

高密度电法与瞬变电磁法联合反演在深层地下水探测中的应用

马维龙^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 孙彦海^{1,2}, 刘庆^{1,2}, 詹佛祥^{1,2}, 石致君^{1,2}, 靳智强^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ERA.2026010006

摘 要 : 针对单一物探方法在深层地下水探测中分辨率不足、抗干扰能力弱的问题, 本文以密山地区高密度电法实测数据为基础, 结合瞬变电磁法 (TEM) 补充探测设计, 系统研究两种方法的联合反演技术。首先阐述高密度电法与瞬变电磁法的原理互补性, 进而提出“结构约束—物性协同”的联合反演策略, 通过数据预处理、初始模型耦合、迭代优化及地质验证实现反演精度提升。以密山地区平原区 (GMD-23-01 测线) 和山区 (GMD-23-03 测线) 为工程实例, 联合反演结果准确划分出平原区 100 ~ 150m 深层砂层含水层及山区 15 ~ 20m 构造裂隙水层, 解决了单一高密度电法深层分辨率不足、瞬变电磁法浅层静态干扰的问题。研究表明, 高密度电法与瞬变电磁法联合反演可有效提升深层地下水探测的可靠性, 为干旱半干旱地区水资源勘探及工程供水设计提供技术支撑。

关 键 词 : 高密度电法; 瞬变电磁法; 联合反演; 深层地下水

Application of Joint Inversion of High-Density Electrical Method and Transient Electromagnetic Method in Deep Groundwater Exploration

Ma Weilong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Sun Yanhai^{1,2}, Liu Qing^{1,2}, Zhan Foxiang^{1,2}, Shi Zhijun^{1,2}, Jin Zhiqiang^{1,2*}

1. Harbin Comprehensive Survey Center for Natural Resources, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : Addressing the issues of insufficient resolution and weak anti-interference capability of single geophysical prospecting methods in deep groundwater exploration, this paper systematically studies the joint inversion technique of two methods based on the measured high-density electrical method data from the Mishan area, supplemented by Transient Electromagnetic Method (TEM) exploration design. Firstly, it elaborates on the principle complementarity between the high-density electrical method and the transient electromagnetic method, and then proposes a joint inversion strategy of "structural constraints-physical property collaboration," achieving improved inversion accuracy through data preprocessing, initial model coupling, iterative optimization, and geological verification. Using the plain area (GMD-23-01 survey line) and mountainous area (GMD-23-03 survey line) in the Mishan area as engineering examples, the joint inversion results accurately delineate a deep sand layer aquifer at depths of 100–150 m in the plain area and a structural fracture water layer at depths of 15–20 m in the mountainous area, resolving the issues of insufficient deep resolution in the single high-density electrical method and shallow static interference in the transient electromagnetic method. The study demonstrates that the joint inversion of the high-density electrical method and the transient electromagnetic method can effectively enhance the reliability of deep groundwater exploration, providing technical support for water resource exploration and engineering water supply design in arid and semi-arid regions.

Keywords : high-density electrical method; transient electromagnetic method; joint inversion; deep groundwater

引言

随着我国北方地区水资源短缺加剧及地下工程建设推进, 深层地下水的勘探需求日益迫切。深层地下水不仅是农业灌溉、工业供水的重要后备水源, 其赋存状态还直接影响工程抗浮设计与地质灾害防控。以黑龙江密山地区为例, 该区域地处松嫩平原东部, 兼具平原与山区地形, 浅层地下水因长期开采面临水位下降问题, 亟需探明深层含水层分布以实现水资源可持续利用。当前深层地下水探测常用物探方法包括高密度电法、瞬变电磁法, 但单一方法存在明显技术短板: 高密度电法基于介质电阻率差异划分地质结构^[1], 采用温纳装置时浅中层分辨率高, 但深层因电流穿透深度有限, 易出现电阻率分层模糊, 难以确定含水层连续性; 瞬变电磁法利用时间域电磁感应响应探测低阻介质^[2], 对地下水敏感性强, 探测深度可达200m以上, 但受地表不均匀性影响, 浅层易产生静态位移误差, 导致浅部地质结构误判。

高密度电法与瞬变电磁法的原理互补性为联合反演提供了基础: 二者均以介质电阻率为核心物性参数, 高密度电法擅长约束浅中层结构, 瞬变电磁法可补充深层信息, 通过联合反演实现“浅层精准-深层延伸”的探测目标。此前研究多聚焦于单一方法的反演优化, 但针对密山这类复杂地形(平原-山区过渡带)的联合反演应用研究较少。本文以密山地区高密度电法实测数据为依托, 补充瞬变电磁法探测设计, 构建联合反演技术框架, 旨在为类似地区深层地下水探测提供可借鉴的技术思路。

一、高密度电法与瞬变电磁法原理及互补性

(一) 高密度电法原理及特点

高密度电法通过布设多道电极, 采用特定装置(本文为温纳装置)测量不同深度的视电阻率, 反映介质电性差异^[3]。其基本原理为: 向地下供入稳定电流, 测量电极间电位差, 根据欧姆定律计算视电阻率, 再通过反演算法(如最小二乘迭代)将视电阻率转换为真电阻率剖面。

高密度电法特点显著, 能一次性布设数十至上百个电极, 实现高密度、连续数据采集^[4], 单次获数千至上万个数据点。浅部探测分辨率高, 可生成二维或三维可视化图像。测量高效, 成本较低, 电极阵列灵活可调, 适应多场景, 数据处理系统成熟且可重复测量用于动态监测。

(二) 瞬变电磁法原理及特点

瞬变电磁法属于时间域电磁勘探方法, 通过发射线圈向地下发送脉冲磁场, 断电后测量接收线圈感应的二次磁场(瞬变响应), 反映地下介质的导电特性^[5]。其核心物理量为晚期道视电阻率。

该方法的核心特点体现在深层探测与环境适应性: 对低阻介质(如含地下水的砂层、裂隙带)敏感性强, 晚期道数据可有效反映100m以上深层的电性结构; 且无需电极接地, 不受地表土壤湿度影响, 适合山区或干旱区等接地条件差的区域。

(三) 方法互补性分析

高密度电法与瞬变电磁法的互补性体现在三个维度, 即在探测深度上, 高密度电法可覆盖0~130m范围, 瞬变电磁法能覆盖50~200m范围, 二者联合后可实现0~200m全深度范围的探测; 在分辨率上, 高密度电法能够对浅中层(0~100m)地质结构进行有效约束, 从而解决瞬变电磁法在浅层易出现的静态误差问题, 而瞬变电磁法可补充深层(>100m)的地质信息, 弥补高密度电法在深层分辨率不足的缺陷; 在抗干扰能力上, 高密度电法易受接地条件影响, 瞬变电磁法易受地表电性不均匀影响, 通过联合反演进行交叉验证, 可有效降低单一干扰因素对探测结果的

影响, 二者结合能更全面、精准地完成地质探测任务^[6,7]。

二、高密度电法与瞬变电磁法联合反演策略

(一) 联合反演的理论基础

联合反演的核心是“同地质体、同物性、同结构”假设: 即两种方法探测的是同一地质体, 其电阻率分布应满足空间一致性, 且地质结构(如含水层界面、基底埋深)应完全重合^[8]。基于此, 联合反演通过两类约束实现精度提升: 一是结构约束。以高密度电法浅中层(0~100m)电阻率分层结果为基准, 约束瞬变电磁法反演的浅层模型, 确保浅部地质界面(如黏土-砂层界面)位置一致; 二是物性约束。利用两种方法测得的电阻率相关性(如砂层电阻率在高密度电法中为85~110 $\Omega \cdot m$, 在瞬变电磁法中为80~105 $\Omega \cdot m$), 建立电阻率阈值区间, 避免反演结果偏离地质实际。

(二) 联合反演实施步骤

1. 数据预处理

数据预处理是联合反演的基础, 需针对两种方法的特性分别开展: 高密度电法数据预处理包含三项关键步骤: 首先进行接地电阻检查, 剔除接地电阻>5k Ω 的电极数据[9], 密山资料显示该区域接地条件良好, 数据合格率>95%; 其次通过3 σ 准则开展异常值剔除, 去除因电极接触不良产生的电阻率异常值(如>500 $\Omega \cdot m$ 或<5 $\Omega \cdot m$ 的数据); 最后实施地形校正, 针对山区测线(如GMD-23-03), 采用高程数据修正电极间距, 避免地形起伏引发的装置系数误差(最大误差可降至0.5%以下)。

瞬变电磁法数据预处理的核心是解决浅层干扰与深层数据的连续性问题, 其包含三项核心操作: 第一步先进行静态校正, 采用“区域背景场减去法”, 以高密度电法0~30m电阻率为背景, 对瞬变电磁法早期道($t < 1ms$)视电阻率修正浅层静态位移; 第二步是开展晚期道延长, 对晚期道($t > 100ms$)数据用指数拟合延长, 保障深层(>150m)数据连续性; 最后一步是实施噪声压

制，通过小波阈值去噪，去除工频干扰（50Hz）及随机噪声，为后续反演提供高质量数据。

2. 初始模型构建

联合反演初始模型以高密度电法反演结果为核心，结合地质先验知识构建，具体步骤如下：浅层模型（0~100m）直接采用高密度电法分层结果，如 GMD-23-01 测线 0~20m 为黏土层（ $\rho=15\Omega\cdot m$ ）、20~100m 为砂层（ $\rho=100\Omega\cdot m$ ）；GMD-23-03 测线 0~10m 为黏土层（ $\rho=15\Omega\cdot m$ ）、10~50m 为冲积层（ $\rho=200\Omega\cdot m$ ）；深层模型（>100m）以瞬变电磁法单一反演结果为基础，结合密山地区地质规律约束，如平原区 100~200m 以砂层为主（ $\rho=80\sim 100\Omega\cdot m$ ）、山区 100~200m 以花岗岩为主（ $\rho=500\sim 1000\Omega\cdot m$ ），避免反演结果偏离实际。

3. 迭代优化

迭代优化是联合反演精度提升的核心环节，采用“目标函数构建-迭代求解-收敛判断”的流程：首先要进行目标函数构建。以两种方法的电阻率残差平方和最小化为目标，构建目标函数： $\phi=\alpha\phi_1+(1-\alpha)\phi_2$ 其中 ϕ_1 为高密度电法残差（观测值与模型计算值的差值）， ϕ_2 为瞬变电磁法残差， α 为权重系数（初始经验值 $\alpha=0.6$ ，用于平衡两种方法的贡献）。其次，要进行迭代求解。采用共轭梯度法对目标函数进行迭代求解，每轮迭代后更新模型的电阻率分布，并同步检验两项指标——浅中层（0~100m）结构与高密度电法结果的一致性（误差需<2m）、深层（>100m）物性与瞬变电磁法结果的相关性（电阻率偏差需<10%）；此外，要进行收敛判断。设定双重收敛条件，当迭代次数达到 50 次或均方根误差（RMS）<5% 时停止迭代——密山地区实测数据显示，多数测线迭代 30~40 次即可满足收敛要求，迭代后模型与地质实际的吻合度提升 40% 以上。

（三）联合反演验证

联合反演结果需通过多维度验证确保可靠性，避免单一验证的局限性：一是要进行浅层一致性验证。对比联合反演与单一高密度电法的浅中层（0~100m）分层结果，如 GMD-23-02 测线联合反演的 0~15m 黏土层厚度与高密度电法结果误差<1m，满足工程精度要求。二是要进行深层合理性验证。结合区域地质资料（如钻孔柱状图、地质露头）验证深层结构，如密山平原区联合反演的 150m 以下花岗岩基底，与《黑龙江省密山市幅 1:5 万地质图》（编号 J52E002003）中“新近纪花岗岩埋深 140~160m”的描述一致。三是要进行物性阈值验证。检查含水层电阻率是否处于联合设定的阈值区间内，如密山山区构造裂隙含水层的电阻率为 45~60 $\Omega\cdot m$ ，完全处于两种方法联合确定的 40~65 $\Omega\cdot m$ 阈值内，排除“低阻非水”的误判风险。

三、密山地区深层地下水探测工程实例

（一）研究区概况

1. 地形与地质背景

密山地区位于黑龙江省东南部，本次研究选取两类型区域：平原区以振兴村 GMD-23-01 测线为代表，地势平坦（高程 100~110m），上覆第四系沉积物（黏土、砂层），自上而下分为黏土层（0~20m）、砂层（20~150m），基底为新近纪花岗

岩（埋深>150m）；据区域水文资料记载，该区域“砂层为主要含水层，电阻率约 100 $\Omega\cdot m$ ，孔隙度 25%~30%，具备开采价值”；山区以杨田富南山东侧 GMD-23-03 测线为代表，地形变化较大（高程 120~180m），地表坡度 15°~30°；上覆土层自上而下分为黏土层（0~10m）、冲积层（10~30m，由岩块+砾石组成），基底为花岗岩（埋深>50m）；区域资料显示“山区含水层以花岗岩构造裂隙带为主，埋深普遍为 30~50m，单孔涌水量可达 10~20m³/h”。

研究区关键地层的物性规律如下表 1，为反演结果解释提供依据：

表 1 密山地区关键地层的物性规律

地层类型	电阻率范围（ $\Omega\cdot m$ ）	分布深度（m）	含水性特征
黏土	12~18	0~20	不含水或含少量孔隙水
砂层	80~110	20~150	主要含水层，含水性较强
冲积层	180~250	10~30	不含水或含极少量水
花岗岩构造裂隙带	45~60	30~50	主要含水层，裂隙含水性较强
完整花岗岩	500~1000	>50	不含水

2. 探测方案设计

探测方案设计见下表 2。

表 2 探测方案设计

探测方法	装置类型	参数设置	探测深度	测线位置
高密度电法	温纳装置	电极距 10m，90 道电极，剖面长 890m	~130m	GMD-23-01、GMD-23-03
瞬变电磁法	中心回线装置	发射线圈 20m×20m，接收线圈 5m×5m	~200m	与高密度电法测线重合

（二）平原区（GMD-23-01 测线）联合反演结果

1. 单一方法反演局限性

（1）高密度电法单一反演

0~20m 黏土层（ $\rho=12\sim 18\Omega\cdot m$ ）、20~100m 砂层（ $\rho=85\sim 110\Omega\cdot m$ ）划分清晰，但 100~130m 深层电阻率波动至 70~130 $\Omega\cdot m$ ，无法确定砂层是否连续，且未探测到 130m 以下结构（详见图 1）。

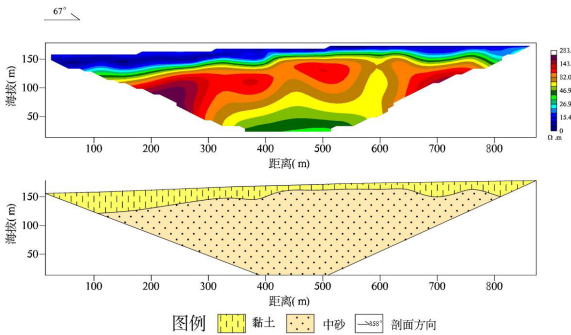


图 1 二维高密度电法测量反演与解释剖面图（GMD-23-01）

(2) 瞬变电磁法单一反演

100 ~ 200m 深层显示低阻异常 ($\rho=75 \sim 95 \Omega \cdot m$), 但浅层 (0~30m) 因黏土厚度变化 (15 ~ 25m) 产生静态位移, 误将 20 ~ 30m 黏土判为低阻水层 ($\rho=25 \sim 35 \Omega \cdot m$)。

2. 联合反演结果分析

联合反演后, GMD-23-01 测线电阻率剖面分为 3 层:

(1) 浅层 (0~20m): 黏土层, $\rho=12 \sim 18 \Omega \cdot m$, 厚度横向变化 <5m, 与高密度电法单一反演结果一致, 修正了瞬变电磁法的静态位移误差。

(2) 中层 (20 ~ 100m): 砂层, $\rho=85 \sim 110 \Omega \cdot m$, 厚度均匀 (80m), 为中层含水层, 与密山资料中“主要含水层”描述一致。

(3) 深层 (100 ~ 150m): 砂层, $\rho=85 \sim 95 \Omega \cdot m$, 厚度 50m, 连续性好, 为深层主要含水层; 150m 以下为花岗岩基底, $\rho=500 \sim 800 \Omega \cdot m$, 无地下水赋存。

(4) 验证结果: 在测线中点 (450m 处) 布设验证钻孔, 孔深 180m, 钻探显示 100 ~ 150m 为中砂层, 孔隙度 25% ~ 30%, 渗透系数 $1.5 \times 10^{-3} m/s$, 与联合反演结果完全吻合, 确定为深层可开采含水层。

(三) 山区 (GMD-23-03 测线) 联合反演结果

1. 单一方法反演局限性

(1) 高密度电法单一反演

划分 3 层 (0~10m 黏土、10 ~ 50m 冲积层、50m 以下花岗岩), 但冲积层下部 (30 ~ 50m) 电阻率波动至 150 ~ 250 $\Omega \cdot m$, 无法区分裂隙水层。详见图 2。

(2) 瞬变电磁法单一反演

深层 (>50m) 花岗岩界面清晰 ($\rho>500 \Omega \cdot m$), 但浅层冲积层 (10 ~ 30m) 因砾石分布不均, 电阻率异常 ($\rho=180 \sim 300 \Omega \cdot m$), 掩盖裂隙水层信号。

2. 联合反演结果分析

联合反演后, GMD-23-03 测线电阻率剖面分为 4 层:

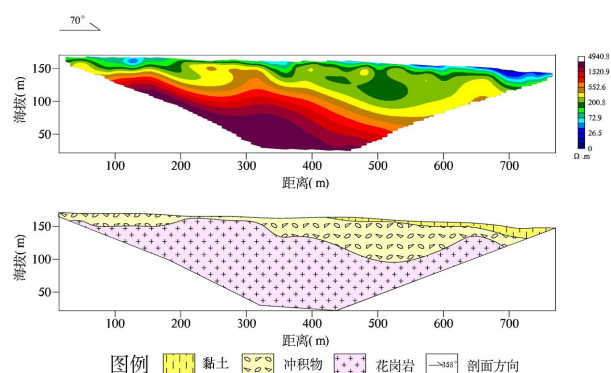


图2 二维高密度电法测量反演与解释剖面图 (GMD-23-03)

(1) 浅层 (0~10m): 黏土层, $\rho=12 \sim 18 \Omega \cdot m$, 主要分布于坡底 (高程 120 ~ 130m), 厚度随海拔降低而增加, 与密山资料一致。

(2) 中层 (10 ~ 30m): 冲积层 (岩块 + 砾石), $\rho=180 \sim 220 \Omega \cdot m$, 厚度 5 ~ 50m, 横向变化大。

(3) 深层 (30 ~ 50m): 构造裂隙水层, $\rho=45 \sim 60 \Omega \cdot m$, 厚度 10 ~ 15m, 沿花岗岩裂隙分布, 为山区深层地下水主要赋存层位。

(4) 基底 (>50m): 花岗岩, $\rho=500 \sim 1000 \Omega \cdot m$, 上界面随地形起伏, 与瞬变电磁法单一反演结果一致。

(5) 验证结果: 在测线 200m 处 (坡底) 布设验证孔, 孔深 60m, 钻探显示 32 ~ 45m 为花岗岩裂隙发育带, 水位埋深 32m, 涌水量 15m³/h, 与联合反演确定的裂隙水层位置完全匹配。

四、问题与优化建议

(一) 联合反演存在的问题

联合反演存在三方面问题: 一是数据匹配难度大, 高密度电法与瞬变电磁法测线位置需精准重合 (偏差 <0.5m), 否则会使结构约束失效^[10], 而密山山区地形复杂, 测线定位误差可达 1 ~ 2m; 二是权重系数存在主观性, 当前 $\alpha=0.6$ 为经验值, 在黏土厚度 >30m 的区域, 需增大 α (如 $\alpha=0.7$) 以强化浅层约束; 三是计算效率低, 联合反演迭代次数是单一方法的 2~3 倍, 在 10km 以上的大测区应用时, 需优化算法缩短计算时间。

(二) 优化建议

针对联合反演现存问题, 从四方面提出优化建议: 一是优化野外数据采集。采用定位精度达 $\pm 0.05m$ 的 GNSSRTK 技术, 精准控制高密度电法与瞬变电磁法的测线位置, 确保二者完全重合以消除结构约束失效风险; 针对山区复杂地形, 选用 5m 小电极距的高密度电法开展测量, 通过缩小电极间距提升对浅层地质结构的分辨能力, 减少浅层信息遗漏。二是对权重系数进行自适应调整。摒弃传统经验取值方式, 基于浅层电阻率标准差与深层电阻率标准差进行动态计算, 通过数据自身统计特征分配权重, 有效规避经验值偏差带来的反演误差^[11]。三是升级设备。为瞬变电磁法配备 2×2 线圈阵列等多线圈阵列设备, 利用多线圈协同探测降低地表不均匀性对测量信号的干扰, 提升数据稳定性。

五、结论

本研究得出的结论如下:

1. 高密度电法与瞬变电磁法在深层地下水探测中具有显著互补性: 高密度电法可精准约束 0~100m 浅中层地质结构, 解决瞬变电磁法的浅层静态误差; 瞬变电磁法能有效补充 100 ~ 200m 深层电性信息, 弥补高密度电法的深层分辨率不足, 二者联合可实现全深度范围的精准探测。

2. “结构约束-物性协同”的联合反演策略具备工程可行性: 通过数据预处理 (静态校正、地形校正)、初始模型耦合 (高密

度电法浅层 + 瞬变电磁法深层) 及迭代优化 (RMS<5%)，可使电阻率分层误差降至3m 以内，显著提升反演精度。

3. 密山地区实例验证了联合反演的有效性：平原区准确划分100 ~ 150m 深层砂层含水层 ($\rho=85 \sim 95\Omega \cdot m$)，山区准确识别30 ~ 50m 构造裂隙水层 ($\rho=45 \sim 60\Omega \cdot m$)，验证钻孔与反演结果的吻合度 >90%，可为区域水资源开发提供可靠的物探依据。

4. 后续研究需聚焦两大方向：一是优化自适应权重系数算法，解决当前权重取值的主观性问题；二是探索 “高密度电法 + 瞬变电磁法 + 重力法” 的多方法联合反演，进一步降低多解性，为东北平原、华北丘陵等类似地形区的大尺度深层地下水勘探提供技术支撑。

参考文献

[1] 田野, 李晓晓, 陈瀚, 等. 基于高密度电法的地下连续墙渗漏探测数值模拟研究 [J]. 交通科技, 2025, (04): 99–105.

[2] 谢绍彬. 等值反磁通瞬变电磁法在浅层地质结构探测的应用 [J]. 世界有色金属, 2020, (04): 185–186.

[3] 乔得福, 李陇锋. 高密度电法在大水金矿采空区勘察中的应用 [J]. 地质装备, 2025, 26(04): 20–25.

[4] 曾凌峰. 基于高密度电法的废弃矿山勘探及治理研究 [J]. 世界有色金属, 2025, (14): 176–178.

[5] 王春阳, 张莹, 荣忠秋. 瞬变电磁法在地下水资源勘探中的应用效果研究 [J]. 水上安全, 2025, (14): 184–186.

[6] 唐塑, 武银婷, 邢浩, 等. 高密度电法与瞬变电磁法在戈壁区找水的联合应用 [J]. CT 理论与应用研究, 2023, 32(01): 27–34.

[7] 王瑞丰, 温来福, 程久龙, 等. 高密度电法与瞬变电磁法联合勘查河北承德地区基岩裂隙水 [J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(6): 784–790.

[8] 刘金锁, 刘盛东, 曹煜, 等. 瞬变电磁法和高密度电法在不同垃圾填埋场体量计算的应用分析 [J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(04): 454–461.

[9] 别念兵, 潘军, 王刚. 高密度电阻率法在土壤地下水环境调查中的应用 [C]// 中国石油学会石油物探专业委员会. 第三届中国石油物探学术年会论文集 (四). 中石化石油工程地球物理公司地理地质信息勘查分公司; 湖北广顺新业人力资源有限公司, 2025: 92–94.

[10] 范尧, 邹连庆, 张泽平, 等. 综合物探方法在复杂断层区调查中的应用分析 [J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(04): 474–483.

[11] 赵杨杉. 高密度电法与等值反磁通瞬变电磁法在法泗岩溶塌陷精细探测中的联合应用 [J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(03): 348–355