

# 高密度电阻率法在某采空区勘查中的应用

黄祥祥, 马 森, 王浩文, 孙鹏飞\*

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸  
Email: 1793905744@qq.com, \*huowang6886@163.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月14日; 发布日期: 2020年12月23日

## 摘 要

采空区的出现常常会存在一些潜在的危险, 可能造成地面沉降、裂缝、建筑物基础设施等破坏。因此, 为了避免采空区对地上的危害, 需要进行采空区的探测工作。根据采空区与围岩层之间存在的电性差异, 利用高密度电阻率法基本查明了采空区的位置、埋深及分布范围。结果表明, 高密度电阻率法是采空区调查评价中的一种行之有效的探测方法。

## 关键词

采空区, 高密度电阻率法, 异常特征

# Application of High-Density Resistivity Method in a Goaf Survey

Xiangxiang Huang, Sen Ma, Haowen Wang, Pengfei Sun\*

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei  
Email: 1793905744@qq.com, \*huowang6886@163.com

Received: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Dec. 14<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2020

## Abstract

The emergence of goafs often has some potential hazards, which may cause ground subsidence, cracks, and damage to buildings and infrastructure. Therefore, in order to avoid the hazards of the goaf to the ground, it is necessary to carry out the detection of the goaf. According to the electrical difference between the goaf area and the surrounding rock, the location, buried depth and distribution range of the goaf area were basically found out using the high-density electrical method. The results show that the high-density resistivity method is an effective detection method in the

\*通讯作者。

survey and evaluation of goafs.

## Keywords

Goaf, High-Density Resistivity Method, Abnormal Characteristics

Copyright © 2020 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

近年来,随着能源技术的快速发展,部分地区出现地下采空区。采空区的出现使得周围岩体的原有应力平衡状态遭受破坏,上覆岩层失去支撑,产生了移动变形,直至破坏塌落[1]。因而,利用科学合理的地球物理方法查明采空区的分布范围及填充状况,为采空区治理和地质灾害评估提供重要数据资料,可以最大程度地消除采空区给工程建设带来的安全隐患,具有显著的经济及社会效益[2]。

目前对于采空区的探测有很多方法,比如采用浅层地震法、探地雷达法、高密度电阻率法、瞬变电磁法等多种物探技术,不同的物探方法其适用性不同。浅层地震发主要是利用采空区的周围岩层之间的速度和波阻抗差异来探测地下采空区,其探测深度大,但是费用较高;探地雷达法主要是通过发射高频的电磁波经过地下传导后接收到反射波的相关参数来推断地下介质,其主要适用于浅部探测;而高密度电阻率法以及瞬变电磁法主要是利用采空区同周围岩层的电性差异来探测采空区,但是由于采空区周围存在电磁以及金属物干扰,瞬变电磁法的数据就会受到较大影响。综上所述,高密度电阻率法是最佳的选择,其与常规的电阻率法相比较,高密度电阻率法具有点距小、成本低、效率高、采集密度大等优点[3][4]。

因此,在不同地质体以及工作目的方面,郑冰、柳建新、程庆、马志飞[5][6][7][8]等都不同程度地探讨两部分或仅仅几种装置的探测效果;中国地质科学院岩溶地质研究所的郑智杰[9]对不同装置类型电极距对岩溶管道的响应特征进行研究;赵志宇(2019)[10]将高密度电阻率法应用于嘎海山水库水文地质勘探中;贾海磊(2018)[11]将高密度电阻率法应用于堤坝渗漏抢险探测中;何清立(2016)[12]等将高密度电阻率法应用于滑坡地质灾害勘查治理中。M. M. Nordiana (2014)[13]分析了电阻率测量中组合数据的应用可能是提高浅层地下电阻率的有用策略。本文将通过高密度电阻率法对于采空区域进行勘探与评价,确定其形态、位置以及分布范围。

## 2. 地质概况及电性特征

### 2.1. 地质概况

工作区附近区域内基岩出露广泛,基本为太古代地层。还包括元古界甘陶河群南寺组第三段( $P_{ms}^3$ ),下部蛋青色厚-巨厚层状白云岩夹板岩、砂岩;上部砂岩、板岩夹少量白云岩。工作区内基岩以该层为主,该层为受辉长岩脉接触变质作用影响的区域,白云岩变质为滑石白云岩、钙质滑石岩,砂岩变质为石英岩。受侵入作用影响,该层产状变化较大,北侧产状倾向北,倾角为 $29^\circ\sim 43^\circ$ ;南侧产状倾向北东或北西,倾角 $50^\circ\sim 80^\circ$ ;未变质的白云岩岩溶较不发育,以小型溶隙、溶孔为主;第四系上更新统洪坡积层( $Q_4^{pl+dl}$ ),黄土,局部夹砾石透镜体和埋藏土;底部砾石层。主要分布于台地地带,第四系厚度 $1\sim 10\text{ m}$ 不等,岩相变化较大;侵入岩(V):辉长岩脉。工作区内辉长岩脉受构造控制,大致以顺层侵入南寺组第三段地层。根据开挖揭露情况,岩脉侵入并不连续,规律性较差。

地质构造本区构造单元属中朝准地台 II 级大地构造单元山西断隆(II<sub>2</sub><sup>3</sup>), 太行拱断束(III<sub>2</sub><sup>11</sup>)。对本区影响较大的地质构造有: 紫荆关 - 灵山深断裂及定兴 - 石家庄深断裂。

## 2.2. 勘探区地球物理特征

### 2.2.1. 表浅层电性条件

本区复杂的地形条件会给野外高密度测线铺设造成困难, 并且给资料处理时的地形校正增加了难度。浅表层第四系较薄, 大多区域基岩出露, 同时因人为破坏, 造成地表条件多样化。整体来说浅层电性条件极差。

### 2.2.2. 深层电性条件

一般情况下地层在完整无破碎时其横向上电性相对均一、差异应较小, 但如果地层出现破坏, 那么地下电性条件将随之改变。本区主要地层为白云岩夹板岩、砂岩, 部分地区为侵入岩(辉长岩脉), 因此在侵入岩以外区域, 电性基本稳定。如出现侵入岩, 那么呈现部分夹层状的相对电阻率变化区域。本区采空区主要为滑石采空区, 以人工井巷开采为主, 根据地层条件, 滑石开采后, 上覆地层以变形为主, 因此本区采空区电阻率要高于周边围岩的电阻率。这一电性差异是我们利用电法寻找同一地层中采空及采空积水异常的基础和依据。

## 3. 工作方法与技术

### 3.1. 工作原理

高密度电阻率法是以地下被探测目标体与周围介质之间的电性差异为基础, 人工建立地下稳定直流电场, 依据预先布置的若干道电极采用预定装置排列形式进行扫描观测, 研究地下一定范围内大量丰富的空间电阻率变化, 从而查明和研究有关地质问题的一组直流电法勘探方法。其原理与普通的电阻率法一致, 区别于观测中设置了高密度的观测点。该方法主要是当人工向地下施加直流电流时, 在地表利用仪器观测其电场的分布, 将观测电流与电压值换算为电阻率值。而由于受到地形的影响以及地下介质的不均匀等, 其测量的电阻率值并非是掩饰的电阻率值, 实际为视电阻率值。通过研究实际视电阻率值的变化规律来确定地下目标体, 从而解决实际的工程地质问题。

### 3.2. 装置的类型

高密度电阻率法的装置类型由最初的几种到现在的目前的十几种[14][15][16]。包括温纳装置、联合剖面装置、偶极装置、三极装置、微分装置、施伦贝尔 1 装置和施伦贝尔 2 装置等。各类装置都有其实际的优缺点以及相应的应用条件, 合理选择相应的装置对于实际工作起到事半功倍的效果。本次研究主要采用温纳装置, 其被公认为最稳妥的装置类型。

温纳装置对于电阻率的垂直变化比较敏感, 一般用来探测水平目标体。其电极排列规律是: A, M, N, B (其中 A, B 是供电电极, M, N 是测量电极), AM = MN = NB 为一个电极间距, 随着间隔系数 n 由最大逐渐减小到最小, 四个电极之间的间距也均匀收拢。该装置适用于固定断面扫描测量, 其特点是测量的断面为倒梯形, 电极排列如下: 其工作方法装置见图 1。

### 3.3. 仪器的选取与测线布置

本次高密度直流电阻率法使用了重庆地质仪器厂生产的 DUK-2A 高密度电法仪器, 由 DZD-2A 多功能直流电法仪和多路电极转换器 (II) 组成。数据处理采用自主开发的直流电阻率测深处理系统。

工作区域内本次高密度电法主网度选择 10 m × 20 m (点距 10 m, 线距 20 m), 在东北部及东部边界地形限制区域, 采用 5 m × 20 m (点距, 线距 20 m) 网格布设。总计布设剖面测线 31 条, 测线长度 25.86 km (图 2)。



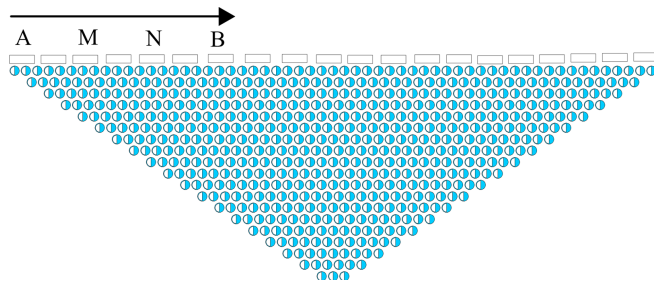


Figure 1. Schematic diagram of Wenner device  
图 1. 温纳装置示意图

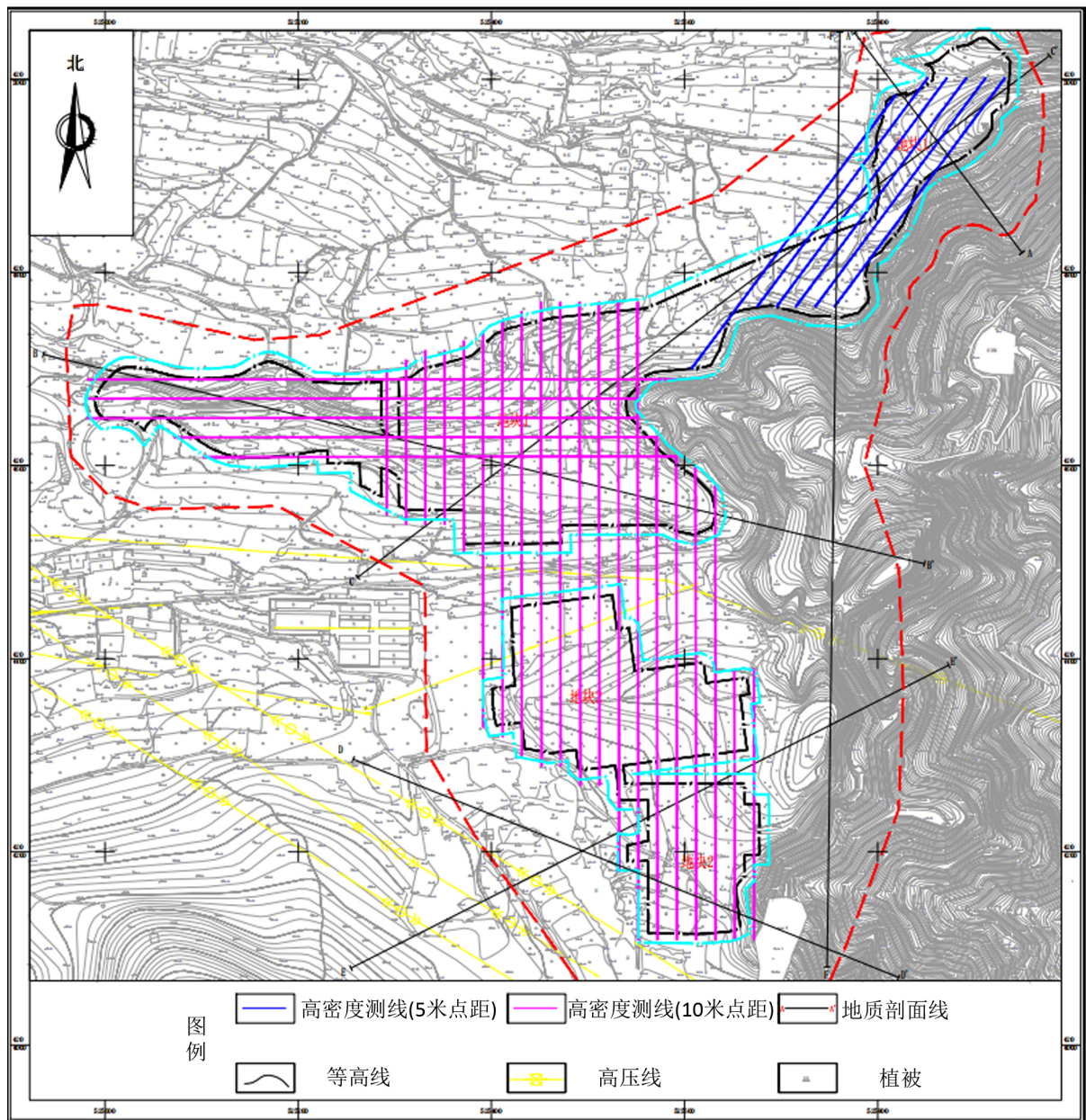


Figure 2. High-density resistivity method survey line layout drawing  
图 2. 高密度电阻率法测线布置图



## 4. 数据分析与讨论

### 4.1. 资料处理

外业采集数据结束后, 需要及时的将数据传输到计算机进行数据备份。对所获得的外业数据进行分析处理。一般情况下, 首先在数据采集过程中, 由于某一电极接地不好, 或受采集现场干扰因素的影响, 会出现一些数据突变点, 为了不造成对解释结果的影响, 对数据突变点进行剔除。其次有时会受到一些随机噪声的影响, 为了消除这些随机噪声, 采用光滑平均的方法对数据进行处理, 但平滑幅度不能过大, 以免平滑掉有用信息, 降低分辨率。还有可能高密度电阻率法的施工受地形影响较大, 虽然选择了相对有利的地形, 但仍然无法完全排除地形对数据的影响, 需要在资料处理阶段进行地形校正。根据地形对数据的影响程度, 采用相适应的地形校正方法, 如几何校正法、比值法等。本次采用 RES2DINV 瑞典反演软件进行反演处理, 网格采用有限元方法, 运用最小二乘法进行反演, 为了确保反演数据的稳定性, 迭代次数选择为 4~5 次, 设置均方根误差限值为 2%。处理后的数据可采用 Surfer 软件绘制出视电阻率断面图。

### 4.2. 资料的解释与推断

根据本次电法勘探的目的, 依据所测得的视电阻率变化规律, 结合已知资料, 由点到线, 由线到面, 由已知到未知, 从简单到复杂, 进行综合对比分析解释。本区高密度电法资料解释均为半定量解释。工作区内滑石采空区基本以人工开挖的井巷式开采, 同时上覆围岩多以变形为主, 因此采空区为整体相对高阻反映。同时巷道长度较长、开采宽度较窄, 而工作区地层为高阻地层, 因此采空区电性分辨率相对较低, 因此解译时以电阻率等值线变化形态来进行对比分析。

从 32 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 3)上可以看出, 整体的电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 向上地层视电阻率形态较为稳定, 局部纵向上有高阻异常, 但视电阻率形态相对连续, 疑似为地层变化引起的。因此 32 号点推测为不含采空区测线, 由此推测, 34~36 号点同样为不含采空区测线(图 4、图 5)。

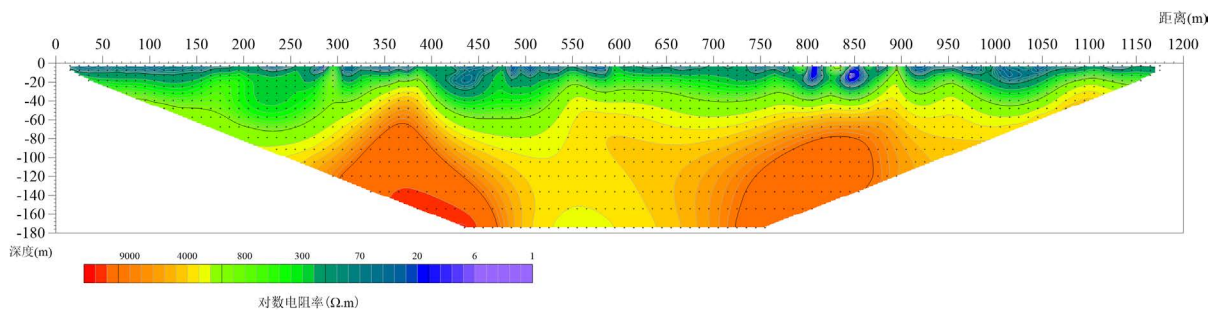


Figure 3. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 32

图 3. 32 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

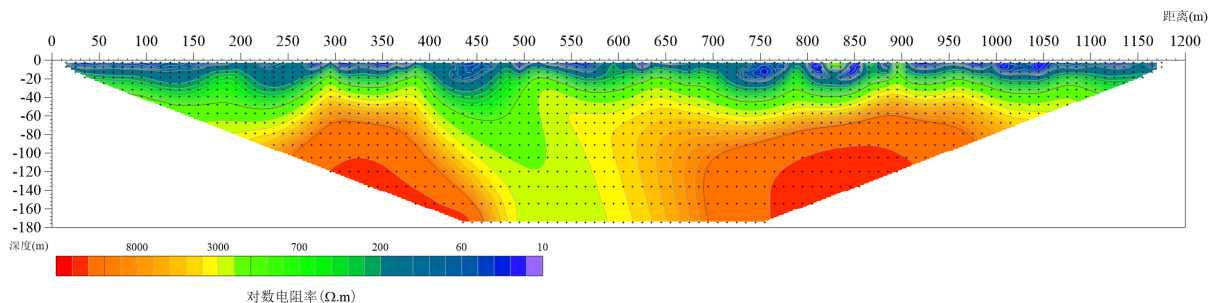
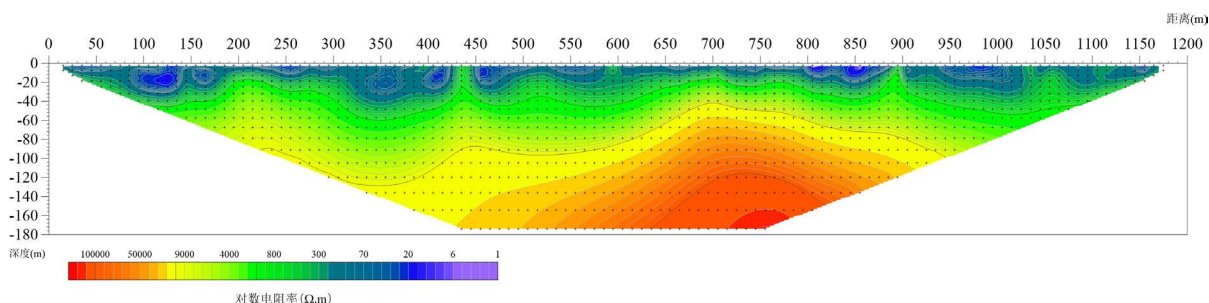


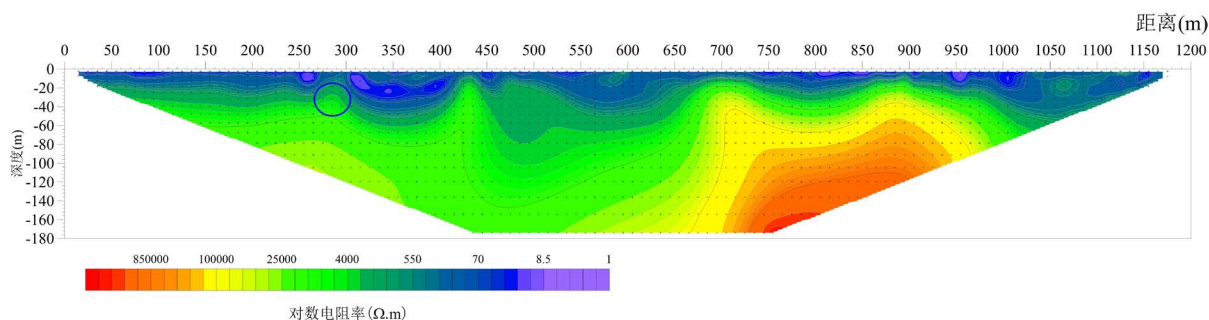
Figure 4. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 34

图 4. 34 号点高密度电阻率法视电阻率断面图



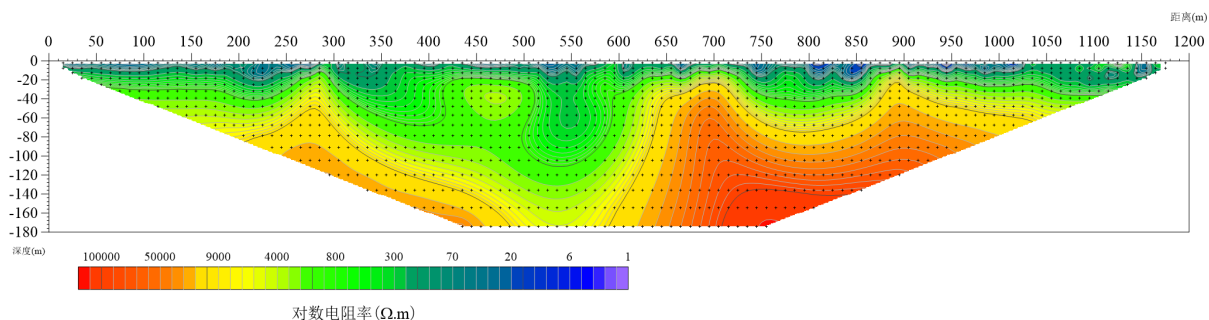
**Figure 5.** High-density resistivity method apparent resistivity section view of point 36  
**图 5.** 36 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 38 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 6)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 270~290 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续, 推测为正常地层。



**Figure 6.** High-density resistivity method apparent resistivity section view of point 38  
**图 6.** 38 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 40 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 7)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 局部纵向上有高阻异常, 但视电阻率形态相对连续, 疑似为地层变化引起的。



**Figure 7.** High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 40  
**图 7.** 40 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 42 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 8)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上视电阻率形态较为稳定, 但在 290~300 m、410~450 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续, 推测为正常地层, 大号电极视电阻率较高, 是因为接地条件造成的。

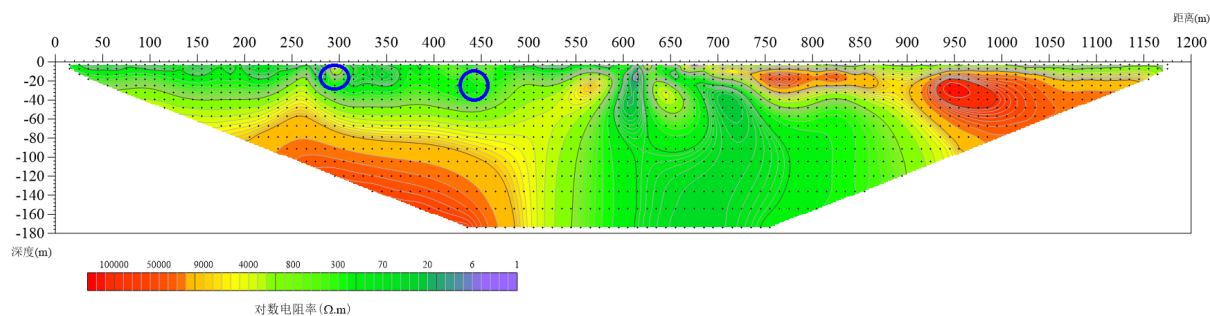


Figure 8. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 42

图 8. 42 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 44 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 9)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 290~300 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续, 推测为正常地层, 790~880 m 处纵向上视电阻率相对较高, 并且视电阻率等值线形态较差, 是因为电极接地条件造成的。

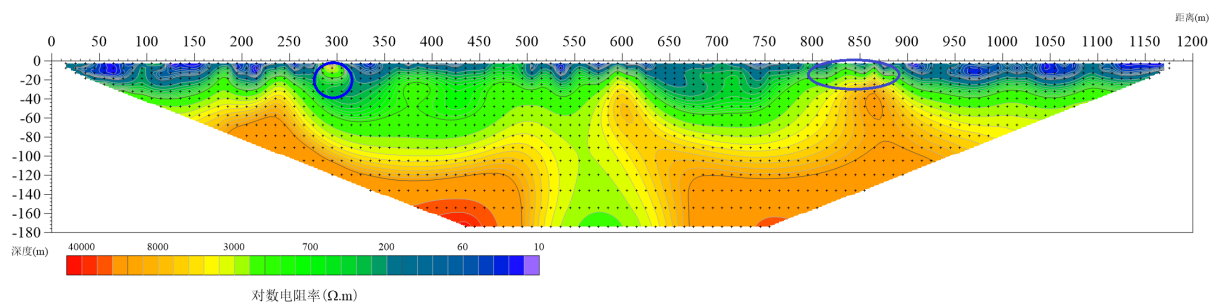


Figure 9. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 44

图 9. 44 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 46 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 10)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 局部纵向上有高阻异常, 但视电阻率形态相对连续, 同时根据高阻区呈线性, 这个部分可能是电极接地条件较差引起的假高阻异常, 因此分析为正常地层。

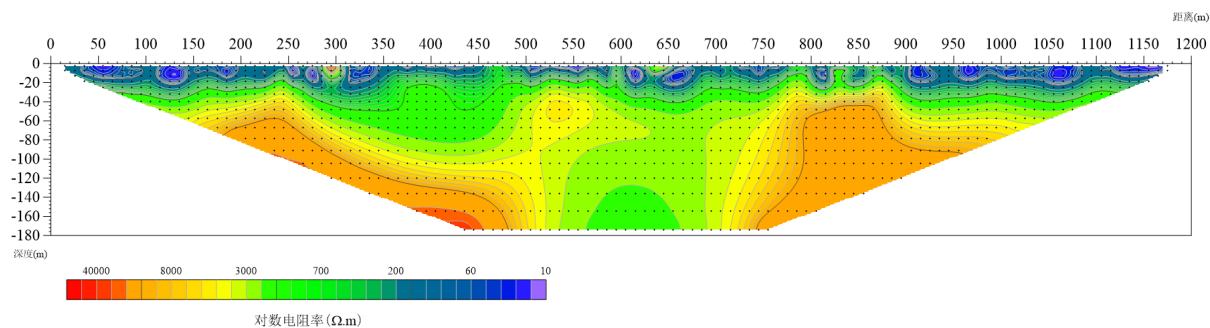
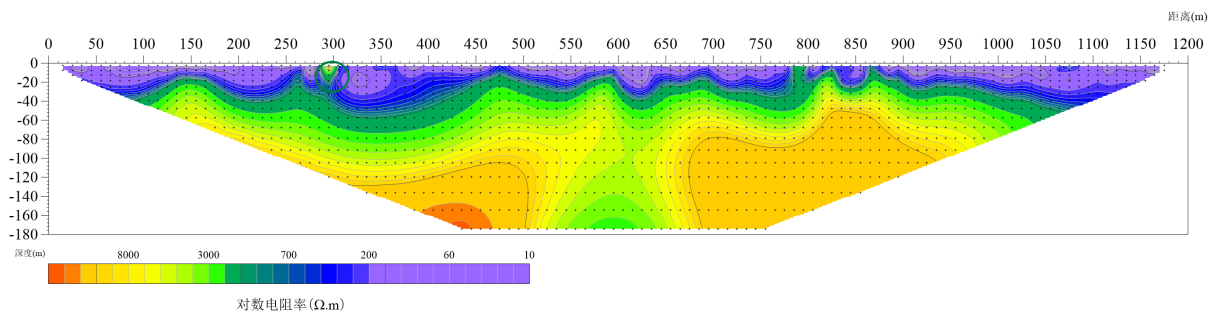


Figure 10. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 46

图 10. 46 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

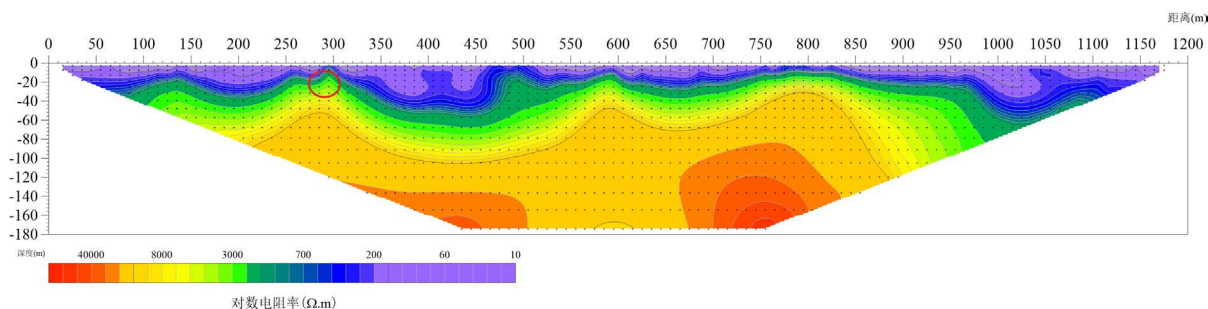
从 48 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 11)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 290~300 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中红色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续, 分析为正常地层。





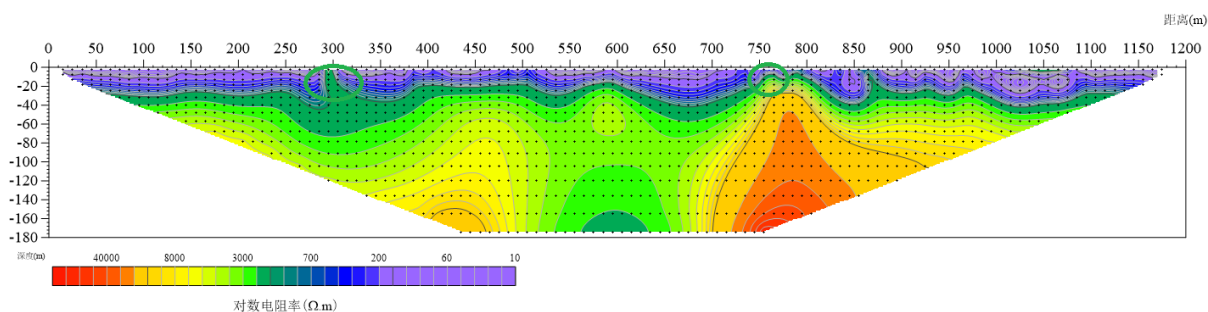
**Figure 11.** High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 48  
**图 11.** 48 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 50 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 12)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 290~300 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 且较为突出, 推测为滑石采空区异常区域(图中红色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续, 分析为正常地层。



**Figure 12.** High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 50  
**图 12.** 50 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 52 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 13)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 300~310 m、760~780 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域, 且较为突出, 推测为滑石采空区异常区域(图中绿色圈定区域), 在 800~820 m 处高阻异常为电极影响造成的单点假异常。其它区域高阻异常区均相对连续, 分析为正常地层。



**Figure 13.** High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 52  
**图 13.** 52 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 54 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 14)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但在 290~300 m、740~760 m 处纵向上呈相对的一个高阻区

域,且较为突出,推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续,分析为正常地层。

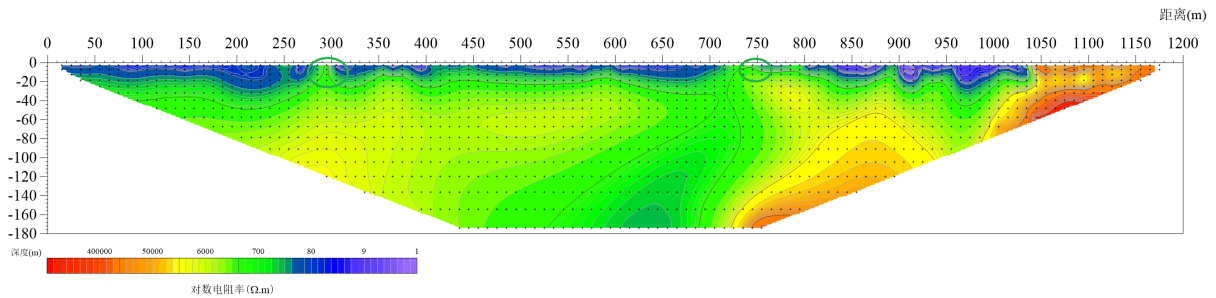


Figure 14. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 54

图 14. 54 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 56 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 15)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,但在 230~240 m、360~410 m、790~810 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域,且较为突出,推测为滑石采空区异常区域(图中绿色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续,分析为正常地层。

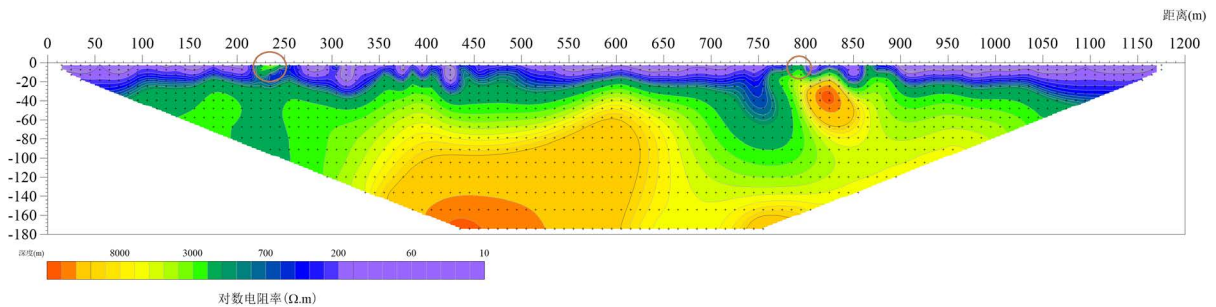


Figure 15. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 56

图 15. 56 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 58 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 16)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,但 290~310 m、890~900 m 在纵向上呈相对的一个高阻区域,且较为突出,推测为滑石采空区异常区域(图中绿色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续,分析为正常地层。

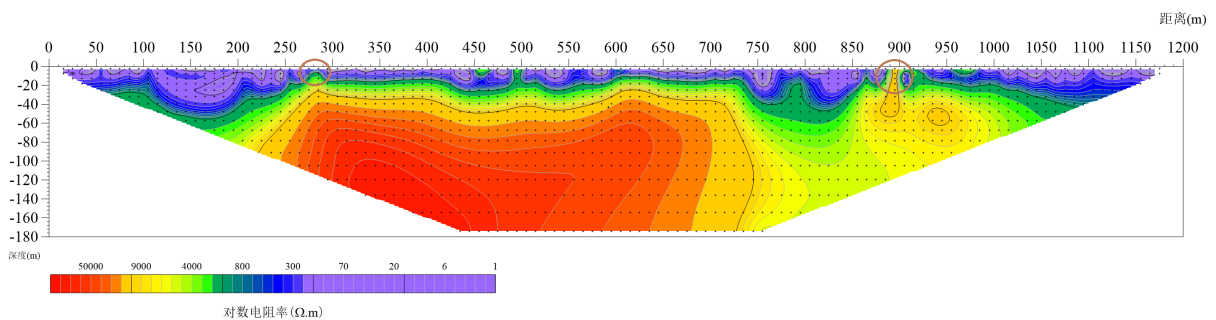


Figure 16. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 58

图 16. 58 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 60 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 17)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,但在 910~920 m 处纵向上呈相对的一个高低阻结合的电阻率等值线不规则异常区域,推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续,分析为正常地层。

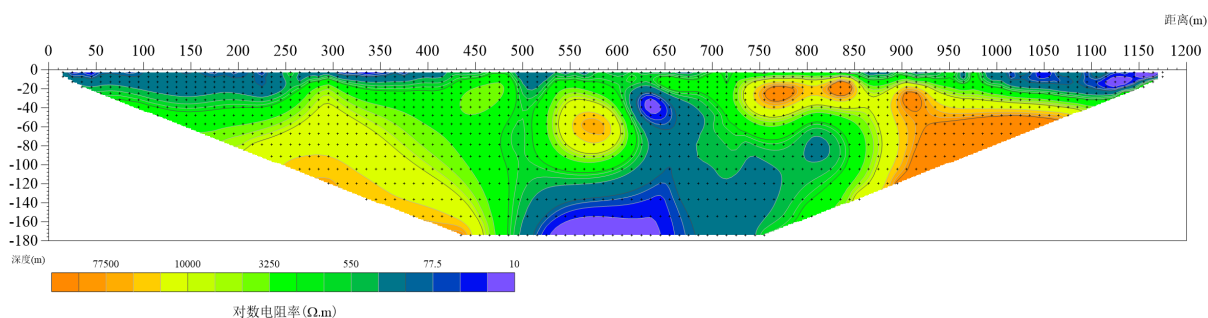


Figure 17. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 60

图 17. 60 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 62 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 18)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,在 250~270 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域,为接地电极条件较差引起的,并且呈上下连续情况,分析为正常地层。

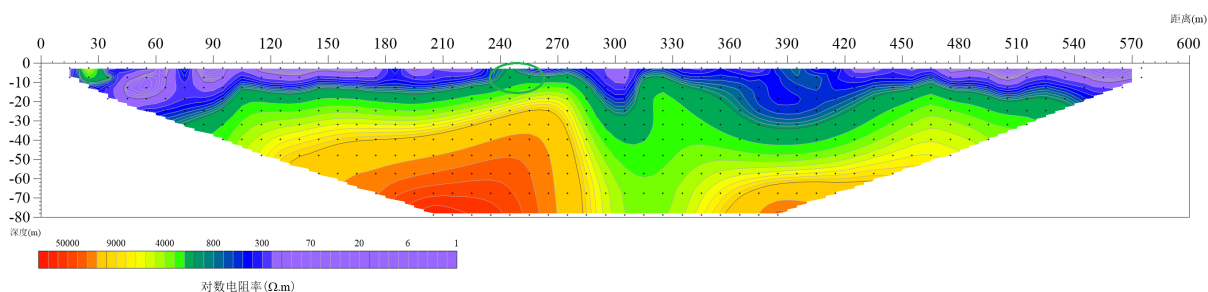


Figure 18. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 62

图 18. 62 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 64 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 19)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,其它区域高阻异常区均相对连续,分析为正常地层。

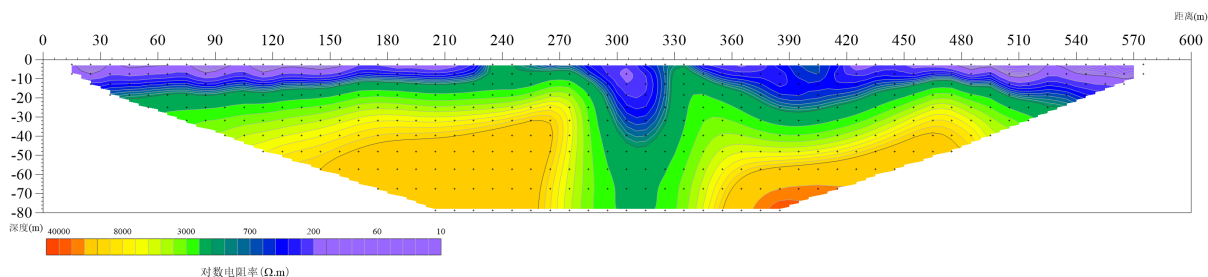


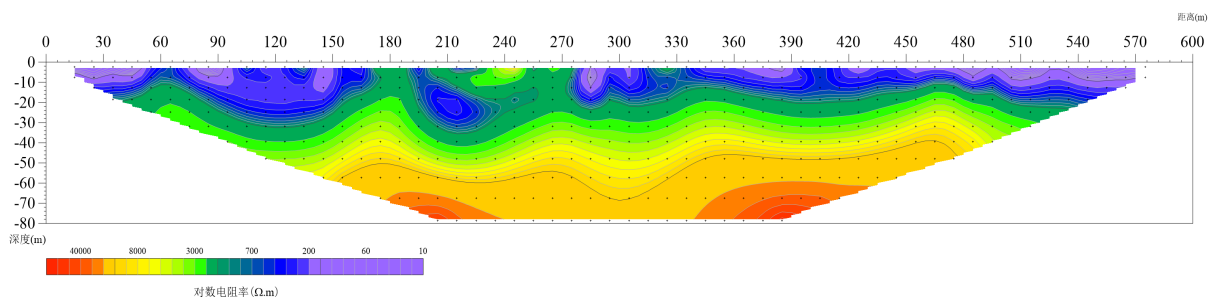
Figure 19. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 64

图 19. 64 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 66 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 20)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,在 220~260 m 处纵向上呈相对的一个高阻区域,为电极影



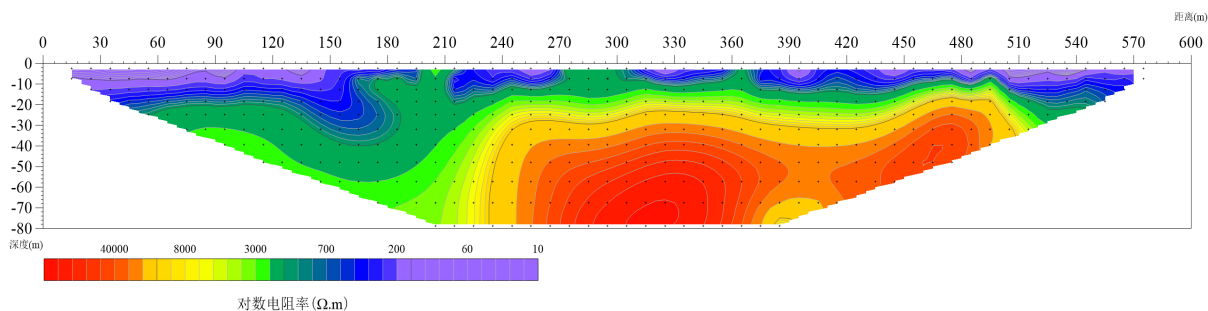
响造成的条状异常，其它区域高阻异常区均相对连续，分析为正常地层。



**Figure 20.** High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 66

**图 20.** 66 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

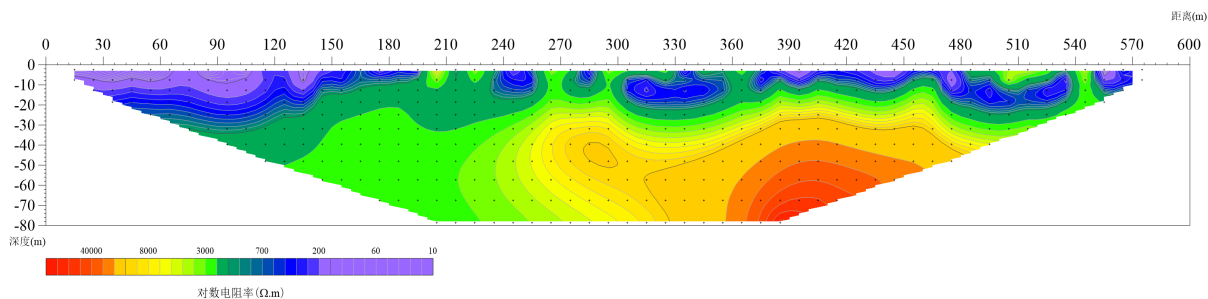
从 68 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 21)上可以看出，整体电性层相对稳定，地层分辨率相对较高，横向上地层视电阻率形态较为稳定，在 200~220 m、280~300 m 纵向上呈相对的一个高阻区域，为电极影响造成连续斜状条带，其它区域高阻异常区均相对连续，分析为正常地层。



**Figure 21.** High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 68

**图 21.** 68 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 70 号点高密度电阻率法视电阻率断面图(图 22)上可以看出，整体电性层相对稳定，地层分辨率相对较高，横向上地层视电阻率形态较为稳定，220~230 m 为一斜状异常，推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区均相对连续，分析为正常地层。



**Figure 22.** High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 70

**图 22.** 70 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 25 号线~27 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 23、图 24、图 25)上可以看出，整体电性层相对稳定，地层分辨率相对较高，横向上地层视电阻率形态较为稳定，局部纵向上有高阻异常，但视电阻率形态相对连续，疑似为地层变化引起的。

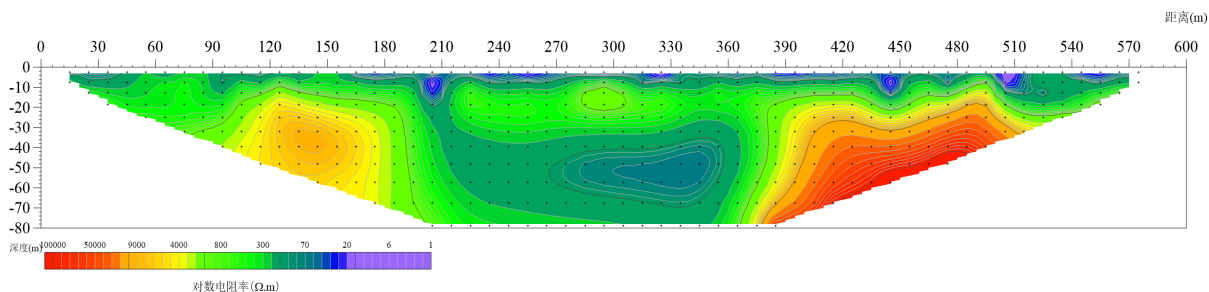


Figure 23. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 25

图 23. 25 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

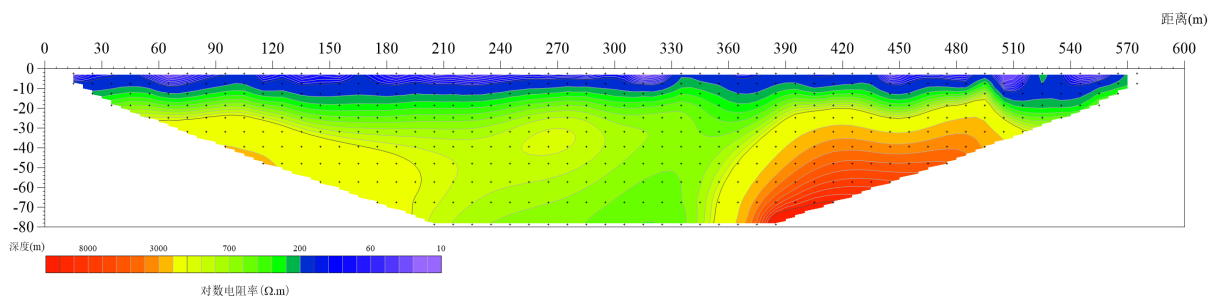


Figure 24. High-density resistivity method apparent resistivity cross-section at point 26

图 24. 26 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

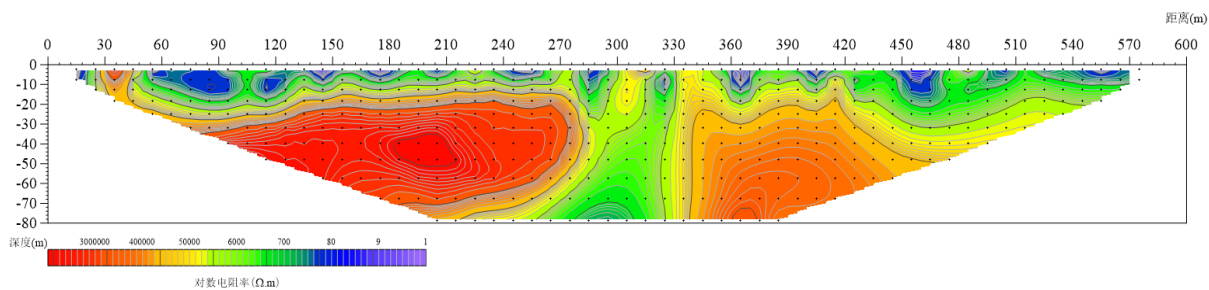


Figure 25. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 27

图 25. 27 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 28 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 26)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 但 510~550 m 在纵向上呈相对的一个高阻区域, 且较为突出, 推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区或连续或呈线性分布, 为电极接地条件造成的假异常。

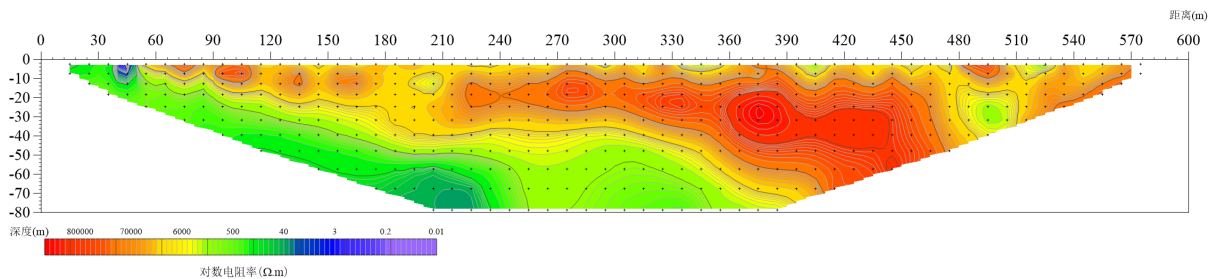


Figure 26. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 28

图 26. 28 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 29 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 27)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,但 460~500 m 在纵向上呈相对的一个高阻区域,且较为突出,推测为滑石采空区异常区域(图中红色圈定区域)。其它区域高阻异常区较为连续,为正常地层。

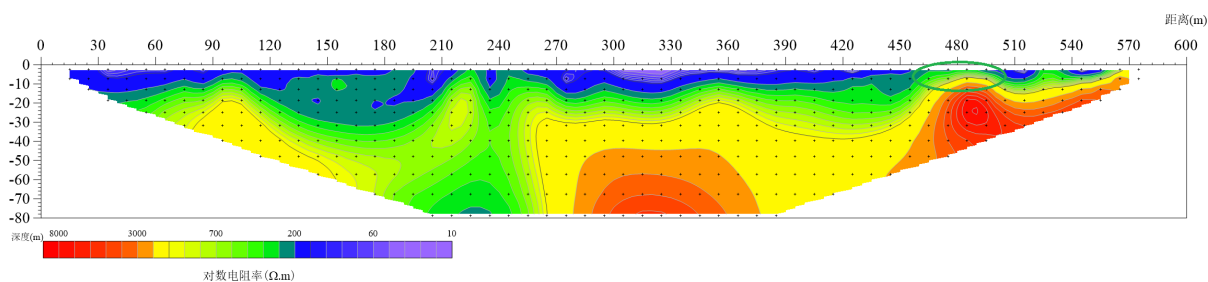


Figure 27. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 29

图 27. 29 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 1a 号线~2b 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 28、图 29)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,局部纵向上有高阻异常,但视电阻率形态相对连续,疑似为地层变化引起的。

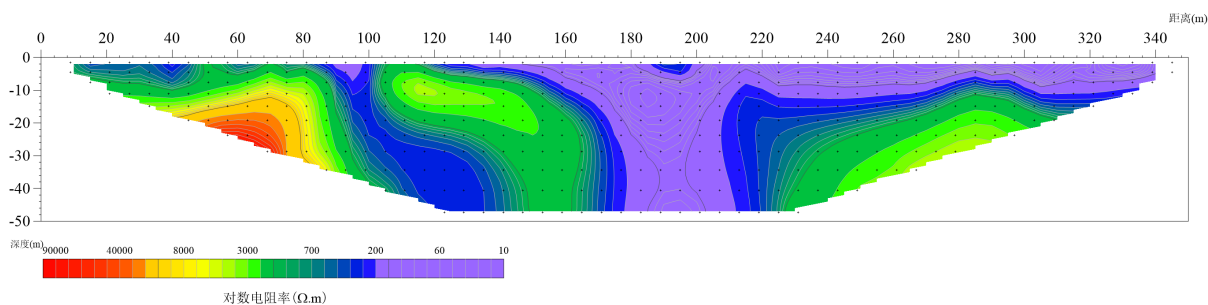


Figure 28. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 1a

图 28. 1a 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

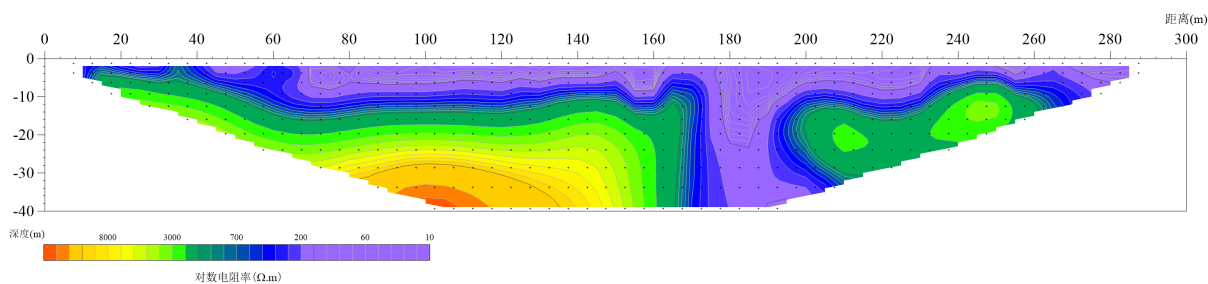


Figure 29. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 2b

图 29. 2b 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 3c 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 30)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,170~230 m 在纵向上呈相对的一个低阻区域,且较为突出,推测为地形及地形影响造成的,其它区域高阻异常区较为连续,为正常地层。

从 4d 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 31)上可以看出,整体电性层相对稳定,地层分辨率相对较高,横向上地层视电阻率形态较为稳定,但 170~210 m 在纵向上呈相对的一个高阻区域,且较为突出,推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区较为连续,为正常



地层。

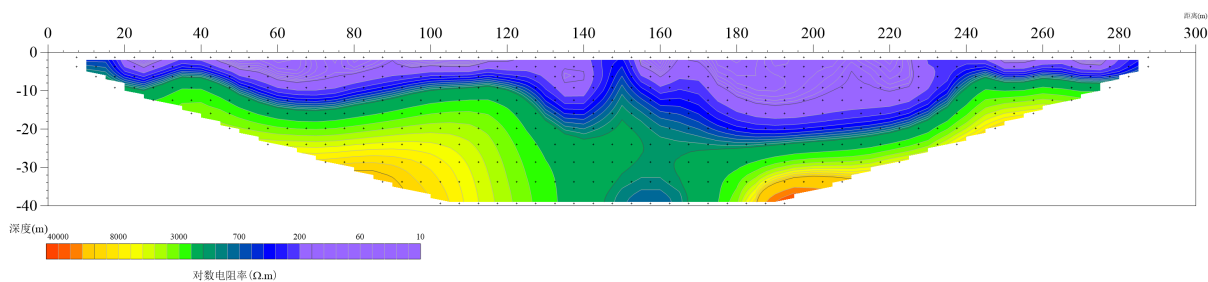


Figure 30. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 3c

图 30. 3c 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

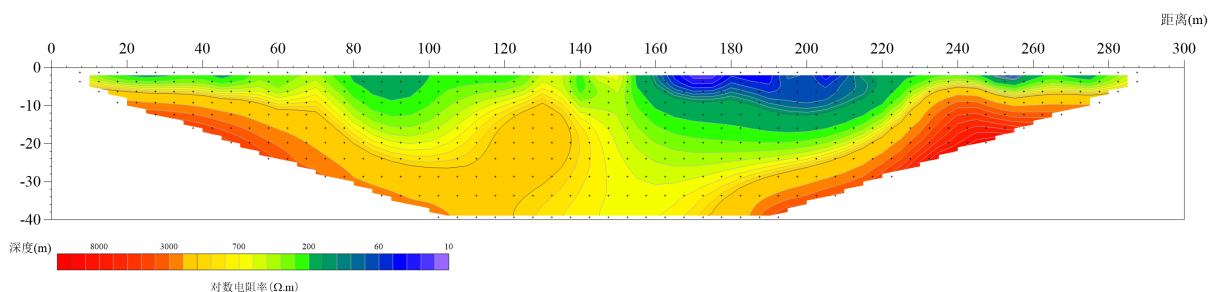


Figure 31. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 4d

图 31. 4d 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 5e 号线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 32)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 150~230 m 为一相对连续的低阻区, 分析为地形影响造成的, 但 200~230 m 在纵向上呈相对的一个低阻中的相对高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中红色圈定区域)。其它区域高阻异常区较为连续, 为正常地层。

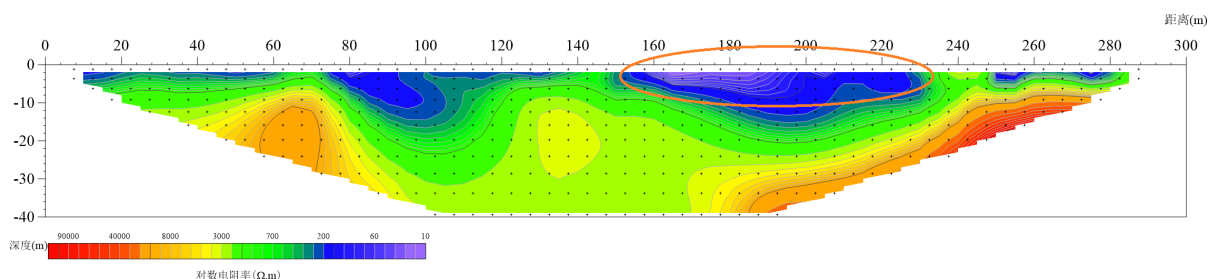


Figure 32. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 5e

图 32. 5e 号点高密度电阻率法视电阻率断面图

从 6f 线高密度电阻率法视电阻率断面图(图 33)上可以看出, 整体电性层相对稳定, 地层分辨率相对较高, 横向上地层视电阻率形态较为稳定, 170~240 m 为一相对连续的低阻区, 分析为地形影响造成的, 但在 210~230 m 处纵向上呈相对的一个低阻中的相对高阻区域, 推测为滑石采空区异常区域(图中蓝色圈定区域)。其它区域高阻异常区较为连续, 为正常地层。

图 34 为高密度电阻率法按照各测线对比分析、同时结合已知资料综合解译后圈定的采空异常分布情况, 图中绿色填充为推测采空区分布位置, 本次物探调查采空区域总计 7 处, 区内分布 5 处, 均位于控制区边缘地带, 大多数呈线性分布。

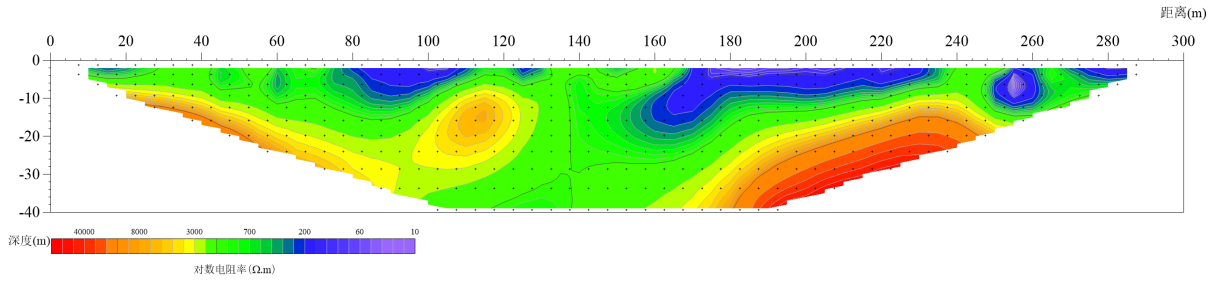


Figure 33. High-density resistivity method apparent resistivity cross section at point 6f  
 图 33. 6f号点高密度电阻率法视电阻率断面图

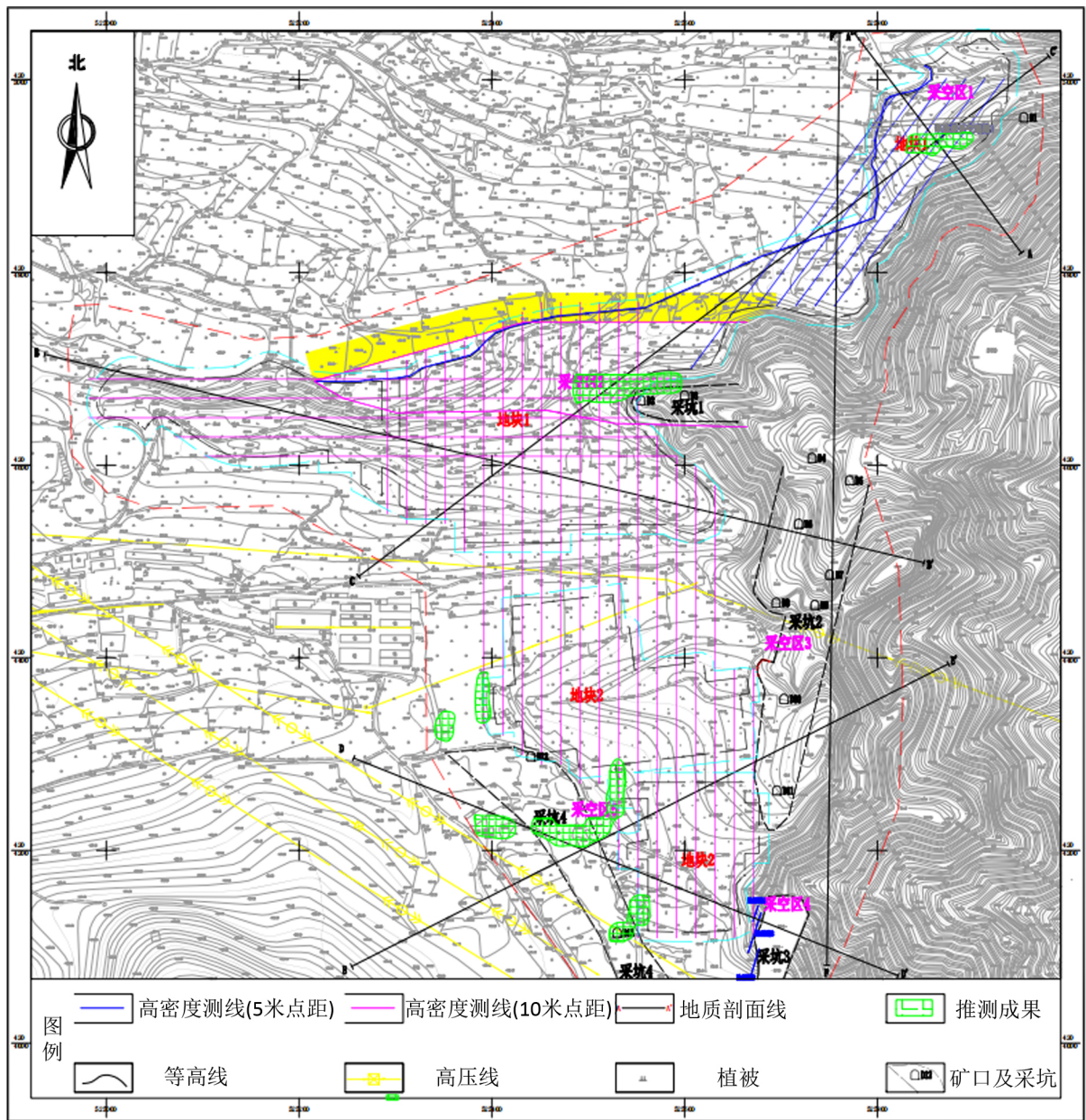


Figure 34. Distribution location map of goaf  
 图 34. 采空区分布位置图

## 5. 结论与建议

### 5.1. 结论

从本次剖面解释情况以及结合地质调查资料分析,工作区及周边共发现坑口 13 个,历史采坑 4 个,地表串珠状塌陷 1 个。从分布情况看,东部及南部坑口及采坑均分布较多,同时根据高密度解译情况,工作区内东部及南部采空区分布较多,与已知调查情况一致。东北部仅发现一个坑口,发现一地表串珠状的塌陷,同时高密度电阻率法解译采空区同样呈线状分布,与已知调查情况基本一致。因此本次的高密度电阻率法对于查明浅部采空区是一种行之有效的技术手段。为该区采空区的后续治理及开发提供了较为详实的基础资料。

### 5.2. 建议

地球物理勘探技术对采空区的分析均为静态和定性解释,同时受各种干扰因素影响,部分解译成果可能有所偏差,建议进行钻探验证及其它相应的地质工作,同时将获取的已知成果与实际结果进行比较,并根据验证情况及时对解译成果进行修正,提高资料准确率。

## 基金项目

国家青年科学基金项目(项目批准号:41604069);河北省教育厅青年基金项目(项目批准号:QN2017310)。

## 参考文献

- [1] 李耀华,李旭. 煤矿采空区的形成及地球物理勘探方法的选择[J]. 资源环境与程, 2014, 28(3): 332-336.
- [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] 李洪嘉,闫绍波,张超. 综合物探技术在煤矿采空区探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(5): 714-720.
- [4] 苏兆锋,陈昌彦,肖敏,贾辉,白朝旭. 精细高密度电阻率法在白云岩矿采空区中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 45-47.
- [5] 郑冰,李柳德. 高密度电法不同装置的探测效果对比[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 33-39.
- [6] 柳建新,曹创华,郭荣文,谢国峰,刘颖. 不同装置下的高密度电法测深试验研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(4): 85-89.
- [7] 程庆,庾先国,李怀良,葛宝,朱丽丽. 高密度电法不同装置特点及勘探效果比较[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 2011: 1.
- [8] 马志飞,刘鸿福,叶章,杨建军. 高密度电法不同装置的勘探效果对比[J]. 物探装备, 2009, 19(1): 52-55+67
- [9] 郑智杰,曾洁,甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电法响应特征的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 161-165+172.
- [10] 赵志宇. 高密度电法在嘎海山水库水文地质勘探中的应用[J]. 科技创新与应用, 2019(10): 180-182.
- [11] 贾海磊,李军,张敏,潘文明,吴雪虎,郝洁. 高密度电法在堤防渗漏抢险探测中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 165-172.
- [12] 何清立,李霄龙,王志勇. 高密度电法在滑坡地质灾害勘查治理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 99-104.
- [13] Nordiana, M.M., Rosli, S. and Nawawi, M.N.M. (2014) A Numerical Comparison of Enhancing Horizontal Resolution (EHR) Technique Utilizing 2D Resistivity Imaging. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 299-309. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0792-2>
- [14] 董浩斌,王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
- [15] 张先林,许强,彭大雷,赵宽耀,刘伦,任敬. 高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1862-1867.
- [16] 朱紫祥,胡俊杰. 高密度电法在岩溶地区溶洞勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(3): 290-293.