

# 物探方法在浅源石油烃类污染探测中的应用

连晟, 查恩来, 王春辉, 蔡五田, 张敏, 李敬杰

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051)

**摘要:** 应用探地雷达和高密度电阻率法, 在冀中平原中部某典型石油烃类污染场地进行探测, 得到了浅源石油烃类污染物的异常特征。通过对探地雷达和高密度电法资料的分析, 得出石油烃类污染物呈现低电阻率、低介电常数特性, 根据这个特点圈定出了此污染场地内储油池区域的污染扩散晕。实践证明, 这两种物探组合在此类污染场地探测中具有推广价值。

**关键词:** 浅源石油烃; 探地雷达; 高密度电法; 环境污染检测

**中图分类号:** P631.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2012)05-0865-04

石油烃类污染物是石油化工生产流程中产生的芳香烃类、卤代烃类、多环芳烃类等多元污染物的统称, 它是污染范围广、危害程度大的工业污染物<sup>[1]</sup>。对这类污染场地, 主要采用钻探、土壤采样、土工试验、布设监测孔等直接调查法。近年来, 环境地球物理学方法逐步应用于环境污染监测、环境治理与评价等方面, 以低频探地雷达和高密度电阻率法为代表的浅部物探方法在环境污染调查中作用突出<sup>[2-3]</sup>。这些物探方法具有成本低、原位测量无破坏性、勘查速度快等特点<sup>[4]</sup>。从2009年起, 笔者应用探地雷达法和高密度电法技术, 开展石油烃类污染物综合物探调查与研究, 获得了针对此类污染物的探地雷达和高密度电法剖面, 认识到了此类污染物的地球物理响应特征。

## 1 研究区概况

污染场地位于冀中平原中部的山前冲洪积平原区, 研究区内100 m深度内岩层由松散第四系砂、黏土地层交互沉积构成, 形成了多层叠置的含水层系统, 地下水埋深17~22 m, 径流方向由西向东。

依据前期调查资料, 场地土壤和地下水均已受到严重污染, 场地内多为点源型污染, 主要污染源包括生产车间内的网络式地沟系统, 油罐区、卸油区内的线状排列的油渠系统, 集中分布的原油管系统, 零星展布的储油池及地表回填油污土等。

## 2 物探工作机理及采集方案

实验分析结果表明, 污染后的水土介质与原状水土介质相比, 电阻率和电磁波特性的都会发生改变<sup>[5-6]</sup>。经较长时间的物理化学作用, 石油类污染物一般会呈现低电阻率、低介电常数特性, 这是应用物探方法开展石油烃类污染调查的物理前提<sup>[7-8]</sup>。石油类污染物渗入土壤介质后, 会沿一定通道运移并在静水面以上形成油水界面, 在雷达图像中表现为局部的强反射界面。石油烃类物质自身为高阻体, 而被其污染的水土介质往往呈现明显的低阻特征, 且污染程度越重, 电阻率越低, 通常认为这与油污的氧化和微生物的降解作用直接相关。基于这些特征, 有针对性地应用探地雷达和高密度电阻率法来探测水土介质的介电特性和电阻率特性, 对比分析后, 就能够得到水土介质的地下结构和污染范围。

研究区为典型石油烃类污染场地, 场地污染物扩散深度均小于40 m。针对研究区内建筑较多, 面积较大, 污染类型较为单一, 局部污染程度大的情况, 采取的布线原则为: 在区内整体布置探地雷达测线, 以得到区内污染的一般情况, 在主要污染源周边布置高密度电法测线, 以获取该处更加详细的地下污染情况; 同时, 要有一定量的物探测线布置在已有监测井附近, 达到与已有监测井互相验证的目的。另外, 在重点污染区采用加密探地雷达扫描数和减

小高密度电法测点电极距的方法,达到对污染区的精细刻画。

数据采集选用 GSSI 公司的 SIR-3000 雷达系统,选用 40 MHz 低频天线发射,宽频带接收,记录时间为 500 ns,样点数为 1 024,进行 0.5 m/s 的低匀速采样;高密度电法测量选用 AGI 公司的 Super-Sting R8 多功能高密度电法仪,数据采集装置采用了温纳、施仑贝格和偶极-偶极 3 种装置,普通剖面电极距为 2 m,重点勘查区内电极距为 0.5 m,单点

测量时间 1.2 s,单点重复 2 次测量。

### 3 烃类污染源的电性异常特征

污染水土介质的电阻率特征及电磁特征十分复杂,不同浓度和扩散形态的污染物,其电磁波特征不尽相同。通过对大量实测剖面数据的分析和研究,总结出了针对浅源石油烃类污染物的物探异常特征(表 1),可以根据物探特征识别出对应的土壤介质及其污染物赋存情况。

表 1 浅源石油烃类污染物探异常特征一览

场地土壤介质	电阻率	雷达波瞬时振幅	雷达波瞬时频率和相位	雷达波反射特征	孔间电磁波衰减系数
纯油污染物	高阻	弱衰减	频移/相移	边界强反射	弱衰减
干燥浸油地层	高阻	弱衰减	边界弱改变	层面反射弱	弱衰减
湿润浸油地层	低阻	较强衰减	渐变特征	层面反射强	较强衰减
半饱和水地层	较低阻	较强衰减	渐变特征	渐变特征	较强衰减
静水位界面	过渡	强衰减	较强频移/相移	清晰强反射	较强衰减
水位下粘土层	低阻	强衰减	渐变特征	弱反射层面	强衰减
水位下砂层	高阻	较强衰减	渐变特征	弱反射层面	较强衰减

## 4 典型物探剖面分析

为了更详细地说明烃类污染源的探地雷达法与高密度电法的应用效果,以研究区内主要污染源之一的储油池周边的物探剖面为例进行分析。图 1 为该剖面位置。

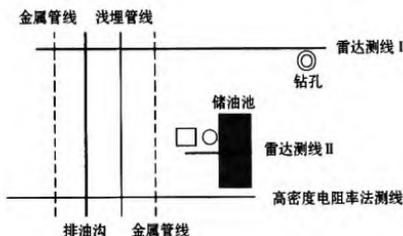


图 1 储油池周边物探剖面布置

### 4.1 探地雷达成果

从探地雷达 I 测线的反射波相对振幅剖面(图 2)中,可解释出浅部粉砂层中的地下管线、排油沟、监测井等典型地物信息。中部包气带内的砂岩层是污染物主要的赋存空间,进入含水层后,雷达波衰减明显。全剖面的砂层上界面(约 10 m)都受到了污染物水平扩散的影响。在频谱特征上,雷达波强反射区的频带变宽,频率向低频方向移动。剖面 28~44 m 段雷达波反射振幅较强,尤其在 10~15 m 深度上反射振幅最强,可达同层位平均振幅值的 1.8 倍。从

雷达强振幅区可圈定出污染扩散羽,污染运移深度达到含水层之上。

对 I 测线邻近油池段进行精细探测,得到跨越储油池探地雷达剖面(图 3)。该剖面中 2 处油池异常影像更加明晰,3 处异常依次为小储油池、井盖和大储油池,大储油池底部雷达波连续致扰动与污染物迁移扩散路径相关。

上述分析表明,距离污染源较近时,污染物分布和迁移路径雷达波特征明显,异常特征易于识别;在远离污染源处,岩性对污染物迁移和扩散起着重要的控制作用。在图 2 的雷达剖面中,与上部的粉土层和粉质黏土层相比,砂层中的有机污染物浓度明显偏高,是污染物的主要赋存空间。同时,污染物的运移受包气带内气体扩散动力及饱和带内地下水波动影响,雷达波的衰减吸收特性也不尽相同。依据污染物介电性质和分布形态的不同,雷达波可能呈强反射特征,出现明显的分层(图 2 雷达剖面属此种情况),也可能呈强吸收特性,在剖面中呈衰减暗区特性,在实际剖面解释时要注意识别。

### 4.2 高密度电法成果分析

平行排列的高密度电法测线和探地雷达所处地质条件基本一致。污染源入渗一定时间后,在电法剖面中一般表现为低阻异常,异常特征为层状或团块状,而监测井、储油池、油井和排油沟等呈高阻异常。

从高密度电法的反演剖面(图 4)中可以看出,该处的电阻率背景值约为  $20 \Omega \cdot \text{m}$ ,为中砂至细砂

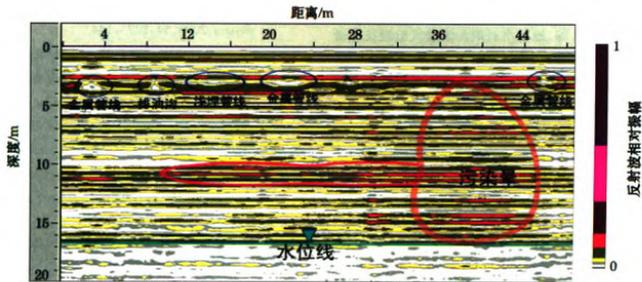


图2 测线 I 的探地雷达时间剖面

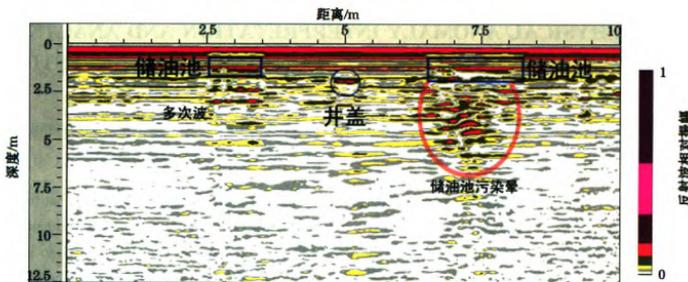


图3 测线 II 的探地雷达时间剖面

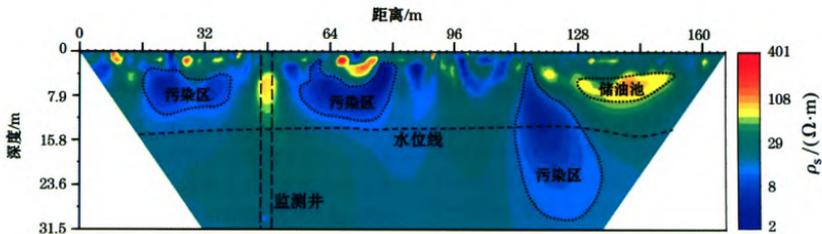


图4 高密度电法反演剖面

层。剖面 48 m 和 140 m 处存在 2 处高阻,其中 48 m 位置为油井,140 m 位置为储油池。剖面中出现了多处低阻团状异常,电阻率低于  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,为污染物入渗和迁移的结果。其中,114 ~ 126 m 之间有一处很明显低阻区,呈倒漏斗状,其扩散深度超过 25 m,判断此处存在较大的污染源,且在包气带内有污染物垂向运移通道,其污染羽已经扩散到水位线以下;16 ~ 36 m 段和 52 ~ 80 m 段分别有一个深度在 8 m 左右的低阻团块,分布在 48 m 处的油井两侧,判断是此处污染物沿水平方向顺砂层迁移的结果。

## 5 结语

探地雷达法和高密度电法剖面中浅源石油烃类污染异常特征明显,据此,可直观地得到污染物的分布规律。通过对两种物探成果剖面的综合分析,建立了浅源石油烃类污染物探异常特征表,通过特征表可以进行研究区地层的划分,对浅部地质体进行定位,圈定污染羽扩散情况,从而确定出污染物空间分布范围,为后期石油烃类污染的研究及治理提供可靠的资料。

## 参考文献:

- [1] 王志强, 武强, 邹祖光, 等. 地下水石油污染曝气治理技术研究[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 745-760.
- [2] 叶腾飞, 拱育龄, 能昌信, 等. 环境地球物理方法在污染场地调查中的应用[J]. 华南大学学报: 自然科学版, 2008, 22(3): 9-14.
- [3] 程业勋, 杨进. 环境地球物理概论[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4] 陈仲侯, 王兴泰. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [5] De Castor D L, Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco. 4-D Ground-penetrating radar of a hydrocarbon leakage site in fortaleza (brail) during its remediation process[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 54: 127-144.
- [6] Steven D S, Georgios P T, Don W S, et al. High-resolution Ultra-shallow subsurface imaging by integrating near-surface seismic reflection and ground-penetrating radar data in the depth domain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2008, 62: 281-286.
- [7] Nigel J C. Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurement; practical implications for hydrological studies[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 27: 23-36.
- [8] 武晓峰, 唐杰, 藤间幸久. 地下水中轻质有机污染物(LNAPL)透透镜体研究[J]. 环境污染与防治, 2000, 22(3): 17-26.

## GEOPHYSICAL ANOMALY INTERPRETATION AND ANALYSIS IN SHADOW BURIED HYDROCARBON CONTAMINATION INVESTIGATION

LIAN Sheng, ZHA En-lai, WANG Chun-hui, CAI Wu-tian, ZHANG Min, LI Jing-jie

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, China)

**Abstract:** In a typical hydrocarbon contamination field of Jizhong (central Hebei) plain, the authors carried out the investigation by using GPR and high-density resistivity methods, and surveyed geophysical shallow hydrocarbon contamination situation. The corresponding analysis of GPR and resistivity imaging anomalies shows that the hydrocarbon contamination is characterized by low resistivity and high dielectric constant. The contamination plume in the oil drain block was mapped. The authors hold that this kind of geophysical analytical method should be popularized.

**Key words:** hydrocarbon contamination; ground-penetrating radar; resistivity imaging method; environment contamination investigation; hydrocarbon contamination

**作者简介:** 连晟(1985-),男,工程师,工学硕士,毕业于吉林大学,从事地球物理方法在水文地质环境地质中的研究及应用。