

刘汉乐,周启友,吴华桥. 轻非水相液体污染过程的高密度电阻率成像法室内监测. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1246~1254  
Liu H L, Zhou Q Y, Wu H Q. Laboratorial monitoring of the LNAPL contamination process using electrical resistivity tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 1246~1254

# 轻非水相液体污染过程的高密度电阻率成像法室内监测

刘汉乐<sup>1,2</sup>, 周启友<sup>1,2</sup>, 吴华桥<sup>1,2</sup>

1 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

2 南京大学水科学系, 南京 210093

**摘 要** 为探讨高密度电阻率成像法监测多孔介质中轻非水相液体迁移过程的有效性, 本文通过三维砂槽进行了非饱和带中轻非水相液体的污染试验, 并利用高密度电阻率成像法进行了同步的动态监测. 试验之后, 将砂槽层层挖开, 通过数码成像, 获取了污染区域的实际范围与形状. 结果表明, 由高密度电阻率成像法圈定的污染区域在范围与形状上都与实际的结果比较接近, 并可通过三维电阻率相对值的时间变化明显的看出轻非水相液体的污染过程. 这说明利用高密度电阻率成像法对非饱和多孔介质中轻非水相液体的空间分布范围进行圈定并监测其迁移过程是完全可行的.

**关键词** 多孔介质, 轻非水相液体, 污染过程, 高密度电阻率成像法

文章编号 0001-5733(2008)04-1246-09

中图分类号 P631

收稿日期 2007-07-13, 2008-03-14 收修定稿

## Laboratorial monitoring of the LNAPL contamination process using electrical resistivity tomography

LIU Han-Le<sup>1,2</sup>, ZHOU Qi-You<sup>1,2</sup>, WU Hua-Qiao<sup>1,2</sup>

1 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Department of Hydrosciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract** In order to investigate the effectiveness of ERT in monitoring LNAPL migration and delineating its spatial distribution in unsaturated porous media, a LNAPL contaminant experiment was made with a sand box and ERT measurement was conducted to monitor the LNAPL contamination process. After the contamination test, the sand was excavated layer by layer and digital pictures were recorded. The results show that the spatial range and shape of the contaminated area obtained from the ERT coincide with that recorded very well, and the contamination process of LNAPL is clearly reflected from the temporal variations of the 3-D resistivity relative variation rate. This means that it is possible to use the ERT to monitor the LNAPL migration and delineate its spatial distribution in the unsaturated porous media.

**Keywords** Porous medium, LNAPL, Contaminating process, Electrical resistivity tomography

## 1 引 言

轻非水相液体简称 LNAPL (Light Non-

Aqueous Phase Liquid), 它的密度低于水, 并与水不混溶, 常见的有汽油、煤油等. 与之相对应的是重非水相液体 DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid), 密度大于水, 常见的有三氯乙烯(TCE)、四

氯乙烯(PCE)等,这些有机物泄漏以后将对土壤和地下水造成严重的污染.目前对轻非水相液体监测和评价的方法主要是钻孔取样和现场开挖,其中钻孔取样仅限于在空间某个点上的采样和分析,代表性受到质疑,多维空间上的分析困难;现场开挖可准确圈定污染区域的范围,但是成本高,耗费人力物力.另外,这两种方法都是损伤和破坏性的,难以在相同的条件下重复进行,不能进行长期的动态监测.

高密度电阻率成像法(Electrical Resistivity Tomography,简称ERT)是通过布置大量的电极测定介质的电阻率差异以达到对介质进行勘察的地球物理方法,该方法与传统电法的差异就是“高精度”和“高分辨率”,可获取大量的电阻率数据,以反映介质内部详细的信息.在国内一些学者对该方法进行了相关的研究<sup>[1~5]</sup>,同时由于该方法具有较强实用性,在工程实践中也得到了广泛的应用<sup>[6~10]</sup>.在国外,高密度电阻率成像法已经被广泛应用于地下水水文研究中,例如确定渗流区中优势流的路径<sup>[11]</sup>、监测非饱和带水体的入渗过程<sup>[12]</sup>、确定地下水的流动方向和速度<sup>[13]</sup>、求解三维空间土壤含水量<sup>[14,15]</sup>和圈定污染物的分布范围<sup>[16,17]</sup>.但利用该方法从三维空间动态监测非水相液体的迁移和分布的研究在国内尚未见报道,在国外也很少见,仅Chambers<sup>[18]</sup>利用电阻抗成像法(electrical impedance tomography)对DNAPL在饱和砂柱中的穿透过程进行了监测研究,而且所用介质还是砂和铁屑的混

合物,所获取的也仅仅是二维平面的图像.

高密度电阻率成像法的优势就是简单方便,可在不同的空间尺度上进行三维的和非破坏性的动态监测,正好可以弥补目前轻非水相液体监测和评价方法中的不足.因此,本文尝试利用高密度电阻率成像法对轻非水相液体进行监测和评价,主要目的有两个:①探讨新方法的有效性,即新兴的地球物理学成像技术“高密度电阻率成像法”在多维动态监测轻非水相液体迁移和分布过程中的有效性;②机理认识和参数提取,即根据监测的结果,探讨轻非水相液体在多孔介质中的分布特征和迁移机理,为提取有关的参数(如饱和度、渗透系数等)奠定基础.为此,本文在三维砂槽中进行了轻非水相液体的污染试验,并利用高密度电阻率成像法进行了实时的动态监测.

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料与测定方法

试验通过三维砂槽(图1)完成,砂槽用无机玻璃制成,内径尺寸为50 cm×40 cm×30 cm.砂槽前后两块玻璃的下部分别打有两个小孔,用于连接注水管、排水管和观测管.本试验选用石英细砂作为多孔介质的代表,其粒径为0.30~0.45 mm.在装填砂槽时,每次称取一定量的细砂倒入砂槽,并层层压实.装填后的砂层干容重约为2.08 g/cm<sup>3</sup>,高度

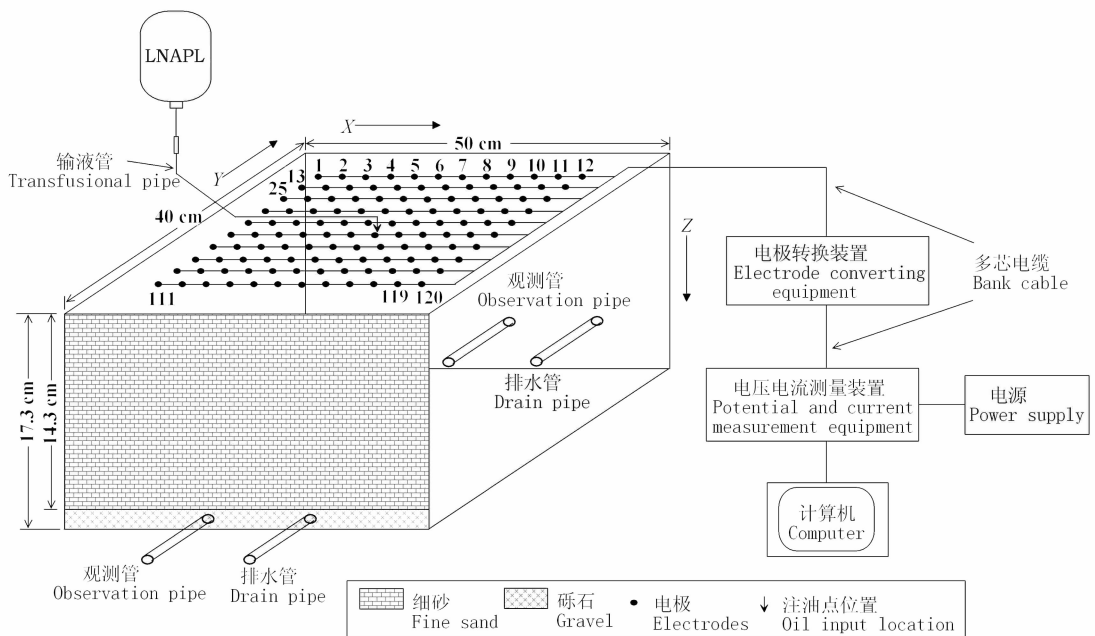


图1 试验装置示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental setup

为 14.3 cm. 为了让砂槽与外界保持良好的水力联系, 在砂层的下部还装填了粒径大于 0.9 mm、厚度为 3 cm 的砾石层.

在砂槽表面埋设了 120 个高 0.5 cm、直径 0.4 cm 的圆筒状的铅制电极. 这些电极形成一个  $10 \times 12$ 、电极水平间距为 4.0 cm 的网格 (图 2), 并通过多芯电缆与一个 216 频道的高密度电法勘探系统 (Next-400, 日本兴和株式会社制) 相连接. 本勘探系统可按事先给定的电极组合进行逐个扫描测定, 自动记录测定结果. 通过向两个电流电极供应电流为 1 mA、

电压范围为 10~150 V、频率为 2 Hz 的交替直流电流, 测定另外两个电位电极之间的电位差. 因此, 每四个电极即可获得一个电位差数据. 测定采用四极法, 并在 X、Y 和 XY 三个方向上进行. 每次扫描测定大约需要 20 min, 可获得 414 个数据.

本研究选用柴油作为 LNAPL 的代表进行试验, 其密度为 0.82 g/mL. 为了在砂槽开挖之后能清晰的拍摄 LNAPL 污染区域的范围与形状, 利用溶于有机物而不溶于水的苏丹红染料将 LNAPL 染成红色.

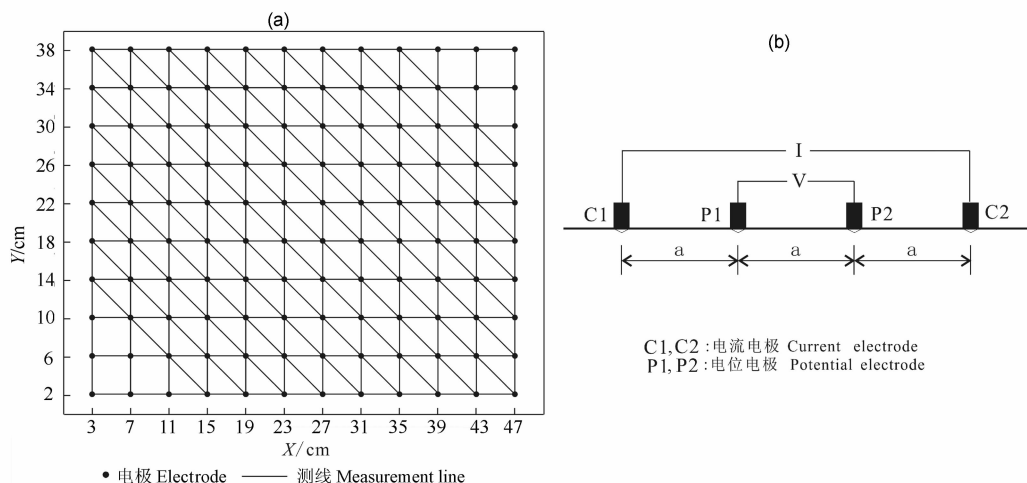


图 2 电阻率成像法电极布置和测定模式

Fig. 2 The electrode installation and measurement patterns for electrical resistivity tomography

试验之前, 通过注水管向砂槽缓慢注入自来水, 直到整个砂槽达到饱和. 然后打开排水管, 让介质在重力作用下排水, 直至排干为止. 再将整个砂槽静置 20 h, 以便形成稳定的非饱和带.

LNAPL 通过输液管从砂槽的中心部位注入, 注入的开始时间为 2007-01-09 14:07, 在 20:30 停止. 在 LNAPL 注入的过程中, 每隔 3 min 或 4 min 记录一次 LNAPL 每分钟的滴数. 通过测得的油滴数与体积的转换关系 (38 滴/mL), 可以获得 LNAPL 注入速度随时间的变化曲线 (图 3). 由于输液管未能控制恒定的滴入速度, 当滴速减慢时, 需要人工调控, 将速度加快, 所以本试验的滴入速度为非稳定的. 注油开始之前, 利用高密度电法勘探系统扫描一次作为背景值, 在注油过程中, 每隔 24 min 扫描测定一次, 20:53 停止扫描. 污染试验完成之后, 于 20:55 进行砂槽开挖, 每挖完一层, 利用数码相机拍照, 以获取被轻非水相液体污染区域的实际范围与形状.

## 2.2 电阻率反演成像

获取电压电流数据之后须进行电阻率反演计

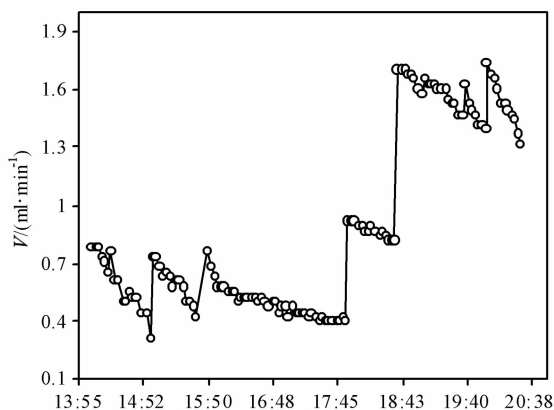


图 3 LNAPL 注入速度图

Fig. 3 The injection velocity of LNAPL

算. 首先, 将砂槽进行微元剖分 (图 4), 根据上述测定的大量电位差资料建立起介质电阻率的初始模型. 然后, 应用有限单元法计算出各测定点的理论电位差值, 并与实际测定的电位差值进行比较. 根据实际测定值和理论计算值之间的误差, 对介质电阻率模型进行修正, 直到理论值和测定值之间的误差达

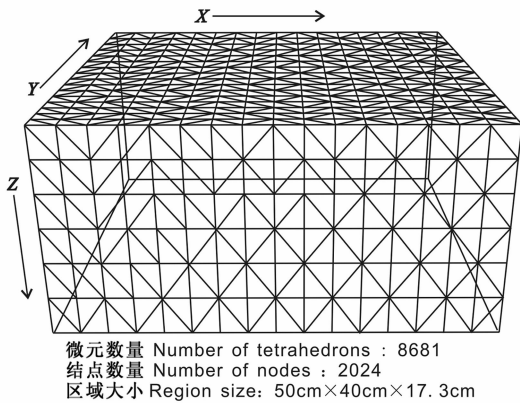


图4 有限单元法计算电位的三维剖分图

Fig. 4 Element division scheme for 3-D FEM electrical potential calculation

到稳定而较小的程度. 此时的电阻率模型即看作介质真实的电阻率, 从而实现三维空间上的电阻率成像. 详细的反演计算方法参见 Zhou 等<sup>[19]</sup>.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 高密度电阻率成像法监测 LNAPL 运移过程的有效性

为了探讨高密度电阻率成像法监测轻非水

相液体的有效性, 我们将砂槽开挖之前的电阻率分布图与电阻率相对值分布图和砂槽开挖后的数码图像进行了对比(图 5), 图中电阻率相对值  $\rho_r$  的定义为

$$\rho_r = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0}, \quad (1)$$

式中  $\rho_0$  为初始值, 即 LNAPL 污染之前介质的电阻率值,  $\rho_t$  为 LNAPL 污染之后  $t$  时刻的介质电阻率值. 取电阻率相对值相当于去掉了背景值的影响, 其图像更清晰的反映了污染区域的范围和电阻率的变化情况. 由图 5 可以看出: (1) 利用电阻率值和电阻率相对值圈定的同一深度上的污染区范围与形状和实际的污染区域范围与形状都比较接近, 虽然电阻率值和电阻率相对值圈定的污染区范围与形状存在一定的差异, 但总体上二者还是比较接近的, 说明应用高密度电阻率成像法确定轻非水相液体的分布是比较有效的; (2) 由不同深度的电阻率分布图可以看出, 非污染区域的电阻率分布呈现出明显的非均质性, 但随着深度的加大, 该非均质性逐渐减弱; (3) 由不同深度的电阻率相对值分布图可以看出, 污染区域内部电阻率相对值也呈现出明显的非均质性, 中心区域的值明显高于周边区域, 虽然随着深度的加大污染范围不断减小, 但这种电阻率相对值分布的非均质性依然存在.

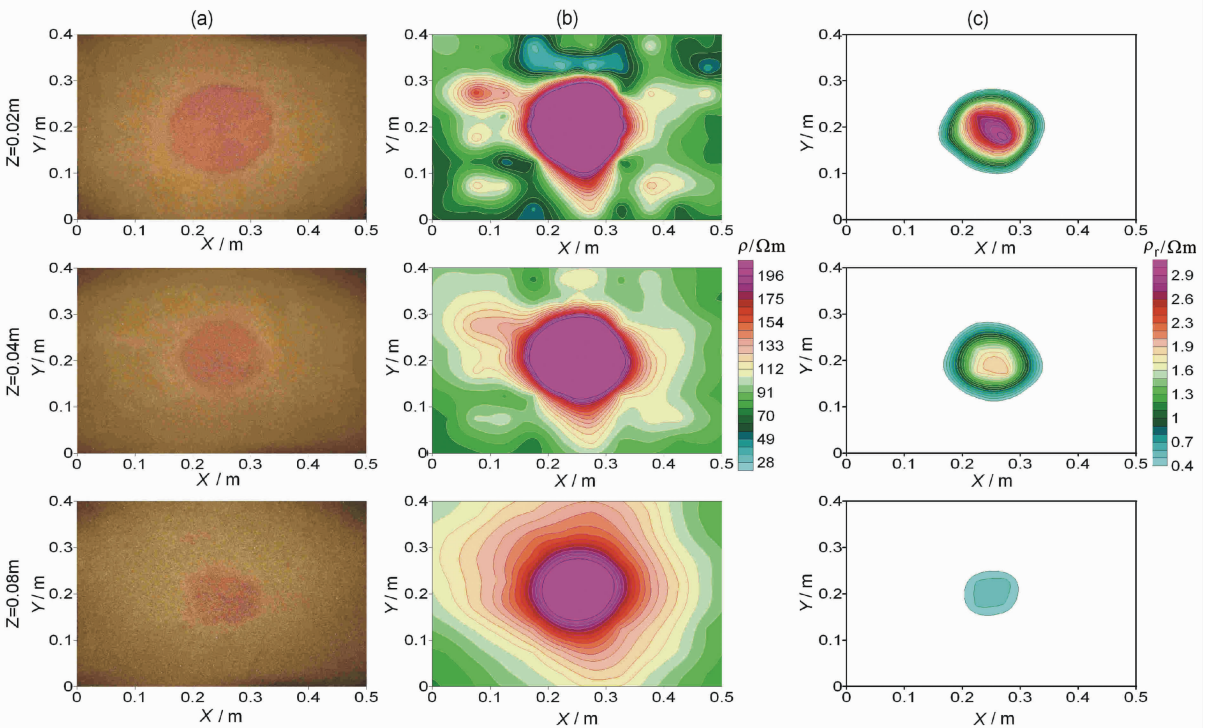


图5 高密度电阻率成像法圈定的污染区域与实际结果的对比图

(a) 开挖后获取的图像; (b) 电阻率分布图; (c) 电阻率相对值分布图.

Fig. 5 A comparison of the contaminated area estimated from ERT and that measured

(a) Pictures obtained after excavating; (b) Distribution of electrical resistivity; (c) Distribution of the resistivity relative variation rate.

为了将高密度电阻率成像法获得的结果与实际的结果作进一步的对比,我们在  $Y=0.20\text{ m}$  和  $X=0.25\text{ m}$  处分别选择一条横剖面线  $a-a1$  和一条纵剖面线  $b-b1$  进行分析(图 6),图中横剖面线  $a-a1$  与污染区域边界的交点为  $A$ 、 $A1$ ,纵剖面线  $b-b1$  与污染区域边界的交点为  $B$ 、 $B1$ . 为了通过数码图像准确的获取这些交点的位置,我们利用刘汉乐<sup>[20]</sup>提出的改进多谱分析方法将图像数字化,获取每个像素点的 RGB 值(Red 值,Green 值,Blue 值). 本文

仅用 Blue 值进行分析,并定义平面某一像素点  $(X, Y)$  的 Blue 值为  $h_{X,Y}$ . 定义  $X$  方向上的“Blue 值相对变化率”为

$$H_X = \frac{h_{X,0.2} - h_{X,0.09}}{h_{X,0.09}}, \quad (2)$$

式中  $h_{X,0.2}$  为通过污染区域的横剖面线  $a-a1$ (图 6,  $Y=0.2\text{ m}$ )上像素点的 Blue 值,  $h_{X,0.09}$  为非污染区域上横剖面线  $c-c1$ (图 6,  $Y=0.09\text{ m}$ )上像素点的 Blue 值. 同样,定义  $Y$  方向上的“Blue 值相对变化率”为

$$H_Y = \frac{h_{0.25,Y} - h_{0.14,Y}}{h_{0.14,Y}}, \quad (3)$$

式中  $h_{0.25,Y}$  为通过污染区域的纵剖面线  $b-b1$ (图 6,  $X=0.25\text{ m}$ )上像素点的 Blue 值,  $h_{0.14,Y}$  为非污染区域上纵剖面线  $d-d1$ (图 6,  $X=0.14\text{ m}$ )上像素点的 Blue 值. 由(2)和(3)可以看出,  $X$  和  $Y$  方向上的“Blue 值相对变化率”是以非污染区域剖面线上的像素点 Blue 值为背景值的污染区域剖面线上像素点 Blue 值的相对变化值.

图 7 是剖面线上 Blue 值相对变化率与相应电阻率变化曲线的对比,可以看出,污染区域的  $H$  值

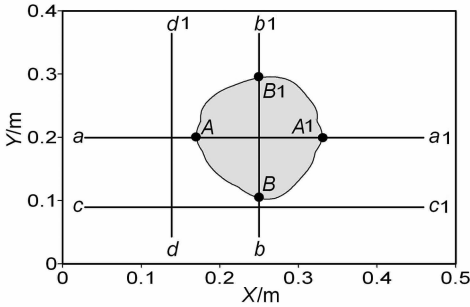


图 6 剖面线及拐点示意图

Fig. 6 The section lines and inflexion points used

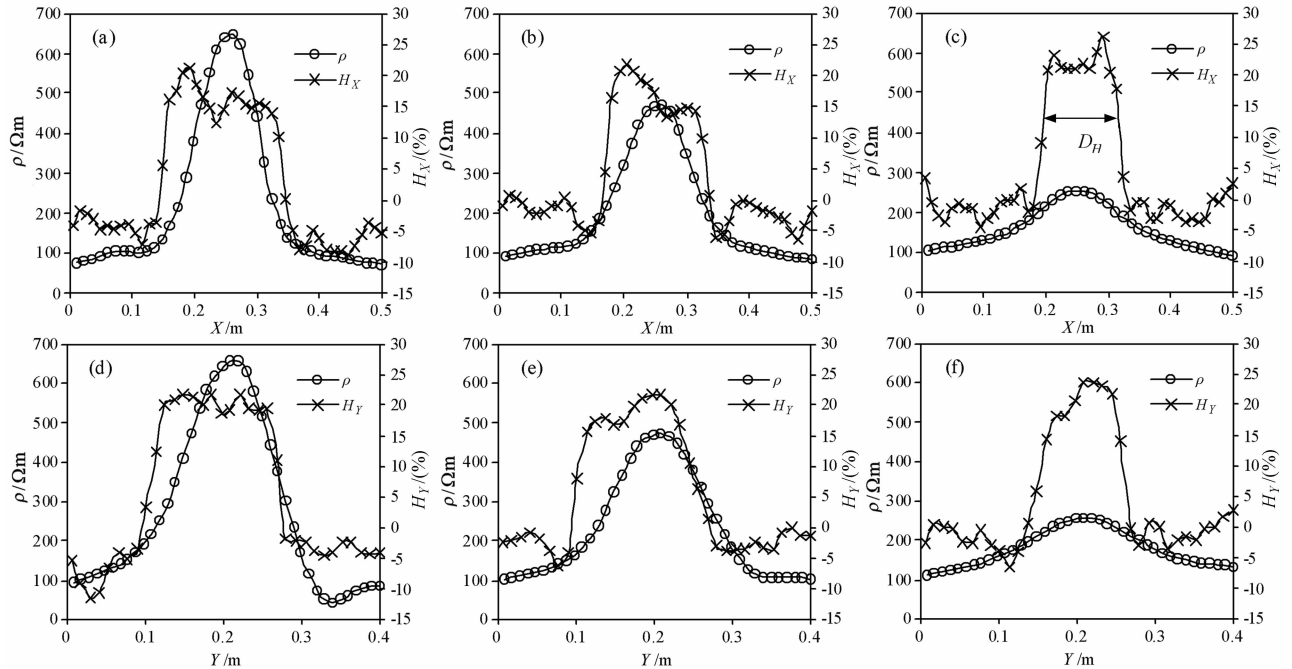


图 7 剖面线上电阻率与 Blue 值相对变化率对比图

- (a) 横剖面线  $a-a1$ ,  $Z=0.02\text{ m}$ ; (b) 横剖面线  $a-a1$ ,  $Z=0.04\text{ m}$ ; (c) 横剖面线  $a-a1$ ,  $Z=0.08\text{ m}$ ;
- (d) 纵剖面线  $b-b1$ ,  $Z=0.02\text{ m}$ ; (e) 纵剖面线  $b-b1$ ,  $Z=0.04\text{ m}$ ; (f) 纵剖面线  $b-b1$ ,  $Z=0.08\text{ m}$ .

Fig. 7 A comparison between resistivity and Blue value relative variation rate at different sections

- (a) Horizontal section line  $a-a1$ ,  $Z=0.02\text{ m}$ ; (b) Horizontal section line  $a-a1$ ,  $Z=0.04\text{ m}$ ;
- (c) Horizontal section line  $a-a1$ ,  $Z=0.08\text{ m}$ ; (d) Vertical section line  $b-b1$ ,  $Z=0.02\text{ m}$ ;
- (e) Vertical section line  $b-b1$ ,  $Z=0.04\text{ m}$ ; (f) Vertical section line  $b-b1$ ,  $Z=0.08\text{ m}$ .

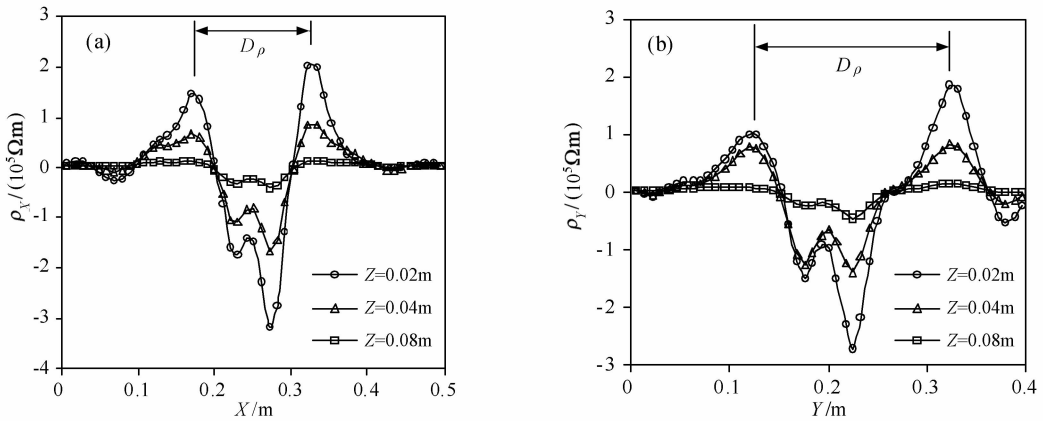


图 8 ERT 确定污染区域直径

(a) 横剖面线  $a-a_1$ ; (b) 纵剖面线  $b-b_1$ .

Fig. 8 The diameters of the contaminated area estimated from ERT

(a) Horizontal section line  $a-a_1$ ; (b) Vertical section line  $b-b_1$ .

和电阻率值都明显高于非污染区域,同一剖面上电阻率值与  $H$  值的变化趋势大体一致,充分说明了高密度电阻率成像法的有效性。

为更好的说明方法的有效性,我们进行了定量分析,将剖面线上根据电阻率变化曲线和  $H$  值确定的污染区直径进行了对比.在剖面线上取电阻率的二阶导数(图 8),

$$\rho_x = \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\rho_y = \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2}, \quad (5)$$

$\rho_x$  和  $\rho_y$  分别为横剖面线  $a-a_1$  和纵剖面线  $b-b_1$  上电阻率的二阶导数.剖面线上电阻率一阶导数表示该剖面线上电阻率的变化速度,电阻率的二阶导数表示一阶导数的变化速度,而在非污染区域与污染区域的“交界点”电阻率的变化速度最快,即电阻率的二阶导数达到最大值,这种“交界点”在数学上称为“拐点”,因此可以通过求电阻率的二阶导数的最大值来确定“交界点”.由二阶导数的最大值(拐点)可获得剖面线上非污染区域和污染区域“交界点”(A、A1、B、B1)的位置,剖面线上“交界点”之间的距离即为污染区域的直径( $D_\rho$ ).由  $H$  值确定的污染区半径( $D_H$ )可直接由图 7 获取.两种方法获取的污染区直径见表 1.由表可以看出,两种方法确定的直径相互非常接近,相对误差也不大,进一步说明了电阻率成像法所获得的结果的可靠性。

### 3.2 三维动态监测结果

为了很好地表示污染区域的动态变化过程,我们选取砂槽中间包括污染物在内的一小块区域(图 9)对电阻率相对值的动态变化过程进行分析。

表 1 剖面线上电阻率和 Blue 值相对变化率确定的污染区直径对比

Table 1 A comparison of the contaminated diameter between resistivity and Blue value variation rate

Z 深度 (m)	剖面线	Blue 值相对变化率 $D_H$ (m)	电阻率二阶导数 $D_\rho$ (m)	相对误差 (%)
0.02	横剖面线 $a-a_1$	0.203	0.153	-24.6
	纵剖面线 $b-b_1$	0.191	0.198	3.7
0.04	横剖面线 $a-a_1$	0.170	0.142	-16.5
	纵剖面线 $b-b_1$	0.185	0.194	4.9
0.08	横剖面线 $a-a_1$	0.149	0.155	4.0
	纵剖面线 $b-b_1$	0.15	0.162	8.0

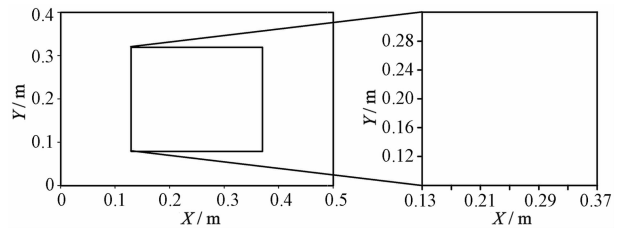


图 9 二维平面上选取的成像区域

Fig. 9 The area used for the following 3-D resistivity relative value imaging

图 10 即为所选区域上 LNAPL 污染过程中三维空间上电阻率相对值随时间的变化图.该图将整个区域从上到下分成 5 层,每层的厚度为 0.02 m.由图可看出,在污染初期,被污染的范围比较小,仅限于中心的浅部区域,电阻率相对变化值也比较小;随着轻非水相液体的不断注入,污染区域的范围不断增大,中心区域的电阻率相对变化值也不断增大。

对于某一时刻,从图中可以清晰地看出,电阻率相对值的空间分布呈现出非均匀性,中心部位的电阻率相对变化值明显偏高,浅部的电阻率相对变化值明显高于深部的,并且随着深度的加大污染区的范围也不断减小,清晰地反映了轻非水相液体由浅入深和从中心向周围迁移的过程。

图 11 显示了纵剖面上电阻率相对值随时间的变化过程. 该图在 Y 坐标上从 0.15~0.25 m 切取

了 5 个剖面,每个剖面的厚度为 0.02 m,其中 slice3 (Y=0.19~0.21 m)位于砂槽的中心部位,该剖面顶部的中间点即为 LNAPL 注入位置. 另外 4 个剖面对称地排列于该剖面的两侧, slice1 和 slice5 对称, slice2 和 slice4 对称. 由图可看出,在污染初期,被污染的范围比较小,电阻率相对变化值也比较低,但随着轻非水相液体的不断注入,污染区域的范围不断扩大,中心区域的电阻率相对变化值也不断升

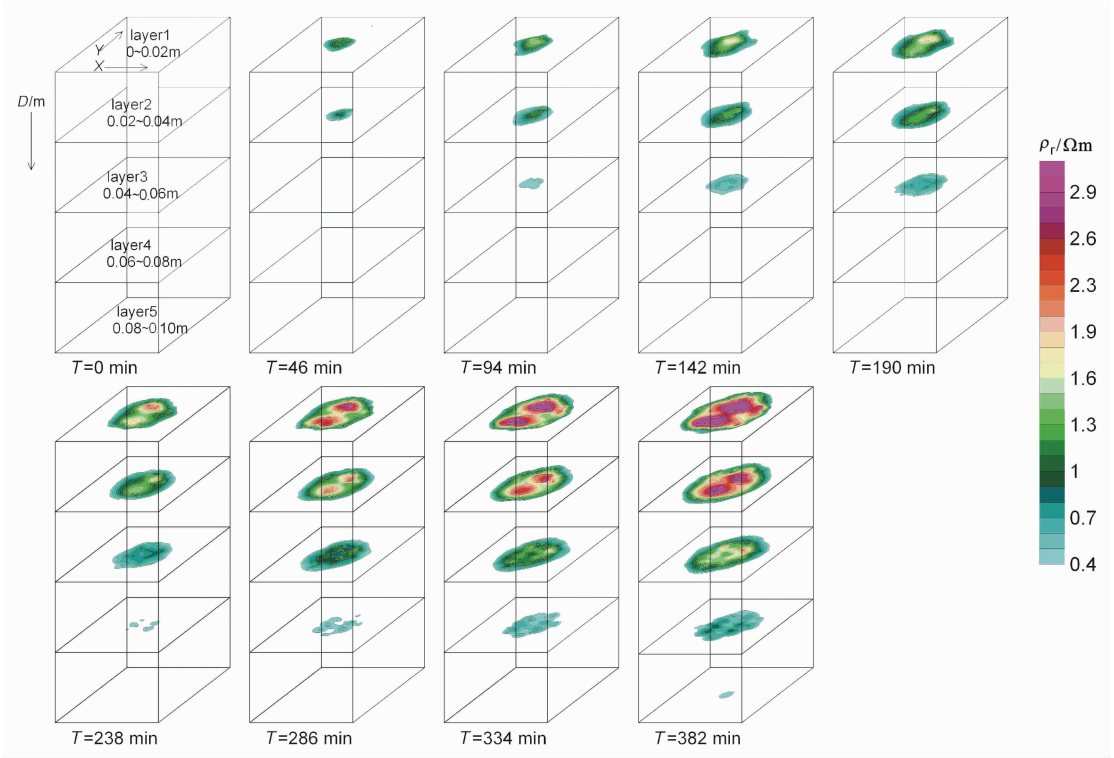


图 10 LNAPL 污染过程中三维空间电阻率相对值随时间变化

Fig. 10 Temporal variations of the 3-D resistivity relative variation rate during the LNAPL contamination process

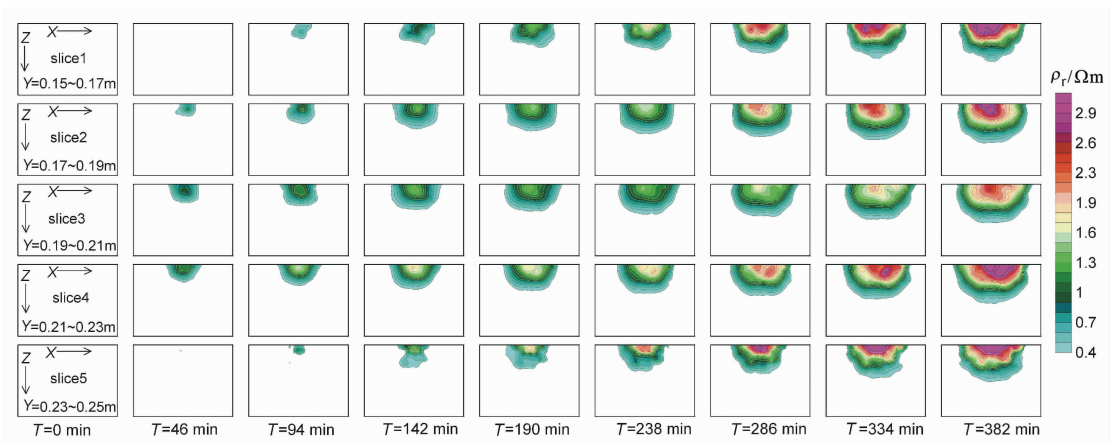


图 11 LNAPL 污染过程中纵剖面电阻率相对值随时间变化

Fig. 11 Temporal variations of the resistivity relative variation rate at different sections during the LNAPL contamination process

高。在污染的中后期,可清楚地看到,大多数剖面上的污染区域都呈现半圆状,而且 slice1 和 slice5 以及 slice2 和 slice4 中的污染区域范围与形状也都大体相似,说明在对称剖面上,污染区域的范围与形状都具有较好的对称性。但剖面上污染区域内部电阻率相对值空间分布的非均匀性依然明显,比如剖面上部中心区域的电阻率相对值就明显高于空间半圆形周边区域,明确地反映了轻非水相液体的污染过程。

## 4 结 论

通过本文的研究可以得出以下几点结论:

(1)高密度电阻率成像法获取的轻非水相液体污染区域的范围、形状和直径( $X$ 方向和 $Y$ 方向)与实际结果都比较接近,说明该方法用于确定多孔介质中轻非水相液体的空间分布是有效的。

(2)由三维空间和纵剖面上电阻率相对值随时间的变化过程清楚地反映了轻非水相液体的污染过程,说明利用高密度电阻率成像法动态监测多孔介质中轻非水相液体的迁移是可行的。

(3)试验中利用 ERT 圈定的污染区域在水平剖面上呈近似圆形,在垂直剖面上呈近似半圆形,随着 LNAPL 的污染,污染区域的范围不断增大,在污染区内部电阻率相对值呈现出明显的非均质性,这种非均质性也间接的反映了轻非水相液体在污染区内部分布的非均匀性。

(4)本文提出了一种新的轻非水相液体监测和评价方法,该方法弥补了目前监测手段的不足,实现了三维空间的 LNAPL 污染过程的可视化。这种新的监测方法对于从三维空间探讨轻非水相液体的迁移机理和分布特征具有重要的意义,并为参数的提取奠定基础,同时,也为进行 LNAPL 修复过程的动态监测以及实现对数值模拟结果的验证创造了条件,具有一定的应用价值。但是,本文的试验是在室内相对较小的尺度上进行的,虽然监测效果比较好,但在野外大尺度复杂条件下应用高密度电阻率成像法进行 LNAPL 的动态监测是否有效还有待进一步研究。

## 参考文献(References)

[1] 罗延钟,谭义东. 高密度电阻率法新观测方案及其数据处理和成图软件系统. 物探化探计算技术, 1996, **18**(2): 134~140  
Luo Y Z, Tan Y D. A new scheme of high density resistivity method and its data processing-plotting software system. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1996, **18**(2): 134~140

[2] 底青云,王妙月. 积分法三维电阻率成像. 地球物理学报, 2001, **44**(6): 843~852  
Di Q Y, Wang M Y. 3-D resistivity tomography by integral method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(6): 843~852

[3] 底青云,倪大来,王 若等. 高密度电阻率成像. 地球物理学进展, 2003, **18**(2): 323~326  
Di Q Y, Ni D L, Wang R, et al. High density resistivity image. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18**(2): 323~326

[4] 黄俊革,王家林,阮百尧. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 1206~1214  
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4): 1206~1214

[5] 罗延钟,万 乐. 高密度电阻率成像. CT 理论与应用研究, 2006, **15**(1): 61~65  
Luo Y Z, Wan L. High density resistivity image. *CT Theory and Applications* (in Chinese), 2006, **15**(1): 61~65

[6] 寇纯武,李克祥,郭 舜等. 高密度电阻率法探测洞穴、采空区的效果分析. 工程勘察, 1994, **6**: 61~65  
Kou S W, Li K X, Guo S, et al. Analysis of effect on high density resistivity method to prospect cave and exhausted working. *Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), 1994, **6**: 61~65

[7] 丑景俊,王 进,孟 琪. 高密度电阻率法应用技术研究. 东北地震研究, 1995, **11**(4): 54~57  
Chou J J, Wang J, Meng Q. Research on application technology of high density resistivity prospecting. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 1995, **11**(4): 54~57

[8] 孟 琪,丑景俊. 高密度电阻率法探测岩溶的应用研究. 东北地震研究, 1996, **12**(3): 58~63  
Meng Q, Chou J J. The application of high density resistivity method to prospecting Karst. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 1996, **12**(3): 58~63

[9] 王士鹏. 高密度电阻率法在水文地质和工程地质中的应用. 水文地质工程地质, 2000, **1**: 52~56  
Wang S P. The application of high density resistivity method in hydrologic and engineering geology. *Hydrologic Geology & Engineering Geology* (in Chinese), 2000, **1**: 52~56

[10] 刘小军,李长征,王家林等. 高密度电阻率法概率成像技术在提防隐患探测中的应用. 工程地球物理学报, 2006, **3**(6): 415~418  
Liu X J, Li C Z, Wang J L, et al. The application of high density resistivity probability tomography image in dike engineering exploration. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 2006, **3**(6): 415~418

[11] Hagrey S A, Michaelsen J. Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at Bokhorst, Germany. *Geophysics*, 1994, **64**(3): 746~753



- [12] Daily W, Ramirez A, LaBrecque D, et al. Electrical resistivity tomography of vadose zone water movement. *Water Resource Research*, 1992, **28**(5): 1424~1442
- [13] White P A. Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity. *Geophysics*, 1994, **59**(2): 192~201
- [14] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 2001, **37**(2): 763~769
- [15] Michot D, Benderitter Y, Dorgny A, et al. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resource Research*, 2003, **39**(5): 1138~1158
- [16] Greenhouse J P, Harris R D. Migration of contaminants in groundwater at a landfill : A case study . 7. DC , VLF , and inductive resistivity surveys. *Journal of Hydrology*, 1983, **63**:177~197
- [17] Gheith H M, Schwartz F W. Electrical and visual monitoring of small scale three-dimensional experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, **34**: 191~205
- [18] Chambers J E, Loke M H, Ogilvy R D, et al. Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, **68**: 1~22
- [19] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional soil resistivity inversion using patching method. *Jour. Japan. Soc. Eng. Geol.*, 1999, **39**(6): 524~532
- [20] 刘汉乐,周启友,李国山. 基于改进多谱图像分析方法的 LNAPL 分布特性研究. *工程勘察*, 2006, (9): 28~32  
Liu H L, Zhou Q Y, Li G S. Study on LNAPL redistribution based on the revised multi-spectral image analysis Method. *Journal of Geotechnical Investigation and Sureying* (in Chinese), 2006, (9): 28~32

(本文编辑 汪海英)