

文章编号: 1004—5589 (2025) 02—0333—09

袁浩伦, 李赛, 彭海洋, 等. 高密度电阻率法在采空区探测中的应用 [J]. 世界地质, 2025, 44 (2): 333–341. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.02.012.

YUAN H L, LI S, PENG H Y, et al. Application of electrical resistivity tomography in detection of goaf areas [J]. World Geology, 2025, 44 (2): 333–341. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.02.012.

高密度电阻率法在采空区探测中的应用

袁浩伦¹, 李赛², 彭海洋³, 刘晨阳¹, 杜立志^{1*}

1. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026;
2. 国网新疆电力有限公司 建设分公司, 乌鲁木齐 830000;
3. 青岛地质工程勘察院 (青岛地质勘查开发局), 山东 青岛 266000

摘要: 高密度电阻率法是一种基于介质电阻率差异的地球物理探测方法, 因其无损和高效的特点, 广泛应用于地下异常体的探测与评估。笔者以金矿采空区为研究对象, 通过数值模拟对采空区可能存在的异常特征进行模拟分析, 并结合实地探检测验了高密度电阻率法在采空塌陷区探测中的适用性, 为采空区治理提供科学依据。针对温纳、偶极-偶极、温纳-斯隆贝格和单极-单极4种电极排列方式, 利用 RES2DMOD 正演软件分别建立单一孤立低阻异常体和半高阻半低阻异常体模型, 模拟采空区完全充水和不完全充水的情况。通过 RES2DINV 反演软件进行数据处理, 采用最小二乘法反演计算。结果表明, 偶极-偶极装置在完全充水异常体的反演中表现最佳, 能够清晰定位和准确描述低阻异常体的几何形状和电性特征, 显示较高的分辨率。对于不完全充水的半高阻半低阻异常体, 各装置的反演精度有所下降, 其中偶极-偶极装置的表现仍优于其他装置, 能够较好地反映异常体的分布特征。在实际探测中, 采用偶极-偶极装置进行探测, 采集数据经过处理后, 结果显示在研究区域的 115 m 处 (深度约 30 m) 存在低阻区。结合地质和水文地质条件, 推断该区域为采空塌陷区。探测结果表明, 偶极-偶极装置能够有效反映采空塌陷区的范围和特性, 对采空异常体的大体范围推测和发育深度估算具有重要意义。

关键词: 无损检测技术; 高密度电阻率法; 反演; 金矿采空区; 孤立异常体; 偶极-偶极装置

中图分类号: TV223.1; P631.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.02.012

Application of electrical resistivity tomography in detection of goaf areas

YUAN Haolun¹, LI Sai², PENG Haiyang³, LIU Chenyang¹, DU Lizhi^{1*}

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Construction Branch of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
3. Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute (Qingdao Geological Exploration Development Bureau), Qingdao 266000, Shandong, China

收稿日期/Received: 2024-09-14; 修订日期/Revised: 2025-01-20; 出版日期/Published: 2025-05-25

基金项目: 吉林省自然科学基金 (20220101172JC)

第一作者: 袁浩伦 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事无损检测技术研究。E-mail: yuanhl23@mails.jlu.edu.cn

* 通信作者: 杜立志 (1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程物探方法与仪器研究。E-mail: dulizhi98@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Abstract: Electrical resistivity tomography (ERT) method is a geophysical exploration technique based on the differences in resistivity of media. Due to its characteristics of non-destructive and high efficiency, it is widely used for detecting and evaluating subsurface anomalies. The authors take a gold mine goaf as the subject, numerical simulations for analyzing potential anomalous characteristics in goaf areas, and field investigations to verify the applicability of ERT in detecting goaf collapse zones, which providing a scientific basis for goaf management. Focusing on Wenner, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger, and pole-pole electrode arrays, RES2DMOD forward modeling software was used to construct models of a single isolated low-resistivity anomaly and a semi-high and semi-low resistivity anomaly to simulate fully water-filled and partially water-filled conditions of goafs. The data were processed by using RES2DINV inversion software with the least-squares method for inversion calculations. The results show that the dipole-dipole array exhibited the best performance for the fully water-filled anomaly, which accurately locate and describe the geometric shape and resistivity characteristics of low-resistivity anomalies with high resolution. For the partially water-filled semi-high resistivity and semi-low resistivity anomaly, the inversion accuracy of all arrays decreased, but the dipole-dipole array still outperformed the others, effectively reflected the distribution characteristics of the anomalies. In field investigations, the dipole-dipole array was employed for data acquisition. The processed data revealed a low-resistivity zone at the position approximately 115 m (30 m in depth) in the study area. Based on geological and hydrogeological conditions, the low-resistivity zone was inferred to be a goaf collapse zone. The findings indicate that the dipole-dipole array effectively reflects the extent and characteristics of goaf collapse zones, providing valuable insights for estimating the approximate range and developmental depth of anomalous areas.

Keywords: non-destructive testing techniques; electrical resistivity tomography; inversion; gold mine goaf area; isolated anomaly; dipole-dipole array

0 引言

金矿的开采可以为国家和地区带来财政收入,促进经济社会的发展,但长期的开采活动导致地下形成了大量的采空区。这些采空区的存在极大地影响了地质稳定性,使得周边区域的地层结构变得脆弱,还可能引发地面塌陷、山体滑坡等地质灾害。

高密度电阻率法是一种结合电剖面技术与电测深技术的多装置、多极距组合方法,其原理与直流电阻率法相同。与常规电阻率法相比,其在操作上更加简单、工作效率更高,同时探测的准确性得到了提升^[1]。该方法已成熟应用于矿产勘查^[2-3]、地质灾害勘查^[4-5]和水利水电工程^[6-7]等领域。同时,该方法在采空区的探测中也有所应用^[8-10]。王刚等^[11]对山区采用不同装置形式探测,发现偶极-偶极装置对纵向结构的响应特别敏感,且纵向分辨率优于温纳装置。在实际工程中,地下采空区通常由空气或水充填,其电性特征(表现为高阻或低阻)与周围岩土体存在显著差异。基于现有地质信息,结合地下介质的导电性、均匀性及目标体埋深等条件综合分析,采用高密度电阻率法可有效识别此类

电阻率异常区。

1 金矿采空区地质特征

探测区域位于山东半岛的西北部,地处胶东地区的低山丘陵地带,地势特点为东北部和中西部地形较高^[12]。该金矿位于焦家—新城和招远—平度两个区域性弧形断裂带之间的灵山沟—北截断裂带中段^[13]。根据板块构造的分类,该金矿的大地构造区域属于华北板块中的渤海陆块,位于胶北隆起区内^[14]。该矿区地层发育不良,第四纪沉积物沿河流及山间分布。中生代花岗岩中分布着大量的脉岩,这些脉岩主要由闪长玢岩和石英脉组成,夹杂少量的煌斑岩,并呈平行条带状排列。晚侏罗世形成的玲珑期弱片麻状黑云母二长花岗岩在地表广泛出露。矿体的围岩以花岗闪长岩为主,具有斑状结构,颜色为浅肉红色,主要矿物成分包括石英、钾长石和斜长石,辅以角闪石、黑云母、绢云母、绿泥石和碳酸盐矿物,副矿物则有磷灰石、锆石以及少量不透明矿物。矿区内还可以见到多条闪长玢岩岩脉^[15]。

中国的绝大多数金属矿为地下矿山,在20世纪50年代建成的地下金属矿山中,超过一半的矿

山由于储量耗尽，已经闭坑或即将关闭，剩余的矿山正在逐步转向深部开采^[16]。在众多黄金矿山中，除了紫金山金铜矿等少数金矿是露天开采外，其余大部分金矿均为地下开采^[17]，本次工程探测的金矿就是地下开采。目前，中国地下金属矿床的开采设计主要依赖于经验法、工程类比法和手册参考等方法，基于这些设计的采矿工艺系统通常采用在采场内进行上向孔凿岩、侧向崩矿以及使用铲运机进行出矿作业^[18]。

2 高密度电阻率法基本原理及装置形式

电阻率法是一种重要的地球物理勘探手段，基于不同地质介质导电性的差异，通过观测和分析人工建立的地下稳定电流场的分布特征，进而用于解决特定地质问题^[19]。在地表任意选取 A、B 两点为供电电极，再选取其他任意两点 M、N 为测量电极，计算出两个测量电极之间的电位差 ΔU_{MN} 。电流强度用 I 表示。通过下式计算视电阻率。

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \tag{1}$$

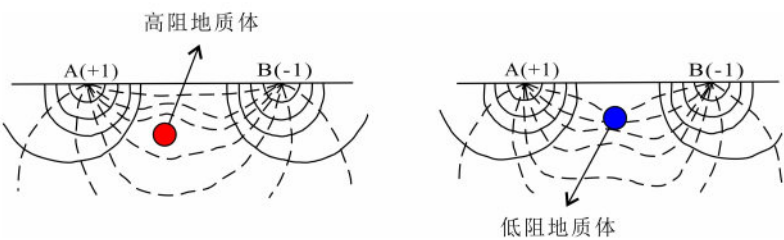


图 1 有高阻地质体和低阻地质体存在时的电场
Fig. 1 Electric fields in presence of high-resistivity and low-resistivity geological bodies

Schlumberger array)、单极-单极装置 (pole-pole array) 等装置形式。

图 2 是 4 种装置形式的示意图。温纳装置由 4 个等间距排列的电极组成，其中两个外侧电极负责注入电流，两个内侧电极负责测量电位差。温纳装置适用于浅层地下结构的探测。偶极-偶极装置是由许多成对的电极构成，每对电极构成一个偶极子，其中 A、B 为供电偶极子，M、N 为接收偶极子。偶极-偶极装置适用于小范围的地下异常探测。温纳-斯隆贝格装置是由 4 个电极组成，其与温纳装置的区别在于，两个外侧的供电电极间距大于内

式中： ρ_s 为视电阻率 ($\Omega \cdot m$)； K 为装置系数； ΔU_{MN} 为测量电极 M、N 之间的电位差 (V)； I 为电流强度 (A)。

其中装置系数 K 取决于电极的空间排列方式，其计算公式如下：

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \tag{2}$$

式中： K 为装置系数； AM 、 AN 、 BM 、 BN 为电极间距 (m)。

当地下半空间存在低阻地质体时，正常的电流会被低阻体吸引，导致地表 MN 位置的实际电流密度有所减少；而当地下半空间存在高阻地质体时，正常的电流受到高阻体的排斥，使得地表 MN 位置的实际电流密度增大^[20]。图 1 为有高阻地质体和低阻地质体存在时的电场。

高密度电阻率法应用在探测工作中的装置形式较多，有温纳装置 (Wenner array)、偶极-偶极装置 (dipole-dipole array)、温纳-斯隆贝格装置 (Wenner -

侧的测量电极间距，较大的供电电极间距可以使电流穿透到更深的地层，这也使斯隆贝格装置能够探测到比温纳装置更深的地层^[21]。温纳-斯隆贝格装置适用于断层和地层倾斜的探测。在单极-单极装置中，供电电极 B 和测量电极 N 在距离供电电极 A 和测量电极 M 无穷远处接地。在此情况下，供电电极 B 在测量电极 M 处产生的电位变化极小，同理，供电电极 A 在测量电极 N 处产生的电位变化也极小，二者所产生的电位变化在实际应用中可忽略不计。单极-单极装置适用于岩性分界面的探测。

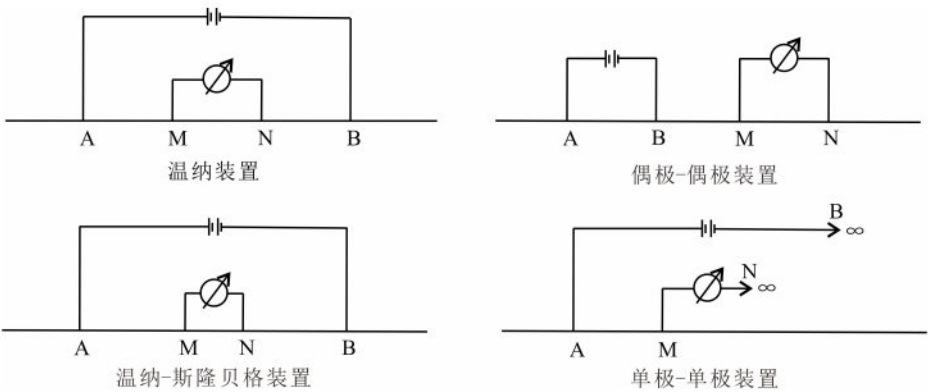


图 2 4 种装置形式

Fig. 2 Four types of electrode array configurations

3 不同装置形式对孤立异常体的探测能力

地层中往往会存在一些孤立的部分，可能是空洞，也可能是某些大块的岩石，或是被水填充的采空区，这些都会引起地层局部电阻率出现异常情况。为了方便研究，笔者在所假设的地层中构建较为规则的异常体进行简单分析。

如图 3 所示，设地层围岩电阻率为 $2\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，某单一孤立地电异常体电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ ，使用 RES2DMOD 正演软件建立单一孤立低阻异常体正演模型，来模拟采空区完全充水的情况。其上边界

在地下深度 18.20 m 处，下边界在深度 23.30 m 处，左侧边界在水平位置 96 m 处，右侧边界在水平位置 100 m 处。正演模拟中布置了 51 个电极，改变电极个数可以控制横向的距离。电极间距设置为 4 m，改变电极间距可以控制测量的精度。

分别更改装置形式为温纳装置、偶极-偶极装置、温纳-斯隆贝格装置和单极-单极装置后导出数据，通过 RES2DINV 反演计算程序进行数据处理与分析，反演方法采用最小二乘法，迭代次数设置为 3 次，得到 4 种装置的反演效果如图 4 ~ 7 所示。

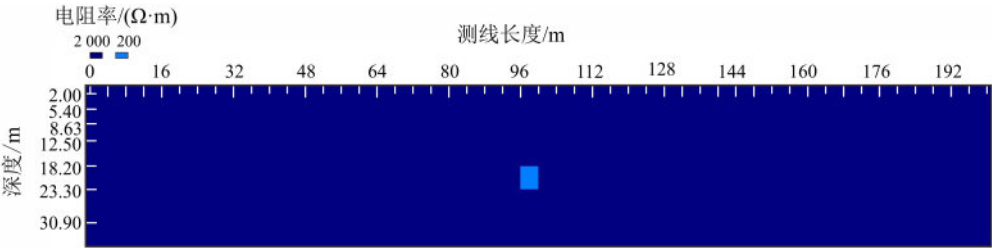


图 3 单一孤立低阻异常体正演模型

Fig. 3 Forward model of isolated low-resistivity anomaly

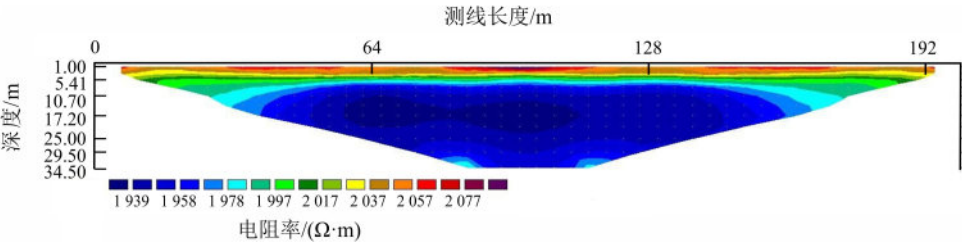


图 4 温纳装置下孤立低阻异常体反演结果

Fig. 4 Inversion result for isolated low-resistivity anomaly using Wenner array

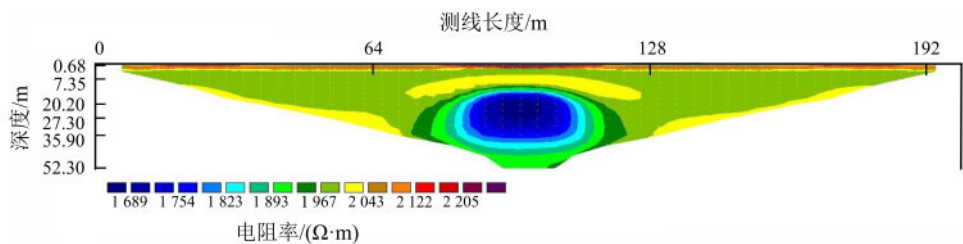


图 5 偶极-偶极装置下孤立低阻异常体反演结果

Fig. 5 Inversion result for isolated low-resistivity anomaly using dipole-dipole array

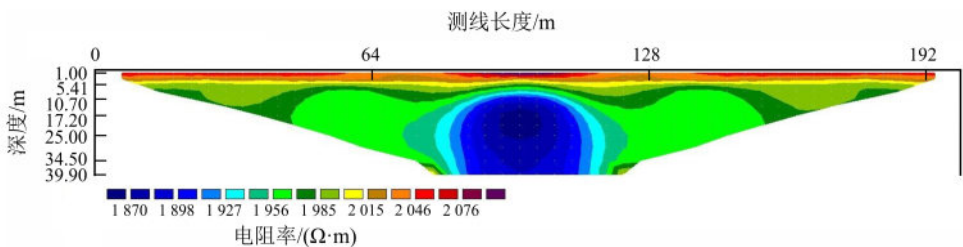


图 6 温纳-斯隆贝格装置下孤立低阻异常体反演结果

Fig. 6 Inversion result for isolated low-resistivity anomaly using Wenner-Schlumberger array

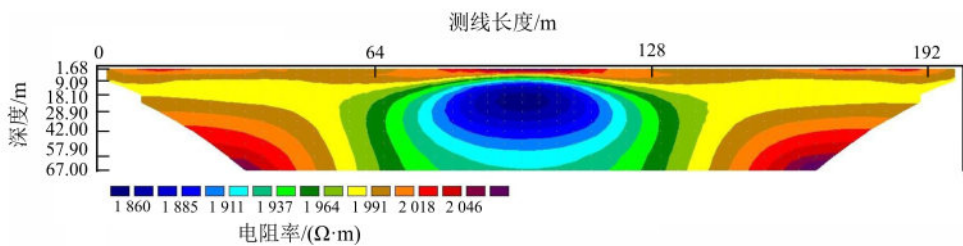


图 7 单极-单极装置下孤立低阻异常体反演结果

Fig. 7 Inversion result for isolated low-resistivity anomaly using pole-pole array

从反演结果来看，偶极-偶极装置（图 5）在对孤立低阻异常体的反演中表现较好，能够准确地定位和描述地下低阻体的几何形状和电性特征，给出清晰的异常体分布图像，具有较高的准确性和合理的分辨率。通过观察温纳-斯隆贝格装置（图 6）和单极-单极装置（图 7）的反演图像，能够大致辨认出异常体的位置，但二者的准确性不及偶极-偶极装置。而温纳装置（图 4）对于孤立低阻异常体的反演结果存在一定的失真和变形，反演结果与其他 3 种装置所获结果存在显著差异，这种差异可能与异常体埋深较深有关。

此外，采空区也可能出现一半充水、一半为空

气的情况，也就是不完全充水空洞。为此建立半高阻半低阻正演模型以模拟这种现象。如图 8 所示，假设地层围岩电阻率为 $2\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，低阻异常体电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ ，高阻异常体电阻率为 $100\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，两者紧密相连，组成半高阻半低阻异常体。高阻异常体上边界在地下深度 $14.80\ \text{m}$ 处，下边界在深度 $18.20\ \text{m}$ 处，左侧边界在水平位置 $96\ \text{m}$ 处，右侧边界在水平位置 $100\ \text{m}$ 处。低阻异常体上边界在地下深度 $18.20\ \text{m}$ 处，下边界在深度 $23.30\ \text{m}$ 处，左右边界与高阻异常体相同。正演模拟中布置了 51 个电极，电极间距设置为 $4\ \text{m}$ 。

分别更改装置形式为温纳装置、偶极-偶极装

置、温纳-斯隆贝格装置和单极-单极装置后导出数据，通过 RES2DINV 反演软件进行数据处理与分析，反演方法和迭代次数与上文相同，得到 4 种装置的反演效果如图 9 ~ 12 所示。

从反演结果来看，4 种装置形式下对孤立半高阻半低阻异常体的反演都没有达到理想的准确度。对比来看，偶极-偶极装置（图 10）的表现相对出色，通过观察反演图像，能够大致识别出低阻异常

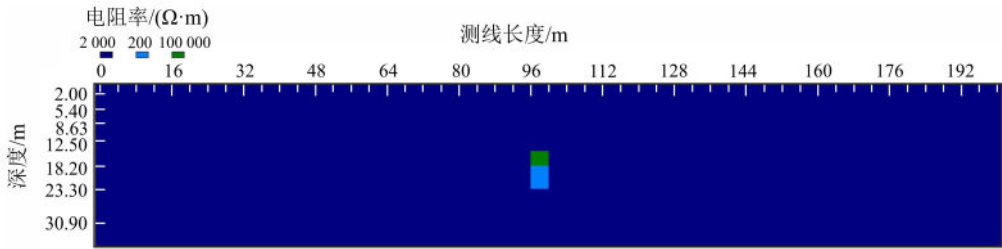


图 8 不完全充水空洞正演模型
Fig. 8 Forward model of partially water-filled cavity

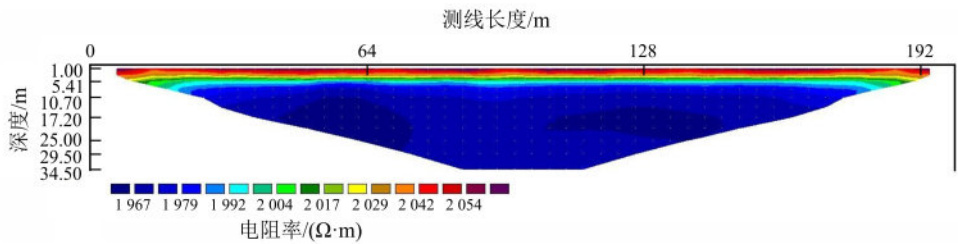


图 9 温纳装置下孤立半高阻半低阻异常体反演结果
Fig. 9 Inversion result for isolated semi-high and semi-low resistivity anomaly using Wenner array

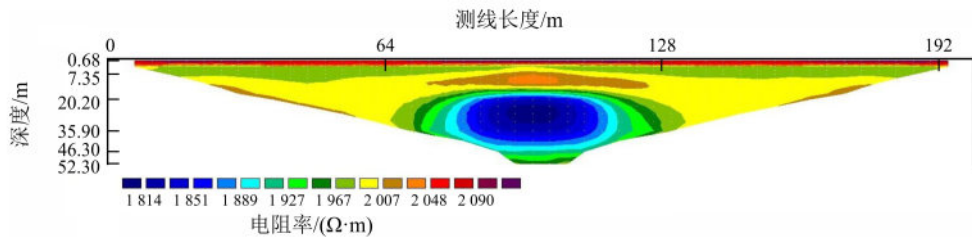


图 10 偶极-偶极装置下孤立半高阻半低阻异常体反演结果
Fig. 10 Inversion result for isolated semi-high and semi-low resistivity anomaly using dipole-dipole array

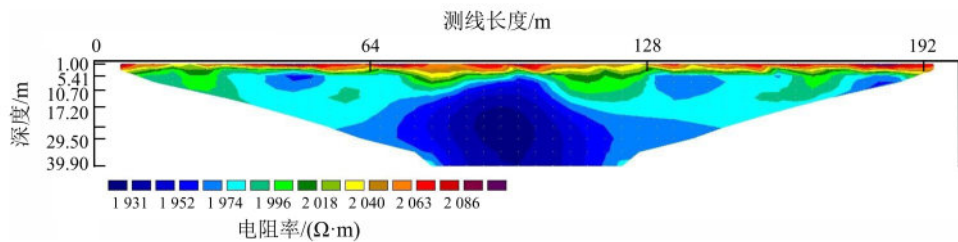


图 11 温纳-斯隆贝格装置下孤立半高阻半低阻异常体反演结果
Fig. 11 Inversion result for isolated semi-high and semi-low resistivity anomaly using Wenner-Schlumberger array

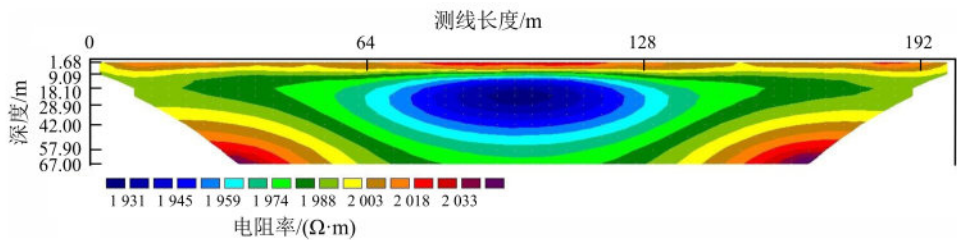


图 12 单极-单极装置下孤立半高阻半低阻异常体反演结果

Fig. 12 Inversion result for isolated semi-high and semi-low resistivity anomaly using pole-pole array

体的上方存在一个高阻异常体；温纳-斯隆贝格装置（图 11）和单极-单极装置（图 12）对低阻异常体的反演结果较为明显，对高阻异常体的反演结果不够清晰；温纳装置（图 9）的反演结果存在明显的失真和变形，形状的扭曲和扩散可能导致部分细节信息丢失。

4 实际探测结果分析

本次工程采用偶极-偶极的装置形式进行探测，道间距 4 m。寻找相对平坦的地形来确保电极稳定，减少干扰。给电极周围的土壤适当浇水，以避免接地电阻过大。将野外采集的原始数据经过转换后，生成各测点在不同深度的视电阻率数据文件。

对数据进行预处理，剔除其中的非点（主要为地面上接地不良的点引发的“串珠状”或“八字型”异常）。随后，将经过预处理的数据导入高密度电阻率法的反演系统，运用最小二乘法进行反演，最终解释成图。本次工程共有 14 条测线，选取其中一条有代表性的测线 1 进行分析。

图 13 为测线 1 的反演结果图，在测线的 115 m 处（深度约 30 m）发现低阻区，与周边有明显差异。依据高密度反演结果图，并结合现场的地质和水文地质条件进行分析，此处的低阻区推断为采空塌陷区。塌陷导致顶面岩土体的电阻率与采空区的电阻率差异较小。

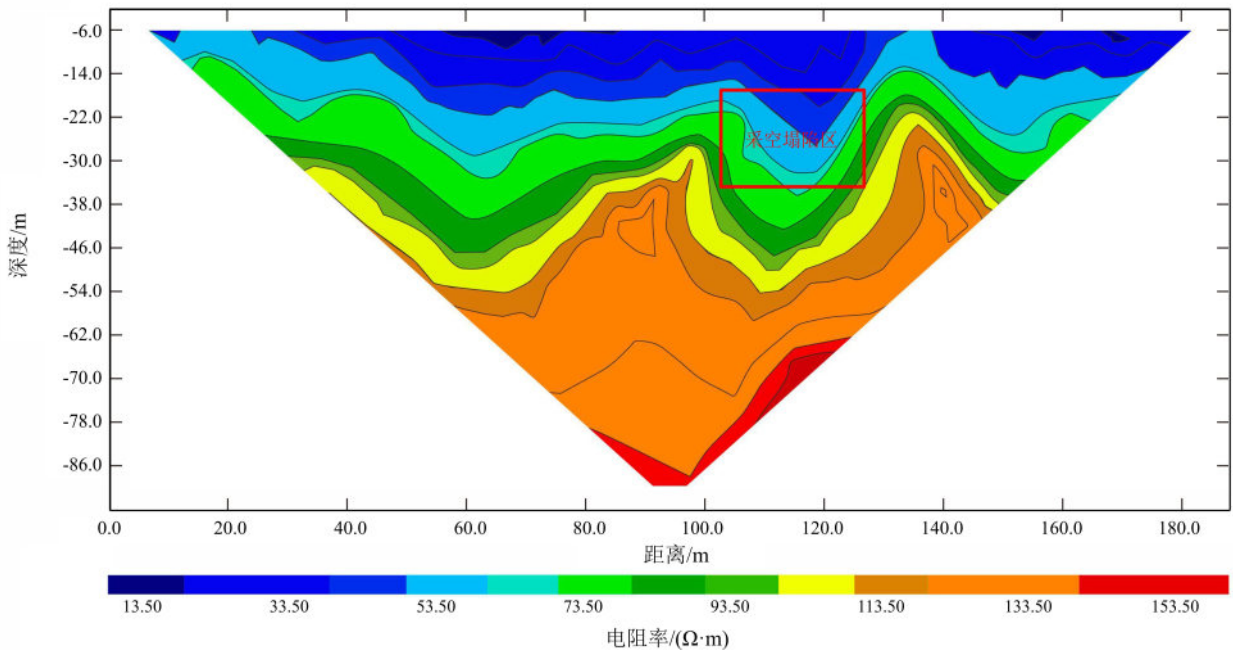


图 13 测线 1 的反演结果

Fig. 13 Inversion result for survey line 1

从所取测线的反演结果来看,对怀疑存在采空区异常的地方,高密度电阻率法能较好地在相关图像上进行反映,表明该方法在采空区异常探测中的有效性和优势。这对于初步划定采空区的大致范围以及估算采空区的发育深度具有重要意义。然而,由于体积效应的存在,高密度电阻率法所探测到的异常范围往往大于实际采空区的范围。因此,采用综合地球物理方法(比如将高密度电阻率法与地震勘探法、瞬变电磁法等方法相结合)进行探测,可以有效弥补单一方法的局限性。不同物理场对异常体的响应机制各不相同,通过数据互补与交叉验证,可以进一步提高异常体范围界定的准确性。

5 结论

(1) 不同装置形式对孤立异常体的探测能力有一定的差异。数值模拟结果表明偶极-偶极装置对充水以及部分充水的空洞即孤立低阻异常体的探测能力较强,更加适用于孤立异常体的探测,有较高的分辨率。

(2) 工程实例数据处理结果进一步验证了高密度电阻率法在地球物理探测中的可靠性和有效性,偶极-偶极装置在金矿采空区探测中有较好的效果,可用于采空塌陷区的探测。

参考文献:

- [1] 杨振威,严加永,刘彦,等. 高密度电阻率法研究进展[J]. 地质与勘探, 2012, 48 (5): 969-978.
YANG Z W, YAN J Y, LIU Y, et al. Research progresses of the high-density resistivity method [J]. Geology and Exploration, 2012, 48 (5): 969-978.
- [2] 马德锡,任喜荣,宋炯,等. 高密度电法在北巴颜喀拉山夸尔贡玛锡金矿点找矿中的应用[J]. 黄金科学技术, 2022, 30 (4): 498-507.
MA D X, REN X R, SONG J, et al. Application of high density electrical method in prospecting for Duoguma antimony gold ore spot in North Bayan Har Mountains [J]. Gold Science and Technology, 2022, 30 (4): 498-507.
- [3] 马圣钊,王登红,刘善宝,等. 综合勘查方法在硬岩型锂矿找矿中的应用:以马尔康稀有金属矿田加达锂矿为例[J]. 地质学报, 2020, 94 (8): 2341-2353.
MA S C, WANG D H, LIU S B, et al. The application of comprehensive prospecting methods on the hard rock

type lithium deposit: a case study of the Jiada lithium mine in the Ma'erkang rare metals orefield [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94 (8): 2341-2353.

- [4] 辛超,黄超,付荣翔,等. 高密度电法在多期次滑坡勘察中的应用研究:以半坡村滑坡为例[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45 (5): 646-653.
XIN C, HUANG C, FU R X, et al. Application of high-density electrical method in multi-stage landslide investigation: take the Banpo village landslide as an example [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45 (5): 646-653.
- [5] 蒋全科,雷宛,刘俊骐. 利用高密度电法勘探盐边县格萨拉巨型滑坡堆积体[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (5): 1853-1866.
JIANG Q K, LEI W, LIU J Q. Exploration of Gesala giant landslide accumulation in Yanbian County by high-density electrical method [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (5): 1853-1866.
- [6] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进步, 2021, 41 (5): 71-75.
LIU X, PENG Y W, YUAN Z H, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (5): 71-75.
- [7] 孔繁良,徐超,李军. 高密度电法在新疆某水库大坝坝险隐患探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19 (1): 16-20.
KONG F L, XU C, LI J. Application of multi-electrode resistivity method in detection of hidden dangers of a reservoir dam in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19 (1): 16-20.
- [8] 张洪. 煤矿采空区与火烧区高密度电法探测模拟[J]. 煤矿安全, 2023, 54 (6): 76-83.
ZHANG H. Simulation of high density electrical detection of goaf and burnt-out area in coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54 (6): 76-83.
- [9] 郭伟立,冀昱坤,白运,等. 高密度电法不同装置组合反演在煤矿采空区探测中的应用[J]. 工程勘察, 2023, 51 (7): 67-71.
GUO W L, JI X K, BAI Y, et al. Application of joint inversion of high-density electrical method with different array to detect coal goaf [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51 (7): 67-71.
- [10] 罗志波,刘文强,曹朋军,等. 高密度电阻率法在山东莱州小浞河铁矿采空区勘查中的应用[J]. 地

- 质与勘探, 2020, 56 (1): 113-122.
- LUO Z B, LIU W Q, CAO P J, et al. Application of the high-density resistivity method in detecting a mined-out area in the Xiaozhuohe iron deposit of Laizhou City, Shandong Province [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56 (1): 113-122.
- [11] 王刚, 王启春, 郭广礼, 等. 高密度电法不同装置在勘察中的对比研究 [J]. *煤炭技术*, 2020, 39 (5): 68-70.
- WANG G, WANG Q C, GUO G L, et al. Comparative study on different devices of high density electric method in exploration [J]. *Coal Technology*, 2020, 39 (5): 68-70.
- [12] 赵弘韵. 招远市土地利用总体规划后评价研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- ZHAO H Y. Research on the evaluation of the overall planning of land use on Zhaoyuan City [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.
- [13] 彭晓蕾, 李碧乐, 张渊, 等. 山东招远北截金矿床的矿化特征及成矿意义 [J]. *黄金*, 2000, 21 (11): 9-11.
- PENG X L, LI B L, ZHANG Y, et al. The mineralizing feature and meaning of Beijie gold deposit of Zhaoyuan City, Shandong Province [J]. *Gold*, 2000, 21 (11): 9-11.
- [14] 李洪奎, 杨永波, 耿科, 等. 山东重大基础地质问题研究进展 [J]. *岩石学报*, 2013, 29 (2): 594-606.
- LI H K, YANG Y B, GENG K, et al. Research progress on major basic geological problems in Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29 (2): 594-606.
- [15] 耿科, 王瑞江, 李洪奎, 等. 胶西北地区北截金矿闪长玢岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2015, 89 (6): 1099-1107.
- GENG K, WANG R J, LI H K, et al. Zircon SHRIMP age of diorite-porphyrity in Beijie gold deposit from the Northwest Jiaodong area and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89 (6): 1099-1107.
- [16] 蔡美峰, 谭文辉, 任奋华, 等. 金属矿深部开采创新技术体系战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 2.
- CAI M F, TAN W H, REN F H, et al. Strategic research on innovative technology systems for deep mining of metal deposits [M]. Beijing: Science Press, 2018: 2.
- [17] 郭树林, 金家瑞, 孙立明. 地下金属矿山采矿技术进展及研究方向 [J]. *黄金*, 2003, 24 (1): 17-21.
- GUO S L, JIN J R, SUN L M. Advance in mining technique of underground metal mine and orientation of its study [J]. *Gold*, 2003, 24 (1): 17-21.
- [18] 赵兴东, 周鑫, 赵一凡, 等. 三山岛金矿连续规模化智能开采工艺研究及应用 [J]. *金属矿山*, 2022 (5): 45-49.
- ZHAO X D, ZHOU X, ZHAO Y F, et al. Study and application of continuous large-scale intelligent mining technology in Sanshandao gold mine [J]. *Metal Mine*, 2022 (5): 45-49.
- [19] 刘栋. 高密度电法仪器的研发与应用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- LIU D. Development and application of electrical resistivity tomography instrument [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [20] 章帮伟. 基于电阻率法土壤污染物运移监测技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHANG B W. Research on monitoring technology of soil pollutant transport based on resistivity method [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [21] 李赛. 高密度电阻率法长期监测异常区自动识别、预警方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- LI S. Research on automatic identification and early warning methods for anomalous zones in long-term monitoring using high-density electrical resistivity [D]. Changchun: Jilin University, 2024.