

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1332

程云涛,刘俊峰,曹创华,等. 衡阳盆地西北缘物化探特征及其找矿意义[J]. 物探与化探,2021,45(5):1189-1195. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2021. 1332](http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1332)

Chen Y T, Liu J F, Cao C H, et al. Ore prospecting on northwestern margin of Hengyang Basin using geophysical and geochemical information[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1189-1195. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2021. 1332](http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1332)

# 衡阳盆地西北缘物化探特征及其找矿意义

程云涛<sup>1</sup>, 刘俊峰<sup>1</sup>, 曹创华<sup>2</sup>, 王荡<sup>1</sup>

(1. 湖南省核工业地质调查院, 湖南 长沙 410011; 2. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410016)

**摘 要:** 衡阳盆地是华南扬子板块和华夏板块的拼接带, 因其复杂的地质构造运动历史造就了其具有丰富的矿产资源潜力。为深入解剖衡阳盆地西北缘地层构架, 探讨矿床就位机制, 首先利用跨越紫云山岩体和南岳岩体的多方法长剖面进行综合探测, 分析了衡阳盆地西北缘盆地结构; 其次选择剖面经过重点区段的精测剖面采用激电测深进行大比例尺精细探测, 分析了长寿—衡阳—观音阁断裂的激电响应特征, 探讨了其成因与成矿远景; 最后结合区域地质、重力异常等综合信息研究了此区内的成矿物质运移规律, 证实了衡阳盆地属于典型的“亚幔柱—幔枝体系”。

**关键词:** 衡阳盆地西北缘; 可控音频大地电磁法; 广域电磁测深; 综合物化探方法; 亚幔柱—幔枝体系

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)05-1189-07

## 0 引言

衡阳盆地位于扬子板块与华夏板块结合部位——钦杭成矿构造带中段与南岭成矿带北缘交汇部位, 该区矿产资源种类齐全, 储量丰富, 其中已发现矿产 66 种, 矿床(点)有 876 处<sup>[1]</sup>。

衡阳盆地西北缘铅锌多金属矿整装勘查区属衡阳市衡阳县、衡山县、衡南县、及邵阳市邵东县管辖, 面积 1 544 km<sup>2</sup>。近年来, 湖南省地勘局 417 大队、有色地质局 217 大队、核工业地质局三〇六大队在该区投入了大量地质工作, 其中盐田桥铜矿、谭子山铜矿、留书塘铅锌矿均取得了较好的勘探成果, 而这些矿区均沿长寿—衡阳—观音阁断裂分布, 表明整装勘查区成矿条件优越、找矿前景较好。

衡阳盆地矿产资源丰富, 但由于衡阳盆地西北缘地层主要是一套白垩系—上新近系红层建造, 该套地层电阻率几十~几百  $\Omega \cdot m$ , 整体阻值较小, 形成了一个天然的低阻屏障。根据湖南 1:20 万重力资料表明, 该区红层最厚深度约 5 km<sup>[2-4]</sup>, 传统类电

法供电电流难以穿透低阻层, 给区内的深部研究带来了困难。本文尝试利用综合物化方法结合广域电磁法新技术, 对衡阳盆地西北缘深部地质特征、成矿模式和找矿方法技术做了探索并得到了具有找矿指导意义的结论。

## 1 地质概况

区内主要出露中元古界冷家溪群和白垩系地层(图 1), 冷家溪群沉积环境为深—半深海盆地平原—浊积扇沉积, 主要岩性为灰绿色千枚状板岩、绢云母板岩夹薄层含白云母变质砂岩。白垩系—古近系广布于盆地内部, 为一套内陆湖相红色砂、泥岩建造。区域性长寿—衡阳—观音阁断裂带穿越矿区中部, 沿此断裂往北, 有南岳、白石峰燕山早期花岗岩体, 岩体内及接触带有大量富含铌、钽、钇、锆等元素的花岗岩伟晶岩脉, 往南有龙秀桥、泉湖、鸡笼街等花岗岩体。区内矿床沿断裂呈线状分布, 北部有国庆铜矿床、黑石砣铁矿床、盐田桥铜矿床, 南部有白鹤铺铜矿床、龙秀桥铜矿床、谭子山重晶石铜矿床,

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2021-06-12

基金项目: 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2261); 国家重点研发计划“深地资源勘查开采重点专项”(2017YFC0602402); 湖南省核工业地质局科技开发项目(KY2019-DDY-01)

第一作者: 程云涛(1982-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 长期从事地球物理勘查和技术管理工作。Email: 674395052@qq.com



表 1 测区岩(矿)石标本物性参数测量结果

Table 1 Measurement results of physical parameters of rock (ore) samples in survey area

| 岩(矿)石 | $\rho_s/(\Omega \cdot m)$ | $F_s/\%$ | $\kappa/(10^{-5}4\pi SI)$ | $J_r/(10^{-3}A \cdot m^{-1})$ |
|-------|---------------------------|----------|---------------------------|-------------------------------|
| 花岗岩   | 3000~5000                 | 1.0~1.2  | 8~20                      | 2~25                          |
| 硅质岩   | 1000~3000                 | 0.7~1.0  | 1~3                       | 1~4                           |
| 板岩    | 500~2000                  | 1.0~1.5  | 1~3                       | 1~4                           |
| 粉砂岩   | 20~180                    | 0.8~1.5  | 0~2                       | 1~5                           |
| 断裂带   | 50~200                    | 2.0~4.5  | -2~-8                     | 1~23                          |

表 2 土壤分析结果

Table 2 The results of soil analysis

| 参数                | Mn     | Co    | Cu    | Zn    | Mo    | Ag   | Sn   | Ba     | W    | Pb    | Sb     | Bi     | As     | Hg    | Au    |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 均值/<br>$10^{-6}$  | 693.78 | 18.34 | 42.30 | 77.74 | 1.35  | 0.07 | 4.97 | 558.76 | 5.10 | 30.93 | 2.45   | 0.77   | 17.04  | 0.04  | 1.77  |
| 均方差/<br>$10^{-6}$ | 25.43  | 0.74  | 3.21  | 1.43  | 0.04  | 0.00 | 0.09 | 156.75 | 0.25 | 0.98  | 0.17   | 0.07   | 1.83   | 0.00  | 0.1   |
| 峰度/<br>$10^{-6}$  | 2.71   | 49.44 | 53.66 | 0.46  | 19.87 | 9.88 | 5.70 | 261.96 | 9.08 | 36.23 | 114.16 | 236.48 | 135.93 | 23.62 | 31.18 |

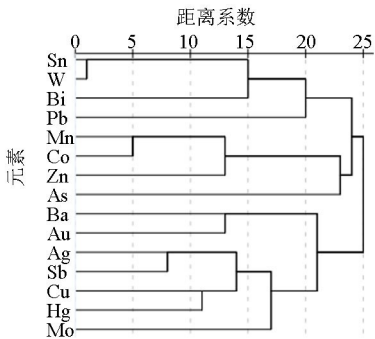


图 2 R 型聚类树状图

Fig. 2 R—clustered tree map

找矿标志。

3 技术方法及工作参数

本次工作布设一条 20 km 物化探综合剖面(图 2),该剖面西起盆地边缘,穿过渣江—茅洞桥凹陷和长寿—衡阳—观音阁断裂,东至冷家溪群板岩。该剖面共开展了 CSAMT 测深、高精度磁法测量、激电测深、土壤地球化学测量和广域电磁法等 5 种勘查方法,其中 CSAMT 测深点距 100 m,探测采用 TM 模式,采集数据频率范围为 1~8 192 Hz,收发距 7 km,发射最大电流为 20 A;广域电磁法发射端功率采用 220 kw,发射最大电流为 130 A,发射频率范围 3/256~8 192 Hz,偶极电源的长度 1.23 km,收发距 13 km,测量点距 100 m;激电测深主要针对电磁法勘探工作所圈异常部位,采用对称四极装置,供电极距 AB/2 最大 750 m,点距 20 m;磁法测量和土壤地球化学测量点距均为 100 m。

4 物化探异常分析

4.1 可控源音频大地电磁测深(CSAMT)

由 CSAMT 测深剖面可见各地质体电性界面明显(图 3a),呈现中部低阻、两侧高阻的形态。红盆以阻值小于 180  $\Omega \cdot m$  为界,由两缘到中部逐渐变深,中部深度大于 2 000 m;红盆两侧均为冷家溪群板岩,电阻均值约为 1 500  $\Omega \cdot m$ ,形态清晰,分布明确;在点 0~600 m 段和点 14 400~17 200 m 段深部存在一个阻值为 4 000  $\Omega \cdot m$  的高阻体,推测为隐伏岩体引起。在点 14 300 m 存在一明显电性分界线,该界面倾向 NW,倾角上陡下缓,延伸深度大于 2 000 m,推测为长寿—衡阳—观音阁断裂(F),根据钻孔 ZK7206 资料表明,在该点在深度 276 m 处见到破碎带,该破碎带厚度约 80 m,与物探成果基本相符。

4.2 广域电磁测深

广域电磁法突破远区测量的限制,提出适用于全域的公式计算视电阻率,大大拓展了观测范围,提高勘探深度和精度<sup>[10-17]</sup>。从测量成果来看(图 3b),该剖面整体红盆平均厚度约 800 m,下伏冷家溪群板岩厚度大于 4 km;点 6 800 m~10 000 m 段的低阻异常体与 CSAMT 测量成果相似,为红盆引起推测该处为渣江—茅洞桥凹陷,延伸深度大于 5 km;点 14 300 m 处的长寿—衡阳—观音阁断裂(F)形态明显,在浅部表现为红盆和冷家溪群的不整合接触,深部切割冷家溪群,倾向 NW,倾角上陡下缓,延伸深度大于 5 km;两侧的隐伏岩体从深部涌入,离地表约 1 km,为该部位成矿提供流体和热源。



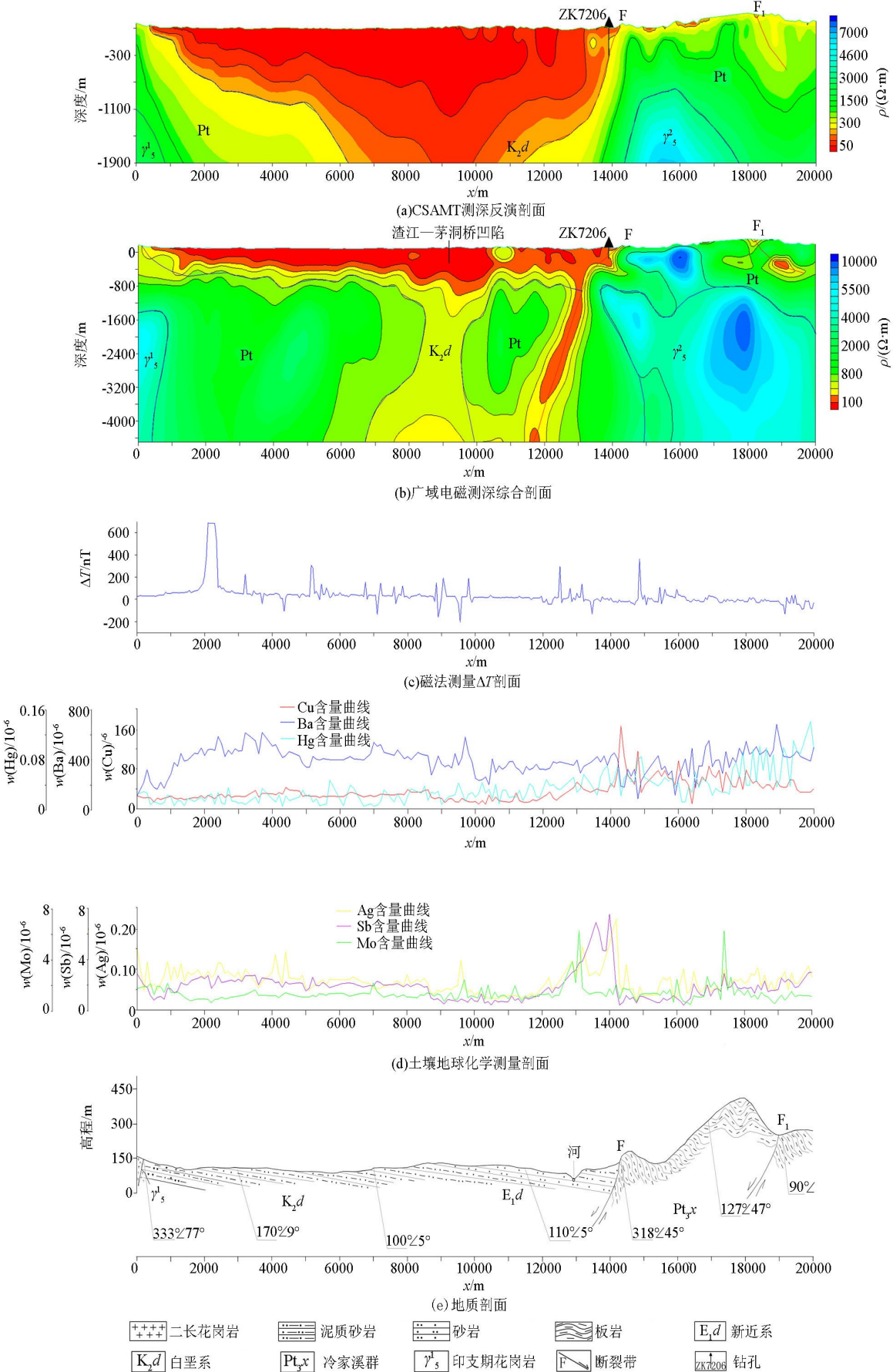


Fig.3 Composite geophysical and geochemical profile of the northwestern margin in Hengyang Basin

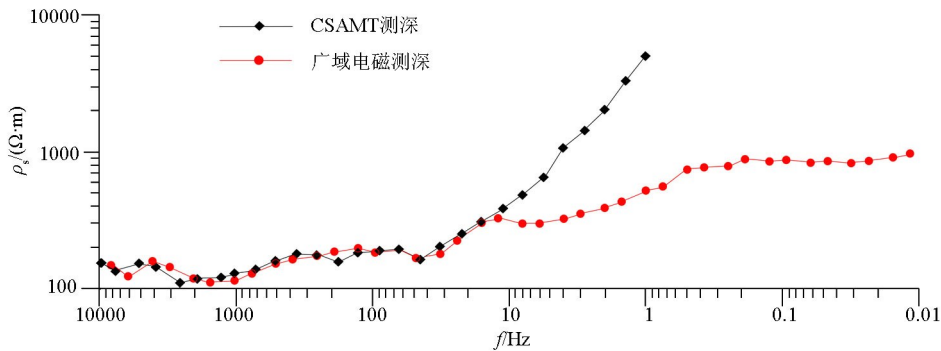


图 4 13200 号点广域电磁测深与 CSAMT 测深视电阻率对比

Fig. 4 The contrast chart of WFEM and CSAMT sounding apparent resistivity in 13200 point

广域电磁测深和 CSAMT 测深剖面整体形态相似,但广域电磁测深在对层状介质的划分、盆地形态的控制、勘探深度及分辨率上存在明显优势。图 4 是 13200 号点广域电磁测深与 CSAMT 测深视电阻率对比图,由图可见,在频率 $f \geq 16$  Hz 时,广域电磁测深与 CSAMT 测深非常吻合,两条曲线基本重合;在 $f < 16$  Hz 时,两条曲线出现了显著的分离,其中 CSAMT 法的曲线基本成 45°角急剧上升,表明已进入近区,相反广域电磁测深曲线呈平缓上升,反映了高阻的基底。

4.3 磁法剖面测量

从磁法剖面可见整体磁异常不明显(图 3c),局部异常为高压线引起,各断裂带位置附近存在局部弱负磁异常。

4.4 土壤地球化学测量

从该剖面土壤样分析来看(见图 3d),Cu 与 Au、Ba、Ag、Sb、Hg、Mo 都存在明显的相关性,尤其是

Ba、Ag、Sb、Hg 组合与 Cu 相关程度较高,可作为该区寻找铜矿床的重要地球化学找矿标志,异常大多位于地表断裂位置。

4.5 激电测深

本次激电测深是在 CSAMT 成果的基础上开展工作,针对异常区布设 600 m 的对称四级测深剖面,数据处理采用吉林大学 GeoElectro 电法系统的激电测深二维反演软件 VESIP<sup>[15-19]</sup>。

由图 5 可见:电阻率剖面电性界线明显,在点 14 300 m 存在一明显分界线,该界面倾向 NW,倾角约 35°,界面西侧电阻率值约 100 Ω·m,界面东侧电阻率值约 1 500 Ω·m。从幅频率剖面来看,对应点 14 300 m 处存在一高极化异常体,幅频率值约为 3.5,与电阻率曲线形态相对应,推测该异常为长寿—衡阳—观音阁断裂(F)引起,该断裂西面为白垩系红盆,东面为冷家溪群地层。

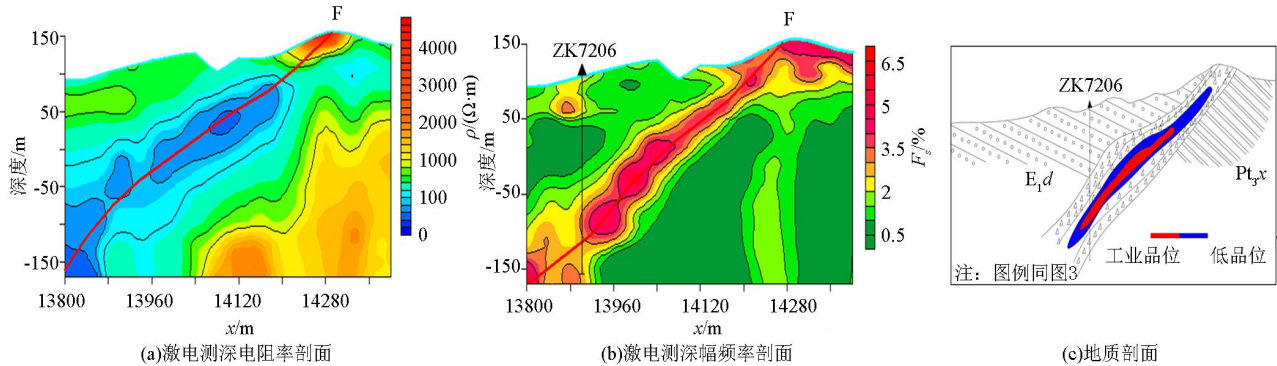


图 5 衡阳盆地西北缘激电测深综合剖面

Fig. 5 The integrated profile of IP sounding of the northwestern margin in Hengyang Basin

5 结论与讨论

衡阳盆地是一对称的白垩系凹陷盆地,于燕山

运动形成雏形,结束于喜马拉雅山运动末期,本次测量对区内发育的 NW 向长寿—衡阳—观音阁控矿断裂,及渣江—茅洞桥凹陷得以控制,对衡阳盆地基底形态和地层分布进行划分和论证,总结该区热液型

铜矿低阻高极化弱磁高化探异常特征,优选找矿方法为 CSAMT+激电+化探的方法组合。

根据衡阳盆地范围内的高重力异常推测此处地壳较薄,而其周边的低重力异常地壳较厚,借鉴前人成果,衡阳盆地深部很可能是一个小型的地幔亚柱<sup>[3,20-22]</sup>,与盆地周缘低密度的侵入体一起,构成了

典型的“地幔亚热柱—幔枝”体系。而本次广域电磁探测深部低阻异常未封闭,且存在较大延伸空间,由此推测渣江—茅洞桥凹陷为地幔亚柱上升通道位置,含矿物质从地幔沿亚热柱上移,至岩石圈底部向外扩散,再沿断裂及幔枝构造的各个部位沉淀、富集成矿(见图6)。

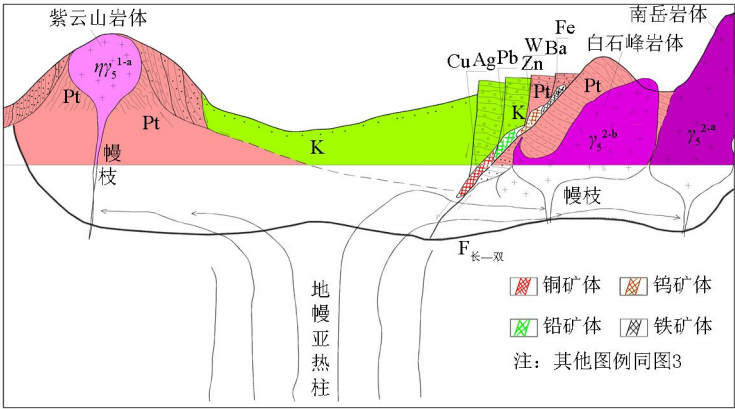


图6 衡阳盆地西缘长寿—双牌深大断裂带控、成矿模式示意

Fig. 6 The metallogenetic model of changshou-shuangpai deep and large fault zone

参考文献 (References):

[1] 湖南省地质调查院. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,2017.  
Hunan Geological Survey Institute. Regional geology of Hunan Province[M]. Beijing: Geology Press, 2017.

[2] 湖南省地质调查院. 1:20 万衡阳幅区域重力调查技术说明书[R]. 2001.  
Hunan Geological Survey Institute. 1:200,000 regional gravity survey technical specification for the Hengyang Plate[R]. 2001.

[3] 王敏,王雨豪,赵亚娟,等. 衡阳盆地与周边重力异常的分析[J]. 国土资源刊,2015,12(4):30-34.  
Wang M, Wang Y H, Zhao Y J, et al. Analysis of gravity anomalies in the Hengyang Basin and surrounding areas [J]. Land Resources Guide, 2015, 12(4): 30-34.

[4] 曾华霖,程业勋,管志宁,等. 重力场与重力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.  
Zeng H L, Cheng Y X, Guan Z N, et al. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[5] 何友宇,姜必广,周锡平,等. 衡阳盆地盐田桥矿区地质—物化探综合找矿效果[J]. 物探与化探,2016,40(4):681-687.  
He Y Y, Jiang B G, Zhou X P, et al. The comprehensive prospecting effect of geology-physical and geochemical exploration in Yantianqiao mining area in Hengyang Basin [J]. Physical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4): 681-687.

[6] 周厚祥,杨贵花,蒋中和,等. 大义山锡矿田矿床地质特征及矿床成因[J]. 华南地质与矿产,2005(2):87-94.  
Zhou H X, Yang G H, Jiang Z H, et al. Geological characteristics and genesis of the Dayishan tin ore field [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2005(2): 87-94.

[7] 冯雨周,邵拥军,葛超,等. 湖南衡阳柏枋铜矿床地质特征及

成因分析[J]. 南方金属,2017(2):29-31.  
Feng Y Z, Shao Y J, Ge C, et al. Geological characteristics and genetic analysis of Baifang copper deposit in Hengyang, Hunan [J]. Southern Metals, 2017(2):29-31.

[8] 饶家荣,王纪恒,曹一中. 湖南深部构造[J]. 湖南地质,1993(s1):10.  
Rao J R, Wang J H, Cao Y Z. Deep structure of Hunan [J]. Hunan Geology, 1993(s1): 10.

[9] 李福顺. 钦杭成矿带衡阳盆地找矿方向及前景分析[J]. 华南地质与矿产,2012,28(4):360-368.  
Li F S. The prospecting direction and prospect analysis of Hengyang Basin in Qinhang metallogenetic belt [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2012, 28(4): 360-368.

[10] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京:高等教育出版社,2010.  
He J S. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[11] 何继善,柳建新. 伪随机多频相位法及其应用简介[J]. 中国有色金属学报,2002,12(2):374-376.  
He J S, Liu J X. Pseudo-random multi-frequency phase method and its application [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 374-376.

[12] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1990.  
He J S. Control source audio magnetotellurics [M]. Changsha: Central South University Press, 1990.

[13] 汤井田,何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2005.  
Tang J T, He J S. The apply of control source audio magnetotellurics [M]. Changsha: Central South University Press, 2005.

[14] 刘耀文,蒋永芳,冯绍平,等. 广域电磁法在上宫金矿集区的应用研究[J]. 物探与化探,2020,44(5):1085-1092.  
Liu Y W, Jiang Y F, Feng S P, et al. The application of the wide field electromagnetic method to the Shangong gold ore concentration area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1085-1092.

[15] 柳建新,郭振威,童孝忠,等. 地面高精度磁法在新疆哈密地区磁铁矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2011,47(3):432-438.  
Liu J X, Guo Z W, Tong X Z, et al. Application of the ground high-precision magnetic method to magnetite survey in the Hami area, Xinjiang [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 432-438.

[16] 王峰,吴志春,陈凯,等. CSAMT 法在深部地质结构探测中的应用——以相山铀矿田邹家山地区为例[J]. 物探与化探,2016,40(1):17-20.  
Wang F, Wu Z C, Chen K, et al. The application of CSAMT to detecting deep geological structures in the Zoujiashan area of the Xiangshan uranium orefield [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 17-20.

[17] 刘俊峰,程云涛,邓志强,等. CSAMT 与 AMT 数据“拼接”处理——以湖南仁里钽铌矿床 7 号剖面为例[J]. 物探与化探,2021,45(1):68-75.  
Liu J F, Cheng Y T, Deng Z Q, et al. CSAMT and AMT data “splicing” processing: A case study of No. 7 profile of the Renli niobium tantalum deposit in Hunan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 68-75.

[18] 李茂平,黄富年. 南岭成矿带坪宝矿田地质物化探异常综合研究及找矿预测[J]. 湖南有色金属,2020,36(4):5-8.  
Li M P, Huang F N. A comprehensive study of geophysical and geochemical anomalies and its prospecting prediction in Pingbao ore field of Nanling metallogenic belt [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(4): 5-8.

[19] 温佩琳,赵秋梅. 大深度激发极化法初步探讨[J]. 物探与化探,1996,20(5):329-330.  
Wen P L, Zhao Q M. A preliminary discussion on the great depth induced polarization method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(5): 329-330.

[20] 赵增霞,徐兆文,缪柏虎,等. 湖南衡阳关帝庙花岗岩岩基形成时代及物质来源探讨[J]. 地质学报,2015,89(7):1219-1230.  
Zhao Z X, Xu Z W, Miao B H, et al. Diagenetic age and material source of the Guandimiao granitic batholith, Hengyang City, Hunan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(7): 1219-1230.

[21] 秦锦华,王登红,陈毓川,等. 试论湖南衡阳盆地与地幔柱的关系及其对关键矿产深部探测的意义[J]. 地质学报,2019,93(6):1501-1513.  
Qin J H, Wang D H, Chen Y C, et al. Discussion on the relationship between Hengyang basin and mantle plume and its implication for the deep prospecting of key minerals [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1501-1513.

[22] 赵斌,高红芳,张衡,等. 基于深度域地震成像的中沙海槽盆地东北部结构构造研究[J]. 热带海洋学报,2019,38(2):95-102.  
Zhao B, Gao H F, Zhang H, et al. Structure study of the north-eastern Zhongsha Trough Basin in the South China Sea based on prestack depth migration seismic imaging [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(2): 95-102.

Ore prospecting on northwestern margin of Hengyang Basin using geophysical and geochemical information

CHEN Yun-Tao<sup>1</sup>, LIU Jun-Feng<sup>1</sup>, CAO Chuang-Hua<sup>2</sup>, WANG Dang<sup>1</sup>

(1. Hunan Nuclear Industry Geological Survey Institute, Changsha 410011, China; 2. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

**Abstract:** The Hengyang Basin is a junction zone between the Yangtze Plate in South China and the Cathaysian Plate. It is expected to have great potential for rich mineral resources given its complex geological tectonic movement history. This paper aims to deeply analyze and explore the stratigraphic framework and deposit occurrence mechanisms on the northwestern margin of the Hengyang Basin. To this end, a series of geophysical surveys in this area were carried out. Firstly, a multi-method survey of a long section spanning the Ziyunshan and Nanyue rock masses was conducted and the structure of the northwestern margin of the Hengyang Basin was accordingly analyzed. Secondary, large-scale fine detections of subsections in the key sections/blocks were carried out using induced polarization (IP) sounding. Meanwhile, the characteristics of the IP response of the Changshou-Hengyang-Guanyin’ge fault were analyzed especially, and the genesis and metallogenic prospect of the fault were explored. Finally, the migration rules of ore-forming materials on the margin were investigated based on comprehensive information such as regional geological and gravity anomalies. The combined results confirmed that the Hengyang Basin is a typical sub-mantle plume-mantle branch system.

**Key words:** northwestern margin of the Hengyang Basin; controlled source audio-frequency magnetotellurics method; wide-field electromagnetic method; comprehensive geophysical and geochemical surveys; sub-mantle plume-mantle branch system