



引文格式: 孔繁良, 徐超, 艾斯卡尔·吐尔逊, 等. 急倾斜煤层采空区综合物探勘查应用研究: 以乌鲁木齐市西山地区关闭煤矿为例[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 143-153. DOI: 10.12401/j.nwg.2024086

Citation: KONG Fanliang, XU Chao, AISIKAR Tuerxun, et al. Application of Integrated Geophysical Prospecting Method in Steep Seam Goaf: A Case Study of The Closed Coal Mine in Xishan Area, Urumqi[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 143-153. DOI: 10.12401/j.nwg.2024086

## 急倾斜煤层采空区综合物探勘查应用研究: 以乌鲁木齐市西山地区关闭煤矿为例

孔繁良<sup>1,2,3,4</sup>, 徐超<sup>2</sup>, 艾斯卡尔·吐尔逊<sup>2</sup>, 邹占<sup>2</sup>, 叶祥鹏<sup>2</sup>, 王军<sup>5</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局地球物理化学探矿大队, 新疆 昌吉 831100; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第八地质大队, 新疆 阿克苏 843000; 4. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 5. 中化地质矿山总局新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 城市边缘关闭煤矿遗留下的大量采空区严重威胁生产生活安全, 查明采空区的分布情况是进行治理工作的前提和基础。笔者以乌鲁木齐市西山地区关闭煤矿急倾斜煤层采空区为研究对象, 综合分析采空区及围岩地质特征、干扰背景, 常用物探方法抗干扰性、适用性和局限性, 优选高密度电法、微动勘探、等值反磁通瞬变电磁和重力 4 种方法进行综合物探勘查, 在区内查明两条采空区带, 向深部延伸 50~450 m, 均处于充水状态, 经钻探验证结果可靠。总结了“低阻-低速”、“高阻-低速”、“低重-低速”等参数组合与采空区不同赋存状况的对应关系, 说明笔者提出的方法技术组合可在类似采空区探测中发挥作用。

**关键词:** 综合物探; 采空区; 急倾斜煤层; 微动探测; 等值反磁通瞬变电磁; 重力勘探; 乌鲁木齐

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0143-11

### Application of Integrated Geophysical Prospecting Method in Steep Seam Goaf: A Case Study of The Closed Coal Mine in Xishan Area, Urumqi

KONG Fanliang<sup>1,2,3,4</sup>, XU Chao<sup>2</sup>, AISIKAR Tuerxun<sup>2</sup>, ZOU Zhan<sup>2</sup>, YE Xiangpeng<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>5</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 2. Geophysical and Geochemical prospecting Party Xinjiang bureau of geology and mineral resources Exploration and Development, Changji, Urumqi 831100, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Uygue Autonomous Region of Geological and Mineral Resources Exploration and Development Bureau Eighth Geological Brigade, Aksu 843000, Xinjiang, China; 4. College of Geological and Mining Engineering Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 5. Xinjiang Geological Survey Institute of China National Bureau of Geology and Mines, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** A large number of goafs left behind by the closed coal mines at the edge of cities seriously threaten the safety of production and life. Finding out the distribution of goafs is the premise and basis for governance.

收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-10-26; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目“天山中段矿山开发的生态环境调查”(2022xjkk1001), 新疆维吾尔自治区科技厅自然科学基金“地球物理方法在煤矿采空区治理中应用研究”(2022D03004)联合资助。

作者简介: 孔繁良(1982-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事固体矿产、环境工程地球物理勘查及方法应用研究。E-mail: 179643628@qq.com。

This paper takes the goaf of steep coal seam in Xishan area of Urumqi as the research target, comprehensively analyzes the geological characteristics and interference background of the goaf and surrounding rock, the anti-interference, applicability and limitations of common geophysical methods, and selects four methods for integrated geophysical exploration: multi-electrode resistivity method, microtremor survey (MS), opposing coils transient electromagnetic (OCTE) and gravity exploration. Two goaf zones were found in the area, extending 50-450 m to the depth, both in a water filled state and proved reliable by drilling. The corresponding relationship between the parameter combinations of "low resistance low speed", "high resistance low speed", "low weight low speed" and different occurrence conditions of goaf is summarized. It shows that the method and technology combination proposed in this paper can play a role in similar goaf detection.

**Keywords:** goaf; the steep seam; integrated geophysical prospecting method; microtremor survey (MS); opposing coils transient electromagnetic (OCTE); gravity exploration; Urumqi

新疆维吾尔自治区是中国煤炭资源大省, 赋煤地层层面积约为 30.7 万 km<sup>2</sup>, 预测煤炭资源量近 2.19 万亿 t, 占全国总储量的 40.5%, 居全国之首(贺阳阳, 2020)。首府乌鲁木齐市号称“煤海上的城市”, 地下煤炭资源极为丰富, 乌鲁木齐矿区同时也是中国最大的急倾斜煤层(倾角大于 55°)矿区(姚建强等, 2018)。由于历史上的无序开采, 后期淘汰落后产能大规模关闭小型煤矿等原因, 在城市边缘矿山遗留大量的采空区(武欣等, 2022), 致使地面裂缝、沉降、塌陷等地质灾害问题突出, 许多土地资源无法直接被利用, 严重威胁人民生产生活安全, 制约了地方经济发展(陈中山, 2022; 杜臻等, 2023; 冯立等, 2023; 蔺楠等, 2023; 王双明等, 2024)。因此, 快速查明煤矿采空区的规模、埋深及赋存情况, 能够为后续稳定性评价和恢复治理方案提供基础依据, 意义重大(张健桥等, 2021)。

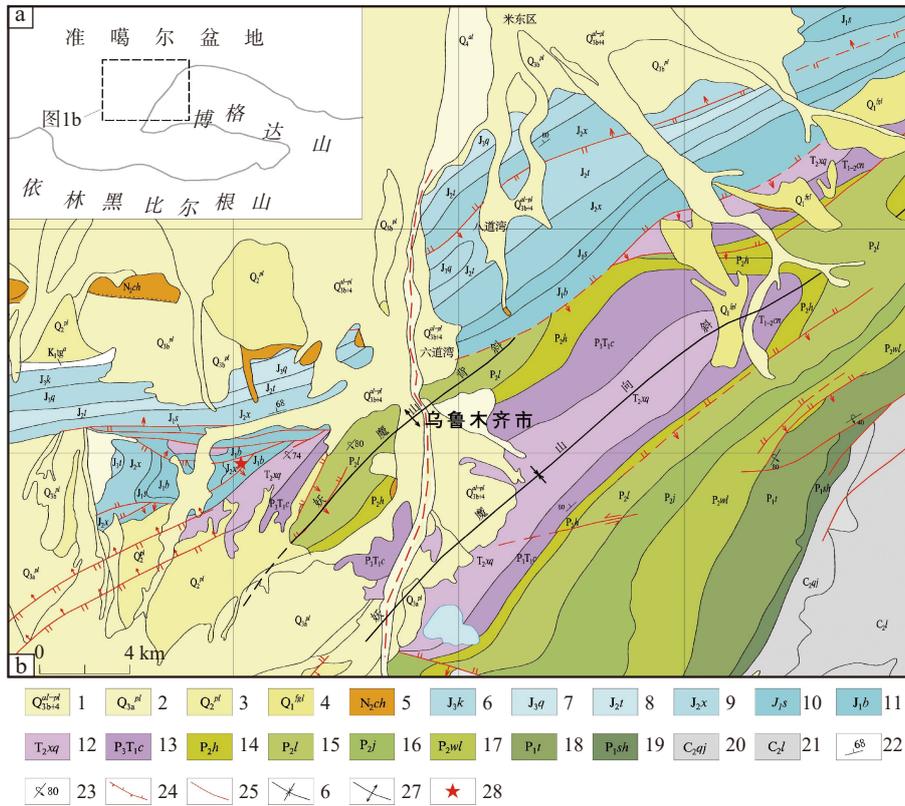
地球物理方法是采空区探测的主要手段, 目前国内已形成了较为完备的地球物理勘探技术体系。重力勘探(张旭等, 2015; 汤伏全等, 2018)、电磁法(范涛等, 2010; 陈卫营等, 2013; 苏永军等, 2023; 宋贵磊等, 2024)、地震勘探(罗霄等, 2020)、探地雷达(程久龙等, 2004, 2010; 张昭等, 2021; 赵东东等, 2022)、高密度电法(徐慧等, 2020; 王强等, 2022)、放射性探测(韩许恒等, 1996)等传统物探方法, 微动勘探(吴飞等, 2021; 胡天义等, 2024)、等值反磁通瞬变电磁(席振铎等, 2016; 赵虎等, 2021)等方法在采空区探测中均已广泛应用。然而, 由于不同采空区存在埋藏深度规模不一、地质构造及赋存条件不同(刘小平, 2022)、探测区干扰背景复杂等不利因素, 致使采用物探单方法进行采空区精细探测的效果大打折扣(李文, 2017), 需要根据煤矿采空区具体地质、地球物理特征, 全面

考虑不同地球物理方法优缺点和适用性, 扬长避短, 开展综合物探勘查, 优化物探方法技术组合。笔者以乌鲁木齐市西山地区关闭煤矿采空区为研究对象, 考虑地层产状陡倾, 面对人文、电磁干扰背景复杂等不利因素, 采用多种物探方法开展采空区探测应用研究, 分析不同方法的地球物理异常特征和应用效果, 旨在探索总结适合急倾斜煤层采空区探测的综合物探方法应用技术组合, 为开展同类工作提供借鉴。

## 1 地质背景与采空区特征

### 1.1 地质背景

研究区位于天山北麓, 准噶尔盆地南缘逆冲断裂带东段, 横跨盆-山结合部位(孙自明, 2015)(图 1a)。构造单元属于乌鲁木齐山前拗陷带, 妖魔山背斜北翼, 为一向北倾斜的单斜构造, 主要受西山-碗窑沟和妖魔山-永丰乡两条隐伏的区域活动断裂控制, 以冲断推覆构造为主, 由多期次侧向挤压作用形成, 兼具走滑扭动成因机制, 构造变形极为复杂强烈(屈栓柱等, 2019), 导致区内岩层陡立, 局部地段出现倒转, 地层倾向一般在 320°左右, 倾角为 75~85°, 煤层为典型的急倾斜煤层, 如图 1b 所示。研究区主要发育侏罗系和第四系地层。侏罗系地层为一套沼泽-湖泊相沉积, 其中, 下侏罗统八道湾组(J<sub>1</sub>b)和中侏罗统西山窑组(J<sub>2</sub>x)为主要含煤地层。前者地层总厚 40.72~947 m, 含煤 15 层(自上而下依次编号为 A1-A13), 平均厚度为 44.04 m, 含煤系数 13.51%, 可采煤层 9 层, 平均总厚度为 42.71 m; 后者地层总厚为 740.71 m, 含煤 29 层(自上而下编号依次为 B1-B18), 总厚为 98.91 m, 含煤系数 12.15%, 可采煤层 16 层, 总厚为 88.15 m。



1.第四系更新统—全新统冲、洪积堆积物; 2.第四系晚更新统洪积层; 3.第四系中更新统冲积堆积物; 4.第四系早更新统洪积层; 5.昌吉河群; 6.上侏罗统喀拉扎组; 7.上侏罗统齐古组; 8.中侏罗统头屯河组; 9.中侏罗统西山窑组; 10.下侏罗统三工河组; 11.下侏罗统八道湾组; 12.中三叠统小泉沟群; 13.上二叠统—下三叠统仓房沟群; 14.中二叠统红雁池组; 15.中二叠统芦苇沟组; 16.中二叠统井井子沟组; 17.中二叠统乌拉泊组; 18.下二叠统塔什库拉组; 19.下二叠统石人子沟组; 20.上石炭统祁家沟组; 21.上石炭统柳树沟组; 22.地层产状; 23.倒转地层产状; 24.逆断层; 25.性状不明断层; 26.向斜构造; 27.背斜构造; 28.研究区位置

图1 研究区大地构造位置图(a)(孙自明, 2015)和地质图(b)

Fig. 1 (a) Geotectonic location map and (b) geology map of the research area

1.2 采空区特征

根据当前煤矿地下开采技术条件,中国按倾角不同将煤层划分为4类,煤层倾角大于55°时定义为急倾斜煤层(刘学军等,2018)。该类煤层的分布特点和

开采方式与其他产状煤层相比差异较大,因而开采后形成的采空区较其他产状煤层采空区赋存分布特征也有所不同,详见表1(赵子锋,2015;刘学军等,2018)。

研究区分为北区和南区两部分,如图2所示,区

表1 急倾斜煤层特点及其采空区特征对照表

Tab. 1 Comparison table of characteristics of steep seam seams and goaf

序号	急倾斜煤层特征	对应采空区特点
1	埋深大,基岩或煤层上部覆盖层密度差,黄土湿陷严重	覆盖层极易随下部采空区发展而发生垮塌,稳定性较差,难以在地表形成稳定“拱”,沿走向方向出现条带状或串珠状塌陷坑
2	多为不稳定复杂煤层,厚度变化大,通常各种厚度煤层(薄、中厚、厚及特厚)均有分布	采空区在顶板方向变形普遍较剧烈,采空宽度通常大于煤层厚度
3	产状复杂,倾角变化较大,煤层分布沿倾向方向向地下延伸深度较大,可采煤层自煤层露头延伸至地下上千米范围	随着煤层开采深度不断增大,采空区范围逐渐向顶板方向发展,而底板方向基本处于稳定状态,采空区平面分布呈不对称状态。采空区竖向深度和厚度分布范围较大,自然垮落时间变化较大,稳定时间漫长
4	地下水在竖向分布上连续性好,平面分布连续性差;由于产状陡倾,不同煤层间水力联系少,煤矿开采受地下水影响相对较小	由于上部未采煤层和顶底板垮落的双重影响,采空区实际都分布有充填物,因富水状况不同导致充填状况复杂,无明显规律



图2 研究区遥感影像及物探测线分布图

Fig. 2 Remote sensing image map of the research area and the distribution of geophysical trial lines

内采空区均具有上表描述特征。北区为乌鲁木齐某焦煤厂井下开采区域,最大开采深度达550 m,2017年关闭。煤矿封井时仅作了简单的放顶和回填工作,未彻底恢复治理,采空区覆岩中仍存在大量空洞,随着时间推移和风化作用的侵入,在雨、水、融冻、地震及外来动力因素的共同影响下使采空区上覆岩层持续破碎冒落,且垮落稳定时间漫长,将继续产生塌陷(方军等,2016),形成潜在的地质灾害风险,目前区内土地仅作为绿化用地。南区煤矿开采活动始于20世纪60年代,主要为简单的露天开采和粗放的小煤窑开采方式,90年代全部关闭。煤矿最大开采深度为243 m,主要开采深度100 m左右,也是采空区的形成主要深度范围。由于采煤历史久远,资料缺失,采空区边界不清、分布及赋存状况不明。基于研究区地表现状,亟需查明采空区的分布范围、深度和赋存状态,为后期恢复治理提供基础性依据,进而采取针对性的采空区综合治理措施,达到消除地灾隐患、改善生态环境,促进土地资源综合利用的目的。

## 2 物探方法选择及适用性分析

研究区及周边人类活动频繁,地表各类建筑物密

集,车辆、机械震动叠加工业、民用电干扰,背景复杂,要达到对研究区采空区地面精细探测的目的,必须采用综合物探方法(王亚辉等,2019),充分发挥各种地球物理方法的优点,尽可能减少多解性,提高解释的可靠性和准确性(黄光明等,2019)。

### 2.1 物性特征

本研究系统收集和测量了研究区地层岩石的物性,统计成果见表2。区内侏罗系泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、砂岩电阻率稍低,波速较高,呈相对低阻高速特征;煤层呈高电阻率-低波速特征。煤层采空区的物性特征相对来说更为复杂,当采空区被顶板垮落物和空气充填,无水或水很少,其电阻率较围岩要高,反之,充水会导致采空区电阻率低于围岩,但充水程度不同、水的矿化程度不同,电阻率也不尽相同;采空区无论垮塌、充填、充水与否,采空区与围岩影响区域相对正常岩层均为低密度、低速特征。综上所述,区内各地层岩性、煤层和采空区间存在电性、波速、密度及波阻抗差异,具备开展综合地球物理勘探的物性前提。

### 2.2 物探方法适用性分析

目前国内外采空区探测方法众多,常用的有:瞬

表2 研究区地层岩性物性参数统计表

Tab. 2 Statistic table of physical parameters of formation lithology in the research area

地层	岩性	电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )		纵波速( $\text{m/s}$ )		方法
		变化范围	常见值	变化范围	常见值	
Q	砂砾石土	200~250	250	1 200~1 500	1 500	统计测井成果
	泥岩	30~60	30	2 500~3 500	2 500	
	泥质粉砂岩	30~150	75	1 500~3 500	3 000	
	粉砂岩	60~130	105	2 000~4 000	3 000	
J	细砂岩	60~150	130	3 000~4 000	3 200	
	砂岩	40~250	150	3 000~4 500	3 500	
	煤层	65~250	180	1 000~3 000	2 000	
	采空区		< 15		< 1 000	

变电磁法、高密度电阻率法、重力勘探、地震勘探和微动勘探。在物性调查的基础上,从方法的原理出发,结合研究区地质特征及干扰条件,分析其适用性。

地面瞬变电磁法集易穿透高阻层、对低阻赋水采空区响应明显、施工便利、高效等优势于一身,是探测采空积水区的首选方法(陈卫营等, 2013),但易受地面导体或高压线的干扰(方军等, 2016),在研究区采用中心回线测深装置进行采集试验,由于1万伏输电线、750千伏高压线以及工业游散电流影响,衰减曲线变形失真严重,二次场衰减曲线普遍不合格,中心回线瞬变电磁装置在研究区不适用。等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM),是席振铎(2016)首次提出的一种新型瞬变电磁勘探技术,与传统的瞬变电磁法相比,其主要区别在于采用双线圈源建立一次场零磁通面来消除一次场对接收线圈的影响,能够直接接收地下纯二次场响应,消除“盲区”,有效解决了传统瞬变电磁法早期信号失真的难题,具有数据测量精度、分辨率高、抗干扰能力强、施工效率高等优点(赵虎等, 2021; 王亮等, 2022; 赵东东等, 2022),同时具备常规瞬变电磁方法易穿透高阻层、对低阻赋水采空区响应灵敏的优点,经过现场试验分析,该方法适合研究区采空区勘探。高密度电法反演信息量丰富、易于解译,不易受地面导体或高压线的干扰,且勘探成本低、效率高(严加永等, 2012; 李文, 2017; 孔繁良等, 2022),非常适合研究区浅层采空区勘查。采空区相对围岩地质体密度较低,会引起地面重力场的微弱变化,重力异常通常在0.05~0.5毫伽( $1\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ )量级(汤伏全, 2018),随着重力仪的精度不断提高,如美国LaCoste & Romberg公司推出的EG型重力仪,加拿大Scintrex公司CG系列

重力仪等,精度都已经达到了微伽( $1\times 10^{-8}\text{ m/s}^2$ )级别(何继善, 2022),通过高精度重力勘探手段推断解释研究区采空区的空间分布特征是可行的。地震勘探具有分辨率高、可靠性强、解释直观和信息量大等特点(陈中山等, 2022),在确定煤矿地层精细结构和采空区导致的局部不均匀性方面优势明显,但是急倾斜煤层、地层反射波难以成像,在研究区探测采空区不适用;微动勘探技术采用天然场源(Okada, 2006),绿色环保,不受电磁干扰和振动干扰影响,对地形及环境噪声无特殊要求,仪器设备轻巧、施工便利等优势,适用于各种地形及环境,在实际工程应用中越来越受到重视(陈实等, 2019; 何继善等, 2022; 蔡有良等, 2022),煤矿采空区填充物质与周边围岩接触面之间存在明显的波阻抗差异(吴飞等, 2021),针对研究区电磁、人文干扰复杂的特点,微动勘探技术非常适用。

### 2.3 物探方法参数选择

试验阶段投入物探仪器设备见表3。通过方法试验确定采用高密度电法、微动勘探、等值反磁通瞬变电磁和重力勘探4种方法,各方法主要施工参数及资料处理解释方法见表4。具体施工过程中,高密度电法作为主要勘探方法,大面积铺开,微动勘探、等值反磁通瞬变电磁和重力方法对重点剖面进行同点位测量,综合对比分析。

## 3 采空区综合探测结果

### 3.1 测区北部探测结果

NGM3线和NW1线位于北区中部(图2),与主煤层露头区域斜交。综合剖面成果如图3所示,NGM3

表3 投入主要物探仪器信息表

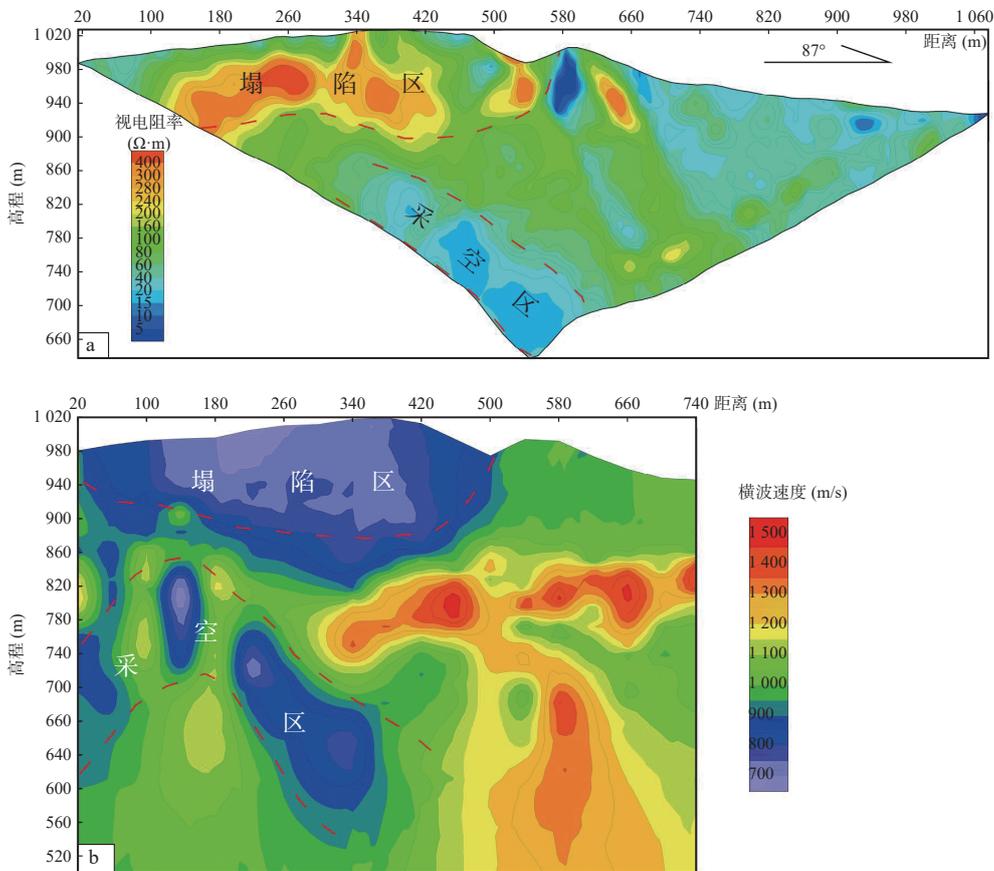
Tab. 3 Information table of the main geophysical instrument

序号	设备名称	型号	产地
1	瞬变电磁仪	Terra TEM	美国LAUREL(劳雷)公司
2	高密度电法仪	DUK-4	重庆地质仪器厂
3	高精度重力仪	CG-5	加拿大scintrex(先达利)公司
4	智能微动勘探系统	CN209	中科大国为
5	等值反磁通瞬变电磁仪	HPTEM-18	湖南五维地质科技有限公司

表4 各方法主要施工参数及资料处理解释

Tab. 4 Acquisition parameters and data processing and interpretation

探测方法	主要施工参数	资料处理解释
高密度电阻率法	采集装置：维纳(对称四极)装置； 供电电压：220~300 V；供电时间：0.5 s； 停供时间：0.1 s；电极距：10 m； 测线5长度：500~1100 m	坏点剔除、加载地形、视电阻率反演、网格化成图等
微动探测	矩阵类型：十字型；矩阵半径：50 m； 检波器频率：2 Hz；采集频率250 Hz； 采集时间：25 min以上；点距：10 m	SPAC法提取频散曲线、半波法经验公式反演、数据拼接、加载地形等
重力	测量方式：采用单程观测法， 早基点-测点-晚基点观测流程，当天闭合； 单点读数时间：45 s；点距：10 m	地形改正、高度改正及布格改正，布格重力异常计算，区域场和剩余重力异常分离
等值反磁通瞬变电磁	采集模式：定点模式；发射频率：0.625 Hz； 发射电流：10.5 A；关断时间：65 μs； 叠加次数：200次；重复观测：2次；点距：5~10 m	数据剔除、编辑等预处理，抽道，二维反演，网格化，二、三维显示



a.高密度电法 NGM3 线视电阻率剖面图；b.微动 NW1 视横波速度剖面图

图3 高密度电法 NGM3、微动 NW1 线综合剖面图

Fig. 3 Integrated profile of multi-electrode resistivity method line NGM3 and microtremor line NW1

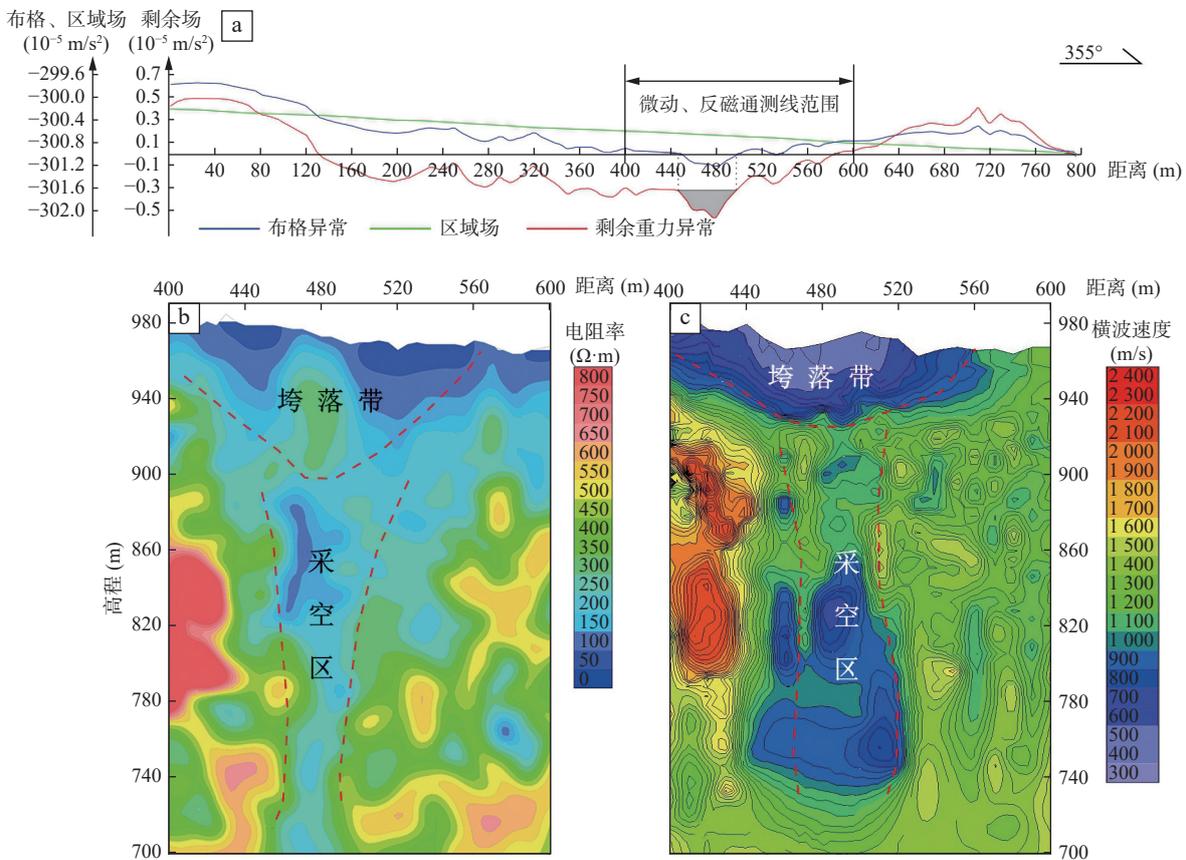
线 20~420 点中浅部视电阻率呈带-块状高阻闭合异常(图 3a),视电阻率值 250~500 Ω·m 底部标高 920 m 左右,对应 NW1 线 20~480 点浅部低速闭合异常(图 3b),视横波速度在 800 m/s 以下,底部标高 900 m 左右。由于矿区深部开采导致浅部形成塌陷,通过简单回充填治理后,相对原始地层松散、裂隙多,力学性质改变,造成波速降低,电阻率升高,推测浅部高阻-低速异常带为采空塌陷区引起。NW1 线 0~360 点中深部出现多个串珠状低速异常,视横波速度在 800 m/s 以下,与 NGM3 线深部低阻异常(未闭合)有一定的对应关系,矿区地下水丰富,采空区充水后呈低阻特征,波速在不密实地层呈低值,推断深部低阻-低速异常区域对应富水采空区。由于高密度电法勘探深度依赖于测线长度(雷旭友等,2009),场地限制,测线布置长度不够导致深部低阻异常未闭合,微动方法起到了互补作用。

NZ2 线位于北区中东部,垂直于构造线布设(图 2)。重力剖面成果见图 4a,NZ2 线剩余重力异常由

南向北总体表现为高-低-高的凹形异常特征,局部重力低位于 440~500 点,异常值  $(-0.55) \times 10^{-5} \sim (-0.25) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,极低值位于 480 点附近。在 400~600 点,剩余重力低异常区,同点位布设反磁通 NF2 线和微动 NW2 线(10 m 点距),剖面成果如图 4b、图 4c 所示,在浅部 400~560 点,存在中低阻、低速异常带,且深度范围和异常形态极为相似;深部 440~520 点,从浅至深分布近于直立的串珠状和带状低阻、低速异常。440~480 点地面投影为原始煤层露头区域,且深部向北陡倾,推断浅部异常区为采空区坍塌垮落带治理后现状的反映,下部近直立异常带由深部采空区引起,低阻、低速特征进一步说明采空区处于充水状态。

### 3.2 测区南部探测结果

SGM1-3 线位于南区中东部(图 2),视电阻率异常空间分布见图 5,在各测线中部均存在北倾的低阻异常带,向深部未封闭,且沿垂直测线方向上有一定的延伸。据此在 SGW2 线 200~320 点,同点位布设微动 SW2 线,综合剖面成果如图 6 所示,在 230~290 点,



a.重力 NZ2 线剖面; b.反磁通瞬变电磁 NF2 线视电阻率剖面; c.微动 NW2 线视横波速度剖面

图4 重力 NZ2 线、反磁通瞬变电磁 NF2 线和微动 NW2 线综合剖面图

Fig. 4 Integrated profile of gravity NZ2 line, OCTE NF2 line and microtremor line NW2 line

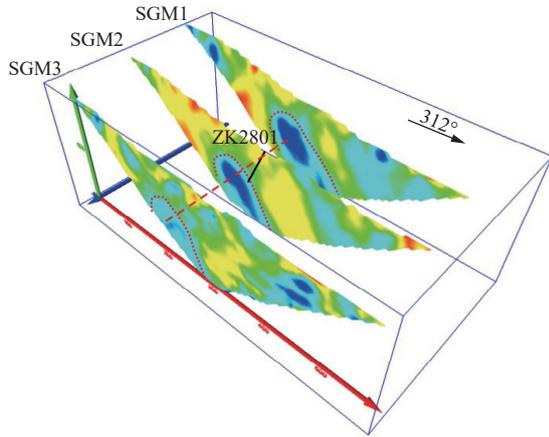
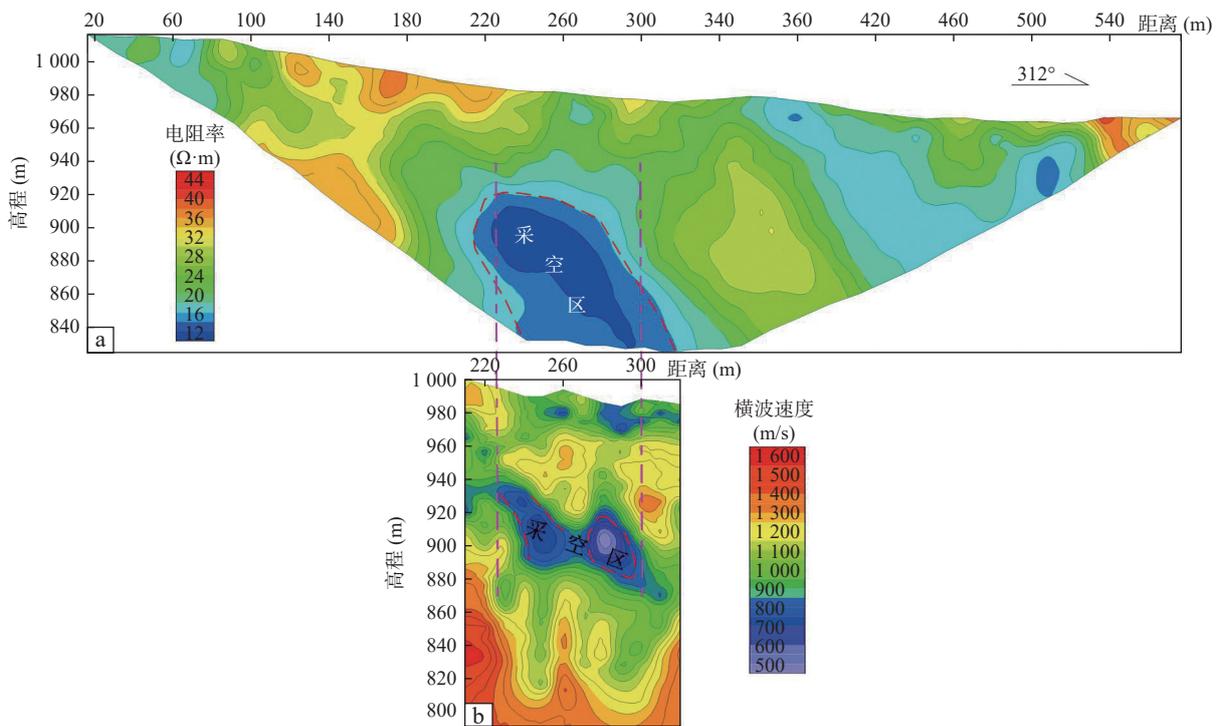


图5 SGM1-3 高密度电法视电阻率剖面图三维展示图  
Fig. 5 Three-dimensional display of apparent resistivity profile of SGM1-3 lines



a. 高密度电法 SGM2 线视电阻率剖面图；b. 微动 SW2 视横波速度剖面图

图6 高密度电法 SGM2 线、微动 SW2 线综合剖面图

Fig. 6 Integrated profile of multi-electrode resistivity method line SGM2 and microtremor line SW2

### 4 结论与建议

(1)通过本次综合物探勘查工作,在北区圈定一处近 EW 走向,长为 670 m、宽为 15~75 m 的采空区带,在竖向上延伸范围较大,深为 100~450 m,处于充水状态;在南区圈定一处 NE 走向,长为 520 m、宽为

标高 940~850 m 处存在不规则低速异常区(图 6b),波速 500~800 m/s,与低阻异常区有很好的对应关系。综合区内地质、水文特征分析,推断低阻低速异常由煤层采空区富水引起。

### 3.3 探测结果验证

为验证物探成果准确性,在北区 NZ2 线 430 号点布置 ZK803 钻孔,南区 SW2 线之间 310 号点布置 ZK2801 钻孔,平面位置见图 2。ZK803 终孔深度为 208 m,于 200 m 左右遇冲洗液漏失、掉钻的采空区特征;ZK2801 终孔深度为 96 m,87 m 遇冲洗液漏失、掉钻的采空特征。钻探成果揭示的煤矿采空区分布位置、深度和赋存状态与综合物探分析解释结果基本一致,证明了物探成果真实性和可靠性,可以作为后期采空区治理施工的基础依据。

15~30 m 的采空区带,深为 50~120 m,处于充水状态。物探成果经钻探验证可靠,为后期采空区的治理施工提供了基础依据。

(2)通过多种物探方法对比试验,验证了在研究区复杂电磁、人文干扰背景下,高密度电法、微动、重力和等值反磁通等物探方法对急倾斜煤层采空区勘查的有效性。

(3)通过高密度电法、微动、重力和等值反磁通综合物探成果结合钻探验证结果,总结了“低阻-低速”、“高阻-低速”、“低重-低速”等不同参数组合与采空区不同赋存状态的对应关系。

(4)针对急倾斜煤层采空区竖向上深度和厚度分布范围大的特点,建议采用重力、高密度电法开展面积性工作,圈定采空区平面分布范围,然后在异常区范围布设微动、等值反磁通剖面,进一步确定采空区向深部的延伸范围和赋存状况。

致谢:等值反磁通瞬变电磁工作得到中南大学地球科学与信息物理学院、湖南五维地质科技有限公司周胜博士团队的大力支持,在此表示衷心感谢。

## 参考文献(References):

蔡有良,吴文贤,彭清华,等.等值反磁通瞬变电磁和微动法在内蒙古某萤石矿采空区探测中的应用效果浅析[J].工程地球物理学报,2022,19(4):459-465.

CAI Youliang, WU Wenxian, PENG Qinghua, et al. Analysis on The Application Effect of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Goaf Detection of A Fluorite Mine in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(4): 459-465.

陈实,刘云祯,李延清,等.综合物探技术在城市活动断裂调查中的应用—以乌鲁木齐八钢石化断裂为例[J].地球物理学进展,2019,34(4):1584-1591.

CHEN Shi, LIU Yunzhen, LI Yanqing, et al. Application of Integrated Geophysical Techniques in Investigation of Urban Active Faults: Take Rümqi Bagangshihua Fracture as An Example[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1584-1591.

陈卫营,薛国强.瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用[J].地球物理学进展,2013,28(5):2709-2717.

CHEN Weiyang, XUE Guoqiang. Application on Coal-mine Voids Detection with Multi-device TEM Technology[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2709-2717.

陈中山,殷全增,耿丽娟,等.关闭小煤矿采空区地面探测方法优选[J].地球物理学进展,2022,37(1):367-373.

CHEN Zhongshan, YIN Quanzeng, GENG Lijuan, et al. Optimization of Ground Detection Method for Small Closed Coal Mine [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 367-373.

程久龙,胡克峰,王玉和,等.探地雷达探测地下采空区的研究[J].岩土力学,2004,25(S1):79-82.

CHENG Jiulong, HU Kefeng, WANG Yuhe, et al. Research on Detecting of Underground Mined-out Areas by Using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1): 79-82.

程久龙,潘冬明,李伟,等.强电磁干扰区灾害性采空区探地雷

达精细探测研究[J].煤炭学报,2010,35(2):227-231.

CHENG Jiulong, PAN Dongming, LI Wei, et al. Study on The Detecting of Hazard Abandoned Workings by Ground Penetrating Radar on Strong Electromagnetic Interference Area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 227-231.

方军,王乐杰.急倾斜煤层老采空区物探方法探讨[J].矿山测量,2016,44(4):90-94.

FANG Jun, WANG Lejie. Discussion on The Exploration Techniques in Steep Inclined Seams of The Abandoned Goaf Areas [J]. Mine Surveying, 2016, 44(4): 90-94.

杜臻,张茂省,冯立,等.鄂尔多斯盆地煤炭采动的生态系统响应机制研究现状与展望[J].西北地质,2023,56(3):78-88.

DU Zhen, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Research Status and Prospect of Ecosystem Response Mechanism to Coal Mining in Ordos Basin [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 78-88.

范涛,王秀臣,李貅,等.瞬变电磁方法在探测煤矿浅层高阻采空区中的应用[J].西北地质,2010,43(2):156-162.

FAN Tao, WANG Xiuchen, LI Xiu, et al. Application of TEM in Detecting Goaf of Coal Mine with High-resistivity and Shallow-layer [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 156-162.

韩许恒,郁春霞.氡射气探测在采空区勘察中的应用[J].工程勘察,1996(5):62-66+72.

HAN Xuheng, YU Chunxia. Application of Radon Emission Detection in Goaf Exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1996(5): 62-66+72.

冯立,张鹏飞,张茂省,等.新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J].西北地质,2023,56(3):19-29.

FENG Li, ZHANG Pengfei, ZHANG Maosheng, et al. Strategies and Practical Paths for Ecological Restoration and Comprehensive Management in Yulin Coal Mining Area in the New Era [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 19-29.

何继善,李帝铨,胡艳芳,等.城市强干扰环境地下空间探测技术与应用[J].工程地球物理学报,2022,19(5):559-567.

HE Jishan, LI Diqian, HU Yanfang, et al. Geophysical Exploration Methods for Strong Interference Urban Underground Space [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(5): 559-567.

贺阳阳.新疆乌市104团急倾斜煤层采空区稳定性及失稳过程分析[D].西安:西安科技大学,2020.

HE Yangyang. Stability and Instability Process Analysis of Steep Coal Seam of No. 104 Group in Xinjiang [D]. Xi'an: Thesis for Master's Degree of Xi'an University of Science Technology, 2020.

黄光明,赵举兴,李长安,等.岩溶区地下溶洞综合物探探测试验研究—以福建省永安大湖盆地为案例[J].地球物理学进展,2019,34(3):1184-1191.

HUANG Guangming, ZHAO Juxing, LI Chang'an, et al. Detection

- of Underground Karst Caves by Comprehensive Geophysical Exploration in Karst Area: Taking Yongan Dahu Basin in Fujian Province as Example[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1184-1191.
- 胡天义, 刘欢, 何威荣, 等. 微动勘探在黑土地地表基质调查中的应用——以莫旗为例[J]. *华北地质*, 2024, 47(4): 80-90.
- HU Tianyi, LIU Huan, HE Weirong, et al. Application of micro-tremor exploration in surface matrix survey of black land: a case study of Moqi[J]. *North China Geology*, 2024, 47(4): 80-90.
- 孔繁良, 徐超, 李军. 高密度电阻率法在新疆某水库大坝坝体隐患探测中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2022, 19(1): 16-20.
- KONG Fanliang, XU Chao, LI Jun. 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.
- 雷旭友, 李正文, 折京平. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(1): 340-347.
- LEI Xunyou, LI Zhengwen, ZHE Jingping. Applications and research of the high resolution resistivity method in caves, mined region and exploitation of Karst region[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(1): 340-347.
- 李文. 煤矿采空区地面综合物探方法优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(1): 194-199.
- LI Wen. Optimization Study of Surface Comprehensive Geophysical Detection Methods of Coal Mine Goafs[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 194-199.
- 蔺楠, 陈莹, 马露, 等. 陕北煤炭基地矿山生态修复成效评估体系构建与实现[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 89-97.
- LIN Nan, CHEN Ying, MA Lu, et al. Construction and Implementation of Evaluation System for Ecological Restoration Effectiveness of Mines in Northern Shaanxi Coal Base[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 89-97.
- 刘小平. 我国建(构)筑物场地下伏煤矿采空区勘察技术进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(4): 139-146.
- LIU Xiaoping. Progress in investigation technology for coal mine goafs under buildings and structures in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(4): 139-146.
- 刘学军, 刘震, 杨镜明. 大理深巨厚急倾斜煤层采空区勘察手段探索[J]. *工程勘察*, 2018, (增刊1): 386-392.
- LIU Xuejun, LIU Zhen, YANG Jingming. The Research on The Exploration Means of Deep and Extra-thick Coal Seam Mining Area[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018, (Sup. 1): 386-392.
- 罗霄, 徐智海, 李正胜, 等. 多参数综合物探方法在煤矿采空区勘探中的应用研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(2): 32-37.
- LUO Xiao, XU Zhihai, LI Zhengsheng, et al. Application of Multi-parameter Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Exploration of Goaf in Coal Mines[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(2): 32-37.
- 屈栓柱, 唐宝山, 张海珠, 等. 准噶尔盆地南缘盆地轮廓和构造属性及页岩气战略选区的重磁电勘探研究[J]. *地质评论*, 2019, 65(6): 1288-1298.
- QU Shuanzhu, TANG Baoshan, ZHANG Haizhu, et al. Study on The Shape and Structural Properties of The Southern Margin of Junggar Basin and The Potential Shale-Gas Strategic Deposit with Integrated Geophysical Methods[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1288-1298.
- 苏贵磊, 公绪飞, 杨富强, 等. 含水采空区瞬变电磁时空响应特征研究及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(12): 201-212.
- SONG Guilei, GONG Xufei, YANG Fuqiang, et al. Spatiotemporal response characteristics of transient electromagnetic field in water-bearing goaves and their applications[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 201-212.
- 苏永军, 胡婷, 曹占宁, 等. 基于高密度电阻率法的雄安新区填埋坑塘探测效果分析[J]. *华北地质*, 2023, 46(4): 70-75.
- SU Yongjun, HU Ting, CAO Zhanning, et al. Analysis of detection effect of landfill pond by the high density resistivity method in Xiong'an New Area[J]. *North China Geology*, 2023, 46(4): 70-75.
- 孙自明, 王毅. 新疆博格达山西缘米泉地区构造解析与建模[J]. *现代地质*, 2015, 28(2): 300-307.
- SUN Ziming, WANG Yi. Structural Analysis and Modeling in Mi-quan Area of The Western Margin of the Bogda Mountain, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 2015, 28(2): 300-307.
- 汤伏全, 李庚新, 原一哲. 煤矿采空区地表重力异常效应模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 945-950.
- TANG Fuquan, LI Gengxin, YUAN Yizhe. Simulation And Study on Ground Gravity Anomaly Effect in Goaf of Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 945-950.
- 王亮, 龙霞, 王婷婷, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在城市浅层空洞探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2022, 46(5): 1289-1295.
- WANG Liang, LONG Xia, WANG Tingting, et al. Application of the opposing-coils transient electromagnetic method in detection of urban shallow cavities[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(5): 1289-1295.
- 王强, 田野, 刘欢, 等. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2022, 46(2): 531-536.
- WANG Qiang, TIAN Ye, LIU Huan, et al. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting in Investigation of Coal Mine Goaves[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(2): 531-536.
- 王亚辉, 张茂省, 师云超, 等. 基于综合物探的城市地下空间探测与建模[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 83-94.
- WANG Yahui, ZHANG Maosheng, SHI Yunchao, et al. Precise De-

- tection and Modeling of Urban Underground Space Based on Integrated Geophysical Exploration[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 83-94.
- 王双明, 孙强, 袁士豪, 等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 1-10.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, YUAN Shihao, et al. On the Coordinated Development of Coal-Water-Soil Multiple Resources[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 1-10.
- 吴飞, 陈海波. 微动探测技术在安徽某煤矿采空区的应用[J]. *能源技术与管理*, 2021, 46(5): 141-144.
- WU Fei, CHEN Haibo. The Application of Microtremor Survey Technology in A Coal Mine Goaf in Anhui Province[J]. *Energy Technology and Management*, 2021, 46(5): 141-144.
- 武欣, 潘冬明, 于景邗. 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): 1197-1206.
- WU Xin, PAN Dongming, YU Jingcun. Review in the geophysical methods for coalmine goaf prospecting[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 1197-1206.
- 席振铎, 龙霞, 周胜, 等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3428-3435.
- XI Zhenzhu, LONG Xia, ZHOU Sheng, et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(9): 3428-3435.
- 徐慧, 牟义, 杨思通, 等. 榆林地区浅埋煤层采空区电法综合勘探技术[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(4): 792-801.
- XU Hui, MU Yi, YANG Sitong, et al. Comprehensive Exploration Technology Based on The Electric Methods for The Goaf of Shallow Coal Seams in The Yulin Area[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4): 792-801.
- 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法进展与展望[J]. *物探与化探*, 2012, 36(4): 576-584.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LV Qingtian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2012, 36(4): 576-584.
- 姚建强, 毛玉坤. 新疆公路急倾斜煤矿采空区处理施工工法[J]. *山西建筑*, 2018, 44(6): 56-58.
- YAO Jianqiang, MAO Yukun. Xinjiang Highway Steeply Inclined Coal Mining Area Treatment Construction Method[J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(6): 56-58.
- 张健桥, 尹维民, 张兴洲. 综合物探方法在厚覆盖煤矿采空区探测中的应用[J]. *地质论评*, 2021, 66(增1): 51-53.
- ZHANG Jianqiao, YIN Weimin, ZHANG Xingzhou. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Detecting Goaf of Thick Overburden Coal Mine[J]. *Geological Review*, 2021, 66(supp.1): 51-53.
- 张旭, 杜晓娟, 苏超, 等. 辽源煤矿采空区重力异常解释研究[J]. *工程地球物理学报*, 2015, 12(6): 755-759.
- ZHANG Xu, DU Xiaojuan, SU Chao, et al. Gravity Anomaly Interpretation of Mined-out Area in Liaoyuan Coal[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2015, 12(6): 755-759.
- 张昭, 殷全增. 不同年限采空区下地震勘探效果实例研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 237-242.
- ZHANG Zhao, YIN Quanzeng. Case study on the effects of seismic exploration beneath the goafs of different ages[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 237-242.
- 赵东东, 张宝松, 宗全兵, 等. 综合物探方法在地铁孤石探测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(3): 1360-1370.
- ZHAO Dongdong, ZHANG Baosong, ZONG Quanbing, et al. Application of integrated geophysical method to detection of boulder in subway shield zone[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 1360-1370.
- 赵虎, 王玲辉, 程强, 等. 等值反磁通瞬变电磁成像技术及工程应用[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2244-2250.
- ZHAO Hu, WANG Linghui, CHENG Qiang, et al. Opposing coils transient electromagnetics imaging technology and engineering application[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(5): 2244-2250.
- 赵子锋. 高速公路下伏急倾斜采空区勘察技术及对路基稳定影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHAO Zifeng. Study on Survey Technology of the Steep Goaf under Expressway and Its Impact on Stability of Embankment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- Okada H. Theory of efficient array observations of Microtremors with special reference to the SPAC Method[J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(1): 73-85.