

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019070

引用格式: 林建勇, 罗凡, 陈辉. 2020. 赣东北塔前一赋春成矿带画子山地区地球物理特征及找矿启示[J]. 高校地质学报, 26(2): 175-184

## 赣东北塔前一赋春成矿带画子山地区地球物理特征及找矿启示

林建勇<sup>1</sup>, 罗凡<sup>2\*</sup>, 陈辉<sup>2</sup>

1. 江苏省核工业二七二地质大队, 南京 211102;  
2. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 南昌 330013

**摘要:** 画子山地区隶属于赣东北塔前一赋春成矿带, 其具有地质条件复杂, 深部成矿条件优越等特点。在复杂的地质条件下, 对多种地球物理方法进行有机的结合, 可较为客观的反映地下深部信息。而物性差异是地球物理方法的应用研究前提, 首先对画子山地区的岩石标本进行物性分析。基于物性分析结果, 在画子山地区针对性的布设两条(8线和11线)重力、磁法及可控源音频大地电磁法综合地球物理剖面, 然后结合地质、物性、钻孔等资料对综合剖面进行解译, 解译得到重力高值和低阻异常区是由矿化引起, 磁异常带由蚀变所引起。最后通过分析综合剖面反映出地下的高密度体、高磁性体和低阻高极化体的分布规律, 圈定出找矿的重点区域为万年群牛头岭组上段地层的西南方向, 为画子山地区的下一步工作指明方向。

**关键词:** 塔前一赋春成矿带; 画子山地区; 地球物理特征研究

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2020) 02-175-10

## Geophysical Characteristics and Prospecting of the Huazishan Area in Taqian-Fuchun Metallogenic Belt, Northeastern Jiangxi Province

LIN Jianyong<sup>1</sup>, LUO Fan<sup>2\*</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>

1. Geologic Party No. 272, CNNC, Nanjing 211102, China;  
2. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

**Abstract:** The Huazishan area belongs to the Taqian-Fuchun Metallogenic Belt in the Northeastern part of Jiangxi Province. It has complicated geological structures but superior conditions for deep metallogeny. For the complicated geological conditions, a combination of a variety of geophysical methods can help detect deep geologic structures. The difference in physical properties of rocks is the basis for the application of geophysical methods. First, the physical analysis of rock specimens in the Huazishan area was carried out. Then, two (8-line and 11-line) gravity, magnetic and controllable source audio magnetotelluric integrated geophysical profiles were obtained from the Huazishan area. The integrated geophysical profiles are interpreted in combination with geological, physical and drilling data. The high gravity and low resistance anomaly zone is interpreted to result from mineralization, and the magnetic anomaly zone was likely caused by alteration. Finally, by analyzing the integrated geophysical profile, the distribution of high-density, high-magnetic and low-resistance high-polarity region in the underground is mapped, and the key area for prospecting is located in the southwest direction

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(41164003; 41404057; 41864004)资助

作者简介: 林建勇, 男, 1967年生, 工学学士, 主要从事矿产资源地球物理勘探应用研究; E-mail: 416224156@qq.com

\*通讯作者: 罗凡, 男, 1994年生, 工学博士在读, 主要从事勘探地球物理研究; E-mail: fanluo188@163.com

of the upper strata of the Niutouling Formation of the Wannian Group. The findings of this study will aid in future ore-deposit prospecting work in the Huazishan area.

**Key words:** Taqian–Fuchun Metallogenic Belt; Huazishan Area; geophysical characteristics

**Corresponding author:** LUO Fan, Ph.D. Candidate; E-mail: fanluo188@163.com

地球物理勘探方法是基于岩矿石之间的物性差异,运用数学物理理论、方法与技术来观测和研究各种地球物理场的空间与时间分布规律的矿产资源勘探手段(Kaufman and Keller, 1983; 刘光鼎, 2017)。对于获取地表覆盖层较厚区域的地下深部信息而言,可采用的地质手段较少,且地质手段对于地下埋藏较深矿体的信息反映不敏感;虽然钻探手段是获取地下深部信息最为直接的技术,但其成本高昂,风险较大,且仅为“一孔之见”并不全面。地球物理勘探方法具有对深部地质信息较为敏感,方法丰富多样,数据覆盖区域大,成本较低等特点,是目前进行地下深部矿产勘探的首选方法(颜廷杰, 2017; 刘光鼎和郝天珧, 1995)。单一的地球物理方法仅反映地下岩矿石的某种物理性质,要对研究区的地下信息获得较为全面的认识,需要采用多种地球物理勘探方法进行综合研究(郝天珧和将为为, 1998; 刘建利等, 2013)。罗凡等(2019)、任伟龙等(2017)、倪晴晖和李大俊(2017)、唐建伟等(2008)等众多学者采用可控源音频大地电磁测深、激电测深、重力、磁法等多种地球物理方法的测量资料,结合地质成果资料,对研究区的覆盖层厚度、基底深度、构造以及矿体的形态等深部信息进行了综合精细解译。通过多种地球物理方法的不同物性参数数据的相互印证与约束(罗凡等, 2018; 严加永等, 2019),不仅可有效降低地球物理勘探的多解性,且为下一步的精细地质解释提供了可靠的依据。

画子山地区位于江西省东北部的乐平市,属于钦杭结合带东段北部的铜多金属矿成矿亚带东段,是塔前一朱溪—赋春成矿带多金属矿床突破区的重要组成部分,具有极其优越的成矿地质条件(林建勇等, 2018; 蒙智宇等, 2017)。近年来,在塔前一赋春地区先后发现了多处的钨、铜多金属超大型矿床,且矿床矿体在深部均呈现规模变大、个数增多、变富的趋势(陈国华等, 2012, 2015; 吴美仁等, 2019; 欧阳永棚等, 2019),

表明塔前一赋春地区的地下深部具有较好的找矿前景。因此,选择对画子山地区的地下信息进行研究。本文首先基于画子山地区的岩矿石的物性进行研究,发现它们之间存在较大的电性、密度和磁性差异,故对画子山地区分别选取可控源音频大地电磁(CSAMT)(Streich, 2015)、重力(付建民等, 2012; 冯旭亮等, 2015)、磁法(付光明等, 2018)三种地球物理勘探方法进行野外数据的采集,然后再对地球物理特征进行深入系统的研究,最后探讨画子山地区的地球物理特征与成矿的内在联系,为画子山地区的下一步找矿工作指明方向。

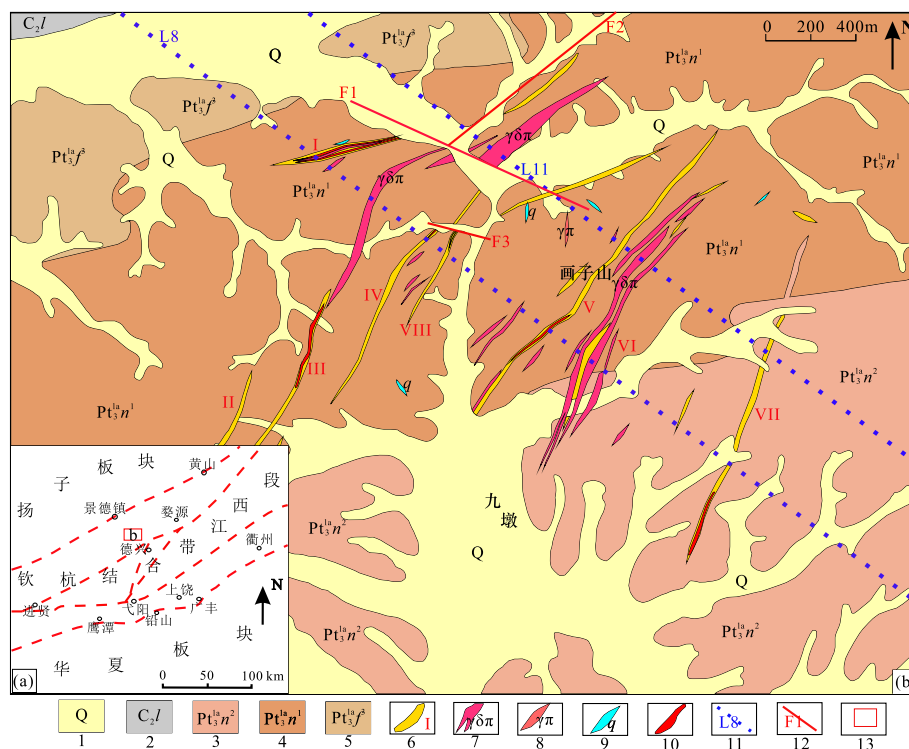
## 1 地质背景

### 1.1 区域地质概况

画子山地区的大地构造位置处于下扬子陆块江南古岛弧带和塔前一赋春推覆构造带的东南部,钦杭结合带中的江西段萍乐坳陷带东端,赣东北深大断裂的北西侧(图1a)(杨明桂和梅勇文, 1997)。区域的新老地层出露简单,主要由广泛分布的新元古界双桥山群、万年群地层构成褶皱基底,及其上部零星分布的上古生界和中新生界的沉积盖层组成。区内经历了晚元古代褶皱造山作用,加里东期褶皱叠加和韧性变形作用,以及印支—燕山期断裂构造活动等多期次多阶段强烈而广泛的构造运动,导致区内的推覆构造发育,并伴随着中酸性岩浆的侵入,造成了区内的构造情况十分复杂。岩浆活动频繁,活动时间长,多种不同来源的岩浆经过了分异演化和同化混杂作用,形成了分布广泛,种类繁多的超基性—酸性岩浆岩,为该区多金属矿床的形成提供物源。

### 1.2 研究区地质特征

研究区内的地层出露较为单一,主要由新元古界万年群枫树岭组和牛头岭组组成,第四系沿山间的谷底分布(图1b)。其中万年枫树岭组可分为下、上、顶三部,下部为青灰色薄—中层状绿泥二云千枚岩,上部为杂色变质凝灰质粉砂岩夹



1, 第四系; 2, 石炭系上统黄龙组; 3, 新元古界万年群牛头岭组上段; 4, 新元古界万年群牛头岭组下段; 5, 新元古界万年群枫树岭组上段; 6, 挤压变形破碎带及编号; 7, 花岗闪长斑岩脉; 8, 花岗斑岩; 9, 石英脉; 10, 金矿化体; 11, 测线及编号; 12, 断层及编号; 13, 研究区位置

图1 画子山地区地质图

Fig. 1 Geological map of the Huazishan area

条纹状千枚岩, 顶部为杂色变质凝灰质粉砂岩夹薄层状含绢云母千枚岩。牛头岭组可分为上、下两段, 其下段下部为灰白色片状(含黄铁矿)变质沉凝灰岩与灰黑色薄层状含炭绢云千枚岩互层, 偶夹含砾变质长石岩屑杂砂岩, 上部为灰白色、浅灰色变质凝灰质粉砂岩与灰黑色薄层状绿泥绢云千枚岩互层。牛头岭组上段呈现为乳白—灰白色, 厚层状变质沉凝灰岩、变质石英角斑质沉凝灰岩夹千枚岩; 底部为土黄色厚层状变质杂砂岩; 顶部为变质石英角斑岩与变质沉凝灰岩互层。第四系为土黄色、褐色、褐黑色粘土、砂土、砂砾石层。

画子山地区整体呈现为一个大型的推覆构造, 将晚元古代的浅变质地层推覆至石炭纪—三叠纪地层之上, 在研究区的西北部形成构造窗, 出露出石炭系地层。区内存在较多的褶皱和蚀变破碎带, 在褶皱和蚀变破碎带中形成花岗闪长斑岩岩脉的形式产出, 岩脉的方向呈北东向展布。而地表的围岩蚀变主要分布在V号破碎带及其两侧的花岗闪长斑岩岩脉之间(图1b)。蚀变形状多呈带状及椭圆状,

蚀变的主要类型为硅化、绿泥石化、褐铁矿化(主要沿裂隙发育, 局部形成铁帽), 沿裂隙面偶尔可见铜蓝。北东侧蚀变以硅化、绿泥石化为主, 南西侧蚀变以硅化、褐铁矿化为主。

## 2 物性分析

物性差异不仅是地球物理勘探方法选择的基础, 更是地球物理与地质互相联系的纽带和桥梁。在对画子山地区进行地球物理特征研究之前, 需对其岩矿石的标本进行测量。研究区的物性测量岩心标本为125块, 露头标本67块, 测量的主要物性参数为: 密度、磁化率、电阻率和极化率, 其物性均值统计如表1所示。

对画子山地区的标本物性统计表1中的不同物性参数进行分析。(1) 从密度参数看, 岩心标本密度均值最小的是石英脉 $2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ , 均值最大的是矿化千枚岩 $2.84 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 。花岗闪长斑岩密度比不含矿化千枚岩密度略低, 花岗闪长斑岩与其他岩性密度差异不明显。(2) 从磁化率参数看, 画子山地区的岩石的总体磁性较低, 含有矿

表1 画子山地区岩石标本物性统计表

Table 1 Physical properties of specimens of rock specimens in the Huazishan area

岩性	位置	密度/( $\times 10^{-3} \text{kg/m}^3$ )	磁化率/( $\times 10^{-5} \text{SI}$ )	极化率 $\eta/\%$	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	数量/块
花岗闪长斑岩	岩心	2.74	87.5	674.7	2.80	31
	露头	2.44	91.8	803.9	3.6	24
千枚岩	岩心	2.77	76.6	1428	2.7	30
	露头	2.56	65.0	3022	2.9	10
千枚岩(矿化)	岩心	2.84	118.7	883.8	6.2	30
	露头	2.44	128	2 153.2	2.4	10
绢云母千枚岩	岩心	2.76	102.9	1109	3.2	30
	露头	2.45	68.3	2457	2.8	15
石英脉	岩心	2.70	49.7	4653	0.9	15
	露头	2.54	44.4	4256	0.8	8
绿泥石千枚岩		2.74	51.5	0.8	3558	15

化的千枚岩磁性较强。(3) 极化率均值最高的是矿化千枚岩6.2%，其次为绢云母千枚岩3.2%；电阻率均值最低的是花岗闪长斑岩674  $\Omega \cdot \text{m}$ ，其次是矿化千枚岩884  $\Omega \cdot \text{m}$ ，矿化千枚岩和花岗闪长斑岩的电性参数表现为低阻高极化特征。

通过对画子山地区的物性及结合前人对物性资料的综合分析可得：

(1) 千枚岩和花岗闪长斑岩作为画子山地区的主要岩性，其磁性较弱，但矿化体的磁性相对较强，表明画子山地区的磁场为一个低缓的磁背景场。

(2) 不含矿化的不同岩性密度差异不明显，但矿化千枚岩的密度比较大，在重力场中矿化千枚岩相对于其他岩性表现出重力异常高值。

(3) 矿化千枚岩、花岗闪长斑岩和其他的矿化体的激电异常表现为低阻高极化特征。

### 3 方法与数据

根据上述对画子山的物性资料分析，表明画子山的矿化体具有高磁高密度及低阻高极化的特征。矿化体较其他岩石的密度、磁性和电阻率差异较大，故为在画子山地区针对性的开展重力、磁法及可控源音频大地电磁方法进行矿产勘探工作奠定了良好的物性基础。下面对画子山地区所用的地球物理勘探方法、测量参数等内容进行介绍。

#### 3.1 重力

在大地测量学、地球物理学等众多领域测量中，发现测量重力加速度值在短时间或区域内的变化情况可获得更多或全部的信息。相对重力仪借助于弹簧，将重力的变化量转变为位移量，当重力与弹簧弹力产生的力矩相平衡时存在如下关系（房丰洲等，2017）：

$$mga \sin(\alpha + \delta) = k(l - l_0)b \frac{d}{l} \sin \alpha$$

上式中  $m$  为重物质量， $g$  为当地的重力加速度， $l$  为悬挂重块时弹簧的长度， $l_0$  为未悬挂重块时弹簧的长度， $k$  为弹簧常数，校准因子  $k/m$  可通过与绝对重力测量点数据比对获得。重力加速度  $g$  和  $\alpha$  角之间的关系是非线性的，当满足如下条件时：

$$l_0 = 0 \quad (\text{即“零长弹簧”}), \quad \alpha + \delta = 90^\circ$$

$$\text{将力矩平衡等式化简为:} \quad mga = kbd \sin \alpha$$

$$\text{重力值为:} \quad \Delta g = \frac{k}{m} bd \sin \alpha$$

$$\text{设置角度为:} \quad \alpha \rightarrow 90^\circ, \quad \delta \rightarrow 0^\circ$$

从上式可知，当重力仪所在地区重力加速度值发生变化时，重物会偏离水平位置，为保证高精度的测量，需要进行“归零”操作，通过这一过程即可读取该地区的重力变化值。

本次对画子山地区的重力测量使用的是美国ZLS公司的贝尔雷斯B98型重力仪（Burris Gravity Meter）。该仪器的零长度弹簧是由合金制成，具有漂移率低、快速反应、稳定、高精度和大范围的反馈等优点。为确保仪器采集数据的有效性，在开工前对仪器性能进行静、动、一致性试验，其中静态试验的曲线呈现线性变化，且24 h静态掉格小于0.040 mGal，动态试验的均方误差为 $\pm 0.007$  mGa等，均满足重力调查相关规范要求。

由于研究区范围较小，故根据研究区的实际情况设置一处重力基点，然后采用相对布格重力测量方式进行1:1万重力剖面测量，点距为40 m，共采集重力数据444个。在野外测量过程中严格按照重力测量的相关规范进行测量。对重力数据的近区地改采用八方位圆域法，通过RTK来测量测点周围



0~20 m 范围内的地形, 然后根据实际的地形情况选择锥形公式、斜面公式和扇形公式计算近区地改值, 中 (20~2000 m)、远区 (2~20 km) 地改高程数据分别通过矢量化的 1:1 万和 1:5 万地形图获得。

### 3.2 磁法

若没有外界的磁场作用于含氢液体时, 质子的磁矩会无规则地任意指向, 不显现宏观磁矩。如果垂直地磁场  $T$  的方向, 添加一强人工磁场  $H_0$ , 则样品中的质子磁矩, 将按  $H_0$  方向排列起来, 此过程称为极化。随后, 切断磁场  $H_0$ , 则地磁场对质子有  $\mu_p \times T$  的力矩作用, 试图将质子拉回到地磁场方向。由于质子自旋, 在力矩作用下, 质子磁矩  $\mu_p$  将绕着地磁场  $T$  的方向作旋进运动, 此过程称为拉莫尔旋进 (管志宁, 1995)。

氢质子旋进的角度  $\omega$  与地磁场  $T$  的大小成正比, 其关系为:

$$\omega = 2\pi f = \gamma_p \cdot T$$

上式中,  $\gamma_p = (2.6751987 \pm 0.0000075) \times 10^8 T^{-1} \cdot s^{-1}$  为质子的自旋磁矩与角动量之比, 称为质子磁旋比。只要能准确测量出质子的旋进频率  $f$ , 即可获得地磁场的值。

画子山地区的高精度磁法的野外测量工作采用加拿大生产的 GSM-19T 型质子磁力仪, 其主要参数为: 测程 20000~100000 nT, 读数分辨率为 0.1 nT, 精度可达 1 nT。在测量之前, 对磁法仪器进行静态噪声、多种 (主机、单台、多台仪器) 一致性等试验, 当试验结果均满足相关规范要求后, 再进行野外的测量工作。

本次高精度磁法的野外测量的点距为 40 m, 采用校正点—观测点—校正点的闭合测量方式进行 1:1 万高精度磁法剖面测量, 共采集磁测数据 450 个。日变改正和基点改正最大误差为  $\pm 0.15$  nT, 纬度改正误差为  $\pm 0.25$  nT, 高度改正误差为  $\pm 0.001$  nT, 仪器一致性误差为  $\pm 1.04$  nT, 操作及点位误差为  $\pm 1.9$  nT, 综合磁测误差统计结果表明总误差为  $\pm 2.17$  nT, 远小于 1:1 万高精度磁测总误差范围控制在 5 nT 的要求。

### 3.3 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)

可控源音频大地电磁法 (CSAMT) 法针对音频大地电磁法 (AMT) 天然场源信号弱、不可控以及人文干扰较强等缺点, 通过接地长导线激发

频率域人工电磁场源, 在波区仿照 AMT 的野外工作方式测量相互正交的电磁场分量  $E_x$  和  $H_x$ , 利用卡尼亚视电阻率计算公式得到视电阻率, 其视电阻率  $\rho_\omega$  的计算公式为:

$$\rho_\omega = \frac{1}{[\omega\mu]} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

上式中,  $\mu$  为磁导率。由于介质对电磁波有吸收作用, 电磁场衰减到  $1/e$  时的电磁波传播的距离即为趋肤深度  $\delta$ , 表示为:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

上式中,  $\rho$  为介质电阻率,  $f$  为电磁波频率。根据经验, 探测深度  $D$  与工作频率和大地电阻率有如下关系:

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{2}} \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

基于上述公式, 可知探测深度与电磁波频率有关。当电磁波的频率增大, 其探测深度将变浅, 反之亦然。故 CSAMT 方法基于上述原理, 通过改变发射机电磁波频率, 来改变探测深度, 最终达到测深目的。

CSAMT 方法的数据采集采用的是赤道偶极工作装置, 阵列方式采集, 极大的提高了作业的效率 and 采集数据的精度。图 2 为 CSAMT 观测系统、接收装置布置示意图, 在测量工作中, 将供电端布设在远离测线处, 使其平行于测线方向放置, 在测量端以阵列方式, 逐个排列进行测量, 一台发射机发送信号, 主接收机和辅助接收机同时进行测量。

本次野外施工使用美国 ZONGE 公司生产的 (30 kw) GDP-32 II 型多功能电法仪, 仪器的主要

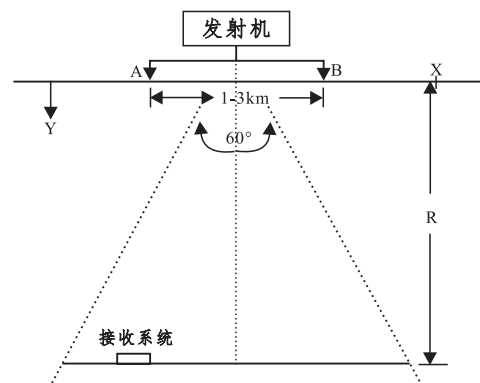


图 2 CSAMT 观测系统布置图

Fig. 2 The arrangement of observing and receiving system

组成有：(1) 供电电源 ZMG-30D 型风冷柴油发电机组，发电频率  $f=400\text{ Hz}$ ，输出功率  $P=30\text{ Kw}$ ；(2) 发射机 GGT-30；(3) 高频发射机控制器 XMT-32S；(4) 快速关断发射机 NT-20；(5) 8 通道 AMT/MT 信号处理器 SC-8；(6) 多功能电法接收机 GDP-32 II。

GDP-32II 多功能电法接收机采用多道同步接收，在实地采集时，将电道和磁道相互垂直，电极和磁棒方位经森林罗盘实测，方位误差小于  $2^\circ$ ；不极化电极在 20~30 cm 深的土坑良好接触；水平磁棒顶端距接收机 5~8 m，并远离钻孔、坡坎、流水、公路等干扰地段；水平磁棒埋入地下深度为 20 cm 左右，埋设时用水平尺确保磁棒的水平状态。在采集过程中，收发距的大小应保证在“远区”工作，通常按大于 4 倍目标体的最大埋深来设计收发距，即收发距约在 5~10 km 范围内；发射偶极距 AB 长度为选择 1~3 km。接收极距 MN 长度与测点间距一致，为 40 m；采集的有效工作频率范围为 8192~0.125 Hz，共 33 个频率，详情见表 2。

## 4 地球物理资料解译

根据前文的研究内容，在画子山地区布设了 8 线和 11 线两条重、磁及可控源大地电磁测深的综合地球物理剖面（图 1）。下面结合地质、钻孔资料对重、磁、电的测量结果进行解译。

### 4.1 重力解译

对画子山地区东北部的 8 线和 11 线分别完成相对重力剖面测量工作，沿测线西北往东南方向，分别穿过地层新元古界万年群枫树组上段、

新元古界万年群牛头岭组下段和新元古万年群牛头岭组上段。

根据相对布格重力异常分布特征，在 8 线和 11 线分别圈定 1 号相对布格高重力异常带和 2 号相对布格高重力异常带（图 3）。1 号相对布格重力异常正值带从 8 线 284 号点至 396 号点，长约 1.2 km，相对布格重力异常均值约在 0.38 mGal。2 号相对布格重力异常带位于 11 线 356 号点至 372 号点间，长约 200 m，相对布格重力异常均值约在 0.7 mGal。根据钻孔资料，深孔 ZK0806 和其他钻孔对地表出露花岗岩闪长斑岩脉的深部走向情况追索较清楚。画子山中深部存在隐伏岩体可能性较小，相对布格高重力异常主要是与岩石矿化有关。

为进一步研究重力异常源的埋深及规模情况，对相对布格重力异常分别作向上延拓 100 m 和 300 m 处理。从图 4 可知，以画子山为中心的相对布格高重力异常衰减并不明显，推测重力异常源的规模和埋深较大。画子山周边 8 线的正相对布格重力异常规模比 11 线要大，通过向上延拓处理后的 8 线布格重力异常正值范围比 11 线大，推测认为画子山西南面的矿化程度优于北东面。

### 4.2 磁法解译

在测区 8 线、11 线布设两条磁法剖面（图 1），测线方位角为 126 度，点距 40 m。根据正负磁异常梯度带特征圈定了两个异常带，1 号  $\Delta T$  异常带位于 8 线 236 号点和 252 号点的正负  $\Delta T$  梯度带上。与地表出露的花岗闪长斑岩脉位置较吻合，且花岗斑岩位于正负异常梯度带的负异常一侧（图 5）。花岗闪长斑岩本身磁性较小，但与围岩发生蚀变后，磁性增强，磁异常特征表现为正负异常梯度带。2 号  $\Delta T$  异常带在 8 线 380 号点至 392 号点和 11 线 380 号点至 432 号点存在一条带状的正  $\Delta T$  异常，并在 11 线 396 号点取得极大值 64.6 nT。推测该正  $\Delta T$  异常由新元古界万年群牛头岭组上段与下段地层接触带矿化或蚀变引起。

### 4.3 综合解译

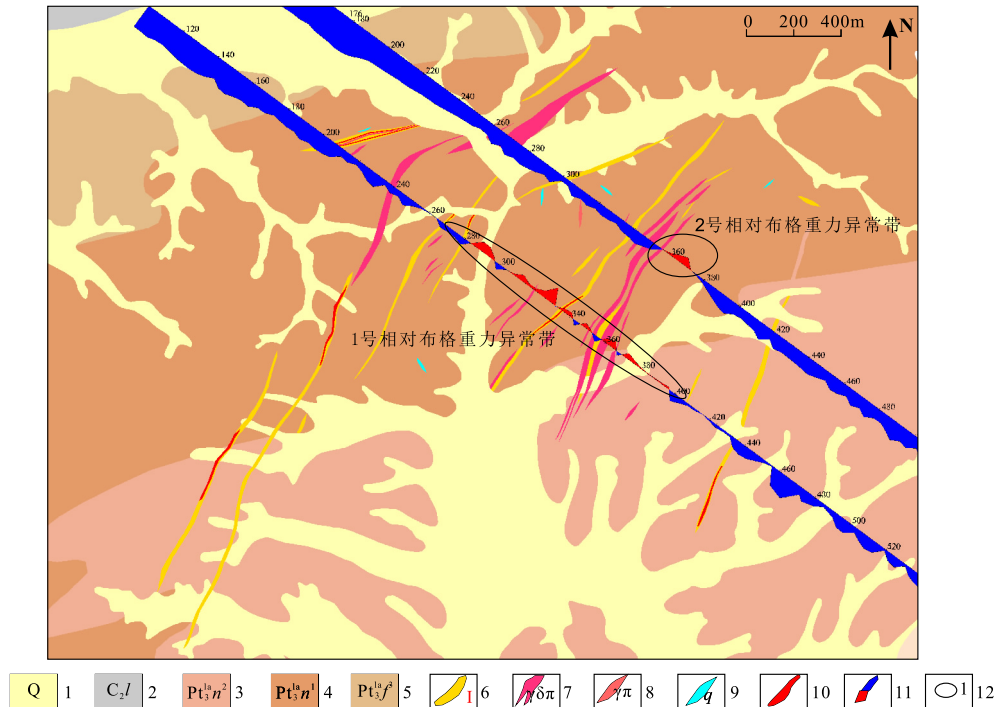
基于上文所述的重、磁异常解译结果与地质资料，结合可控源音频大地电磁测深方法结果，对 8 线和 11 线两条重、磁、电综合剖面（图 6、7）分别进行综合解译。

#### 4.3.1 8 线综合剖面

8 线的综合物探异常主要集中在以画子山为中

表 2 CSAMT 工作频率一览表  
Table 2 CSAMT working frequencies

频点号	频率/Hz	频点号	频率/Hz	频点号	频率/Hz
1	0.125	12	5.657	23	256.000
2	0.177	13	8.000	24	362.039
3	0.250	14	11.314	25	512.000
4	0.354	15	16.000	26	724.077
5	0.500	16	22.627	27	1024.000
6	0.707	17	32.000	28	1448.155
7	1.000	18	45.255	29	2048.000
8	1.414	19	64.000	30	2896.309
9	2.000	20	90.510	31	4096.000
10	2.828	21	128.000	32	5792.619
11	4.000	22	181.019	33	8192.000



1, 第四系; 2, 石炭系上统黄龙组; 3, 新元古界万年群牛头岭组上段; 4, 新元古界万年群牛头岭组下段; 5, 新元古界万年群枫树岭组上段; 6, 挤压变形破碎带及编号; 7, 花岗闪长斑岩脉; 8, 花岗斑岩; 9, 石英脉; 10, 金矿化体; 11, 相对布格重力异常剖面; 12, 相对布格重力异常带

图3 相对布格重力异常剖面图

Fig. 3 Section of relative bouguer gravity anomalies

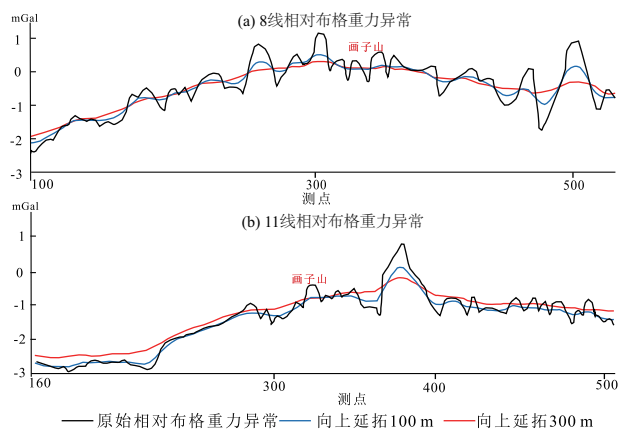


图4 相对布格重力异常向上延拓图

Fig. 4 Relative bouguer gravity anomalies of upward continuation

心一带,画子山一带表现为低阻和布格高重力异常特征,在低阻异常区,磁异常表现为负 $\Delta T$ 异常。根据CSAMT视电阻率异常图圈定出C1-低阻异常区和C2-低阻异常区两处低阻异常区(图6)。C1-低阻异常区呈下口不封闭的条带状,倾角约60度,其水平投影位于测点200至320号点间,长约1.2 km,宽约200 m。C1-低阻异常带的视电阻率背景

值约在 $400 \Omega \cdot m$ ,测点280号点附近的钻孔ZK1约在标高-150 m见到比较富集的铜矿化,与C1-低阻异常区对应较好。IV挤压破碎带穿越了该低阻异常区,在破碎带可见黄铜、黄铁和铅锌矿化,结合钻孔ZK1对该低阻异常区的揭示,推测认为C1-低阻异常区主要是由矿化及破碎带等主要因素引起。

测点372至456号点标高在0~500 m以上出现极高阻区,主要是测量时受到水库近场效应影响。C2-低阻异常区位于测点284号点至372号点间,宽约900 m,标高约在-500 m以下。低阻异常区由两个低阻异常中心组成,呈下口不封闭的圆柱状。C2-低阻异常区处于牛头岭组下段地层,其视电阻率均值在 $800 \Omega \cdot m$ 。钻孔ZK0806触到测点316号点附近的低阻异常中心,对该异常有一定的揭示作用。该钻孔底800 m以下岩石依次分别为凝灰质千枚岩、破碎硅化凝灰质千枚岩和硅化变余沉凝灰岩。钻孔下部矿化程度较好,矿化主要为黄铁矿化,黄铜矿化,方铅矿化。该低阻异常中心近似陡立条带状,与破碎带的位置对应关系较好。结合钻孔资料可知,316号点附近的低阻异常中心主要是由矿化和破碎带所控制。

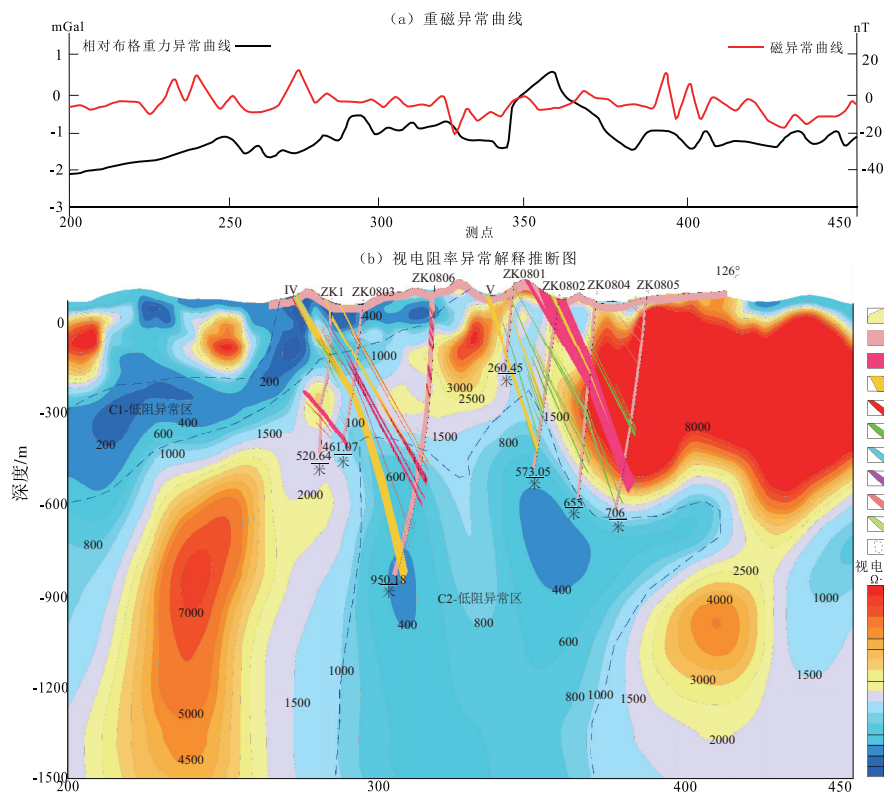




- 1, 第四系; 2, 石炭系上统黄龙组; 3, 新元古界万年群牛头岭组上段; 4, 新元古界万年群牛头岭组下段; 5, 新元古界万年群枫树岭组上段;  
6, 挤压变形破碎带及编号; 7, 花岗闪长斑岩脉; 8, 花岗斑岩; 9, 石英脉; 10, 金矿化体; 11, 磁异常剖面; 12, 磁异常带

图5 磁异常剖面图

Fig. 5 Section of magnetic anomalies



- 1, 第四系残坡积物松散物; 2, 中元古界双桥山群; 3, 花岗闪长斑岩; 4, 挤压变形破碎带及编号; 5, 金矿化体; 6, 铜矿化体; 7, 铅矿化体;  
8, 锌矿化体; 9, 铅、锌、金矿化体; 10, 钼矿化体; 11, 低阻异常区

图6 8线综合异常解释推断图

Fig. 6 The 8-line comprehensive anomaly interpretation

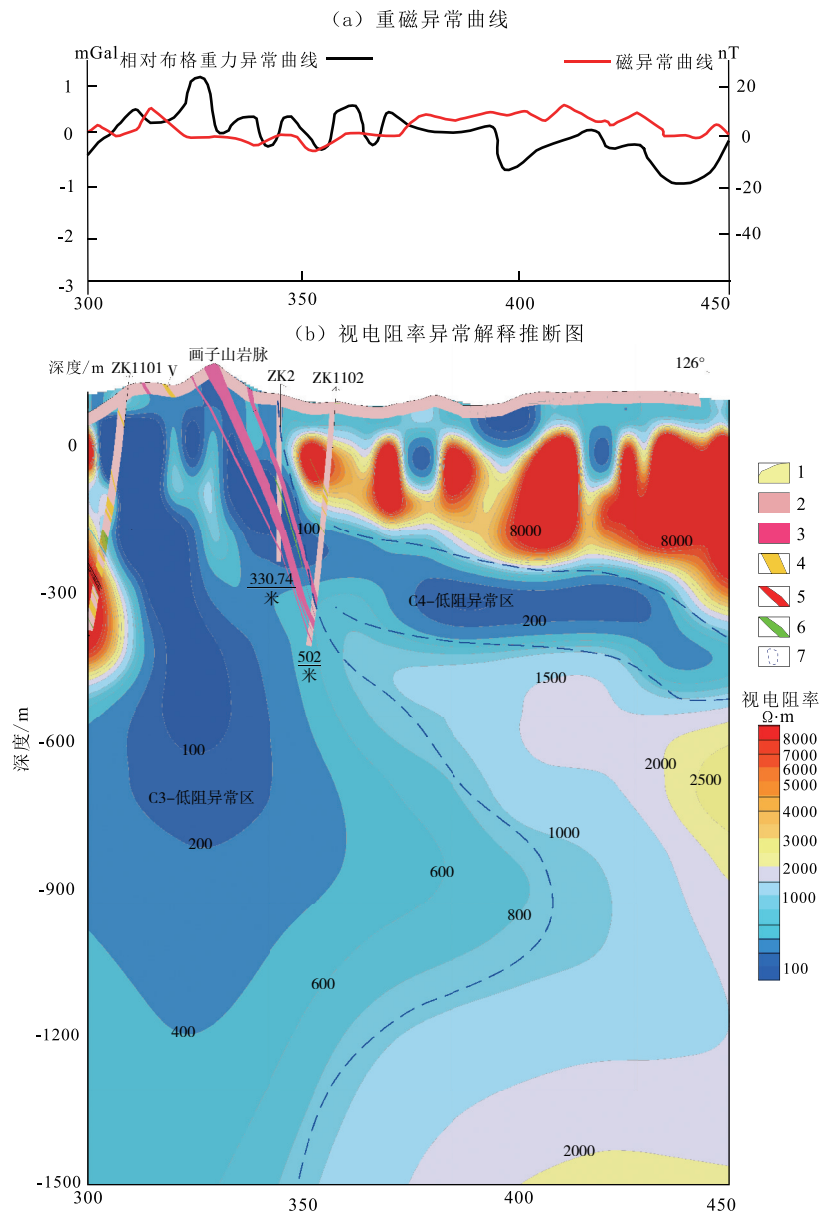


测点 340 至 372 号点地质工程对 C2-低阻异常区的揭示程度较低。钻孔 ZK0802、ZK0804 和 ZK0805 未触到低阻异常中心部位, 钻孔 ZK0805 底部见有矿化较好的铜矿(化)体, 矿化程度较好。钻孔对 V 号破碎带深部空间展布具有一定的控制作用, 推测 V 号破碎带有可能穿过测点 360 号点的低阻异常中心位置。综合钻孔资料认为 360 号点低阻异常中心仍是由破碎带和矿化引起。

#### 4.3.2 11 线综合剖面

11 线综合剖面从测点 324 至 452 号点跨越万年

群牛头岭组下段和牛头岭组上段地层, 地表 400 号点为该两地层接触位置。11 线的视电阻率异常解释图(图 7b)显示, 该剖面视电阻率背景值约在  $800 \Omega \cdot \text{m}$ , 视电阻率值由牛头岭组下段向牛头岭组上段逐渐增大。根据视电阻率异常特征圈定两处低阻异常区, C3-低阻异常区位于测点 324 至 364 号点间, 宽约 400 m。异常区近似直立状, 测线西北部异常不封闭。钻孔 ZK1101 底部碎裂千枚岩见黄铁、黄铜矿化及铅锌矿化, 绢云母千枚岩主要成分为绢云母 55%, 晶屑 25%, 石英 10%, 绿泥



1, 新元古界万年群牛头岭组; 2, 第四系; 3, 花岗闪长斑岩; 4, 挤压变形破碎带及编号; 5, 金铅锌矿化体; 6, 铜矿化体; 7, 低阻异常区

图7 11线综合异常解释推断图

Fig. 7 The 11-line comprehensive anomaly interpretation

石5%，其余为黄铁矿、黄铜矿等。钻孔ZK2底部花岗闪长斑岩普遍见细脉浸染状黄铁、黄铜矿化，硅化，推测该低阻异常是由矿化引起。C4-低阻异常区呈近似水平层状，位于测点376至452号点，标高在-250~450 m间。C4-低阻异常区介于两高阻层之间，与其他低阻异常区有所不同，推测其是由蚀变引起。

在340号点至372号点间可控源测量的视电阻率断面图显示为一个较陡立的低阻异常带。此次可控源还显示在标高-300 m左右有一条近似水平的柱状低阻异常带，长约800 m，宽有100 m左右。360号点至380号点见相对布格重力异常表现为正异常，结合地质资料，正相对布格重力异常与花岗闪长斑岩位置对应较好。

从物性测量可知，花岗闪长斑岩的密度较一般的千枚岩密度要高，推测正布格重力异常是由矿化体千枚岩和矿化花岗闪长斑岩引起。在低阻异常区，磁异常表现为负 $\Delta T$ 异常，与8线的磁异常分布相似，推测认为负 $\Delta T$ 异常与矿化有关。

## 5 结论

通过对画子山地区的物性资料的分析，采用重、磁、电三种物探方法对8线和11线剖面进行综合探测，并结合地质成果资料对不同方法进行解释，得到认识如下。

(1) 地面高精度磁法剖面圈定了两处 $\Delta T$ 异常带，1号磁异常带与地表出露的花岗闪长斑岩相吻合，推测该异常是由岩脉与围岩蚀变引起；2号磁异常带位于新元古界万年群牛头岭组上于下段地层接触的位置，推测是由地层挤压造成的蚀变引起。在测线8和11共圈定两处相对布格高重力异常带，结合物性测量成果，推测两处的相对布格高重力异常是由于万年群牛头岭组下段矿化引起。

(2) 根据可控源音频大地电磁测深(CSAMT)成果主要圈定了四处低阻异常带。结合已有的钻探成果对异常解析进行综合解释，推测认为低阻异常仍是由矿化引起。根据8线、11线视电阻率异常分布特征，认为8线C2低阻异常区和11线C3-低阻异常区空间存在一定的延续性，且沿南西向至北东线即有8线至11线低阻体埋深逐渐呈变浅，规模逐渐较小的趋势。

(3) 通过综合物探对测区高密度体、高磁性

体和低阻高极化体分布规律及异常特征的研究，表明异常区是以画子山为中心，且低阻异常向画子山西南方向聚集，即画子山下一步工作的重点区域应为万年群牛头岭组上段地层的西南方向。

**致谢：**匿名审稿专家和编辑老师对本文提出的宝贵意见和建议，在此一并表示感谢！

## 参考文献 (References):

- 陈国华, 万浩章, 舒良树, 等. 2012. 江西景德镇朱溪铜钨多金属矿床地质特征与控矿条件分析[J]. 岩石学报, 28(12): 3901-3914.
- 陈国华, 舒良树, 舒立旻, 等. 2015. 江东南段朱溪铜(钨)多金属矿床的地质特征与成矿背景[J]. 中国科学: 地球科学, 45(12): 1799-1818; 1791-1796.
- 冯旭亮, 王万银, 李建国, 等. 2015. 大中条地区重磁场特征及其断裂分布与构造单元[J]. 地质与勘探, 51(3): 563-572.
- 付光明, 许强平, 苏祥辉, 等. 2018. 庐江县顺港地区磁异常特征与靶区预测[J]. 科学技术与工程, 18(22): 21-30.
- 付建民, 刘因, 宋蓓蓓, 等. 2012. 基于重磁多尺度边缘检测的庐枞盆地基底构造研究[J]. 地质与勘探, 48(5): 979-990.
- 管志宁. 2005. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝天兆, 将为为. 1998. 综合地球物理方法在山东百里店地区寻找隐伏金矿中的应用[J]. 地球物理学报, 41: 404-413.
- 林建勇, 张雷雷, 赵盛博, 等. 2018. 江西省乐平市画子山金铜矿岩石物性特征研究[J]. 科技创新, 21(1): 6-7.
- 刘光鼎, 郝天兆. 1995. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 36(6): 850-854.
- 刘光鼎. 2017. 地球物理通论[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 刘建利, 李西周, 张泉. 2013. 重、磁、电联合反演在银额盆地定量解释中的应用[J]. 物探与化探, 37(5): 853-858.
- 罗凡, 许强平, 严加永, 等. 2019. 安徽拂晓地区地物化特征及找矿意义[J]. 地质与勘探, 55(4): 0925-0938.
- 罗凡, 严加永, 付光明. 2018. 基于已知信息约束的重磁三维反演在深部磁铁矿勘查中的应用——以安徽泥河铁矿为例[J]. 物探与化探, 42(1): 50-60.
- 蒙智宇, 饶建锋, 欧阳永棚, 等. 2017. 塔前—赋春成矿带红梅岭花岗斑岩地球化学特征与成矿潜力[J]. 矿物学报, 37(4): 486-494.
- 倪晴晖, 李大俊. 2017. 综合地球物理勘探方法在团鱼山南部地区构造划分中的应用[J]. 地质与勘探, 53(6): 1140-1147.
- 欧阳永棚, 饶建锋, 廖绍平, 等. 2019. 赣东北朱溪矿集区构造控岩—控矿特征[J]. 中国地质, 46(4): 878-893.
- 任伟龙, 宁君, 翟亮亮, 等. 2017. 综合地球物理勘探在八仙筒地区砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 40(3): 279-283.
- 唐建伟, 丁建荣, 郝天兆. 2008. 徐闻地区综合地球物理勘探方法应用研究[J]. 地球物理学进展, 23(3): 800-807.
- 吴美仁, 陈祺, 王先广, 等. 2019. 赣东北枣林碧玄岩地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 46(4): 850-860.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 3(1): 52-59.
- 严加永, 罗凡, 张昆, 等. 2019. 长江中下游成矿带岩体三维空间结构: 来自重磁三维反演的证据[J]. 地质科学, 54(3): 853-875.
- 颜廷杰. 2017. 江西朱溪铜钨多金属矿深部找矿地球物理方法综合研究[D]. 吉林: 吉林大学.
- Kaufman A A and Keller G V. 1983. Frequency and Transient Soundings[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Streich R. 2015. Controlled-source electromagnetic approaches for hydrocarbon exploration and monitoring on land [J]. Surveys in Geophysics, 37(1): 47-80.