

文章编号:1673-9469(2022)02-0092-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.014

河北省平原区填埋物污染的电性识别特征

李 晓¹, 刘志远^{1*}, 张云鹏¹, 孟庆鑫², 陈志彬¹, 丁文萍¹

(1. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081; 2. 河北地质大学 地球科学学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 针对河北省平原区工业固废和生活垃圾两类填埋场地, 采用“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法, 确定了污染物/填埋物的电性识别特征, 所圈定的污染物的空间分布与钻孔验证结果相吻合, 结果表明: 高密度电阻率法效率高、抗干扰能力强, 更突出浅部信息, 是快速识别目标区的重要参考; 时谱激电参数特征在污染物的识别和圈定中较传统激电参数则更为稳定, 该组合方法在工业固废填埋物、生活垃圾填埋场渗漏污染的探测中相互印证、相互补充, 取得了较好的识别效果。

关键词: 垃圾填埋场; 高密度电阻率法; 时谱激电; 污染识别

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

Electrical Identification Characteristics of Landfill Pollution in Hebei Plain Area

LI Xiao¹, LIU Zhiyuan^{1*}, ZHANG Yunpeng¹, MENG Qingxin², CHEN Zhibin¹, DING Wenping¹

(1. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang, Hebei 050081, China;

2. School of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: For the two types of landfill sites including the industrial solid waste and domestic waste in Hebei Plain area, the electric identification characteristics of pollutants/landfill were determined by the combination method of “High density resistivity method + Induced polarization (IP) sounding + time spectrum IP parameters”, and the spatial distribution of the contaminants delineated was consistent with the results of the borehole verification. The results show that the high density resistivity method has the advantages of high efficiency, strong anti-interference ability, and more prominent shallow information, which provides an important reference for rapid identification of the target area. The characteristics of time-spectrum IP parameters are more stable than the traditional P parameters in the identification and delineation of pollutants. The combined method is verified and supplemented in the detection of leakage pollution of industrial solid waste landfill and domestic waste landfill, and has achieved good identification effect.

Key words: landfill site; high density resistivity method; time-spectrum induced polarization; pollution identification

随着我国经济的飞速发展, 城市垃圾数量日益剧增, 同时加上处理方式不当引起的土壤、地下水污染问题日益突出, 严重危害着环境与人体健康。要治理垃圾污染带来的环境问题, 首先需要快速圈定垃圾填埋范围及渗漏液空间分布。而地

球物理勘探方法具有原位、无损、快速、经济等特点, 在垃圾填埋场探测中发挥着十分重要的作用。

自20世纪末起, 国内外利用地球物理方法和技术在垃圾填埋探测等方面做了大量实践研究, 为此次研究提供了理论基础和实践前提。Aristode-

收稿日期: 2022-02-17

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(D2021403001)

作者简介: 李晓(1987-), 女, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理勘探与综合解释。

* 通讯作者: 刘志远(1985-), 男, 河北沧州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探与综合解释。

mou等^[1]利用直流电阻率法和时域激发极化法监测垃圾填埋场污染物的运移。程业勋等^[2-3]证明高密度电阻率法在探测土壤与地下水污染方面效果显著;能昌信等^[4]研究了垃圾填埋场地电物理模型的电学特性;闫永利等^[5]将大地电磁法应用于垃圾填埋场地下水污染的检测;牛真茹等^[6]利用高密度电法和钻探法点面结合探查了填埋场的地层结构及填埋层的空间展布情况;尉斌等^[7]应用电法成像观测(EIS)技术获取了某垃圾填埋场地下介质的电阻率分布特征;李永涛等^[8]利用高密度电法、环境磁学等对垃圾填埋场进行了污染物检测与污染评价;刘兆平等^[9]在河北两处不同类型垃圾填埋场上采用探地雷达法、高密度电阻率法、激发极化法和瞬变电磁法,均有一定的效果。以往工作较侧重电阻率特征的研究,而对激电场的时域变化特征重视不够。

本文针对河北平原区以工业固体废弃物和生活垃圾为主的两处垃圾填埋场,采用“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法,分析了填埋物及污染物的电性识别特征,时谱激电特征对污染的识别效果尤其显著。

1 方法原理及物性特征

1.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是以地下介质体的电阻率差异为物性前提,用直流电阻率法的阵列形式,即采用一次性布设几十甚至几百根高密度电极布点,进行二维地电断面测量的电阻率层析成像方法^[10]。高密度电阻率法可以实现数据的快速采集和微机处理,并且能有效地进行多种电极排列方式的参数测定,改变了传统电阻率法的工作模式,提高了工作效率,能够获得较丰富的地电断面信息,更适合于场地环境调查的需求。

1.2 时间域激发极化法

时间域激发极化法是以岩(矿)石、水的激电效应差异为物性前提,通过观测和研究人工建立的直流激发极化场的变化规律而进行探矿和解决环境问题的一种人工场源勘查方法^[10]。激发极化法不受地形起伏和围岩导电性不均匀的影响,可以区分由地下电子导体和离子导体引起的视电阻率异常性质。描述激发极化效应的参数是视极化率,它是二次场与总场的比值。由于二次场和总场均与供电电流成正比,故极化率是与电流无关

的常数。但极化率与供电时间 T 和放电时间 t 有关。

1.3 时谱激电方法

时间域谱激发极化法简称时谱激电,是指在不同时间观测并分析激电效应以解决地质问题的物探方法^[11],采用时谱激电处理方式,进行时间域谱激电正演和谱参数最优化反演。

1.3.1 时间域谱激电正演

Cole-Cole模型常用于激电谱正演分析,本文应用该模型作为正演和视谱参数计算的基础,频率域表达式通常写为:

$$\rho_{(\omega)}^* = \rho_0 \cdot \left\{ 1 - m \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: ρ^* 为复阻抗, ρ_0 为零频率条件下的电阻率, m 为极化率, ω 为角频率, τ 为时间常数, c 为频率相关系数。时间常数 τ 反映激电场的衰减速度,频率相关系数 c 反映衰减曲线的张弛特征^[12]。

Cole-Cole模型为频率域表达式,本文采用数字滤波法^[13]实现该模型的“频率-时间”变换,其时域表达式可写为:

$$\rho_{(t)}^* = \sum_{r=1}^{21} \Phi_r \cdot \text{Re}$$

$$\left[\rho_0 \cdot \left\{ 1 - m \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + (W_r \cdot \tau)^c} \right] \right\} / W_r \right] \quad (2)$$

$$W_r = 10^{a_r - 1gr} \quad (3)$$

式中: a_r 为滤波横坐标, Φ_r 为滤波系数。

1.3.2 谱参数最优化反演

基于最小二乘原则,使用多时道观测数据,建立目标函数:

$$X = \sum_{n=1}^N \| m_a^{\text{forward}} - m_a^{\text{obs}} \|^2 \quad (4)$$

式中: m_a^{obs} 为视极化率的观测结果, m_a^{forward} 为视极化率的正演结果, N 个时道。

本文采用最速梯度法进行最优化求解,迭代式子可写为:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \alpha^{(k)} \cdot g^{(k)} \quad (5)$$

$$g^{(k)} = \frac{\partial X^{(k)}}{\partial x^{(k)}} \quad (6)$$

式中: x 为最优化求解向量,包含时间常数和相关系数, k 为迭代次数, g 为目标函数对求解向量的梯度, α 为搜索步长,搜索步长符合以下算式:

$$X(x^{(k)} + \alpha^{(k)} \cdot g^{(k)}) = \min_{\alpha \geq 0} X(x^{(k)} + \alpha \cdot g^{(k)}) \quad (7)$$

1.4 物性特征分析

根据相关文献资料,河北省平原区介质的常见电阻率及其变化范围^[14]:第四系粘土、砂质土、粉砂岩的电阻率一般在 $25 \sim 150 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内;生活垃圾的电阻率较低,一般在 $1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内;垃圾渗漏液的电阻率非常低,通常小于 $1 \Omega \cdot \text{m}$;工业固废的电阻率较高,一般大于 $40 \Omega \cdot \text{m}$ 。

河北省平原区出露地层主要为第四系松散堆积物,易于污染物的扩散、运移,除咸水区和淤泥外,其正常场的电性背景值均在 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。生活垃圾填埋场的渗液中离子浓度普遍较高,是电学活动性较强的污染物质,渗入地下后有的与土壤作用,产生新的盐类,改变土壤和地下水的性质,使电阻率降低^[15]。其金属含量的多少决定其激电特性的强弱,即极化率的高低。

一般典型介质的时谱激电参数特征为:炭化物:高极化率,低 τ ,高 c ;硫化物:高极化率,高 τ ,低 c ;矿化物:高极化率,高 τ ,低 c 。时间常数 τ 反映衰减时间的快慢,与金属矿物或离子含量呈正比,即金属矿物或离子含量越高,则衰减时间越长, τ 值越高。频率相关系数 c 反映金属矿物或离子分布的均匀性或连通性,即金属矿物或离子分

布不均匀或连通性越差,则 c 值越低。

工业固废填埋物与其周围介质对比,其电阻率明显高于周围介质,其激电特性受金属矿物或离子含量的多少、均匀性的影响;而生活垃圾填埋场渗漏区的电阻率则明显低于周围介质,其激电特性亦受金属矿物或离子含量的多少、均匀性的影响。

上述物性特征分析,为此次开展电性特征识别提供了充分的地球物理前提。

2 应用实例及识别效果

2.1 工业固废填埋场地

试验场地为已关停某磷肥厂附近、以炼硫的炉渣为主的工业固废填埋场,已导致周围地下水重金属含量超标,地表为农田。此处地层为第四系粉土、粉砂、粉质粘土,易于污染物的扩散、运移,地下水位约在 25 m 以下。布置4条高密度电阻率法剖面对试验场地进行整体控制,电极距 5 m ,供电时间 1 s ,最小隔离系数 1 ,最大隔离系数 10 ,供电电压 $\geq 180 \text{ V}$;局部增加激电测深相互佐证,点距 10 m ,最大 AB 距 200 m , $V1$ 延时 40 ms , $V2$ 延时 200 ms ,积分采用 200 ms ,供电周期 16 s ,详见图1。



图1 物探工作平面布置及推断固废范围平面图

Fig. 1 The plane figure of the geophysical prospecting work and the delineated area of landfill

高密度电阻率法采用温纳装置和偶极-偶极装置进行了对比试验,如图 2 所示,两种装置所圈定的异常范围总体趋势一致,细节部分稍有不同。DY01 剖面 0~100 m 处存在高阻异常,电阻率值变化范围为 50~160 $\Omega \cdot m$,剖面 150~320 m 处电阻率值变化范围为 30~60 $\Omega \cdot m$,两处中高阻异常顶板埋深均为 10 m 左右,推断此中高阻异常由工业固体填埋废弃物引起。图 3 中 DY02 剖面 0~120 m、165~260 m、300~410 m 处出现高阻异常,电阻率值为 50~160 $\Omega \cdot m$,推断顶板埋深 10~20 m。

激电测深数据采用时谱激电处理方式得到时间常数 τ 和频率相关系数 c ,见图 4。在剖面 50~120 m 存在一处明显高阻体,与高密度电阻率法反映一致,推断该高阻异常由工业固体填埋废弃物引起,且存在明显的微高极化率、高 τ 、低 c 特征。激电测深的实际深度与 $AB/4$ 距对应较好。高阻区圈定工业固废的顶板埋深约为 10 m,相对高极化区圈定工业固废的顶板埋深约为 20 m,而高 τ 异常区和低 c 异常区所圈定工业固废的顶板埋深约为 15 m。在 DY02 剖面 80 点处进行钻探验证,在孔深 15 m 处见工业废渣,与时谱参数的推断结果更加吻合。

综上所述,此次利用高密度电阻率法快速圈定异常区,后采用激电测深及时谱激电参数进行多参数综合推断,与钻探验证结果相吻合,说明“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法在本场地探测中是行之有效的。四种电性

参数均对工业固废填埋物有明显反应,表现为中高阻、微高极化率、高 τ 和低 c 的电性识别特征,且参数 τ 和 c 的推断埋深更为精准、圈定范围更为可靠。

2.2 生活垃圾填埋场地

某未闭坑生活垃圾填埋场,垃圾填埋区埋深约 20 m,周围介质以粉土、粉质粘土、粉砂为主,地下水位约 20 m,可能存在边部和底部渗漏风险。

本次采用高密度电阻率法和激电测深同剖面测量来相互佐证场地边部渗漏范围。高密度电阻率法采用十字剖面布设,电极距 3 m,最小隔离系数 1,最大隔离系数 15,供电时间 1 s;在垃圾填埋区边部增加激电测深,点距 10 m,最大 AB 距 80 m, $V1$ 延时 40 ms, $V2$ 延时 200 ms,积分采用 200 ms,供电周期 16 s。工作布置见图 5。

如图 6 所示,DG1 剖面浅部普遍存在一层中高阻层,可能受地表硬化地面、垃圾填埋区外延水泥渗坑的旁测影响所致,周围地层的电阻率常见值在 20~60 $\Omega \cdot m$,硬化地面和其它构筑设施的电阻率常见值更高。在剖面 30~70 m、100~140 m 和 160~210 m 分别出现 3 个低于 10 $\Omega \cdot m$ 的低阻区,初步推断此三处低阻区可能由垃圾填埋区边部渗漏造成。

如图 7 所示,激电测深剖面 150~200 m 处存在视电阻率小于 6 $\Omega \cdot m$ 低阻异常区,与高密度电阻率法的效果一致,初步推断其由垃圾场渗滤液

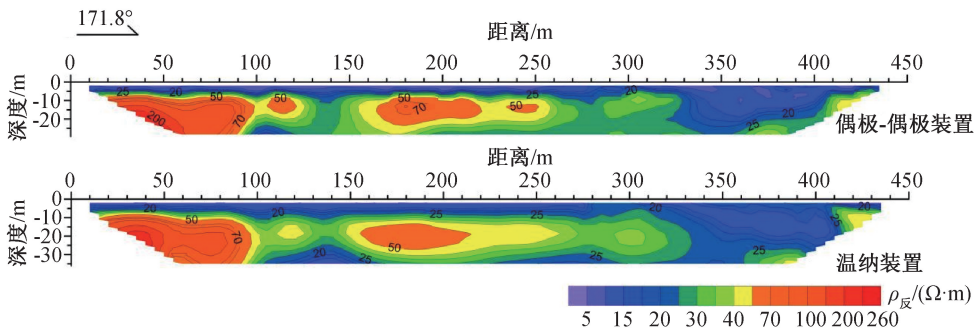


图 2 DY01 剖面高密度电阻率反演断面图

Fig. 2 The high density resistivity inversion section of DY01 profile

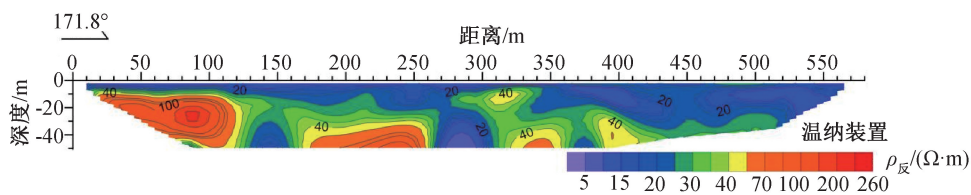


图 3 DY02 剖面高密度电阻率反演断面图

Fig. 3 The high density resistivity inversion section of DY02 profile

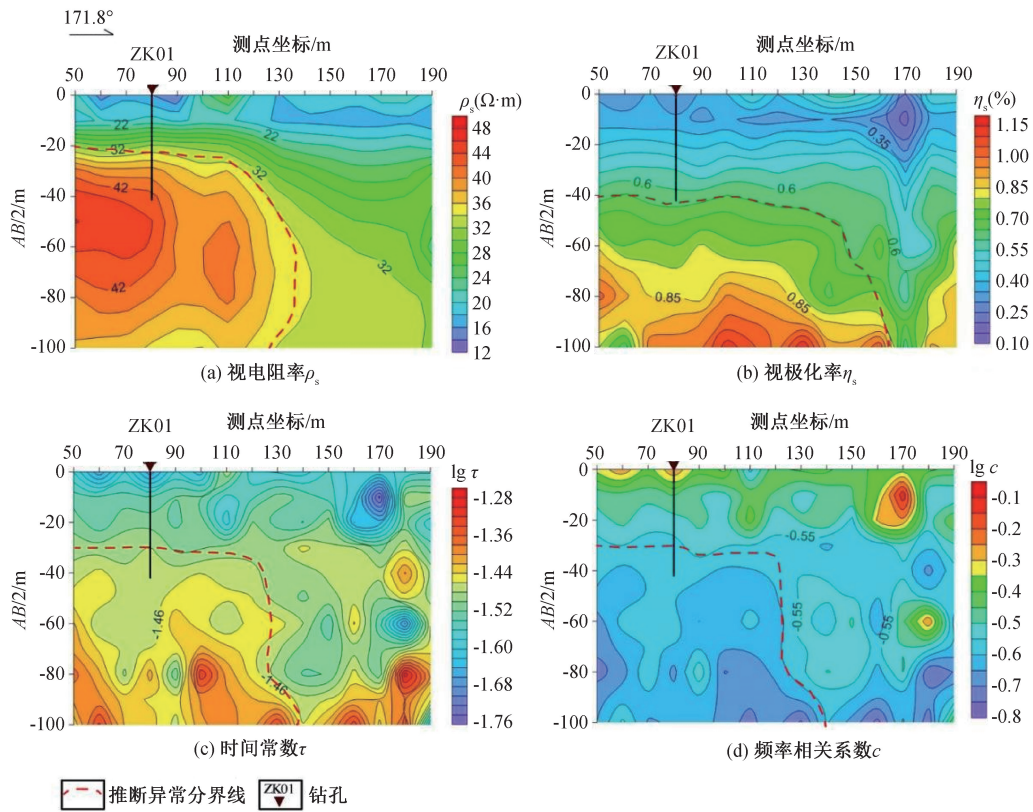


图4 DY02剖面激电参数断面图

Fig. 4 The IP parameters section diagram of DY02 profile

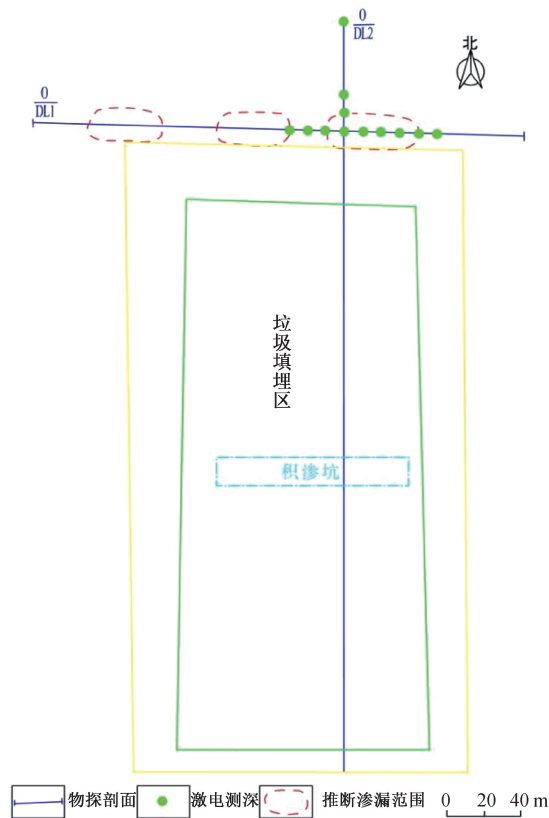


图5 物探工作布置及推断渗漏范围平面图

Fig. 5 The plane figure of geophysical prospecting work and the inferring the influence area of leakage

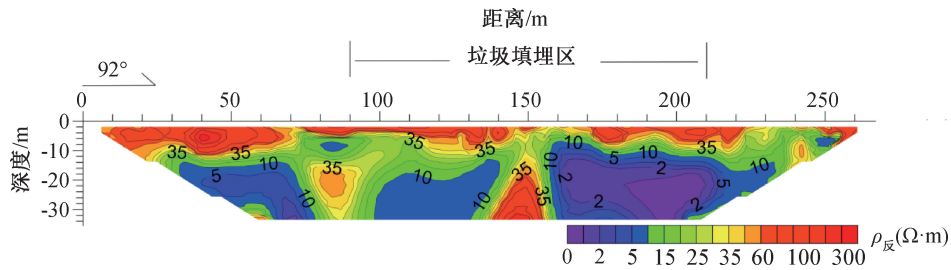


图 6 DG1 剖面高密度电阻率反演断面图

Fig. 6 The high density resistivity inversion section of DG1 profile

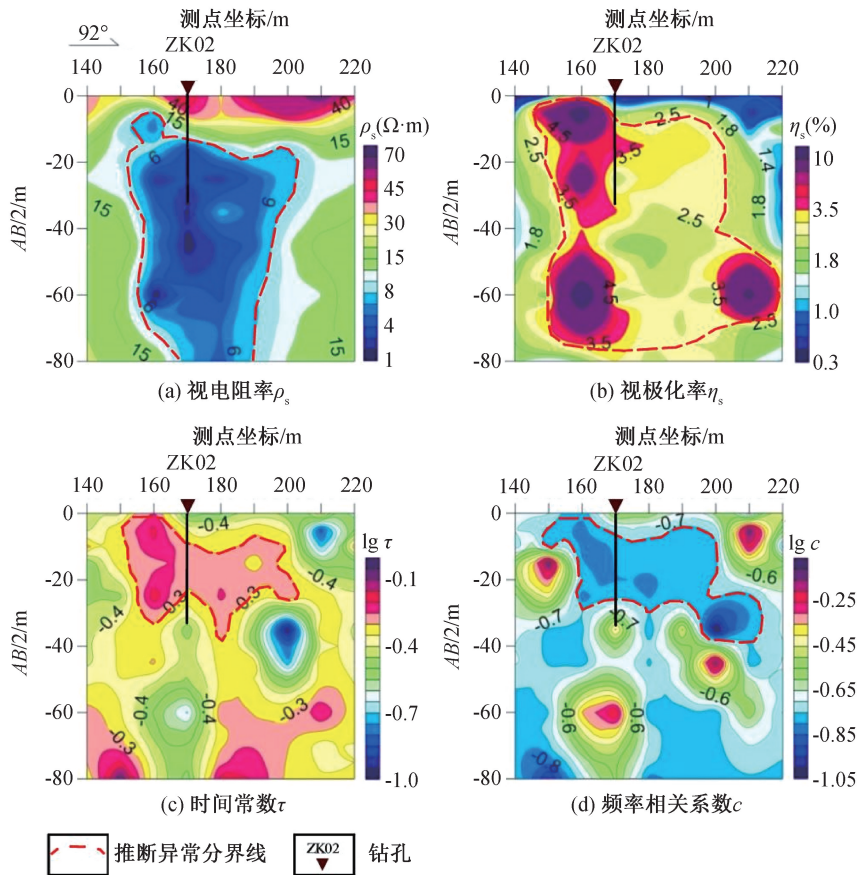


图 7 DG1 剖面激电参数断面图

Fig. 7 The IP parameters section diagram of DG1 profile

污染引起,具有明显的低阻、高极化、高 τ 和低 c 的电性识别特征。图 7 中各参数所圈定的异常范围,电阻率显示的低阻异常范围较大,底部未封闭;极化率反映的高值异常区的范围更大;而 τ 所反映的高值异常区和 c 所反映的低值异常区范围近似,底部埋深约 15 m。在 DG1 剖面 170 点处进行钻探验证,在 5~15 m 深度为渗漏影响范围,孔深 15 m 以下为原状淤泥质土,有效阻隔污染物的扩散。钻探结果揭示出本场地边部渗漏的污染底界面深度约 15 m,与时谱激电参数 τ 和 c 的推断结果更为吻合,从而也证实了淤泥质土层使低阻范围扩大,说明了多方法、多参数相互佐证的重要性。

所圈定的污染区低阻、高极化特征明显;高 τ 说明衰减时间较长,其金属矿物或离子含量较高;低 c 说明其金属矿物或离子分布不均匀。低阻、微高极、高 τ 、低 c 的电性特征明显,多参数套合较好,且参数 τ 和 c 圈定的异常范围更准确。

如图 8 所示在剖面 100~400 m 范围(垃圾填埋区)、0~20 m 埋深为低于 $10 \Omega \cdot m$ 低阻区,主要由填埋区内低阻充填物引起,剖面 245 m 为积渗坑位置,电阻率值低于 $2 \Omega \cdot m$,推断由渗滤液富集引起。剖面 110~140 m 处、埋深 17~30 m,出现低于 $2 \Omega \cdot m$ 低阻异常,底部未圈闭,初步推断由该处 HDPE 土工防渗层渗漏引起。剖面 60~100 m 亦

出现低于 $2 \Omega \cdot m$ 低阻异常,此为垃圾填埋区以外,与 DG1 剖面的低阻区相对应。

如图 9 所示,激电测深断面图中 DG2 剖面 50~60 m 处存在小于 $10 \Omega \cdot m$ 低阻异常区,表现为高极化,高 τ 和低 c 的电性特征,而 0~50 m 为第四系正常背景场的反应,推断该垃圾填埋区的边部渗漏扩散在 DG2 剖面 50~100 m 范围,深度 5~15 m。

生活垃圾的渗漏液往往重金属含量超标、离

子浓度较高,渗漏液与周围介质接触后电化学性增强,使得其导电性、激电性显著提高。此次利用“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法进行了综合推断,与钻探验证结果相吻合,说明了该组合方法的有效性,方法之间相互印证。四种电性参数均对本场地的污染物有明显反应,表现为低阻($<10 \Omega \cdot m$)、高极化率、高 τ 和低 c 的电性识别特征,时谱激电参数 τ 和 c 的推断埋深更

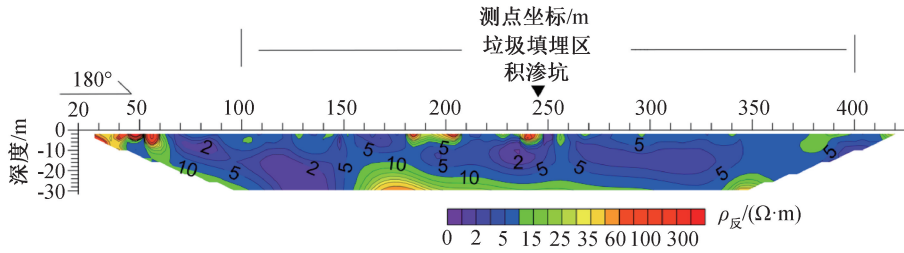


图 8 DG2 剖面高密度电阻率反演断面图

Fig. 8 The high density resistivity inversion section of DG2 profile

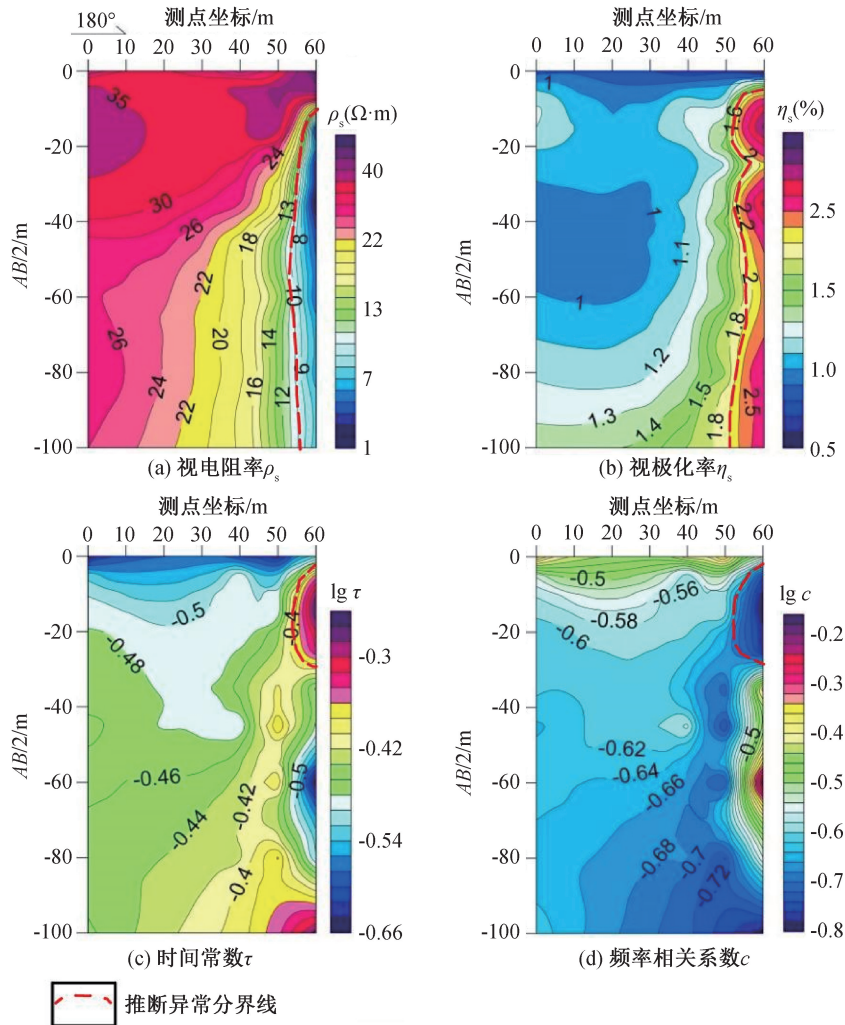


图 9 DG2 剖面激电参数断面图

Fig. 9 The IP parameters section diagram of DG2 profile

为精准、圈定范围更为可靠。

3 结论

1)通过河北省平原区内两类(工业固废填埋物、生活垃圾填埋场渗漏)不同场地的实际探测效果,总结出“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法,该组合方法探测结果是切实有效的,多方法、多参数之间得到了相互印证。

2)利用电阻率、极化率以及时谱激电参数 τ 和 c ,有效圈定了污染物的范围及埋深,揭示了不同污染物/填埋物的电性识别特征;与电阻率和极化率参数相比发现:时谱激电参数所推断的埋深更为精准、所圈定的范围更为可靠。

参考文献:

- [1] ARISTODEMOU E, THOMAS-BETTS A. DC Resistivity and Induced Polarisation Investigations at a Waste Disposal Site and Its Environments [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 44(2-3): 275-302.
- [2] 程业勋, 刘海生, 章元. 城市垃圾污染的地球物理调查 [J]. *工程地球物理学报*, 2004(1): 26-30.
- [3] 刘海生, 侯胜利, 马万云, 等. 土壤与地下水污染的地球物理地球化学勘查 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(4): 307-311.
- [4] 能昌信, 董路, 王琪, 等. 填埋场地电模型的电学特性 [J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 758-760.
- [5] 闫永利, 马晓冰, 袁国平, 等. 大地电磁法在阿苏卫填埋

场地下水污染检测的应用研究 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(6): 1863-1868.

- [6] 牛真茹, 李飞飞, 袁霆, 等. 高密度电法与钻探法点面结合综合探查场地填埋层空间分布特征 [J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2021, 38(2): 79-86.
- [7] 尉斌, 闫永利, 马晓冰, 等. 应用 EIS 观测技术圈定垃圾填埋区范围 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(5): 861-864.
- [8] 李永涛, 金琳, 郑军, 等. 基于地球物理方法的垃圾填埋场污染物检测与监测技术 [C] // 2016 年中国环境科学学术年会论文集 (第二卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 1084-1090.
- [9] 刘兆平, 杨进, 罗余水. 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.
- [10] 李金铭. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [11] 刘崧. 谱激电法 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [12] 孟庆鑫, 胡祥云. 时间域谱激电法地-井观测响应数值模拟 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3): 655-663.
- [13] GUPTASARMA D. Computation of the Time-Domain Response of a Polarizable Groud [J]. *Geophysics*, 1982, 47(11): 1574-1576.
- [14] 程业勋, 杨进. 环境地球物理学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [15] 程业勋, 杨进, 赵章元. 环境地球物理学的现状与发展 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1364-1369.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 85 页)

参考文献:

- [1] 陈洁金, 高超, 晋婉晴, 等. 软弱地层大断面隧道三台阶七步法与临时仰拱法适应性分析的对比研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(S1): 180-186.
- [2] 向海辉, 冯红耀, 赵文强, 等. 软弱围岩隧道不同施工方法数值分析研究 [J]. *公路*, 2020, 65(5): 334-340.
- [3] 朱苦竹, 张书强, 庄瑞鸿. 浅埋软岩大跨度隧道开挖工法研究 [J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2018, 34(1): 66-73.
- [4] 张聚文, 傅鹤林. 浅埋偏压小间距大跨隧道开挖工法的数值分析 [J]. *公路工程*, 2018, 43(3): 26-30.
- [5] 胡志强. 软弱围岩隧道中管棚锁脚台阶法施工技术 [J]. *铁道建筑技术*, 2019(8): 89-92.
- [6] 陶虎, 于品清. 黄土地区隧道锁脚锚管作用机理分析研究 [J]. *人民长江*, 2011, 42(17): 47-50.

- [7] 杨志刚, 肖伯强, 陈培帅, 等. 隧道三台阶开挖锁脚锚管倾角优化研究 [J]. *人民长江*, 2017(16): 60-62+72.
- [8] 伍毅敏, 吕康成, 徐岳. 软弱地基隧道锁脚钢管管承载特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009(12): 71-79.
- [9] 张涛. 软弱围岩隧道锁脚锚杆(管)支护特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [10] 罗彦斌, 陈建勋. 软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型 [J]. *岩土工程学报*, 2013(8): 46-52.
- [11] 陈建勋, 乔雄, 王梦恕. 黄土隧道锚杆受力与作用机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(8): 1690-1697.
- [12] 徐晨. 软弱围岩隧道中锁脚锚杆支护效果研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [13] 黄明琦. 锁脚锚杆作用机理及其在厦门翔安隧道中的应用研究 [J]. *铁道建筑技术*, 2009(7): 86-89.

(责任编辑 周雪梅)