



朱溪钨铜矿的广域电磁法深部探测

陈后扬¹, 李帝铨², 凌帆², 吴西全¹, 危志峰¹, 张斌³, 田红军³,
游文兵³, 邹其峰¹, 刘献满¹

(1. 江西省地质局物化探大队, 南昌 330002;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 湖南继善高科技有限公司, 长沙 410208)

摘要: 朱溪钨铜矿是近年发现的超大型矽卡岩型钨铜矿床, 刷新了钨矿资源量的世界纪录, 主矿体埋深普遍超过1000 m。2017年, 矿体在倾向和走向上没有完全封闭, 主要控岩控矿构造的深部产状未知, 亟需开展深部探测工作。本研究尝试将广域电磁法应用到朱溪矿区深部探测; 利用物性资料和井旁视电阻率测深曲线建立了目标地质体电性、密度、磁性与岩性之间的联系; 开展了重磁电多参数对比分析, 结合已知地质资料绘制了骨干剖面的二维地质-地球物理断面, 依据广域电磁法反演断面拟三维切片图构建了三维地质找矿模型。结果表明: 这些工作较好地揭示了区内主控岩控矿构造、赋矿层位的展布形态, 获取了与深部隐伏岩体有关的热液蚀变活动信息。广域电磁法为朱溪矿区深部500~3000 m“第二找矿空间”的成矿规律研究、下一步找矿方向等提供了有力依据, 是金属矿产深部找矿的有效方法技术。

关键词: 朱溪钨铜矿; 广域电磁法; 矽卡岩; 深部探测

文章编号: 1004-0609(2022)-10-3227-17

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

引文格式: 陈后扬, 李帝铨, 凌帆, 等. 朱溪钨铜矿的广域电磁法深部探测[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(10): 3227-3243. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42244

CHEN Hou-yang, LI Di-quan, LING Fan, et al. Deep exploration of wide field electromagnetic method in Zhuxi W-Cu deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(10): 3227-3243. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42244

江西省景德镇浮梁县朱溪钨铜多金属矿区位于钦杭结合带萍(乡)乐(平)坳陷带之东端^[1], 该矿的发现改变了江西省“南钨北铜”的资源分布格局, 同时揭开了塔前-赋春矿集区找大矿的序幕^[2-3]。通过近期“攻深找盲”钨铜矿勘查阶段(2010—2019年)^[4], 朱溪隐伏矿体沿走向已控制延伸大于1800 m, 沿倾向控制延伸近2000 m, 主要矿体沿走向和倾向均未控制至边界^[4-5]。众多学者集中围绕朱溪钨铜矿矿床地质特征与控矿条件^[6-9]、成岩和成矿年

代^[3, 10-13]、成矿规律与找矿方向^[4-5, 14-20]等方面开展了大量科学研究, 探索形成了朱溪式“脉面层体”就矿找矿方法^[4-5, 14-20], 抓住逆冲推(滑)覆断裂带控岩-控矿、碳酸盐岩构造岩片赋矿、燕山期成矿花岗岩体等关键成矿要素^[4-5, 14-15], “以脉找体”“以层寻体”“以面追体”, 取得重大找矿突破^[4]。

物化探技术在朱溪“就矿找矿”的“面上求点”和“点上探矿”两个阶段^[4-5]发挥了重要作用。早在1969年, 江西省地矿局物化探大队七〇五队

基金项目: 江西省地质矿产勘查开发局地质科研项目(赣地矿字[2017]78号)

收稿日期: 2021-08-26; 修订日期: 2021-11-25

通信作者: 李帝铨, 教授, 博士; 电话: 15802637512; E-mail: lidiquan@126.com

通过物化探扫面发现了朱溪铜铅锌钨钼等元素异常, 查证后发现了朱溪铜矿^[4-5]。张爽等^[21]采用低飞航磁技术划分出8条深断裂, 推断出4个成矿远景区。郭信等^[22]基于1:50000重力、航磁等资料, 利用重磁三维反演建模技术建立了朱溪外围构造格架和三维地质-地球物理模型, 对隐伏岩体进行了立体识别。对于矿区尺度, 颜廷杰^[23]开展了精细物探剖面研究, 通过2.5D重磁反演获取了深部磁性源和低密度隐伏岩体信息, 并结合极化率和电阻率异常构建了找矿模型。然而, 随着朱溪“第二找矿空间”勘查的深入, 仅仅依靠传统物探方法已难以满足大埋深、小尺度、复杂地质条件等“点上”深部精细探测要求。

2005年, 何继善院士^[24]提出了广域电磁法理论, 受到地球物理界高度关注。该方法采用大功率发射、宽频带频谱信号发射-接收等技术, 极大地提高了频率数据密度和信噪比, 具有效率高、抗干扰能力强、测量精度高的优点, 实现了电磁法由粗放到精细的跨越^[24-26]。广域电磁法为透视深部地质结构提供了新的手段。

本次在朱溪开展广域电磁法深部探测试验, 着眼于“点上”深部结构的精细刻画。在前人已有研究成果的基础上, 以“脉面层体”就矿找矿方法^[4]为指导, 拟系统阐述朱溪广域电磁法数据精细处理、定性分析、反演解释、电性信息提取和综合地质-地球物理解释的试验过程, 并依据广域电磁法反演断面拟三维切片构建三维地质找矿模型, 从精细电性结构角度深化对朱溪超大型钨铜多金属矿床的认识, 验证广域电磁法应用于金属矿产深部找矿的有效性。

1 地质概况

区内地层发育有新元古界(Pt_3)、石炭系至三叠系(C-T)、白垩系(K)及第四系(Q)等, 主要由浅变质岩、沉积岩及少量第四系松散沉积物三大部分组成(见图1(a))。朱溪矿区地处钦杭结合带东段塔前-赋春钨铜多金属矿集区(见图1(b))。

基底地层为新元古界万年群($Pt_3^{1a}W$)深海盆地相夹浊流沉积, 主要为绢云母千枚岩、凝灰质千枚

岩、砂质千枚岩、变质粉砂岩、变质细砂岩组合的浅变质岩系。盖层主要为石炭系-三叠系(C-T)碳酸盐岩夹碎屑岩, 总体呈走向NE、倾向NW、倾角 $22^\circ\sim 86^\circ$ 的单斜构造展布, 以角度不整合覆于新元古代浅变质岩之上。其中石炭系黄龙组(C_2h)和船山组(C_2c)碳酸盐岩地层是矿床形成的重要物质基础, 属主要含矿层位。石炭系与新元古界接触界面(滑脱断裂面)上盘的船山组和黄龙组中常有工业矿体产出。区内二叠系由下至上主要分布有栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m)、乐平组(P_3l)和长兴组(P_3c); 三叠系主要出露安源群(T_3a)^[5]。

受九岭南缘由NW向SE的逆冲推覆构造影响, 区内发生多层次逆冲推(滑)覆, 使新元古代浅变质岩逆冲推覆于C-T构造岩片之上; 基底以紧闭褶皱为主, 发育网格状剪切裂隙。矿区断裂构造发育, 按断裂走向可分为NE向、近EW向、NNE向、NW向等4组, 其中NE向断裂最为发育, F2断裂与成矿密切相关。F1、F2断裂均为区域性逆冲推(滑)覆断裂, 断裂总体倾向NW, 倾角变化较大, 局部具有倒转现象。F1断裂带上盘为新元古界万年群、下盘为C-T地层, 断裂带走向NE $50^\circ\sim 60^\circ$ 、倾向NW、倾角 $60^\circ\sim 80^\circ$, 矿区范围内多为高角度连续逆冲推覆。F2断裂最初应为不整合接触界面, 受后期推(滑)覆构造叠加改造作用, 在矿区内表现为断层接触, 既有推覆作用时的韧性挤压特征, 亦有应力释放滑脱时的张性特征, 断裂上盘以C-P地层为主, 下盘多为新元古界万年群, 断裂总体呈NE $45^\circ\sim 60^\circ$ 舒缓波状延展, 其倾向NW呈挠曲状, 倾角在浅部较陡, 往深部趋于平缓, 层间滑脱扩容空间为主要赋矿场所, 是区内最主要控岩控矿构造, 是岩浆侵入、成矿流体运移的通道, 亦是矿质沉淀集聚场所^[5]。

矿区内岩浆活动较为强烈, 发育中基性和酸性侵入岩, 与成矿关系密切的主要为燕山期酸性岩, 如黑云母花岗岩、蚀变花岗岩、花岗斑岩, 主要侵位于 $Pt_3^{1a}W$ 浅变质岩和C-T地层, 均为隐伏岩体, 以黑云母花岗岩规模最大^[5]。

矿区目前已发现主矿种有W、Cu。18[#]~54[#]线主矿体厚大, 均为隐伏矿体。按矿体空间分布特征、产出形态及赋矿围岩特征, 可将矿区内矿体划

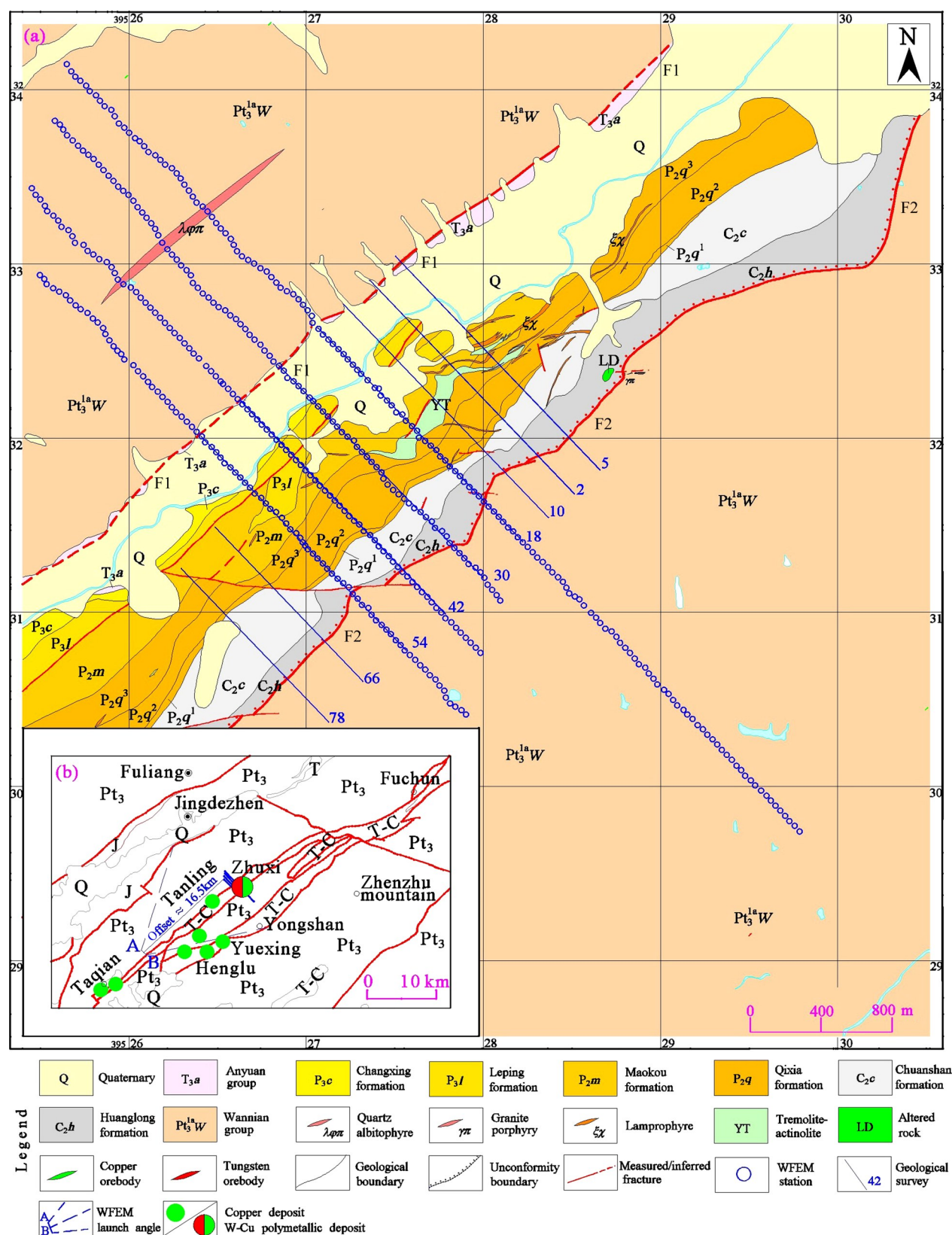


图 1 朱溪钨铜多金属矿区地质构造及广域电磁法剖面部署简图

Fig. 1 Geological map and wide field electromagnetic method survey grid of Zhuxi W-Cu polymetallic deposit:

(a) Geological map of mining area; (b) Regional geological map

分为矽卡岩型、蚀变花岗岩型、云英岩细脉-网脉型和石英细脉-网脉型矿体四类。矽卡岩型矿体为区内最主要矿体类型,主要呈似层状、透镜状顺层产出F2构造面及其上盘黄龙组中。矿体总体走向NE,倾向NW,沿走向控制大于1200 m,沿倾向控制近2000 m^[5]。截至2017年主要矿体沿走向和倾向均未封闭,仍有一定的延伸。

2 物性特征

物性是联系地球物理和地质的纽带,物性数据是定性解释和定量反演的首要约束条件,将研究区地层岩性与物性资料相结合,建立主要地质体地球物理推断解释标志,可为后续异常解释、构建地质-地球物理模型提供依据。

物性研究以岩矿石物性参数^[23]为主要参考,本次试验整合了朱溪矿区及其外围弹岭、横路、月形等矿区的岩芯标本物性参数(见表1)。区内矽卡岩磁性最高,千枚岩为弱磁性,其余地层均为无磁性,因此可利用磁异常识别矿化蚀变。安源群(T_3a)和乐平组(P_3l)密度最低,其余地层密度均在2.7 g/cm³左右。矽卡岩及大理岩密度最高,引起局部重力高异常;花岗岩密度平均为2.6 g/cm³,与围岩地层约有-0.1 g/cm³差异,可引起局部重力低异常。矽卡岩极化率最高,含炭质灰岩次之,其余地层均为低极化特征。从岩性来看,灰岩、白云岩、大理岩和千枚岩的电阻率普遍高,粉砂岩和石英砂岩电阻率低,灰岩经热液交代形成矽卡岩,电阻率降低。可见,大理岩表现为无磁性、高密度、高阻、低极化特征;矽卡岩表现为高磁性、高密度、低阻、高极化特征。花岗岩电阻率均值为2688.1 $\Omega \cdot m$,深部隐伏岩体的围岩主要为 Pt_3^{1a} 千枚岩及石炭系灰岩、白云岩,它们的电阻率一般在3500 $\Omega \cdot m$ 以上,相对隐伏岩体略高;深部岩株、岩脉规模小且破碎,往往被厚大的矿化蚀变带包围,甚至表现出中低阻特征,因此,单独依据电法资料识别和圈定岩体难度较大^[27]。 P_2q^2 含炭质灰岩的电阻率因炭质程度不同而变化,总体上为夹持于上、下高阻层之间的一相对低阻层,可作为本区广域电磁资料处理解

释的一个“低阻标志层”。

综上所述,区内不同岩(矿)石物性存在一定差异规律,这为该区进行多参数综合研究提供了地球物理前提。

3 广域电磁法深部探测试验

3.1 测线布置

广域电磁法在该区主要针对深部500~3000 m“第二找矿空间”进行探索。在主矿体上方,与地质剖面重合,共部署实施了4条广域电磁法试验剖面,采用测量水平电流源产生的电场水平分量 E_x 的 $E-E_x$ 广域电磁法^[24,26]进行野外数据采集。4条测线均沿NE向布置,与C-T构造岩片垂交(见图1和表2)。

3.2 数据处理

获取可靠数据是物探工作成功的基础,可靠的推断解释则是成败的关键^[27-28]。广域电磁法资料处理主要运用了中南大学何继善^[24]团队研发的“地球物理资料综合处理解释一体化系统(GME_3DI)”。首先对原始数据进行细致的预处理,对电场进行静态校正,然后迭代计算广域视电阻率。然后,定性分析客观电性结构的“横向分块”和“纵向分层”特征,对比已知地质剖面、岩石物性、井旁广域电磁法测深曲线,不断优化反演参数。最后,采取带场源的一维反演结果作为初始模型,进而开展2.5D连续介质反演^[30]。数据处理过程中结合已有地质、钻探、物探等资料,多次反复,逐步修正模型,减少反演拟合误差,降低反演解释的多解性。

3.3 定性分析

异常定性对物探解释推断来讲是头等大事^[27]。4条试验剖面均垂直于NE主构造方向平行布置,它们所覆盖的地层构造单元基本相同,地下电性分布特征也体现出很好的相似性,本文以42#线为例作定性分析阐述。

由图2可见,中部C-T构造岩片地段广域视电阻率降低,等频率广域视电阻率曲线(见图2(c))呈现两个层级的“V”型结构,体现出区内硅钙面(包

表 1 研究区主要岩(矿)石物性参数统计表
Table 1 Physical parameters of several main rocks and ores

Stratigraphic unit	Main lithology	Magnetic susceptibility/ ($4\pi\times 10^{-6}\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)			Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)			Resistivity/($\Omega\cdot\text{m}$)			Polarizability/%		
		Arithmetical mean	Common range	Characteristic	Arithmetical mean	Common range	Characteristic	Geometrical mean	Common range	Characteristic	Arithmetical mean	Common range	Characteristic
T_3a	Siltstone	10.6	1.1–18.3	Non	2.55	2.33–2.61	Low	863.2	424.8–1435.4	Low	1.1	0.1–3.2	Low
P_3c	Limestone	3.7	0.2–6.4	Non	2.68	2.66–2.72	Mid	3926.9	1293.4–7182.7	High	2.0	0.6–4.8	Low
P_3l	Quartz sandstone	12.4	5.3–18.9	Non	2.53	2.32–2.63	Low	734.5	381.2–1254.3	Low	0.9	0.1–2.7	Low
P_2m	Limestone	5.3	2.7–13.6	Non	2.70	2.57–3.03	Mid	4317.7	1847.2–8329.4	High	2.2	0.3–5.1	Low
P_2q^3	Limestone	4.5	0.5–7.4	Non	2.73	2.58–2.91	Mid	3623.9	1738.9–8217.5	High	1.7	0.1–2.6	Low
P_2q^2	Carbon limestone	5.1	0.1–74.0	Non	2.76	2.53–3.09	Mid	492.6	208.7–1247.1	Low	3.5	2.4–4.9	Mid-high
P_2q^1	Limestone	4.8	1.8–8.3	Non	2.71	2.65–2.77	Mid	3865.2	1540.8–8014.6	High	1.9	0.6–3.1	Low
C_2c C_2h	Limestone, dolomite	1.1	0.2–33.3	Non	2.73	2.48–3.05	Mid	4759.1	2013.2–7928.5	High	2.1	0.9–3.8	Low
$Pt_3^{la}W$	Phyllite	29.3	16.2–36.2	Weak	2.73	2.65–2.82	Mid	3543.7	1791.3–7010.3	High	2.9	1.5–5.6	Mid-low
	Skarn	582.1	11.5–9698.4	High	3.36	2.84–4.18	High	546.2	319.8–932.9	Low	3.5	1.5–8.2	High
	Marble	0.4	0.1–4.67	Non	2.86	2.72–3.41	High	4827.1	3335.0–6986.7	High	1.4	1.2–1.6	Low
	Granite	2.3	0.3–7.2	Non	2.60	2.51–2.92	Low	2688.1	1401.2–5157.1	Mid	2.3	1.5–3.5	Low

表2 测量基本信息表

Table 2 Basis information of survey

Survey line No.	Azimuth angle/(°)	Length/km	Offset/km	Line spacing/m	Station distance/m	Frequency range/Hz
54 [#]	136	3.4	≈16.5	300	40	0.0117–8192 (61 frequencies)
42 [#]		3.7				
30 [#]		3.7				
18 [#]		6.0				

含 C/Pt 界面、F2 推(滑)覆构造)在纵深上的上下两个成矿台阶特征,下成矿台阶是厚大矽卡岩型钨矿体的储存场所。曲线类型(见图 2(b))总体以“HKH”型为主,在横向上有较大波动,这与 C-T 构造岩片的复杂岩性和构造相一致。

两侧 $Pt_3^{1a}W$ 浅变质岩基底广域视电阻率升高,等频率广域视电阻率曲线总体平缓;曲线类型单一,横向连续性、继承性较好,基本以“H”型为主,曲线前支一般较短,推测为浅部风化、含水等引起,构成区内高背景场。印证了两侧浅变质岩基底“岩性单一”的结论。

由等频率视电阻率(ρ_s)曲线可见(见图 2(c)),推(滑)覆构造 F1、F2 恰好处在“V”型结构的两侧。其中, F1 附近的广域视电阻率梯度变化普遍较陡,指示 F1 产状更陡; F2 附近的广域视电阻率呈宽缓的台阶式渐变,指示其产状在深部存在陡、缓变化, F2 平缓处(即第二台阶)是本区重要的储矿部位,其两侧矿化蚀变发育。靠近 F1、F2 断裂构造的两侧基底局部地段的等频率视电阻率曲线存在扭曲和波动,指示两侧浅变质岩基底次级构造发育,岩体沿此侵位的可能性大。

井旁电测深往往可以得到更具代表性的“统计”资料^[27],图 3 和 4 所示分别为 42[#]线 ZK4210、ZK4212 井旁广域电磁测深曲线。对比地层柱状图,不断调整反演参数,标定各电性层层位,得到的广域电磁法一维反演资料反映出良好的“分层”能力: P_2q^2 炭质地层和富钨矿化体往往对应“HKH”型曲线的低阻层, P_2m 、 C_2c 、 C_2h 碳酸盐岩地层和矽卡岩等一般对应中阻层,底部 $Pt_3^{1a}W$ 浅变质岩基底引起深部高阻背景。

使用标定后的反演参数进行全区带场源的一维连续介质反演,以此初始模型经 2.5D 连续介质反演得到剖面电性结构(见图 5(a)),结合前述各岩组

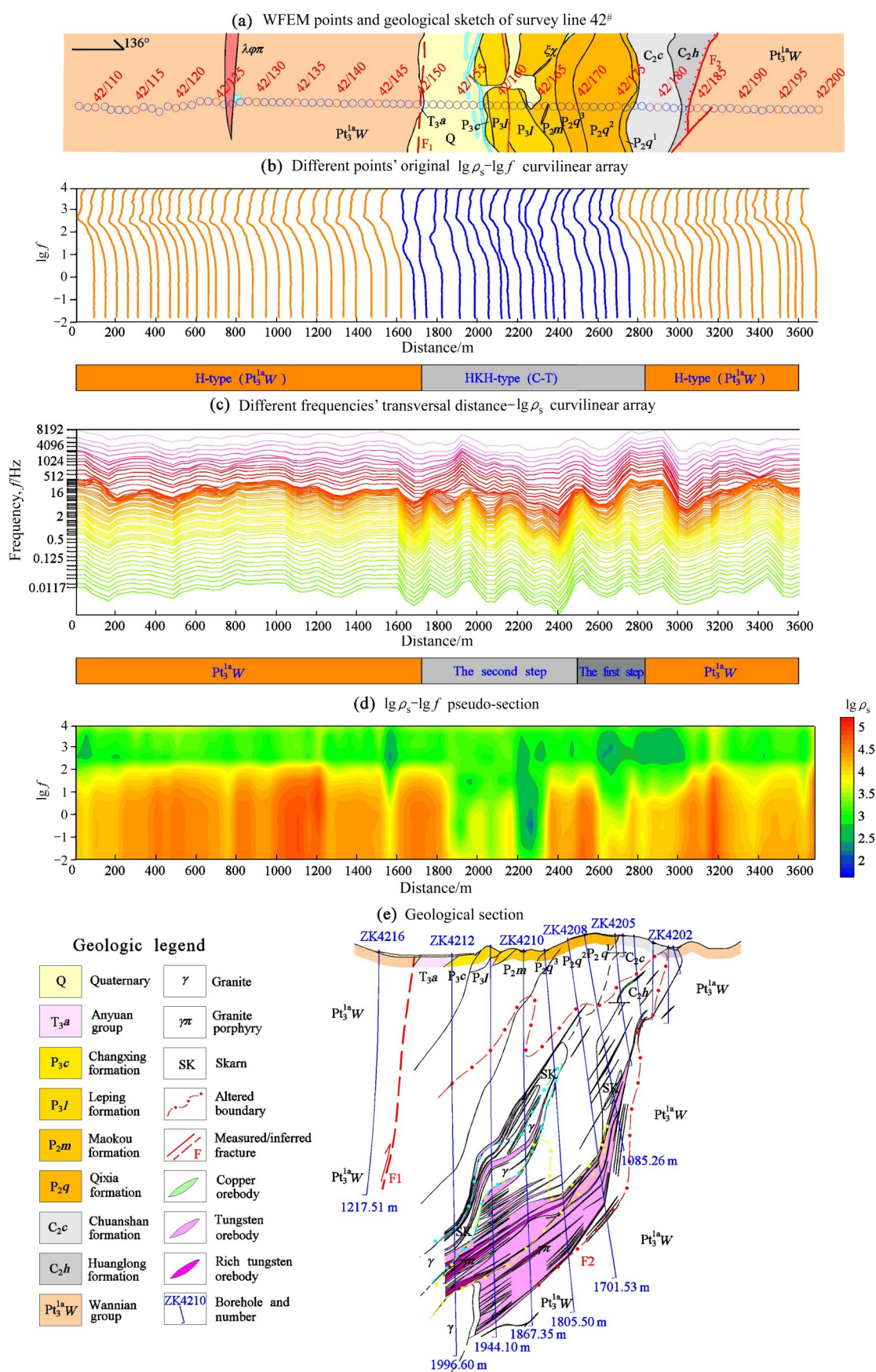
物性特征及井旁电测深资料,区内可划分出 4 个主要电性层: 1) P_2q^1 、 P_2q^3 、 P_2m 和 P_2c 为中阻层; 2) P_2q^2 炭质灰岩层和沿 P_2/C_2 界面侵入的岩脉为本区重要的低阻标志层,其可与推测的 F2 断裂构造大致圈定本区主要赋矿层位 C_2c 和 C_2h 空间; 3) C_2c 和 C_2h 矽卡岩化蚀变带表现为中阻层; 4) $Pt_3^{1a}W$ 为高阻背景,在中浅部扭曲变化大,往深部电阻率增大。

3.4 电性信息提取

物探的终极成果(无论定性方面的,还是定量方面的)都隐含在数据、曲线、图像的背后,因此物探成果中的大部分信息需要挖掘^[27]。

一方面,在广域电磁反演结果(见图 5(a))的基础上,采用高斯低通滤波方法提取背景场(见图 5(c)和图 6(a)),计算反演结果与背景场的残差,得到局部场(见图 5(d))。背景场反映总体构造格架,局部场则重点突出 C-T 构造岩片的不同岩组及次级构造。以 42[#]线为例,通过背景场及局部场分离,背景场展现了中部 C-T 构造岩片与两侧浅变质岩基底的横向分块特征,它们之间由推(滑)覆构造 F1、F2 分隔开来,北西侧 $Pt_3^{1a}W$ 老地层推覆于 C-T 构造岩片之上。局部场则显示 C-T 构造岩片区域可进一步划分“T- P_2q^3 ”中阻层、“ P_2q^2 炭质地层和沿 P_2/C_2 界面侵入的岩脉”低阻标志层、“ C_2 碳酸盐岩及矽卡岩”中阻层三个电性层,钨矿(化)体则夹持于板状低阻标志层与推(滑)覆构造 F2 之间, C_2c 和 C_2h 为主要赋矿层位。

另一方面,采用导数、梯度模等边界增强与检测方法,结合前人矿床构造研究成果,识别、厘定断裂构造。使用 Prewitt(普鲁伊特)微分算子进行导数提取(见图 6(b)和(c))。垂向一阶导数(见图 7(a))和垂向二阶导数(见图 7(c))主要反映纵向分层特征,

图 2 42[#]线广域视电阻率定性分析综合断面图Fig. 2 Wide field apparent resistivity qualitative analysis section of survey line 42[#]

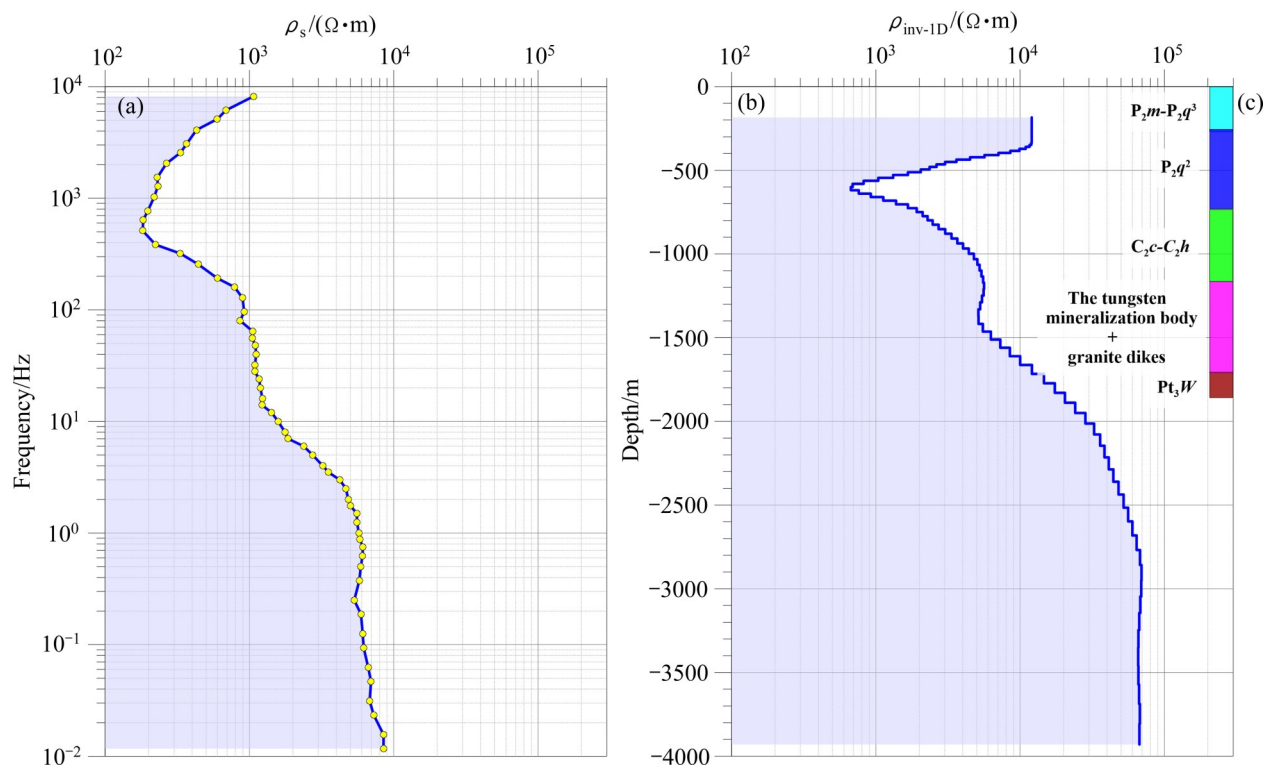


图3 42[#]线ZK4210井旁2240号点广域视电阻率曲线及其一维反演曲线

Fig. 3 Wide field apparent resistivity curve and its 1D inversion result of station 2240 nearby ZK4210 of survey line 42[#]:

(a) Wide field apparent resistivity curve; (b) 1D inversion result; (c) Simple borehole diagram

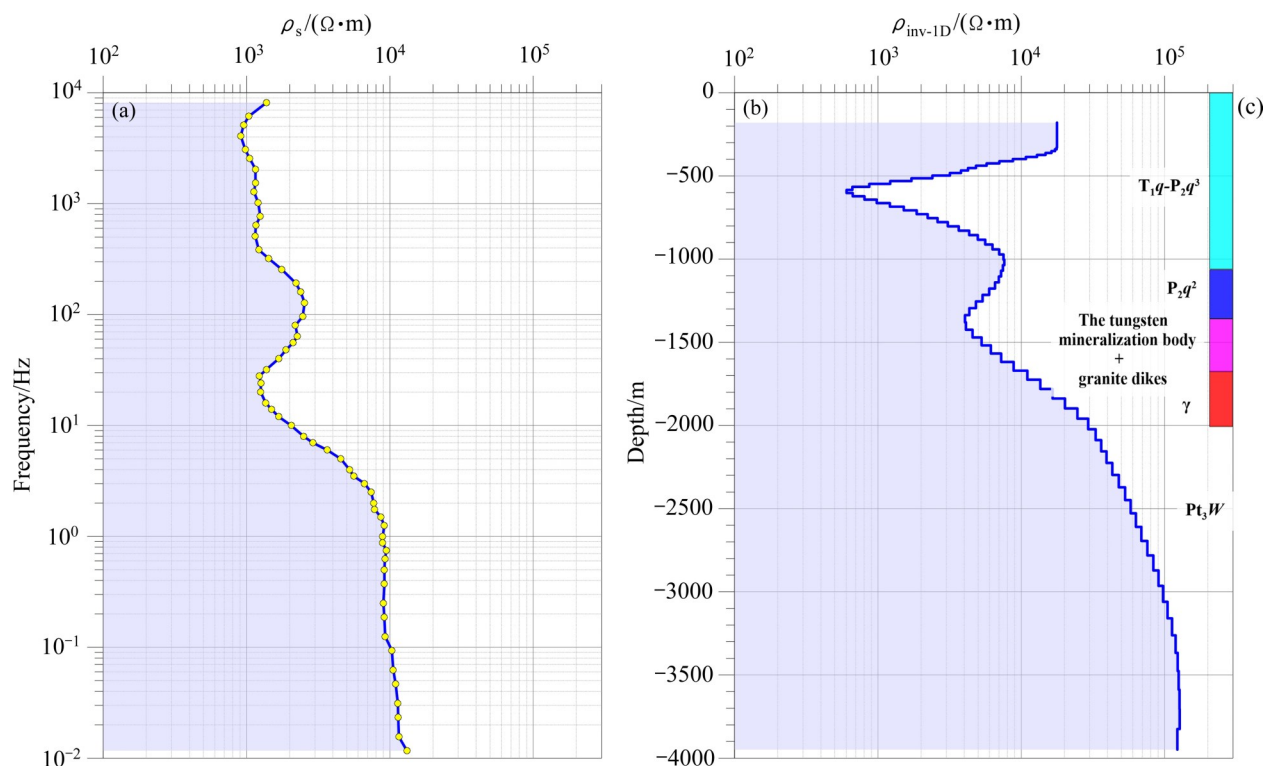


图4 42[#]线ZK4212井旁1840号点广域视电阻率曲线及其一维反演曲线

Fig. 4 Wide field apparent resistivity curve and its 1D inversion result of station 1840 nearby ZK4212 of survey line 42[#]:

(a) Wide field apparent resistivity curve; (b) 1D inversion result; (c) Simple borehole diagram

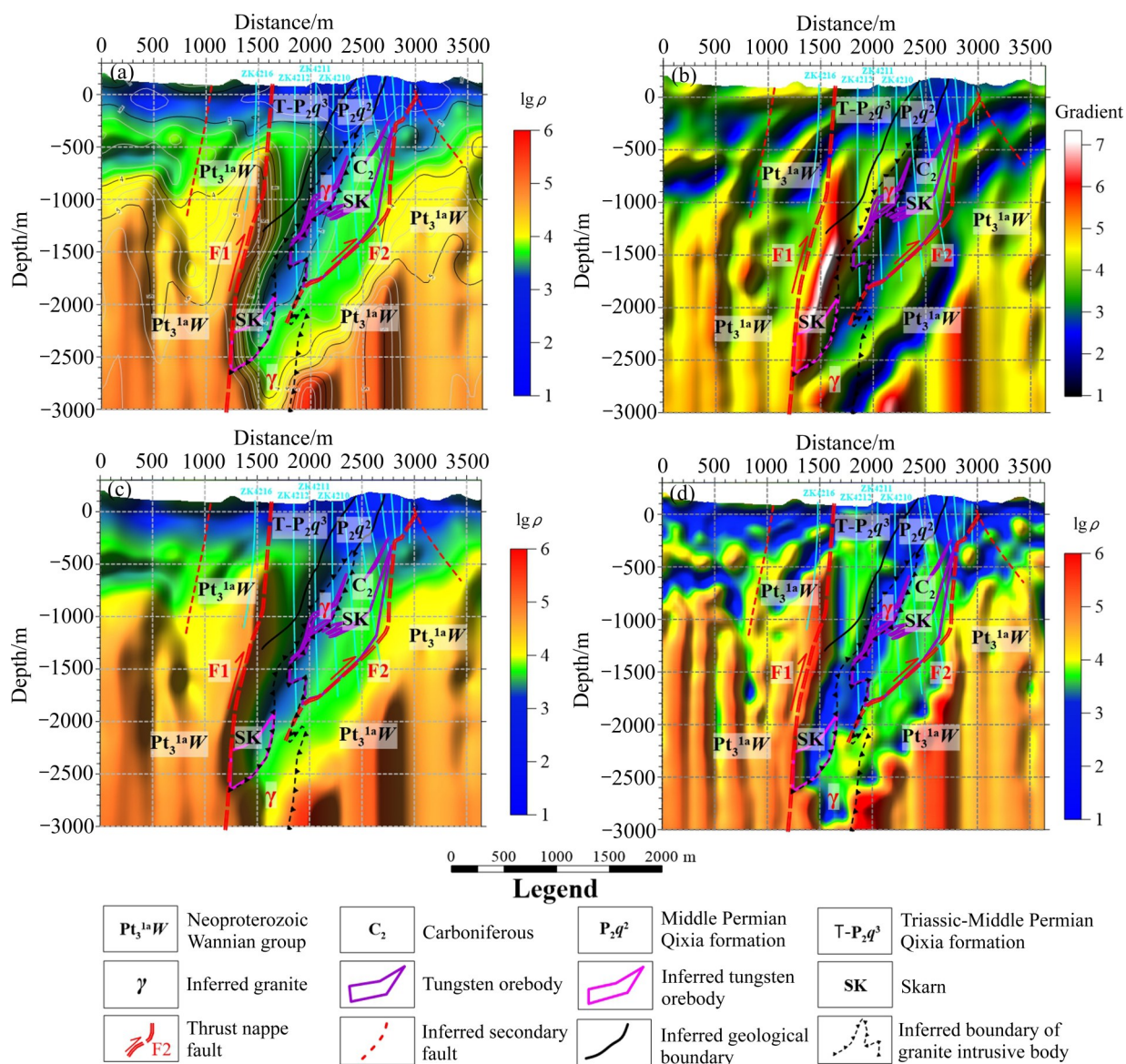


图5 42#线广域电磁反演断面背景场及局部场分离、梯度模提取

Fig. 5 Background and local resistivity and resistivity gradient of survey line 42#: (a) WFEM inversion section; (b) Inverse resistivity gradient section; (c) Background resistivity; (d) Local resistivity

水平一阶导数(见图7(b))和水平二阶导数(见图7(d))则反映横向分界特征。同时,基于反演结果的垂向二阶导数,求取其解析信号振幅(总梯度模量),利用极大值位置进行了断裂构造的边缘识别(见图5(b))。可见,各边缘识别方法能很好地互补、互证,二阶方法相比一阶方法细节更丰富、界面更明显,尤以梯度模对构造线和各岩组分层的表现更直观、清晰。42#线广域电磁断面梯度模线性异常较好地刻画了控矿断裂、推覆、滑覆等构造的边界和位置。其中,F1产状极陡,局部反转(已有钻孔验证),F2产状上陡下缓,于深部同F1有交会的趋

势。两侧浅变质岩基底存在一系列具一定角度排列的低幅值线性异常、线性异常错断等特征,推测为区内次级构造。

3.5 精细剖面地质-地球物理综合解释

多方法多参数综合分析是减少异常解释的多解性的有效方法^[27]。以42#线为例,布格重力异常(见图8(b))表现为中部低、往两侧逐渐抬升特征,这是低密度的花岗岩与C-P碳酸盐岩产生的低重力异常叠加在高密度的Pt₃^{1a}W浅变质岩与矽卡岩高重力背景上的结果。重力低中存在的局部重力高,可作为

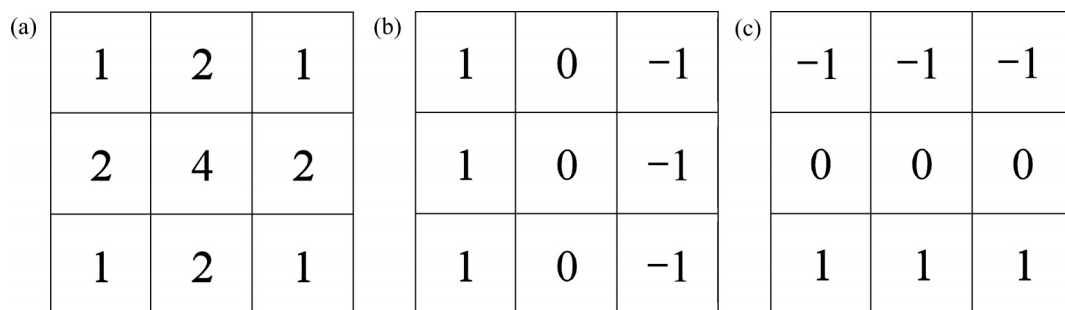


图6 背景场及导数提取算子

Fig. 6 Operators of background resistivity and derivative calculation: (a) Convolution factor of Gaussian lowpass filter; (b) Convolution factor of horizontal Prewitt filter; (c) Convolution factor of vertical Prewitt filter

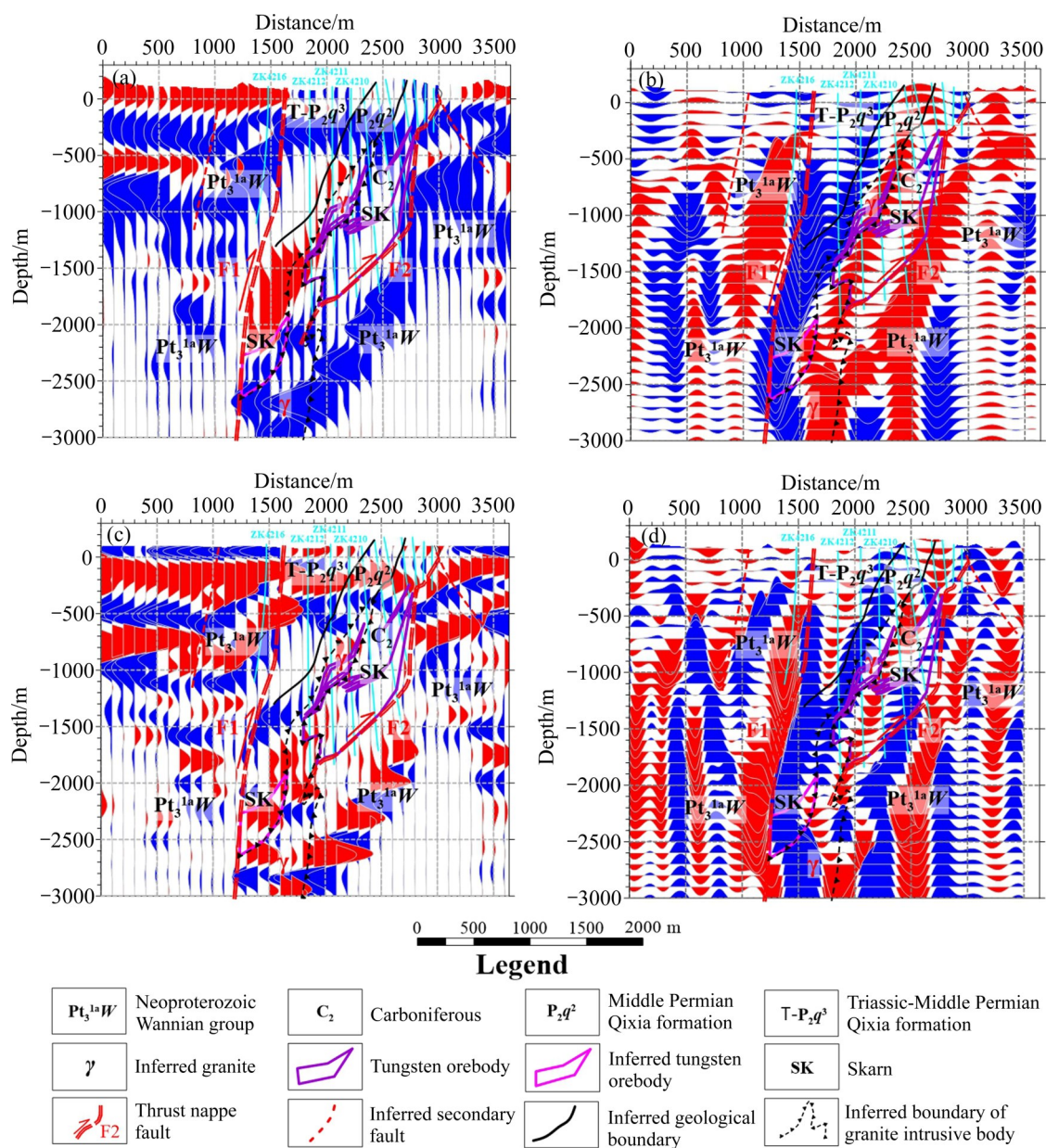
图7 42[#]线广域电磁反演断面导数提取

Fig. 7 Derivative calculation of survey line 42[#]: (a) Vertical first derivative of ρ ; (b) Horizontal first derivative of ρ ; (c) Vertical second derivative of ρ ; (d) Horizontal second derivative of ρ

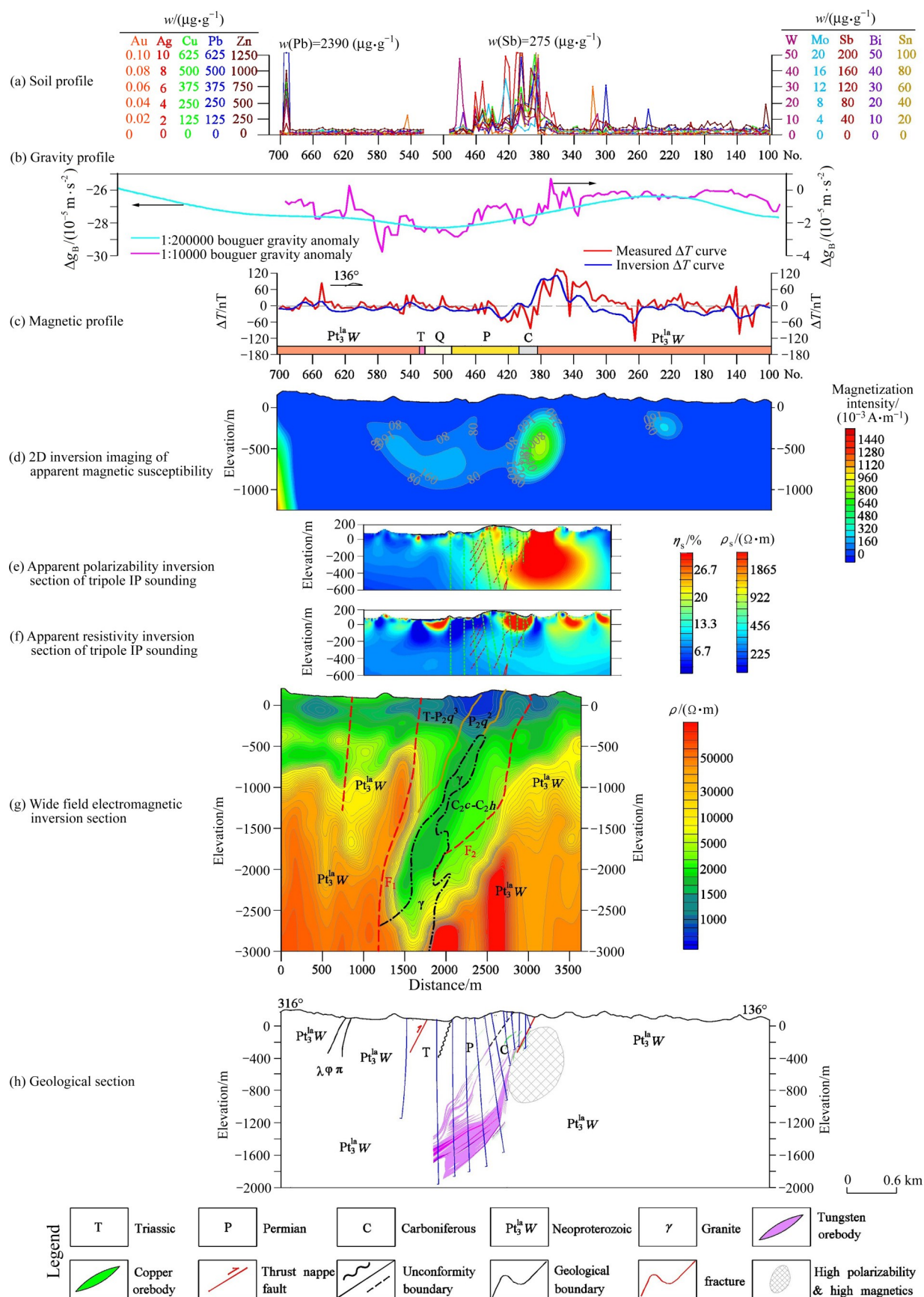


图 8 42#线二维地质-地球物理断面

Fig. 8 Geologic and geophysical section of survey line 42[#]

寻找矽卡岩型钨铜矿的重力异常标志^[22]。磁异常(ΔT)剖面(见图8(c))总体呈现低缓的正、负磁异常伴生分布, ΔT 梯级带位于浅变质岩与碳酸盐岩接触带附近, 受NE向构造F2控制。二维视磁化率成像反演结果显示(见图8(d)), 推(滑)覆构造F2附近存在一椭圆形磁性源, 与激电高值异常吻合(见图8(e), η_s 为视极化率)。分析广域电磁法反演断面(见图8(g)), C-T构造岩片与 $Pt_3^{1a}W$ 浅变质岩基底的电性梯度界面是推(滑)覆构造的重要标示。NW侧的F1为压扭性逆冲推覆构造, 其附近的电性横向变化快速, 纵向分布较陡, 反映其产状极陡, 热液蚀变活动相对较弱。SE侧的F2为逆冲推覆后沿构造薄弱面产生滑脱的产物, 是本区主要导热、控矿构造。相比F1, 其电性横向宽缓渐变, 纵向呈“阶梯式”形态向NW倾伏, 较缓的“阶梯平台”则是重要的赋矿部位。

成矿热液沿主要的导热、控矿构造F2向上运移, 上部 P_2q 地层和下部 $Pt_3^{1a}W$ 基底分别起遮挡和屏蔽作用, 于缓凹处“圈闭”形成厚大矽卡岩型钨矿(化)体, 在浅表形成细脉状、网脉状裂隙充填型铜矿(化)体。随着岩体沿F2“通道”上侵, 岩浆活动形成的蚀变产物如矽卡岩、角岩、磁黄铁矿、黄铁矿等主要分布于F2附近, 它们具有较强磁性和导电性, 从而引起局部磁异常、激电异常和化探异常(见图8(a))。

值得注意的是, 随着深度的增加, F1和F2表现出逐渐交会的趋势, 这也制约了C-T构造岩片的空间规模, 导致主要赋矿层位 C_2c 和 C_2h 的展布空间被压缩。

隐伏岩体一直是本区深部找矿关注的关键地质问题。区内与成矿密切的隐伏岩株、岩脉往往具有埋深大、尺度小、形态复杂、与围岩电阻率差异小等特点, 单独依据电磁法资料识别和定位难度较大。由图9可见, 4条广域电磁法反演断面中C-T构造岩片深度范围均存在不同程度的扭曲状相对低阻异常, 在深部造成横向间断, 其上部对应局部低重力异常和低缓正负伴生磁异常。目前, 已有多处钻孔遇黑云母花岗岩, 岩体侵位分布在深度1600~2200 m范围。颜廷杰^[23]曾利用2.5D重磁反演技术构建了朱溪深部隐伏岩体。由于岩体与围岩具一定

密度、磁性、电性差异, 重、磁、电多参数组合得以互补、互证, 推测该“扭曲状相对低阻异常+局部低重力异常+低缓正负伴生磁异常”表征隐伏岩体之侵位。

综上所述, 重、磁、电阻率横向梯度界面主要反映断裂构造界线, 高磁、高极化异常指示岩浆热液运移通道, 低重力异常、低缓正负伴生磁异常叠加广域电磁深部扭曲状相对低阻异常可提取隐伏岩体侵位信息, 广域电磁法反演断面中部的板状低阻标志层与F2夹持范围可大致圈定主要赋矿层位 C_2c 和 C_2h 的展布空间。

4 分析与讨论

1) 朱溪钨铜矿具有逆冲推覆深断裂带控岩-控矿、碳酸盐岩构造岩片赋矿、燕山晚期隐伏岩体成矿的特征^[5, 14]。以广域电磁法成果为主, 结合地质资料, 构建的三维地质找矿模型(见图9)反映了相关成矿地质体的空间形态及位置关系, 对今后找矿方向提出以下两点认识: ①区内由SE往NW方向钨铜矿体倾角逐渐变缓、厚度增大、个数增多, 矿化蚀变总体增强, 岩株、岩脉穿插更频繁^[15], 隐伏岩株NW侧、沿倾向深部具有矽卡岩型钨铜多金属矿增储潜力; ②走向自SW向NE、垂向上由下向上成矿元素依次呈现出 $W \rightarrow W-Cu-(Fe) \rightarrow Cu-W \rightarrow Cu-Zn \rightarrow Zn-(Pb-Ag)$ (由高温到低温)变化趋势^[5, 15], 岩体侵位亦有逐步升高之势, 即朱溪矿区SW侧外围成矿岩体埋深更大, 应作为下一步深部找矿方向。以上认识是基于现有地质-地球物理资料推断得出的。然而, 对任何未知事物的推断, 在被证实之前都是多解的^[28], 今后还需加大广域电磁数据处理与解释技术研究力度。例如广域视电阻率的各向异性反演^[31]; 三维反演^[32]; 广域电磁数据与重力、磁法等方法获得的数据进行联合反演^[33]等可作为进一步研究方向。

2) 钦杭结合带萍(乡)乐(平)坳陷带长期以煤、非金属矿产较为重要, 内生金属矿床规模相对较小^[1, 14, 34]。下成矿台阶朱溪巨大钨铜矿床的发现, 打开了坳陷带“深地”找矿的一扇窗户^[14]。萍乐坳陷西部的萍乡-丰城地区就有志木山、五宝山、七

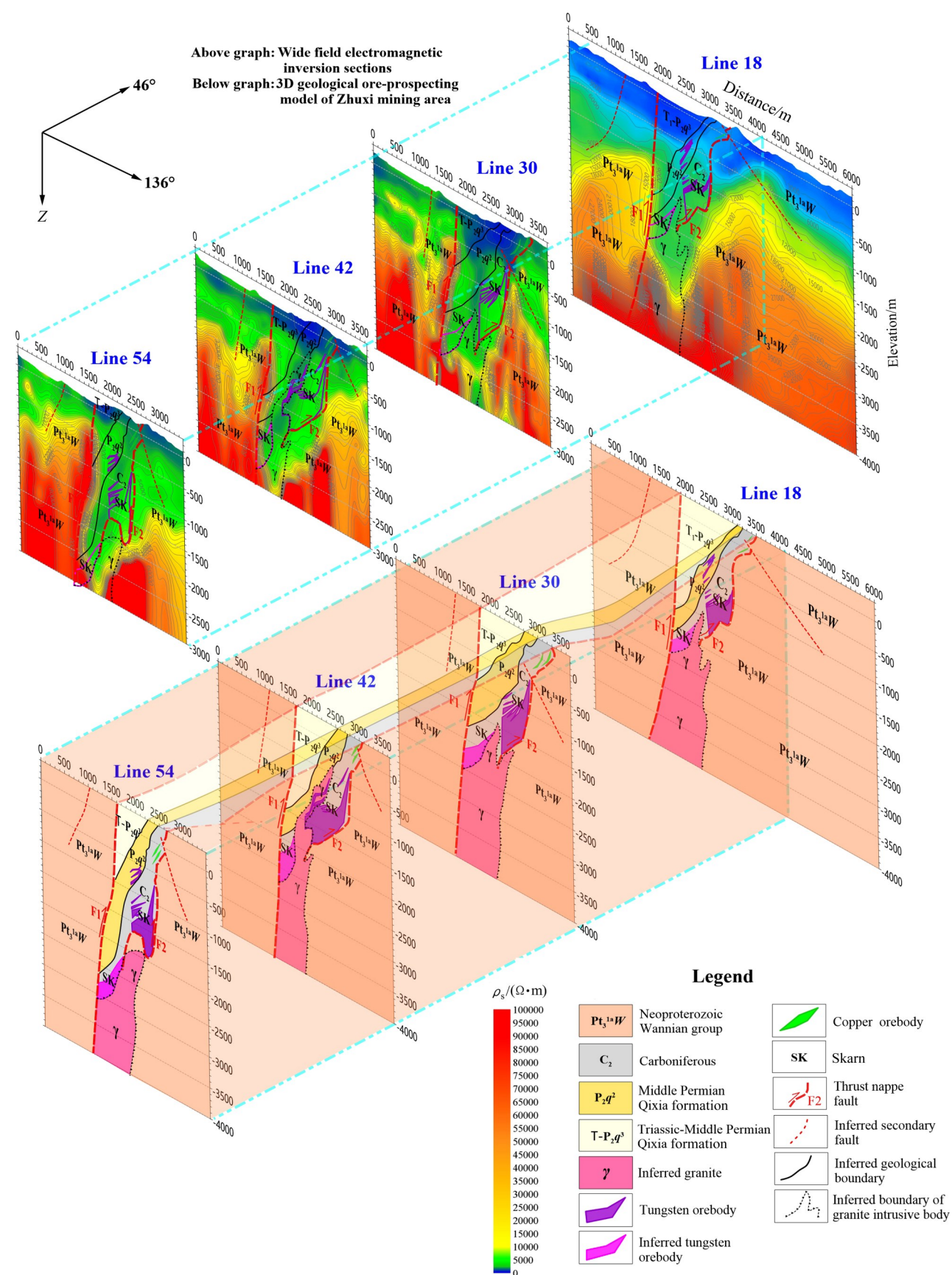


图9 广域电磁法反演断面拟三维展示及三维地质找矿模型

Fig. 9 Wide field electromagnetic inversion sections and 3D geological ore-prospecting model of Zhuxi mining area

宝山、铁岗山4个被错断的“无根”矿床^[35],东部塔前-赋春地区的塔前、月形、横路、弹岭等也已发现上成矿台阶^[14]。第二台阶(或下成矿台阶)是区内近一个时期金属矿床找矿的重要目标空间^[14, 35]。广域电磁法在朱溪钨铜矿的深部探测试验结果表明:其对C-T构造岩片、逆冲推覆深断裂、主要赋矿层位有良好的空间定位能力(见图5~9),是金属矿产“探深寻根”^[35]的有效方法技术。萍乐坳陷带第二台阶隐伏矿床具有覆盖厚、埋藏深、规模大、保存好的特点,利于广域电磁法发挥其技术优势和特点。

5 结论

1) 朱溪钨铜矿是目前世界第一大矽卡岩型钨铜多金属矿床。通过广域电磁法探测试验,获取了高质量的广域电磁测深数据,经精细处理解释得到可靠的深部电性结构。综合前人研究成果,采用骨干剖面42#线的二维地质-地球物理断面及区内广域电磁法反演断面拟三维图展示研究区构造格架,刻画推(滑)覆构造、石炭系赋矿层位、隐伏岩体等控矿地质体的空间形态、位置及相互关系,为朱溪矿区深部500~3000 m“第二找矿空间”的成矿规律研究、下一步找矿方向等提供了有力依据。

2) 本次试验利用物性资料和井旁视电阻率测深曲线建立目标地质体电性、密度、磁性与岩性之间的联系。立足可靠的原始数据,进行定性分析、反演解释,进而采用导数、梯度模等边界增强与识别方法提取电性信息。最终利用重、磁、电多参数组合互补、互证,进行综合地质-地球物理解释,并以拟三维形式进行立体刻画,构建三维地质找矿模型。朱溪广域电磁资料的“精细做法”,是取得矿区尺度深部探测良好效果的有力支撑,可推广应用于萍乐坳陷带半隐伏或隐伏金属矿产深部找矿。

致谢:

文章写作过程中得到了何继善院士、周雷高级工程师、王先广教授级高级工程师的指导和支持。江西省地质局科技教育处、江西省矿产资源保障服务中心、江西省地质局第十地质大队给本文提供了

宝贵的基础地质、物化探等资料。湖南继善高科技有限公司、中南大学在广域电磁法新技术、新装备的应用研究方面给予了大力支持。在此一并致以诚挚的谢意!

REFERENCES

- [1] 杨明桂, 梅勇文. 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, 1997, 13(3): 52-59.
YANG Ming-gui, MEI Yong-wen. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1997, 13(3): 52-59.
- [2] 韦星林. 我国近年钨矿勘查新发现及其启示[J]. 中国钨业, 2016, 31(3): 1-7.
WEI Xing-lin. New discoveries of tungsten ore prospecting in China[J]. *China Tungsten Industry*, 2016, 31(3): 1-7.
- [3] 吴筱萍, 欧阳永棚, 周耀湘, 等. 景德镇朱溪钨铜多金属矿床岩浆岩地球化学特征及其对成矿的约束[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1885-1896.
WU Xiao-ping, OUYANG Yong-peng, ZHOU Yao-xiang, et al. Geochemical characteristics of magmatite and their constraints on mineralization of the Zhuxi tungsten-copper polymetallic deposit in Jingdezhen, Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1885-1896.
- [4] 王先广, 胡正华, 陈国华, 等. 朱溪式“脉面层体”就矿找矿法在深部矿产勘查的实践及其意义[J]. 中国钨业, 2020, 35(5): 1-9.
WANG Xian-guang, HU Zheng-hua, CHEN Guo-hua, et al. Application of Zhuxi-style “vein-lay-contact ore-body” prospecting method near existing deposit to deep mineral exploration[J]. *China Tungsten Industry*, 2020, 35(5): 1-9.
- [5] 王先广. 江西省地质勘查基金找矿重大突破与科技创新[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2020.
WANG Xian-guang. The prospecting obvious breakthrough and technological innovation of Jiangxi Geological Exploration Fund[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2020.
- [6] 陈国华. 江西景德镇朱溪钨铜多金属矿床地质特征与控矿条件研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
CHEN Guo-hua. The ore-controlling conditions and geological features of the W-Cu polymetallic ore deposit in the Zhuxi area of Jingdezhen, Jiangxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [7] 陈国华, 舒良树, 舒立旻, 等. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿

- 床的地质特征与成矿背景[J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(12): 1799-1818, 1-6.
- CHEN Guo-hua, SHU Liang-shu, SHU Li-yu, et al. Geological characteristics and mineralization setting of the Zhuxi tungsten(copper) polymetallic deposit in the eastern Jiangnan Orogen[J]. Scientia Sinia (Terrae), 2015, 45(12): 1799-1818, 1-6.
- [8] 陈国华, 万浩章, 舒良树, 等. 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, 2012, 28(12): 3901-3914.
- CHEN Guo-hua, WAN Hao-zhang, SHU Liang-shu, et al. An analysis on ore-controlling conditions and geological features of the Cu-W polymetallic ore deposit in the Zhuxi area of Jingdezhen, Jiangxi province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3901-3914.
- [9] 欧阳永棚, 陈国华, 饶建锋, 等. 景德镇朱溪铜钨多金属矿床地质特征及成矿机制[J]. 地质学刊, 2014, 38(3): 359-364.
- OUYANG Yong-peng, CHEN Guo-hua, RAO Jian-feng, et al. On geological features and metallogenic mechanism of Zhuxi Cu-W polymetallic deposit in Jingdezhen of Jiangxi[J]. Journal of Geology, 2014, 38(3): 359-364.
- [10] 贺晓龙, 张达, 陈国华, 等. 江西朱溪铜钨矿床成因:来自矿物学和年代学的启示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(4): 1050-1070.
- HE Xiao-long, ZHANG Da, CHEN Guo-hua, et al. Genesis of Zhuxi copper- tungsten deposit in Jiangxi Province: Insights from mineralogy and chronology[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(4): 1050-1070.
- [11] 李岩, 潘小菲, 赵苗, 等. 景德镇朱溪钨(铜)矿床花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其与成矿关系探讨[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 693-708.
- LI Yan, PAN Xiao-fei, ZHAO Miao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemical features and relations to the W-Cu mineralization of granitic porphyry in Zhuxi skarn deposit, Jingdezhen, Jiangxi[J]. Geological Review, 2014, 60(3): 693-708.
- [12] 刘善宝, 王成辉, 刘战庆, 等. 赣东北塔前-赋春成矿带岩浆岩时代限定与序列划分及其意义[J]. 岩矿测试, 2014, 33(4): 598-611.
- LIU Shan-bao, WANG Cheng-hui, LIU Zhan-qing, et al. Northeast Jiangxi Taqian-Fuchun metallogenic belt magmatite time limit and sequence division and its significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(4): 598-611.
- [13] 万浩章, 刘战庆, 刘善宝, 等. 赣东北朱溪铜钨矿区花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 岩矿测试, 2015, 34(4): 494-502.
- WAN Hao-zhang, LIU Zhan-qing, LIU Shan-bao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granodioritic porphyry located Zhuxi copper-tungsten mine in northeast Jiangxi and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(4): 494-502.
- [14] 欧阳永棚, 饶建锋, 廖绍平, 等. 赣东北朱溪矿集区构造控岩-控矿特征[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 878-893.
- OUYANG Yong-peng, RAO Jian-feng, LIAO Shao-ping, et al. Rock- and ore-controlling structure in the Zhuxi ore concentration area in the northeastern Jiangxi Province[J]. Geology in China, 2019, 46(4): 878-893.
- [15] 欧阳永棚, 饶建锋, 尧在雨, 等. 朱溪式矽卡岩型矿床成矿作用及找矿方向[J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 148-158.
- OUYANG Yong-peng, RAO Jian-feng, YAO Zai-yu, et al. Mineralization and prospecting direction of the "Zhuxi type" skarn deposit[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 148-158.
- [16] 夏中智, 王先广. 江西朱溪超大型钨铜矿床拆离与推覆造山动热成岩成矿机制[J]. 地质学刊, 2016, 40(4): 552-559.
- XIA Zhong-zhi, WANG Xian-guang. Metallogenic and diagenic mechanism of the detachment and nappe orogenesis at the Zhuxi super-large tungsten-copper deposit in Jiangxi Province[J]. Journal of Geology, 2016, 40(4): 552-559.
- [17] 胡正华. 赣东北朱溪钨多金属矿床形成条件与成矿规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- HU Zheng-hua. The formation conditions and metallogenic regularity of Zhuxi tungsten polymetallic deposit in northeast of Jiangxi Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [18] 刘建光, 杨小鹏, 周耀湘, 等. 江西省浮梁县朱溪钨铜矿床花岗岩成因及其与成矿的关系[J]. 资源调查与环境, 2015, 36(4): 276-284.
- LIU Jian-guang, YANG Xiao-peng, ZHOU Yao-xiang, et al. Genesis of granites and relationship of mineralization in Zhuxi tungsten-copper deposit, Fuliang County, Jiangxi Province[J]. Resources Survey and Environment, 2015, 36(4): 276-284.
- [19] 谢涛, 冯毅, 罗淦川, 等. 江西景德镇朱溪钨铜矿床控矿构造特征研究[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 79-80.
- XIE Tao, FENG Yi, LUO Lu-chuan, et al. Study on ore-controlling characteristics of Zhuxi W-Cu deposit in Jingdezhen, Jiangxi Province[J]. Acta Mineralogica Sinica,

- 2015, 35(S1): 79–80.
- [20] 何细荣, 陈国华, 刘建光, 等. 江西景德镇朱溪地区铜钨多金属矿找矿方向[J]. 中国钨业, 2011, 26(1): 9–14.
- HE Xi-rong, CHEN Guo-hua, LIU Jian-guang, et al. On the copper-tungsten prospecting orientation in Zhuxi region[J]. China Tungsten Industry, 2011, 26(1): 9–14.
- [21] 张 爽, 张 楠, 吴贺宇, 等. 低飞航磁技术在江西朱溪矿区中的应用[J]. 世界地质, 2018, 37(2): 595–601.
- ZHANG Shuang, ZHANG Nan, WU He-yu, et al. Application of low-altitude aeromagnetic technology in Zhuxi mining area of Jiangxi[J]. Global Geology, 2018, 37(2): 595–601.
- [22] 郭 信, 兰学毅, 严加永, 等. 大比例尺重力调查与成矿预测: 以江西朱溪钨矿外围为例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 985–1004.
- GUO Xin, LAN Xue-yi, YAN Jia-yong, et al. Large-scale gravity survey and metallogenic prediction: An example of the Zhuxi tungsten deposit in Jiangxi Province[J]. Geology And Exploration, 2020, 56(5): 985–1004.
- [23] 颜廷杰. 江西朱溪钨铜多金属矿深部找矿地球物理方法综合研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- YAN Ting-jie. Comprehensive study of geophysical methods to the deep prospecting of tungsten-copper polymetallic ore in Zhuxi area of Jiangxi[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [24] 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 Ji-shan. Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [25] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809–1816.
- HE Ji-shan. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809–1816.
- [26] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1065–1072.
- HE Ji-shan. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41(3): 1065–1072.
- [27] 刘士毅. 物探技术的第三根支柱[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- LIU Shi-yi. The third backbone of geophysical technique[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [28] 刘士毅, 田黔宁, 赵金水, 等. 解决物探异常解释多解性的一次尝试[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 691–696.
- LIU Shi-yi, TIAN Qian-ning, ZHAO Jin-shui, et al. An attempt to reduce ambiguity in geophysical interpretation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 691–696.
- [29] 陆柏树. E - Ex 广域电磁法静态校正方法探讨[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 137–141.
- LU Bai-shu. Discussion of static correction methods for $E - E_x$ wide field electromagnetic method[J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 137–141.
- [30] 戴世坤, 王顺国, 张钱江, 等. 频率域可控源电磁法 2.5D 正反演[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2513–2523.
- DAI Shi Kun, WANG Shun Guo, ZHANG Qian Jiang, et al. 2.5D forward and inversion of CSEM in frequency domain[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2513–2523.
- [31] 刘云鹤, 殷长春, 蔡 晶, 等. 电磁勘探中各向异性研究现状和展望[J]. 地球物理学报, 2018, 61(8): 3468–3487.
- LIU Yun-he, YIN Chang-chun, CAI Jing, et al. Review on research of electrical anisotropy in electromagnetic prospecting[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(8): 3468–3487.
- [32] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629–3664.
- LÜ Qing-tian, ZHANG Xiao-pei, TANG Jing-tian, et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3629–3664.
- [33] 柳建新, 赵 然, 郭振威. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 151–160.
- LIU Jian-xin, ZHAO Ran, GUO Zhen-wei. Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 151–160.
- [34] 中国矿产地质志编委会. 中国矿产地质志·江西卷[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- Editorial Board of Mineral Geology of China. Records of China's mineral geology · Jiangxi volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [35] 杨明桂, 余忠珍, 唐维新, 等. 论“深地”找矿攻略[J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 65–74.
- YANG Ming-gui, YU Zhong-zhen, TANG Wei-xin, et al. On strategy for deep prospecting[J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(4): 65–74.

Deep exploration of wide field electromagnetic method in Zhuxi W-Cu deposit

CHEN Hou-yang¹, LI Di-quan², LING Fan², WU Xi-quan¹, WEI Zhi-feng¹, ZHANG Bin³,
TIAN Hong-jun³, YOU Wen-bing³, ZOU Qi-feng¹, LIU Xian-man¹

(1. Geophysical & Geochemical Exploration Brigade of Jiangxi, Nanchang 330002, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Hunan Geosun High-Tech Co., Ltd., Changsha 410208, China)

Abstract: The Zhuxi W-Cu polymetallic deposit in Jiangxi Province, China, is a super large-scale skarn deposit, sets the new world record of tungsten mineral resources in recent years. The burial depth of the main orebodies commonly exceeds 1000 m. Because of the lack of deep exploration, until 2017, the orebodies along the dip and strike direction were not closed completely, and the main rock-control and ore-control structures were not known. The deep exploration was urgently needed. The wide field electromagnetic method was applied for deep exploration. The logical relationships between the resistivity, density, magnetic and lithology of the target geologic body have been established, based on the characteristics of the property data and the sounding resistivity near by the drill. The authors then made a comprehensive study by multiparameter mutual constraint with fine processing and interpretation of gravity, magnetic and electric, compared with known geologic data, drew the 2D geological-geophysical section of the backbone profile. And the 3D geological ore-prospecting model has been set up by wide field electromagnetic inversion sections. The results show that those works clearly reveal the distributed shape of the main rock-control and ore-control structures and the main ore-bearing stratum. The magma hydrothermal alteration which relates to concealed Yanshanian intrusive rocks in deep is acquired. The experimental results are references for the 500 – 3000 m deep-seated second mineralization location's metallogenic regularity and the further geological prospecting direction of Zhuxi W-Cu polymetallic deposit, and show that the wide field electromagnetic method is an effective method for deep exploration.

Key words: Zhuxi W-Cu deposit; wide field electromagnetic method; skarn; deep exploration

Foundation item: Project(GDKZ[2017]78) supported by Geological Scientific Research Project of Geology Bureau in Jiangxi Province, China

Received date: 2021-08-26; **Accepted date:** 2021-11-25

Corresponding author: LI Di-quan; Tel: +86-15802637512; E-mail: lidiquan@126.com

(编辑 李艳红)