地球物理方法对垃圾填埋场探测的有效性试验研究

刘兆平[1,2], 杨 进[1,2], 罗水余[1]

1. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京) 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083

Liu Zhaoping[1,2], Yang Jin[1,2], Luo Shuiyu[1]

1. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Geo-detection of Ministry of Education, China University of Geosciences(Beijing), Beijing* 100083, *China*

Liu Zhaoping, Yang Jin, Luo Shuiyu. The application of geophysical methods to the analysis of landfill. Earth Science Frontiers, **2010, 17(3): 250-258**

Abstract: In this study, we have conducted experimental research on different types of landfill including construction and household waste in a city of Hebei province by using various geophysical methods, such as high-density resistivity method, ground-penetrating radar method, high-precision magnetic measurement method, induced polarization method and the transient electromagnetic method. According to the measured data and combined with the geological and geotechnical characteristics of the working area, we point out the role and the capacity of different geophysics methods in delineating and monitoring the coverage and spreading trends of the pollution of a landfill. It has been found that the ground penetrating radar method, high density resistivity method, induced polarization method and transient electromagnetic method have some effects in detecting contamination leakage of a landfill. The experimental research shows that besides the high density resistivity method, the induced polarization method also has a good effect in monitoring the scope and trend of pollution and delineating the degree of contamination.

Key words: landfill; geophysical methods; experimental research

摘 要:文中根据在河北省某市两处不同类型垃圾(建筑垃圾和生活垃圾)填埋场上采用多种地球物理方法(高密度电阻率法、探地雷达法、高精度磁测法、激发极化法和瞬变电磁法)进行试验研究所取得的实测资料,结合工作地区的地质和岩土物性特征,通过分析对比,指出了不同地球物理方法在圈定和监测垃圾填埋场的污染范围和扩散趋势等方面的作用和能力。实验证明,垃圾填埋场渗漏污染检测中,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。除高密度电阻率方法外,激发极化法在监测垃圾的污染范围和污染趋势、圈定污染程度方面,效果也很明显。

关键词:垃圾填埋场;地球物理方法;试验研究

中图分类号:P631 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2321(2010)03-0250-09

近年来,随着现代化城市的发展,城市人口的增长,城市垃圾也随之增加。城市垃圾的剧增,堆放和处理地的日益减少,以及由于处理不当所造成的对土壤、地下水的严重污染,加剧了对环境和人体健康的危害。垃圾绕城造成的对土壤和地下水的污染已成世界难题。地球物理勘探方法作为新兴的非侵入性检测方法,具有经济、快速、准确及检测范围广等优点,对污染场地的检测具很强的可行性和推广价值。

收稿日期:2009-10-14;**修回日期**:2009-11-30
基金项目:国家自然科学基金项目(40674068)
作者简介:刘兆平(1969—),女,博士研究生,主要从事环境工程地球物理研究。E-mail: zpliu@cugb.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目前,国外有一些学者利用地球物理方法和技术在垃圾填埋探测和受污物物性方面做了实验研究,积累了宝贵的经验。例如美国工程部队编写的《地球物理勘探在工程和环境调查中的应用》[1],其目的就是介绍地球物理勘探方法在工程、地质及环境包括危险的、有毒的和放射性废弃物调查中的新应用。Aristodemou 和 Thomas-Betts[2]研究了直流电阻率法和时域激发极化法在垃圾填埋场中监测污染物运移的应用。借助于直流电阻率法和时域激发极化法的应用建立了该垃圾填埋场污染物运移的模型,经过分析电阻率的显著不同区分出了垃圾填埋场南、北两部分分别接收不同类型废弃物的结论。Mac Farlane 等[3]在 Borden 垃圾填埋场实验,观测到填埋场底部污染水体由于渗滤液发生放热反应,最高温度比周围正常水温高出 4～5 ℃,形成明显异常区,并且该异常区不会因为外部季节的变化而发生改变。因此可以通过该温度异常检测出渗滤液的扩散范围等。在国内,程业勋等[4]通过采用高密度电阻率法、地质雷达法、瞬变电磁法、地温法等,对北京市两个垃圾填埋场检测垃圾渗漏液的扩散范围、扩散深度进行的实验,比较了各方法的效果并结合钻孔资料,得出了被污染的土壤和地下水呈低电阻率的特征,视电阻率在 10 Ω·m 左右就可定性为被渗滤液污染,可以给出地下污染物的空间位置。能昌信等[5]研究了垃圾填埋场地电物理模型的电学特性,指出土壤电容大小将随所测面积以及电压的增加而增大。闫永利,马晓冰,袁国平等[6]通过对北京阿苏卫填埋场开展大地电磁观测研究,揭示了该地区地下电性结构特征,通过引进模糊数学的隶属函数的理论,给出了分辨地下水污染程度的量化指标,对阿苏卫填埋场地下水污染状况进行了细化分辨。在我国,将地球物理勘查方法用于垃圾填埋场检(监)测尚属刚刚起步。

本文首次针对不同类型(以建筑垃圾为主和以生活垃圾为主)的垃圾填埋场,通过采用高密度电阻率法、激发极化法、探地雷达法、瞬变电磁法、高精度磁测法来进行实验研究,在国内首次将激发极化法和高精度磁测法运用到垃圾填埋场检测中。

1　试验地区的地质概况

1.1　地层结构特征

我们在河北某市选取两处垃圾填埋场进行试验,一处为以建筑垃圾为主(市区东南方向),一处以生活垃圾为主(市区西北方向),两处填埋场相距约 2.5 km。该地区浅层(50 m 以上)的地质时代为第四系全新统(Q_4),该时代含水层 3～4 层,自成一个含水层组,其特征是各层均呈透镜体状。含水层组内,单层含水层厚度 1.5～4.0 m,总厚度 12～13 m。上部岩性为中砂,下部岩性为粗砂。各含水层之间的非含水层,岩性以粉土、粉质粘土为主,水平延伸较稳定。

在该含水岩组以下,(埋深 30～32 m 以下)有一厚度达 24～25 m 的非含水层,岩性以粉质粘土为主,其次为粉土。其岩性特征表现为湿、可塑或硬塑,颜色为黄褐色,含姜石、云母片、螺壳、砂粒等,孔隙发育。非含水层厚度大,水平延伸稳定,对保护第二含水层组地下水免遭污染具有良好的屏障作用(钻孔地质柱状剖面图见下图 1)。

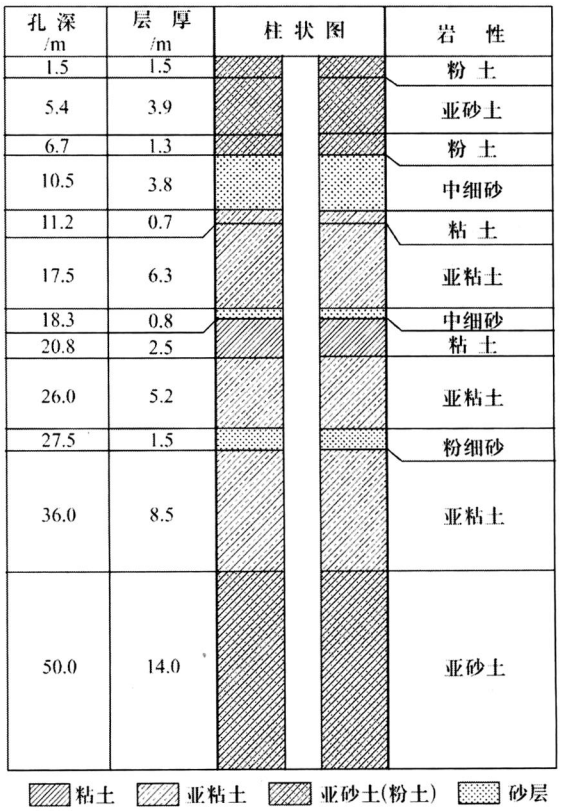


图 1　钻孔地质柱状剖面图

Fig. 1　Drilling geological columnar section

1.2　水文地质特征

该区主要含水岩组为第四系地层,从地表向下含水层划分为 4 个含水岩组:第一含水岩组,相当于全新统,底界面埋深 10～50 m,含水层总厚度一般

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

小于 15 m,含水层岩性一般以中细砂为主,隔水层底板厚 5～15 m,岩性以亚砂土、亚粘土为主。第二含水岩组相当于上更新统,从山前至东部平原,底界面埋深 50～150 m,含水层厚度 40～20 m,并逐渐变薄,岩性从西向东由砾粗砂到中砂、中细砂。下伏隔水层底板厚度 5～15 m 到 20～30 m,岩性为亚砂土和亚粘土。第三含水岩组相当于中更新统,底界面埋深从西向东由 150 m 逐渐加深到 280 m,含水层层数 5～7 层,总厚度 10～30 m,含水层岩性自西向东由砂砾石、粗砂渐变为中粗砂、含砾粗砂。含水层结构上部疏松,下部致密,下伏隔水底板厚度 20～30 m,岩性主要为亚粘土。第四含水岩组相当于下更新统,底界面埋深 340～420 m,含水层厚度 30～50 m,岩性以中粗砂、含砾粗砂为主,下伏隔水层底板厚度一般大于 20 m,岩性为亚粘土。

2 地球物理特征及采用的方法技术

2.1 地球物理特征

表征岩土介质的物理性质有电阻率/电导率、介电常数、传播系数及衰减系数等,表 1 给出了环境勘查中一些常见岩石和介质的电阻率及其变化范围,表 2 给出了常见岩土介质的一些物理参数值[7],这些参数值是地球物理工作的基础。

从表 1 可以看出,生活垃圾的电阻率较低,一般在 1～10 Ω·m,垃圾渗漏液的电阻率非常低,通常 < 1 Ω·m,而建筑垃圾的电阻率较高,一般 > 200 Ω·m。

表 1 不同岩石和介质的电阻率变化范围

Table 1 Resistivity range of different rocks and media

岩石类型	电阻率/ (Ω·m)	介质类型	电阻率/ (Ω·m)
肥粘土、泥灰岩	3～30	民用垃圾	13～30
瘦粘土、泥灰岩	10～40	生活垃圾填埋场渗沥液	0.4
粘土、砂质土、粉砂岩	25～150	倾倒的废石和土壤	200～350
含粘土的砂	50～300	工业淤泥	40～200
砂、砾石(湿)	200～400	废金属	1～12
砂、砾石(干)	800～5 000	碎玻璃和瓷器	100～550
碎石(干)	1 000～3 000	砂铸模	400～1 600
灰岩、石膏	500～3 500	废纸(湿)	70～180
砂岩	300～3 000	被污染的垃圾堆	1～10
盐层和盐丘	> 10 000	焦油	300～1 200
花岗岩	2 000～10 000	使用过的油	150～700
片麻岩	400～6 000	使用过的漆和涂料	200～1 000
		服装清洗剂	30～200
		河水	0.1～100
		地下水	< 100

表 2 一些常见岩土介质的参数值[7]

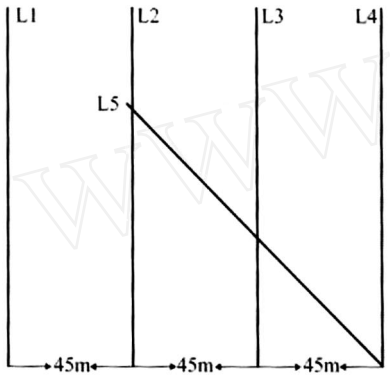
Table 2 Parameters of some common geotechnical media[7]

介质	电导率/ (S·m^{-1})	相对介电常数	传播速度/ (cm·ns^{-1})	衰减系数/ (dB·m^{-1})
空气	0	1	30	0
纯水	10^{-4}～3×10^{-2}	81	3.3～3.4	0.1
海水	1～10	81	3.3～3.4	1 000
冰		3.2	17	0.01
干砂	10^{-7}～10^{-3}	4～6	15	0.01
湿砂	10^{-4}～10^{-2}	25～30	6	0.03～0.3
粘土	10^{-1}～1	5～40	4.7～13	1～300
泥炭		60～80	3.4～3.9	0.3
土壤	1.4×10^{-4}～5.0×10^{-2}	2.6～15	13～17	20～30
灰岩(干)	10^{-9}	7	11	0.4～1.0
灰岩(湿)	2.5×10^{-2}	8		0.4～1.0
花岗岩(干)	10^{-8}	5	15	0.01～1
花岗岩(湿)	10^{-3}	7	10	0.01～1
肥土		15	7.8	
混凝土		6.4	12	

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　试验采用的地球物理方法及探测技术

地球物理勘测方法能清晰地观察到地下异常图像,快速检测垃圾填埋场大范围内污染状况,准确地检测出垃圾填埋场的准确位置、范围等。根据测区地质地层结构特征和地球物理性质变化特征,我们选用高密度电阻率法、激发极化法、探地雷达法、瞬变电磁法、高精度磁测法等几种探测方法进行实验对比分析。在以建筑垃圾为主的填埋场主要采用了探地雷达方法和高密度电阻率法,在以生活垃圾为主的垃圾填埋场试验所采取的方法及测线布置见图 2。为其中 L1—L4 各测线分别采用了探地雷达法、高密度电阻率法、高精度磁测法;L5 测线采用了激发极化法和瞬变电磁法。



L1－L4：探地雷达法、高密度电阻率法、高精度磁测法
L5：激发极化法、瞬变电磁法

图 2　以生活垃圾为主的垃圾填埋场试验所采取的方法及测线布置示意图

Fig. 2　Diagram of geophysical prospecting methods and different layout of testing line in landfill mainly with household garbage

高密度电阻率法通过测量被测物体与背景值的电性差异来推测其空间分布特征,由此测量填埋堆体的范围。测量使用德国 DMT 公司生产的 RESECS 直流电测仪。工作中采用温纳(Wenner)装置进行测量,数据采集系统有较高的精度和抗干扰能力,并可获得较丰富的地电信息。该方法既能提供地质体某一深度沿水平方向岩性的变化情况,又能反映垂直方向岩性变化情况。一次可以完成纵横二维的勘探过程。本次探测中,采用的道间距为 3 m,最大隔离系数 n 为 32。

探地雷达法利用不同地质体介电常数的差异,根据电磁波反射原理进行探测。野外采用美国 GSSI 公司生产的 SIR 系列(SIR-3000)仪器,100 MHz 的天线沿布设的测线进行剖面测量。探地雷达往地下发射高频宽带电磁波,当地下介质结构、形状和介质属性发生变化时电磁波会发生反射和透射。通过地表天线接收反射回来的电磁波来对地下情况进行判断分析。

激发极化法选用北京地质仪器厂生产的 DWJ-3A 型微机激电仪。野外测量中采用测深装置,AB/2 分别选取 3、6、9、15、25、40、65、100 m,MN/2 分别选取 1、5 m。测深点数 8 个,点距 25 m,测线长 200 m。仪器自动显示视电阻率、视极化率、视半衰减时、视累加和、视偏离度和其余 6 个不同延时的视极化率。

瞬变电磁法根据地层介质电导率的差别来区别异常体。采用加拿大凤凰地球物理有限公司(Phoenix Geophysics Limited)最新一代多功能电法仪 V8 系统进行中心回线瞬变电磁测深(CL TEM)的观测。发射采用方形线框,其边长 50 m ×50 m,接收线圈置于发射线框的中心点。野外测量采用两个观测频段(25 Hz 和 5 Hz)进行中心回线瞬变电磁测深,测量点 10 个,观测点距为20 m。

高精度磁测法勘探在某些地下填埋物的探测方面具有优势,因为这些地下填埋物往往具有较强的磁性。高精度磁法勘探在污染场地调查中具有空间的全面性、快速、原位无损的特点。采用国内 CZM-3 型质子磁力仪,布置了 10 条南北方向的剖面,线距 15 m,点距 3 m。GPS 用 GARMIN GPS-72 型仪器进行定位。实测中采用 88 # 仪器进行日变观测,1 # 仪器进行剖面测量。

3　野外实测结果分析

3.1　以建筑垃圾为主的垃圾填埋场

在该实验区主要采用高密度电阻率法和探地雷达方法进行试验,实测剖面图如图 3 和图 4。通过对剖面图进行分析可见,高密度电阻率测线上,高低阻异常明显。视电阻率在 10～40 Ω·m 的区域为未填埋区;视电阻率在 40～100 Ω·m 的区域为填埋与未填埋的过渡带;视电阻率大于 100 Ω·m 的区域为建筑垃圾填埋区。这样划分建筑垃圾填埋区与非填埋区的界线清晰,与地表所见垃圾范围一致。以建筑垃圾为主的垃圾填埋场高密度电阻率剖面反映出高阻特征。探地雷达异常较为明显,且有一定的区域性,填埋界面较为清楚。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

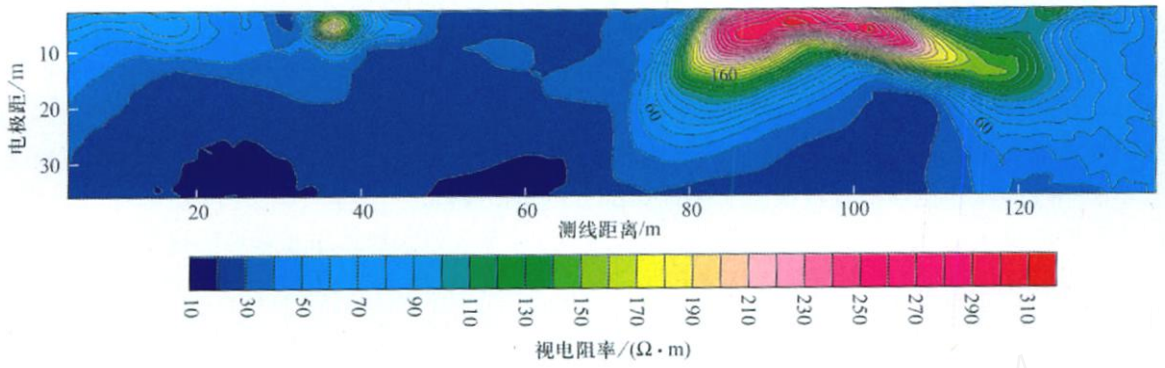


图 3 以建筑垃圾为主的垃圾填埋场高密度电阻率实测剖面图

Fig. 3 The high density resistivity survey profile of waste landfill mainly with construction waste

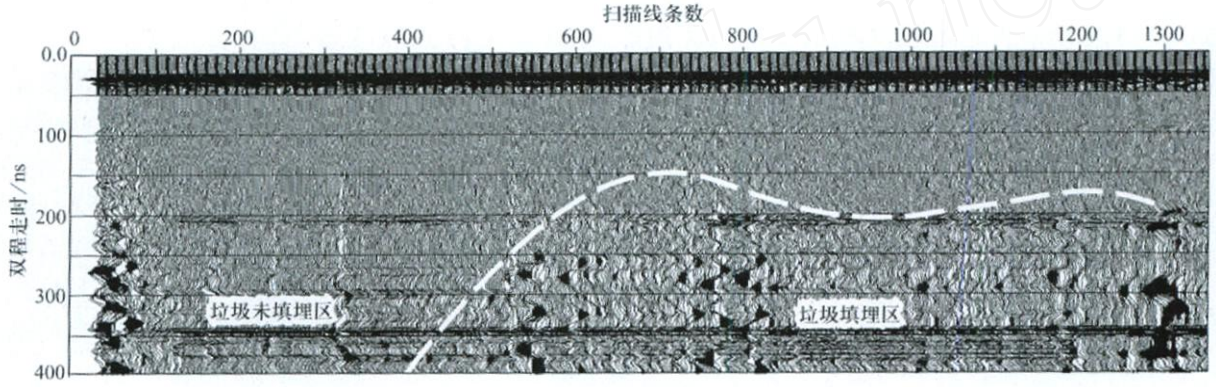


图 4 以建筑垃圾为主的垃圾填埋场 GPR 实测剖面图

Fig. 4 GRP survey profile of waste landfill mainly with construction waste

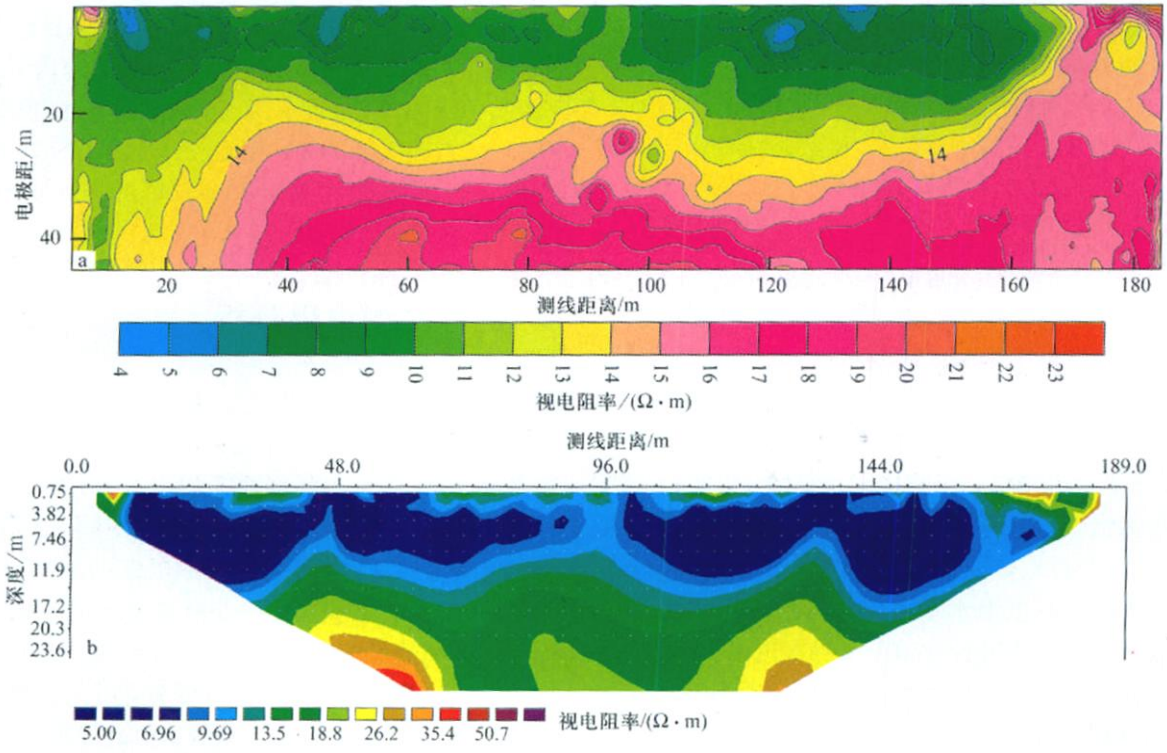


图 5 以生活垃圾为主的垃圾填埋场 L2 测线高密度电阻率实测剖面图(a)和反演效果图(b)

Fig. 5 The high density resistivity survey profile of survey line L2 of landfill mainly with household garbage of Line L2 (a) and inversion effect graph (b)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　以生活垃圾为主的垃圾填埋场

3.2.1　L1—L4线

对生活垃圾填埋场L1—L4线采用的方法有高密度电阻率法、探地雷达法和高精度磁测法。下面以L2线为例分别对各种方法试验效果加以分析。

(1)高密度电阻率法。L2线高密度电阻率法实测剖面图和反演效果图见图5。根据反演结果对测区内的四条测线的剖面做了对比解释。根据比照将剖面均划分为3个电性层:第1层为浅地表的中高阻层,其平均深度为0～3 m,电阻率的变化范围为10～25 Ω·m;第2层为中间低阻层,其平均深度为3～10 m,电阻率的变化范围为1～10 Ω·m;第三层为底部高阻层,其平均深度为10～18 m,电阻率的变化范围为12～50 Ω·m。即纵向上电阻率呈现“中高—低—高”变化的电性分布规律。15 Ω·m的视电阻率等值线指出了垃圾渗漏污染的界线,大于15 Ω·m的等值线为临界区,小于15 Ω·m的等值线为污染区。视电阻率等值线的大小和分布反映了地下垃圾渗漏污染的程度和范围,在一定范围内可以说明视电阻率的大小和渗漏污染的严重程度呈反比。与以建筑垃圾为主的垃圾填埋场高密度电阻率剖面反映为高阻特征相反,以生活垃圾为主的垃圾场高密度电阻率剖面反映为低阻特征。

(2)探地雷达法。L2线探地雷达方法实测剖面图见图6。探地雷达各测线上异常明显,剖面上波形均匀平稳,同相轴连续的区域为未被污染区,反之波形变化较大,电磁波反射强烈的区域为污染区,异常反映越强,污染越严重。根据垃圾场电性特征被污染的垃圾电阻率为1～10 Ω·m,相对介电常数为5～40,电磁波传播速度为0.047～0.13 m/ns。在本测区垃圾渗漏液污染较为严重,电阻率值较低(小于10 Ω·m),故电磁波传播速度约为0.078 m/ns,

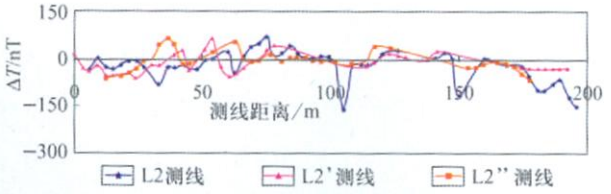


图7　以生活垃圾为主的垃圾填埋场L2、L2'、L2''测线高精度磁测ΔT剖面图

Fig. 7　ΔT profiles of high-precision magnetic measurement of survey lines L2, L2', L2'' of landfill mainly with household garbage

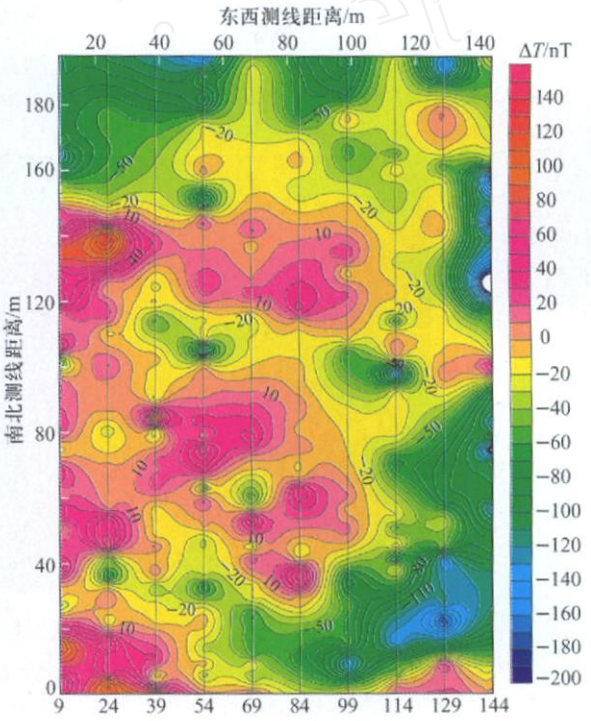


图8　以生活垃圾为主的垃圾填埋场高精度磁测ΔT平面等值线图

Fig. 8　ΔT planar contour chart of high-precision magnetic measurement of landfill mainly with household garbage

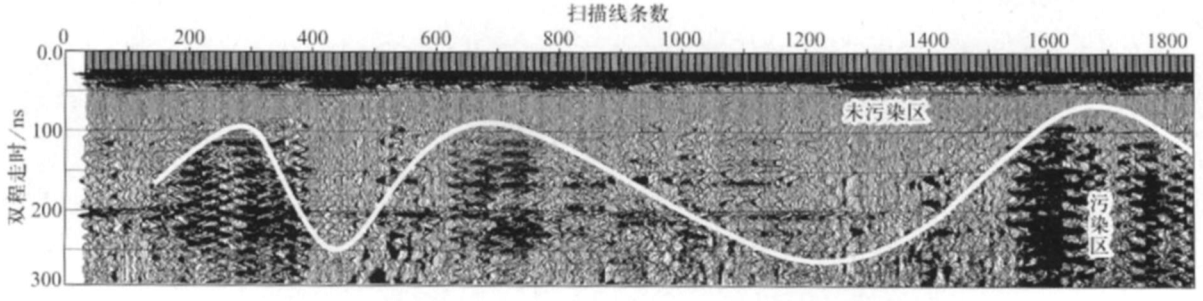


图6　以生活垃圾为主的垃圾填埋场L2测线GPR实测剖面图

Fig. 6　GRP survey profile of survey line L2 of landfill mainly with household garbage

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

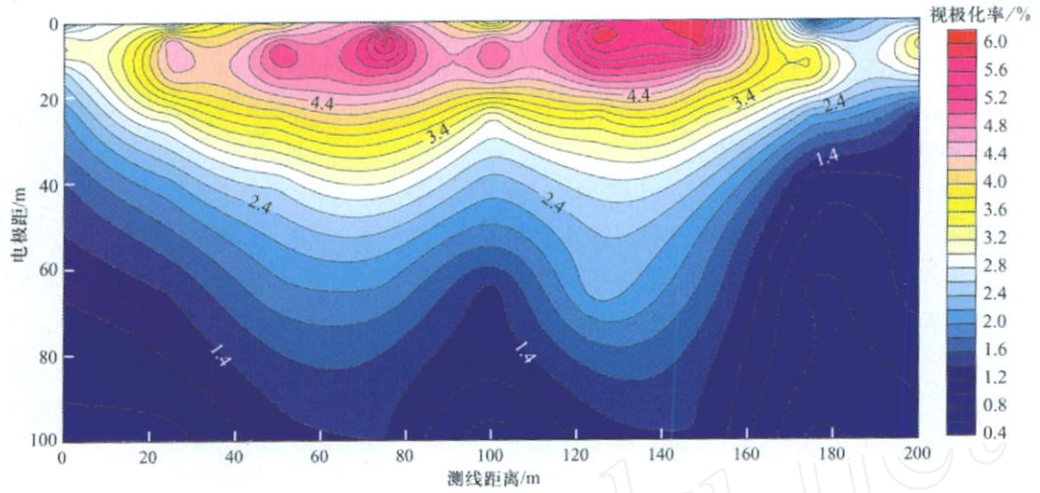


图 9 以生活垃圾为主的垃圾填埋场测线 L5 视极化率断面等值线图

Fig. 9 The contour map of apparent polarization rate of survey Line L5 of landfill mainly with household garbage

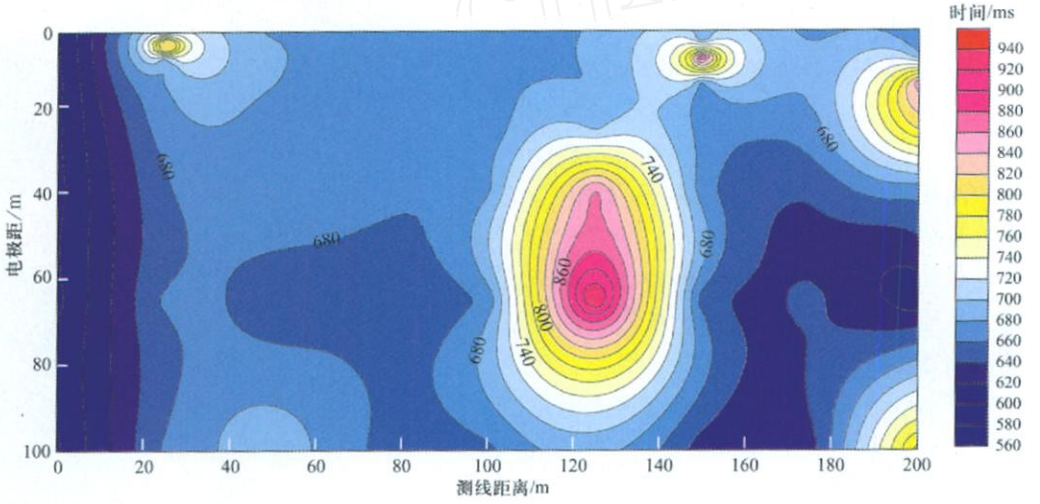


图 10 以生活垃圾为主的垃圾填埋场测线 L5 视半衰时断面等值线图

Fig. 10 The contour map of apparent half-life cross section of survey Line L5 of landfill mainly with household garbage

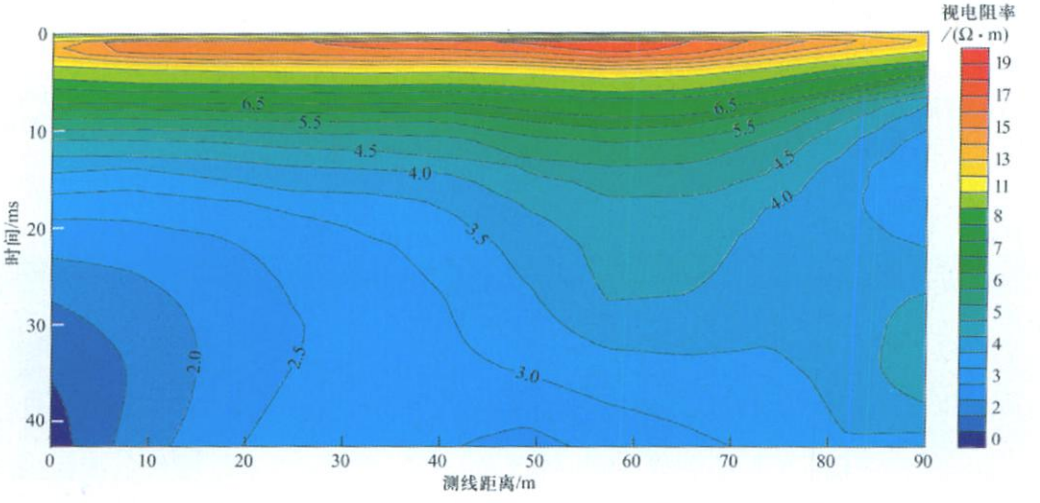


图 12 以生活垃圾为主的垃圾填埋场测线 L5 瞬变电磁晚期视电阻率断面等值线图

Fig. 12 The cross-section contour map of apparent resistivity in the late TEM period of survey L5 of landfill mainly with household garbage

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

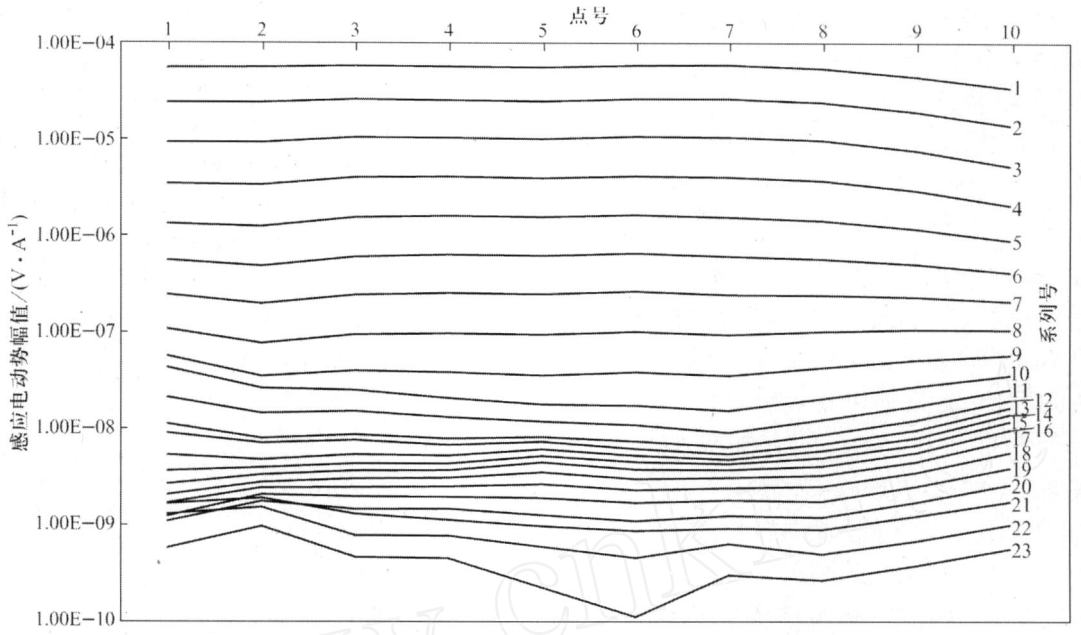


图 11　TEM 多测道 $V(t)/I$ 剖面曲线图

Fig. 11　TEM multi-channel $V(t)/I$ cross section curve

这样探地雷达探测的污染区最大深度约为 15 m。从图中可以清楚地看到两个分层界面。其中第一个界面深度在 162 ns(8.1 m)处,第二个界面在 205 ns (10.25 m)处。可以看出探地雷达方法对反映以生活垃圾为主的垃圾填埋场各个层的分界面和垃圾压实度效果也比较好。

(3)高精度磁测。高精度磁测在测区共做了 10 条剖面,L2、L2'、L2"(L2'、L2'测线为 L2 东侧 15 m、30 m 与 L2 平行的两条测线)测线高精度磁测剖面图见图 7。从剖面图上看,磁异常上下跳动,变化不均,无明显异常规律。但在 ΔT 平面等值线图上,磁异常有明显的分异性(见图 8),测区中心有两个极大值(约大于 20 nT),其极大值外围为次极大值(-20～20 nT),次极小值(-20～120 nT)位于其边部,最小值(小于 -120 nT)集中在测区东南一带。在定性分析的基础上进行了垃圾渗漏污染的磁异常分区,等值线大于 20 nT 的圈闭为严重污染区;等值线为 -20～20 nT 的异常带为污染区;等值线为 -20～120 nT 的异常带为临界区;等值线小于 -120 nT 的范围为未污染区。

3.2.2　L5 线

对生活垃圾填埋场 L5 线,采用的方法为激发极化法和瞬变电磁法,现对其试验效果加以分析。

激发极化法。以生活垃圾为主的垃圾填埋场测线 L5 激电测深所得出的视电阻率及视半衰时断面等值线图见图 9 和图 10。激发极化法的背景值较低且平稳,通常情况下视极化率的背景值小于 1%,当地下存在渗漏污染时视极化率会变大,可达到 7%左右。由图 9 可见,该试验区随 AB/2 的加大,视极化率呈现从 6%减少到 0.4%的变化,说明地表渗漏污染严重。从视半衰时断面等值线图可以看出,视半衰时在 100～150 m 存在高值异常,最大值为 840 ms,而该地区半衰时的背景一般为 600 ms 左右。视半衰时越大,二次场衰减速度越慢,说明被污染程度越深。

瞬变电磁法。以生活垃圾为主的垃圾填埋场测线 L5,TEM 多测道 $V(t)/I$ 剖面曲线图及瞬变电磁晚期视电阻率拟断面等值线图见图 11 和图 12。由于瞬变电磁探测深度较大,因此异常形态基本上反映了垃圾场地下深部的电性特征,对浅部分辨能力较差,未能反映出表层一定范围内的渗漏污染状况。瞬变电磁法剖面晚期视电阻率断面等值线图的异常整体上反映了垃圾污染区的形态,但异常幅度较小,需进一步查证。

4　结论

垃圾填埋问题越来越受到人们的重视,如何来圈定和监测垃圾填埋场的污染范围和污染发展趋势,已经成为科学工作者研究的课题。地球物理方

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

法因其特有的监测和探测优势(工效高、成本低、装备轻便,并且能够快速提供大面积的综合资料等),可做出自身的特殊贡献。

通过我们对河北某市两处垃圾填埋场的五种方法探测研究,确立了垃圾填埋场地球物理探测的有效方法与技术为电磁类方法。实践证明,垃圾填埋场渗漏污染检测中,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。通过试验研究发现,除了高密度电阻率方法外,激发极化法在监测垃圾的污染范围和污染趋势、圈定污染程度方面,效果也很显著。对于不同的地球物理方法其勘探深度各不相同,勘探从浅到深,方法依次是探地雷达法,高密度电阻率法、激发极化法和瞬变电磁法。不能说哪一种方法是最好的、万能的,具体问题应具体分析,从中折中优选出最佳的方法。

随着地球物理技术的不断提高以及环境恶化程度的不断加剧,地球物理方法除了用于解决城市垃圾填埋问题外,在环境污染监测和治理中的应用前景更加广阔,在对环境污染进行监测和治理时,地球物理技术越来越受到人们的重视,已成为解决环境污染不可缺少的重要手段。

References

[1] Crops of Engineers Washington D. C. Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations[R]. New York: ASCE Press, 1995.

[2] 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.

[3] Mac Farlane D S, Cherry J A, Gillham R W. Migration of contaminants in groundwater at Borden landfill, Ontario, Canada[J]. Groundwater Flow Plum Delineation, A Special Issue of Journal of Hydrology, 1983, 63: 1-2.

[4] Cheng Y X, Liu H S, Zhao Z Y. Investigation of urban landfill contamination using geophysical methods[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(1): 26-31(in Chinese).

[5] Neng C X, Dong L, Wang Q, et al. The electricity characteristics of the earth-electricity model in landfill[J]. China Environmental Science, 2004, 24(6): 758-760(in Chinese).

[6] Yan Y L, Ma X B, Yuan G P, et al. Application of magnetotelluric method in groundwater pollution detection on Asuwei refuse sanitary landfill[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1863-1868(in Chinese).

[7] Cheng Y X, Yang J. An Introduction to Environmental Geophysics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 92-113(in Chinese).

参考文献

[4] 程业勋, 刘海生, 赵章元. 城市垃圾污染的地球物理检测[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(1): 26-31.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 程业勋, 杨进. 环境地球物理学概论[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 92-113.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net