

V8 电法工作站可控源音频大地电磁测深数据 广域化处理实现研究及应用

王君伟¹, 胡均杰², 丁正江^{1*}, 王 玉¹, 尹召凯¹, 宋林君¹, 李瑞波¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队; 2. 山东省第三地质矿产勘查院)

摘要:近年来,随着地质勘查领域对深部与隐伏矿体探索需求的日益增长,电磁法设备,尤其是从 V8 电法工作站到广域电磁测深设备的广泛应用,显著推动了攻深找盲工作的进程。基于 V8 电法工作站与广域电磁测深设备在基本原理及野外作业流程上的高度相似性,创新性地提出了将 V8 电法工作站采集的可控源音频大地电磁测深数据进行广域化处理的方法。通过对比分析 3 个实际项目的数据处理结果发现:这一处理策略能够有效模拟并达到广域电磁法设备的勘探效果,实现了在不增加额外硬件投资的前提下,提升了数据解释精度与勘探目标深度。可控源音频大地电磁测深数据的广域化处理方法,不仅是对传统电磁勘探技术的一次重要改进与创新,更是矿山勘查领域新质生产力发展的生动体现。

关键词:V8 电法工作站;广域电磁法;可控源音频大地电磁测深;新质生产力;矿产勘查;采空区勘查治理;地热勘查;卡尼亚视电阻率

中图分类号:TD11 P631.2

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)01-0024-06

doi:10.11792/hj20250105

引 言

V8 电法工作站在地质找矿、地热勘查、采空区勘查治理等工作中得到了广泛应用,常用方法有大地电磁测深(MT)、音频大地电磁测深(AMT)、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)等^[1-5]。大地电磁测深、音频大地电磁测深采用的是天然场源,天然场源的特点是信号较弱,而且是随机的,导致数据不够准确。可控源音频大地电磁测深采用人工场源,提高了信号强度,数据也更加可靠。但是,可控源音频大地电磁测深也有很多缺点:测量位置需达到远区要求,收发距离需要足够远,通常超过 10 km,这就使得采集的信号减弱;虽然采用的是音频频率,但通常 100 Hz 或者几十赫兹就开始进入近场,导致实际有用的频点较少,勘探深度大打折扣,通常反演深度低于 1 500 m。

近年来,广域电磁测深法得到了极大推广,其特点与 CSAMT 相似,采用人工场源,提高了信号强度,可利用比 CSAMT 更低的音频频率,因此有更高的勘探深度。由于广域电磁测深法采用不简化公式进行计算,而不采用卡尼亚电阻率公式,也就不考虑近场问题,因此拓展了观测范围,数据更加准确。虽然广域电磁测深法相对于 CSAMT 有很多优点,但如果

已有 V8 电法工作站^[6]或其他 CSAMT 设备,再购买一套广域电磁测深设备,则导致成本过高。

2024 年,政府工作报告首次将“大力推进现代化产业体系建设,加快发展新质生产力”列为首要任务。矿产勘查既是新质生产力的重要组成,又是推动新质生产力发展的重要力量^[7-13]。V8 电法工作站与广域电磁法设备均为当下地矿勘探较为先进的技术。使 V8 电法工作站的 CSAMT 工作达到或者接近广域电磁测深法数据水平,需对现有 CSAMT 技术改进,拓展 V8 电法工作站的应用范围,符合因地制宜发展新质生产力的要求。

1 电流源广域电磁法

根据广域电磁法理论,广域电磁法包含 7 种方式^[3],但电流源广域电磁法($E-E_x$)较为方便,也是当下广域电磁测深设备所采用的方式。电流源广域电磁法野外布设示意图见图 1。电流源广域电磁法测量的是水平电流源产生的电场水平分量 E_x ,其原理与计算方式^[4-5]如下:

$$E_x = \frac{I\rho}{2\pi r^3} f_{E-E_x}(ikr) \quad (1)$$

$$f_{E-E_x}(ikr) = 3\cos^2\phi - 2 + e^{-ikr}(1 + ikr) \quad (2)$$

收稿日期:2024-08-10; 修回日期:2024-09-25

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC011001);山东省地矿局科技攻关项目(KY202208)

作者简介:王君伟(1986—),男,工程师,从事固体地球物理工作;E-mail:271051631@qq.com

* 通信作者:丁正江(1977—),男,研究员,博士,从事地质矿产勘查与科研工作;E-mail:ytdzhj@126.com

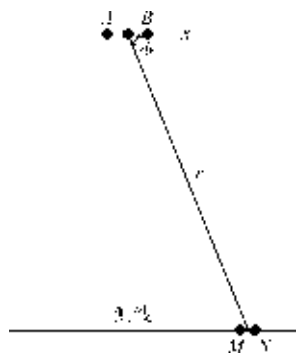


图 1 电流源广域电磁法野外布设示意图

Fig. 1 Schematic of field layout for current source wide-area electromagnetic method

式中: I 为发射端 AB 之间的电流强度(A); L 为供电 AB 极距(m); ρ 为半空间的视电阻率($\Omega \cdot m$); r 为测点到 AB 中点的距离(m); i 为复数; k 为波数, $k = \sqrt{\omega^2 \mu \varepsilon - i\omega \mu / \rho}$; ϕ 为 x 轴与径向矢量 r 的夹角($^\circ$); μ 为磁导率, 真空中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率(Hz); ε 为介电常数, 真空中 $\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

由式(1)可得 $E - E_x$ 方式广域视电阻率, 见式(3)。

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \times \frac{1}{f_{E-E_x}(ikr)} \quad (3)$$

式中: $K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{L MN}$; $\Delta V_{MN} = E_x \cdot \overline{MN}$, 为测量电压(V);

$\overline{MN}$ 为测量电极之间的距离(m)。

利用式(3)通过迭代法计算视电阻率。实际计算发现, 视电阻率的迭代初始值对结果影响不大, 会很快收敛, 可能是因为 ε 与 μ 很小, 所以数值变化不大。

2 V8 电法工作站 CSAMT 数据的广域化计算实现及新质生产力融入分析

2.1 CSAMT 数据的广域化可行性分析

CSAMT 与广域电磁法的野外施工要求相差不多, CSAMT 要求发射与接收距离足够远且达到远区的条件, 所以对 CSAMT 采集数据进行广域化计算是合理的。CSAMT 广域化彩头处理探测深度, 按照电磁法有效深度计算公式 $D = 356 \sqrt{\rho/f}$, 在胶东地区火成岩电阻率大于 $1\,000 \Omega \cdot m$, 而 V8 电法工作站 CSAMT 通常采用的频率是 $0.125 \sim 7\,680 \text{ Hz}$, 所以 D 最大可超过 10 km , 只是 CSAMT 低频进入近场数据不能使用, 但经广域化计算后则可以使用。对于当下, 无论是地质找矿还是地热勘查, V8 电法工作站 CSAMT 数据广域化计算后的深度都能满足要求。通

过查阅相关资料, V8 电法工作站的 Txu-30 主机最低发射频率为 $0.003\,9 \text{ Hz}$, 该频率低于广域电磁法常用的频率下限^[12-15], 所以当需要探测较大的深度时, 可以增加低频频点。

2.2 CSAMT 数据广域化计算参数获取

计算视电阻率时需要录入较多参数, $\overline{MN}$ 、 L 、 f 等参数可以根据实际情况设置, 而电流 I 需要在野外施工时的发射端进行记录。电场 E_x 可以从 V8 电法工作站导出文件中获取。V8 电法工作站文件格式及文件数据格式见文献[6-7], 只需提取广域化计算需要的视电阻率、频率等参数即可。需要对获取数据的正确性进行验证, 通过计算 CSAMT 视电阻率与文件导出的视电阻率进行对比来判断。卡尼亚视电阻率(ρ_s)利用式(4)计算^[2,5,9-10]。计算视电阻率与导出视电阻率对比见图 2。由图 2 可知: 导出视电阻率与计算视电阻率基本一致, 说明提取数据是正确的。

$$\rho_s = \frac{1}{\omega \mu} \times \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (4)$$

式中: H_y 为磁场水平分量(nT)。

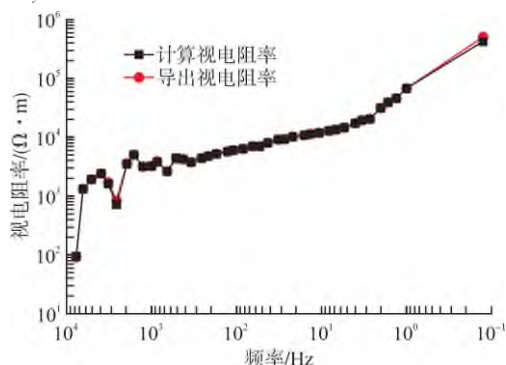


图 2 计算视电阻率与导出视电阻率对比

Fig. 2 Comparison of calculated apparent resistivity and derived apparent resistivity

2.3 CSAMT 视电阻率与广域化视电阻率对比

CSAMT 视电阻率与 CSAMT 广域化视电阻率对比见图 3。由图 3 可知: 按照特定计算方法将 CSAMT 数据进行广域化处理后, 与原始 CSAMT 视电阻率差距较大。这不仅验证了 CSAMT 计算所得视电阻率普遍偏高, 与文献[3]的发现相吻合, 还进一步揭示了广域化处理技术在提升数据质量和勘探效能方面的显著优势。

2.4 新质生产力融入分析

2.4.1 数据优化与去噪能力增强

CSAMT 数据广域化处理方法作为新质生产力的一种体现, 其核心在于通过更广泛的数据采集与整合, 实现了对原始 CSAMT 数据中突变点的有效去除。这些突变点, 在频率 $100 \sim 200 \text{ Hz}$ 尤为明显, 推测源于磁棒采集过程中的干扰。广域化处理通过避免直

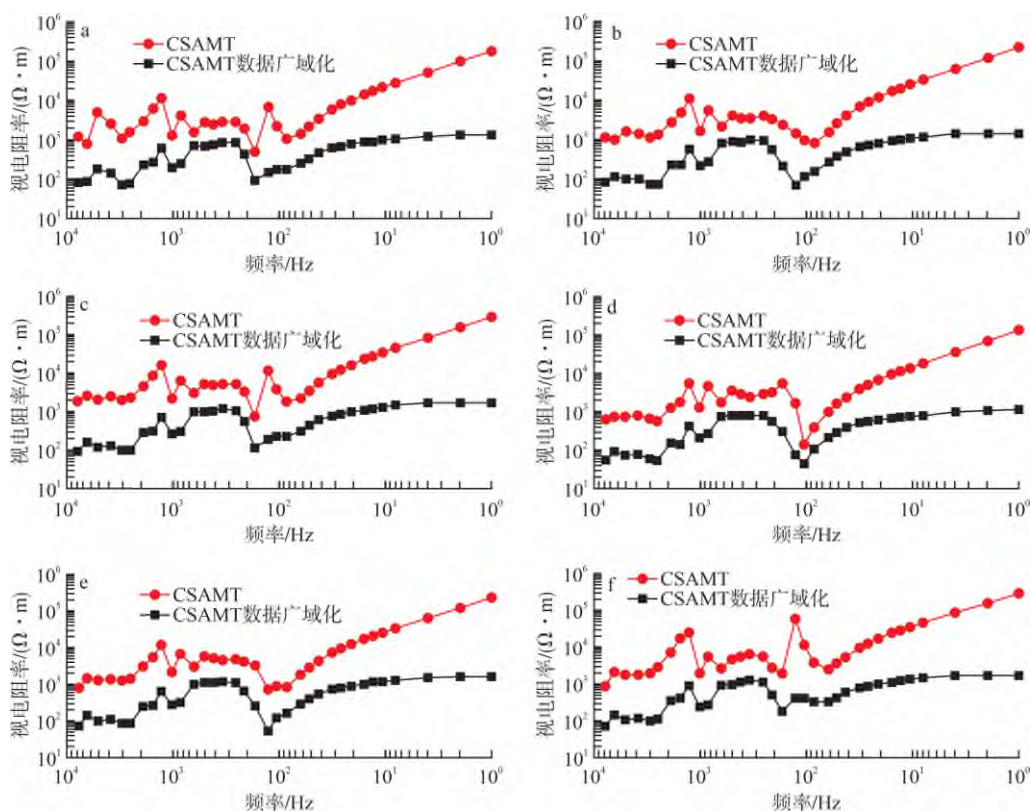


图3 CSAMT视电阻率与CSAMT广域化视电阻率对比

Fig. 3 Comparison of CSAMT apparent resistivity and CSAMT wide-area apparent resistivity

接依赖磁道数据,显著减少了此类噪声,从而提高了数据的纯净度和可靠性,为地质解释提供了更为坚实的基础。

2.4.2 勘探深度与频率范围拓展

传统CSAMT视电阻率在80 Hz附近开始呈现45°上升趋势(见图3),标志着进入近场区域,限制了低频段数据的有效利用。而经过广域化处理,这一现象得到显著改善,不仅避免了近场效应的干扰,还极大地拓宽了可用的频率范围。这意味着在保持相同勘探效率的前提下,广域化技术能够触及更深的地下结构,显著增加勘探深度,为深部资源勘探和地质结构研究提供可能。

3 应用实例

3.1 文登晒字地热勘查

近年来,温泉产业发展迅速,CSAMT以施工方便、效率高效、探测深度大、抗干扰能力强的特点成为温泉勘查中应用的重要手段^[16-20]。

文登地下热源蓄量丰富,拥有得天独厚的温泉资源。胶东半岛已查明的13处知名温泉中,文登独占5处,包括天沐温泉、汤泊温泉、呼雷汤温泉、大英汤温泉、七里汤温泉。本次勘查区位于界市镇晒字村附近,距离大英汤温泉约10 km。为查明地下深部的地质结构,本次物探勘查工作采用CSAMT进行。

文登晒字地热勘查CSAMT数据广域化与CSAMT反演对比见图4。图4-a使用winglink反演软件反演,图4-b使用中国地质大学CSAMT-SW反演软件反演。由图4可知,CSAMT反演断面图的电阻率要比广域化处理反演断面图的电阻率大。勘查区内高压线较多,对CSAMT测量结果影响较大,CSAMT反演断面图960测点往大号方向虽然做过静态校正,但结果仍不理想。而CSAMT数据广域化处理反演断面图曲线平滑很多。-800 m以浅,两图相差不多;而-800 m以深,两图差别较大;结果表明,广域化处理反演断面图要比未处理的断面图内容丰富,能够反映更多深部信息。

3.2 栖霞臧家庄深部地质体

为研究深部地下结构,在栖霞臧家庄先后开展CSAMT勘查与广域电磁测深工作,CSAMT点距50 m,共36个测点;广域电磁测深点距100 m,共16个测点。CSAMT、广域电磁法、CSAMT数据广域化反演对比见图5。CSAMT使用CSAMT-SW反演软件反演,广域电磁法使用自带的反演软件反演,CSAMT数据广域化处理使用winglink软件反演。广域电磁法反演深度从地表以上100 m开始计算,因此图中广域电磁法实际深度要加100 m。CSAMT反演的视电阻率较高,但整体结构相差不多;-800 m以浅是两侧高阻夹着中间的低阻条带;而-1 600 ~ -800 m左侧是

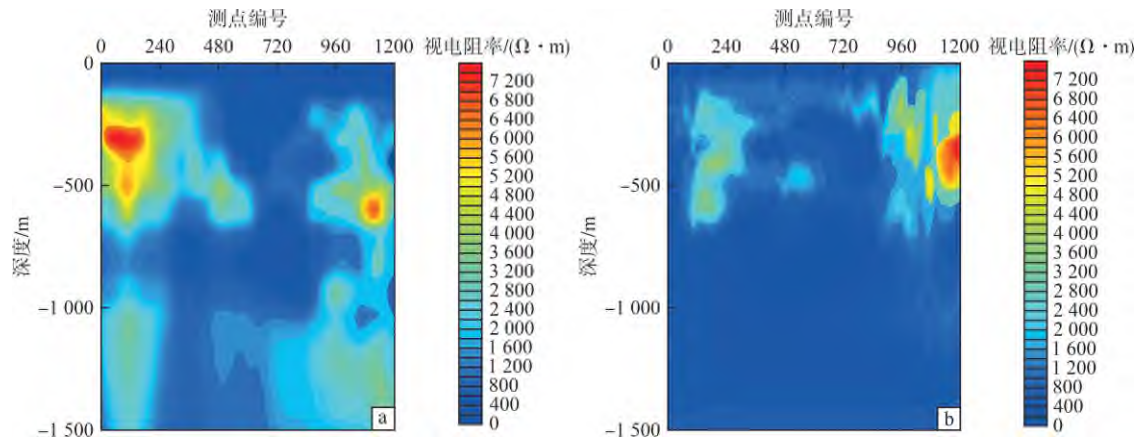


图 4 文登晒字地热勘查 CSAMT 数据广域化(a)与 CSAMT(b)反演对比

Fig. 4 Comparison of inversion of wide-area CSAMT data (a) and CSAMT (b) for geothermal exploration in Shaizi, Wendeng

低阻区域,右侧是高阻区域。因此,本次物探工作质量没有问题。

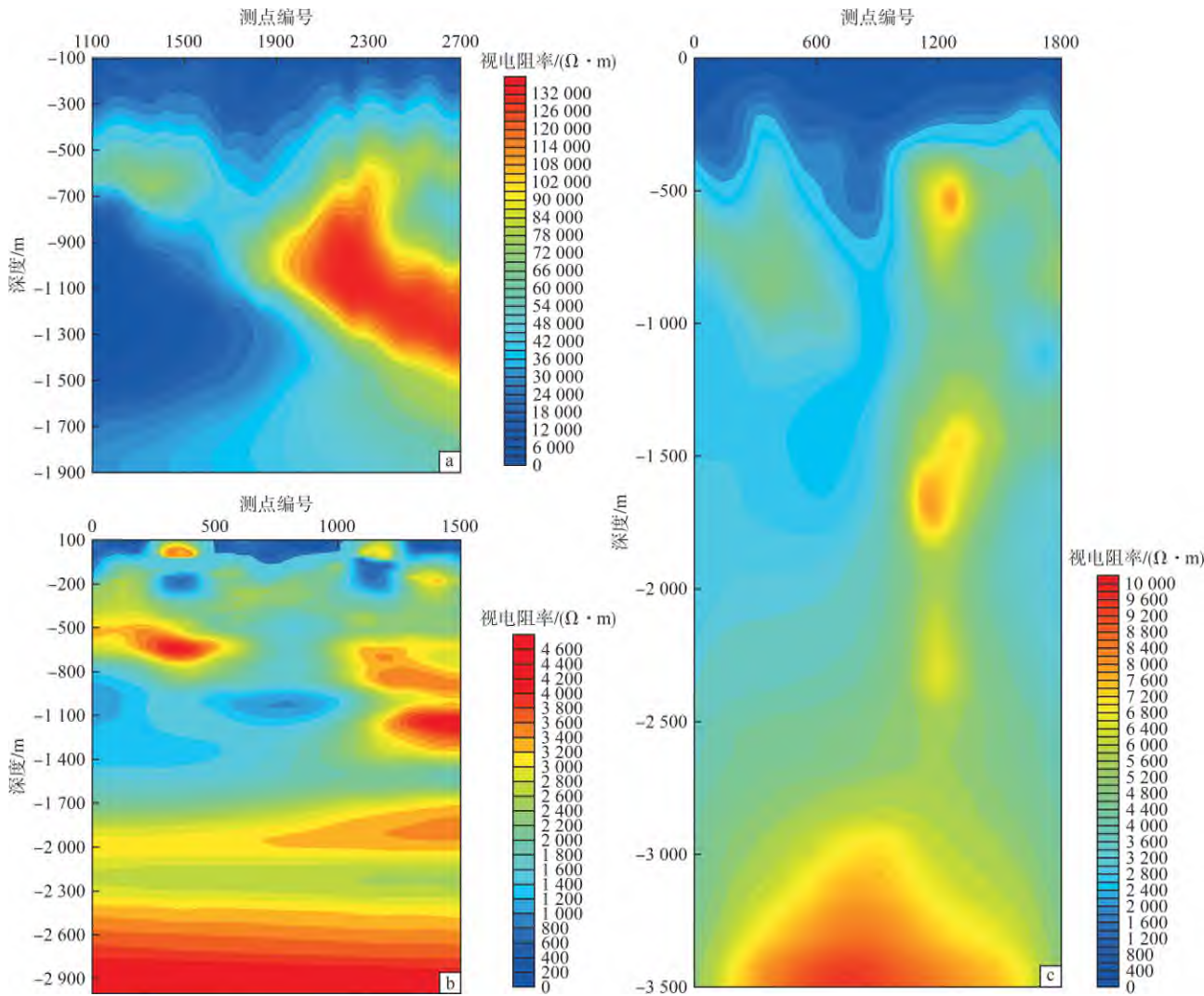


图 5 CSAMT(a)、广域电磁法(b)、CSAMT 数据广域化(c)反演对比

Fig. 5 Comparison of inversion of CSAMT (a), wide-area electromagnetic method (b), and wide-area CSAMT data (c)

对比广域电磁法与 CSAMT 数据广域化反演结果:整体相差不多,广域电磁法反演断面图浅部细节比 CSAMT 数据广域化反演断面图多。广域电磁法反演断面图的 400 测点、1200 测点有 2 处孤立的高

阻异常,应该是干扰引起的,而 CSAMT 数据广域化反演断面图中则没有。就浅部而言,CSAMT 数据广域化反演断面图与广域电磁法反演断面图更相似,与传统 CSAMT 相比优势明显。为了解 CSAMT 数据广域

化反演的有效深度,选定了-3 400 m,其深部的高阻体向深部未封闭,说明反演深度范围内的数据都是可靠的。

3.3 西林断裂

西林断裂是胶东重要的控矿构造^[14-15],自烟台市开发区南张家村南向西经西林村延伸至栖霞市西尹家村,该段长约 18 km,可见宽度 50~200 m,走向近东西,倾向南,倾角 25°~60°,该段构造作为臧家庄中—新生代断陷盆地的北界,对盆地形成起到了明显的控制作用。该段的构造岩组合为构造角砾岩和碎裂岩。断裂具有先压后张多期次活动特点,西林金矿床的产出受控于该断裂。为了深入研究深部成矿系统和控矿要素,实现西林断裂深部找矿新突破,在西林断裂附近开展了 CSAMT、广域电磁法、CSAMT 数据广域化等地球物理勘查工作。其中,CSAMT 的频率为 1~9 600 Hz,广域电磁法的频率为 0.011 7~8 192 Hz^[12]。

西林断裂 CSAMT、CSAMT 数据广域化、广域电磁法反演对比见图 6。CSAMT 反演电阻率断面图使用 CSAMT-SW 软件反演;CSAMT 数据广域化反演电阻率断面图使用 winglink 软件反演;广域电磁法反演电阻率断面图使用广域电磁法反演软件反演。对比图 6-a、c 可知:CSAMT 对左侧的高阻部分反映较好,而右侧的低阻部分在-1 000 m 深度以下的高阻部分(G2)则没有反映。通过查看一维反演数据,CSAMT 在右侧低阻部分反映深度较浅,达不到 1 200 m,图 6-c 对 G2 区域反应较好,与图 6-b 对比形态相似:在 3800 测点附近电阻率等值线有向浅部凸起的趋势。图 6-c 右下角深度超过 2 200 m 有 1 处高阻异常,在图 6-b 中没有,通过查看数据,CSAMT 数据广域化一维反演也没有达到该深度。因此,该高阻异常是 CSAMT 数据广域化反演加入的。

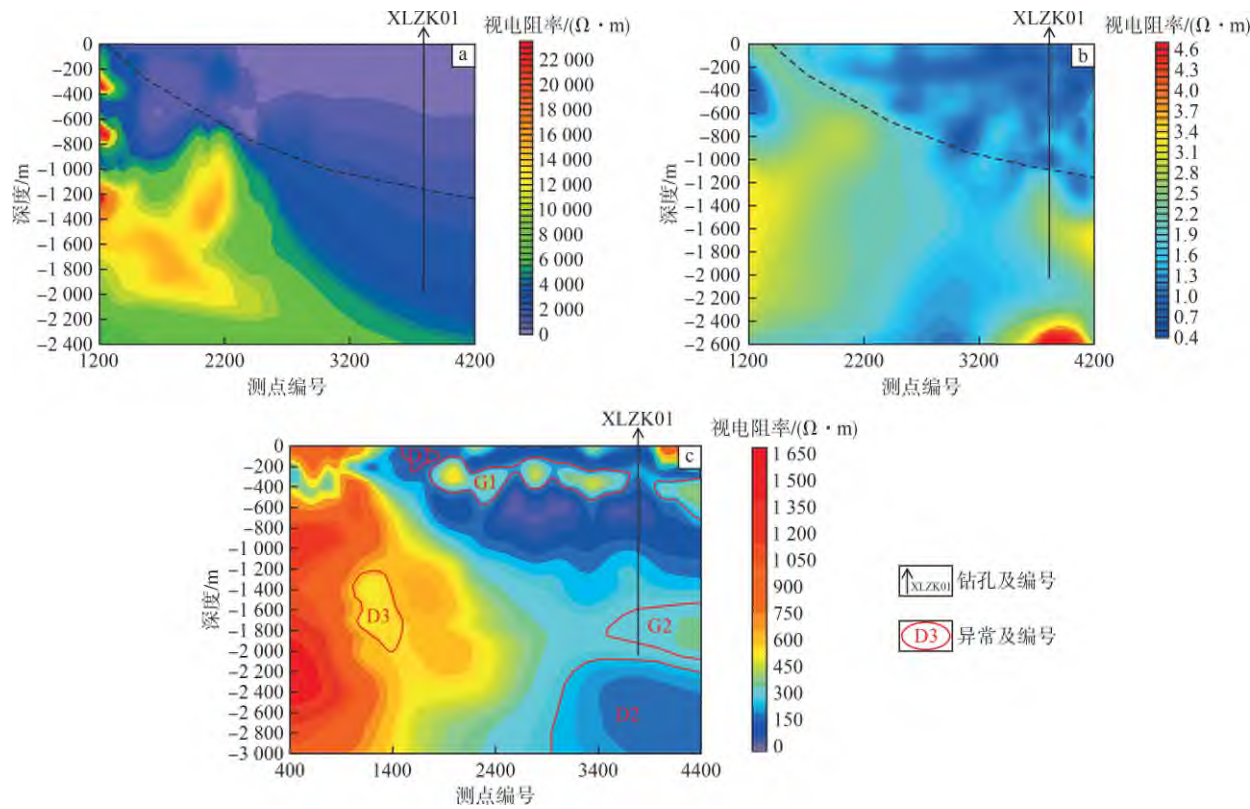


图 6 西林断裂 CSAMT(a)、CSAMT 数据广域化(b)、广域电磁法(c)反演对比

Fig. 6 Comparison of inversion CSAMT (a), wide-area CSAMT data (b), and wide-area electromagnetic method (c) for the Xilin Fault

通过对比发现,CSAMT 数据广域化处理不仅反演结果更加准确,而且还能增加反演深度,但由于 CSAMT 采用的频率较高,所以深度比广域电磁法浅。在今后的 CSAMT 工作中应该增加低频测点,以便增加反演深度,提高反演精度。

图 6 中红色虚线为推断西林断裂,在 3800 测点附近布设钻孔 XLZK01,终孔深度 2 002 m。于-1 150~-610 m 深度揭露西林断裂。钻探验证情况与图 6-b 对应较好,这是因为 CSAMT 频点数与广域电磁法频

点数相同,但范围小,所以频点更密集。经取样化验,于-990~-970 m 深度发现良好的金、银、铜、铅、锌、硫矿化。其中,金品位为 0.05~0.72 g/t,银最高品位为 10.71 g/t,铜最高品位为 0.19 %,铅最高品位为 0.24 %,锌最高品位为 0.25 %,硫最高品位为 7.25 %;表明西林深部具有较好的矿化显示。

4 结 语

V8 电法工作站可控源音频大地电磁测深数据广

域化处理,比传统 CSAMT 能获得更加丰富的信息,探测深度大大增加,数据更加准确,优势明显。与广域电磁法结果相比,CSAMT 数据广域化浅部内容没有广域电磁法细节多,这是由于 CSAMT 频率设置较窄导致的。在进行 CSAMT 工作时,可以增加频率密度,增加采集时间以达到接近或者替代广域电磁法的目的。与广域电磁法野外施工相比,CSAMT 野外施工需要的电流小,这不仅节约了生产成本,而且降低了安全风险。

如果已经拥有 V8 电法工作站,可以按照 CSAMT 野外工作流程采集数据,通过增加频点数量及采集时间的方法获得比传统 CSAMT 更多的数据,再利用本文提出的方法对数据进行处理,能达到广域电磁法的效果。该方法不仅节省了购买广域电磁测深设备的支出,而且拓展了原有设备的应用范围,即便需要使用 MT 方法解决的问题,在深度要求不是很大的前提下也可以使用 CSAMT 数据广域化来实现。

可控源音频大地电磁测深数据广域化处理方法属于矿产勘查技术创新,是矿产勘查新质生产力的一部分。新质生产力的引入,不仅仅是技术层面的革新,更是思维模式的转变。广域化处理技术与 CSAMT 的深度融合,不仅解决了传统方法中的技术瓶颈,还促进了勘探效率的全面提升。通过减少数据处理中的错误和干扰,加快了地质模型的构建速度,降低了勘探成本,为地质勘查行业的可持续发展注入了新的活力。

[参 考 文 献]

[1] 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.

- [2] 柳建新,童孝忠,郭荣文,等.大地电磁测深法勘探——资料处理、反演与解释[M].北京:科学出版社,2012.
- [3] 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):1 065-1 072.
- [4] 王顺国,熊彬.广域视电阻率的数值计算方法[J].物探化探计算技术,2012,34(4):380-383,365.
- [5] 龙西亭,刘春明,柳建新,等.对人工源频域电磁法视电阻率的探讨[J].物探与化探,2016,40(6):1 178-1 184.
- [6] 吴正刚,雷旭友,余年.基于 V8 系统大地电磁数据格式转换及实现[J].工程地球物理学报,2009,6(5):603-606.
- [7] 杨凯.基于 Python 的 MTU 系列大地电磁测深仪时间序列读写与应用[J].物探化探计算技术,2023,45(1):121-128.
- [8] 刘俊峰,孙保山,程云涛. V8 MT 时间序列数据文件读写[J].工程地球物理学报,2015,12(5):660-664.
- [9] 李鹤,李桐林,伍亮,等.CSAMT 全区视电阻率转换及其效果分析[J].地球物理学进展,2015,30(2):889-893.
- [10] 冯兵,王珺璐,周祥文,等.CSAMT 探测中电场 E_x 全区视电阻率定义及应用[J].煤田地质与勘探,2013,41(6):78-82.
- [11] 毛先进,鲍光淑.水平电偶源频率域电磁测深全区视电阻率的直接算法[J].中南工业大学学报,1996,27(3):253-256.
- [12] 宋林君,唐德龙,尹召凯,等.多种物探方法在西林金成矿带深部探测效果分析[J].黄金,2023,44(7):23-28.
- [13] 杨建锋,余韵,姚晓峰,等.矿产勘查推动新质生产力发展路径初探[J].中国矿业,2024,33(5):39-45.
- [14] 丁正江,孙丰月,刘福来,等.胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J].岩石学报,2015,31(10):3 045-3 080.
- [15] 王玉,尹召凯,王君伟.胶西北焦家—仓上地区深部地球物理探测综合应用[J].黄金,2023,44(7):55-60.
- [16] 魏鸿,王斌战,王成蛟,等.CSAMT 法在寻找温泉中的应用[J].资源环境与工程,2012,26(6):621-633.
- [17] 韦洪兰,龙霞,席振铎,等.多极化大地电磁系统及其在金属矿勘探中的应用[J].黄金,2023,44(1):68-74.
- [18] 黄力军.可控源音频大地电磁测深法在中低温对流型地热田勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2021,18(3):336-341.
- [19] 马为.CSAMT 在镜泊湖玄武岩覆盖区深部地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(4):450-454.
- [20] 王文昌,李建新.可控源音频大地电磁测深在新疆温泉县地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(3):338-341.

Research and application of wide-area processing for controlled-source audio magnetotelluric sounding data from the V8 electrical workstation

Wang Junwei¹, Hu Junjie², Ding Zhengjiang¹, Wang Yu¹, Yin Zhaokai¹, Song Linjun¹, Li Ruibo¹

(1. No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources;

2. No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province)

Abstract: In recent years, the growing demand for deep and concealed orebody exploration in the geological prospecting field has significantly advanced the process of deep-targeting exploration through the widespread application of electromagnetic equipment, particularly the transition from the V8 electrical workstation to wide-area electromagnetic sounding devices. Based on the similarities in fundamental principles and field operation procedures between the V8 electrical workstation and wide-area electromagnetic sounding equipment, this study proposes an innovative method for wide-area processing of controlled-source audio magnetotelluric (CSAMT) sounding data collected using the V8 electrical workstation. Comparative analyses of data processing results from 3 real cases demonstrate that this approach effectively simulates and achieves the exploration performance of wide-area electromagnetic equipment. It enhances data interpretation accuracy and exploration target depth without requiring additional hardware investment. The wide-area processing method for CSAMT data represents a significant improvement and innovation in traditional electromagnetic exploration technology and exemplifies the development of new quality productive forces in the field of mineral exploration.

Keywords: V8 electrical workstation; wide-area electromagnetic method; controlled-source audio magnetotelluric sounding; new quality productive forces; mineral exploration; goaf exploration and remediation; geothermal exploration; Carnian resistivity