

高频大地电磁法在煤矿采空区勘探中的应用

唐春城, 王中乐

中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年3月6日; 录用日期: 2023年4月8日; 发布日期: 2023年4月18日

摘 要

为查明湖南株洲市某煤矿诱发水害事故的隐蔽致灾因素, 采用高频大地电磁系统对测区进行了采空区探测。共布置了2.4 km总长的6条测线, 设置了126个测点, 采集了10~398 kHz的大地电磁信号, 查明了测区范围内地下介质电阻率分布情况, 并根据反演视电阻率剖面图推测出含水区域的空间位置。推测结果已知水体和已有地质资料相吻合, 为测区的安全防范和治理提供了可靠的物探资料和强有力的依据。研究表明, 高频大地电磁系统能在复杂地形条件下准确地定位煤矿采空区、确定采空区的边界和埋深, 浅部勘探效果好, 在煤矿采空区勘探领域的应用前景广阔。

关键词

电磁法, 高频大地电磁法, 采空区

Application of High-Frequency Magnetotelluric Method in Exploration of Coal Mine Goaf

Chuncheng Tang, Zhongle Wang

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

Received: Mar. 6th, 2023; accepted: Apr. 8th, 2023; published: Apr. 18th, 2023

Abstract

In order to identify the hidden disaster-causing factors of induced water hazards in a coal mine in Zhuzhou, Hunan Province, China, the high-frequency magnetotelluric system was used to explore the goaf area. A total of 6 measurement lines with a total length of 2.4 km were arranged, and 126 measurement points were set up to collect the ground electromagnetic signals ranging from 10 to 398 kHz. The distribution of underground medium resistivity in the measurement area was determined, and the spatial location of the water-containing area was inferred based on the inverted

resistivity profile. The inferred results were consistent with the known water bodies and existing geological data, providing reliable geophysical data and strong evidence for the safety prevention and control of the measurement area. The study shows that the high-frequency magnetotelluric system can accurately locate the coal mine goaf, determine the boundary and burial depth of the goaf, and has good shallow exploration effect under complex terrain conditions. Therefore, it has broad application prospects in the exploration of coal mine goaf.

Keywords

Electromagnetic Method, High-Frequency Magnetotelluric Method, Goaf

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国煤炭资源丰富, 开发历史悠久, 而煤炭资源开采完成后留下的空腔和巷道会构成煤炭采空区, 近几年由采空区造成的塌陷、突水等事故层出不穷, 严重影响了煤炭资源开发, 甚至是危害到相关人员的生命与财产安全[1], 因此查明采空区的空间范围和含水情况意义重大[2]。目前, 主要的煤矿采空区探测方法有三种, 第一种方法就是地质钻探方法, 该方法探测精度高, 但操作复杂、成本高。第二种方法是地质灾害调查法, 该方法简单, 成本低, 但只能确定大概范围, 作为一种定性方法, 不能作为防治依据。第三种就是依据目标体与围岩之间的物性差异进行探测的物探方法[3]。地球物理方法速度快、成本低且精度相对较高, 已成为采空区探测的主要手段, 地震法[4]、电磁法[5] [6] [7]、探地雷达法[8]等方法都已经广泛应用于采空区勘探中[9] [10]。在分析测区地质概况和物性差异的基础上, 选择合适的地球物理方法, 设置合理的参数, 对测区进行面积性的扫描测量, 可以获得更好的勘探效果[11]。然而目前的采空区探测中普遍面临干扰源众、地形复杂等问题, 使用传统方法对采空区进行精细探测愈发困难。结合本次测区范围内的地形、植被等自然条件和目标探测深度范围等因素, 本文选择使用高频大地电磁法进行采空区探测, 该方法设备轻便、探测深度大、对低阻异常敏感[12] [13] [14], 有更好的浅部勘探效果, 适用于各种不同的地质条件和比较恶劣的野外环境, 能准确地确定采空区边界与埋深。

2. 方法原理

高频大地电磁法原理与传统音频大地电磁法相同, 均是基于平面波电磁感应理论, 以天然电磁场为场源, 在地表观测携带地下介质信息的电磁场信号, 可以推导地下介质卡尼亚视电阻率(ρ)的计算公式[15]:

$$\rho = \frac{1}{5f} |Z|^2 \quad (1)$$

其中, 波阻抗(Z)的计算公式:

$$|Z| = |Z_{xy}| = |Z_{yx}|, \quad Z_{xy} = \frac{|E_x|}{|H_y|}, \quad Z_{yx} = \frac{|E_y|}{|H_x|} \quad (2)$$

再依据趋肤效应理论与勘探深度定义, 推导出准静态条件下趋肤深度(δ)与勘探深度(H)的公式:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

$$H = 0.6923\delta \approx 356\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

式中 ρ 为电阻率($\Omega \cdot m$), Z 为平面张量波阻抗, Z_{xy} 、 Z_{yx} 为主阻抗元素[16], f 代表频率(Hz), δ 为趋肤深度(m), H 为勘探深度(m), E_x 代表实测电磁强度(mV/km), H_y 代表实测正交磁场强度(nT)。

根据本次物探的任务, 在矿区北部 A2 区布置了 6 条以 SE140° 为方位角的测线, 测线方向垂直于地层和构造走向, 测线间距 100 m, 测线编号由西至东递增, 测点编号由南往北递增, 每条测线长 300 m, 点距为 20 m, 具体见测区北部物探测线布置图 1。

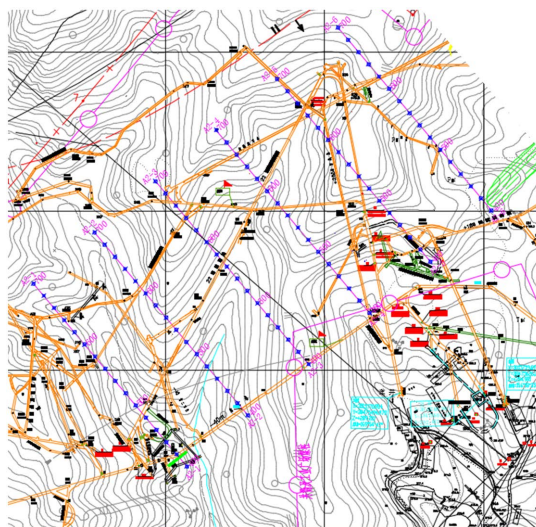


Figure 1. Layout diagram of measuring lines
图 1. 测线布置图

3. 测区地质概况

测区地表水系简单, 水体不发育, 多为季节性小溪。地表水流受降雨补充, 地表滞流层厚度薄, 排泄条件良好。矿区内出露的地层主要有第四系(Q)、侏罗系中统(J₂)、三叠系下统大冶组(T₁d)、二叠系上统大隆组(P₃d)、龙潭组(P₃l)。主要的含煤地层为二叠系上统龙潭组上段(P₃l²)、下段(P₃l¹)。

3.1. 煤、岩层地球物理特征

矿区的煤系地层为二叠系上统龙潭组, 煤层具有中灰, 低挥发分的特点, 而岩层为不同粒度的砂岩和泥岩组成, 据工作区钻孔测井资料, 水体、煤层与围岩电阻率有明显差异。三叠系下统大冶组主要由泥质灰岩夹灰岩、钙质泥岩组成; 二叠系上统大隆组由钙质泥岩、泥岩夹泥质灰岩、灰岩组成, 全组厚度一般 50~120 m。大冶组及大隆组地层电阻率一般在 100 $\Omega \cdot m$ 以上, 成为煤系地层的上覆高阻层。龙潭组为本区含煤地层, 根据岩性及含煤性分为上、下两段: 上段(P₃l²)为含煤段, 由黑色泥岩、砂页泥岩及浅灰色砂岩互层组成, 厚约 200 m, 含煤 13 层; 下段(P₃l¹)含煤 4 层, 由泥岩、砂质泥岩、砂岩组成, 厚约 200 m。整个煤系地层呈低阻层, 电阻率低于非煤层段砂岩、泥质砂岩等, 一般为 $n \times 10 \Omega \cdot m$ 。

3.2. 采空影响区、富水区的地球物理特征

煤层被开采后留下采空后未回填的巷道、废弃老窑、放顶后的冒落等形成采空区, 破坏了开采前隔水较好的隔水层, 矿区大部分可采煤层都有露头, 老空区大部分位于浅部, 直接接收地表降水的补给,

不同程度的存在积水。老空区积水不断的积聚并溢流、下渗, 通过岩石节理裂隙、层间裂隙、导水断层、冒落带及透水层等通道下渗, 并形成新的积水区, 或水流汇集, 达到一定的体量或者规模, 将直接威胁到矿井的安全。地表水、邻矿积水是主要的水补给源。富水区的电阻率呈极低值(一般为几十 $\Omega\cdot\text{m}$), 采空影响区电阻率略高, 呈低、中低值(一般为 $n \times 10 \Omega\cdot\text{m}$), 相对隔水层(体)弱含水煤和完整岩层呈中低、中高阻(一般为几十到几百 $\Omega\cdot\text{m}$)。电性差异明显, 反映在电阻率等值线剖面上的形态为“漏斗”、“封闭”、“半封闭”状的低阻异常区, 或者等值线疏密程度突变、等值线曲率突变。根据以上各区域电性差异, 本测区中使用地球物理电磁勘探方法查明积水区的物性条件较好、工作方法实用有效。

4. 数据处理与异常分析

4.1. 数据处理

高频大地电磁法数据处理主要分为数据预处理, 静态校正和反演成图三个步骤。使用配套数据处理软件分析数据的时间序列和阻抗, 初步的数据分析主要是为了查看数据质量; 剔除错误数据、应用地形校正, 结合地质情况分析地质异常和假异常, 采用五点中值滤波进行静态校正。导出经过处理及软件反演的数据, 反演使用的数据频率范围为 10 Hz~398 kHz, 采用 Surfer 绘制图 2 的电阻率与相位图和图 3 的各测线反演视电阻率断面, 图 3 中左下角到右上角依次为测线 1 至测线 6 反演视电阻率断面。

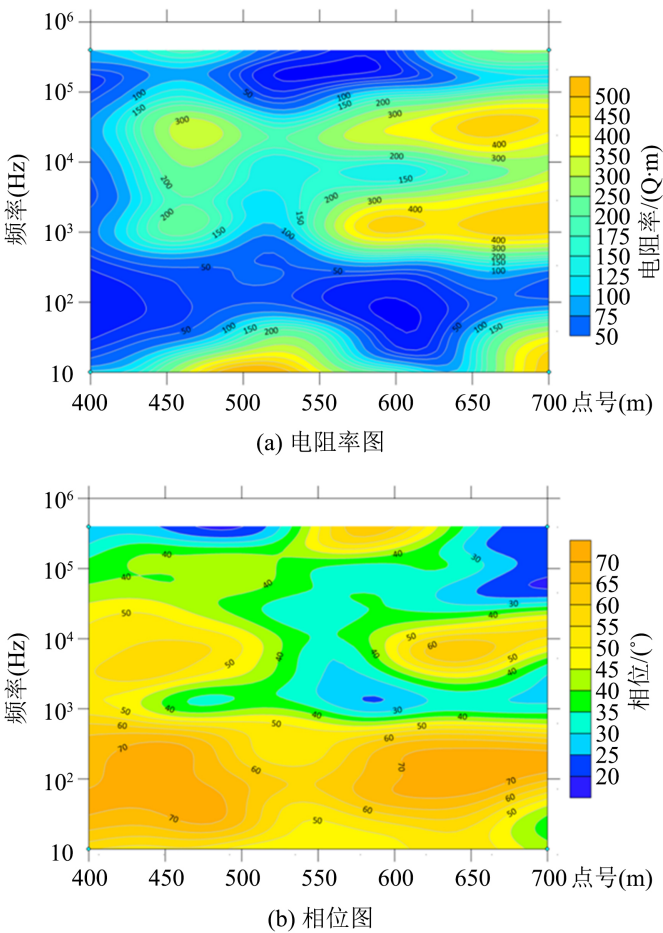


Figure 2. Resistivity diagram and phase diagram of Line 1
图 2. 测线 1 电阻率图与相位图

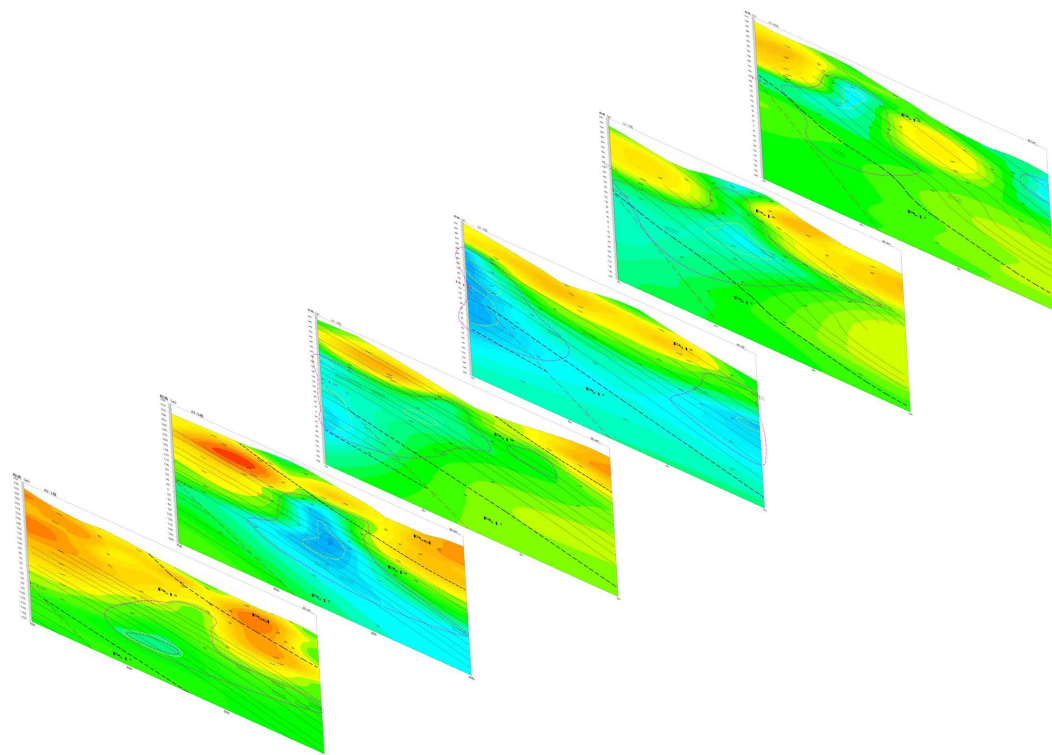


Figure 3. Inversion apparent resistivity section of each survey line

图 3. 各测线反演视电阻率断面

导出 6 个反演电阻率剖面图中推测采空区域的空间数据, 使用 Voxler 4 软件将空间数据网格化, 绘制推测采空区域的三维等值面图, 导入电阻率剖面数据绘制切片图。为方便观看, 切片图透明系数设为 0.7, 结果如图 4 所示。从图中可以看到, 测线 1 和 2 之间的含水区域可能存在连通情况, 测线 3 和 4 之间的含水区域体积大、范围广, 需要着重防范该区域发生灾害。

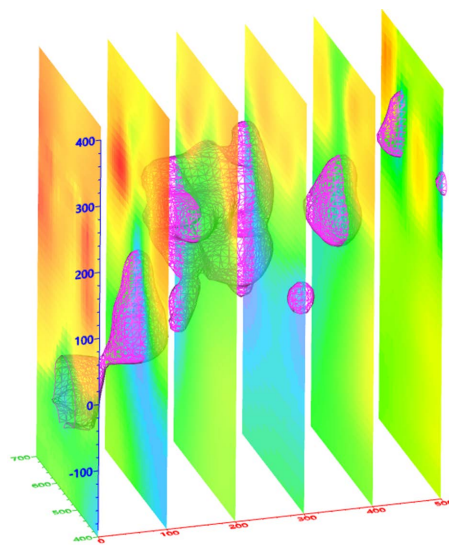


Figure 4. 3D map of presumed water region

图 4. 三维推测含水区域图

4.2. 异常分析

为了能更准确地分析高频大地电磁法在采空区探测中的应用效果, 选取 3 条测线的反演视电阻率断面图进行具体分析, 如图 5 所示。

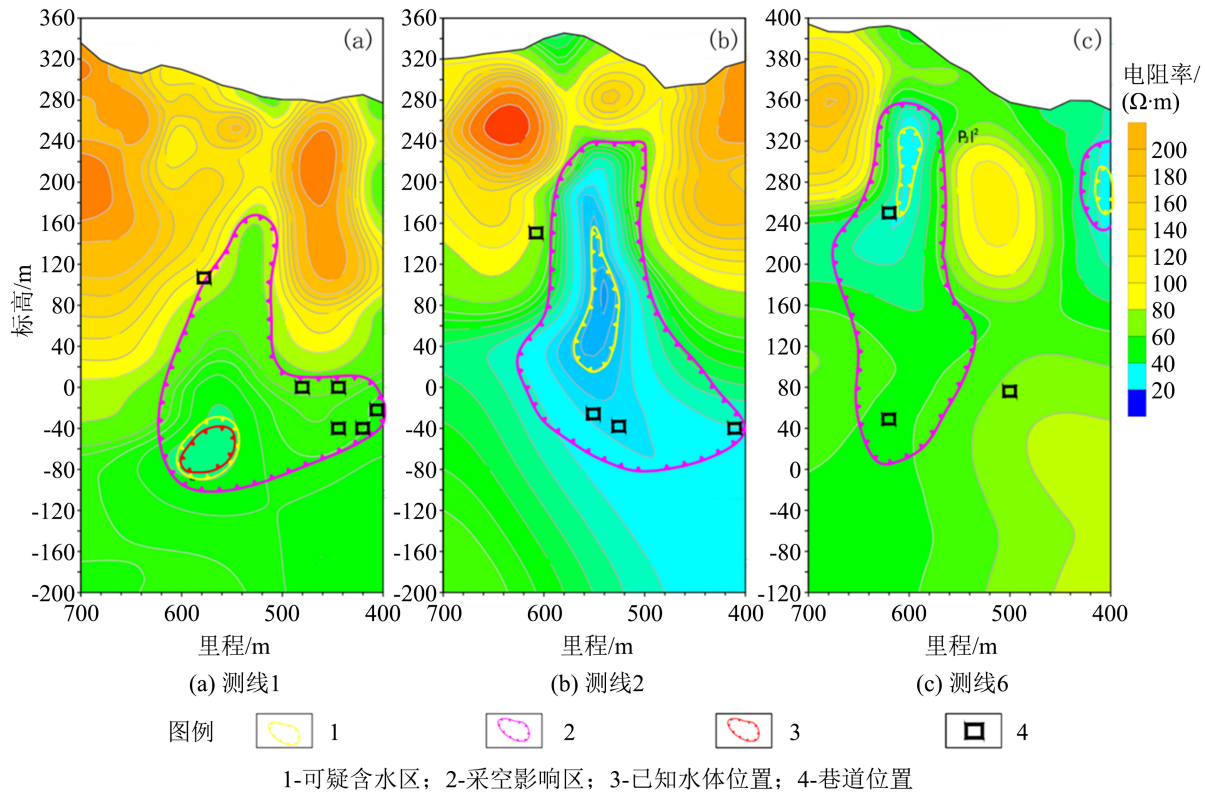


Figure 5. Inversion apparent resistivity profile
图 5. 反演视电阻率断面图

结合相关地质资料及矿区调查信息, 测线 1 剖面基岩以二叠系上统龙潭组砂质泥岩、粉砂岩及砂岩、泥页岩地层为主, 局部上覆二叠系上统大隆组钙质泥岩、泥岩夹泥质灰岩、石灰岩地层; 电阻率值在 $30 \sim 300 \Omega \cdot m$ 之间, 本段龙潭组地层中存在多层煤层可开采, 目前调查有 6 处采煤巷道通过该剖面。测线 1 断面图的中部区域存在大片低阻区, 在测线 $620 \sim 400 \text{ m}$ 段、标高 $-100 \sim 168 \text{ m}$ 处形成“低阻、极低阻”区域, 推测为采空影响区。采空影响区中极低阻值区域推测为可疑含水区, 位于测线 $605 \sim 545 \text{ m}$ 段、标高 $-90 \sim -30 \text{ m}$ 处, 其中测线 $600 \sim 545 \text{ m}$ 段、标高 $-83 \sim -38 \text{ m}$ 异常为已知 3 号水体。

结合相关地质资料及矿区调查信息, 测线 2 剖面基岩以二叠系上统龙潭组砂质泥岩、粉砂岩及砂岩、泥页岩地层为主, 局部上覆二叠系上统大隆组钙质泥岩、泥岩夹泥质灰岩、石灰岩地层; 电阻率值在 $5 \sim 450 \Omega \cdot m$ 之间, 本段龙潭组地层中存在多层煤层可开采, 目前调查有 4 处采煤巷道通过该剖面。本段呈大片低阻区, 形成一处“低阻、极低阻”区域推测为采空影响区, 位置在测线 $630 \sim 400 \text{ m}$ 段、标高 $-80 \sim 240 \text{ m}$ 处。采空影响区中极低阻值区域推测为可疑含水区, 位于测线 $570 \sim 525 \text{ m}$ 段、标高 $15 \sim 158 \text{ m}$ 处。

结合相关地质资料及矿区调查信息, 测线 6 剖面基岩以二叠系上统龙潭组砂质泥岩、粉砂岩及砂岩、泥页岩地层; 电阻率值在 $12 \sim 220 \Omega \cdot m$ 之间, 本段龙潭组地层中存在多层煤层可开采, 目前调查有 3 处采煤巷道通过该剖面。圈出两处“低阻、极低阻”区域推测为采空影响区, 位置在测线 $680 \sim 535 \text{ m}$ 段、标

高 5~356 m 处; 测线 430~400 m 段, 标高 234~320 m。采空影响区中极低阻值区域推测为可疑含水区, 位置如下: 测线 615~585 m 段, 标高 246~333 m; 测线 415~400 m 段, 标高 248~294 m。

通过以上测线分析结果与已知资料进行验证, 结果显示推测采空区位置与已知信息对应较好, 部分推测含水区位置与已知水体位置一致; 为验证反演结果的准确性, 我们对经过该剖面的巷道进行了实地踏勘, 踏勘结果与反演结果图相吻合。

5. 结论

1) 本次使用高频大地电磁仪器集了 10 Hz~398 kHz 频率范围的信号, 处理数据和反演后共得到 6 条测线剖面, 绘制了三维推测含水区域图, 查明了测区范围内标高-200 m 以上可疑含水区的分布情况, 通过更高的采集信号取得了良好的浅部勘探效果;

2) 详细分析了其中三条剖面的异常区域, 对经过这些剖面的巷道进行了实地踏勘, 结合已有的地质资料, 发现推测采空区范围与已知水体分布情况吻合较好, 验证了高频大地电磁法在采空区勘探领域的有效性与可靠性;

3) 反演结果表现出高频大地电磁法可以清晰有效地反映复杂地形采空区及其围岩的电性结构, 准确定位采空影响区边界与埋深, 表明该方法在日益复杂的采空区探测领域中有着巨大的应用前景。

参考文献

- [1] 张凯, 林年添, 聂西坤, 等. 用于深部采空区探测的可控源音频大地电磁法抗强干扰数据采集及处理策略[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 2119-2127.
- [2] 陈实, 李振宇, 潘建伟, 黄学明. 基于高密度电法的煤炭采空区数值模拟及应用[J]. 新疆地质, 2018, 36(2): 189-193.
- [3] 宋海生, 赵护林. 物探方法在探测煤炭采空区的应用[J]. 山西冶金, 2022, 45(1): 281-283.
- [4] 贾煦, 孙建伟, 刘向东, 等. 微动勘探与高密度电法在小尺度老采空区探测中的应用[J]. 中国地质调查, 2022, 9(6): 42-50.
- [5] 黄海昆, 罗腾腾, 何玉婷, 郭培文. 瞬变电磁法在某煤矿采空区积水探测中的应用[J]. 矿产与地质, 2022, 36(5): 1004-1010.
- [6] 郑燕, 宋德朝, 宋豪, 等. 基于可控源音频大地电磁法的煤矿采空区探测研究[J]. 能源与环境, 2022, 44(8): 123-131.
- [7] 卿晓峰, 杜蛟. 综合电法在煤矿采空区探测中的效果分析[J]. 四川地质学报, 2022, 42(2): 325-330.
- [8] 徐坤, 李欣睿, 陈忍忍. 地质雷达在煤矿采空区的探测应用研究[J]. 地质装备, 2022, 23(6): 25-27+37.
- [9] 武欣, 潘冬明, 于景邨. 煤矿采空区地球物理探测方法综述[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 10.
- [10] 黄祥祥, 马森, 王浩文, 孙鹏飞. 高密度电阻率法在某采空区勘查中的应用[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(12): 1165-1180. <https://doi.org/10.12677/ag.2020.101214>
- [11] 王浩文, 许少帅, 黄祥祥, 孙鹏飞. 基于瞬变电磁法和高密度电法的煤矿采空区探测[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(1): 145-159. <https://doi.org/10.12677/ag.2022.121016>
- [12] 张德实, 何帅, 杨炳南, 等. 高频大地电磁法在黔北某铝土矿勘查中的应用[J]. 贵州地质, 2022, 39(2): 115-121.
- [13] 李鹏博, 李铮, 李海. 高频大地电磁法在铁路隧道勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 713-717.
- [14] 闫海涛, 陈锋, 张龙, 张超. 高频大地电磁 EH4 在隧道岩溶勘察中的应用研究[J]. 路基工程, 2019(6): 165-169.
- [15] 赵文龙, 郭紫明. 音频大地电磁法和瞬变电磁法在煤窑采空区中的对比应用[J]. 西部资源, 2022(3): 171-174.
- [16] 闫永帅, 霍继炜, 高宇甲, 等. 基于高频大地电磁法的优势渗流通道识别研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 76-82.