

文章编号:1673-9469(2021)02-0079-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.013

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

牛真茹¹,李飞飞²,袁 霆¹,蔡运胜¹,张有军^{1*},刘仕刚¹

(1. 天津华北地质勘查总院,天津 300170;2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司,北京 100089)

摘要: 当各类垃圾埋入地下后,垃圾渗滤液会逐渐由包气带渗入土壤中,对土壤环境造成一定影响。鉴于上部填埋层与下部原状土层之间会存在显著的物性差异,高密度电法定性探查精度有限,钻探勘察耗时耗力且成本高,两种方法优劣互补,对综合查明填埋层的空间分布特征具有实际应用意义。主要利用高密度电法无损探测和钻探法重点勘察的点面结合综合探查了某填埋场,查明了场地的地层结构及填埋层的空间展布情况,借助 Volxer 软件绘制了高密度电法反演形体渲染成果图,同时采用 GMS 软件构建了三维填埋层实体可视化模型,对比分析了两种手段的应用成果,为填埋场污染治理修复与风险管控提供了理论依据。

关键词: 高密度电法;钻孔探查;三维可视化模型;Volxer 与 GMS 联合;

中图分类号:X3

文献标识码:A

Comprehensive Exploration of the Spatial Distribution Characteristics of a Landfill Layer by High Density Electrical and Drilling Method

NIU Zhenru¹, LI Feifei², YUAN Ting¹, CAI Yunsheng¹, ZHANG Youjun^{1*}, LIU Shigang¹

(1. Tianjin North China Geological Exploration General Institute, Tianjin 300170, China;

2. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd, Beijing 100089, China)

Abstract: When all kinds of garbage are buried in the ground, the landfill leachate will gradually infiltrate into the soil from the aeration zone, causing a certain impact on the soil environment. In view of the significant physical property difference between the upper landfill layer and lower undisturbed soil layer, the high-density electrical method is of limited precision, and the drilling survey is time-consuming, labor-consuming and costly, so complementing the advantages and disadvantages of the two methods has practical application significance for comprehensively identifying the spatial distribution characteristics of landfill layer. In this study, a landfill was explored by the combination of high-density electrical method and drilling method, and the stratum structure of the site and the spatial distribution of the landfill layer were found out, and the three-dimensional stratum solid model was constructed, and the spatial distribution of the landfill layer was determined with the Volxer software drawing the rendering results of high-density electrical inversion and constructing the 3D solid visualization model of landfill by GMS software, and analyzing the application results of the two methods, which provided a theoretical basis for landfill pollution control and risk control.

Key words: high density electrical method; borehole exploration; 3D visualization model; Volxer and GMS

收稿日期:2021-01-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51808378);天津华北地质勘查局 B 类科研项目(HK2020-B9);天津市规划和自然资源局科技项目(ML2019-HP-F162);天津市科技计划项目(20YDTPJC00230)

作者简介:牛真茹(1990-),女,河南安阳人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为土壤与地下水污染场地调查与修复、地下水建模。

* 通讯作者:张有军(1989-),男,安徽亳州人,博士,工程师,主要研究方向为污染场地调查与修复、农田污染修复。

现阶段地球物理探测技术作为一种无损探测手段在场地污染调查过程中发挥着越来越大的作用^[1]。固体废弃物填埋是处置工业有害废物和居民生活垃圾的有效方式之一,其中常见的填埋场大部分露天,经长期降雨淋滤与垂向入渗作用,垃圾渗滤液可能会对土壤包气带造成污染影响,受地下水径流与污染运移等作用,进一步对地下水环境造成污染影响,因此精确探查固体废弃物填埋的空间分布特征对污染场地治理修复与风险防控具有实际意义。近年来,国内外很多学者致力于地球物理探测技术在场地环境调查中的应用^[2-5],鉴于高密度电法对填埋层的探查不够精准^[6],仅在面上初步定性识别场地污染特征,定性精度相对较差,而钻探探查埋物时野外工作量大、成本高且耗时耗力等缺点对某些填埋场地调查并不适用,因此研究高密度电法无损探测与钻探法重点勘查的综合探查方法对获取场地埋物的空间分布特征具有指导意义。

本文以天津市某填埋场为研究对象,采用了以高密度电法为“面”的无损探测和以钻探法为“点”的重点勘察,分析了物探反演解译成果与钻探勘察结果,同步借助 Volxer 软件绘制了高密度电法反演形体渲染成果图,利用 GMS 软件构建了三维埋层实体可视化模型,研究了该填埋场埋物的空间分布特征,并对比分析了两种探查手段的应用成果。

1 研究区概况

1.1 场地概况

项目位于天津市某填埋场,目前场地空置,整体较为平整,局部有少数土堆,场地环境现状详见

图 1。根据历年影像资料可知该填埋场的填埋历史较长,填埋层分布范围较大且埋物种类繁多,主要包括各类生活垃圾及工程堆土、建筑装饰废料、混凝土残块等建筑垃圾。



图 1 场地环境现状

Fig. 1 Current situation of site environment

1.2 地层条件

依据《天津市地基土层序划分技术规程》(DB/T 29-191-2009)及水文地质勘察结果,场地地层按成因类型和沉积年代可划分为人工堆积层和第四纪松散沉积层,按地层岩性及其理化性质进一步划分为 4 个大层,分别是:第 1 大层即人工填土层,第 2 大层即全新统上组陆相冲积层,第 3 大层即全新统中组海相沉积层,第 4 大层即全新统下组陆相冲积层,地层特征详见表 1。

结合渗透性对场地地层进行概化,主要概化为 6 层(表 1),然后利用 Horizon 法构建了 Solid 三维地层实体模型(图 2),可知:各地层在整个场地内基本分布连续,不同地层厚度不一,其中黏土④层在场地南侧与西南侧的分布缺失,详见地层单元纵切剖面图 3。

表 1 场地地层划分列表

Tab. 1 Stratigraphic division of the site

分层	地层特征		三维地层概化
人工堆积层	第 1 大层	人工填土层	杂填土①层 概化地层图例 1
	第 2 大层	全新统上组陆相冲积层	黏土④层 淤泥质黏土⑥ ₁ 层 粉砂⑥ ₂ 层 概化地层图例 2 概化地层图例 3
第四纪松散沉积层	第 3 大层	全新统中组海相沉积层	粉质黏土⑥ ₃ 层 淤泥质粉质黏土⑥ ₄ 层 概化地层图例 4
	第 4 大层	全新统下组陆相冲积层	淤泥质黏土⑥ ₅ 层 粉土⑥ ₆ 层 概化地层图例 5
			黏土⑦ ₁ 层 粉质黏土⑦ ₂ 层 概化地层图例 6

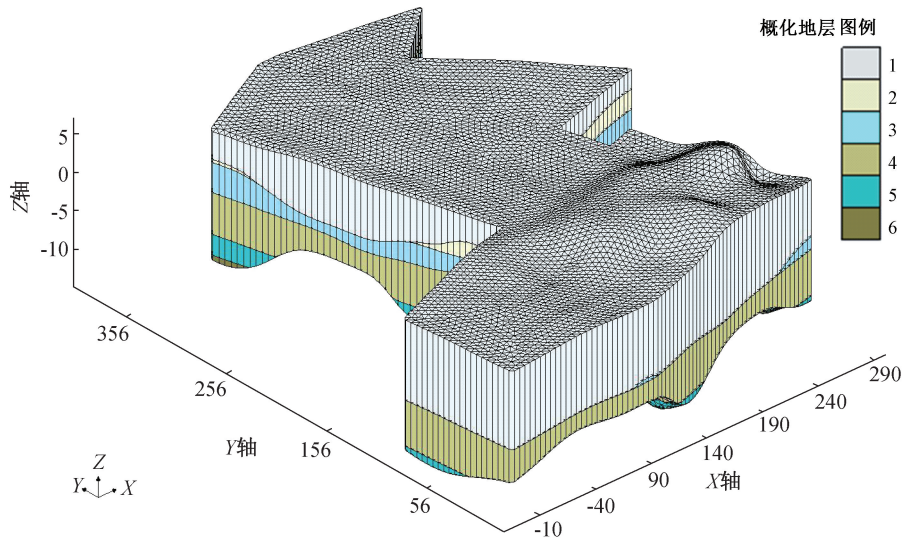


图 2 场地地层单元的三维空间展布图

Fig. 2 Three dimensional spatial distribution of stratigraphic units in the site

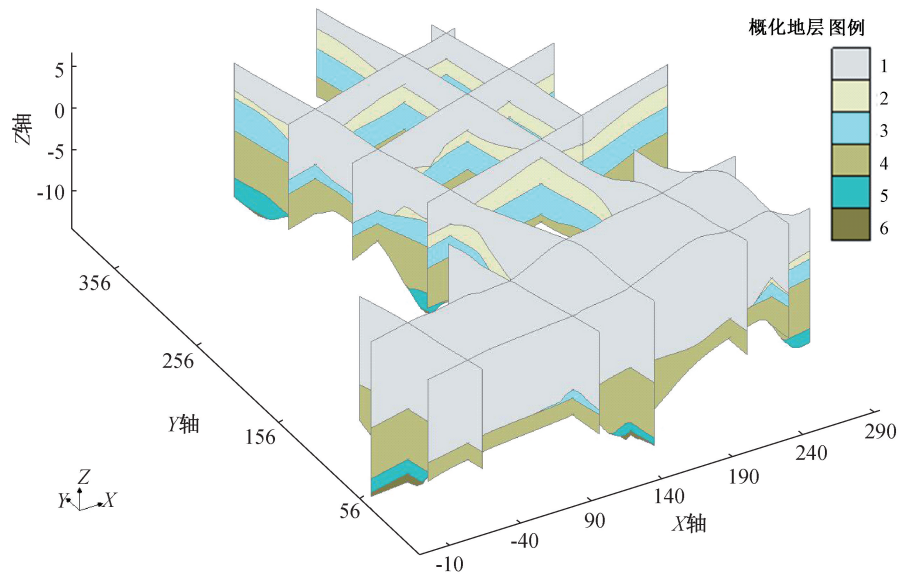


图 3 场地地层单元纵切剖面图

Fig. 3 Longitudinal section of stratigraphic unit in the site

1.3 含水层特征

场地地表以下最大勘探深度范围内主要分布的浅层地下水类型为潜水,含水层整体赋存于粉砂、粉质黏土、粉土及淤泥质粉质黏土层中,其水力特性呈现微承压,其中场地南侧填埋垃圾厚度较大,已埋藏至潜水含水层中,垃圾渗滤液与下部潜水水力联系密切。据统计场地潜水含水层总厚度约为 7.5 ~ 12.1 m,稳定水位埋深为 2.32~6.16 m。

1.4 探查手段可行性

鉴于该场地为人工扰动的填埋场,填埋物质成分繁多且不稳定,其电性主要表现为高阻特征,

下部的原状土稳定层电性特征为低阻反映,即填埋层与稳定的正常沉积层之间存在着显著的电性差异,为开展高密度电法工作提供了良好的地球物理条件;此外,场地整体较为平整,便于开展钻探勘察,即采用高密度电法为“面”与钻探法为“点”的综合探查方法对本填埋场适用。

综上,结合电阻率差异的电性模型特点,借助高密度电法物理探查方法能够查明填埋层与正常沉积层的界面,初步确定填埋层的分布情况;同时利用钻探勘察方法,对物理探查结果进行验证,最终确定填埋层的空间展布范围。

2 高密度电法以“面”无损探查

2.1 高密度电法定点测量

根据填埋场内的具体情况,高密度电法物理探查工作布置采取由北到南、从西至东的编号顺序,研究区共完成了10条剖面线的测量,各剖面线位置依据场地实际环境与工作条件等布设,长度分别为180、198、284和360 m不等,累计剖面线长度3.0 km,高密度电法剖面线布设详见图4。

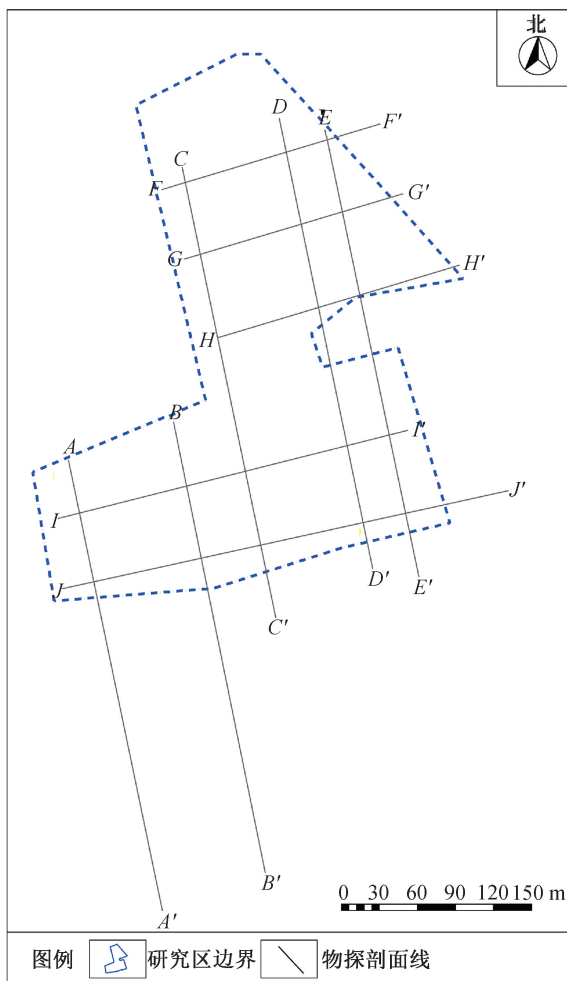


图4 高密度电法剖面线实际布置图

Fig. 4 Actual layout of high density electrical profile

高密度电法采用温纳装置形式进行测量,测量点距2 m,隔离系数为1~10,保证了足够的探测深度和较高的分辨率。

2.2 高密度电法成果分析

根据图5高密度电法测量反演解释推断可知,全区地电断面特征基本一致,总体反映为近地表浅部为相对高阻层,表明了垃圾填埋层的垂向深

度与水平展布情况,其中填埋层分界线详见图5。由此看出,垂向上相对高阻层多在2.1~11.0 m之间,最厚处可达14.0 m左右,初步推测是填埋层的反映,同时在不同剖面或相同剖面的不同区段,高阻异常场值及形态有较大变化,是由于填埋层的成分及埋藏厚度不等等情况造成的,呈现出填埋层极不均匀的状态特征^[8]。

此外,在填埋层下方出现显著的低阻层,相应层位厚度较大,电阻率值一般在0.3~4.0 $\Omega \cdot m$ 之间,埋藏深度在地面以下3.0~15.0 m范围,主要是由富含盐碱水的淤泥质黏土等引起;再往深部的电阻率值逐渐升高,场值多在3.0~10.0 $\Omega \cdot m$ 之间甚至更高,分析认为是由于深部黏土层处于半凝结、凝结状态,其内部含水量变少,局部还有粉砂层的缘故所致,深部地层的界面相对平缓而且连续^[9-10]。

根据各条剖面线上地表浅层电性异常的分布形态,用虚线对高阻异常进行了圈定,对应范围即为推断的填埋层。通过对各剖面线相交处推断填埋层对比分析,得出各剖面推断填埋层结果一致。从填埋层的反映结果得出场地各剖面线特征不尽相同,填埋层厚度不均一、成分种类繁多,但总体分布比较连续。

借助Volxer软件利用上述所有电阻率数据模拟了场地高密度电法反演解释推断形体渲染成果图^[11-12],由此可以看出场地填埋层厚度自北向南逐渐增大,其中西南部填埋层厚度分布最大,详见图6。

3 钻探法以“点”探查填埋层

研究区原为某废弃物填埋场,依据高密度电阻率推断断面结果,同时结合钻孔验证数据(勘察孔布置详见图7),初步确定杂填土层为填埋层,填埋物种类主要包括各类生活垃圾及工程堆土、建筑装饰废料、混凝土残块等建筑垃圾。

根据填埋层三维空间展布图8可知,平面上填埋层分布均匀,布满整个研究区;垂向上填埋层厚度不均,分别自北东向南西厚度逐渐增大;同时由填埋层厚度等值线分布特征(图9)可知,钻孔T13/T14以南的填埋厚度大于8 m,最厚处达13.5 m,而钻孔T13/T14以北的填埋厚度较小,普遍为2~4 m,即填埋厚度以钻孔T13/T14为界,南北两部分厚度发生突变,这与填埋物堆存与回填历史有关。

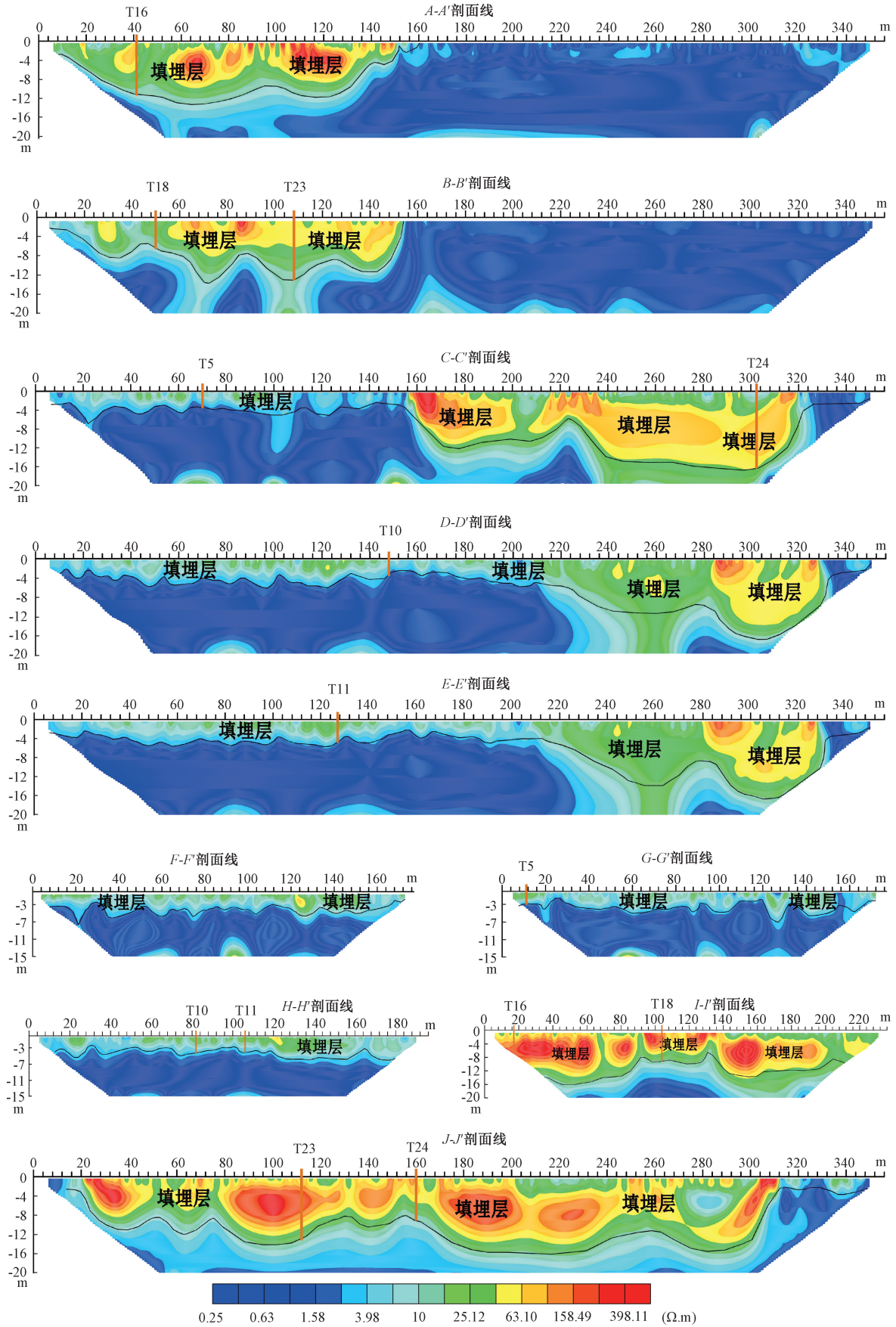


图 5 高密度电法测量各剖面线反演解释推断图

Fig. 5 Inversion, interpretation and inference of each profile line measured by high density electrical method

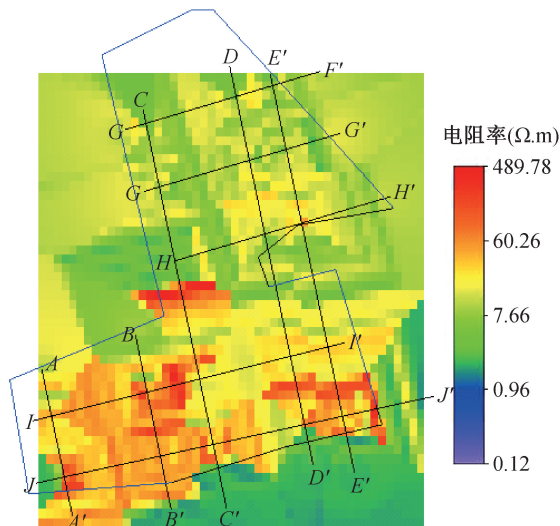


图6 高密度电法反演数据形体渲染成果图
Fig. 6 Rendering results of high density electrical inversion data

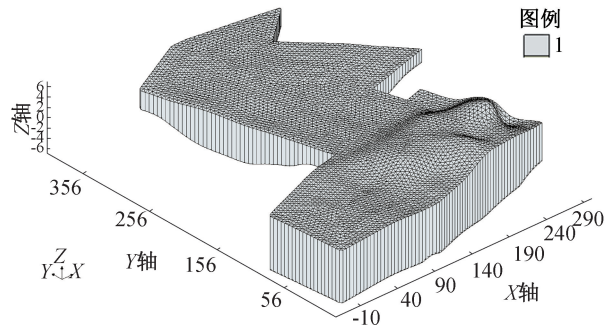


图8 场地填埋层的三维空间展布图
Fig. 8 Three dimensional spatial distribution of landfill layer in the site

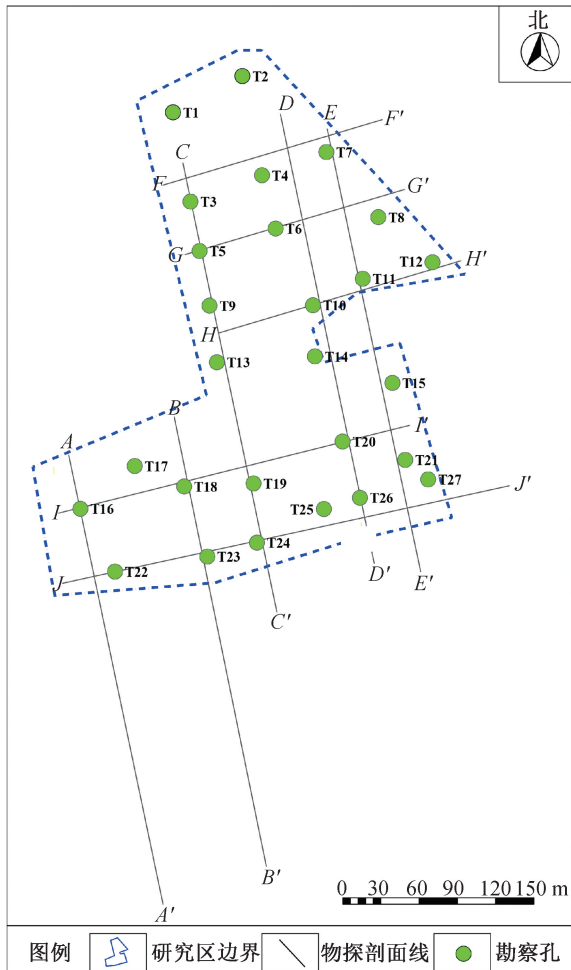


图7 钻探法勘察孔布置图

Fig. 7 Layout of exploratory holes by drilling method

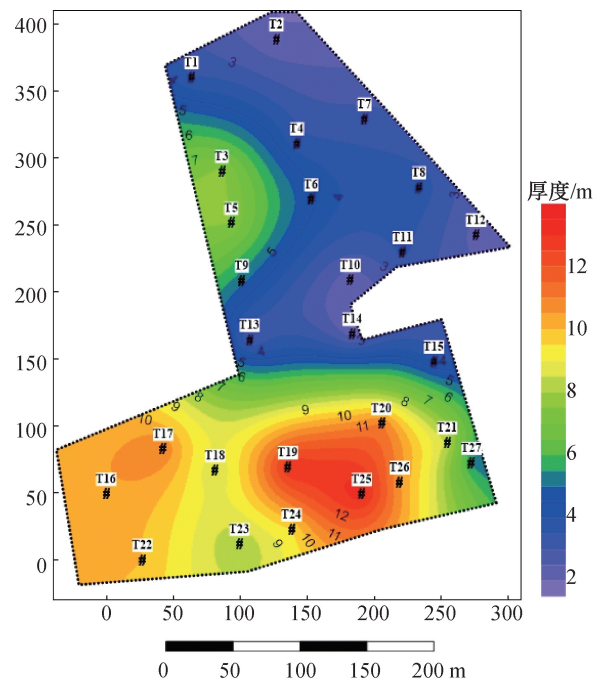


图9 场地填埋层厚度等值线分布特征图
Fig. 9 Contour distribution characteristics of landfill thickness in the site

4 填埋层综合探查

汇总场地高密度电法反演推断成果与钻探勘

察验证结果,两种手段整体上对填埋层空间分布的探查情况基本一致,分述如下:

(1) 高密度电法剖面线 $A-A'$ 、 $I-I'$ 、 $G-G'$ 、 $D-D'$ 和 $E-E'$ 分别穿过主要钻孔 T16、T18、T5、T10 和 T11,垂向上高密度电法反演的填埋层深度与揭露的填埋物厚度基本一致,其中钻孔 T18 揭露填埋层(杂填土层)厚度为 8.5 m,剖面线穿过钻孔 T18 位置的填埋层厚度为 9.3 m,钻孔 T11 揭露填埋层(杂填土层)厚度为 3.6 m,剖面线穿过钻孔 T11 位置的填埋层厚度为 4.8 m,详见反演推断图 5 与典型钻孔柱状图 10。

(2) 高密度电法剖面线 $J-J'$ 、 $C-C'$ 分别穿过主要钻孔 T23、T24,垂向上高密度电法反演的填埋层



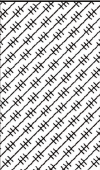
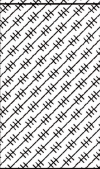



钻孔编号	T18	钻孔性质	勘察孔	孔深/m	10.0	初见水位埋深/m	3.00
地层年代	层底深度/m	地层厚度/m	地质柱状 1:100	岩性描述			
Q ₄ ¹ m	8.5	8.5		杂填土:以生活垃圾与建筑垃圾为主,呈杂-黑色,中密,稍湿-饱和,含碎石、砖渣、灰渣、塑料袋等,其中0~0.2 m为黄褐色的黏质粉土填土			
	10.0	1.5		粉质黏土:呈灰色,中密,湿,可塑,含云母、有机质,土质不均			
钻孔编号	T23	钻孔性质	勘察孔	孔深/m	12.0	初见水位埋深/m	6.70
地层年代	层底深度/m	地层厚度/m	地质柱状 1:100	岩性描述			
Q ₄ ¹ m	2.7	2.7		杂填土:以建筑垃圾为主,呈杂色,中密,稍湿,含砖渣、灰渣等,其中0~0.6 m为褐色的黏质粉土填土			
	5.3	2.6		杂填土:以粉质黏土填土为主,呈灰色,中密,稍湿,软塑,含蚌壳皮、砖渣等			
	8.0	2.7		杂填土:以生活垃圾为主,呈杂色,中密,稍湿-饱和,含塑料袋、砖渣等			
Q ₄ ² m	10.0	10.0		粉砂:呈灰色,中密,饱和,含云母、有机物、贝壳皮等			
	12.0	2.0		粉质黏土:呈灰色,密度较低,湿,软塑,含云母、有机质			

图 10 场地典型钻孔柱状图

Fig. 10 Site typical borehole histogram

深度相对钻孔揭露的埋物厚度较大,其中钻孔 T23、T24 揭露埋土层(杂填土层)厚度分别为 8.0、

9.5 m,剖面线穿过钻孔 T23、T24 位置的埋土层厚度分别为 13.8、15.6 m,推测可能受地层含水率及

岩性等影响,同时表明高密度电法无损探查填埋物的空间展布具有一定受限性,详见反演推断图5与典型钻孔柱状图10。

(3)根据物探断面推断结果填埋层的平均厚度为6.80 m,场地内钻孔揭穿填埋层的累计厚度约为180.60 m,加权平均后,平均厚度约为6.65 m,两者数据非常接近,再次证实了高密度电法无损探查成果的真实性与可靠性。

5 结论

1)高密度电法测量反演解释推断结果总体反映了近地表浅部为相对高阻层,厚度多在2.1~11.0 m之间,最厚处可达14.0 m左右,初步认为是填埋层;同时在不同剖面或相同剖面的不同区段,高阻异常场值及形态有较大变化,这是由于填埋层的成分及埋藏厚度不等、成分种类繁多等情况所造成,表现出填埋层极不均匀的状态特征,但总体分布比较连续。

2)根据钻探探查可知,平面上填埋层分布均匀,布满整个研究区;垂向上垃圾填埋厚度不均,分别自北向南西厚度增大。

3)对比高密度电法和钻探探查垃圾填埋层的过程分析,综合考虑实际场地情况,在高密度电法精确度分析的短板上增加钻探实测,一方面可详细且精确地查明场地地层与填埋层的空间展布特征,另一方面也减少了工作量并节省了成本,对于今后的场地土壤污染调查具有一定指导意义。

参考文献:

- [1]夏凡,郝明亮,宋洪伟.高密度电法在河北某垃圾场污染调查中的应用分析[J].地下水,2015,37(6):112-114.
- [2]徐飞印,谢鹏.高密度电法在某废弃物填埋场探测中的应用[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2019,21(1):43-47.
- [3]黄彪,朱源婷.高密度电法在武汉市生活垃圾填埋场的环境调查[J].贵州地质,2019,36(3):261-266.
- [4]夏群,王蓉,李韬.基于电阻率综合测试的污染场地快速诊断方法研究[J].上海国土资源,2016,37(2):65-70.
- [5]陈峰.高密度电法在污染场地调查中的应用研究[J].环境与发展,2018,30(07):25-26.
- [6]徐子东,师学明,傅庆凯,等.武汉某回填土堆场高密度电法污染调查研究[J].工程地球物理学报,2011,8(5):542-546.
- [7]杨良权,李波,彭涛,等.综合物探技术在园博园湿地垃圾坑勘察中的应用[J].工程勘察,2013(2):88-95.
- [8]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中的应用[J].水文地质与工程地质,2010,37(2):21-26.
- [9]于光文,王颖,王经纬,等.物探技术和GMS模型在非正规垃圾填埋场调查中的实际应用[J].环境工程,2019,37:1107-1111.
- [10]叶腾飞,龚育龄,能昌信,等.环境地球物理方法在污染场地调查中的应用[J].南华大学学报:自然科学版,2008,22(3):9-14.
- [11]刘慧鹏,李文尧. Voxler 在 EH4 数据资料成图中的应用[J].云南地质,2010,29(1):98-101.
- [12]GONG Shengping, YANG Yabin, WANG Mingming, et al. A 3D Graphical Representation Method to Deposit Geology Using Volxer [J]. CT Theory and Applications, 2015, 24(5): 761-768.
- [13]黄静莉,王清.基于GMS的城市地下空间三维工程地质地层建模[J].长春工程学院学报:自然科学版,2012,13(1):74-77.

(责任编辑 王利君)