

基于电阻率三维成像技术的 地下氯化物污染探测

王辉¹⁾, 王建历^{1, 3)}, 黄明^{1, 3)}, 石战结²⁾, 柳思龙¹⁾, 廖小倩¹⁾

1) 浙江省工程物探勘察设计院有限公司, 杭州, 310005;

2) 浙江大学地球科学学院, 杭州, 310058;

3) 浙江省地球物理技术应用研究所有限公司, 杭州, 310005

内容提要:城市工业退役场地因曾生产或使用有毒、有害原料,导致土壤和地下水受到污染。城市地质调查通常采用钻探取样和测试分析等技术确定场地受污染情况,此类方法仅能获得钻孔附近污染物分布信息,难以对场地实现快速评估。电阻率三维成像技术具有观测范围广、获取数据量大、成像精度高等优点,通过一次性采集数据可实现观测范围内地下介质电阻率成像。地下水被重金属、氯化物、硝酸盐等无机污染物污染后土体导电能力增强,为电阻率法探测提供了良好的物性前提条件。笔者等以氯化物污染场地调查为例,通过建立理论模型并进行正演计算,验证了电阻率三维成像技术的有效性。在杭州市某工业退役场地开展现场探测试验,依据电阻率低异常确定了氯化物污染源(储罐)位置、污染羽空间分布特征及污染物渗漏通道,证实了电阻率三维成像技术具有良好的探测能力。

关键词:电阻率法;三维成像;有限单元法;污染场地调查;氯化物

随着城市地下空间开发利用进入快速发展阶段,土地资源紧张成为制约城市发展的重要因素。为了给城市发展腾出新的空间,各类化工、印染、冶炼等生产企业纷纷从城市向外迁移,原厂址变成工业退役场地。因曾生产或使用化工原料,工业退役场地遗留的重金属、石油烃等污染物会对土壤及地下水形成污染(廖晓勇等,2011;章诗辞等,2017;吉敏等,2024;蔡敏琦等,2025),给城市土地资源开发利用造成不利影响,需进行土壤及地下水环境修复。此外,退役场地周边地块在开发建设过程中改变了原有的工程地质和水文地质条件,加剧了污染物扩散或迁移,容易衍生出新的环境问题(马青山等,2019;徐蓓艺等,2024;汪思颖等,2024)。

开展地质适宜性评价对于科学合理开发城市地下空间、保障城市安全意义重大(程光华等,2019;黄敬军等,2020;邢怀学等,2022),污染场地调查是地质适宜性评价的重要内容(郭骏瀚等,2024)。当前,污染场地调查一般按照收集资料、确定污染源、钻探取样与测试分析、确定污染物范围、综合评估的技术流程进行,钻探取样和测试分析作为最重要的

技术手段和工作内容,虽然能够准确地获得特定点位污染物种类及含量,但因钻孔数量有限,难以满足大面积场地快速调查的需要。

地球物理探测作为绿色、经济、快速的勘查技术,可高效获取场地内地下介质物性分布信息,弥补钻探取样“一孔之见”的劣势,已成为污染场地调查的重要技术手段(程业勋等,2005;叶腾飞等,2009;李广才等,2023;Slater et al., 2010;Mwakanyamal et al., 2012;Johnson et al., 2015;赵少桦等,2018;李洪丽等,2020;田少兵等,2024)。电阻率三维成像以地下介质的导电性差异为基础,用于探测地下导电性良好的目标体具有明显的优势,在地质调查、岩溶与采空区勘察、地质灾害监测、地下目标物探测等方面得到了应用(闫述等,2010;Badmus et al., 2012;李忠平,2020;王浩,2021;岑洋等,2021;Pham et al., 2022;Zghair et al. 2023)。

重金属、氯化物、硝酸盐等无机污染物以带电离子的形式存在于地下水中,在外电场的作用下会极大地增强土体的导电能力(蔡国军等,2012),因此采用电阻率成像技术探测地下无机污染物具备良好

注:本文为国家自然科学基金面上资助项目(编号:42274188)和浙江省2025年建设科研项目(编号:2025K331)的成果。

收稿日期:2025-03-17;改回日期:2026-01-09;网络首发:2026-02-15;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.031

作者简介:王辉,男,1975年生,学士,高级工程师,主要从事地球物理勘查工作;Email:50279779@qq.com。通讯作者:王建历,男,1984年生,硕士,高级工程师,主要从事地球物理勘查工作;Email:2509986331@qq.com。



的地球物理前提。笔者等以氯化物污染探测为例,通过建立理论模型并进行电阻率法三维数值模拟,验证了电阻率三维成像技术的有效性,在杭州市某化工生产企业退役场地开展了现场探测试验,根据获得的电阻率三维地电模型确定了氯化物污染源(储罐)的位置、污染羽范围,推断了污染物渗漏通道。

1 电阻率三维成像技术

电阻率三维成像是在地面供电建立稳定地下电流场,按预先设计的网格一次性布置数十至数百个电极,通过控制不同的电极组合获得研究范围内的视电阻率响应,对视电阻率数据进行反演可得到地下介质分布电阻率三维模型,结合地质资料对电阻率模型进行解译实现解决地质问题的目的。

图1为电阻率三维成像数据采集常用装置,测量时通过采集单元将多个剖面进行串联,每次控制一个采集单元进行单剖面数据采集,完成所有剖面测量后对观测数据进行组装,再进行三维反演。相比于二维(剖面)观测,电阻率三维成像技术采集数据量大、工作效率高,获得的地电模型能更准确反映地下介质分布(Loke et al., 1996; 黄瑶, 2024)。

2 三维点电源场有限元法数值模拟

2.1 异常电位的边值和变分问题

均匀半空间三维点电源异常电位的边值问题可归纳为(Sasaki, 1994; 阮百尧, 2002):

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -\nabla \cdot (\sigma' \nabla u_0) & \in \Omega \\ \partial u / \partial n = 0 & \in \Gamma_s \\ \partial u / \partial n + u \cdot \cos(r, n) / r = 0 & \in \Gamma_\infty \end{cases} \quad (1)$$

式中, ∇ 为哈密顿算子; σ 为介质的电导率; σ' 为异

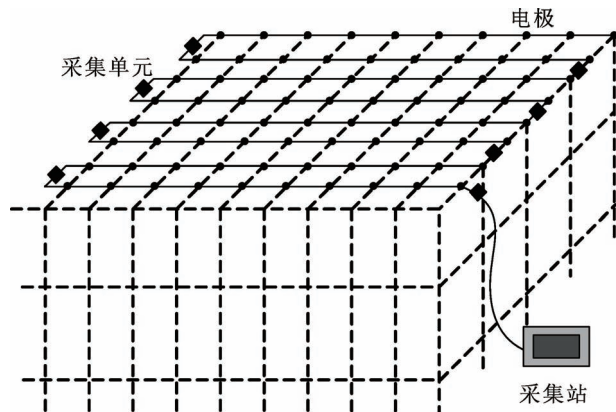


图1 电阻率三维成像观测装置

Fig. 1 Resistivity 3D imaging observation device

常电导率, $\sigma' = \sigma - \sigma_0$ (σ_0 为点电源所在处的电导率); u_0 为介质的正常电位,点源位于地表时, $u_0 = I/2\pi\sigma_0 r$ (r 为观测点至电源点的距离); u 为异常电位; Ω 为三维区域; Γ_s 为区域 Ω 的地面边界, Γ_∞ 为区域 Ω 的地下边界; n 为边界的外法向方向。

与边值问题(1)式等价的变分问题为:

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 + \sigma' \nabla u_0 \cdot \nabla u \right] d\Omega + \\ \int_{\Gamma_\infty} \left[\frac{1}{2} \sigma \cdot \cos(r, n) \cdot u^2 / r + \right. \\ \left. \sigma' \cdot \cos(r, n) \cdot u_0 u \right] d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 单元分析

将式(1)对区域 Ω 和边界 Γ_∞ 的积分分解为对各单元 e 和单元边界 Γ_e 的积分之和,对式(2)的各项单元积分后将所得结果相加,再扩展成由全体节点组成的矩阵,可得:

$$\begin{aligned} \bar{F}_e(u) &= \frac{1}{2} u_e^T (K_{1e} + K_{2e}) u_e + u_e^T (K'_{2e} - K'_{1e}) u_{0e} \\ &= \frac{1}{2} u_e^T K_e u_e + u_e^T K'_e u_{0e} = \frac{1}{2} u^T \bar{K}_e u + u^T \bar{K}'_e u_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $K_e = K_{1e} + K_{2e}$ 、 $K'_e = K'_{2e} - K'_{1e}$ 、 K_{1e} 、 K'_{1e} 是与节点坐标相关的系数, K_{2e} 、 K'_{2e} 是与四面体单元在 Γ_∞ 上的三角面积相关的系数矩阵; u 和 u_0 分别是全体节点异常电位 u 与正常电位 u_0 组成的列向量; \bar{K}_e 和 \bar{K}'_e 分别是 K_e 、 K'_e 的扩展矩阵。

由全部单元的 $\bar{F}_e(u)$ 相加可得:

$$\begin{aligned} \bar{F}(u) &= \sum \bar{F}_e(u) = \frac{1}{2} u^T \sum \bar{K}_e u + \\ u^T \sum \bar{K}'_e u_0 &= \frac{1}{2} u^T K u + u^T K' u_0 \end{aligned} \quad (4)$$

令(4)式的变分为0,合成到全体单元网格节点得到线性方程组:

$$K u = -u K' u_0 \quad (5)$$

式中, K 、 K' 为总体系数矩阵。

2.3 电场求解

解方程组式(5)可得各节点的异常电位 u ,则总场电位 $V = u + u_0$,进而根据装置形式计算视电阻率:

$$\rho_s = k \cdot V / I \quad (6)$$

式中, k 为装置系数(程志平, 2007); I 为供电电流。

2.4 理论模型正演计算

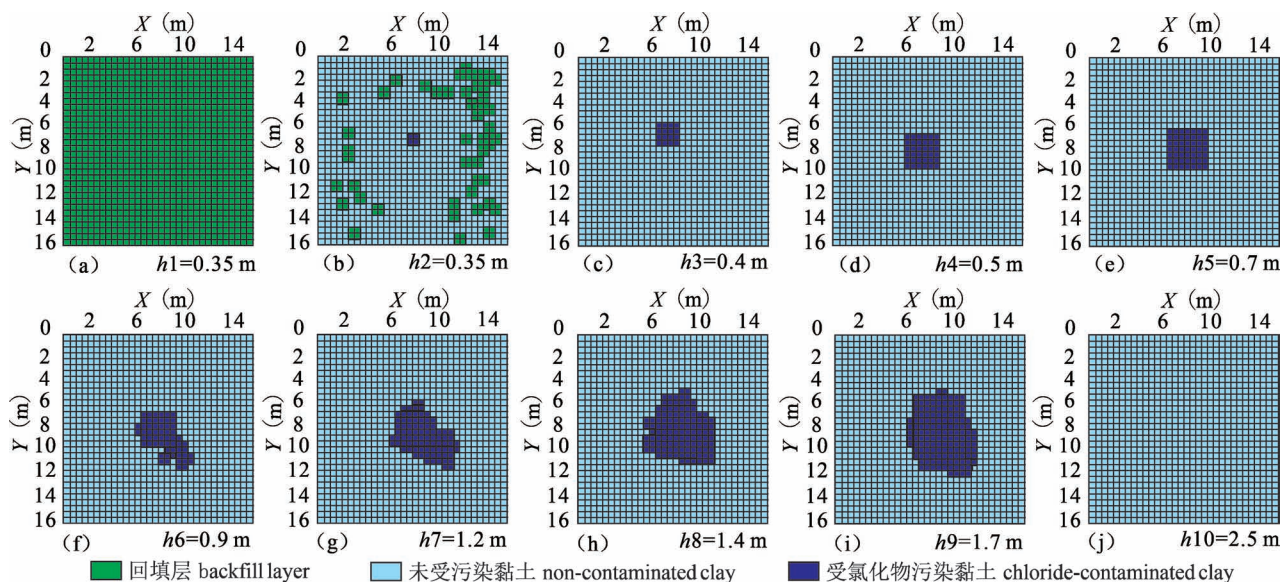


图2 氯化物污染场地理论模型:(a)一(j)代表不同深度介质电阻率分布

Fig. 2 Theoretical model of a chloride-contaminated site: (a) to (j) represent the resistivity distribution of the medium at different depths

2.4.1 地下污染物模型

建立图2所示污染场地模型。浅部为回填土,电阻率设为 $\rho_1 = 200 \Omega \cdot \text{m}$,下部为黏土层,未受污染的黏土电阻率设为 $\rho_2 = 30 \Omega \cdot \text{m}$,因氯化物污染在地下水作用下导电性增强,受污染的黏土电阻率明显下降,设为 $\rho_3 = 0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 。

采用六面体单元对模型进行剖分,共剖分为 $32 \times 32 \times 20$ 个网格,平面网格(X 方向、 Y 方向)间距为 0.50 m ,深度方向共划分为10层(每层2个网格),层厚度逐渐增加,各地层参数为:第一层为回填土,厚度 $h_1 = 0.35 \text{ m}$;第二层为回填土和黏土混合层,厚度 $h_2 = 0.35 \text{ m}$,氯化物污染区域位于模型中部,面积为 1.00 m^2 ;第三至九层为局部受污染的黏土层,厚度分别为 $h_3 = 0.40 \text{ m}$ 、 $h_4 = 0.50 \text{ m}$ 、 $h_5 = 0.70 \text{ m}$ 、 $h_6 = 0.90 \text{ m}$ 、 $h_7 = 1.10 \text{ m}$ 、 $h_8 = 1.40 \text{ m}$ 、 $h_9 = 1.70 \text{ m}$,随埋深增加受污染范围扩大,面积分别为 4.00 m^2 、 9.00 m^2 、 12.25 m^2 、 14.50 m^2 、 20.75 m^2 、 29.00 m^2 、 35.00 m^2 ;第十层为未受污染的黏土层,厚度 $h_{10} = 2.50 \text{ m}$ 。

2.4.2 模型正演

对理论模型进行正演计算,按 17×17 网格布置电极,电极间距为 1.00 m ,采用施伦贝谢(Schlumberger)装置采集数据,共获得5474个视电阻率数据,点位分布如图3。

2.4.3 模型反演

电阻率反演采用阻尼最小二乘反演算法,目标

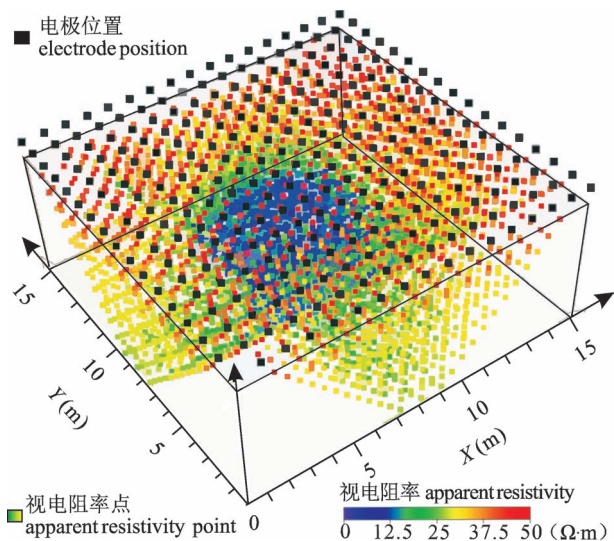


图3 视电阻率点位分布图

Fig. 3 Schematic diagram of apparent resistivity points

函数为:

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \alpha \mathbf{I}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{G}^T \Delta \mathbf{d} \quad (7)$$

式中, \mathbf{G} 为雅可比矩阵(即灵敏度矩阵), α 为阻尼因子, \mathbf{G} 为单位矩阵, $\Delta \mathbf{d}$ 为观测数据 d_{obs} 和模型正演理论值 d_m 的残差向量, $\Delta \mathbf{m}$ 为初始模型 m_0 的修改量。

反演流程见图4,具体步骤为:①设定模型参数初值,以观测数据平均值作为电阻率初值;②对模型正演得到理论观测数据(d_m);③收敛判断,若理论

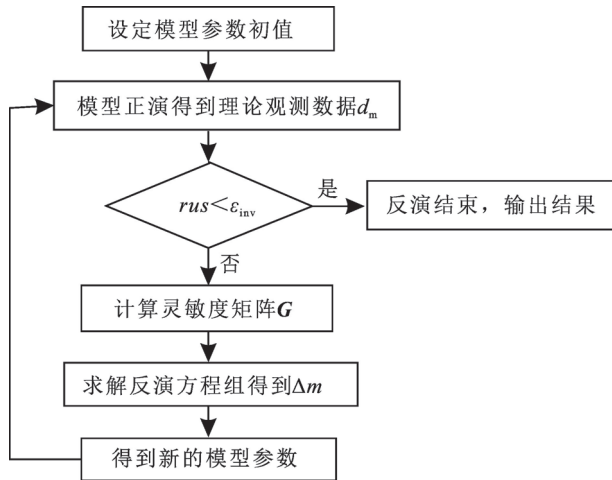


图4 阻尼最小二乘反演流程图

Fig. 4 Flowchart of damped least squares inversion

观测数据 (d_m) 与实际观测数据 (d_{obs}) 之间的误差满足收敛判据 ($rus < \epsilon_{inv}$), 输出模型参数作为反演结果, 反之则进入下一步; ④计算灵敏度矩阵 G ; ⑤求解反演方程组得到模型修正量 Δm ; ⑥计算得到新模型参数, 重复执行第②, 进入下一循环。上述过程在 Res3dinv 软件平台上实现。

将理论模型计算得到的视电阻率添加 2% 随机噪声后作为实测数据进行反演, 迭代 5 次, 均方根误差 $rus = 2.16\%$, 反演结果如图 5。图中电阻率低异常区为受氯化物污染的黏土 (电阻率值 $< 30.00 \Omega \cdot m$), 与设定的模型一致。

3 方法试验

选择杭州市某工业退役场地进行试验, 该场地

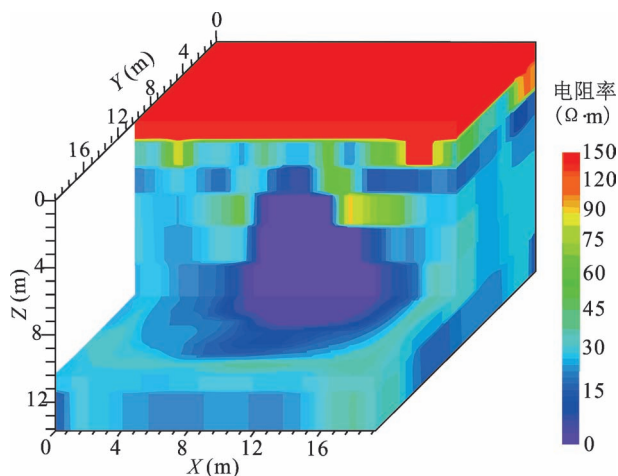


图5 理论模型电阻率三维成像结果

Fig. 5 3D resistivity imaging results of model

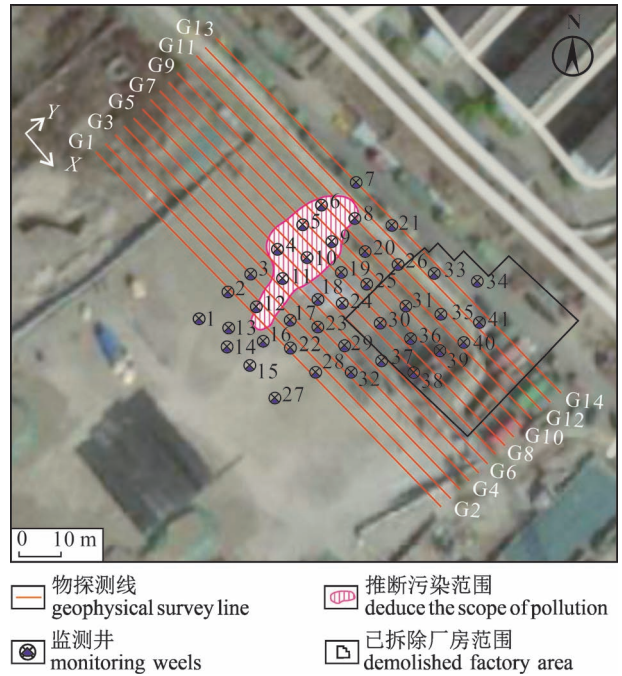


图6 试验场地物探测线布置图

Fig. 6 Layout of geophysical exploration lines at the test site

曾建有氯乙醚、氯化石蜡生产车间, 从事化工产品加工持续二十余年, 于 2007 年停产退役。环境调查显示地下水中氯化物含量严重超标, 最高达 5990 mg/L 。

3.1 工程地质与地球物理特征

试验场地自浅及深分布第四系全新统杂填土、素填土、粉质黏土夹粉砂、黏质粉土、淤泥质粉质黏土。杂填土层由建筑垃圾回填, 土质不均, 层厚 $1.50 \sim 2.10 \text{ m}$; 素填土层主要由粉土充填, 土质不均, 层厚 $1.00 \sim 1.90 \text{ m}$; 粉质黏土夹粉砂层局部含大量粉土, 层厚 $11.30 \sim 15.60 \text{ m}$; 黏质粉土层局部含少量粉质黏土, 层厚 $1.50 \sim 4.90 \text{ m}$; 下覆淤泥质粉质黏土为本地区隔水层。

试验前对场地及外围土壤、地下水进行电阻率测试, 结果见表 1。回填土 (杂填土、素填土) 位于地下水位以上, 电阻率为 $50 \sim 300 \Omega \cdot m$, 未受污染的粉质黏土电阻率介于 $10 \sim 50 \Omega \cdot m$, 受氯化物污染

表1 试验场地主要介质电阻率特征

Table 1 Resistivity characteristics of main media in the test site

介质类别	电阻率 ($\Omega \cdot m$)
杂填土、素填土	50~300
未受污染粉质黏土	10~50
受氯化物污染粉质黏土	5~10
含氯化物工业废水	0.01~1

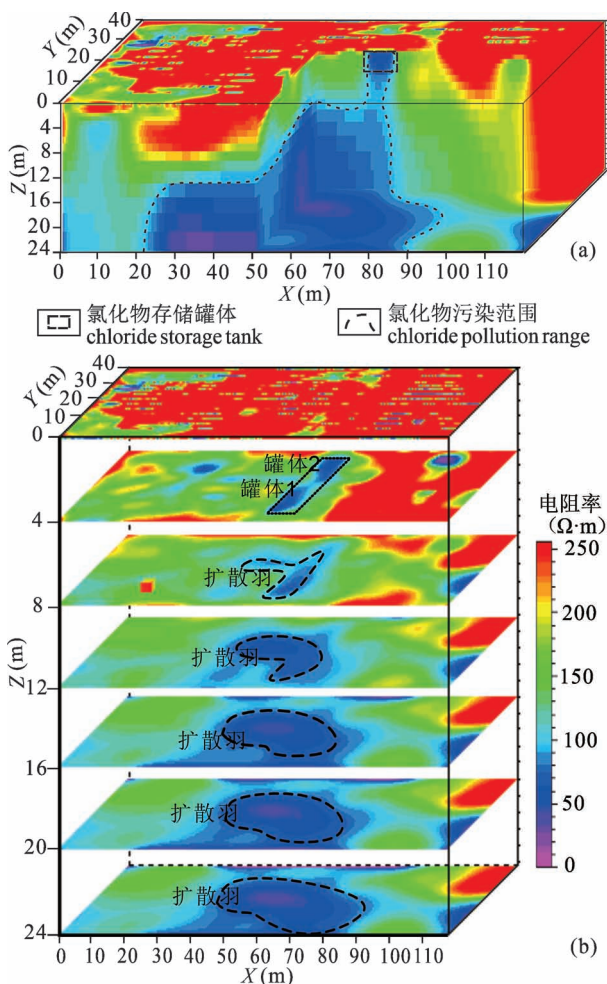


图7 试验场地电阻率三维成像结果:(a)立体图;(b)侧视图

Fig. 7 3D imaging of resistivity in polluted sites;

(a) 3D image; (b) side view slice image

的粉质黏土电阻率降低,为 $5 \sim 10 \Omega \cdot m$ 。此外,对含氯化物工业废水进行了测试,电阻率为 $0.01 \sim 1 \Omega \cdot m$,明显低于淡水电阻率(约为 $100 \Omega \cdot m$)。

3.2 数据采集

采用图1所示装置进行数据采集,共分割为14条剖面(图6),电极点距为2.00 m,测线间距为3.00 m,单条剖面长118.00 m,采用施伦贝谢装置共采集有效视电阻率数据11774个,数据质量满足《电阻率测深法技术规范(DZ/T 0072-2020)》要求。

3.3 试验结果

对实测数据进行反演,共迭代5次,均方根误差 $r_{ms} = 6.45\%$ 。反演成像结果见图7,浅部显示为电阻率高异常,电阻率值大于 $50 \Omega \cdot m$,为回填土层的电性反映。试验区中部 $50.00 \sim 80.00 m$ 范围(X方向)、埋深 $5.00 \sim 8.00 m$ 见低电阻率异常(电阻率值 $< 10 \Omega \cdot m$),经钻探验证为氯化物存储罐体,为该

场地内氯化物的主要来源;罐体下方低电阻率区域随深度增加呈扩大趋势(图7b),根据低电阻率异常外边界可圈定污染羽范围,该区域监测井(图6中4、5、8、9、10、11、12)显示氯化物平均含量为 1458.55 mg/L ,与电阻率低异常范围吻合;低电阻率异常中心构成了污染物下渗的通道。深部低电阻率异常未封闭,结合工程地质条件分析,氯化物污染已扩散至淤泥质粉质黏土,由于该层为隔水层,推断污染物在该地层上部富集。

4 结束语

通过建立氯化物污染场理论模型并对模型进行正演,验证了电阻率三维成像技术探测氯化物污染的有效性。经现场试验,证实了电阻率三维成像技术在确定地下氯化物污染源(存储罐体)、圈定受污染土体范围(污染羽)及污染物渗漏通道等方面可获得良好的地质效果。

相比于二维剖面探测,电阻率三维成像技术具有获取数据量大、成像精度高等特点,适合用于污染场地快速勘查,其对导电性良好的地下目标体具有较高的分辨能力,可作为重金属、氯化物、硝酸盐等无机污染场地调查优选的地球物理方法。

致谢:笔者等研究过程中得到了浙江大学杨文采院士的指导,在此深表谢意。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 蔡国军, 邹海峰, 刘松玉, 杜延军, 陈德. 2012. 电阻率CPTU在某农药厂污染场地评价中的应用. 工程地质学报, 20(5): 821~826.
- 岑洋, 许孝臣, 江晓益, 谭磊. 2021. 三维高密度电法在土石坝渗漏探测中的应用. 地质论评, 67(S1): 1~2.
- 程光华, 王睿, 赵牧华, 苏晶文, 杨洋, 张晓波. 2019. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势. 地学前缘, 26(3): 39~47.
- 程业勋, 杨进. 2005. 环境地球物理学概论. 北京: 地质出版社, 1~364.
- 程志平. 2007. 电法勘探教程. 北京: 冶金工业出版社, 1~205.
- 郭骏瀚, 刘凯. 2024. 城市地下空间资源地质环境适宜性评价方法对比分析. 地质论评, 70(3): 1083~1096.
- 黄敬军, 赵增玉, 姜素, 杨磊, 高立, 许书刚. 2020. 自然资源管理视角下江苏省城市地质调查工作新思考. 地质论评, 66(6): 1609~1618.
- 黄瑶. 2024. 基于三维电阻率法的水电工程隧道地质条件探查. 物探与化探, 48(1): 281~286.
- 吉敏, 杨洁, 张施阳, 李晓曼, 李青青. 2024. 上海市典型行业退役场地土壤和地下水石油烃污染碳链组分特征及风险评估. 环境科学研究, 37(11): 2547~2556.
- 李广才, 李培, 姜春香, 张鹏辉, 王兴宇. 2023. 我国城市地球物理勘探方法应用进展. 地球物理学进展, 38(4): 1799~1814.

- 李洪丽, 鹿琪. 2020. 探地雷达在LNAPL污染土壤探测中的应用进展研究. *地球物理学进展*, 35(3): 1141~1148.
- 李忠平. 2020. 基于高密度电法温纳装置的三维电阻率反演应用. *地球物理学进展*, 35(3): 970~975.
- 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 赵丹. 2011. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题. *环境科学*, 32(3): 784~794.
- 马青山, 贾军元, 田福金, 雷廷. 2019. 地下水开采引发的土体变形对污染物迁移影响研究. *中国煤炭地质*, 31(2): 35~40+59.
- 阮百尧, 熊彬. 2002. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元模拟. *地球物理学报*, 45(1): 131~138.
- 田少兵, 王鹏, 冯洪川, 尚通晓, 梅荣, 刘玲, 陈月云, 李向前. 2024. 基于地球物理数据的化工场地污染源追踪案例分析. *环境科学学报*, 44(4): 344~355.
- 汪思颖, 韩绮, 张立秋, 封莉. 2024. 中国地下水污染防治技术研究进展与展望. *环境污染与防治*, 46(12): 1834~1840.
- 王刚, 周启友, 吴世艳, 凌成鹏, 杨新星, 雷明. 2012. 基于高密度电阻率成像法的基岩裂隙网络原位识别试验研究. *地质论评*, 58(1): 165~174.
- 王洁. 2021. 三维高密度电法在城市地下岩溶塌陷区探测中的应用. *工程地球物理学报*, 18(1): 107~112.
- 王钧, 朱国维. 2022. 基于Res3dinv软件的三维高密度电法成像效果分析. *工程地球物理学报*, 19(1): 117~125.
- 邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 华健, 常晓军, 蔡小虎. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究——以杭州市为例. *地质论评*, 68(2): 607~614.
- 闫述, 林建, 薛国强, 周楠楠. 2010. 地下洞体的三维电阻率探测方法. *地球物理学进展*, 25(6): 2163~2167.
- 叶腾飞, 龚育龄, 董路, 能昌信, 吴曲波, 陈勇. 2009. 环境地球物理在污染场地调查中的现状及展望. *环境监测管理与技术*, 21(3): 23~27.
- 赵少桦, 董艳辉, 李学兰, 王礼恒. 2018. 地下水污染物浓度与电阻率映射关系的构建. *中国科学院大学学报*, 35(6): 814~821.
- Badmus B S, Akinyemi O D, Olowofela J A, Folarin G M. 2012. 3D electrical resistivity tomography survey for the basement of the Abeokuta terrain of Southwestern Nigeria. *Journal of the Geological Society of India*, 80(6): 845~854.
- Cai Guojun, Zou Haifeng, Liu Songyu, Du Yanjun, Chen Si. 2012. Application of resistivity cptu in evaluation of contamination site for pesticide factory. *Journal of Engineering Geology*, 20(5): 821~826.
- Cen Yang, Xu Xiaochen, Jiang Xiaoyi, Tan Lei. 2021. Application of 3D high-density resistivity method in leakage detection of embankment dam. *Geological Review*, 67(S1): 1~2.
- Cheng Guanghua, Wang Rui, Zhao Muhua, Su Jingwen, Yang Yang, Zhang Xiaobo. 2019. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 39~47.
- Cheng Yexun, Yang Jin. 2005. An introduction to environmental geophysics. Beijing: Geological Publishing House, 1~364.
- Cheng Zhiping. 2007. Course of electrical prospecting. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~205.
- Guo Junhan, Liu Kai. 2024. Comparative analysis of geological environment suitability evaluation methods for urban underground space resources. *Geological Review*, 70(3): 1083~1096.
- Huang Jingjun, Zhao Zengyu, Jiang Su, Yang Lei, Gao Li, Xu Shugang. 2020. New thoughts on urban geological survey concerning natural resource management in Jiangsu Province. *Geological Review*, 66(6): 1609~1618.
- Huang Yao. 2024. Exploring geological conditions for tunnel construction in hydropower engineering using a 3D resistivity method. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 48(1): 281~286.
- Ji Min, Yang Jie, Zhang Shiyang, Li Xiaoman, Li Qingqing. 2024. Characteristics and risk assessment of carbon chain components of petroleum hydrocarbon contamination in soil and groundwater of typical enterprise retired sites in Shanghai. *Research of Environmental Sciences*, 37(11): 2547~2556.
- Johnson T C, Versteeg R J, Day-Lewis F D, Major W, Lane J W Jr. 2015. Time-lapse electrical geophysical monitoring of amendment-based biostimulation. *Groundwater*, 53(6): 920~932.
- Li Guangcai, Li Pei, Jiang Chunxiang, Zhang Penghui, Wang Xingyu. 2023. Advances of the application of urban geophysical exploration methods in China. *Progress in Geophysics*, 38(4): 1799~1814.
- Li Hongli, Lu Qi. 2020. Progress in application of ground penetrating radar in LNAPL contaminated soil detection of LNAPL. *Progress in Geophysics*, 35(3): 1141~1148.
- Li Zhongping. 2020. Application of 3-D resistivity inversion based on Winner device of high density electricity method. *Progress in Geophysics*, 35(3): 970~975.
- Liao Xiaoyong, Chong Zhongyi, Yan Xiulan, Zhao Dan. 2011. Urban industrial contaminated sites: A new issue in the field of environmental remediation in China. *Environmental Science*, 32(3): 784~794.
- Liao Xiaoyong, Chong Zhongyi, Yan Xiulan, Zhao Dan. 2011. Urban industrial contaminated sites: A new issue in the field of environmental remediation in China. *Huanjing Kexue*, 32(3): 784~794.
- Loke M H, Barker R D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44(3): 499~523.
- Ma Qingshan, Jia Junyuan, Tian Fujin, Lei Ting. 2019. Study on impact from soil mass deformation on pollutant migration initiated by groundwater exploitation. *Coal Geology of China*, 31(2): 35~40+59.
- Mwakanyamale K, Slater L, Binley A, Ntarlagiannis D. 2012. Lithologic imaging using complex conductivity: Lessons learned from the Hanford 300 Area. *Geophysics*, 77(6): E397~E409.
- Pham D N, Pham K N, Lai P H, Thi N. 2022. 3D inversion of 2D electrical resistivity data for geotechnical analysis. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 63(6): 45~52.
- Ruan Baiyao, Xiong Bin. 2002. A finite element modeling of three-dimensional resistivity sounding with continuous conductivity. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(1): 131~138.
- Sasaki Y. 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, 59(12): 1839~1848.
- Slater L D, Ntarlagiannis D, Day-Lewis F D, Mwakanyamale K, Versteeg R J, Ward A, Strickland C, Johnson C D, Lane J W Jr. 2010. Use of electrical imaging and distributed temperature sensing methods to characterize surface water - groundwater exchange regulating uranium transport at the Hanford 300 Area, Washington. *Water Resources Research*, 46(10): 2010WR009110.
- Tian Shaobing, Wang Peng, Feng Hongchuan, Shang Tongxiao, Mei Rong, Liu Ling, Chen Yueyun, Li Xiangqian. 2024. A case study of contaminant source tracking at chemical sites based on geophysical data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 44(4): 344~355.
- Wang Gang, Zhou Qiyong, Wu Shiyang, Ling Chengpeng, Yang Xinxing, Lei Ming. 2012. An *in-situ* experimental study of fractures network identification within bedrock by high-density electrical resistivity tomography. *Geological Review*, 58(1): 165~174.

- Wang Jie. 2021&. Application of three-dimensional high-density electrical method in urban underground karst collapse area detection. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 18(1): 107~112.
- Wang Jun, Zhu Guowei. 2022&. Analysis of the effect of three-dimensional high-density electrical imaging based on Res3div software. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 19(1): 117~125.
- Wang Siying, Han Qi, Zhang Liqiu, Feng Li. 2024&. Research progress and prospect of groundwater pollution prevention and control technology in China. *Environmental Pollution and Control*, 46(12): 1834~1840.
- Xing Huaixue, Dou Fanfan, Ge Weiya, Hua Jian, Chang Xiaojun, Cai Xiaohu. 2022&. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization. *Geological Review*, 68(2): 607~614.
- Yan Shu, Lin Jian, Xue Guoqiang, Zhou Nannan. 2010&. Three-dimensional high resolution resistivity method for prospecting underground caves. *Progress in Geophysics*, 25(6): 2163~2167.
- Ye Tengfei, Gong Yuling, Dong Lu, Neng Changxin, Wu Qubo, Chen Yong. 2009&. Status and development of environmental geophysics in the investigation of contaminated sites. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 21(3): 23~27.
- Zghair M M, Al-Kubaisi M S, Karim H H. 2023. 3D resistivity imaging investigation for engineering construction project studies at Al-muthana Airport in Baghdad, Iraq. *Iraqi Journal of Science*; 5086~5094.
- Zhao Shaohua, Dong Yanhui, Li Xuelan, Wang Liheng. 2018&. Establishment of the relationship between contamination concentration and electrical resistivity in shallow aquifer based on groundwater numerical modeling. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 35(6): 814~821.

Subsurface chloride pollution detection based on 3D resistivity imaging technology

WANG Hui¹⁾, WANG Jianli^{1, 3)}, HUANG Ming^{1, 3)}, SHI Zhanjie²⁾, LIU Silong¹⁾, LIAO Xiaoqian¹⁾

1) *Zhejiang Engineering Geophysical Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, 310005;*

2) *School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027*

3) *Zhejiang Institute of Geophysical Technology Application Co., Ltd, Hangzhou, 310005*

Abstract: Industrial abandoned sites, due to the production or use of toxic and harmful raw materials, have resulted in soil and groundwater contamination. Conventional urban geological surveys typically rely on drilling sampling and testing analysis to determine the pollution status, which can only obtain information regarding pollutant distribution near boreholes, thereby making it difficult to achieve rapid assessment of the entire site. The three-dimensional (3D) resistivity imaging technique, characterized by its broad observation range, substantial data acquisition capabilities, and high imaging resolution, enables comprehensive imaging of subsurface medium resistivity within the observed domain. The conductivity of the soil matrix is known to increase following contamination by inorganic pollutants such as heavy metals, chlorides, and nitrates, thereby establishing favorable physical conditions for resistivity-based detection methods. In a case study focusing on chloride-contaminated sites, the efficacy of the 3D resistivity imaging technique was substantiated through the development of theoretical models and subsequent forward modeling. Field investigations conducted at a decommissioned industrial site in Hangzhou led to the delineation of the chloride contamination source (storage tank), the spatial distribution of the contaminant plume, and the identification of contaminant migration pathways based on observed low-resistivity anomalies, thereby confirming the robust detection capabilities of the technique.

Keywords: resistivity method; three-dimensional imaging; finite element method; pollution site investigation; chloride

Acknowledgements: This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42274188) and the Zhejiang Province's 2025 Construction Scientific Research Project (No. 2025K331)

First author: WANG Hui, male, born in 1975, bachelor's degree, senior engineer in geophysical and geochemical exploration, is mainly engaged in geophysical exploration work; Email: 50279779@qq.com

Corresponding author: WANG Jianli, male, born in 1984, master's degree, senior engineer in geophysical and geochemical exploration, is mainly engaged in geophysical exploration work; Email: 2509986331@qq.com

Manuscript received on: 2025-03-17; Accepted on: 2026-01-09; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.031

Edited by: LIU Zhiqiang

