

基于瞬变电磁法和高密度电法的煤矿采空区探测

王浩文¹, 许少帅¹, 黄祥祥², 孙鹏飞^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头

收稿日期: 2021年12月18日; 录用日期: 2022年1月20日; 发布日期: 2022年1月28日

摘要

煤矿开采后经过漫长的变化会形成采空区, 采空区往往会造成地面沉降、塌陷等潜在的安全隐患, 为了消除这些安全隐患带来的问题, 并查明煤矿采空区的分布情况, 本文采用瞬变电磁法和高密度电法对长春某区域进行了综合探测, 介绍了两种探测方法的基本原理, 并对多条测线以及不同深度的电阻率平面图和叠加图进行了综合分析, 对比分析了两种方法的探测结果, 经验证, 两种方法探测出的采空区范围有很好的吻合, 提高了探测的可信度。

关键词

瞬变电磁法, 高密度电法, 煤矿采空区, 地面沉降

Mine Goaf Detection Based on Transient Electromagnetic Method and High Density Electrical Method

Haowen Wang¹, Shaoshuai Xu¹, Xiangxiang Huang², Pengfei Sun^{1*}

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Baotou Iron and Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou Inner Mongolia

Received: Dec. 18th, 2021; accepted: Jan. 20th, 2022; published: Jan. 28th, 2022

Abstract

After a long changes, coal mining will form the mined-out area, goaf tends to cause land subsi-

*通讯作者。

文章引用: 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. DOI: 10.12677/ag.2022.121016

dence, collapse, such as potential safety hazard, in order to eliminate the safety hidden trouble problems, and find out the distribution of coal mining goaf, the transient electromagnetic method and high-density electrical method are adopted in this paper, a area in Changchun has carried on the comprehensive detection, this article introduces the basic principle of the two methods of detection. In addition, the resistivity maps and superposition maps of multiple survey lines and different depths are comprehensively analyzed, and the detection results of the two methods are compared and analyzed. It is proved that the scope of the goaf detected by the two methods is in good agreement, which improves the reliability of detection.

Keywords

Transient Electromagnetic Methods, Multi-Electrode Resistivity Method, Coal Mined-Out Area, Land Subsidence

Copyright © 2022 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

在国家高速发展的过程中,煤炭资源是能源中不可或缺的战略资源[1],因此,近年来对于煤矿的开采活动一直在持续。经过对地下煤矿的不断开采,越来越多采空区和塌陷区出现,导致了地面沉降、塌陷以及房屋断裂等问题[2] [3]。因而,在进行工程建设之前,利用地球物理方法对测区进行采空区和塌陷区的探测可以很大程度上保证工作的安全开展[4] [5],也为当地居民的生命和财产消除了潜在的安全隐患。

探测采空区的地球物理方法包括瞬变电磁法、高密度电阻率法、浅层地震法等方法[6] [7]。在探测时,应根据测区的范围、地质概况以及地球物理特征选取合适的探测方法。对于该测区,本次探测采用的方法是瞬变电磁法和高密度电阻率法[8] [9] [10]。瞬变电磁法有灵活度高、效率高、对低阻地质体更加敏感等特点[11],因而常用于采空区和地下空洞的探测。高密度电阻率法具有测点密度大、信息量大、工作效率高等特点[12] [13],是探测采空区、堤坝、裂缝等安全隐患的有效方法[14]。本文将通过分析瞬变电磁法和高密度电阻率法在测区的探测结果,来确定该区域采空区的分布情况。

2. 测区地质概况及地球物理特征

2.1. 地层

测区的地层主要以中生界上侏罗纪煤系地层和下白垩纪赤紫—灰绿色岩层为主;东北部出露有侏罗白垩纪营城组火山碎屑岩和火山岩。煤系出露面积狭小,大部分地区均为下白垩纪及营城组所覆盖。构成基底的岩层为石炭二迭纪变质岩系和海西期花岗岩,均出露在本区的东部及北部边缘。

2.2. 构造

本区岩层之构造形态均呈北东—南西向条带分布,其煤系地层走向为 $N10^{\circ}\sim 15^{\circ}N$,向西倾斜,倾角一般 $25^{\circ}\pm$,北部大顶子区岩层倾角一般在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$,煤系地层呈简单的单斜构造[15] [16]。

本区的构造运动以断裂构造为主,构造线方向大致以 NN-SW 向和 SN-NW 向两组。

2.3. 地球物理特征

经过煤层开采后形成的采空区有两种情况:如果积水,一般反映为低阻异常;如果不积水,反映为

高阻异常。根据勘探区煤层赋存情况可知,本区煤层厚度较小,属薄煤层,冒落带的内部充填的松散物的视电阻率明显高于周围介质,裂隙带的岩石电阻率变大,主要是由于采空区塌陷造成岩石出现裂隙,而当采空区充水较多时,采空区的电阻率变小。采空区的岩石裂隙具有不同的电性差异是本次电法探测的地球物理前提。

3. 探测方法与技术

3.1. 方法原理

3.1.1. 瞬变电磁法原理

瞬变电磁法为时间域电磁感应法,装置由发射回线以及接收回线组成。探测原理是:在地面设置一回线,再给发送的回线提供一束电流,再瞬间切断电流供给,瞬间的突变会产生一个向下的一次磁场,在一次磁场的冲击下,地质体导电良好则会产生电流,电流的大小将由地质体导电情况决定。然后此电流会导致一个衰减过程,此衰减过程又导致一个衰减的二次磁场传向地表,由地面的接收回线接收,该变化将反映地下地质体的电性分布情况。若按不同的延迟时间测量二次感应电动势 $V(t)$,就得到了二次磁场随时间衰减的曲线。若地下没有良导体,曲线会快速衰减;当存在良导体时,由于电源切断的一瞬间,所观测到的过渡过程衰变速度将变慢,从而发现地下导体的存在[17]。

3.1.2. 高密度电法原理

在本次探测中,高密度电阻率法[18]采用的是温纳装置。对于探测垂向的变化,温纳装置有着很好的使用效果,与异常对应关系好,通常用于探测水平目标体。温纳装置的装置系数比起其它装置要小得多,在同样情况下,可观测到更强的信号,可以在地质噪声较大的地方使用。另外,温纳装置的边界损失较大。温纳电极排列顺序为 A, M, N, B, 其中 A 和 B 为供电电极, M 和 N 为测量电极, $AM = MN = NB = na$ ($n = 1, 2, \dots$), 温纳装置测点分布图如图 1。由于 $AM = MN = BN$, 则温纳排列的视电阻率的表达式[18]为:

$$\rho = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = 2\pi na \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1)$$

3.2. 测线布置

瞬变电磁法依据测线垂直于地层走向的原则,结合勘探区实际情况,测线为东西方向按照 $20 * 20$ 米的网格进行布置,高密度电法依据测线垂直于地层走向的原则,结合勘探区实际情况,以南北方向进行测线布置,测点的电极距为 8 m, 详见瞬变电磁法及高密度电法测线布置图图 2。

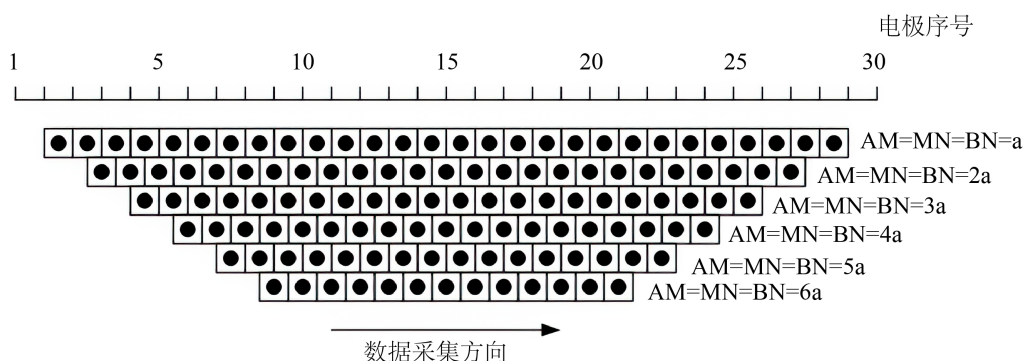


Figure 1. Distribution map of measuring points of Wenner device
图 1. 温纳装置测点分布图

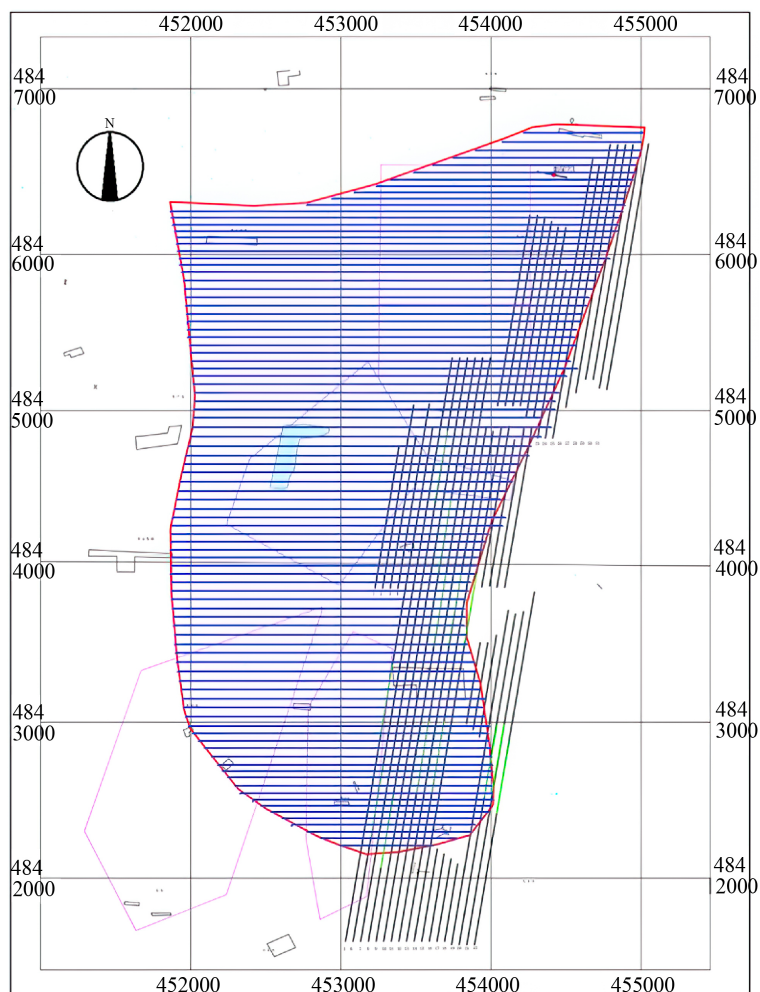


Figure 2. Survey line layout drawing
图 2. 测线布置图

4. 数据处理与解释

4.1. 瞬变电磁法数据处理流程

在获取原始数据后，首先对数据进行编辑，通过信号去噪等方法对数据进行预处理，常用的信号去噪方法有小波变换去噪法；S 变换去噪法等方法。由于测区内地形较为复杂，所以地形校正问题也成为本次资料处理的最重要的环节之一，本次电法资料通过对原始数据的地形处理，使电法资料反映的信息更准确地反映实际的水文地质分布情况，使用比值校正法或空间滤波法等方法对地形进行校正。再将地形校正后的文件进行网格化处理，以及样条函数光滑，得到瞬变电磁法各测线的断面图和平面图。流程图如图 3。

4.2. 高密度电法数据处理流程

首先将野外观测的文件进行导入，对于同测线多排列观测文件，还需要进行文件的拼接合并，使其同一测线的观测数据编入一个数据文件，以便数据处理和反演。再对个别数据明显为不符合真实地下信息的“畸点”进行剔除，如有必要，还应进行插值补点。

由于工区内沿剖面具有一定的地形，为了避免地形因素对异常解释的影响，对地形数据进行编辑，确保反演结果精度，而不受地形影响。

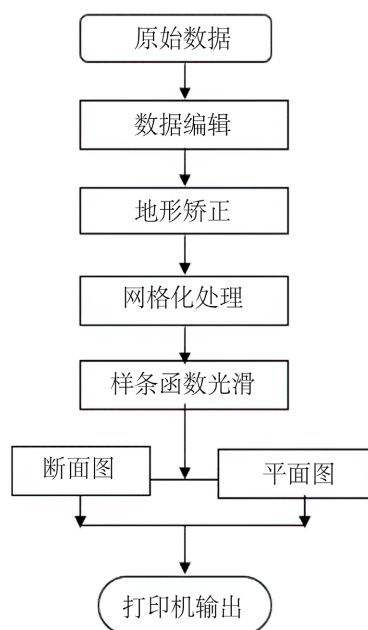


Figure 3. Transient electromagnetic method data processing flowchart

图 3. 瞬变电磁法数据处理流程图

对处理后的视电阻率成像剖面异常，采用瑞典 RES2DINV 高密度电法软件进行二维反演计算，选择最小二乘法反演技术，利用地面实测视电阻率数据和地形数据，采取三角网格剖分方式，生成地下二维地电模型，实现迭代循环式反演，以确保了资料的解释精度。

经过预处理和反演后，结合研究区域的相关地质资料和物性资料，对得到的视电阻率断面等值线图等进行垂直断面解释以及水平切片解释，最后再综合解释，推测采空区的范围。流程图如图 4。

4.3. 资料的分析与解释

电法资料解释建立在资料处理后的视电阻率拟断面图、反演电阻率断面等值线图、视电阻率顺层切片图、反演电阻率顺层切片图的基础上。本文选取了瞬变电磁法和高密度电法的几条具有代表性的测线进行分析，并结合不同深度的平面叠加图综合分析，推断采空区的位置与范围。

4.3.1. 瞬变电磁法典型测线分析

图 5 为 111 线瞬变电磁法视电阻率剖面图，从图中看出在横坐标 1350~1450 处、1800~1950 处出现视电阻率高低起伏变化，且在 1350~1450 处对应的多道剖面 67~73 号物理点的尾部道数出现紊乱，分析由于该处距离干扰源不足 40 米造成的假异常；在 1800~1950 处对应多道剖面 91~99 号物理点无明显干扰，异常反映较可靠。综合分析该 111 线剖面在 1350~1450 处异常可靠性较低，1800~1950 处异常可靠性较高，综合分析为采空引起的异常，但由于该处水位较低，采空区长期静止通过裂隙充水，在视电阻率剖面图反映为低阻异常。经钻探验证，在 1900 处打钻 220~230 米深度附近出现采空，证实 1800-1950 处异常反映及分析解释符合煤矿采空的地质规律，分析较准确。

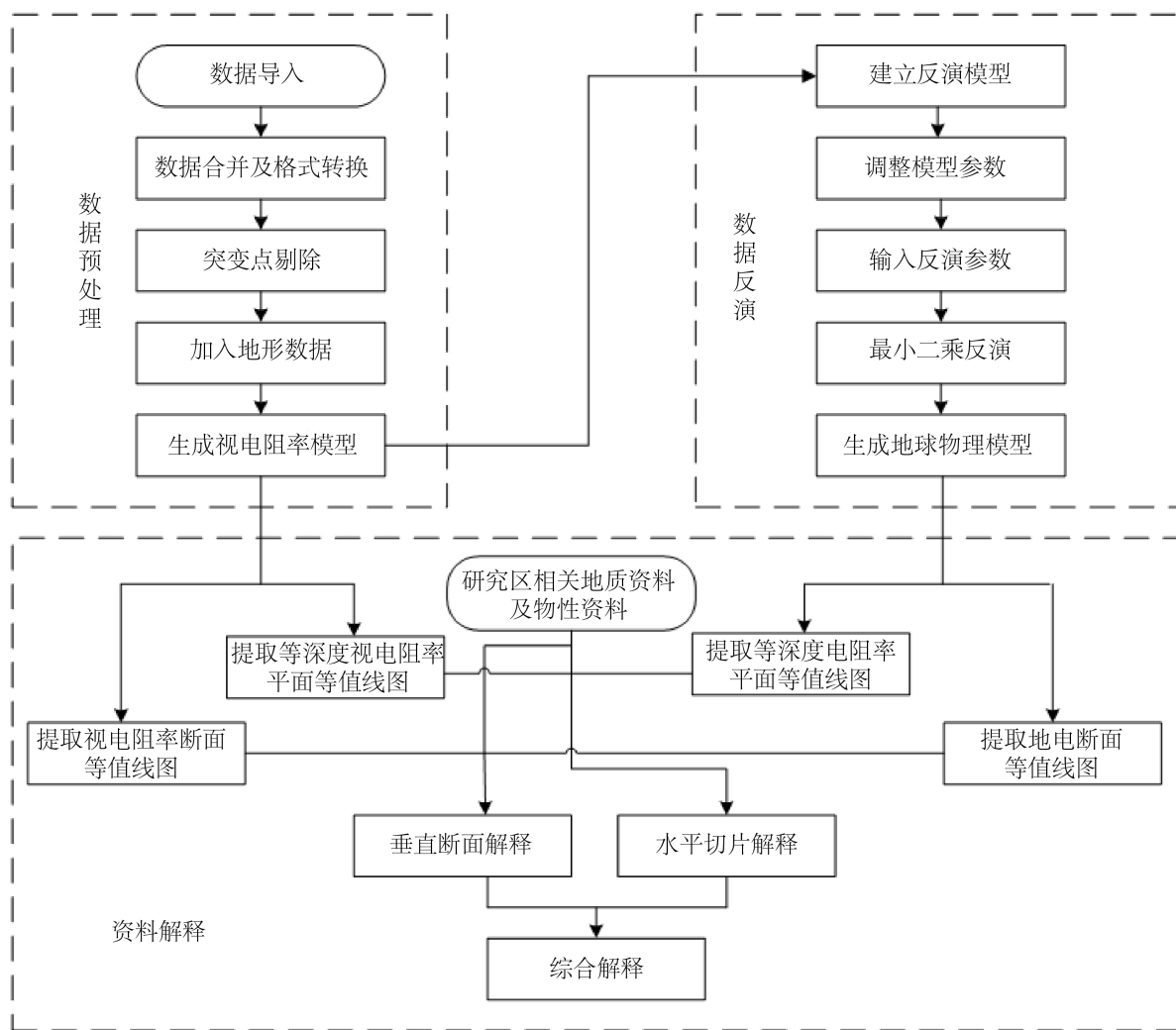


Figure 4. High density electrical data processing flow chart
图 4. 高密度电法数据处理流程图

图 6 为 25 测线瞬变电磁综合剖面图，从图中可以看出：多道剖面 31、41 号物理点电压值出现陡变(即红色矩形框 a、b)，是因为测点存在电线干扰造成的，对应视电阻率拟断面图出现 A、B 典型的假异常现象；71~73 号物理点电压值出现相对低电压的异常变化，对应视电阻率拟断面图水平方向出现视电阻率起伏变化，该位置位于宽城井口附近，综合分析该异常是煤层采掘后顶板垮塌造成的异常，可靠性较高。

图 7 为 65 测线瞬变电磁综合剖面图，从图中可以看出：多道剖面 57~64、90~97 号物理点电压值出现抬高(即红色矩形框)，对应视电阻率拟断面图水平方向在距离 1100~1250 段、1750~1900 段，标高-50 米即深度 300 米附近出现视电阻率的起伏变化，且视电阻率值较低，分析该位置位于宽城井口附近，综合分析该异常是煤层采掘后顶板垮塌并充水造成的低视电阻率异常，可靠性较高。

4.3.2. 高密度电阻率法典型测线分析

由图 8 可见，从横向上看，二维高密度电法呈现为高低相间的分布情况，且南低北高。在测线 250~440 m 和 700~900 m 位置低阻异常对应明显，根据本区地层情况、地质资料调查以及相邻剖面线进行综合判断，推断其为采空或采空破碎区。在 625~750 一段三角形高阻区，根据当地地质资料，其为花岗岩区域；

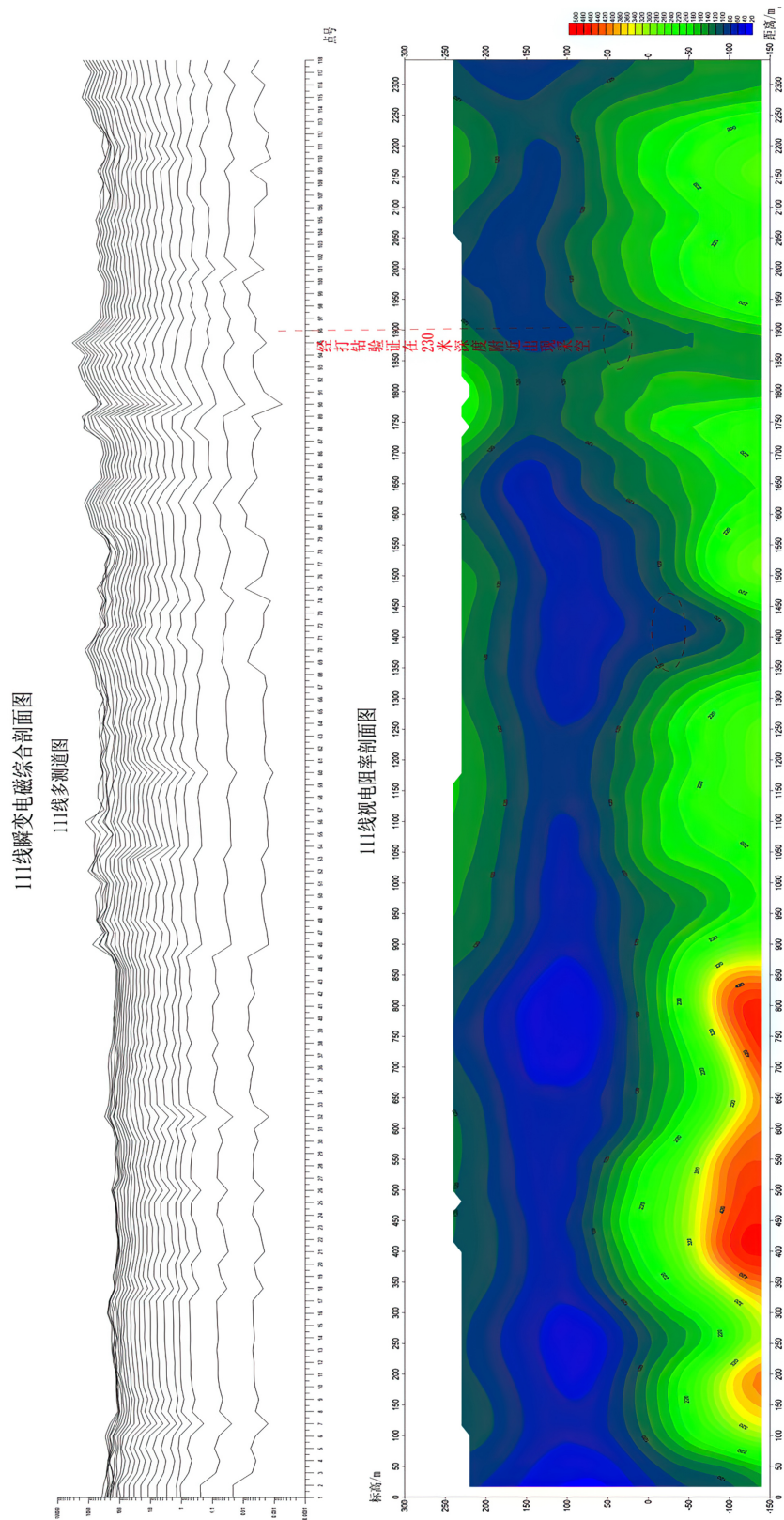


Figure 5. Transient electromagnetic method apparent resistivity profile at line 111
图 5. 瞬变电磁法在第 111 号线视电阻率剖面图

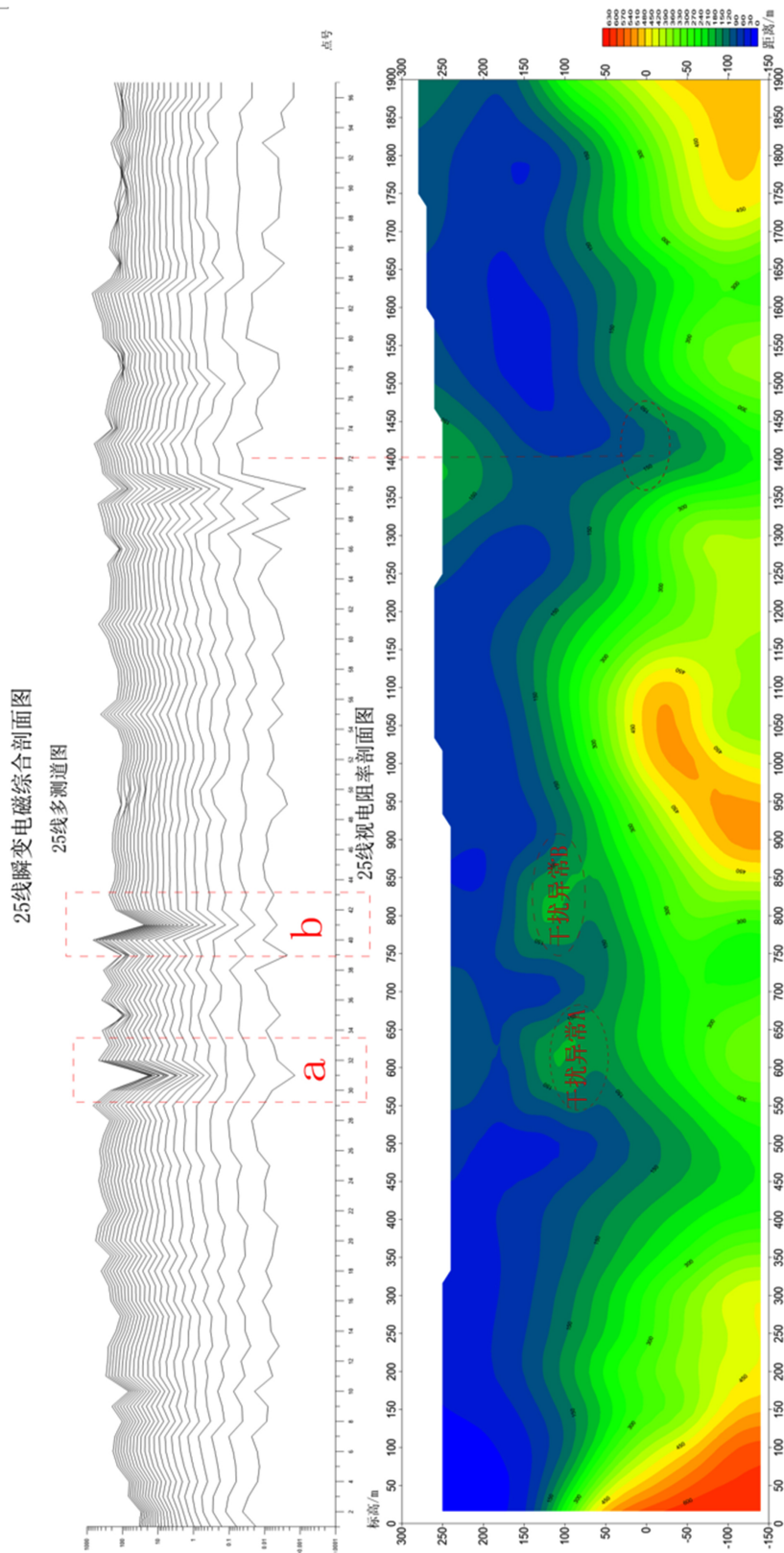


Figure 6. Transient electromagnetic method apparent resistivity profile at line 25
图 6. 瞬变电磁法在第 25 号线视电阻率剖面图

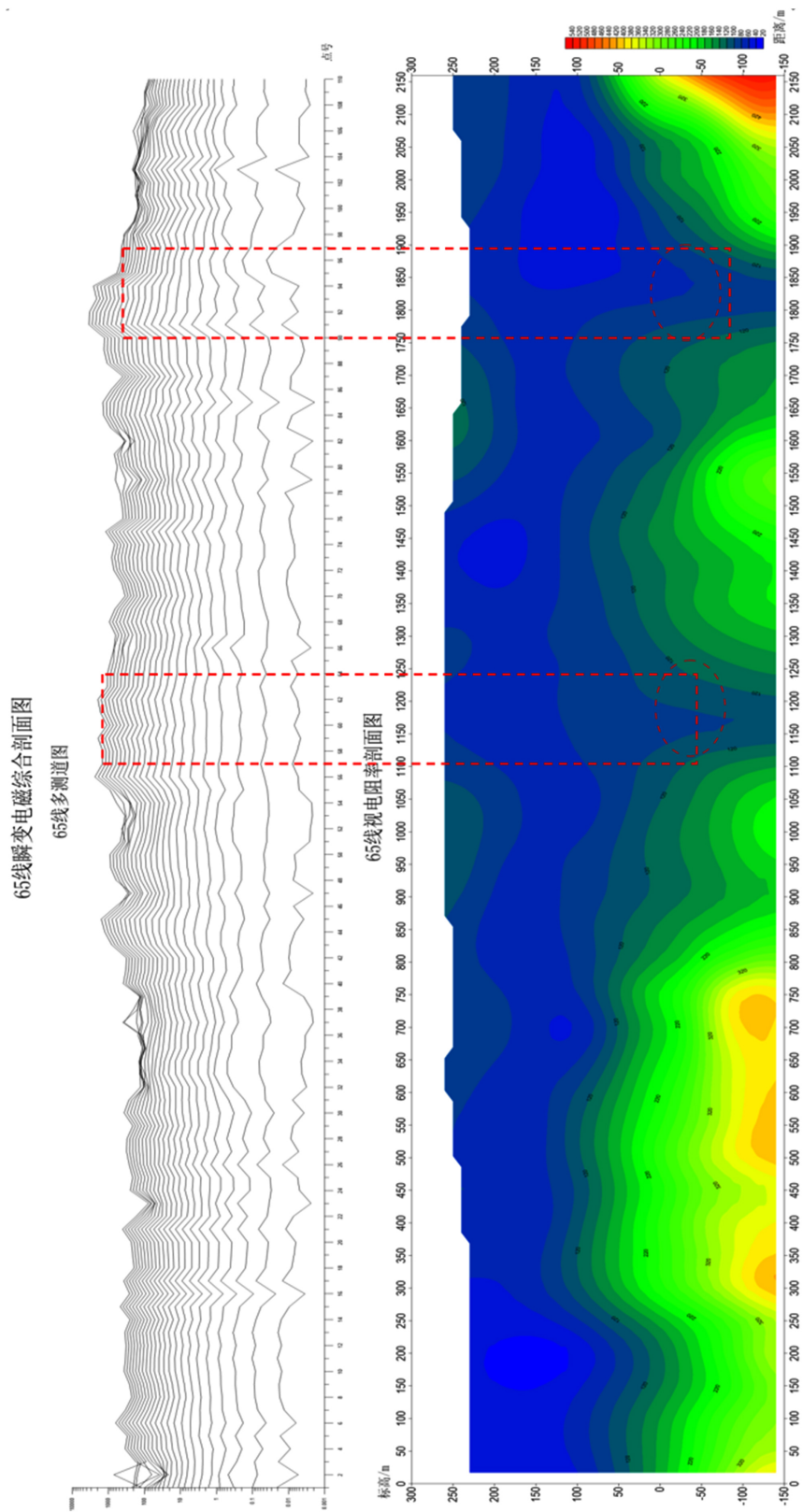


Figure 7. Transient electromagnetic method apparent resistivity profile at line 65

图 7. 瞬变电磁法在第 65 号线视电阻率剖面图

从纵向上看, 高密度电法的反演结果显示浅部(0~10 m)电阻率呈现低阻, 是因为测线布设在农田区域, 地表整体表现为低阻特征, 反映了第四系粉质黏土组成的松散土层; 在 10~100 m 之间, 形态较为规则的中阻异常, 推测为沙泥岩互层。

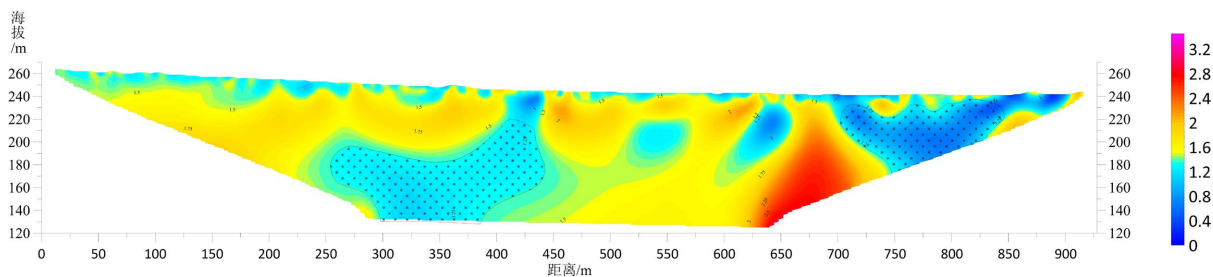


Figure 8. High density resistivity method apparent resistivity profile at line 1

图 8. 高密度电阻率法在第 1 号线视电阻率剖面图

图 9 为高密度电阻率法在第 2 号线视电阻率剖面图, 从横向上看, 二维高密度电法呈现为高低相间的分布情况, 且南低北高。在测线 250~370 m、420~520 m 和 710~950 m 位置低阻异常对应明显, 根据本区地层情况、地质资料调查、以及相邻剖面线进行综合判断, 推断其为采空或采空破碎区。在 575~750 一段三角形高阻区, 根据当地地质资料, 其为花岗岩区域; 从纵向上看, 高密度电法的反演结果显示浅部(0~10 m)电阻率呈现低阻, 是因为测线布设在农田区域, 地表整体表现为低阻特征, 反映了第四系粉质黏土组成的松散土层; 在 10~100 m 之间, 形态较为规则的中阻异常, 推测为沙泥岩互层。

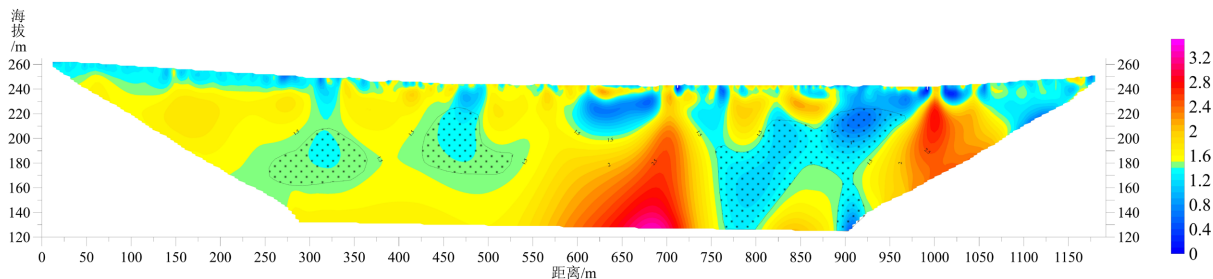


Figure 9. High density resistivity method apparent resistivity profile at line 2

图 9. 高密度电阻率法在第 2 号线视电阻率剖面图

图 10 为高密度电阻率法在第 17 号线视电阻率剖面图, 由于该测线中间存在大量的村庄, 无法进行连续的测线布设。从横向上看, 二维高密度电法整体电阻较高, 是由于该区域存在大量的花岗岩。在测线 180~400 m、420~520 m 和 2800~2920 m 位置低阻异常对应明显, 根据本区地层情况、地质资料调查、以及相邻剖面线进行综合判断, 推断其为采空或采空破碎区。在 3600~4200 存在一中低阻异常, 由于附近大量的花岗岩的存在, 平均视电阻率值偏高, 根据地质资料调查、以及相邻剖面线进行综合判断, 推断其采空或采空破碎区; 从纵向上看, 高密度电法的反演结果显示浅部(0~5 m)电阻率呈现低阻, 是因为测线布设在农田区域, 地表整体表现为低阻特征, 反映了第四系粉质黏土组成的松散土层; 在 5~100 m 之间, 形态较为规则的中阻异常, 推测为沙泥岩互层, 夹杂部分高阻异常, 推测为花岗岩。

4.3.3. 瞬变电磁法不同深度平面叠加图及异常区分析

瞬变电磁勘探成果从-50 m 开始, 按 50 米深度间隔提取, 得到-100 m、-150 m、-200 m、-250 m、

-300 m、-350 m 共 6 张视电阻率平面图，为了解测区不同深度地层的电性变化规律，分析各异常区的垂向分布特征，制作了测区各层电阻率垂向叠加图。图 11 为瞬变电磁法视电阻率平面叠加图。

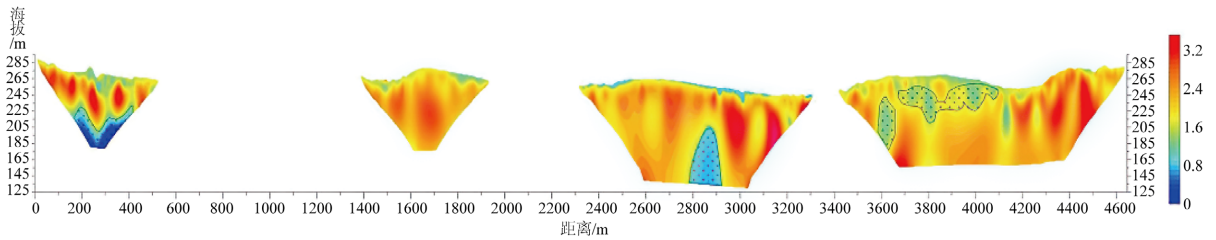


Figure 10. High density resistivity method apparent resistivity profile at line 17

图 10. 高密度电阻率法在第 17 号线视电阻率剖面图

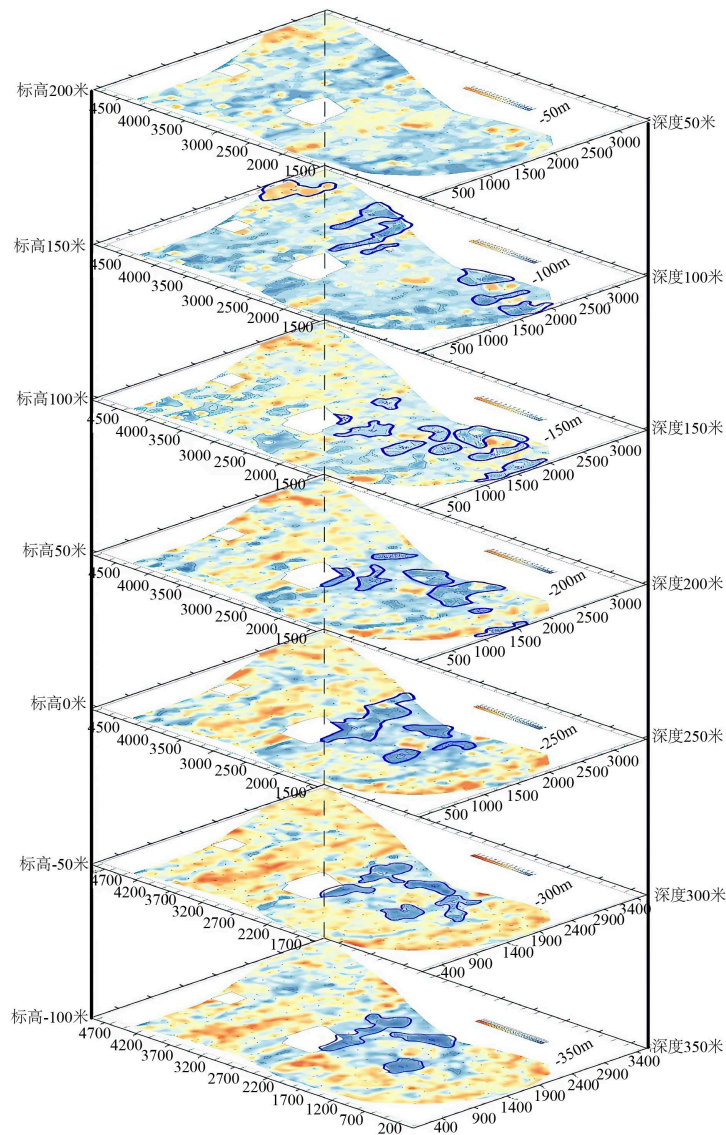


Figure 11. Transient electromagnetic method apparent resistivity plane superposition diagram

图 11. 瞬变电磁法视电阻率平面叠加图

从垂向叠合图上来看, 200 米深度以内异常较多, 200 米到 350 米深度异常较少但面积较大, 这是由于瞬变电磁是一个逐渐衰减的二次场信号, 浅层分辨率较高, 由浅入深异常平面分布位置较接近, 深部异常集中于测区中东部, 南部异常较浅, 北部异常最浅, 与收集资料及煤层深度相符。

经瞬变电磁各深度平面图综合分析, 结合实际调查情况, 考虑瞬变电磁的体积效应对重合区域进行比对取舍, 划分异常如图 11, 图中 A 代表为 100 米深度附近瞬变电磁低阻异常, 由于方法的局限性, 该深度异常作为对高密度资料的参考使用。B 代表为 150 米深度附近低阻异常, C 代表为深度 200 米附近低阻异常, D 代表为 250 米深度附近低阻异常。E 代表为深度 300 米附近低阻异常, F 代表为 350 米深度附近低阻异常, 各深度低阻异常具体位置如图 12。

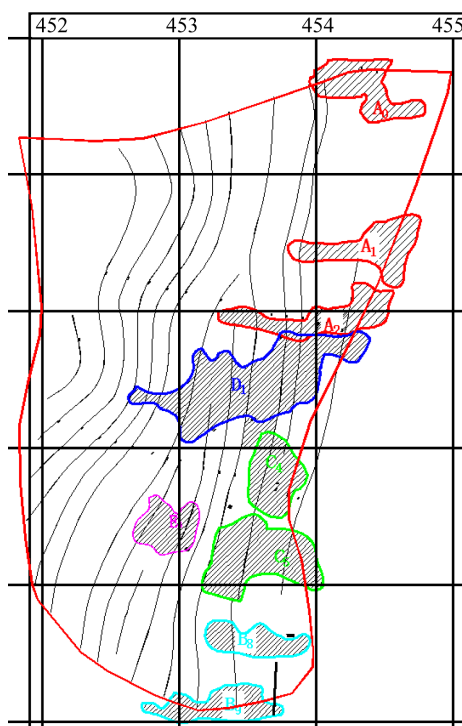


Figure 12. Transient electromagnetic method analysis results at various depths

图 12. 瞬变电磁法各深度分析成果图

4.3.4. 高密度电法不同深度平面叠加图及异常区分析

高密度电法平面成果图从-30 m 开始, 按照 20 米深度间隔提取, 得到-30 m、-50 m、-70 m、-90 m 和-110 m 共 5 张电阻率平面图, 将高密度电法 5 张电阻率平面图叠加后, 得到图 13。

由不同目的层电阻率切片图显示, 从浅到深视电阻率值逐渐升高, 反映了地层由浅至深电性变化的总体特征。从垂向叠合图上来看, 由上至下低阻异常区域范围并没有呈现明显的增大或者变小的趋势, 显示为采空或采空破碎区分布呈现不规则分布, 推测煤矿开采过程中, 并没有完全按照工作面规划进行生产。

经高密度电法各深度平面图综合分析, 结合实际调查情况, 考虑高密度电法地形影响对重合区域进行比对取舍, 划分异常如图 14, 图中 GA 代表为 30 米深度附近低阻异常, GB 代表为 50 米深度附近低阻异常, GC 代表为深度 70 米附近低阻异常, GD 代表为 90 米深度附近低阻异常, 由于方法的局限性, 该深度异常作为与瞬变电磁的对比使用。GE 代表为 90 米深度附近低阻异常。具体位置如下图所示。

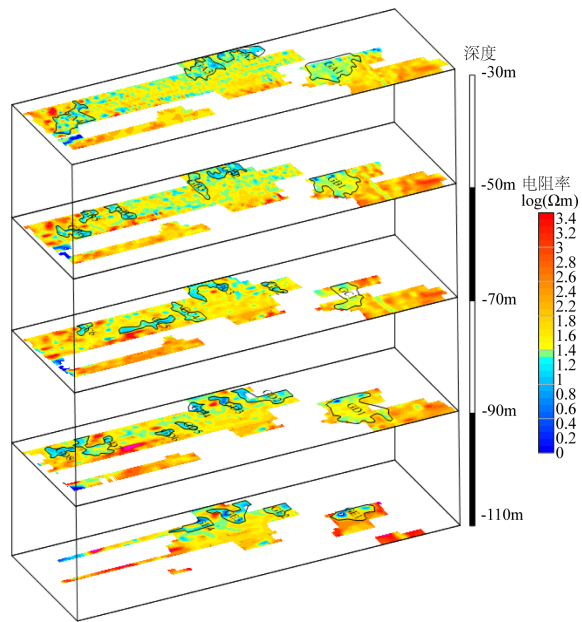


Figure 13. High density resistivity method resistivity superposition diagram of each depth

图 13. 高密度电阻率法各深度电阻率叠加图

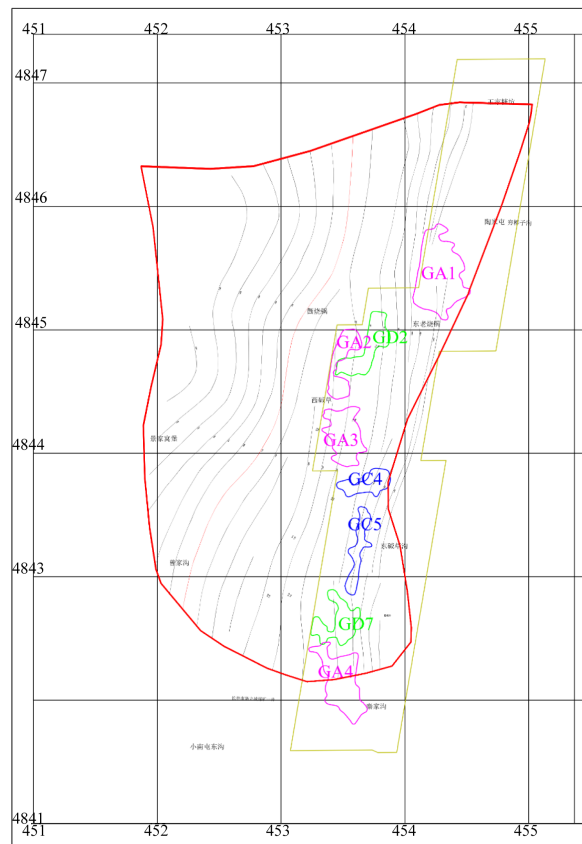


Figure 14. High-density resistivity method analysis results at various depths

图 14. 高密度电阻率法各深度分析成果图

4.4. 综合物探解释

从实际材料图可以看出，瞬变电磁测量范围要大于高密度测量区域，但是在整个区域东侧，两种方法有重合。在该区域中，由于两种探测方法的局限性以及针对的探测深度的差异，仅仅对高密度成果的-90 m 深度平面成果图与瞬变电磁-100 米深度平面成果进行比对。

将高密度电法-90 m 深度平面成果图圈定的低阻异常与瞬变电磁-100 米深度平面成果圈定的低阻异常进行比较，并将两者低阻异常叠加到煤层底板等高线图中，如图 15 所示。为了区别瞬变电磁和高密度异常，将瞬变电磁异常区域用红色线条表标识，高密度异常区域用绿色线条标识。

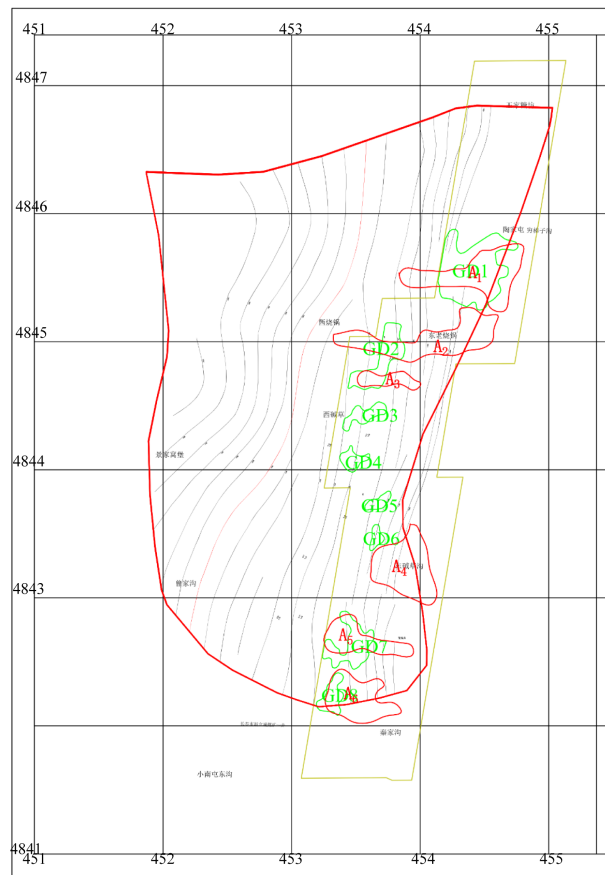


Figure 15. Comparison of plane results of transient electromagnetic method and high density resistivity method

图 15. 瞬变电磁法与高密度电阻率法的平面成果对比图

从上图中可以看出，在两种方法的重合区域中，瞬变电磁法推断有 6 处异常，高密度电法推断有 8 处异常，其中重合区域北侧、中部和南侧异常两种方法解释基本一致，但高密度电法推断的 GD3、GD4 和 GD5 异常在瞬变电磁平面中没有明显异常存在。分析原因：首先，两种方法的探测深度和精度不同，高密度电法深度探测精度稍差一些；其次，本次对比平面的 100 m 深度成果，但由于电法和电磁法都存在体积效应，所以在某一深度上都存在容差，所以两种方法互为补充。

5. 结论

通过瞬变电磁探测，详细查明了煤矿塌陷区 100 m-350 m 深度异常分布范围。通过异常平面分布位

置统计, 浅部(100~200 米深度)异常集中于测区北部及南部, 水库东部及南部附近异常较深在 200~300 米深度附近, 通过结合已有地质资料及现场井口调查资料核实, 探测资料较吻合, 结果可靠。

通过高密度电法探测, 详细查明了煤矿塌陷区 30 m~110 m 深度采空异常的分布范围。通过对采空异常区域统计, 发现均表现为测区东部分布范围较大, 且集中在测区东部的北侧、中部和南侧。最后通过数据合并分析, 与已有地质资料和现场调查资料有很好的吻合, 结果可靠。

综上所述, 电法勘探对于探测采空区是一种高效的地球物理方法, 取得了良好的探测结果。

基金项目

生态智慧矿山联合基金项目(项目编号: D2020402013); 河北工程大学教育教学改革研究与实践项目(思政案例库与案例教学法在“地球物理勘探含测井”课程建设中的探索研究)联合资助。

参考文献

- [1] 郭有刚, 刘峰, 王斌武, 侯跃新. 瞬变电磁法在煤矿采空区勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(2): 151-154.
- [2] 郗卫东. 瞬变电磁法在探测煤矿采空区及塌陷区中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 92-95.
- [3] 孙英峰, 罗霄, 高艺瑞, 王朋朋, 董川龙, 贺永昌. 瞬变电磁法在探测采空区中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 157-163. <https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2020.03.035>
- [4] 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.
- [5] 康鸿文, 柴新朝. 瞬变电磁法及高密度电法在采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(2): 167-170.
- [6] 董杰, 孟庆生, 尹明泉, 张心彬. 综合物探方法在采空塌陷区调查中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 557-560.
- [7] 丁荣胜, 张殿成, 王仕昌, 等. 高密度电阻率法和地震映像法在采空区勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 732-736.
- [8] King, A. (1987) Cindered Coal Detection Using Transient Electromagnetic Methods. *Geoexploration*, **24**, 367-379. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(87\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0016-7142(87)90007-X)
- [9] Quincy, E.A., et al. (1976) Remote Sensing of an Underground Coal-Burn Cavity with a Wide-Band Induction System. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, **14**, 236-243. <https://doi.org/10.1109/TGE.1976.294432>
- [10] 解海军. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2009.
- [11] 吴俊林, 靳月文. 瞬变电磁法在采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 168-170.
- [12] Mauriello, P. and Patella, D. (1999) Resistivity Anomaly Imaging by Probability Tomography. *Geophysical Prospecting*, **47**, 411-429. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00137.x>
- [13] 阿发友. 高密度电法和地质雷达在断层及溶洞探测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [14] 袁树森, 张志军. 高密度电阻率法在地下煤矿采空区探测中的应用[J]. 矿产与地质, 2006(3): 273-278.
- [15] 刘金明. 长春市活动断层探测及第四纪标准剖面的建立[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [16] 赵淼. 长春市活动断裂研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [17] 王粤, 龚育龄. 瞬变电磁法在探测煤矿采空积水区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 71-74.
- [18] 王丽红. 高密度电法和瞬变电磁法在煤矿采空区的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020. <https://doi.org/10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000927>