

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1572

李帝铨,肖教育,张继峰,等. WFEM 与 CSAMT 在新元煤矿富水区探测效果对比[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1359–1366. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1572>

Li D Q, Xiao J Y, Zhang J F, et al. Comparison of application effects of WFEM and CSAMT in water-rich area of Xinyuan Coal Mine[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1359–1366. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1572>

WFEM 与 CSAMT 在新元煤矿富水区探测效果对比

李帝铨^{1,2,3}, 肖教育^{1,2,3}, 张继峰⁴, 胡艳芳^{1,2,3}, 刘最亮⁵, 张新⁵

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 有色金属资源与地质灾害探测湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083; 3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 4. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710000; 5. 阳泉煤业(集团)有限责任公司 地质测量部, 山西 阳泉 045000)

摘要: 为了探测煤层中的富水体, 首次在新元矿区开展了基于广域电磁法的富水区探测, 并同时配套了可控源音频大地电磁法作为对比。通过视电阻率数据曲线、频率—视电阻率拟断面图和反演结果的对比结果, 显示广域电磁法具有探测深度大、效率高、精度高的特点, 可为煤矿富水区探测提供新的有效技术。

关键词: 广域电磁法; 可控源音频大地电磁法; 富水区; 煤矿

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1359-08

0 引言

煤矿开采时, 煤矿隐蔽致灾地质因素是影响煤炭安全开采的首要问题, 这些地质因素包括地质构造、矿井水、煤层瓦斯、顶底板条件等, 煤层中富水区是煤矿开采中重大隐蔽地质隐患之一。地球物理探测是查明这些地质因素的重要手段, 常用的电磁勘探方法有可控源音频大地电磁法(CSAMT)、瞬变电磁法、巷道无线电波透视等。广域电磁法是相对于传统的 CSAMT 法和 MELOS 方法提出来的, 使用人工场源发射电流, 采用单分量或多分量测量和适合于全域的公式来计算广域视电阻率, 供电频率的带宽选择较大, 适合大深度勘探^[1-4], 在油气勘探、固体矿产勘探、地热勘探^[5-10]等领域应用较为广泛。广域电磁法有可能在煤炭水害富水区探测领域做出贡献, 但是之前还没有具体实施应用。为了比较广域电磁法和可控源音频大地电磁法的探测效果, 证实广域电磁法在煤田中探查水的可行性, 在山西沁水煤田新元煤矿进行了对比实验。这是广域电磁法在煤矿系统富水探测中的首次应用。

本次广域电磁法采取了多维多分量的方式, 即采用旁侧装置和轴向装置分别测量电场的 E_x 、 E_y 分量, 从而获得同一测点 4 个不同的电场分量, 每个电场分量均求出相应的广域视电阻率。理论分析与试验数据表明, 在野外采用旁侧装置测量电场 E_x 分量, 测线敷设和收拢方便, 移动灵活, 信号强度大, 更适用于实际勘探^[11]。本文主要对广域电磁法的旁侧装置 E_x 、轴向装置 E_x 的频率视电阻率拟断面图和 CSAMT 的频率视电阻率拟断面进行对比; 同时对信号强度较大、分辨效果好的旁侧 E_x 装置的反演结果与 CSAMT 的反演结果进行对比, 从而说明广域电磁法在煤炭领域富水区探测的可行性。

1 基本原理

广域电磁法是一种采用 2^n 序列伪随机信号作为激励信号的人工源频率域电磁法, 该方法采用水平电流源或者垂直磁偶源作为场源, 通过测量电磁场的某个分量以获得广域视电阻率。

根据均匀大地表面水平电流源产生的电场 E_x 的精确表达式如下:

收稿日期: 2020-12-21; 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0807802); 中南大学研究生科研创新项目(2019zzts648)

第一作者: 李帝铨(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁法探测理论与技术研究及教学工作。Email: lidiquan@csu.edu.cn

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)], \quad (1)$$

由式(1)得到广域视电阻率表达式:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (2)$$

式中: I 为发送电流; dL 为场源尺寸; r 为收发距; φ 为方位角; k 为波数; σ 为介质电导率; ΔV_{MN} 为观测电位差, MN 为电极距; K_{E-E_x} 是一个只与观测装置的几何尺寸有关的系数; $F_{E-E_x}(ikr)$ 是由发送电流频率 ω 、地下电阻率 ρ 以及收发距 r 构成的复函数。采用式(2)定义的广域视电阻率可不受观察点到场源距离的限制,因此,利用计算机迭代方法求解的视电阻率最佳值适用于广大区域^[10,12]。

可控源音频大地电磁法是利用人工源激发地下岩石产生的电导率差异观测一次场电位和磁场强度变化的一种电磁勘探方法,其频率范围一般为 0.25~8 192 Hz。主要针对大地电磁测深法场源的随机性和信号微弱,以致观测十分困难的状况提出的一种改进方案^[12-13]。

CSAMT 法采用水平电偶极子或垂直磁偶极子作为场源,在远区测量一对相互正交的电场和磁场分量,沿用 MT 法采用波阻抗提取视电阻率的公式:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_\varphi}{H_r} \right|^2 \quad (3)$$

式中: ρ_a 为视电阻率, ω 为电磁波的频率, μ 为介质的磁导率。

CSAMT 和 WFEM 在野外施工场源布置和测线布置方面有所差异,相同的目标体探测深度下,WFEM 所需的收发距较小。CSAMT 测量相互正交的电场和磁场,WFEM 只需测量单一的电场或磁场即可进行广域视电阻率的换算以及反演。CSAMT 和 WFEM 在数据处理方面由于各方法视电阻率的定义不同,处理方法也有所差异。

2 研究区地质与地球物理概况

新元井田 31004 工作面属华北石炭—二叠系煤田,井田基本形态为一单斜,井田位于沁水煤田的西北部,阳煤集团寿阳区中南部。新元井田范围内自上而下的含水层组主要包括:第四系砂砾石层孔隙含水层组,二叠系石盒子组、石千峰组、三叠系刘家沟组砂岩裂隙含水层组,二叠系下统山西组砂岩裂隙含水层组,石炭系上统太原组石灰岩溶及砂岩裂隙含水层和中奥陶统峰峰组与上马家沟组石灰岩岩溶含水层组(图 1)。

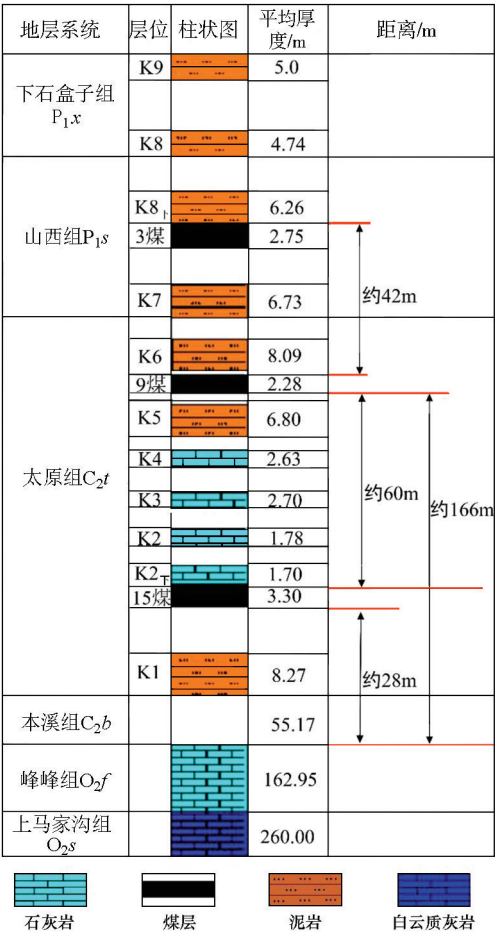


图 1 新元井田已知的含水层与主采煤层关系示意
Fig. 1 Relationship between known aquifer and main coal seam in Xinyuan minefield

研究区主要地层从上到下依次有第四系(Q)、二叠系上石盒子组(P_{2s})、二叠系下石盒子组(P_{1x})、二叠系山西组(P_{1s})、石炭系太原组(C_{2t})、石炭系本溪组(C_{2b})、奥陶系峰峰组(O_{2f})、奥陶系上马家沟组(O_{2s})、奥陶系下马家沟组(O_{2x})。根据已有的测井电阻率信息统计分析,测区地层电阻率总体呈现高阻—低阻—高阻—低阻—高阻的趋势(表 1)。研究区主要可采煤层为 3 号煤、9 号煤、15 号煤。富水区的目的层位于山西组和太原组中,均表现为低阻特征。

3 数据采集

此次在新元 31004 工作面所属地面共布置 2 条广域电磁法测线——280 线、285 线,其中 280 线为广域电磁法和可控源音频大地电磁法在相同地质条件下的共同测线。280 线总长 3 km,点距 20 m,共 150 个测点(图 2)。

广域电磁法野外采集使用中南大学自主研发的

表 1 地层及围岩物性参数统计

Table 1 Statistics of physical parameters of stratum and surrounding rock

地层	主要岩性	电阻率范围(平均值)/(Ω·m)	电性特征
上石盒子组(P ₂ s)	砂岩、硅质岩、泥岩	>82.4(150.2)	高阻
下石盒子组(P ₁ x)	泥岩、细粒长石石英砂岩	20~30(25.1)	低阻
山西组(P ₁ s)	砂岩	60~72(66.5)	高阻
	泥岩	15~20(19.8)	低阻
	煤层	320~340(335.7)	高阻
太原组(C ₂ t)	砂质泥岩	15~30(20)	高阻
	石灰岩	>370(420.3)	
	煤层	>300(380.6)	
	砂岩、泥岩	150~160(155.8)	
本溪组(C ₂ b)	粉砂岩、铝质泥岩	60~75(71.6)	低阻
峰峰组(O ₂ f)	泥质灰岩、层状石灰岩	<100(63.4)	低阻
上马家沟组(O ₂ s)	石灰岩、白云质灰岩	>960(1200)	高阻

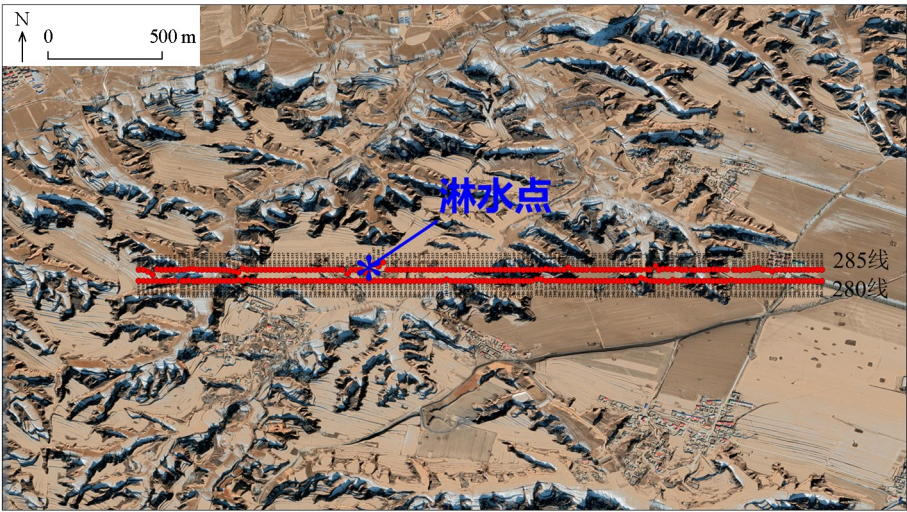


图 2 测线布置示意

Fig. 2 Survey line layout

广域电磁发射机和广域电磁接收仪,采用旁侧装置($E-E_x$ 、 $E-E_y$)和轴向装置($E-E_x$ 、 $E-E_y$),发射电流为 120 A、发射频率为 0.75~8 192 Hz,共 28 个频点。此次采用的旁侧装置和轴向装置(图 3)与传统的广域电磁法区别在于利用 2 个相互正交的源进行供电,例如:当采用轴向装置进行观测时,分别沿着平行于源的方向采集 E_x 分量,沿着垂直于源的方向采集 E_y 分量;旁侧装置亦是如此。CSAMT 野外工作采用美国 ZONG 公司研发的 GDP32- II 电法工作站,信号发射和接收采用与之配套的装置,发射电流 20 A,测量频率 0.125~8 192 Hz,共 30 个频点。广域电磁法和可控源音频大地电磁法收发距同为 8.99 km,场源位置相同,供电电极距 1.0 km。

4 资料处理解释与对比

采用中南大学自主设计的广域电磁法数据处理

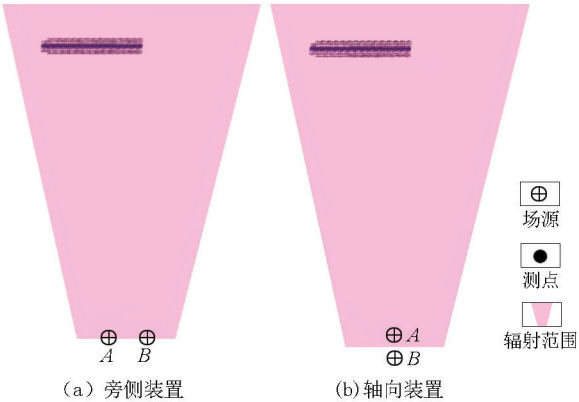


图 3 广域电磁法观测装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of WFEM's observation device

和反演一体化解释平台,经过对数据进行预处理、“飞点”剔除、静态校正、数据滤波、定性分析、参数点分析以及曲线类型分析,再建立模型作数据反演,最后依据其他物探成果进行综合推断解释。可控源

音频大地电磁法采用 Mtsoft2D 软件进行处理,包括近场校正、去除“飞点”、静态校正以及反演电阻率断面成图,最后进行结果解释。

依据勘探区地球物理特征,将上石盒子组(P_2s)电性特征为高阻,下石盒子组电性特征为低阻(P_1x),以及山西组(P_1s)、太原组(C_2t)整体电性特征呈现高阻,本溪组(C_2b)的电性特征为低阻,作为反演电阻率断面图的地质解释原则。

4.1 原始数据对比

图 4、图 5 分别为新元矿 31004 工作面 280 线广域电磁法和可控源音频大地电磁法所测得山顶处 4 个号位的视电阻率曲线。可以看出:CSAMT 法卡尼亚视电阻率曲线由于受到场源效应的影响在低频段进入过渡区和近区,导致 CSAMT 法卡尼亚视电阻

率曲线在低频段出现明显的上翘趋势,在 10~60 Hz 处会出现一个电阻率极小值,此时处于过渡区,随后 CSAMT 法卡尼亚视电阻率曲线由极小值呈 45° 上升的趋势。CSAMT 法卡尼亚视电阻率在 235 号点和 237 号点高频处出现“飞点”而广域电磁法整体的电阻率曲线较为平滑,整体呈现高阻—低阻—高阻的趋势,这与实际的地质资料较为吻合。

图 6 为新元矿 31004 工作面 280 线广域电磁法和 CSAMT 的视电阻率拟断面对比。可以看出广域电磁法的旁侧装置 E_x (图 6a) 和轴向装置 E_x (图 6b) 的原始数据频率视电阻率拟断面图在低频段依然有响应,说明受到场源效应的影响很小,不受过渡区和近区的影响;而 CSAMT 法卡尼亚视电阻率曲线

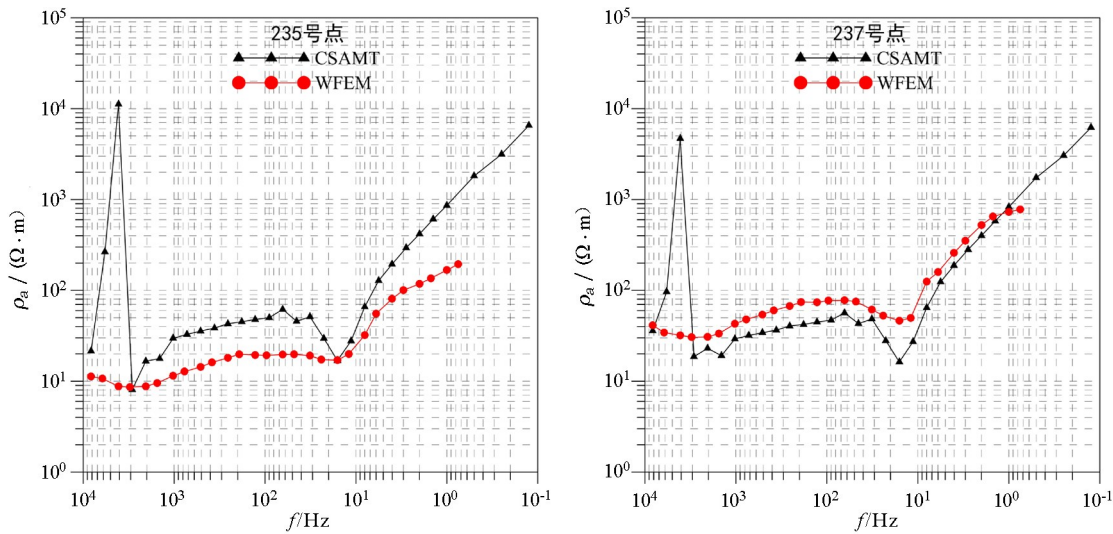


图 4 235、237 号点 CSAMT 和 WFEM 视电阻曲线对比

Fig. 4 Comparison of apparent resistance curve between CSAMT and WFEM at point 235 and 237

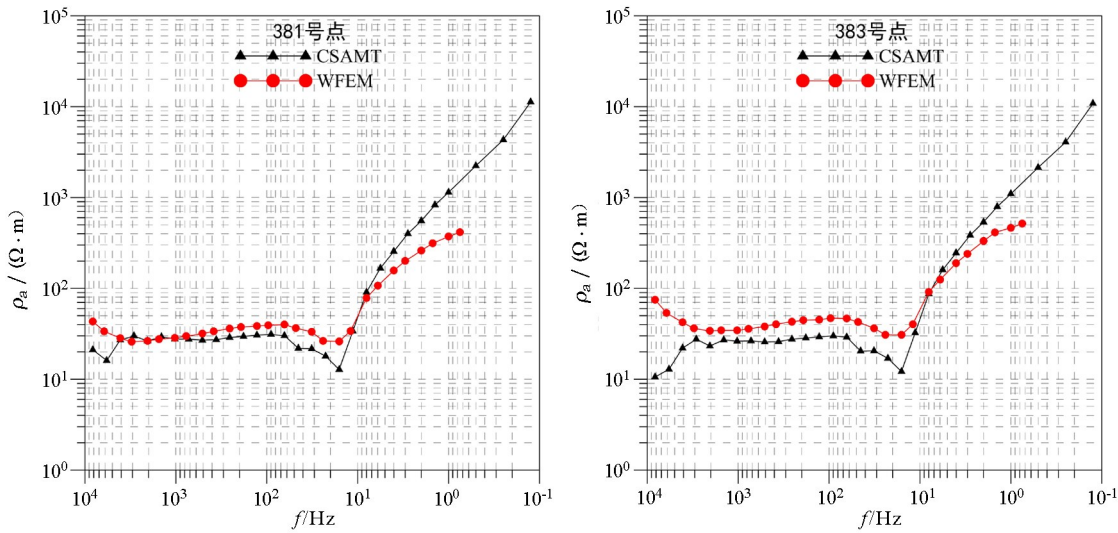


图 5 381、383 号点 CSAMT 和 WFEM 视电阻率曲线对比

Fig. 5 Comparison of apparent resistance curve between CSAMT and WFEM at point 381 and 383

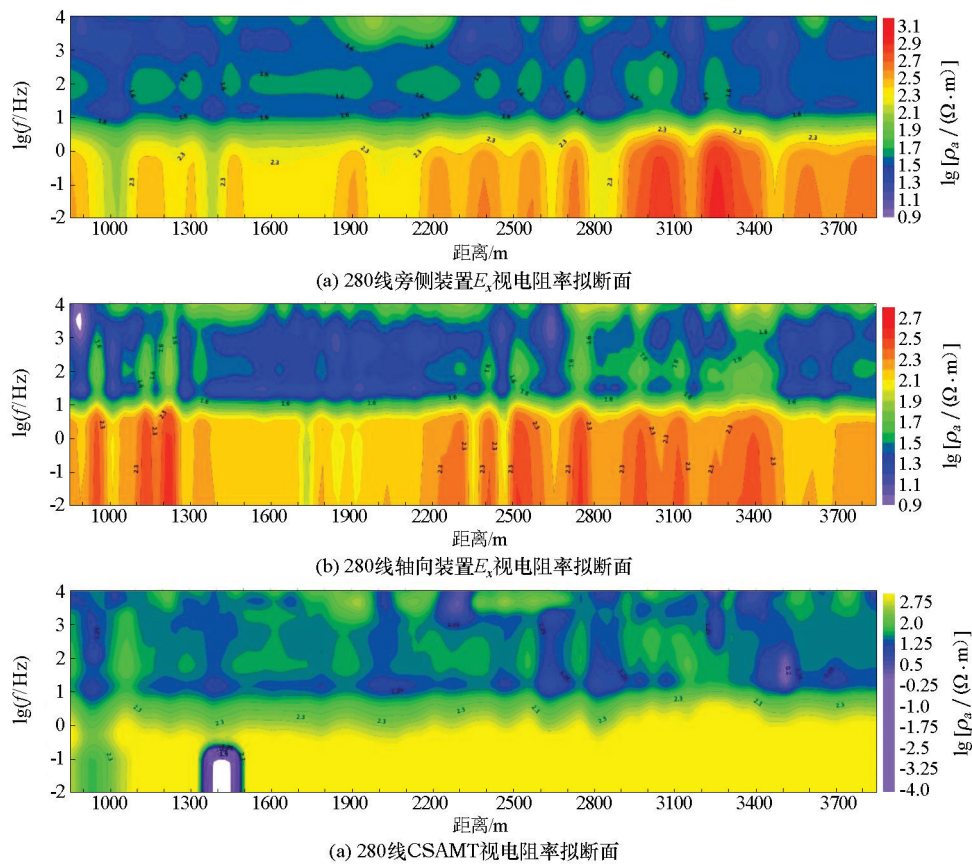


图 6 280 线 WFEM 和 CSAMT 视电阻率拟断面对比

Fig. 6 Comparison of apparent resistivity of original data of WFEM and CSAMT

(图 6c) 由于受到场源效应的影响,在低频段进入过渡区和近区导致 CSAMT 法卡尼亚视电阻率曲线在低频段出现明显的上翘趋势,所以导致在低频段无法对地层进行划分。同时,可以认为广域电磁法旁侧装置 E_x 和轴向装置 E_x 对富水体分辨范围更大;综合比较图 6a 和图 6b,可以认为旁侧装置 E_x 对富水体的分层能力优于轴向装置 E_x 。

4.2 反演结果验证

最新淋水点靠近辅助进风巷,285 线与之较为接近。最新的 31004 工作面淋水点最大出水量达到 $25\text{ m}^3/\text{h}$,约靠近辅助进风巷 60 m,与 285 测线距离为 1620 m。在 285 线电阻率反演断面(图 7)中进行了标注,这与实际的淋水点较为吻合,证明了电阻率反演断面的准确性;淋水点处电阻率约为 $35\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,这与我们统计的围岩电阻率和出水点电阻率($\rho_s \leq 35\text{ }\Omega\cdot\text{m}$)也是吻合的,推断水来自 3 号煤层上部 K8 含水层。

4.3 反演结果对比

在对 CSAMT 数据反演之前需要对原始数据进行整理,剔除个别畸变点,通过可视化 MT-Pioneer 5.1 数据处理软件进行下一步操作,不进行人为数

据的平滑,对因干扰产生的“飞点”直接剔除以提高反演的准确性。选择二维非线性共轭梯度法进行反演,模型光滑度设置为 80,约束视电阻率的误差为 9%。

广域电磁法资料处理解释以岩石物性为基础,通过对原始数据飞点剔除、静态校正等预处理并结合原始数据“频率—视电阻率”曲线完成定性分析,然后建立合理的地质模型,进行一维连续介质反演,并在一维反演的基础上进行二维反演,结合电阻率测井资料解释,提高广域电磁法解释成果的可靠性和解释精度。利用一维反演的结果可进行断层划分,利用二维连续介质反演结果可进行地层划分^[10],最后综合一维连续介质和二维连续介质反演结果,对富水区进行精确的识别。

图 8 为 WFEM 和 CSAMT 的反演结果对比。通过对围岩电阻率和巷道出水点的电阻率分析,可将 $\rho \leq 35\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 划为低阻异常区。从反演电阻率断面看,K10 含水层在 WFEM 反演断面图中距离 0~500 m、1 300~3 200 m 富水性较强,且该富水区连续性较强。从 WFEM 反演电阻率断面看,K8 含水层在 WFEM 反演断面图中距离 0~1 200 m、1 300~1 700

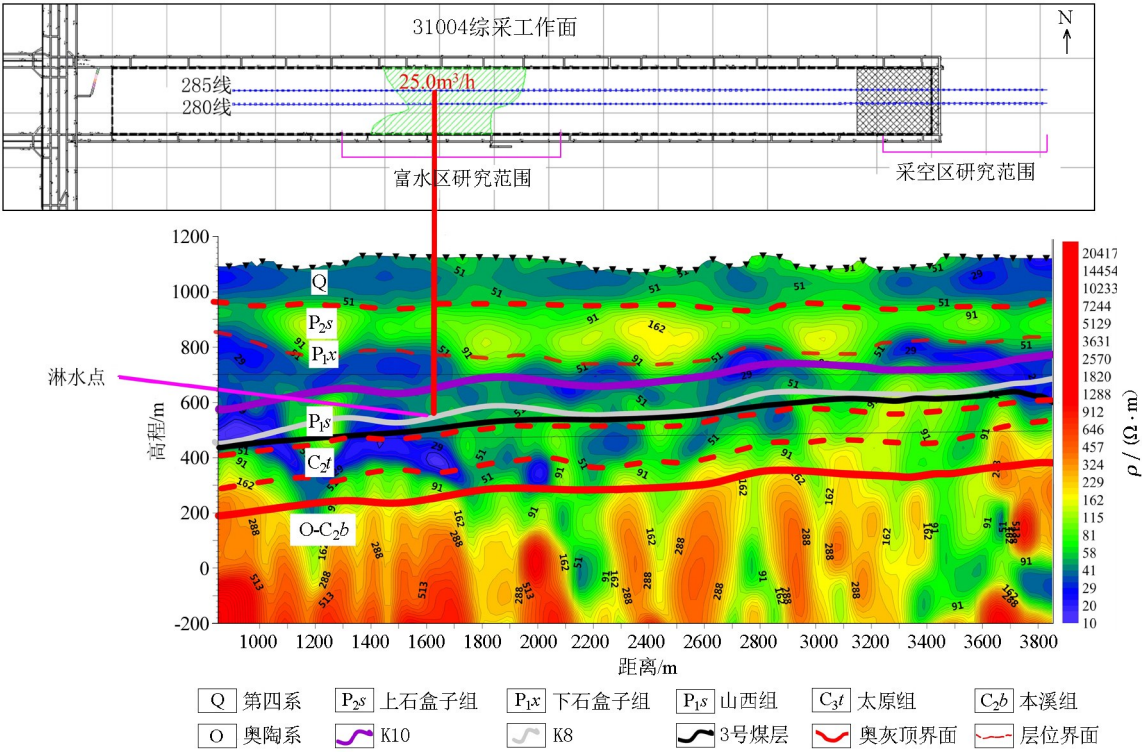


图 7 285 线反演结果与最大淋水点验证

Fig. 7 285 line inversion results and water outlet verification

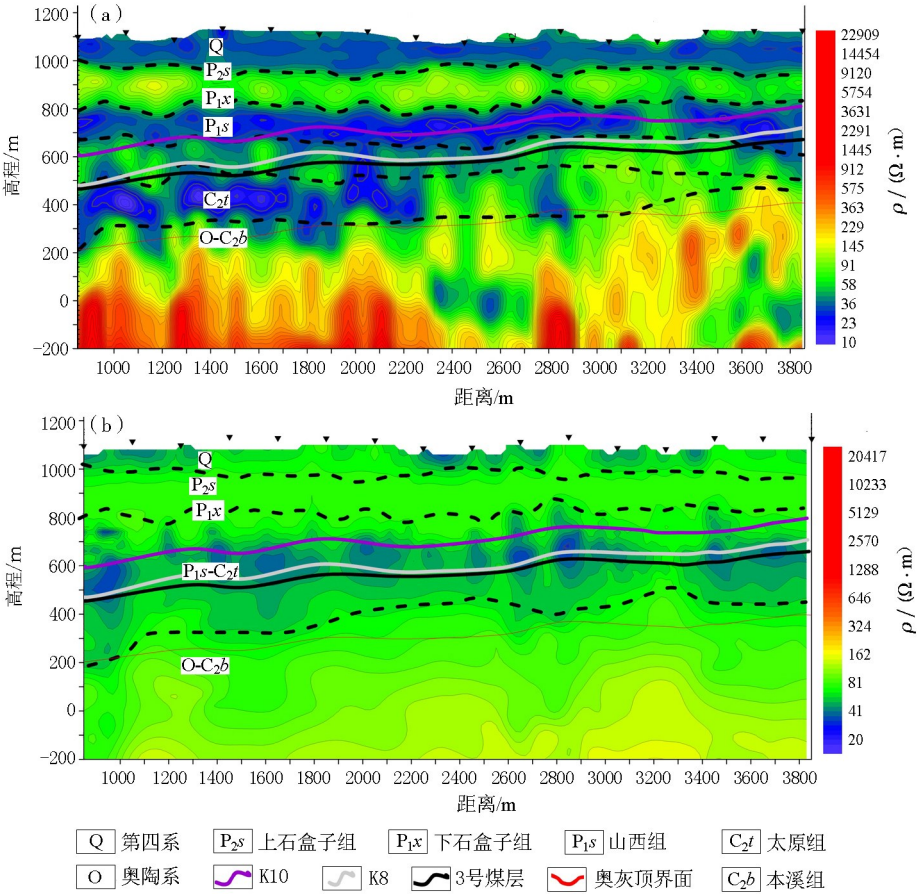


图 8 280 线 WFEM (a) 和 CSAMT (b) 的反演结果对比

Fig. 8 Comparison of inversion results of WFEM (a) and CSAMT (b) of line 280

m、2 000~2 100 m 处富水性较强。

通过对 WFEM 的反演断面图和 CSAMT 的反演断面图对比分析可看出:WFEM 反演结果呈现低阻—高阻—低阻—高阻—低阻—高阻的关系,对第四系和上石盒子组、下石盒子组、山西组、太原组—奥陶系有很好的分辨能力,而 CSAMT 的反演结果呈现低阻—高阻—低阻—高阻的关系;WFEM 反演结果对 K10 含水层和 K8 含水层的分辨较为清晰,而 CSAMT 的反演结果对 K10 含水层和 K8 含水层的分辨较为模糊,分辨不清。

5 结论

1)广域电磁法是基于全区视电阻率来定义的,对视电阻率的求解公式没有近似取舍,因此测量范围大、测量精度高。可控源音频大地电磁法受到场源效应和近区、过渡区的影响导致卡尼亚视电阻率曲线在低频段产生 45°上扬的趋势。

2)广域电磁法采用 2ⁿ 伪随机信号多频波发射,相对于可控源音频大地电磁法的单频波发射,其深部的分辨率较高。同时只需观测单一电场 E_x 分量即可求得广域视电阻率。

3)广域电磁法首次在煤矿中进行富水区探查应用,经过此次对比可发现广域电磁法在煤矿中对富水体的探查高效、准确度高。也证实了广域电磁法在煤炭领域富水区探测具有推广应用的巨大潜力,可为煤炭领域富水区探测提供新技术。

参考文献 (References):

[1] 何继善. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 985–990.
He J S. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 985–990.

[2] 李帝铨, 胡艳芳. 强干扰矿区中广域电磁法与 CSAMT 探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 967–972.
Li D Q, Hu Y F. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferential mining area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 967–972.

[3] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319–326.
Xue G Q, Yu J C. New development of TEM research and application in coal mine exploration [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319–326.

[4] 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 J S. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Jour-

nal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065–1072.

[5] 王宏宇, 李帝铨, 柳建新, 等. 广域电磁法在鄂尔多斯盆地西南缘含油富集区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1038–1047.
Wang H Y, Li D Q, Liu J X, et al. Application of wide-field electromagnetic method in the detection of oil-rich enrichment areas in the southwestern margin of the Ordos basin [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1038–1047.

[6] 梁维天, 孙新胜, 王东波, 等. 广域电磁法在河洼多金属矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1048–1052.
Liang W T, Sun X S, Wang D B, et al. The application of the wide field electromagnetic method in the exploration of the Hewa polymetallic ore deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1048–1052.

[7] 田红军, 张光大, 刘光迪, 等. 黔北台隆区地热勘探中广域电磁法的应用效果[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1093–1097.
Tian H J, Zhang G D, Liu G D, et al. The application effect of the wide field electromagnetic method in geothermal exploration of Tailong area, northern Guizhou Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1093–1097.

[8] 詹少全, 丁梅花, 李爱勇, 等. 贵州碳酸盐岩山区广域电磁法勘探应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 88–92.
Zhan S Q, Ding M H, Li A Y, et al. The application of wide field electromagnetic sounding method to exploration in carbonatite mountain areas of Guizhou Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 88–92.

[9] 李帝铨, 汪振兴, 胡艳芳, 等. 广域电磁法在武陵山区页岩气勘探中的探索应用——以黔北桐梓地区为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 991–998.
Li D Q, Wang Z X, Hu Y F, et al. The application of wide field electromagnetic method to shale gas exploration in Wuling Mountain area: A case study of Tongzi area in northern Guizhou [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 991–998.

[10] 符超, 袁博, 李学兰, 等. 广域电磁法在保靖页岩气勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(4): 416–422.
Fu C, Yuan B, Li X L, et al. Application of wide area electromagnetic method in shale gas exploration in Baojing [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(4): 416–422.

[11] 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 field electromagnetic method and pseudo random signal method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010, 1–7.

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

[13] 汤井田. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2005.
Tang J T. Controllable source audio frequency magnetotelluric method and its application [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2005.

Comparison of application effects of WFEM and CSAMT in water-rich area
of Xinyuan Coal Mine

LI Di-Quan^{1,2,3}, XIAO Jiao-Yu^{1,2,3}, ZHANG Ji-Feng⁴, HU Yan-Fang^{1,2,3}, LIU Zui-Liang⁵, ZHANG Xin⁵

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha 410083, China; 3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710000, China; 5. Geological Survey Department of Yangquan Coal Industry Group, Yangquan 045000, China)

Abstract: To detect the water-rich areas in coal seams, the wide-field electromagnetic method (WFEM) was employed in the Xinyuan mining area of Huayang New Material Technology Group Co., Ltd. for the first time. Meanwhile, the controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) was used for comparison. According to the comparison results of the apparent resistivity curves, frequency-apparent resistivity pseudo sections, and inversion results, WFEM enjoys the advantages of large detection depth, high efficiency, and high precision and thus serves as a new effective technology for the detection of water-rich areas in coal mines.

Key words: WFEM; CSAMT; water-rich areas; coal mine

(本文编辑:沈效群)

(上接 1358 页)

Abstract: The prospecting of shallowly concealed karst caves is studied using the cross-hole ultra-high density resistivity method. The results are as follows. It was feasible to prospect Karst caves using existing survey boreholes according to the cross-hole ultra-high density resistivity method. The transverse and longitudinal distribution ranges of karst caves can be directed reflected by the distribution characteristics of the cross-hole resistivity obtained through forward and inverse calculations. Meanwhile, it was difficult to distinguish the connectivity between karst caves, and the depth deviation was the distance between two adjacent electrodes. It is suggested that the depth of the boreholes used should be consistent, the ratio of the borehole depth to the borehole space should be higher than 1.5, and the electrode space should be 1~2 m in practice.

Key words: urban geology;cross-hole resistivity method; ultra-high density resistivity method; Karst cave

(本文编辑:沈效群)