矿区综合电磁法数据集元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	皖南乌溪多金属矿区综合电磁法实验数据集
数据集短名	ComprehElectromagneticDataPolymetallicOreWuxi
作者信息	林方丽 M-5558-2018, 河南师范大学, linfangli@htu.edu.cn 王光杰 C-4555-2018, 中国科学院地质与地球物理研究所, gjwang@mail.iggcas.ac.cn 杨晓勇 M-5549-2018, 中国科技大学, xyyang555@163.com
地理区域	安徽合肥泾县乌溪
数据年代	2011-2015
数据格式	.xls、.grd、.cmd、.cms、.cmr、.csv、.csr、.pdf
数据量	31.4 MB
数据集组成	皖南乌溪多金属矿区综合电磁法实验数据集包括： （一）实地测量和实验室分析得到的原始数据：(1) 岩石物性测量数据；(2) 实地测量的线与点的 GPS 数据；(3) 地面高精度磁测得到的原始磁场数据和改正后的磁场数据；(4) 双频激电法得到的平面视幅频率与视电阻率数据；(5) CSAMT 测量的野外施工班报和每天采集到的原始数据 （二）剖分数据：(1) 地面高精度磁测法得到的磁场改正数据的剖分结果；(2) 双频激电法得到的视幅频率剖分数据；(3) CSAMT 法获得的各测线深部视电阻率数据的剖分结果
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2016YFC0600507）；河南师范大学博士科研启动金（5101239170002）；联合基金项目（U704134）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[5]

3 数据研发方法

本研究中用到的所有数据都是实地采集的资料，受到实时的电磁干扰，因此数据处理是主要目标就是去除各种电磁干扰，从而提取出由地下矿产资源所引起的磁异常、激电异常和电阻率异常。

3.1 算法原理

3.1.1 地面高精度磁测算法原理

目前使用的质子磁力仪可测定绝对地磁场强度,需消除由地球形状、自转等运动所引起的地磁场的影响,求出各测站之间地磁场的真正差值。因此对于观测到的磁场则需要改正,主要包括正常梯度改正、高度改正、地磁日变改正。

当进行高精度磁测工作时,需要进行正常梯度改正,可用国际地磁参考场 IGRF1990.0 模型提供的高斯系数,用电子计算机算出测区内 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 节点地磁场 T_0 值。计算磁场总强度 T_0 及梯度值:

$$T_0 = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial X} = \frac{3ZH}{2RT_0} \quad (2)$$

式中, X 、 Y 、 H 、 Z 分别为地磁场东向、北向、水平方向及垂向分量, R 为地球平均半径, $R = 6,371\text{ km}$ 。以通过总基点的等恒线为零线,向北每过一条等值线减少 1 nT ,向南每过一条等值线增加 1 nT 。

磁场沿垂向的磁场梯度:

$$\frac{\partial T_0}{\partial R} = -\frac{3T_0}{R} \quad (3)$$

由式(3)可知,当 $T_0 = 50,000\text{ nT}$ 时,地磁场垂向梯度为 -0.024 nT/m 。高差 30 m 时,地磁场垂向变化可达 -0.72 nT 。因此高度改正是基于地磁场的垂向梯度,根据每个测点的高程进行改正。

在地球的变化磁场中,除大家熟悉的长期变化和静日变化外,还有源于空间磁场的扰动变化,包括周期从 $0.2\text{--}1,000\text{ s}$ 的快速振动,其幅度一般为 $0.01\text{--}5\text{ nT}$ (有时可达 $10\text{--}20\text{ nT}$)。高精度磁测必需对地磁场的这种周期变化进行改正,可以通过日变改正去除地球自身磁场变化对观测磁场的影响,因此,对日变观测有较高的要求。

由于后期解释需要,在前期地面高精度磁测基础上,进行了补充测量。两次测量时间间距较长,为了保证两次结果的一致性,通过一部分测点的重复测量数据,对两次结果进行归一化。

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{1i} - V_{2i})}{n} \quad (4)$$

$$V_{2i} = V_{1i} - \Delta V \quad (5)$$

式中, V_{1i} 、 V_{2i} 分别为第一次和第二次测量的磁场数据,通过重复测量数据计算出归一化参数 ΔV 。

3.1.2 双频激电算法原理

双频激电法就是把两个频率的方波信号叠加在一起,形成双频组合信号,同时供入地下,接收来自地下的含有这两个主频率的激电总场的电位差信息,一次就可以得到低频和高频两个电位差,计算视幅频率 $F_s^{[6]}$ 。

$$F_s(\%) = \frac{\Delta V(f_L) - \Delta V(f_H)}{\Delta V(f_L)} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $\Delta V(f_L)$ 、 $\Delta V(f_H)$ 分别为低频和低频电位差。

3.1.3 可控源音频大地电磁算法原理

CSAMT 反演计算是基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出的水平电偶极源在地面上的电场及磁场公式:

$$E_x = \frac{I \cdot AB \cdot \rho_1}{2\pi r^3} \cdot (3\cos^2 \theta - 2) \quad (7)$$

$$E_y = \frac{3 \cdot I \cdot AB \cdot \rho_1}{4\pi r^3} \cdot \sin 2\theta \quad (8)$$

$$E_z = (i-1) \frac{I \cdot AB \cdot \rho_1}{2\pi r^2} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\rho_1}} \cdot \cos \theta \quad (9)$$

$$H_x = -(1+i) \frac{3I \cdot AB}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0 \omega}} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$H_y = (1+i) \frac{I \cdot AB}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0 \omega}} \cdot (3\cos^2 \theta - 2) \quad (11)$$

式中, I 为供电电流强度; AB 为供电偶极长度; r 为场源到接收点之间的距离。

将沿 x 方向的电场 E_x 与沿 y 方向的磁场 H_y 相比, 并经过一些简单运算, 就可获得地下的视电阻率公式:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (12)$$

式中, f 为频率。可见只要在地面上能观测到两个正交的水平电磁场 (E_x , H_y) 就可获得地下的视电阻率, 也称卡尼亚电阻率。

(1) 测点间距校正

由于测线通过地表的坡度很大, 因此导致测点与测点之间坡度方向的距离与设计的两测点之间的水平距离 (25 m) 有很大的差异。众所周知, 卡尼亚视电阻率是由互相垂直的水平电场和水平磁场计算得到的, 它与 E_x 的平方成正比, 与 H_y 的平方成反比。在山区工作时, 因磁探头沿等高线搁置, 所以 H_y 仍为水平磁场。而电场 x 分量 E_x 是沿着坡度方向测量, 使得所测电场不再是水平电场。因此观测值 H_y 接近真实情况, 而 E_x 将有定一误差。从而导致视电阻率值也存在一定误差, 所以必须对电场进行修正。商用处理软件计算电场时采用公式 $E_x = \Delta V / \Delta x$, ΔV 为两个电极之间的电位差, Δx 为两个电极之间的水平距离。而实测的电场为 $\Delta V_{\text{斜}} / \Delta x$ 。所以电场的水平分量应修正为:

$$E_x = \Delta V_{\text{斜}} \cos \theta / \Delta x \quad (13)$$

式中, θ 为坡度角。通过自编的程序对观测的电场资料进行了地形校正预处理。

(2) 静态校正

卡尼亚视电阻率计算公式是对远区 (或称波区) 导出的。在过渡区或近区, 卡尼亚视电阻率 ρ_s 将发生畸变, 即使在均匀大地条件下, 算出的 ρ_s 也明显偏离大地的真电阻率, 这称为近场效应。由于 CSAMT 法的近场效应, 信号的穿透深度并不会随着频率一直加深。

近地表存在局部导电性不均匀体时，电流流过不均匀体表面而在其上形成“积累电荷”，由此产生一个与外电流场成正比（比例系数不随频率变化）的附加电场。它使实测的各个频率的视电阻率，相对于不存在局部不均匀体时变化一个常数。从而使绘于双对数坐标系中的频率测深曲线，沿视电阻率轴（即纵轴）发生上下平移。当局部不均匀体为低阻体时，测深曲线向下平移；而若为高阻体，则向上平移。

（3）电磁干扰去除

由于本次部分数据受到比较严重的电磁干扰，因此，我们在进行反演计算前，先对原始数据进行电磁干扰去除的处理，再进行反演计算。

CSAMT 法所采集到的原始数据，只是对应一系列频率的没有考虑装置特性的平均视电阻率值，不能准确地反映地下地层的真实电性特征，必须结合收发距的大小、AB 偶极的长度、发射电流的大小以及采样间距等装置的详细数据进行合理的反演计算，才能得到对应地下不同深度处的电性分布剖面。在反演时采用了一维最小二乘反演技术。

经处理后，我们得到了各测线的反演后的电阻率断面图。

3.2 技术路线

根据三种方法的基本原理，对采集到的数据进行相应的处理，数据处理流程图如图 1 所示。

4 数据结果与验证

4.1 数据结果组成（或空间分布）

在数据集基础上，通过计算可得到乌溪矿区的测点坐标和高程数据、平面磁异常分布、平面视幅频率异常以及深度视电阻率异常数据。经过深部电阻率数据的剖分切片，可以得到不同深度的切片电阻率异常（表 2），切片结果已通过《地球物理学报》发表^[7]。

4.2 数据结果验证

通过深部视电阻率剖面图与钻孔地质图叠加对比，电阻率分布特征与区内岩性分布基本一致，钻探结果进一步证明区内地表矿化不明显，整体电阻率较高，岩体相对其他岩石表现为高阻特征，矿化能够明显的降低岩层电阻率。

5 讨论和总结

通过综合电磁方法的应用，揭示了矿区内岩体和蚀变的分布特征及相互关系，进一步推测成矿物质运移方向和深部成矿机制。根据岩体的极化率和低阻体的规模推断，乌溪矿区是一个极其有利的斑岩型铜（钼金）成矿远景区，进一步扩大了由俯冲作用形成的华南

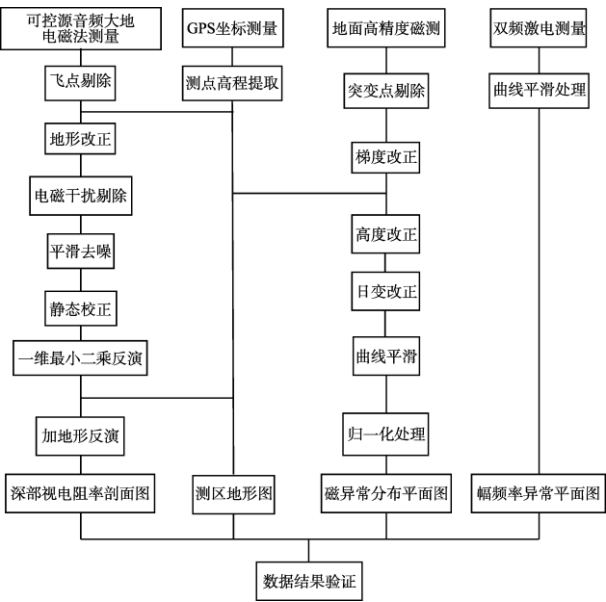


图 1 数据研发技术路线图

成矿分带形成斑岩型铜矿的可能范围，有利于引导华南的区域成矿地质研究。该数据是以乌溪矿区采集到的高精度坐标、地面高精度磁测、双频激电和可控源音频大地电磁法 4 个数据库为基础所建立的数据集。该数据的可靠性比较高，对定性分析皖南多金属成矿带的成矿机理具有参考价值。

表 2 部分数据结果

序号	数据文件名称	数据说明
1	line5000	5000 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
2	line5200	5200 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
3	line5400	5400 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
4	line5600	5600 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
5	line5800	5800 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
6	line6000	6000 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
7	line6200	6200 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
8	line6400	6400 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
9	line7000	7000 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
10	line7200	7200 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
11	line7400	7400 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
12	line7600	7600 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
13	line7800	7800 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度
14	line8000	8000 线的深部电阻率数据, x 轴为点号, y 轴为深度

作者分工：王光杰、杨晓勇对数据集的开发做了总体设计；林方丽采集和处理了电磁法数据；王光杰、林方丽设计了模型和算法；林方丽做了数据验证；林方丽撰写了数据论文等。

参考文献

[1] Sun, W. D., Ling, M. X., Yang, X. Y., *et al.* Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: an overview [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2010, 53(4): 475–484.

[2] Sun, W. D., Liang, H. Y., Ling, M. X., *et al.* The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 103: 263–275.

[3] 李双, 孙赛军, 杨晓勇等. 皖南泾县乌溪斑岩型矿床地质特征与成矿年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(1): 153–166

[4] 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 皖南乌溪多金属矿区综合电磁法实验数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.03.08.V1.

[5] 全球变化科学研究数据出版系统编辑部. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).

[6] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[7] 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究——以皖南乌溪多金属矿区为例[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4323–4337. DOI: 10.6038/cjg20161132.