



ERT 探测技术在水土污染调查中的研究实践

李兆令^{1,2}, 邢楠¹, 武志敬^{1*}, 刘宝江^{1,2}, 田少兵³, 赵飞¹, 陈铁¹

(1. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东 泰安 271000; 2. 山东省地矿局岩溶塌陷防治重点实验室, 山东 泰安 271000; 3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049)

摘要:应用高密度电阻率成像法(ERT)对某化工园区地下水及土壤受二氯乙烷、二氯丙烷等卤代烃有机物污染影响区域进行了探测,得到了污染场地的电性异常特征。通过对比钻孔的化学分析测试数据结果,确定高浓度有机污染物(DNAPL)形成的污染晕表现为高电阻率特征,结合地质资料,最终较准确地查明了地层结构和污染羽的分布范围,合理的解释了污染物的运移路线和形成机理,为园区地下水和土壤修复工作提供了参考依据。实践表明,ERT 探测技术在地下水和土壤有机污染调查中有较好的应用效果,值得推广使用。

关键词:高密度电阻率法; ERT; 地下水; 土壤污染

中图分类号: P631; X53

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.11.009

0 引言

水土环境污染问题是当今世界关心的热点问题之一,随着我国发展水平的提高,国家社会日益重视经济的高质量可持续发展,人们也越来越关心和自己生活息息相关的水源和土地的品质和健康保障问题,因而地下水土壤污染的调查和治理也成了人们关心的话题。传统方法对这类污染场地的调查一般采用土壤采样、钻探、土工试验等手段,不但耗时长,成本高,而且易对地表和地下稳定的水体环境造成破坏,形成二次污染,同时难以全面反映污染物的空间分布特征,迫切需要寻求新的勘查方法以满足场地污染土的地下全空间野外探查^[1-2]。随着高密度电阻率成像法(ERT)技术的日趋成熟,加速了其在环境污染检测方面的应用,该方法具有效率高、成本低、信息量丰富等优点,近年来成为水环境污染治理的重要探测手段。

某化工产业园在前期浅层地下水调查中,发现存在二氯乙烷、二氯丙烷等卤代烃超标现象,通过多次的分析调查,初步确定了疑似重点污染区域,为精确确定污染物的分布范围和深度,为溯源和治理工

作提供帮助,本研究在该场区及周边区域布设了 ERT 剖面,并进行了钻探验证,两者吻合较好。

1 地质背景

1.1 地质及水文地质特征

园区位于沂沭断裂带,昌邑-大店和安丘-莒县断裂形成的地堑内,区域主要出露白垩纪王氏群红土崖组、青山群八亩地组和大盛群地层以及中生代正长斑岩、元古代辉长岩和二长花岗岩等^[3]。区内地形平坦,全被第四系覆盖。根据以往工勘钻孔揭露(图1),场区地层可分为5层:①耕土层,褐色,松散,主要由风化残积土组成,厚度一般为0.5~0.6 m。②黏土,黄褐色,可塑,有光泽,韧性高,上部为粉质黏土,厚度一般为0.8~1.2 m。③砂层,上层为黄色中砂,主要成分为石英与长石,含少量黏性土,该层分布不均,分布范围较小;下层为黄褐色粗砂,主要成分为石英与长石,含少量黏性土,含少量圆砾角砾,层厚0.5~3.0 m。④全风化泥质砂岩,紫褐色,厚度一般为2~4 m。⑤强风化泥质砂岩,紫褐色,风化裂隙发育。

收稿日期:2025-04-06;修订日期:2025-05-19;编辑:陶卫卫

作者简介:李兆令(1988—),男,山东巨野人,高级工程师,主要从事地球物理勘探工作;E-mail:781426724@qq.com

*通信作者:武志敬(1987—),男,山东泰安人,高级工程师,主要从事地质矿产调查工作;E-mail:297250410@qq.com

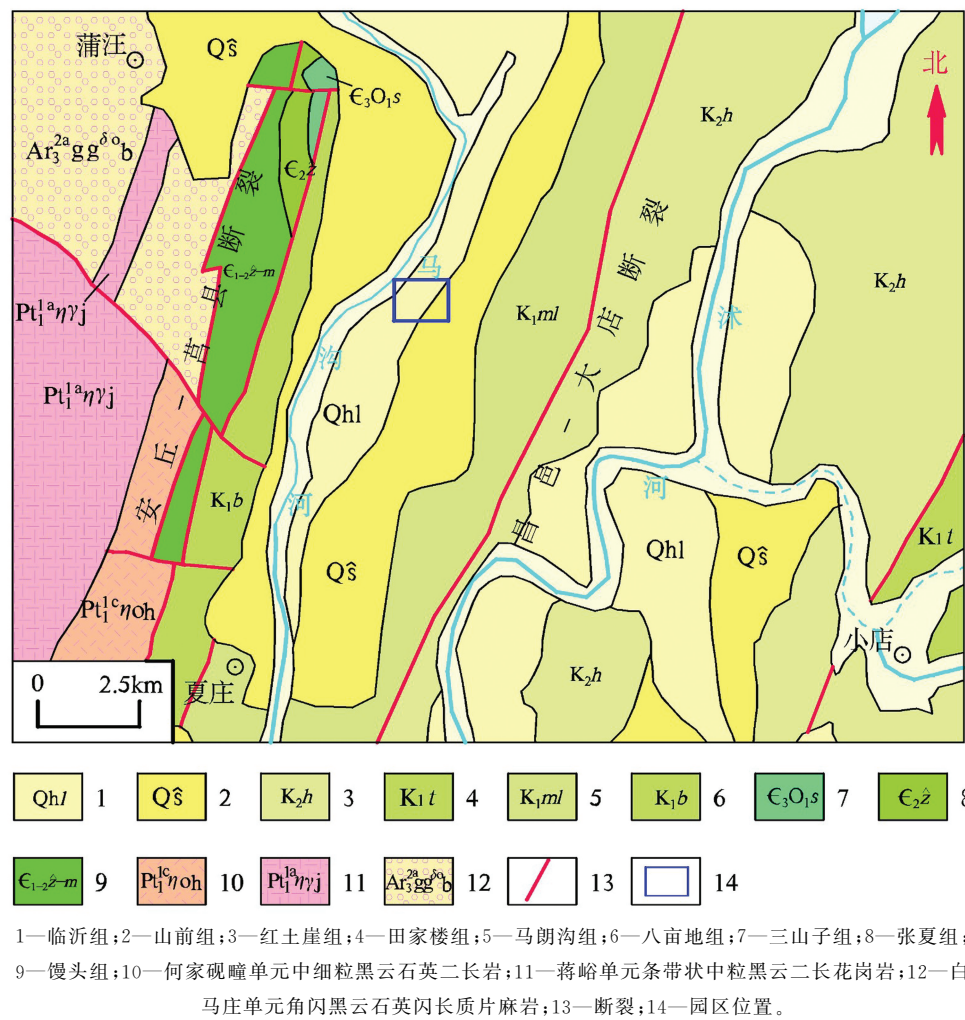


图 1 园区区域地质简图

园区地下水类型分为松散岩类孔隙裂隙水和基岩裂隙水 2 种,其中松散岩类孔隙含水岩组为区内主要含水岩组,主要由第四系冲积、冲洪积层不同粒径的砂及砂砾石组成,厚度一般 20~30 m,透水性强,水量丰富^[4]。园区表层土壤及碎屑岩总厚度为 4~6 m,整体相对比较薄,孔渗性较好,易于得到地表水的补给,但赋存量不大,受降水及开采的影响极为明显;底部为风化的紫红色砾岩、页岩等,风化程度不等,地下水受到岩石风化裂隙和破碎程度控制。赋存的地下水类型,顶部为松散岩类的孔隙水,下部主要为碎屑岩类裂隙水,整体该区域地下水的赋存量小。地下水监测表明,区内地下水径流总的方向为由南向北。

1.2 岩(土)电性特征

场区内粉质黏土和全(强)风化泥质砂岩电阻率较低,粉质黏土实测一般在 0~10 Ω·m 之间,局部

含有薄层中砂、粗砂时,电阻率有所增高,风化的泥质砂岩电阻率整体在 0~20 Ω·m 之间,其电阻率大小与其风化程度有关,一般全风化泥质砂岩的电阻率与粉质黏土相当,强风化略高一些;区内高电阻率岩(土)性主要为砂层,实测电阻率大部分在 20~50 Ω·m 之间,明显高于粉质黏土和全风化泥质砂岩(表 1)。

表 1 区内岩石(土)实测电阻率一览表	
岩石(土)名称	实测电阻率/(Ω·m)
黏土	0~10
砂层	20~50
风化泥质砂岩	0~20

区内地下水污染物主要为二氯乙烷和二氯丙烷等,由于该类有机物属于不良导体,当污染物进入砂层以后导致砂层含水率降低,从而造成砂层电阻率变大,污染物富集程度越大电阻率变大幅度越高,综

上所述,区内不同岩土和各岩性与污染物之间这种明显的电性差异为利用 ERT 方法探测污染物分布提供了较好的地球物理前提。

2 ERT 方法

2.1 ERT 工作机理及研究方案

ERT 技术是以地壳中岩层矿石的导电性差异为基础,通过观测和研究人工建立的大地电流场的分布规律从而解决相应地质问题的高密度电法勘探方法。与传统电阻率法相比,它不仅可以反映测点下方不同电性的岩层随深度的分布情况,还可以反映地下一定深度内沿水平方向地电断面的特征,弥补了传统电阻率法测点稀少、精度低的缺点^[7-15]。ERT 技术排列装置类型较多,本研究采用了分辨率较高的施伦贝尔装置(图 2),在整个测量过程中 MN 固定为一个点距,AM 和 NB 的距离随间隔系数的递减逐次由大到小变化,最终得到一个上宽下窄的梯形断面,对其进行数据处理和反演,得到地层中电阻率分布情况,对比分析污染物与原始地层电性差异从而判断是否存在污染现象。

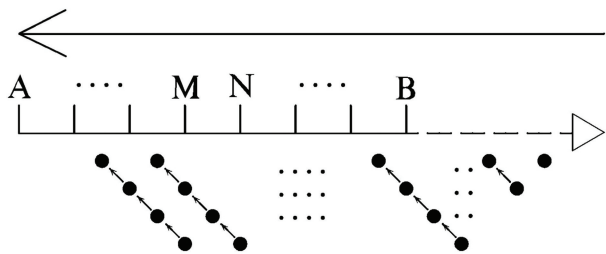


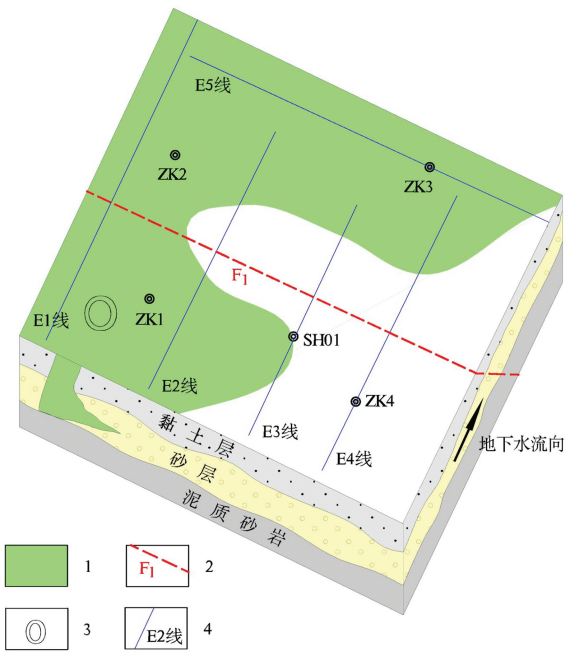
图 2 施伦贝尔装置示意图

根据园区实际条件,本研究共布设 5 条 ERT 剖面(具体位置见图 3),其中 E1—E4 剖面基本平行布设,对全区进行面积控制,方位角 26°,测点距 5 m,E3 剖面穿过场区已有的地下水监测孔 SH01 孔;E5 剖面位于园区外围,方位角 116°,点距 10 m,该剖面本意是获取清洁地层电性特征作为参照,反演剖面视电阻率后发现该剖面亦受污染。

2.2 异常辨识

按照物探资料由已知到未知的解释原则,经过已知的 SH01 孔布设 E3 剖面,其电阻率特征如图 4。

E3 线位于园区中部,点距 5 m,剖面控制长度 220 m。从视电阻率反演断面图可以看到,剖面视电阻率基本分为 3 层,上层 2 m 以浅视电阻率大部



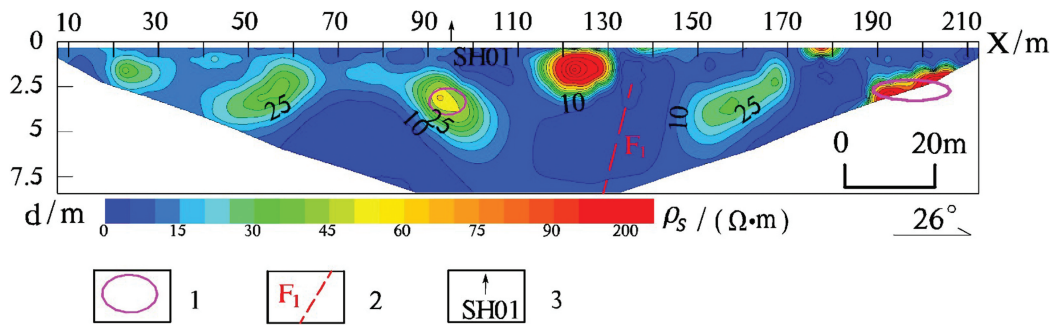
1—污染异常范围;2—断层;3—地下储油罐;4—ERT 测线及编号。

图 3 园区工程部署图

分较低,基本在 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右;中层深度大致 2~5 m 左右,视电阻率相对较高,大部分在 $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,高阻不连续;下层视电阻率较低,大部分在 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下。

据前期调查,剖面水平位置 95 m 左右存在污染,据该处钻孔揭露,岩心自上而下分别为黏土层—砂层—全风化泥质砂岩,且岩心具有刺激性气味,综合该区岩土物性资料可推断,剖面上部低阻层为第四纪黏土层的反映,局部电阻率较高,应为地表干扰或个别电极接地条件较差引起;中部高阻层推断为砂层的地电反应,从高阻层的串珠状分布特征可以判断砂层厚度分布不均匀;下部低阻层为全风化或强风化泥质砂岩的地电反应,基岩局部裂隙发育,含水量增加,电阻率进一步降低,在桩号 135 m 左右,出现一处带状低阻异常,推断此处可能有断裂存在。

与一般砂层形成的局部高阻层相比,SH01 钻孔下部对应的视电阻率明显偏高,在 3.75 m 深度左右形成团块状高阻异常,异常中心区域视电阻率大部分在 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上,推断为污染物富集引起。通过前期调查,地下水污染物主要为二氯乙烷和二氯丙烷,二者皆为密度比水大且难溶或不溶于水的有机化合物,进入水体以后便会以重非水相液体形式存在并迁移。由于 DNAPL 比重比水大,因此 DNAPL 在随水流运移的同时在重力作用下逐步下



1—异常示意;2—推断断裂及编号;3—钻孔。

图 4 E3 线视电阻率反演断面图

渗,并逐渐在砂层中沉积聚集,由于该类有机物属于不良导体,当污染物进入砂层以后导致砂层含水率降低,从而造成砂层电阻率变大,污染物富集程度越大电阻率变大幅度越高。因此,可根据剖面中部高层 50 Ω·m 等值线范围圈定污染物分布情况。

2.3 典型剖面分析

E1 线位于园区西侧,从图 5 可以看到,剖面视电阻率基本分为两层,大致 3 m 以浅视电阻率较低,大部分在 20 Ω·m 以下,推断为第四纪黏土层的反映;3 m 以下视电阻率较高,大部分在 30 Ω·m 以上,推断为砂层的反应,该剖面砂层较厚,大致 5 m 深度以下,视电阻率明显变大,在桩号 85 m 和 190 m 形成 2 个高阻异常中心,异常极值分别为 143 Ω·m 和 180 Ω·m,该高阻异常指示了污染物的影响范围和深度。两高阻异常中间,大致在桩号 135 m 左右出现明显的低阻带,推断此处可能有断裂存在。

据图 6 可知,E2 剖面大致 2 m 以浅视电阻率较低,大部分在 20 Ω·m 以下,推断为第四纪黏土层的反映,左端桩号 35~50 m 视电阻率较高,推断为地表杂填土引起,该区域地表存在人工填土(建筑垃圾、碎石等),其电性特征与天然黏土层显著不同,填土结构松散、孔隙度大,导致电阻率升高。此外,该区域地表存在硬化路面,电极接地条件差异可能进一步抬升视电阻率。2 m 以下剖面视电阻率存在串珠状高阻异常,指示了该处砂层分布的不均匀性,桩号 55~110 m 和 175~210 m 视电阻率进一步变高,大部分在 50 Ω·m 以上,推断为污染物富集引起。在桩号 130 m 左右,存在一处明显的低阻带,为 F₁ 断裂的电性反映。

E4 线位于园区东部,据图 7 可知,E4 剖面视电

阻率自上而下分为明显的 3 层,上层(大致 2 m 以浅)和下层(大致 5 m 以下)视电阻率较低,基本不超过 20 Ω·m,分别推断为第四纪黏土层和全风化或强风化泥质砂岩的地电反应;中层深度大致 2~5 m 左右,视电阻率相对较高,大部分在 20~40 Ω·m 之间,推断为砂层的反映。在剖面右侧桩号 200~220 m 左右形成高电阻率异常,可能为污染物富集引起。在桩号 140 m 左右下部,存在一不太明显的电阻率梯度带,应为 E1 线—E3 线推断的 F₁ 断裂的反映。

E5 线沿场区外围北侧布设,点距 10 m。从图 8 可以看到,剖面视电阻率自上而下分为明显的 3 层,上层大致 2 m 以浅视电阻率较低,基本不超过 20 Ω·m,推断为第四纪黏土层地电反应;中层视电阻率相对较高,大部分在 30 Ω·m 以上,推断为砂层的反映,该层厚度不均匀,自西向东逐渐变薄;下层视电阻率较低,大部分在 20~40 Ω·m 之间,推断为下伏泥质砂岩的反映,泥质砂岩自浅至深风化程度减弱,故视电阻率随深度的变大逐渐变大,局部裂隙较发育,造成地下水富集,导致视电阻率局部变低。以 50 Ω·m 视电阻率等值线圈定污染物分布范围,可见污染物自西向东污染程度逐渐减弱,且分布具有明显的不连续性。

3 综合成果解释及验证

综合 ERT 剖面勘查成果可大致了解场区浅部地电分布特征:场区西部视电阻率较高,东部相对较低,视电阻率自上而下基本可分为低—高一低 3 层,上层大致在 2 m 以浅,视电阻率大部分不超过 20 Ω·m,该层分布较均匀;中层视电阻率较高,大部分在 30 Ω·m 以上,该层深度变化较大,大部分

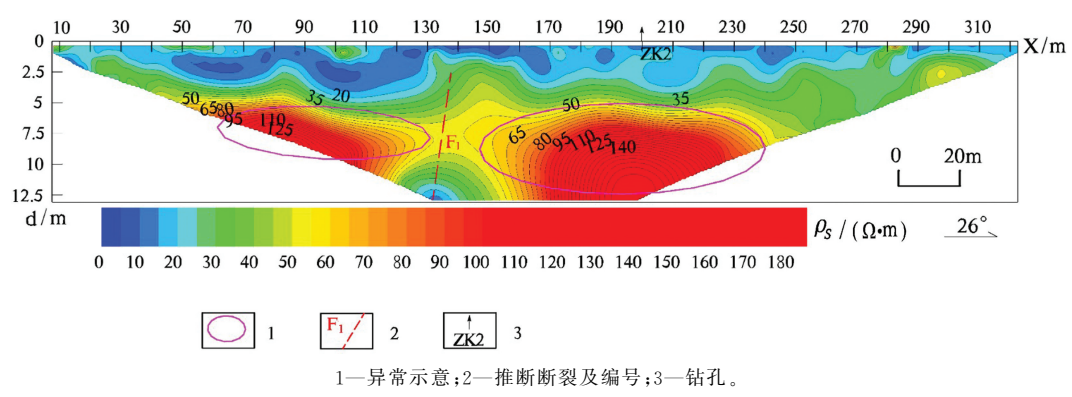


图 5 E1 线视电阻率反演断面图

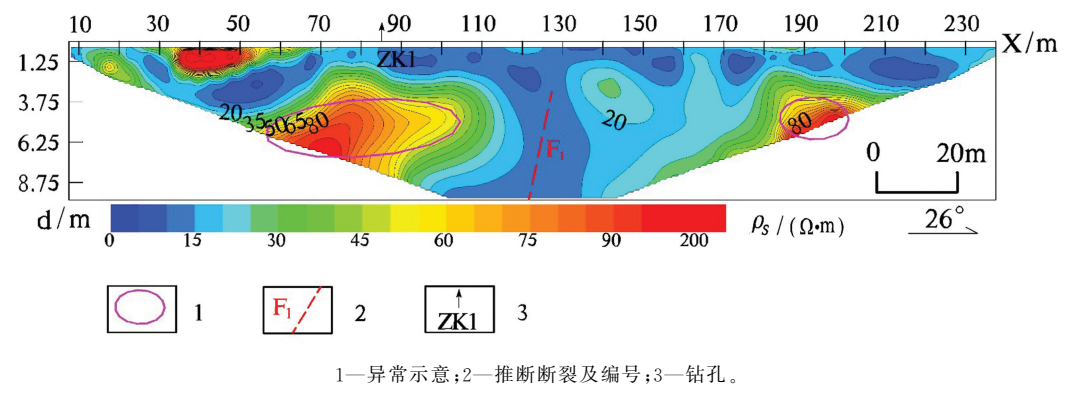


图 6 E2 线视电阻率拟断面图

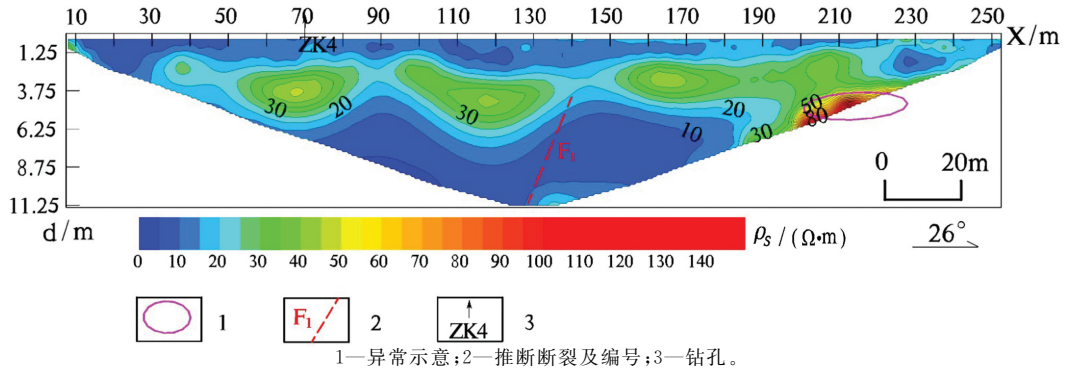


图 7 E4 线视电阻率拟断面图

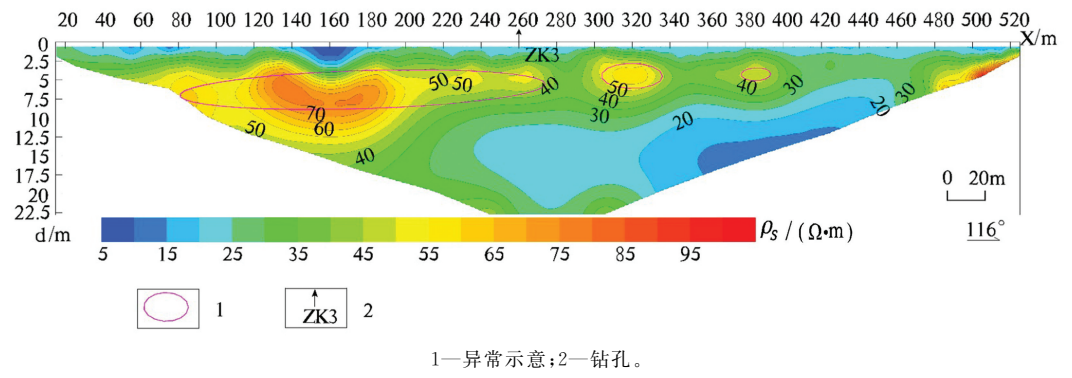


图 8 E5 线视电阻率拟断面图

在 2~10 m 左右,局部地段更深,且该层在场区分布不均匀,不同地段分布差异较大,局部缺失;下层视电阻率基本在 20~40 Ω·m 之间,随着深度的变大,电阻率有变大的趋势。

园区视电阻率低—高一低的分布特征与 SH01 钻孔揭露的黏土—砂层—泥质砂岩的地层结构相吻合,依据钻孔揭露和区域地质资料,结合园区内 5 条视电阻率剖面反演成果,推断园区黏土层厚约 2 m 左右,场区西部砂层较厚,大致埋深在 2~13 m 左右,局部更深,园区中部及东部砂层相对较薄,埋深大致在 2~5 m 左右。在园区中部存在 NW 走向的断裂带 F₁。以 50 Ω·m 视电阻率等值线圈定污染

羽分布范围,可见污染物在园区分布范围较广,主要集中在园区西部和北部,分布深度大致与砂层分布特征一致,具体分布范围见图 3。

依据 ERT 勘查成果,在园区布设了 4 个化学分析取样钻孔,孔深 30 m,其中 ZK1 孔、ZK2 孔见到具有强烈“苦杏仁”刺激性味道的污染物,污染岩心厚度较大,其深度为 0.5~12.3 m。ZK3 钻孔岩心刺激性气味较轻,污染岩心深度为 5~8.4 m,ZK4 钻孔岩心无刺激性气味。地下水取样化学检测结果显示 3 个钻孔二氯乙烷、二氯丙烷等卤代烃有机物超标,各钻孔污染组分含量见表 2。

表 2 验证孔地下水主要污染物含量表

单位:μg/L

主要污染组分	ZK1 钻孔		ZK2 钻孔		ZK3 钻孔		ZK4 钻孔		限定值
	组分含量	超标倍数	组分含量	超标倍数	组分含量	超标倍数	组分含量	超标倍数	
1,2-二氯乙烷	2020	50.5	1260	31.5	240	6	20	0.5	40
1,2-二氯丙烷	1830	30.5	970	16.2	330	5.5	50	0.8	60
二氯甲烷	4590	9.2	2140	4.3	550	1.1	90	0.2	500
1,1,1-三氯乙烷	42460	10.6	36420	9.1	8160	2	520	0.1	4000
1,1,2-三氯乙烷	690	11.5	380	6.3	190	3.2	38	0.6	60
氯苯	3260	5.4	2180	3.6	980	1.6	70	0.1	600

从表 2 可以看到,ZK4 钻孔主要有机污染物组分均未超标(按照 GB/T14848—2017《地下水标准》Ⅳ类标准,下同),ZK1、ZK2 和 ZK3 钻孔各有机污染物组分均超标。ZK1 对应的视电阻率普遍在 70 Ω·m 以上,最高达 200 Ω·m,其对应的污染物浓度超标也最高,其中 1,2-二氯乙烷超标达 50.5 倍,1,2-二氯丙烷超标 31.5 倍;ZK3 钻孔对应的视电阻率相对较低,大部分在 50~70 Ω·m 左右,其对应的 1,2-二氯乙烷和 1,2-二氯丙烷分别超标 6 倍和 5.5 倍;ZK4 钻孔视电阻率低于 50 Ω·m,有机物组分含量均未超标,由此可见场区污染物浓度基本与视电阻率呈正相关关系,据此分析场区西南部视电阻率明显高值异常对应的位置为污染源,污染源发生泄漏以后逐渐向下渗透,进入含水层以后随地下水发生运移,依据视电阻率推断,F₁ 断裂污染程度低,分析为断裂内部水力流动性大,搬运能力强,使得 DNAPL 不易黏附,多沿裂隙渗透到两侧地层中,由于本区地下水流向为自南向北,故造成场区北部污染程度重于南部(污染源位置除外)的分布格局。

4 结论

(1)本研究采用高密度电阻率成像法(ERT)对污染区域实施系统性探测,成功获取了污染物赋存状态的电性响应特征。通过设定 50 Ω·m 视电阻率等值线阈值,较准确圈定了污染羽的空间分布范围及垂向赋存深度。结合验证孔岩心化学分析结果,证实了污染物的高阻异常特征与卤代烃类有机污染物(DNAPL)的富集规律高度吻合。

(2)依据验证钻孔取样分析结果,污染物浓度与视电阻率基本呈正相关关系,结合场区地质及地下水特征,确定了污染物来源和成因,合理地解释了污染羽的运移路线和形成机理,为园区地下水和土壤修复治理工作提供了参考依据。此次实践不仅为污染场地的快速识别与精准治理提供了技术支撑,更为同类工业污染场地的调查与修复工作积累了关键经验。

(3)本次研究系统揭示了该化工园区内地下水及土壤污染的空间分布特征,并有效识别了污染羽的东部边界。然而,受限于化工园区外围密集的工业设施及地表硬化覆盖,ERT 电极布设与信号采集

受到显著干扰,导致未能对污染区域的西部和北部边界进行完整圈定,影响了污染范围的全空间解析。未来工作中,建议结合地面穿透雷达、地球化学追踪技术或跨孔电阻率层析等多元手段,以弥补单一物探方法的不足,提升复杂工业场地污染边界的识别精度。

参考文献:

[1] 徐子东,师学明,傅庆凯,等.武汉某回填土堆场高密度电法污染调查研究[J].工程地球物理学报,2011,8(5):542-546.

[2] 姜月华,吴吉春,李云,等.高密度电法在城市地下水和土壤有机污染调查中的应用[J].华东地质,2021,42(1):1-8.

[3] 颜翠翠,韩琳,谭志容,等.莒县沭河下游地区水文地质条件及富水块段特征[J].山东国土资源,2021,37(5):32-40.

[4] 张大勇.莒县沭河盆地地下水污染预警研究[D].长春:吉林大学,2019.

[5] 武志敬,朱文科,李兆令,等.基于高密度电法的岩溶勘查:以枣庄某工程为例[J].山东国土资源,2022,38(3):45-52.

[6] 邱小峰.高密度电法在上海某地区环境污染调查中的应用[J].

工程勘察,2021,49(5):71-78.

[7] 崔迎龙.高密度电法在和龙市大青头沟村煤田采空区勘探中的应用研究[D].长春:吉林大学,2019.

[8] 梁森,陈建华,李宏涛,等.基于松鼠搜索算法的跨孔电阻率溶洞探测[J].物探与化探,2022,46(5):1296-1305.

[9] 荣晓伟.城市地下空间物探的应用方法探讨:以滕州一小区拟建场地为例[J].能源与节能,2022(8):95-97.

[10] 柳建新,曹创华,郭荣文,等.不同装置下的高密度电法测深试验研究[J].工程勘察,2013,41(4):85-89.

[11] 宋涛,包怡,赵松,等.井—电联合勘探与三维地质建模在某填埋场环境调查中的应用[J].物探与化探,2024,48(1):272-280.

[12] 李鸣威,闫怀宇,李昊霖,等.高密度电法研究有机污染物迁移行为的可行性分析[J].南方农机,2015,46(8):70-72.

[13] 高宗军,孙金凤,鲁统民,等.淄博市大武水源地地下水有机污染物种类与分析评价[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(4):1-9.

[14] 周广柱,曹译允,王翠珍,等.城市土壤中铅分布特征及环境风险[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):49-57.

[15] 白新飞,成世才,申中华.济南西部地下水有机污染现状及污染源浅析[J].山东国土资源,2017,33(9):51-54.

Application of ERT Technology in Investigation
of Groundwater and Soil Pollution

LI Zhaoling^{1,2}, XING Nan¹, WU Zhijing¹, LIU Baojiang^{1,2}, TIAN Shaobing³, ZHAO Fei¹, CHEN Tie¹
(1.No.5 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Tai'an 271000, China; 2. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention and Control of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Tai'an 271000, China; 3. Geological Survey of Jiangsu Province, Jiangsu Nanjing 210049, China)

Abstract: By using high density resistivity imaging (ERT) method, the areas affected by halogenated hydrocarbon organic pollutants have been detected, such as dichloroethane and dichloropropane in the groundwater and soil of a chemical industrial park in a certain city. The abnormal electrical characteristics of the polluted site have been obtained. Through comparing chemical analysis test data of drilling holes, it is determined that the pollution halo formed by high concentration organic pollutants (DNAPL) exhibited high electrical resistivity characteristics. Combining with geological data, geological structures and distribution range of pollution plumes have been accurately identified, and the migration route and formation mechanism of pollutants have been reasonably explained. It will provide some references for groundwater and soil remediation work in the park. Practice has shown that ERT detection technology has good application effects in the investigation of organic pollution in groundwater and soil.

Key words: High density resistivity method; ERT; groundwater; soil pollution