

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.22

高密度电阻率法探测 DNAPLs 污染的适宜性探讨

朱建友¹, 邓亚平¹, 施小清¹, 吴吉春¹, 姜月华², 苏晶文²

(1. 表生地球化学教育部重点实验室/南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 重非水相流体(DNAPLs)的电阻率一般较高,在地下介质中与周围的地下水形成明显的电性差别。利用这一特性,非侵入式的高密度电阻率法(ERT)在探测 DNAPLs 污染场址中污染范围展现出一定优势。然而在实际场址的调查应用中,ERT 有时无法探测到显著的高阻异常,或探测的高阻异常是由于介质的非均质性产生,从而导致对 DNAPLs 污染分布的误判。针对该问题,文章首先基于有效介质电阻率模型,计算了不同 DNAPLs 饱和度情形下的地层总电阻率值,从理论上解释了当 DNAPLs 污染程度较低时不存在显著高阻异常的原因。进一步构建理想 ERT 正演模型,探讨 ERT 探测 DNAPLs 污染的适宜性。研究结果表明:介质的非均质性(例如高阻的砾石等)对 ERT 探测具有很强的干扰,可造成 DNAPLs 分布范围的误判,因此传统静态 ERT 探测 DNAPLs 污染仅适用于均质介质或者非均质介质中 DNAPLs 污染程度较高的条件。对于非均质介质 DNAPLs 污染程度较低时,需采用基于时间域的差分反演方法屏蔽介质非均质性的影响,从而准确判定 DNAPLs 分布。

关键词: ERT;有效介质电阻率模型;非均质性;差分反演方法

中图分类号: X502

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0144-08

Discussion on the suitability of electrical resistivity tomography method to detect DNAPLs contamination

ZHU Jianyou¹, DENG Yaping¹, SHI Xiaoqing¹, WU Jichun¹, JIANG Yuehua², SU Jingwen²

(1. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education/School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Due to the high resistivity of dense non-aqueous phase liquids (DNAPLs), there is a significant difference in electrical properties between the underground medium and the groundwater. Because of this difference, electrical resistivity tomography (ERT), which is a non-intrusive monitoring method, has shown its potential in detecting organic contaminated sites. However, in field survey, the ERT couldn't reveal the obviously high resistivity anomaly sometimes, or the high resistance anomaly is caused by the heterogeneity of the medium rather than the DNAPLs, thus caused the result of the miscarriage of justice. In order to explore the suitability of the ERT in DNAPLs contaminated site, this paper calculates the total true resistivity under different DNAPLs saturation conditions by using effective medium resistivity model. It is theoretically explained that there is no significant high resistance anomaly when the DNAPL saturation is small. Then, an ideal ERT forward model is established to discuss the suitability of ERT. Results show that the heterogeneity of the medium (such as high resistance of gravel, etc) on the ERT detection has a strong interference, which may

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 新疆联合基金(U1503282);国家自然科学基金(41030746,41672229,41172206);“长江三角洲经济区地质环境综合研究”(1212011220002);“长江三角洲经济区地质环境综合研究与功能区划”(1212010914006);“长江三角洲地区地下水污染调查评价”(1212010634400)

第一作者: 朱建友(1992-),男,硕士,主要研究方向为水文地球物理。E-mail: zhujy684@sina.com

通讯作者: 施小清(1979-),男,副教授,主要从事地下水数值模拟。E-mail: shixq@nju.edu.cn

cause the miscarriage of justice of the DNAPLs distribution of the scope, and conventional static ERT detection of DNAPLs pollution is only applicable to the conditions which the DNAPLs saturation is high in homogeneous or heterogeneous medium. When the saturation of DNAPLs is small, if the DNAPLs saturation is low, the differential inversion method based on time domain can effectively weaken the influence of the heterogeneity of the medium, and recognize the distribution of DNAPLs accurately.

Keywords: ERT; effective medium resistivity model; heterogeneity; differential inversion method

随着有机化工产品使用量的增加,越来越多的重非水相液体(dense non-aqueous phase liquids, DNAPLs)因泄漏或不当排放进入地下环境,使我国土壤与地下水环境中有机污染问题不断加剧^[1]。这些DNAPLs在自然条件下极难降解,进入地下水后会对人体健康或环境产生危害^[2],故对地下水安全造成极大的威胁。因此,准确找到污染源区并对其进行修复成为目前亟待解决的问题。诸如高密度电阻率法(electrical resistivity tomography, ERT)、探地雷达、地震勘探等地球物理勘探方法以其经济、快速、非侵入性等优点^[3],正逐渐应用到水文地质领域。而ERT具有连续性、原位无损、快速等优点^[4],在进行污染场地评价、污染类型划分、污染深度判断时,可以有效减少钻探,得到国内外研究学者的高度重视。

目前,研究者多通过室内实验和野外探测对ERT探测DNAPLs进行研究^[5]。在室内实验方面,Chambers等^[6]采用ERT监测DNAPLs在饱和多孔介质中的运移路径;郭健等^[7]运用ERT定量监测二维砂箱中DNAPLs的运移过程与饱和度;Power^[8,9]等通过室内实验的方式,将多相流模型与ERT正演模型进行耦合,从而对三维砂箱中DNAPLs进行研究。在野外探测方面,Cassiani等^[10]用ERT与多种物探方法相结合的方式,成功圈定了原油污染区域;Cardarelli等^[11]应用ERT方法成功探测到意大利罗镇沉积地层中DNAPLs造成的高阻异常。

虽然ERT方法在野外实践中取得了一些成果,但由于野外地质结构的复杂性,探测数据有时并不理想,使得ERT并没有成为一项普遍应用的工具^[8]。在一些实际DNAPLs污染区,ERT解译出的高阻异常有时并不是由DNAPLs引起的^[9],或者探测不到DNAPLs造成的高阻异常,这些情况阻碍了ERT在DNAPLs污染探测方面的应用。为此,本文基于有效介质电阻率模型解释了地层电阻率高度的原因,并为区分野外介质体高阻与DNAPLs高阻,引入差分反演方法,进而探讨地层非均质性对ERT探测效果的影响,为ERT在实际野外调查中的应用提供理论技术支持。

1 方法与原理

1.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法本质属于直流电阻率法,但在实际供电中,供电电流为低频交流电^[12]。它是以地下介质的电性差异为基础,来辨别不同地质体及其他物体。通过供电电极(A、B)向地下注入电流,测量两接收电极(M、N)间的电压,来研究电场分布规律,从而推断地下电阻率的分布状态^[12]。根据供电电极和接收电极位置关系的不同,可以分为温纳装置、偶极装置和施贝装置等。

1.2 有效介质电阻率模型

长期以来,Archie^[13]公式在DNAPLs饱和度与地层电阻率之间建立联系起到桥梁作用,其理论公式为:

$$\varphi^m \cdot S_w^n = \frac{R_w}{R_t} \quad (1)$$

式中: R_t ——总电阻率/ $\Omega \cdot m$;

R_w ——水电阻率/ $\Omega \cdot m$;

φ ——有效孔隙度;

m ——黏结指数;

S_w ——水饱和度;

n ——饱和度指数。

式(1)在砂岩地层中得到了较好应用,但它是建立在岩石骨架颗粒电阻率无穷大条件下,因而在非均质地层中,尤其在砂泥岩地层中,Archie公式会造成较大误差^[14]。为此,Berg^[15]建立了有效介质电阻率模型来计算多组分混合物质的总电阻率。该模型将介质颗粒骨架、NAPL相与气相作为分散相,水看做连续相,其理论基础为Hannai-Bruggeman(HB)公式^[15]:

$$\varphi \cdot S_w = \left(\frac{R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{R_t - R_r}{R_w - R_r} \right) \quad (2)$$

式中: R_r ——分散相电阻率/ $\Omega \cdot m$ 。

如图1所示,有效介质电阻率模型首先将研究区分散相分解成数量很大、体积很小的区块。接下来,从加入到连续相中第一种分散元素区块开始,每加入一种分散元素对混合物总电阻率进行一次计算,每次计

算均以前一次迭代结果作为初始电阻率,此迭代过程调用以下公式^[15]:

$$V_{i,j} = (i-1) \cdot \sum_{p=1}^k \frac{V_p}{s} + \sum_{p=1}^j \frac{V_p}{s} \quad (3)$$

$$\varphi_{i,j} = 1 - \frac{\frac{V_j}{s}}{\varphi_i + V_{i,j}} \quad (4)$$

$$R_{0i,j} = R_{0i-1,j} \cdot \varphi_{i,j}^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \frac{R_{0i-1,j}}{R_{dj}}}{1 - \frac{R_{0i,j}}{R_{dj}}} \right)^{-m_j} \quad (5)$$

式中: $V_{i,j}$ ——在分散元素 j 增加 i 次时总的体积分数;
 k ——分散元素种类;
 s ——分散相分解的块数;
 $\varphi_{i,j}$ ——分散元素 j 在增加 i 次时求得的分散相总孔隙度;
 φ_i ——水的总体积分数 ($\varphi_i = S_w \cdot \varphi$);
 $R_{0i,j}$ ——本次加入分散元素 j 后计算混合物总电阻率/ $\Omega \cdot m$;
 $R_{0i-1,j}$ ——上一次加入分散元素 j 后计算混合物总电阻率/ $\Omega \cdot m$;
 R_{dj} ——加入分散元素 j 后总的分散相电阻率/ $\Omega \cdot m$;
 m_j ——分散相 j 黏结指数。

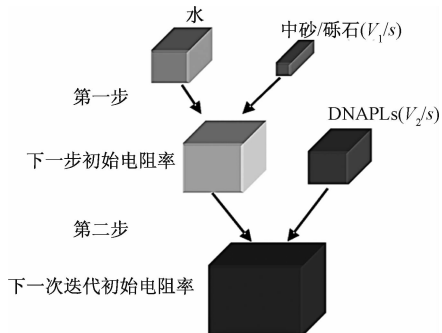


图1 有效介质电阻率模型计算流程^[15] (一次迭代)

Fig.1 Effective medium model calculation process (oneiteration)

有效介质电阻率模型考虑到介质颗粒骨架电阻率并非无穷大的条件,同时解决了分散元素加入顺序不同造成电阻率不同的问题。其中式(5)根据 HB 方程变形得到。假设地层由 q 种分散元素组成,每种分散元素被分解成 s 块,那么式(5)将被调用 $s \cdot q$ 次,此时求得的电阻率即为地层总电阻率。

根据有效介质电阻率模型计算得到中砂和砾石在不同 DNAPLs 饱和度情形下地层总电阻值,并绘制图

2(相关参数见表1)。DNAPLs 饱和度为 DNAPLs 所占孔隙体积与介质孔隙体积的比值,这里用以表征污染程度。由图2可见,DNAPLs 污染后的地层总电阻率随着 DNAPLs 饱和度增加呈指数增长。然而,相对于 DNAPLs 本身具有的电阻率值,当 DNAPLs 饱和度较低时,地层总电阻率较低。

表1 材料参数表

Table 1 Parameters of materials			
材料	孔隙度 ^[16]	电阻率/ $\Omega \cdot m$	孔隙指数 ^[15]
中砂	0.40	1000.0 ^[17]	1.50
砾石	0.25	1000.0 ^[17]	1.50
黏土	0.60	30.0 ^[17]	1.50
DNAPLs	—	1.810 ¹¹ ^[17]	—

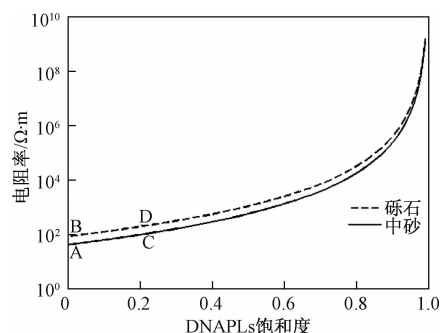


图2 不同饱和度地层总电阻率变化曲线

Fig.2 Bulk resistivity variation with DNAPLs saturation

注:A、B 为中砂、砾石在未污染条件下的电阻率值,分别为 38,81 $\Omega \cdot m$;C、D 为中砂、砾石在 DNAPLs 饱和度为 0.2 时的电阻率值,分别为 93,186 $\Omega \cdot m$

1.3 差分反演方法

差分反演方法作为延时性监测方法的一种,在污染区域识别方面显示出一定优势。延时监测的核心思想是通过对同一地点不同时间的地下介质电阻率进行测量,对目标区域进行实时性跟踪监测,对比不同时刻地下介质电阻变化,结合环境分析以及其他物探资料,判断出污染地区^[18]。其理论公式为^[19]:

$$\Delta D = (d_t - d_0) - [G(X_t) - G(X_0)] \quad (6)$$

$$X_{i+1} = X_i + (J^T J + C^T \Lambda C)^{-1} J^T \Delta D \quad (7)$$

式中: ΔD ——观测值与背景值之间的数据差异;

d_0 ——测得的电阻率背景数据;

d_t —— t 时间后的电阻率数据;

X_0 ——初始模型;

X_t —— t 时间后的模型;

J ——雅可比行列式或敏感系数矩阵;

Λ ——对角阵;矩阵 C 包含模型二阶导数的 n 阶矩阵。

在资料处理方面,差分反演方法既可以用两次成果资料进行直接对比高低阻电阻率异常,也可以采用多次测量数据的百分比进行反演成像,进而更为有效地观察到地下介质电阻率变化^[18]。较传统的 ERT 反演方法,具有收敛速度快,消除系统误差等优点^[20]。

2 理想模型的正演和反演

2.1 理想模型

根据有效介质电阻率模型计算得到地层真实电阻率值,在此基础上,建立二维电阻率模型,选用黏土和中砂作为背景介质,其中夹有砾石与黏土透镜体。

理想模型由美国 AGI 公司 EarthImager 软件进行虚拟构建,意在演示现实存在的两种情况:(a)原污染场地被高阻的建筑垃圾覆盖;(b)污染区域附近存在电阻率大的介质透镜体。模型一为层状非均质地层,模型分为两层,上层厚度为 4.5 m 的黏土层,下层为中砂层,在上覆黏土层中有两处较大范围的砾石透镜体(18 m×3 m),DNAPLs 存在于右侧砾石透镜体中,污染范围为 18 m×0.5 m,位于地面以下 2.5~3 m 处;模型二在中砂层中左侧为砾石透镜体(20 m×2.5 m),右侧为黏土透镜体(15 m×0.5 m),在黏土透镜体上方蓄积了一定量 DNAPLs,范围为 15 m×0.5 m,位于地面以下 3~3.5 m 处(图 3)。利用该软件在理想模型地表布设 56 根电极,电极间距为 1 m。

为探讨地层非均质性和 DNAPLs 饱和度对 ERT 探测效果的影响,采用 EarthImager 正反演软件对模型进行模拟,探测装置采用温纳装置,原因在于温纳装置对垂向电阻率变化比较敏感,信号强度较强,具有更好

的抗噪能力^[18]。根据装置探测深度为最大极距 1/6 得到垂向测深约为 9 m 左右。

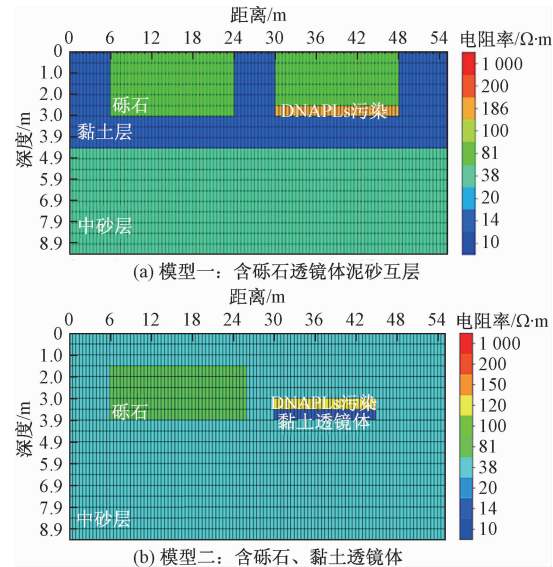


图 3 污染区理想模型

Fig. 3 Synthetic model of contaminated area

根据模型一,采用 ERT 方法得到未被 DNAPLs 污染模型视电阻率的分布(图 4a)。在野外条件下,若存在低渗透性的黏土介质,有机污染物在向下迁移过程中一般会在其上方发生蓄积,因此在模型中设置两种不同情景:污染物饱和度设置为 0.2,0.7,分别对应 DNAPLs 低污染程度和高污染程度情景。根据有效介质电阻率模型计算对应 DNAPLs 饱和度的电阻率值,利用 EarthImager 软件进行正演模拟,得到视电阻率剖面(图 4b 和 c)。

类似的,得到模型二在得到初始模型视电阻率断面图,通过正演模拟得到视电阻率剖面(图 5)。

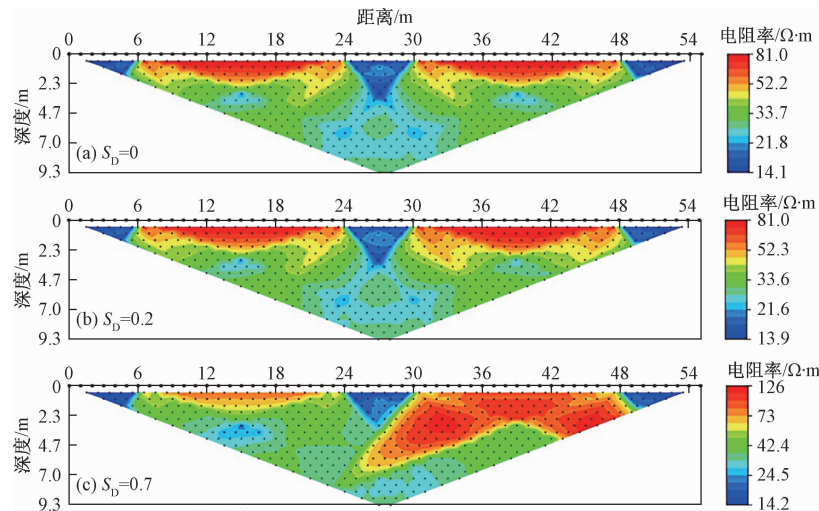


图 4 不同 DNAPLs 饱和度情形下模型一的视电阻率断面图

Fig. 4 Apparent resistivity section of the first model under different DNAPLs saturation

注: S_D 为多孔介质中 DNAPLs 饱和度

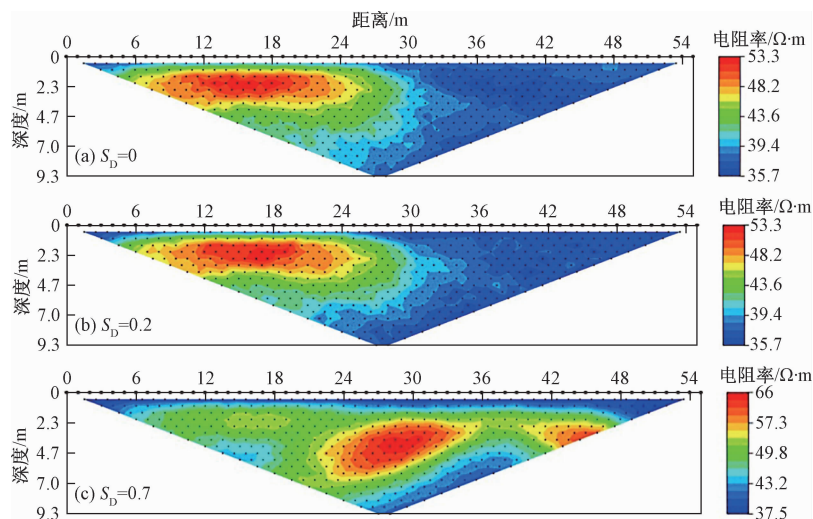


图 5 不同 DNAPL 饱和度情形下模型二的视电阻率断面图

Fig. 5 Apparent resistivity section of the second model under different DNAPLs saturation

2.2 直接反演

模型反演是根据 ERT 测得的视电阻率数据,推断剖面的地电断面,确定地下地质体真实电阻率分布。因此,

根据正演模拟得到的理想模型视电阻率数据,采用最小二乘法进行反演计算,得到不同饱和度条件下模型一(图 6)、模型二(图 7)电阻率直接反演图像。

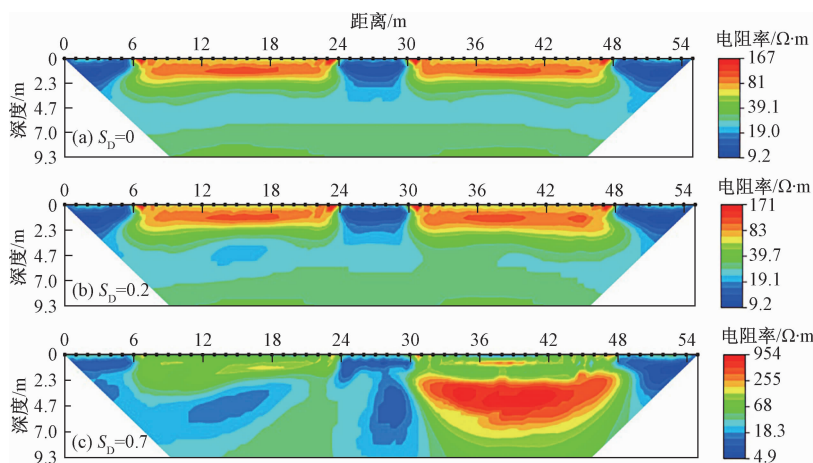


图 6 模型一反演结果图

Fig. 6 Inversion result of the first model under different DNAPLs saturation

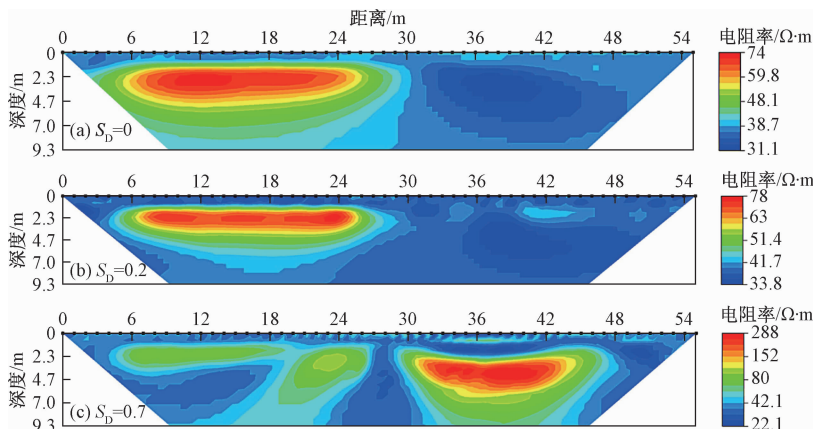


图 7 模型二反演结果图

Fig. 7 Inversion result of the second model under different DNAPLs saturation

2.3 差分反演

上述研究表明,污染场地地层的非均质性和 DNAPLs 饱和度的大小对 ERT 探测结果存在较大影响。为解决上述问题,引入基于时间域的差分反演算法,以消除地层非均质性对 ERT 探测结果的影响。为

更好地突出地下介质中电阻率变化,本文将低饱和度 ($S_D = 0.2$) DNAPLs 情况下测量数据与未污染条件下测量数据进行差分反演成像(图8),反演结果以电阻率变化百分比呈现。

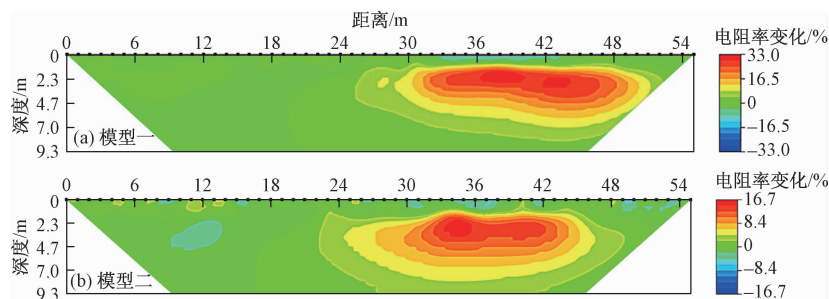


图8 差分反演图

Fig. 8 Differential inversion results

3 适宜性讨论

3.1 地层均质条件下

根据有效介质电阻率模型计算可知,未污染中砂、砾石层电阻率分别为 $38 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $81 \Omega \cdot \text{m}$,而当多孔介质中 DNAPLs 饱和度为 0.2 时,污染区域电阻率为 $93 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $186 \Omega \cdot \text{m}$,与背景电阻率差距足够大。根据王玉玲^[21]的研究成果,当背景电阻率与污染区域电阻率差距较大,在 ERT 视电阻率断面上会显示出污染区域高阻异常,且异常响应随着 DNAPLs 饱和度的增加而越发明显,但异常区与污染区域的形态并不一致,通过直接反演的方式可以对污染区域的形态进行修正,更好地圈定污染区域范围。

3.2 地层非均质条件下

在地层非均质条件下,直接反演的地层电阻率会受到高阻岩石体以及低阻黏土体的影响,导致电阻率断面在一些情况下并不能很好地显示出 DNAPLs 污染区域的高阻异常。根据 DNAPLs 饱和度的不同,分为高饱和度和低饱和度两种条件。

3.2.1 高饱和度 DNAPLs 条件

当 DNAPLs 饱和度达到 0.7(图 4c、5c)时,由有效介质电阻率模型计算的砾石体和中砂层的电阻率分别为 $6980 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $3780 \Omega \cdot \text{m}$,远远高于仅饱水时砾石体与中砂层的电阻率,因此在电阻率断面上均出现明显的高阻异常。在视电阻率断面(图 4c、5c)上,高阻异常出现在 DNAPLs 污染区域附近,但由于视电阻率是对地质体电性差异的综合响应,异常区域并不能很好与污染位置对应,因此对污染区域的探测结果会受到介质非均质性的影

响。在反演断面(图 6c、7c)上,高饱和度 DNAPLs 污染条件下,模型反演图像较视电阻率图像能够更好地圈定模型污染区域,模型一反演结果(图 6c)显示高阻异常区域在水平距离 30~36 m、垂向深度 3 m 左右的中心区域;模型二反演结果(图 7c)中高阻异常出现在水平 30~42 m、垂向深度 3~4 m 中心区域;对比图 2,高阻异常区与模型设定的污染区域吻合较好。说明在污染区域 DNAPLs 饱和度较大时,模型中砾石透镜体和黏土透镜体对 ERT 探测结果影响不大,并且随污染物饱和度增加,透镜体对反演结果的影响持续减小,同时反演图像较视电阻率断面,能够更好地对污染区域进行圈定。

3.2.2 低饱和度 DNAPLs 条件

如图 4(b)、5(b)所示,当 DNAPLs 饱和度较低时,视电阻率在数值上较未污染情况并没有发生明显变化,高阻异常仍出现在砾石体对应区域;在电阻率反演断面(图 6b、7b)上,模型一中,虽然污染区域电阻率 ($186 \Omega \cdot \text{m}$) 高于砾石透镜体电阻率 ($81 \Omega \cdot \text{m}$),但反演结果中电阻率并未发生明显的增加,高阻异常特征仍出现在砾石体区域;在模型二反演结果(图 7b)中,污染区域电阻率 ($93 \Omega \cdot \text{m}$) 虽高于背景中砂层电阻率 ($38 \Omega \cdot \text{m}$),但对比图 7(a),只有反演结果中电阻率值很小幅度上升,高阻异常响应仍是由高阻砾石体造成的。因此在 DNAPLs 饱和度较低的地层中,ERT 方法直接反演并不能有效探测到污染区域高阻异常

为此,对 DNAPLs 饱和度较低的情景进行差分反演,从而消除介质非均质性对 ERT 探测效果的影响,得到模型的差分反演结果。模型一中(图 8a),差分反演结果显示电阻率变化最大的部分为横坐标 30~36 m 之

间、深度为 3 m 左右的区域,变化率为 33.0%,该处正是模型中设置的 DNAPLs 污染区域,较图 6(b) 反演结果,差分反演更准确地探测到砾石透镜体内部的污染区域;在模型二(图 8b)中,电阻率变化最大部分位于横坐标 30 ~ 42 m、垂向深度为 2.3 ~ 3.5 m 之间,变化率为 16.7%,该位置与图 3(b) 显示的 DNAPLs 污染区域能够很好吻合。较图 6(b)、图 7(b) 的反演结果,差分反演更好地圈定出非均质模型中 DNAPLs 污染区域。

4 实际案例

污染场地原为化工厂,主要生产单叔丁基对甲酚、

邻硝基苯甲醛。由于储罐年久失修,有机物(硝基苯、氯苯、1,2-二氯乙烷)长期泄漏,造成严重的 DNAPLs 污染。基于 DNAPLs 与周围介质间电性差异,采用 ERT 测线布置在污染区域。限于篇幅,文中仅选择测线 L1 和 L2 作为代表,测线东西方向布设,贯穿该化工厂厂区,每条测线长 300 m。测线 L1(图 9a)有两处高阻异常区:一处位于测线 90 ~ 160 m 范围,深度 16 ~ 30 m;另一处位于测线 180 ~ 210 m 范围,深度 13 ~ 28 m;测线 L2(图 9b)处有两处 DNAPLs 污染严重区域:一处位于测线 90 ~ 110 m 之间,深度 15 ~ 30 m;一处位于测线 130 ~ 180 m,深度 32 ~ 40 m。

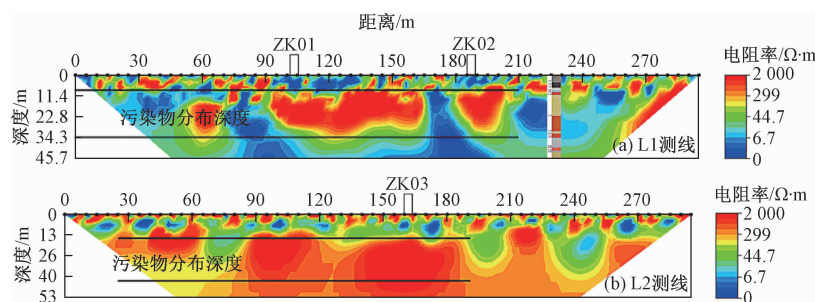


图 9 测线 L1 和 L2 的 ERT 反演结果

Fig. 9 Inversion result of the survey line L1 and L2

在对场地进行 ERT 探测之后,在高阻异常区进行钻探取样,钻孔编录结果表明:对 ZK01 钻孔, DNAPLs 污染主要集中在埋深为 24 m 左右的粉细砂层,下层粉质黏土层中 DNAPLs 饱和度较低;对 ZK02 钻孔,除了在细砂层中发现饱和度较高的 DNAPLs 污染物,在黏土层和细砂层薄层间隔的细缝中,也发现饱和度较高的 DNAPLs 污染;对 ZK03 钻孔,在地面以下 24 m 处开始出现 DNAPLs 污染,在 35.70 m 到 40.5 m 处,发现明显苦杏仁味油状液体浸染。ERT 探测结果与钻探编录结果对比表明:在污染场区,当 DNAPLs 饱和度较高情况下,不必采用差分反演方法,传统 ERT 探测结果也能够很好地和钻探数据吻合,成功探测到 DNAPL 污染区域。

5 结论及建议

(1) 在地层均质条件下,采用传统 ERT 直接反演方法基本能探测出 DNAPLs 污染区域的高阻异常。

(2) 当非均质地层孔隙中 DNAPLs 饱和度较高时,根据有效介质电阻率模型可知,污染区域电阻率远远高于周围介质体的电阻率,因此地层非均质性对 ERT 探测效果影响较小,此时采用传统静态 ERT 探测通过直接反演的方式可有效圈定有机物污染区域。

(3) 当非均质地层孔隙中 DNAPLs 饱和度较低时,传统静态 ERT 探测结果受地层非均质性的影响较大,无法有效地确定污染区域。一方面可能无法探测到预期 DNAPLs 造成的高阻异常;另一方面,也可能由于天然条件下砾石等高阻体的影响,易造成污染区域的误判。建议采用时移 ERT 探测,通过差分反演方法屏蔽地层非均质性的影响,从而有效探测非均质地层中 DNAPLs 污染范围。

参考文献:

- [1] 高存荣,王俊桃. 我国 69 个城市地下水有机污染特征研究[J]. 地球学报, 2011, 32(5): 581 - 591.
[GAO C R, WANG J T. Research on groundwater organic contamination characteristics in 69 cities of China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(5): 581 - 591. (in Chinese)]
- [2] 蔡五田. 论污染场地的几个问题[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 123 - 128. [CAI W T. Several issues on contaminated sites [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 123 - 128. (in Chinese)]
- [3] 刘兆平,杨进,罗水余. 地球物理方法对垃圾填埋场探测的有效性试验研究[J]. 地学前缘, 2010, 17

- (3):250-258. [LIU Z P, YANG J, LUO S Y. The application of geophysical methods to the analysis of land fill[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010,17(3): 250-258. (in Chinese)]
- [4] 孙亚坤,能昌信,刘玉强,等. 铬污染土壤电阻率特性及其影响因素研究[J]. *环境科学学报*,2011,31(9):1992-1998. [SUN Y K, NENG C X, LIU Y Q, *et al.* Investigation on the electrical resistivity of chromium contaminated soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1992-1998. (in Chinese)]
- [5] 姜振蛟,卞建民,查恩爽,等. 高密度电阻率成像法在水文地质领域的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 21-25. [JIANG Z J, BIAN J M, ZHA E S, *et al.* The application of the electrical resistivity tomography in hydrology: An overview[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010,37(2): 21-25. (in Chinese)]
- [6] Chamber J E, Loke M H, Ogilvy R D, *et al.* Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedancetomography[J]. *Contam Hydrol*, 2004, 68(1/2): 1-22.
- [7] 郭健,叶淑君,肖安林,等. 二维孔隙介质中重非水相液体饱和度测定与分析[J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2):324-332. [GUO J, YE S J, XIAO A L, *et al.* DNAPL Saturation Measurements and Analysis in 2-D Porous Media[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014,20(2):324-332. (in Chinese)]
- [8] Power C, Gerhard J I, Karaoulis M, *et al.* Evaluating four-dimensional time-lapse electrical resistivity tomography for monitoring DNAPL source zone remediation[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2014,162: 27-46.
- [9] Power C, Gerhard J I, Tsourlos P, *et al.* Improved time-lapse electrical resistivity tomography monitoring of dense non-aqueous phase liquids with surface-to-horizontal borehole arrays [J]. *Journal of Applied Geophysics*,2015,112(1): 1-13.
- [10] Cassiani G, Binley A, Kemna A, *et al.* Noninvasive characterization of the Trecate (Italy) crude-oil contaminated site: link between contamination and geophysical signals[J]. *Environmental Science and Pollution research*, 2014, 21(15): 8914-8931
- [11] Cardarelli E, Di Filippo G. Electrical resistivity and induced polarization tomography in identifying the plume of chlorinated hydrocarbons in sedimentary formation: a case study in Rho (Milan-Italy) [J]. *Waste Management & Research*, 2009,27(6): 595-602.
- [12] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005: 208-212. [LI J M. *Geoelectric field and electrical exploration* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 208-212. (in Chinese)]
- [13] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Petroleum Technology*, 1942(146): 54-61.
- [14] 沈金松,苏本玉,王智茹,等. 泥质砂岩电导率模型的分析及对比[J]. *测井技术*,2008,32(5):385-393. [SHEN J S, SU B Y, WANG Z R, *et al.* Analysis and Contrast of The Shaly Sandstone Conductivity Model [J]. *Well Logging Technology*, 2008,32(5):385-393(in Chinese).]
- [15] Berg C R. An effective medium algorithm for calculating water saturation at any salinity or frequency [J]. *Geophysics*, 2007: 59-67.
- [16] 张人权,梁杏,靳孟贵,等. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 2011:16-18. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, *et al.* *Fundamental of hydrogeology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 16-18. (in Chinese)]
- [17] Loke M H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys [M/OL]. <http://www.geotomosoft.com/downloads.php>, accessed 12 July 2012.
- [18] 孙红亮. 高密度电法的延时性勘探的研究与实践[D]. 成都:成都理工大学, 2008. [SUN H L. A study on the electrical imaging time-delay surveys [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese)]
- [19] Karaoulis M, Revil A, Tsourlos P, *et al.* IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography [J]. *Computers & Geosciences*, 2013(54): 164-170.
- [20] Yang Xianjin. Stochastic inversion of 3-D ERT data [D]. Tucson:University of Arizona, 1998.
- [21] 王玉玲. 重金属污染场地电阻率法检测数值模拟及反演研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2013. [WANG Y L. Study on numerical simulation and inversion of electrical resistivity method for heavy metal contaminated sites [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese)]