

高密度电法在地下水污染区边界圈定 与水源筛选中的协同应用

马维龙^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 陈海江^{1,2}, 王康^{1,2}, 刘红岩^{1,2}, 丁禹达^{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/ME.2025070014

摘 要 : 为解决地下水污染防控与优质水源地开发的协同问题, 本文以密山地区 15 条高密度电法剖面探测成果为基础, 系统分析高密度电法在地下水污染区边界圈定与水源筛选中的应用逻辑与技术路径。研究表明, 密山地区不同地貌单元的地层结构与电阻率特征存在显著差异, 高密度电法可实现污染区边界划分, 并筛选优质水源地。两者协同应用时, 需以“无污染边界约束水源地范围、水源地参数反推污染风险”为核心, 结合钻孔数据验证, 提升结果可靠性。本文可为类似北方平原—山区过渡带的地下水管理提供技术参考。

关 键 词 : 高密度电法; 地下水; 污染边界; 水源地筛选

Collaborative Application of High-Density Resistivity Method in Boundary Delineation of Groundwater Contamination Zones and Selection of Water Source Areas

Ma Weilong^{1,2}, Li Guodong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Chen Haijiang^{1,2}, Wang Kang^{1,2}, Liu Hongyan^{1,2}, Ding Yuda^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

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

Abstract : To address the collaborative challenges in groundwater contamination prevention and control alongside the development of high-quality water source areas, this paper systematically analyzes the application logic and technical pathways of the high-density resistivity method in boundary delineation of groundwater contamination zones and selection of water source areas, based on the detection results from 15 high-density resistivity profiles in the Mishan area. The study reveals significant differences in stratigraphic structure and resistivity characteristics across various geomorphic units in the Mishan area, demonstrating that the high-density resistivity method can effectively delineate contamination zone boundaries and screen high-quality water source areas. When applied collaboratively, the core approach involves "constraining the water source area range by non-contaminated boundaries and inferring contamination risks through water source area parameters," combined with borehole data verification to enhance result reliability. This paper provides technical references for groundwater management in similar transitional zones between northern plains and mountainous regions.

Keywords : high-density resistivity method; groundwater; contamination boundary; water source area selection

引言

地下水是我国北方重要的饮用水与工农业用水来源, 易受工业废水、农业面源污染影响^[1,2], 且优质水源地短缺加剧水资源供需矛盾。精准圈定污染边界阻断扩散、筛选优质水源地保障供水安全, 是地下水管理核心任务。高密度电法分辨率高、探测范围广、成本低, 可通过地层电阻率差异反演地下介质分布: 地下水污染会改变地层孔隙水离子浓度、黏土层吸附特性, 导致电阻率异常^[3]; 优质含水层电阻率与隔水层差异显著, 使其具备服务“污染边界圈定”与“水源地筛选”的潜力。密山地区 15 条高密度电法剖面探测, 获取了完整的地层结构、电阻率分布及含水层特征数据, 为研究协同应用提供了区域案例。

通讯作者: 丁禹达, 邮箱: 909894777@qq.com

一、高密度电法在地下水污染区边界圈定中的应用

地下水污染区边界圈定的核心是“识别污染导致的电阻率异常，并区分异常与岩性、含水率等非污染因素的差异”。仅依赖电阻率变化判定污染区存在多解性，需结合水质分析结果、含水层介质变化数据形成“物探+化学+地质”的综合判定体系^[4]。基于密山地区数据，高密度电法可通过“清洁区背景标定—污染区

表1密山地区清洁区不同地层背景电阻率标定表

地貌单元	地层类型	分布深度	背景电阻率范围	电阻率稳定性	标定依据（剖面编号）
平原区	黏土层（隔水层）	0~30m	13~17Ω·m	稳定（变异系数<10%）	GMD-23-01、02、12~15
平原区	砂层/砂岩层（含水层）	20~100m	90~300Ω·m	稳定（变异系数<15%）	GMD-23-01、02、12~15
山区	黏土层（隔水层）	0~15m（坡底）	13~17Ω·m	较稳定（变异系数<12%）	GMD-23-03、06
山区	冲积层（含水层）	5~50m	180~220Ω·m	较稳定（变异系数<18%）	GMD-23-03~06
山区	花岗岩（隔水层）	>20m	500~1000Ω·m	稳定（变异系数<8%）	GMD-23-03~06

注：变异系数=标准差/平均值，数值越小说明电阻率越稳定，越适合作为背景值。

标定过程中需注意两点：一是平原区黏土层电阻率普遍低于山区黏土层，需分区域标定；二是含水层电阻率随岩性变化，需按岩性细分，避免误判污染异常。

（二）污染区电阻率异常识别

1.黏土层污染异常

黏土层为隔水层，其电阻率异常主要与孔隙水污染物类型相关，该结论基于密山地区8个污染区钻孔与清洁区钻孔的对比验证：重金属污染会增强孔隙的导电性，使黏土电阻率降至10Ω·m以下（低于背景值）。且异常区因地下水横向流动呈连续带状分布[5]，例如GMD-23-01-1剖面200~400m处，黏土层电阻率8~10Ω·m，对应钻孔ZK-13水样中镉浓度0.05mg/L（超Ⅲ类标准5倍）。有机物污染（如石油烃）会填充黏土层孔隙、降低导电性，使电阻率升至20Ω·m以上，异常区因有机物分布不均呈“斑块状”；如GMD-23-10剖面500~600m处，黏土层电阻率20~22Ω·m，水样中石油烃浓度0.03mg/L（超Ⅲ类标准6倍）；需注意，电阻率低于10Ω·m也可能由黏土层含水率升高（如雨季积水）导致，因此局部出现“高低波动”（如局部降至8Ω·m、周边升至18Ω·m）时，需结合孔隙水含水率检测（烘干法）与污染物浓度分析排除非污染因素。

2.含水层污染异常

含水层为地下水主要赋存层，电阻率异常由孔隙水污染物与介质吸附共同导致^[6]：

（1）平原区砂层含水层：清洁区电阻率约100Ω·m，重金属污染降至70Ω·m以下，有机污染升至130Ω·m以上，异常区与地下水流向一致。（2）山区冲积层含水层：清洁区电阻率180~220Ω·m，重金属污染降至150Ω·m以下，有机污染升至250Ω·m以上，异常区沿裂隙发育方向分布。

表2密山地区水源地筛选评价指标与标准

评价类别	指标名称	平原区评价标准	山区评价标准	数据来源（高密度电法）
基础参数	含水层岩性	砂层/砂岩层（富水性强）	冲积层（基岩风化带裂隙发育）	电阻率反演（砂层100Ω·m左右，冲积层200Ω·m左右）
基础参数	含水层埋深	20~100m（便于开采，避免污染）	15~20m（浅层裂隙水易开采）	电阻率剖面中含水层顶界面深度

异常识别—多维度边界验证”三步实现精准圈定。

（一）清洁区背景电阻率标定

污染异常的识别需以清洁区电阻率为基准。且需按“地貌单元+地层类型”细分，避免区域差异导致的误判。基于密山地区15条剖面的反演结果，可按“地貌单元+地层类型”分别标定清洁区背景电阻率，具体如表1所示。

（三）染区边界精准圈定

1.横向边界圈定

沿疑似污染区布设平行剖面（间距50m，参考GMD-23-01与02），采集电阻率数据；如GMD-23-01（清洁区）黏土层电阻率15Ω·m，疑似污染剖面（GMD-23-01-1）在200~400m处电阻率降至10Ω·m以下，确定该区间为横向异常区；连接异常区“电阻率突变点”（如13Ω·m，背景值下限）形成横向污染边界。

2.纵向边界圈定

在横向异常区内布设垂直剖面（与地下水流向垂直），探测深度覆盖含水层（参考GMD-23-01的130m深度）；如疑似污染剖面中，黏土层（0~20m）电阻率10Ω·m（异常），砂层含水层（20~60m）电阻率70Ω·m（异常），60m以下砂层电阻率恢复至100Ω·m（清洁），则黏土层污染边界为0~20m，含水层污染边界为20~60m，60m以下为清洁区。

3.边界验证

为提升圈定精度，需结合钻孔采样验证：在污染边界附近布设钻孔，采集黏土层与含水层水样，检测污染物浓度。若水样中重金属浓度超过《地下水质量标准》Ⅲ类标准，且对应深度电阻率异常，则确认边界有效；反之，需调整背景电阻率标定标准，重新圈定^[7]。

二、高密度电法在水源地筛选中的应用

水源地筛选的核心是“识别富水性强、水质潜力优、稳定性高的含水层”。基于密山地区的地层特征，高密度电法可通过“含水层识别—参数量化—综合评价”实现优质水源地筛选。

（一）水源地筛选核心指标与评价标准

结合《饮用水水源保护区划分技术规范》与密山地区实际，筛选指标分为“含水层基础参数”与“稳定性参数”两类，具体评价标准如表2所示。

基础参数	含水层厚度	>30m（富水量充足）	>10m（裂隙水储量稳定）	电阻率剖面中含水层顶底界面差值
稳定性参数	电阻率变异系数	<15%（岩性均匀，富水性稳定）	<18%（裂隙分布均匀）	含水层段电阻率标准差 / 平均值
稳定性参数	隔水层完整性	黏土层连续（厚度 >10m）	花岗岩界面连续（无裂隙贯通）	黏土层 / 花岗岩电阻率连续性

注：平原区以深层砂层 / 砂岩层为目标，山区以中层冲积层（基岩风化带）为目标，避免浅层黏土层（富水性差）与深层花岗岩隔水。

（二）平原区水源地筛选（以兴凯湖乡为例）

兴凯湖乡为密山平原区核心区域，布设 GMD-23-12 与 13 两条剖面，地势平坦，最大探测深度 90 ~ 170m，地层为“黏土层 + 砂岩层 + 花岗岩”三层结构，适宜筛选深层水源地。

1. 含水层识别与参数量化

以 GMD-23-12 剖面（总长 1190m，最大探测深度 170m）为例：反演显示 25 ~ 95m 深度段电阻率 150 ~ 200Ω · m，判定为砂岩层（富水性强），排除浅层黏土层（0~25m，15Ω · m）与深层花岗岩（>95m，500 ~ 1000Ω · m）；含水层埋深 25 ~ 95m（符合 20 ~ 100m 标准），厚度 70m（满足 >30m 标准），变异系数 ≈ 14.3%（<15% 标准）；浅层黏土层厚度 25m（>10m）且横向连续，深层花岗岩界面连续无裂隙，可阻隔污染。

2. 筛选结果与成井建议

GMD-23-12 剖面砂岩层含水层满足所有标准，判定为“优质水源地候选区”，成井建议：深度 80 ~ 95m（穿透砂岩层中下部），井径 300 ~ 400mm，过滤管 25 ~ 95m 全段设置，采用不锈钢管材防腐。GMD-23-13 剖面（总长 590m）参数相似，砂岩层厚度 60m，变异系数 13.8%，亦为优质水源地候选区，可与 GMD-23-12 联合形成“兴凯湖乡水源地集群”提升供水能力。

表 32023 年密山地区水源地筛选结果汇总表

水源地等级	数量	分布区域	对应剖面编号	含水层类型	成井深度建议	预计出水量（m³ / d）
优质候选区	6	振兴村	GMD-23-01、02	砂层	>60m	500~800
优质候选区		兴凯湖乡	GMD-23-12、13	砂岩层	80~95m	800~1200
优质候选区		兴隆岗村	GMD-23-14、15	砂岩层	70~85m	600~1000
合格候选区	4	杨田富南山东侧	GMD-23-04、05	冲积层（裂隙）	15~20m	200~400
合格候选区		临河村南侧	GMD-23-10、11	砂层	40~55m	300~500

注：预计出水量基于含水层厚度与电阻率稳定性估算，实际需结合抽水试验验证。

三、高密度电法的协同应用逻辑与案例验证

高密度电法在“污染边界圈定”与“水源地筛选”中的协同应用，核心是“以污染边界约束水源地范围，以水源地参数反推污染风险”，形成“污染防控—水源开发”的闭环管理。本节以密山杨田富南山区为例，阐述协同应用流程与效果。

（一）协同应用核心逻辑

协同本质是“参数互用与结果互证”：筛选水源地时，限定在“污染边界外清洁区”，避开污染区或扩散路径（如山区水源地布设在裂隙上游清洁区）；水源地含水层埋深、隔水层厚度等参数，反推污染风险（如山区水源地黏土层厚度 <5m 则污染风险

（三）山区水源地筛选（以杨田富南山东侧为例）

杨田富南山东侧为密山山区，布设 GMD-23-03~06 四条剖面，地形起伏较大，地层为“黏土层 + 冲积层 + 花岗岩”三层结构，适宜筛选浅层裂隙水水源地。

1. 含水层识别与参数量化

以 GMD-23-04 剖面（总长 790m，最大探测深度 120m）为例：反演显示 10 ~ 25m 深度段电阻率 180 ~ 220Ω · m，判定为冲积层（基岩风化带裂隙发育），排除浅层黏土层（0~10m，坡底分布，厚度 <5m）与深层花岗岩（>25m，500 ~ 1000Ω · m）；含水层埋深 10 ~ 25m（核心区 15 ~ 20m，符合标准），厚度 15m（满足 >10m 标准），变异系数 20%（接近 <18% 标准，需钻孔验证裂隙分布）；深层花岗岩界面局部有裂隙，需避开。

2. 筛选结果与成井建议

GMD-23-04 剖面冲积层含水层基本满足标准，判定为“合格水源地候选区”，成井建议：深度 15 ~ 20m（核心裂隙段），避开 500 ~ 600m 花岗岩裂隙区，井径 200 ~ 300mm，过滤管 15 ~ 20m 段设置（缠丝过滤管），成井后每月监测水位。

GMD-23-05 剖面冲积层变异系数 17.5%（满足标准），判定为优质水源地候选区，可作为山区主要供水点。

（四）水源地筛选结果汇总

基于 15 条剖面的评价，密山地区共筛选出“优质水源地候选区”6 处、“合格水源地候选区”4 处，具体分布如表 3 所示，可为区域供水规划提供直接依据。

高，需扩大缓冲区）。污染边界圈定时，若异常区与水源地含水层重叠需重新验证（如异常区对应花岗岩则可能为岩性差异，对应冲积层则优先排查污染）。

（二）协同应用案例（杨田富南山区）

1. 第一步：污染边界圈定（山区特殊性适配）

按“坡底黏土层 15Ω · m、坡中冲积层 200Ω · m、全区域花岗岩 800Ω · m”标定，避免地形导致岩性误判；GMD-23-03 剖面（坡底 600 ~ 700m）发现异常：黏土层电阻率降至 10Ω · m 以下（重金属污染），下方冲积层降至 150Ω · m 以下（污染渗透），确定为污染区；横向边界沿坡底 600 ~ 700m 延伸，纵向边界因地下水裂隙流扩散，定为“0~30m（冲积层全段污染）”，30m 以下花岗岩为清洁隔水层。

2. 第二步：清洁区内筛选水源地

基于污染边界，清洁区为“距离 <600m 或 >700m、深度

>30m”；分析 GMD-23-04 剖面（200 ~ 500m）：冲积层埋深 15 ~ 25m、厚度 15m、电阻率 180 ~ 220 $\Omega \cdot m$ （变异系数 17%），黏土层仅坡底分布（厚度 5m），冲积层下伏花岗岩界面连续，判定为优质水源地候选区；因黏土层厚度 <10m（污染风险中等），设置 100m 缓冲区（水源地与污染边界距离 >100m）。

3. 第三步：验证与方案输出

在水源地候选区（GMD-23-04 剖面距离 300m 处）布设验证钻孔，采集冲积层（15 ~ 20m）水样，检测结果显示重金属浓度符合《地下水质量标准》Ⅲ类标准，与清洁区电阻率特征匹配，确认清洁区有效。

最终确定方案：

- （1）污染边界：横向 600 ~ 700m（坡底），纵向 0~30m。
- （2）水源地布局：GMD-23-04 剖面距离 200 ~ 500m 处（1 处，成井深度 15 ~ 20m）。
- （3）防控建议：在缓冲区（500 ~ 600m）布设 2 个监测井，每月监测水质，防止污染沿裂隙扩散。

（三）协同应用效果评价

该案例中，协同应用实现“三个精准”：一是污染边界精准，排除 2 处“岩性差异假异常”，污染区面积从 1.2km² 修正为 0.8km²，精度提升 33.3%；二是水源地布局精准，避开 1 处“潜在污染风险水源地”（550m 处，近污染边界），保障供水安全；三是成本精准控制，减少 40% 钻孔验证工作量（从 5 个降至 3 个），提升开采效率。

四、存在问题与优化建议

（一）现存主要问题

当前高密度电法在地下水污染边界圈定与水源地筛选中的应用仍存在三方面不足：一是设备分辨率局限，现有单一 10m 电极距对浅层 <5m 黏土层的轻度有机污染（电阻率异常 <5 $\Omega \cdot m$ ）识别能力弱，难以区分污染与含水率变化的差异，且深层 >100m 含水层参数量化精度不足，如 GMD-23-12 剖面 170m 处花岗岩界面因分辨率限制呈现模糊特征，影响隔水层完整性判断；二是数据

融合程度低，仅依赖高密度电法数据，未与探地雷达（可辅助识别污染扩散路径的细微裂隙）、钻孔数据深度整合，且探地雷达天线频率单一（如 50MHz）导致数据尺度不匹配，无法形成三维地层模型^[8]；三是验证手段单一，多依赖高成本的钻孔采样，覆盖范围有限，缺乏“物探初筛—现场快检—钻孔验证”的立体验证体系，易遗漏局部污染异常或水源地风险点。

（二）优化建议

针对这些问题，可从三方面优化：首先更新观测设备与参数，采用 5m+10m+20m 多电极距组合，5m 电极距提升浅层 <5m 污染异常的识别精度，20m 电极距增强深层 >100m 含水层的量化能力，减少分辨率导致的误判；其次加强多源数据融合，构建“高密度电法 + 探地雷达 + 钻孔”综合数据库，通过离散光滑插值算法统一数据尺度，生成三维地层模型，直观展示污染边界与水源地的空间关系^[9,10]；最后构建立体验证体系，减少钻孔采样数量，增加“便携式电阻率仪 + 水质快速检测仪”的现场验证（如污染边界突变点、水源地候选区），对优质水源地开展长期抽水试验与水质监测，兼顾验证精度与成本控制。

五、结论

本文以 2023 年密山地区 15 条高密度电法剖面成果为基础，研究该技术在地下水污染区边界圈定与水源地筛选中的协同应用，得出结论：一是密山平原区与山区地层结构差异显著，平原区以“黏土层 + 砂层 / 砂岩层”为主，山区以“黏土层 + 冲积层 + 花岗岩”为主，两类区域地层电阻率特征（黏土层 $\approx 15 \Omega \cdot m$ 、含水层 100 ~ 200 $\Omega \cdot m$ 、花岗岩 500 ~ 1000 $\Omega \cdot m$ ）为协同应用奠定基础；二是高密度电法可通过对应流程精准划分污染区、筛选优质水源地，两项任务参数互用与结果互证形成闭环管理；三是杨田富南山区案例显示，该技术减少 40% 验证成本，水源地安全系数达 100%，为北方山区提供可复制范式；四是更新设备、融合数据、构建立体验证体系，可提升该技术分辨率与可靠性，适配更复杂地下水环境。

参考文献

[1] 孙中文. 污染场地土壤污染调查与风险评估研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(08): 153-155.
[2] 王凯, 梅昌旺, 王莹. 高密度电法下地下水环境污染场地勘探与防治对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(04): 109-114.
[3] 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.
[4] 朱紫祥, 胡俊杰. 地球物理勘探技术在地下水资源探测中的应用研究 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(03): 66-70.
[5] 高畅, 邢程, 郭秀军, 等. 不同演化阶段的 NAPLs 污染区高密度电阻率法探测效果分析 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2020, 50(S1): 128-136.
[6] 李丹. 约束反演与地质数据综合解释砂岩含水层特征 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(07): 96-100.
[7] 王凯, 梅昌旺, 王莹. 高密度电法下地下水环境污染场地勘探与防治对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(04): 109-114.
[8] 张瑞城, 周念清, 江思珉, 等. ILUES 算法融合 ERT 数据反演污染源参数与渗透系数场 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2022, 50(02): 223-230.
[9] 任剑飞. 基于高密度电阻率法的地下水污染调查研究 [J]. 水利科技与经济, 2016, 22(05): 70-72.
[10] 李建东, 赵留峙. 地质雷达与高密度电法融合技术在选矿监测模型构建中的方法研究 [J]. 黄金, 2025, 46(02): 40-42+54.