

# 高密度直流电法在勘查城市断层的应用

谢宇虹<sup>1</sup>, 冯金国<sup>2</sup>, 葛长峰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京市规划与自然资源委员会, 北京

<sup>2</sup>中节能大地环境修复有限公司, 北京

<sup>3</sup>北京市地质工程设计研究院, 北京

收稿日期: 2022年11月19日; 录用日期: 2023年3月1日; 发布日期: 2023年3月30日

## 摘要

在地球物理勘探中, 因断层赋水特性, 导致断层地电特性与周围围岩有明显差异, 使得常规电法勘探是在传统地球物理勘探方法中具有重要的位置, 但传统直流电法跑极慢、效率低, 且单一装置所获得的数据易于受到多种干扰因素的影响, 为此, 本文采用高密度电阻率法, 结合电剖面法和电测深法的优点进行隐伏断层探测, 探槽结果证实了该施工方案能准确的探测断层位置。

## 关键词

地裂缝, 黄庄 - 高丽营断裂, 高密度电法

# Application of High-Density Resistivity Method in Urban Fault Exploration

Yuhong Xie<sup>1</sup>, Jinguo Feng<sup>2</sup>, Changfeng Ge<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing

<sup>2</sup>China Energy Conservation Land Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing

<sup>3</sup>Beijing Institute of Geological Engineering Design, Beijing

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 1<sup>st</sup>, 2023; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In geophysical exploration, due to the water-bearing characteristics of faults, the fault's geo-electric characteristics are significantly different from the surrounding deposits, which makes high-density

resistivity detection play an important role in the traditional geophysical exploration methods. However, the traditional direct current method is relatively slow and inefficient, and the data obtained by a single device is easy to be affected by a variety of interference factors. Therefore, the high-density resistivity method is adopted in this paper. Combined with the advantages of electric section method and electric sounding method, buried fault detection is carried out. The results of the exploration through trenching prove that the construction scheme can accurately detect the fault location.

## Keywords

Ground Fracture, Huangzhuang-Gaoliying Fault, High-Density Resistivity Method

Copyright © 2023 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. 前言

被新沉积物覆盖、被侵位岩体占据或形成于地下深处未切穿至地表的断层常被称为隐伏断层，当地震来袭时，易于在地壳浅部隐伏断层附件形成地震重灾区/带。又因其潜伏于地表以下、于地表无出露，致使在工程建设中易于忽视，在未设防时，构筑物易遭受破坏[1]，尤其是，当区内隐伏断层为活动断层时[1] [2] [3] [4]。因其具有较强的隐蔽特点，工程勘察难度加大，如工程上的逐桩钻探以进行岩样分析，或相邻多钻孔间的超声波 CT 成像等[5]，具有一定的片面性，且成本高昂。由于断层/断裂受地质构造运动影响，断层带/面岩体破碎，岩溶裂隙发育，地下水丰富，为此，采用高密度电阻率法以发挥电剖面法和电测深法的优点，避免传统联合剖面法人工跑极耗费过大的问题，以获得较丰富的地电断面结构特征的地质信息[6]，从而快速、准确的确定隐伏断层位置，为诸如地质钻孔、探槽等验证断层位置提供可靠信息，进而为隐伏断层的活动性提供可靠科学依据[7] [8]。

现以为研究北京市顺义区高丽营镇九厂路场地地裂缝的成因为研究目标[9] [10]，以确定区内断层为研究对象，以开挖探槽为验证方法，具体介绍高密度电法在勘察近地表层断层、裂隙工作中的运用。

## 2. 研究区地层特征

本次研究在北京市顺义区高丽营镇区域开展高密度直流电法和槽探验证工作。研究区主要以刘斌屯组和尹各庄组等两组地层为主[11] [12]，其中，刘斌屯组上部主要为含砂粘土层，中部为灰黄色 - 黄褐色含钙质结核砂质粘土层，下部主要为黄色斑杂褐色含粘土粉砂层，植物根系残骸发育，局部夹有粘土层、含粉砂粘土层、粘土层及含粘土粉砂层。底部为黄褐色 - 浅灰黄色粘土层，局部相变为含粘土粉砂层；该组厚度为 2.234 m~2.935 m 不等；尹各庄组上部以灰黑色粉砂层沉积物为主，中下部为灰黑色粉砂质粘土层，该组厚度大于 5.1 m。

## 3. 高密度电法工作原理

电法勘探是以地下岩(矿)石的电性差异为基础的，利用直流或交流电场来研究地质构造和寻找有用矿产的一种物理勘探方法。电阻率法是直流电法勘探的一种，是基于分析地壳中各种岩(矿)石具导电性能差异进行成像的勘探方法[13] [14]。当人工向地下通以直流电流时，在地表上用仪器就能观测地面电场分布情况，通过研究这种人工电场的分布规律，就可以发现地下电阻率不均匀地质体存在的位置和大概深度，

达到寻找地下矿产及解决地质问题的目的。

高密度激电法具有多通道接收、发射接收分体式的特点，在工程勘察领域，多采用单极-偶极装置和偶极-偶极装置。当地面水平，地下为均匀、无限、各向同性介质，将 A、B 两供电电极与电源相连，并向地下供入电流强度为  $I_p$  的电流时，可得到 M、N 两端的电位差  $v_p$ ，此时测得的电阻率为“均匀大地电阻率”。但实际上大地条件并不能满足大地电阻率条件，这样测得的既不是围岩电阻率，也不是矿体电阻率，称为视电阻率。视电阻率用  $\rho_s$  表示，单位为  $\Omega \cdot m$ ，可以定义为：

$$\rho_s = K \frac{v_p}{i_p}$$

其中： $K$  为装置常数，由程序软件根据操作员所选择的装置和输入的极距常数，使用相应装置计算公式计算出来的常数[15]。

#### 4. 数据采集

本次物探电法工作采用温纳剖面法和联合剖面法，其中温纳剖面法  $MN = 1 m$  或  $MN = 2 m$ ；联合剖面法采用  $AB = 30 m$ 、 $MN = 6 m$ ， $AB = 20 m$ 、 $MN = 4 m$  以及  $AB = 10 m$ 、 $MN = 2 m$  三种测量装置，无穷远 C 极布置在超过 5 倍 AO 的位置。

工作仪器采用重庆奔腾数控技术研究所研制的 WDA-1A 多功能数字直流激电仪。该仪器具有功率大、精度高、抗干扰能力强、自动计算、存储量大、测量准确快速、操作方便、性能稳定等特点。

观测系统采用 120 个电极，呈  $\alpha$  排列，其中 L1、L2 线电极距分别为 1 米和 2 米，供电电压为 100~400 V，最小和最大间隔系数为 1~30。该套观测系统主要观测研究区 30 米以浅的地层电阻率特征。

#### 5. 高密度电法资料解释

在资料分析中，判别异常区主要是根据电阻率值变化及等值剖面的形态等综合因素考虑的。根据高密度电法温纳转置二维电阻率反演断面图及联合剖面装置视电阻率曲线，进行推断解释。

##### 1) L1 剖面电性特征与分析

如由 L1 剖面反演电阻率断面图(图 1)可见，该剖面电阻率值一般为 5~80  $\Omega \cdot m$ ，从纵向上宏观表现为“高阻→低阻”的电性分布特征，局部(横坐标 60 m 至 90 m 间)夹杂高阻体。根据电阻率的变化特征分析，0~10 m 深度范围内可划分为 2 个电性层(以纵坐标标注数据为准)：浅部(0~1 m)为高阻层，电阻率一般在大于 30  $\Omega \cdot m$ ，以横坐标 85 m 为界，该处电阻率变化剧烈，等值线扭曲，推断其为断裂(命名为 F1)，其右侧表层厚度变大，中深部(-1~-10 m)为低阻，电阻率一般为 5~20  $\Omega \cdot m$ 。

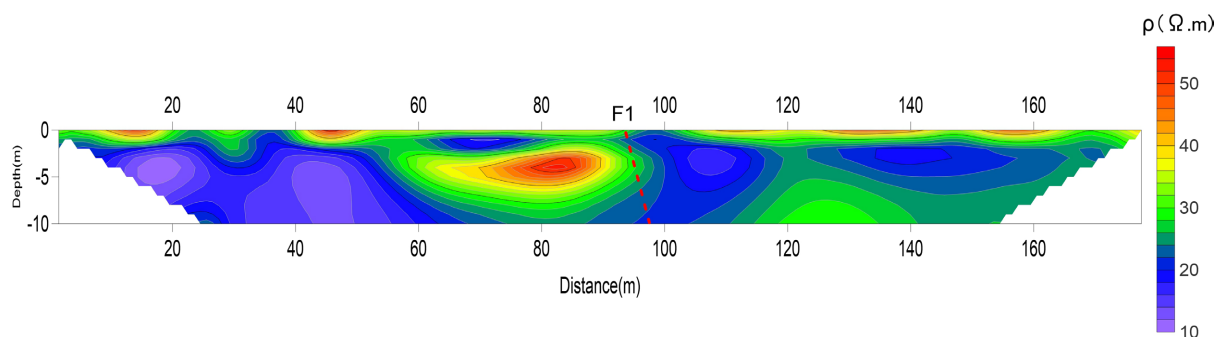
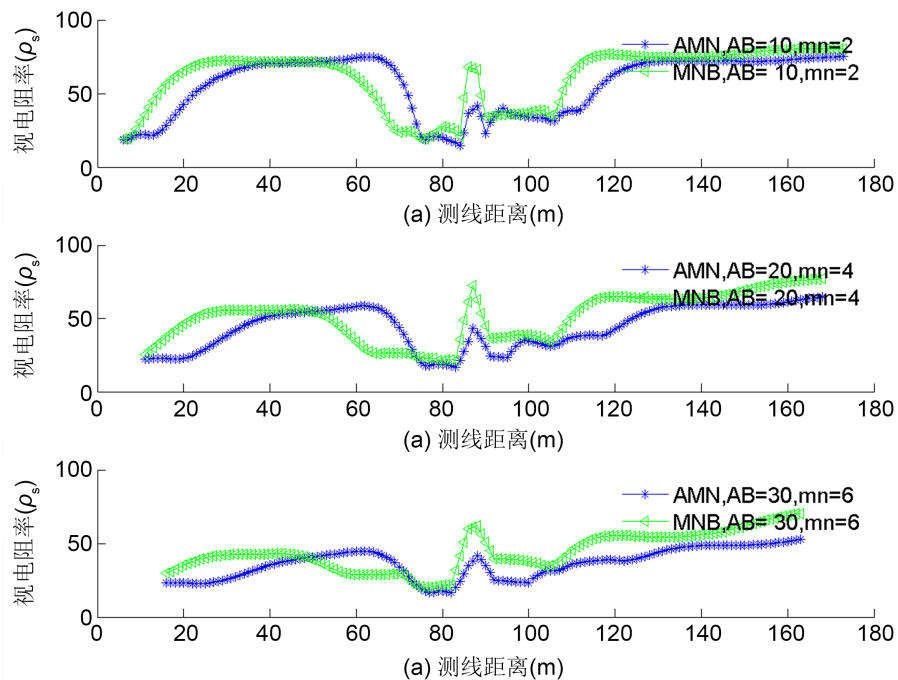


Figure 1. High density electrical inversion profile of L1

图 1. L1 线高密度电法反演断面图



**Figure 2.** Combined section method apparent resistivity curve of L1  
**图 2.** 测线 L1 联合剖面法视电阻率曲线

根据电阻率异常的纵向变化特点,结合岩矿石电性特征分析:0~1 m为上覆土层,主要为腐殖层、中粗砂粘土层和粉砂粘土层,由于其含水量偏低,故电阻率偏高;-1~-10 m主要反映为潜水面以下粘土层和淤泥层,含水量近饱和,故电阻率偏低,形成低阻屏蔽。

如图 2 所示,测线方向与断层方向垂直,相比于 AB = 20 或 30 时,在 AB = 10 时,  $\rho_{sA}$ 、 $\rho_{sB}$  曲线较显杂乱。测线左侧 48 米处出现一高阻负交点,但其左右有同步高的趋势,结合图 1 二维视电阻率反演结果,可知此处可能为伪交点,有待进一步验证;在测线 78 米至 95 间,附近出现一低阻正交点,结合图 1 二维视电阻率反演结果,此处可能发育一断层,且视倾角约在 75°;测线右侧分异性差,且视电阻率值约在 50~80  $\Omega \cdot m$  间,表明其相关地层未错动,此处发育断层的可能性低。

## 2) L2 剖面电性特征与分析

由 L2 剖面反演电阻率断面图图 3 可知,该剖面电阻率值一般为 5~80  $\Omega \cdot m$ ,纵向上,宏观表现为“高阻→低阻→高阻”的分布特征。根据电阻率的变化规律,0~31 m 深度范围内可划分为 3 个电性层(以纵坐标标注数据为准):浅部(0~2 m,未标出)为较高阻层,电阻率一般在 30  $\Omega \cdot m$ ,分布不连续,横坐标 30 m 和 210 m 两处受到管道(局部不均匀体)影响,解释时需引起注意;第二层(-2~-10 m),电阻率一般在 20  $\Omega \cdot m$  以上,底界略有起伏;第三层(-10~-31 m),电阻率抬升。

如图 4 所示,在测线 55 m~75 m 间,出现一相对高阻负交点,如图 3 所示,以横坐标 70 m 为界,该处等值线扭曲。结合图 3 和图 4 进行分析,推断其为断裂(命名为 F1,视倾角约 70°)。

如图 4 所示,随着 AB 极距的增大,其相应勘探深度的增加,联合剖面  $\rho_{sA}$ 、 $\rho_{sB}$  曲线分异性差,表明其右侧表层厚度变大,与图 3 中较为一致。如图 3 所示,横坐标 125 m 处,大于 10 m 深度等值线被错开,推断其为断裂(命名为 F2,视倾角约 70°)。

根据电阻率异常的纵向变化特点,结合岩土电性特征分析:0~2 m 为上覆土层,主要为腐殖层、中粗砂粘土层和粉砂粘土层等,由于其含水量偏低,故电阻率偏高;-2~-10 m 主要反映为潜水面以下粘土

层和淤泥层，含水量近饱和，故电阻率偏低，形成低阻屏蔽。深部(-10~31 m)，土层的岩性可能发生变化。

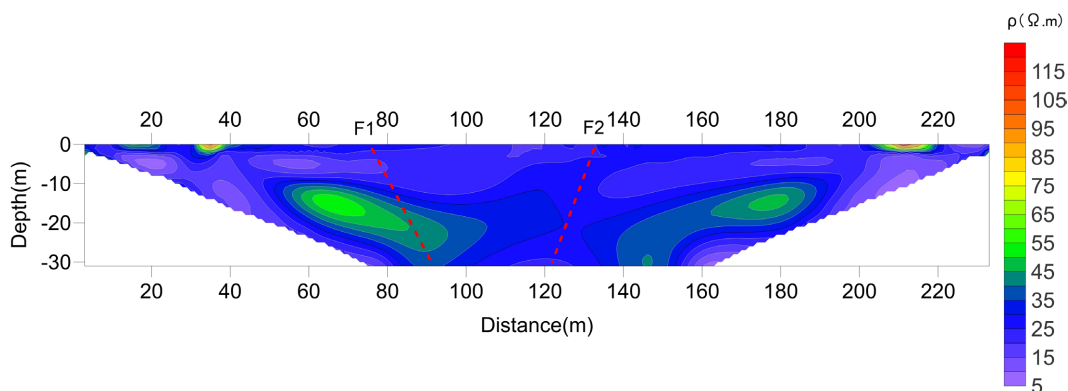


Figure 3. High density electrical inversion profile of L2  
图 3. L2 线高密度电法反演断面图

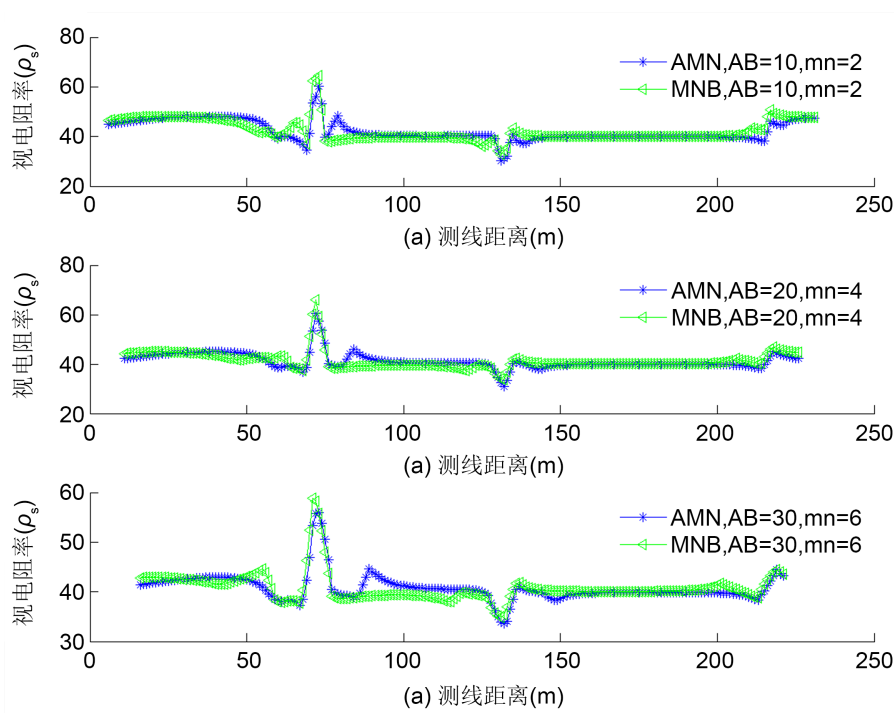


Figure 4. Apparent resistivity curve for L2  
图 4. 测线 L2 视电阻率曲线

## 6. 探槽施工验证

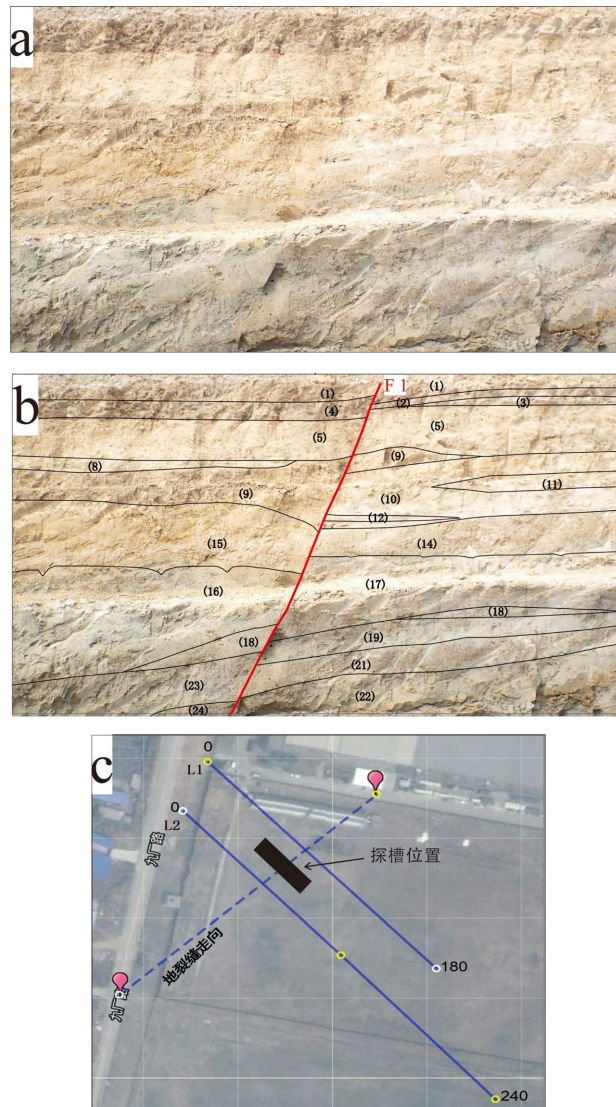
为验证电法结果，在两条剖面均有显示的 F1 断层位置附近开挖一条探槽，探槽两壁宽约 18 m，探槽长 48 m，深 5 m~8 m 不等。

探槽在位于北东壁地表 23.9 m 处揭露了一条断裂，与电法揭露 F1 断裂位置较为重合，故命名为 F1 断裂。F1 断层为正断层，断裂面向上延至地表，走向 NE49°，北东壁上断裂面倾角 73°~75°，主断裂面基本平直，局部有透镜体，断裂面分布有擦痕，铁染发育，擦痕平直连续，下盘粘土层向上盘运动方向小

幅度弯曲。该断层在探槽南西壁上也可见出露。该断层断面清晰，滑动特征明显，上、下盘各岩性对应较好。该断层在北东壁上，断裂面向上可延至地表，但近地表处断层面不明显。断层破裂面平直，无透视镜体及填充物，擦痕平直，铁染发育，断裂面及两侧地层均无挤压现象(图 5)。

在探槽南西壁上揭露的断层走向  $NE62^\circ$ ，断裂面倾角  $62^\circ$ ，与北东壁略有变化，基本可认为是 F1 断层的延续。在尹各庄组地层中的灰黑色粘土层中，该断层拖曳现象明显。

刘斌屯组与尹各庄组的沉积间断面垂直位移为 0.25 m，尹各庄组中上部富含生物碎屑(螺壳)的灰黑色粘土层显示的垂直位移为 0.20 m。



**Figure 5.** F1 distribution on the NE wall of the trench  
**图 5.** 槽探北东壁解释的 F1 断裂空间位置

## 7. 结论与建议

以高密度电法为代表的电法勘探方法在野外工作中，单一装置所获得的数据易于受到多种干扰因素的影响，因而建议采用多种电法，有利于野外实际测量的数据的交叉验证，为实际工程生产提供可靠的

科学依据。本文通过前期调研、踏勘及多条高密度电法剖面对断层进行了解释,并给出了其断裂特征,并通过开挖探槽以进一步验证地球物理电法勘探工作。本次研究认为,高密度直流电法虽然受异常点受多种因素的影响,特别是含水量与电阻率的密切和敏感关系,但其对就探测方法本身而论,其对断层浅部空间展布的成像仍是城市隐伏活动断层位置探测较为有效的方法之一,因此可结合槽探等验证手段同步开展探测,综合判定是否存在断层点及上断点埋深。

## 参考文献

- [1] Zhao, S., Meng, Y., Ma, Z., *et al.* (2019) Geometry in the North Section of Huangzhuang-Gaoliying Fault at Beijing, China and Its Effects on the Ground Rupture. *Journal of Environment and Engineering Geophysics*, 4, 549-555. <https://doi.org/10.2113/JEEG24.4.549>
- [2] 赵帅, 孟勇琦, 孙佳珺. 基于 S 波波速变化的北京市高丽营地区地裂缝发展趋势研究[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(7): 1123-1130. <https://doi.org/10.12677/AG.2018.87123>
- [3] 刘猛, 徐健楠, 汤斌峰. 高密度电法在城市轨道交通工程隐伏断层探测中的应用[J]. 铁道勘察, 2016, 42(5): 78-80.
- [4] 张宗路, 韩勇. 直流电测深法在探测断层中的应用[J]. 地下水, 1996(2): 64-67.
- [5] 程邈, 傅焰林, 李振宇. 高密度电法在查明潜伏断裂中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(4): 417-420.
- [6] 鲍广富. 断层及其含导水性的直流电法勘察实例[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(12): 169-171.
- [7] 胡明顺, 潘冬明, 李兵, 等. 井地地震 CT 成像数值模拟研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2009(4): 1399-1404.
- [8] 李华, 焦彦杰, 吴文贤, 等. 西南岩溶地区找水的地球物理方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(5): 1-6.
- [9] 赵忠海, 朱红军. 北京市顺义平原区地质环境的主要特征及地质灾害现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 64-66.
- [10] 赵忠海. 北京平原区新构造活动及其引发的不良地质现象分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2): 66-70.
- [11] 孙佳珺, 孟勇琦, 赵帅. 基于钻孔资料的北京平原区第四纪地层分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(z1): 107-110.
- [12] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原地区地质系统[J]. 城市地质, 2009, 4(3): 6-12.
- [13] 底青云, 王妙月, 严寿民, 等. 高密度电阻率法在珠海某防波堤工程中的应用[J]. 地球物理学进展, 1997(2): 79-88.
- [14] 杨文强. 三维任意形体高密度电阻率法数值模拟方法[J]. 物探化探计算技术, 1997(3): 79-82.
- [15] 杨进, 郑于文. 高密度电阻率法的原理与技术[J]. 工程勘察, 1989(2): 73-76.