doi：10. 3969/j. issn. 1005-7854. 2021. 02. 001

不同感应类电法勘探的煤矿采空区积水探测对比研究

林井祥　李月超　李国鑫　李博文　李彬仕
（黑龙江科技大学 矿业工程学院，哈尔滨 150022）

摘　要：为对比不同电法勘探确定矿井采空区含水体分布规律，以鸡西矿区某煤矿工程为实例，应用瞬变电磁法和大地电磁法的四种设备对煤矿采空区积水体进行探测，通过探测反演成果与已知资料对比分析，进行钻探验证研究。结果显示，四种探测设备反演结果的视电阻率变化特征基本相似，都能较好地反映出电性层在垂向上的分布规律，视电阻率绝对值差别不大，所得电阻率值为 0～100 Ω·m，探测推断的采空区积水区域范围大致相同，并指出水源的导水通道，与现场实际资料及钻探结果基本一致，验证了这两种方法的有效性，其中瞬变电磁法的 PROTEM-57 瞬变电磁仪勘探结论更为精确。该研究可为煤矿防治水工作提供技术支持，具有十分重要的工程应用价值。

关键词：感应类电法；采空区积水；视电阻率；探测
中图分类号：TD745. 2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-7854(2021)02-0001-07

Detecting comparative study on goaf hydrops of coal mine by different induction electrical methods

LIN Jing-xiang　LI Yue-chao　LI Guo-xin　LI Bo-wen　LI Bin-shi
(School of Mining Engineering，Heilongjiang University of Science & Technology，Harbin 150022，China)

Abstract：In order to determine the distribution law of water bearing body in mine goaf by comparing different electrical prospecting，taking a coal engineering in Jixi mining area as an example，four kinds of equipments of Transient Electromagnetic Method and Magnetotelluric Method are applied to detect goaf hydrops of coal mine. Through comparative analysis of detection inversion results and known data to carry out the drilling verification research. The results show that the apparent resistivity variation characteristics of the inversion results of the four kinds of detection equipment are basically similar，which can reflect the vertical distribution law of electric layer，the apparent resistivity in absolute value is similar，the obtained resistivity value is 0～100 Ω·m，which can detect and refer that the regional range of goaf hydrops is approximately same. It is pointed out that the underground watercourse of water source is basically consistent with the actual field data and drilling results，which verifies the effectiveness of the two methods，and the exploration conclusion of PROTEM-57 is more accurate. The research can provide technical support for mine water control and has very important engineering application value.

Key words：induced electrical；goaf hydrops；apparent resistivity；detection

在煤矿建设和生产中，采空区积水成为矿井水害事故的主要原因。因此清楚地掌握采空区含水体的分布规律，成为煤矿安全生产的依据[1-4]。通过实践证明，当前主要是使用地球物理勘探技术探测采空区含水体的分布规律，而最有效的地面地球物理探测方法主要是电法勘探。电法勘探的方法有很多种分类方式，按照产生异常电磁场的原因来分类，则可分为传导类电法、感应类电法[5]。由于井工煤矿开采形成的采空区相对深度较深，所以其更适用于感应类电法勘探[6-7]。瞬变电磁法和大地电

收稿日期：2020-05-15
基金项目：黑龙江省高等学校基本科研业务费支持项目(Hkdct201802)；黑龙江科技大学大学生科研创新训练项目(KY2020002)
第一作者：林井祥，讲师，硕士，研究方向为煤矿水害防治与采矿工程。E-mail：linjingxiang34@163. com

磁法这两种电法是对煤矿采空区积水很敏感的感应类电法勘探方法，同时运用这两种方法进行勘探对比研究，能更准确地反映煤矿采空区积水情况[8]。

目前基于电法勘探确定矿井采空区含水体分布规律的方法众多，但不同方法之间对比的研究较少[9-11]。鉴于此，笔者结合鸡西矿区某煤矿工程实例，应用瞬变电磁法和大地电磁法对煤矿采空区积水体进行探测，通过瞬变电磁法与大地电磁法探测反演成果与已知资料及钻探结果进行对比分析研究，比较两种研究方法四种探测设备在煤矿采空区积水体探测中的优缺点及应用效果。

1　研究方法

1.1　瞬变电磁法

瞬变电磁法——基于电磁感应原理上的时间域人工源电磁探测方法。它利用发送回线 Tx(磁源)发送脉冲磁场(通常称为一次场)，在一次场关断的瞬间，由于作用在良导电矿体上磁通的变化，在良导电矿体中激励起的感应涡流，其是随时间衰变的涡流场，从而激励起随时间变化的感应电磁场(通常称为二次场)。由于二次场包含有良导电矿体形状、大小、位置及导电性等丰富的地电信息，在一次脉冲磁场的间歇期间，利用接收线圈 Rx 观测二次场(或称响应场)，通过对这些响应信息的提取和分析，从而达到探测目的[12-13]。

1.2　大地电磁法

大地电磁法——基于电磁感应原理，用于研究地球电性的一种地球物理方法。它利用宇宙中的太阳风、雷电等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源，称为一次场，该一次场是平面电磁波，垂直入射到大地介质中，大地介质中将会感应出变化的电场即大地电流场，并产生二次电磁场，在地球内部，这种电磁场的分布取决于岩石的电性结构。在地面上单点观测天然交变电磁场互相垂直的 Ex、Ey、Hx、Hy 四个分量，分析研究地面波阻抗随频率的变化，可以探测出地球内部岩石电性随深度的分布规律[14]。

2　瞬变电磁法和大地电磁法勘探

2.1　勘探区概况

勘探区为黑龙江省鸡西市鸡冠区某煤矿，其矿井设计生产能力为 0.6 Mt/a，现开采煤层为无夹矸的 1#、2#煤层，1#、2#煤层均位于侏罗系上统鸡西群城子河组上部。该矿开拓方式为双斜井开拓，通风方式为中央并列抽出式通风，采煤方法为走向长壁后退式采煤法。井口高程为＋295 m，现开采水平为－65 m。勘探区地层自上而下见表 1。勘探区地形为山地，测区内有厂矿企业、高压线、水沟、铁路等。

表 1　勘探区地层情况

Table 1　The stratigraphy of the exploration area

煤层系统			地层名称接触关系	
界	系	统		
新生界(KZ)	第四系(Q)		冲击层	
	第三系(R)	上第三系(N2)	高位立武岩(BN2)	
中生界(MZ)	白垩系(K)	下白垩(K1)	桦山群(K1hs)	
	侏罗系(J)	上侏罗系(J_3)	鸡西群(J_32)	穆棱组(J_3m)
				城子河组(J_3c)
				滴道组(J_3d)
元古界(Pt)	下元古界(Pt1)	上部($Pt1^2$)	麻山群($Pt_{12}ms$)	

为保证对比试验效果，根据勘探区地表及地质情况，试验并确定理想的采集数据参数，同时保证采集数据质量和设备仪器性能符合相关规程，因此对比试验线选择在勘探区西部的 2120E 测线，测点选择在勘探区北部的 720 N～920 N 测点，此处没有电磁干扰的厂矿企业、高压线、水沟、铁路等影响因素，同时存在已知采空积水区。

2.2　瞬变电磁法及勘探成果

本次瞬变电磁法勘探选用大定源回线装置，采用加拿大 GEONICS 公司生产的 PROTEM-57 瞬变电磁仪和澳大利亚 MONEX GeoScope 公司生产的 TerraTEM24 瞬变电磁仪，这两套仪器均具备探测精度高、受地形干扰小等优点。仪器主要性能参数见表 2。

表 2　PROTEM-57 瞬变电磁仪和 TerraTEM24 瞬变电磁仪性能参数表

Table 2　The performance parameter tables of the PROTEM-57 TEM and TerraTEM24 TEM

参数仪器	PROTEM-57 瞬变电磁仪	TerraTEM24 瞬变电磁仪
供电电流	0～25 A，连续可调	0～50 A，连续可调
供电频率	25 Hz(高频)/6.25 Hz(中频)/2.5 Hz(低频)	0.5～25 Hz
采样道数	20 门或 30 门	最大 200 个窗口
同步方式	电缆线同步或晶体同步	GPS 同步或线缆同步
动态范围	29 bits(1～175 db)	24 bits AD
输出电压	18～150 V，连续可调	24～240 V，连续可调
数据管理	固态存储 3300 套数据，RS232 输出	30 GB 硬盘 USB 数据传输，工业标准 RS485 接口
接收方式	三维/高频接收线框	专用接收线框

通过运用 PROTEM-57 瞬变电磁仪和 TerraTEM24 瞬变电磁仪对勘探区进行探测，由于论文篇幅限制，采集参数对比试验不展开介绍了，两套设备主要工作参数见表 3。采用反演软件进行数据处理，使用 Surfer 软件成像出图，如图 1 中(a)为 PROTEM-57 瞬变电磁仪探测所得，(b)为 TerraTEM24 瞬变电磁仪探测所得。

表 3　PROTEM-57 瞬变电磁仪和 TerraTEM24 瞬变电磁仪工作参数表

Table 3　The working parameter tables of the PROTEM-57 TEM and TerraTEM24 TEM

参数	PROTEM-57 瞬变电磁仪	TerraTEM24 瞬变电磁仪
发射频率/Hz	2.5	25
发射框面积/(m× m)	400×400	360×360
发射电流/A	14	14.6
关断时间/μs	213	210
同步方式	电缆线同步	GPS 同步
线距/m	40	40
点距/m	20	20
反演软件	BETEM 软件	IX1Dv3 软件

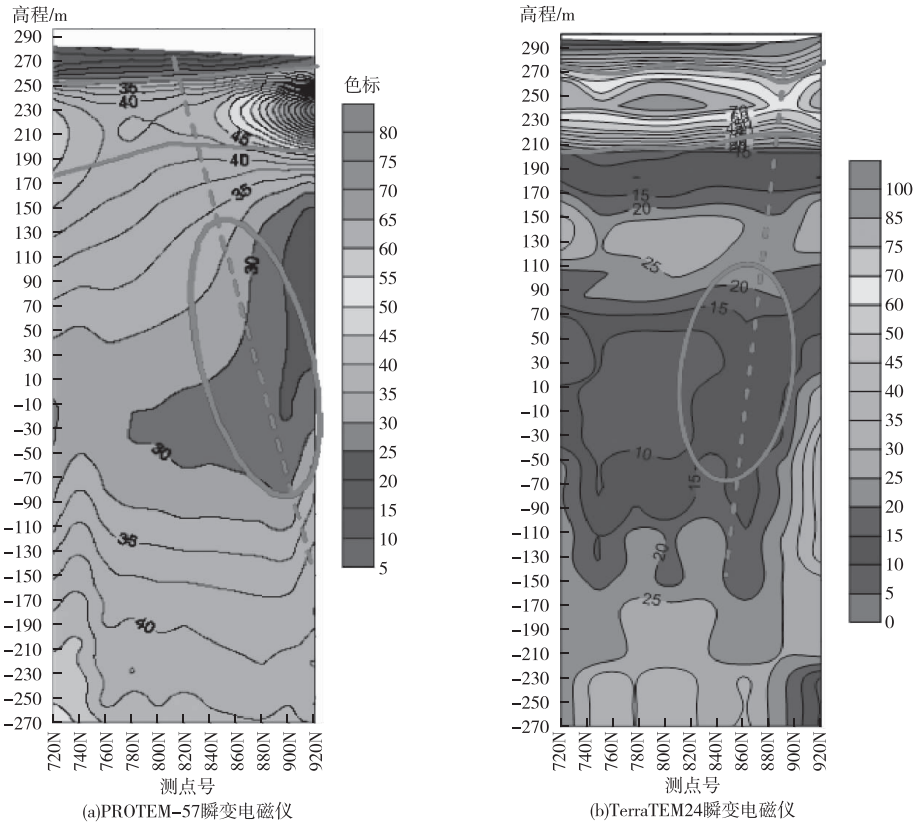


图 1　瞬变电磁法测线视电阻率剖面图

Fig. 1　The apparent resistivity profiles of the line of TEM

从图 1 中可见，第一，视电阻率变化特征基本相似，呈“低—中—高—低—中”变化。第二，视电阻率绝对值差别较大，PROTEM-57 瞬变电磁仪所得电阻率值为 15～85 Ω·m，TerraTEM24 瞬变电磁仪探测所得电阻率值为 10～105 Ω·m。第三，图中均出现了明显的低阻异常反映且存在局部差异，探测推断的采空区积水区域范围大致相同(图中椭圆圈定区域)，并推断水源的导水通道(图中虚线)。PROTEM-57 瞬变电磁仪探测采空区积水区是测点 840 N—920 N 之间－90～＋130 m 标高范围内，TerraTEM24 瞬变电磁仪探测采空区积水区是测点 720 N—920 N 之间－70～＋110 m 标高范围内。第四，由于采用不同的反演软件，前者是用 BETEM 软件，后者是用 IX1Dv3 软件，前者反演结果在图中显示分辨率较高，细节更丰富，识别规模的地质体特征强于后者，可见 BETEM 软件反演效果要优于 IX1Dv3 软件。

2.3　大地电磁法及勘探成果

本次大地电磁法勘探采用美国电磁研究机构 EMI 和电磁仪器制造商 Geometrics 公司联合研制的 EH-4 连续电导率剖面仪和 Geode EM3D 电磁勘探系统，这两套仪器均具备工作效率高、设备体积小、质量轻等优点。仪器主要性能参数见表 4。

表 4　EH-4 连续电导率剖面仪和 Geode EM3D 电磁勘探系统性能参数表

Table 4　The performance parameter tables of the EH-4 and Geode EM3D

参数	EH-4 连续电导率剖面仪	Geode EM3D 电磁勘探系统
频率范围/Hz	10～92 000	100～1 000
冲量/Amp-m^2	400	400
电源	12 V，60 Ah 电瓶	12 V，60 Ah 电瓶
磁棒探头	配有 10 Hz～100 kHz 的磁感应棒	配有 0.1～1 kHz 的磁感应棒
道数	4 道(2 电，2 磁)	4 道(2 电，2 磁)

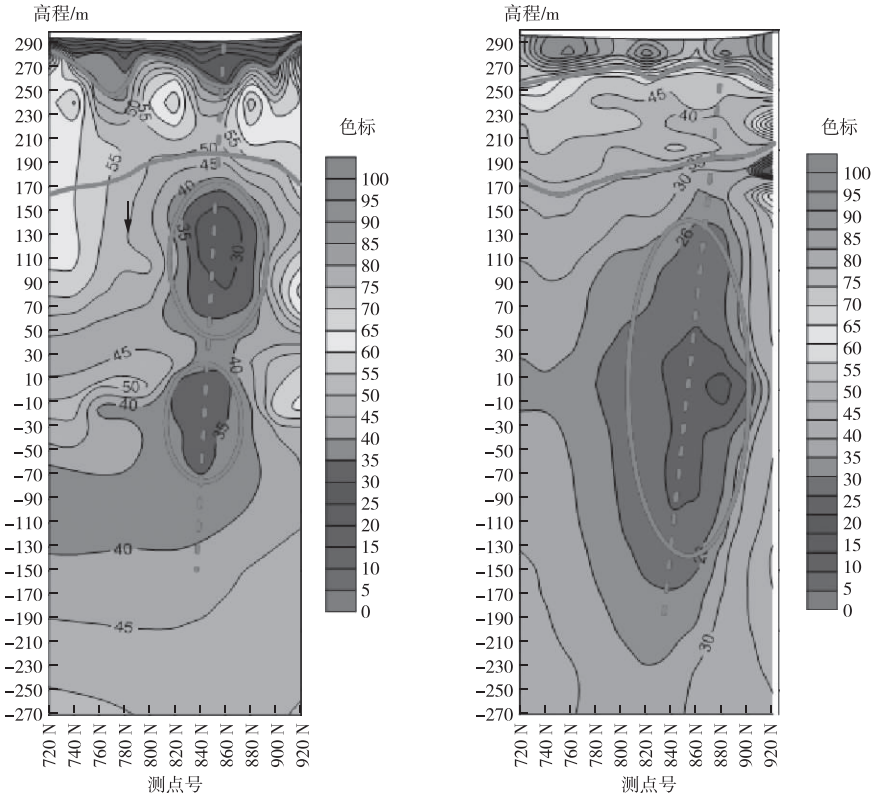
通过运用 EH-4 连续电导率剖面仪和 Geode EM3D 电磁勘探系统对勘探区进行探测，由于论文篇幅限制，采集参数对比试验不展开介绍了，两套设备主要工作参数见表 5。采用反演软件进行数据处理，使用 Surfer 软件成像出图，如图 2 中(a)为 EH-4 连续电导率剖面仪探测所得，(b)为 Geode EM3D 电磁勘探系统探测所得。

从图 2 中可见，第一，视电阻率变化特征差异较大，前者呈“低—中—高—中—低—中”变化，后者呈“高—中—低—中”变化，差异主要来源于 Geode EM3D 电磁勘探系统浅部盲区数据导致的。第二，视电阻率绝对值没有差别，EH-4 连续电导率剖面仪和 Geode EM3D 电磁勘探系统探测所得电阻率值为 0～100 Ω·m。第三，图中均出现了明显的低阻异常反映且存在局部差异，探测推断的采空区积水区域范围大致相同(图中椭圆圈定区域)，并推断水源的导水通道(图中虚线)。EH-4 连续电导率剖面仪探测采空区积水区是测点 820 N—900 N 之间－70～＋150 m 标高范围内，Geode EM3D 电磁勘探系统探测采空区积水区是测点 800 N—900 N 之间－130～＋130 m 标高范围内。第四，由于采用不同的反演软件，前者是用设备自带的 IMAGEM 2D 软件，后者是用 第三方 Zonge SCS 2D 软件，可见前者数据处理时间明显少于后者。

表 5　EH-4 连续电导率剖面仪和 Geode EM3D 电磁勘探系统工作参数表

Table 5　The working parameter tables of the the EH-4 and Geode EM3D

参数仪器	EH-4 连续电导率剖面仪	Geode EM3D 电磁勘探系统
观测模式	张量连续剖面	张量连续剖面
布极方式	“＋”字形	“＋”字形
采集频段	Band 1(10～1 K) Band 4(500～3 K) Band 7(750～100 K)	24 kHz(10 kHz～1 500 Hz) 3 kHz(1 500 Hz～20 Hz) 93.75 Hz(20 Hz～0.1 Hz)
叠加次数	32	50(24 kHz)、100(3 kHz)、3(93.75 kHz)
点距	20	20
极距	20	20(40)
反演软件	IMAGEM 2D	Zonge SCS 2D



(a)EH-4 连续电导率剖面仪　　(b)Geode EM3D电磁勘探系统

图 2　大地电磁法测线视电阻率剖面图

Fig. 2　The apparent resistivity profiles of the line of magnetotelluric method

2.4　两种方法与已知资料及钻探对比分析

根据现场勘查和矿方提供的水文地质资料及采掘工程图(图 3)可知，在该测线的 840 N-920 N 测点处为 2014 年炮采形成的 1#、2#左五片采空区，采空区积水的导水通道主要是该测线附近的已知 F3 断层与采空区及上覆岩层裂隙形成的。

现场对该测线 860 N 测点处进行探空钻探验证，探空钻探结果显示：钻孔深度在 160 m 处见空同时见水，探空钻孔情况见表 6。

根据以上分析结果，瞬变电磁法和大地电磁法两种方法的四种设备探测的采空区积水相应深度与现场实际资料及钻探结果基本一致，验证了这两种方法的有效性，其中瞬变电磁法的 PROTEM-57 瞬变电磁仪勘探结论更为精确。

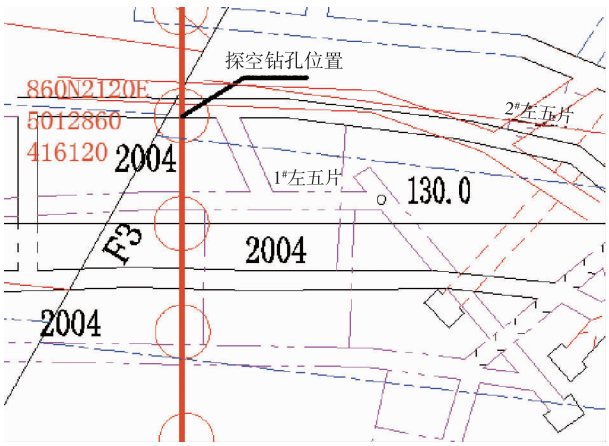


图 3　采掘工程图

Fig. 3　The mining engineering drawing

表 6　钻孔探空情况一览表

Table 6　The　list of drilling sounding

钻孔编号	钻孔深度/m	主要地层情况	揭露采空区情况
ZK1	160	0～6 m 为粉质黏土，6～36 m 为强风化细砂岩，36～36.5 m 为煤，36.5～40 m 为中风化粉砂岩，40～40.5 m 为煤，40.5～55.0 m 为中风化粉砂岩，55.0～55.5 m 为煤，55.5～95 m 为中风化粉砂岩，95～96.5 m 为煤，96.5～119 m 为中风化粉砂岩，119～119.5 m 为煤，119.5～128 m 为中风化粉砂岩，128～129 m 为煤，129～160 m 为中风化粉砂岩，160 m 见采空区，见水	+130 m 为含水采空区上界

3　结论

以鸡西矿区某煤矿工程为实例，采用瞬变电磁法和大地电磁法的四种设备探测采空区积水空间位置，根据探测成果的视电阻率变化值、反演剖面图、采空区积水体探测效果的差异，结合已知资料及钻探结果进行对比分析。结果显示，四种探测设备反演结果的视电阻率变化特征基本相似，都能较好地反映出电性层在垂向上的分布规律，视电阻率绝对值差别不大，所得电阻率值为 0～100 Ω·m，探测推断的采空区积水区域范围大致相同，并指出水源的导水通道，与现场实际资料及钻探结果基本一致，验证了这两种方法的有效性，其中瞬变电磁法的 PROTEM-57 瞬变电磁仪勘探结论更为精确。该研究可为煤矿防治水工作提供技术支持，具有十分重要的工程应用价值。

参考文献

[1]　康健，付知勇，王洪波，等. 基于瞬变电磁法的采空区含水体分布探测[J]. 黑龙江科技学院学报，2013(3)：263-267.
KANG J，FU Z Y，WANG H B，et al. Detection of goaf water-contained distribution based on transient electromagnetic method [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology，2013(3)：263-267.

[2]　康健. 基于瞬变电磁法的矿井含水体探测及水害防治研究[J]. 中国煤炭，2018(5)：32-35.
KANG J. Study on mine aquifer detection and water damage control based on transient electromagnetic method[J]. China Coal，2018(5)：32-35.

[3]　傅知勇. 鸡西兴农地区采空区积水体分布研究[D]. 哈尔滨：黑龙江科技大学，2013.
FU Z Y. The research on goaf hydrops distribution at Jixi Xingnong area [D]. Harbin：Heilongjiang University of Science and Technology，2013.

[4]　商宇航，邰振华，刘春雨，等. 基于瞬变电磁法的煤矿采空区积水探测[J]. 黑龙江科技大学学报，2018(2)：152-156.
SHANG Y H，TAI Z H，LIU C Y，et al. Detection of water accumulation in coal mine goafs based on transient electromagnetic method [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology，2018(2)：152-156.

[5]　董雁南，赵雷. 电法勘探在金属矿勘查中的应用探究[J]. 西部资源，2016(4)：82-83.
DONG Y N，ZHAO L. Application of electrical prospecting in metallic mineral exploration [J]. Western Resources，2016(4)：82-83.

[6]　廖巍. 上覆老空区导水裂隙及通道的发育特征分析与工程实践研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2015.
LIAO W. Analysis about characteristic of water-conducting fracture and channel in overlying strata and goaf and research of the corresponding engineering practice[D]. Xuzhou：China University of Mining & Technology，2015.

[7]　曹静，吴灿灿. 地面瞬变电磁法对采空区赋水情况的应用研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版)，2017，18(2)：100-103.
CAO J，WU C C. The applied research on assignment to water bearing property in mined-out area by ground transient electromagnetic method[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)，2017，18(2)：100-103.

[8]　宋漪. 大地电磁法与瞬变电磁法综合物探在某隧道找水勘查中的应用[J]. 科技创新与应用，2012(34)：28-29.
SONG Y. Application of magnetotelluric method and transient electromagnetic method in water exploration of a tunnel [J]. Technology Innovation and Application，2012(34)：28-29.

[9]　王晓飞. 综合电法在青海省大通沟南山—黄矿山石墨矿勘探中的应用[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2018.
WANG X F. Application of integrated electrometry in graphite exploration of Datonggou south mountain-yellow mine，Qinghai province[D]. Beijing：China University of Geosciences(Beijing)，2018.

[10]　王桀. 煤矿水文地质勘查中瞬变电磁法的应用[J]. 现代矿业，2020，36(2)：14-15，46.
WANG J. Application of transient electromagnetic method in coal mine hydrogeological exploration[J]. Modern Mining，2020，36(2)：14-15，46.

[11]　罗志龙. 电法勘探在寻找矿区水文地质中的应用研究[J]. 世界有色金属，2018(15)：251-252.
LUO Z L. Application of electrical prospecting in hydrogeology of mines [J]. World Nonferrous Metals，2018(15)：251-252.

[12]　解海军，颜羽，董毅. 混合小波去噪在瞬变电磁资料处理中的应用[J]. 黑龙江科技大学学报，2016(6)：687-690，704.

(下转第 20 页)