

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.01.006

## 高密度电法在探测澧县艳州船闸工程场地 隐伏断裂中的应用

王升<sup>1,2</sup>, 韩世礼<sup>1,2\*</sup>, 彭莎莎<sup>1,2</sup>, 张华丽<sup>3</sup>, 李国银<sup>4</sup>

(1. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南衡阳 421001; 2. 湖南省稀有金属矿产开发与废物地质处置技术重点实验室, 湖南衡阳 421001; 3. 湖南交通职业技术学院路桥工程学院, 湖南长沙 410132; 4. 长沙水业集团有限公司, 湖南长沙 410015)

**摘要:** 隐伏断裂是工程建设时不可忽略的安全隐患, 不仅会影响建筑物的稳定性, 而且也会给人们的生活造成重大损失。本研究区内基岩风化程度不均、界面较复杂、局部存在断裂可能性较大, 为了查明该工程建设中存在的工程安全隐患, 采用了高密度电法进行探测。施工场地内共布置了3条物探测线, 经过反演解释并结合已有钻孔资料分析, 共发现了3条断裂破碎带, 并且查明了断裂破碎带地下分布的延伸方向以及基底岩土界面的起伏形态, 与钻探验证结果相吻合。

**关键词:** 隐伏断裂; 高密度电法; 反演; 钻探

**中图分类号:** U641 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-0062(2022)01-0039-06

### Application of High-density Electrical Method in Detecting Hidden Fractures in Yanzhou Ship Lock Engineering Site of Lixian County

WANG Sheng<sup>1,2</sup>, HAN Shili<sup>1,2\*</sup>, PENG Shasha<sup>1,2</sup>, ZHANG Huali<sup>3</sup>, LI Guoyin<sup>4</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Wastes, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. School of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha, Hunan 410132, China; 4. Changsha Water Industry Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410015, China)

**Abstract:** Hidden fracture is a hidden safety hazard that cannot be ignored during con-

收稿日期: 2021-06-17

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4524; 2018JJ2327); 南华大学大学生研究性学习和创新性实验计划项目(X2019106)

作者简介: 王升(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事地球物理勘探和环境地质方面的研究。E-mail: 1535797791@qq.com。\* 通信作者: 韩世礼(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地球物理勘探和环境地质方面的研究。E-mail: hanshili@126.com

struction, which will not only affect the stability of buildings, but also cause heavy losses to people's lives. In the study area, the weathering degree of bedrock is uneven, the interface is complex, and there is a high possibility of local faults. In order to find out the hidden engineering safety hazards in the construction of the project, high-density electrical detection was used. A total of 3 object detection lines are arranged in the construction site. After inversion and interpretation and combined with the analysis of existing drilling data, a total of 3 fractured fracture zones have been discovered. In addition, the extension direction of the underground distribution of the fracture zone and the undulating shape of the basement rock-soil interface were ascertained, which was consistent with the drilling verification results.

**key words:** hidden fracture; high-density electrical method; inversion; drilling

## 0 引言

随着我国经济的高速发展,水利工程建设越来越频繁,施工区不稳定的断裂带直接影响水利工程结构的稳定性,正在活动的断层(如新构造运动剧烈、地震频繁地区的断层)对建筑物的影响更加巨大。在水利工程建设中这种潜在的安全隐患,会严重影响人民群众的生命财产安全,当下防范突发性灾难事故刻不容缓。

本文研究区位于湖南省常德市澧县,1631年在区域上发生过大型破坏性地震<sup>[1-2]</sup>,该地震是迄今为止有记载的华南内陆最大的地震之一,震中属于洞庭湖盆地西南部的太阳山隆起,发震断裂则是太阳山断裂,这已是大多数研究者的共识<sup>[3]</sup>。据湖南省地震局有关记载,澧县断裂西段的石门县、澧县以及澧南地段近几年曾发生多次地震,由地震发展史可知,距离研究区最近的澧县断裂一直处于较活动状态,并且具备发震断裂的一定条件。

研究区地处澧县境内澧水干流艳洲洲尾,位于澧阳平原腹地,在澧水石门至澧县航道建设工程的艳洲枢纽船闸工程中拟建设船只通行水道,目前正处于工程的初勘阶段。由于研究区内基岩风化程度不均,岩土界面较复杂,加之区域上局部可能存在不稳定断层,若运用钻探方法,不仅费用高周期长,而且可能会出现遗漏现象。高密度电法具有效率高,检测灵活,抗干扰能力强等优点,是工程中最常用的地球物理勘探方法之一<sup>[4-7]</sup>。

## 1 地质概况及地球物理特征

### 1.1 区域地质概况

第四纪洞庭盆地由临澧凹陷、澧县凹陷、太阳山隆起、安乡凹陷、武陵隆起等多个次级构造单元

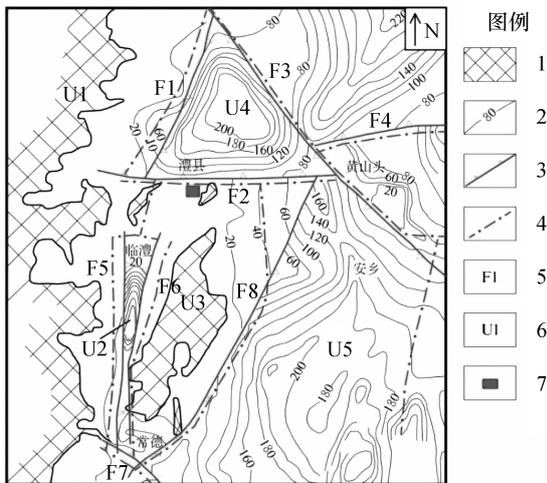
组成,展现了非常复杂的隆-凹构造格局。一般隆起区多为岗状平原以及低山丘陵区域,第四纪期间地势起伏主要以抬升为主,因此区域上基岩出露偏多,第四系厚度明显减小,并组成了多级阶地。凹陷区主要为低平原地貌,第四纪期间沉降幅度较大,不同地层时代沉积会发生上下叠置,沉积叠置厚度较大<sup>[8]</sup>。上述隆-凹构造格局主要受第四纪正断裂控制(据柏道远等<sup>[9]</sup>,详见图1)。澧县凹陷为洞庭盆地西北部的次级凹陷,北东面为江汉盆地,南面接安乡凹陷和太阳山隆起,西面为武陵隆起。澧县凹陷是由3条边界围成的三角形凹陷地貌,每条边界长约50 km。主要受控于3条正断裂的边界,即南县-黄山头断裂、复兴厂断裂、澧县断裂。

### 1.2 工程地质概况

研究区处于澧阳平原腹地,位于澧水河右岸阶地,交通便利,距澧县县城5 km,地形略为起伏,地面标高约27.1~55.5 m,相对高差28.4 m。根据前期实际钻孔工程地勘结果可知,工作区地层分为第四系全新统(Q<sub>4</sub>)及泥盆系(K)两个地层时代。其中第四系全新统地层分为三层,顶层为素填土与粉质黏土,素填土结构松散,为人工填筑,揭露层厚约0.5~5.8 m;粉质黏土含砂,均匀性好,揭露层厚3.3~9.0 m;中间层为冲洪积卵砾石组成,卵砾石结构密实,分选性一般,磨圆度好,场地内分布面积大,揭露层厚1.8~14.3 m;底层为卵石层,以砂及黏性土充填,揭露层厚约26 m。泥盆系地层岩性为中风化石英砂岩,裂隙间可见充填褐红色泥砂,裂面为红褐色矿物质浸染,全场地分布,最大揭露厚度7.2 m,最大深度约65 m。

### 1.3 地球物理特征

由于岩石和土壤块的组成和厚度以及风化裂隙带的水和泥浆填充程度的不同,导致岩石和土壤块的物理参数存在差异。岩层的电阻率与其岩性、孔隙率、含水量等性质是相关的,不同岩性的电阻率差异是高密度电阻率方法物探工作的前提<sup>[10]</sup>。本工作区岩土体类型素填土、砂卵石与砂岩之间存在较大电阻率差异(详见表1),素填土电阻率在5~20 Ω·m之间,平均电阻率为12 Ω·m;砂卵石电阻率在20~100 Ω·m之间,平均电阻率为52 Ω·m;砂岩电阻率在120~480 Ω·m之间,平均电阻率为200 Ω·m。依据上述电性组合特性可以有效的探测岩土界面形态及裂隙疏松带等不良地质体。



1—前第四纪基岩出露区;2—第四系等厚线及厚度值/m;  
 3—第四纪早期控盆或控凹正断裂,齿向示下降盘;  
 4—第四纪构造单元界线;5—断裂编号;6—构造单元编号;  
 7—研究区;F1—复兴厂断裂;F2—澧县断裂;  
 F3—南县—黄山头断裂;F4—石首断裂;F5—雷公庙断裂;  
 F6—渐水断裂;F7—常德—益阳断裂;F8—周家店断裂;  
 U1—武陵隆起;U2—临澧凹陷;U3—太阳山隆起;  
 U4—澧县凹陷;U5—安乡凹陷。

图1 第四纪洞庭盆地构造格局及第四系等厚图  
 Fig.1 The Quaternary Dongting Basin Tectonic Framework and Quaternary Isobaric Map

表1 电阻率物性参数表

Table 1 Parameter of resistivity for various media

介质类型	电阻率变化范围/ (Ω·m)	电阻率平均值/ (Ω·m)
素填土	5~20	12
砂卵石	20~100	52
砂岩	120~480	200

## 2 高密度电法的工作原理及方法

### 2.1 高密度电法工作原理

高密度电法与常规的电阻率法基本工作原理大致相同,工作原理是利用岩土体的电性差异,通过施加电场作用后以地层中电流传导的规律,然后观测表现出不同电阻率的地质体分布。在施工地插入一定数量的电极,通过仪器智能控制排列电极,并接收电流信号,仪器通过A、B电极向地下供应电流(I),然后观测MN电极之间的电位差(ΔV),计算出测量点(M、N之间)的视电阻率值<sup>[11]</sup>。高密度电法具有数据采集量大、效率高、成本低、智能跑极、抗干扰能力强等优点,在数据采集过程中可以很大程度上避免人为操作出现的误差<sup>[12-13]</sup>。

通常在获得高密度电法的视电阻率统计数据后,即可进行初步探讨,后期对数据进行反演计算,即可知晓岩土体中电阻率的分布情况,从而确定基岩以及岩矿在地下空间的分布。

### 2.2 工作方法及测线布置

本次研究投入仪器设备为重庆奔腾数控技术研究所生产的WGMD-9超级高密度电阻率测量系统,该系统以WDA-1、1B超级数字直流电法仪为测控主机,通过集中式高密度电阻率电缆、电极,实现二维高密度电阻率测量。

进行野外数据采集工作之前,首先进行了方法试验,通过综合对比各装置类型,最终选定对称四极测深(施伦贝谢尔)进行数据采集。根据初勘推断断层走向及场地条件所限,设计物探测线近东西向,共布置了3条测线(图2):其中W1线点距5m,电极120根,长度600m,总体方位110°;W2线点距4m,电极79根,长度312m,总体方位100°;W3线点距4m,电极51根,长度200m,总体方位96°。同时为得到尽量多的测深数据,提高测深数据的准确性,根据场地情况,尽量向两侧延长测线长度。

## 3 数据处理及异常解释推断

### 3.1 数据处理方法

高密度电法的数据处理分为数据预处理和反演计算<sup>[14]</sup>。数据的预处理包括数据转换、拼接合并、排序、突变点剔除、滤波等;反演计算主要采用2DRES反演软件进行计算,本次工作主要采用的是基于圆滑约束的最小二乘法进行反演,绘制视

电阻率等值线图。

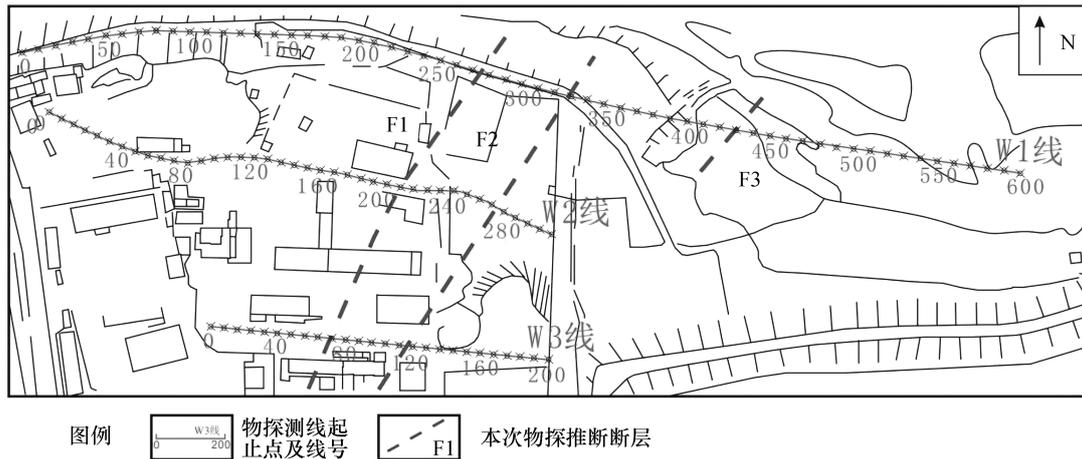


图2 高密度电法工作布置图及推断断裂成果图

Fig.2 Work layout of high-density electrical method

### 3.2 异常推断解译

高密度电法推断解译,主要依据二维反演成果图并结合工程地质情况进行分析。需要注意的是,二维反演成果图由于会受软件算法和收敛条件的限制,深度会受到一定程度的限制。若地质条件整体电阻率较高,其反映深度会相应增大,反之地质条件整体电阻率较低,其反映深度也会相应减小。

通过高密度二维反演图(图3)可知,高密度电法W1线、W2线、W3线上部表现为低阻体(深蓝色),主要由素填土和含水砂卵石层引起。W1线显示厚度在2~50m左右,整体表现为中间厚两边薄,特别是西侧厚度在1~3m左右;W2线

显示低阻体逐渐向东延伸,整体缓慢增厚;W3线上部低阻体显示厚度在20~45m左右。W2、W3线的长度受场地影响,测线长度有所限制,测量深度相对较浅。由W1线二维反演图可知,深度在40m以下存在3处呈陡直或倾斜条带状的中低阻异常带,电阻率在120~180Ω·m左右,分别位于测线275m、330m、425m处,推测由断裂破碎带引起,分别命名为F1、F2、F3(图4)。另外位于120m点位附近,深度在40m以下存在一低阻异常带W1-1(图4中虚线椭圆);位于475m点位附近浅部电阻率无明显下凹,深度在50m以下存在一低阻异常带W1-4,推测两处异常由临近河床含水量较大所致。

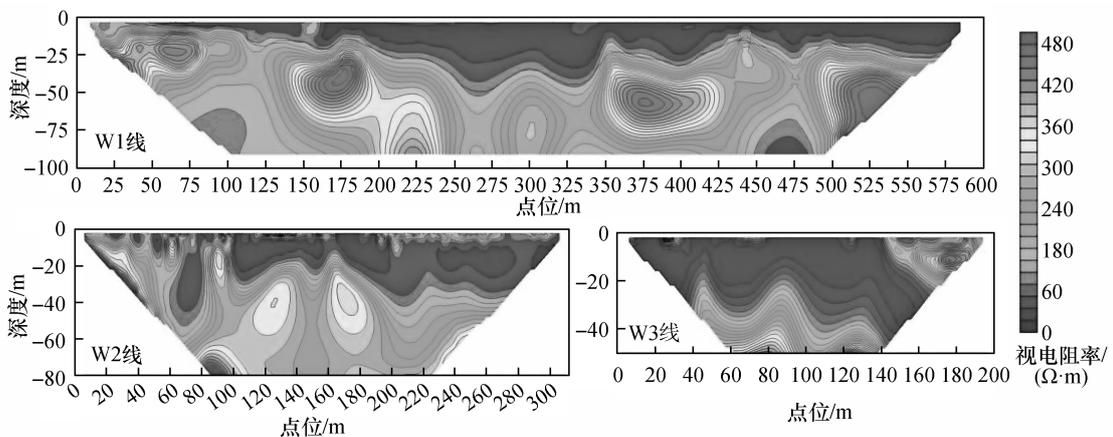


图3 高密度电法视电阻率反演图

Fig.3 Apparent resistivity inversion map of high-density electrical method

高密度电法 W2 线 216 m 点位附近与 W3 线 75 m 点位附近,电阻率曲线均出现明显下凹趋势,并具有一定的延伸性,推测由 F1 断裂构造引起的破碎带充水引起。高密度电法 W2 线反演图的 72 m 点号附近,深度在 32 ~ 56 m 之间,存在一狭长条带状低阻异常,电阻率在 10 ~ 160 Ω · m

之间,推测由该场地的建筑施工地面水下渗引起,低阻异常带命名为 W2-1;测线西侧位于 60 m 和 90 m 的浅部,存在两个孤立的局部高阻体,根据现场观察,推测可能由修路时某种高阻人工填渣或含水卵石引起。各测线推断岩性界面及异常位置详见推断解译图(见图 4)。

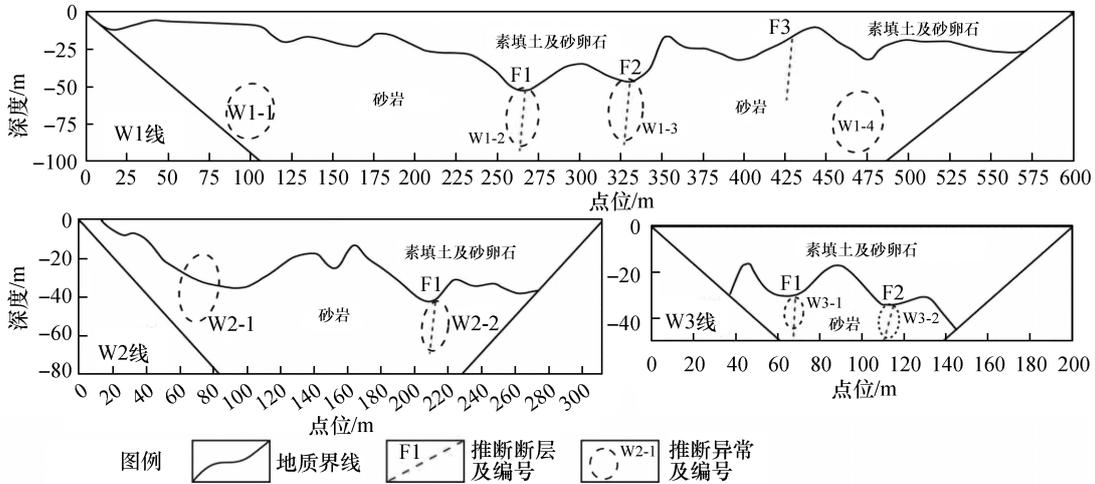


图 4 高密度电法推断解译图

Fig. 4 Interpretation diagram of high-density electrical method

### 3.3 综合异常分析

根据上述异常推断解译模式,对 3 条测线剖面二维反演图进行对比分析,并结合实际工程地质情况加以综合评价,直观揭示了各剖面的素填土、砂卵石层与紫红色砂岩的岩性界面。上部素填土、砂卵石层主要呈低电阻率特征,厚度 2 ~ 55 m 左右,下部砂岩呈中高电阻率特征,基底砂岩界面波动起伏较大,整体由西向东砂岩界面逐渐变浅(见图 4)。

本次工作共推断出 3 条断裂破碎带,分别编号为 F1、F2 和 F3,其中 W1 线的 F3 处于剖面延长线位置,属于研究区外围的单个异常,其走向不

明,未列入本次综合异常带推断解译表(见表 2)。本次工作共圈定单独异常体 8 处,分别是 W1-1、W1-2、W1-3、W1-4、W2-1、W2-2、W3-1、W3-2 异常体,其中 W1-1 异常位于 W1 线 120 m 处,W1-2 异常位于 W1 线 265 m 处,W1-3 异常位于 W1 线 325 m 处,W1-4 异常位于 W1 线 470 m 处,4 处异常体的深度均约为 40 m;W2-1 异常位于 W2 线 72 m 处,深度约 32 ~ 56 m;W2-2 异常位于 W2 线 216 m 处,深度约 40 m;W3-1 异常位于 W3 线 75 m 处,深度约 35 m;W3-2 异常位于 W3 线 110 m 处,深度约 40 m。各测线推断岩性界面及综合异常位置详见高密度电法推断解译图(见图 4)。

表 2 高密度电法综合异常带推断解译表

Table 2 Inference and interpretation table of high-density electrical method

断裂号	异常范围	异常特征	物探推断
F1	W1 线的 265 m 附近 W1-2 异常;W2 线的 216 m 附近 W2-2 异常;W3 线的 75 m 附近 W3-1 异常。	电阻率异常呈马鞍形中间低两边高特征,且各测线反映一致。	推测为充水断裂破碎带。
F2	W1 线的 325 m 附近 W1-3 异常;W3 线的 110 m 附近 W3-2 异常。		

## 4 钻探结果验证

通过对高密度电法二维反演图的综合解译,分别对3条断裂破碎带进行钻孔验证。

选取W2线220 m、W3线120 m处、W1线420 m处,进行F1、F2、F3断裂破碎带的验证,分别在孔深38.2 m、32 m和16.5 m处见有中风化石英砂岩破碎带,岩石破碎,节理裂隙较发育,裂隙间充填泥砂,与高密度电法推断结果一致。

## 5 结论

1) 根据各剖面二维反演图,结合实际工程地质情况分析,较好地揭示了各剖面素填土、砂卵石层与紫红色砂岩之间的界面起伏形态及深度。

2) 本次高密度电法工作共推断出3条断裂破碎带,其中F1和F2在各剖面反映一致,电阻率曲线明显下凹,多呈条带状低阻异常,且具有一定的延伸性;F3处于剖面延长线位置,属于研究区外围的单点异常。经过钻孔验证,破碎带内多岩石破碎,与高密度电法推断结果一致。

3) 高密度电法有效查明了澧县艳洲枢纽船闸工程不良地质体破碎带及隐伏断裂的空间分布位置,为拟建船只通行水道的设计提供了可靠的基础地质资料支撑。

### 参考文献:

[1] 崔华伟,郑建常,侯志刚,等. 湖南常德及其周边地区的地震重定位与应力场分析[J]. 华南地震,2020,40(4):35-41.  
[2] 董瑞树,周庆,陈晓利,等. 1631年湖南省常德地震的再考证[J]. 地震地质,2009,31(1):162-173.

[3] 赵凌强,詹艳,周本刚,等. 1631年常德历史地震区深部结构的大地电磁探测研究[J]. 地震地质,2018,40(1):155-170.  
[4] 陈斌,汪耀,胡祥云,等. 大湾区珠江口海上高密度电法探测[J]. 地球科学,2020,45(12):4550-4562.  
[5] JIANJUN G,ZHANG Y X,XIAO L. An application of the high-density electrical resistivity method for detecting slide zones in deep-seated landslides in limestone areas[J]. Journal of applied geophysics,2020,177(2):104013.  
[6] 刘金涛,胡晓明. 高密度电法勘探在岩溶查找中的应用[J]. 地质科技情报,2003,22(2):100-102.  
[7] 王建飞. 高密度电法在工程地质勘察中的应用:以云南曲靖危险废物集中处置区为例[J]. 云南大学学报(自然科学版),2017,39(增刊2):317-321;330.  
[8] 柏道远,刘波,李长安,等. 第四纪洞庭盆地临澧凹陷构造:沉积特征与环境演化[J]. 山地学报,2010,28(6):641-652.  
[9] 柏道远,马铁球,王先辉,等. 1:25万常德市幅区域地质调查主要进展及成果[J]. 中国地质调查,2014,1(2):1-6.  
[10] GANCE J,MALET J P,SUPPERR R,et al. Permanent electrical resistivity measurements for monitoring water circulation in clayey landslides[J]. Journal of applied geophysics,2016,126:98-115.  
[11] 韩世礼,彭莎莎,王升,等. 高密度电法在桩体塌陷应急探测中的应用研究[J]. 南华大学学报(自然科学版),2020,34(6):43-49.  
[12] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探,2012,36(4):576-584.  
[13] 陈立波,张迪,李林瑞,等. 综合物探方法在桂林冶金厂岩溶勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2016,13(2):196-201.  
[14] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探,2012,36(4):576-584.