

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.04.09

基于高密度电阻率法的雄安新区埋埋坑塘探测效果分析

苏永军¹,胡婷¹,曹占宁¹,范翠松¹,韩博¹,滕菲¹,刘继红¹,申由甲²

(1.中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心),天津 300170;

2.天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384)

摘要:为探索有效探测雄安新区埋埋坑塘的地球物理方法,本文尝试应用高密度电阻率法探测雄安新区已埋埋坑塘的空间特征,其解译结果与等值反磁通瞬变电磁法剖面反演结果相互印证,后经槽探和钻孔验证,高密度电阻率法反演结果解译的埋埋坑塘的范围和埋深与验证结果基本吻合,该方法在横向和纵向上具有良好的分辨率,能获得浅部丰富的地质信息,达到了精细化探测目的,应用效果显著。高密度电阻率法在雄安新区探测埋埋坑塘的成功尝试,为今后雄安新区及其它类似地区探测埋埋坑塘方法选择提供了借鉴和参考。

关键词:高密度电阻率法;等值反磁通瞬变电磁法;埋埋坑塘;钻孔;雄安新区

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2023)04-0070-06

中共中央、国务院于2017年4月1日决定设立河北雄安新区,这是以习近平同志为核心的党中央作出的一项重大的历史性战略选择,是继深圳经济特区和上海浦东新区之后又一具有全国意义的新区,具有重要的现实意义和深远的历史意义,是千年大计、国家大事。为贯彻习近平总书记关于雄安新区规划建设的重要讲话精神,中国地质调查局实施了雄安新区大规模工程地质勘察工作^[1-5],取得一系列勘查成果,为雄安规划建设提供了有力支撑。

为使雄安新区城市建设更科学合理利用地下空间资源,避免不利地质条件的影响,警惕地面沉降、地裂缝、含水砂层、坑塘(土坑、水塘和埋埋坑塘)等不良工程地质问题,需要对此类地质问题进行探测。2018年7月17日人民网报道,在雄安新区城市建设中,雄安新区三县共排查出纳污坑塘810个;其中有水纳污坑塘606个,露天坑塘易排查,而近地表已埋埋坑塘中的软土等埋埋物,可导致地基失稳、建筑物破坏,危害人民生命和财产安全。因此,急需精准探测埋埋坑塘的平面位置和地下空间展布特征。目前探测地裂缝、垃圾埋埋场、含水砂层等不良地质体有地质雷达、高密度电阻率法、浅层地震等地球物理方法^[6-11],笔者在雄安新区调查埋埋坑塘的过程中,尝试把高密度电阻率法应用到其中一处埋埋坑塘调查当

中,查明了埋埋坑塘的范围和埋深,调查结果得到其它地球物理方法探测成果印证,同时与钻探结果基本吻合,该方法在探测埋埋坑塘方面有效可行、效果显著。本次对已埋埋坑塘的成功尝试,为今后雄安新区及其它地区探测埋埋坑塘方法的选择提供了参考依据。

1 研究区地质地球物理概况

雄安新区地处北京、天津、保定腹地,涉及河北省雄县、容城、安新3县及周边部分区域(图1),区位优势明显、交通便利、环境承载力较强。全境内地势由西北向东南逐渐降低,地面高程多在5~26 m,地形坡降小于2‰^[12],属堆积平原地貌。文中埋埋坑塘研究区位于安新县城西南方向6 km左右。

1.1 浅表地层特征

雄县-容城-安新全境及周边部分地区地表出露地层为第四系松散层,区内浅层沉积物主要为第四纪以来冲洪积、冲积和冲湖积形成,岩性以粉质黏土、粉土、粉砂、中细砂和黏土为主,成因类型以冲积、洪积、湖积为主^[13]。研究区新生界自上而下主要由以下层位构成:

(1)全新统(Q_h):全新统底板埋深一般7~12 m,主要为冲积、冲(洪)积-湖积和湖积的堆积物。下部

收稿日期:2023-10-11

资助项目:中国地质调查局项目:“华北地区大地电磁基础调查(DD20230234)”、“京津冀协同发展区暨雄安新区资源环境承载能力监测评价”(DD20221727);“雄安新区水土质量与地质调查评价(DD20189122)”

作者简介:苏永军(1981-),男,硕士,正高级工程师,地球物理专业,现从事水工环、矿产等方面的地球物理调查研究,E-mail:syj95123@163.com。



图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

岩性为灰黄色粉质黏土和粉土,上部岩性多为黄棕色粉土。

(2)上更新统(Q_p^3):上更新统底板埋深一般50~60 m,主要为冲洪积、冲(洪)积-湖积的堆积物,岩性以粉质黏土、粉土及不同粒级的砂、砂砾石为主。

(3)中更新统(Q_p^2):中更新统底板埋深一般70~80 m,主要为冲洪积、冲(洪)积-湖积的含砂粉质黏土、黏土夹砂及砂砾石的堆积物。

(4)下更新统(Q_p^1):下更新统覆盖于新近系之上,底板埋深约300 m,主要为冲洪积及冲(洪)积-湖积黏土、粉质黏土夹砂砾石。

1.2 地球物理特征

通过对雄安新区以往物性资料和该区300余口工程地质钻孔测井参数的综合分析^[14],显示研究区浅层岩性具有明显的电阻率差异(表1),浅表被素填土覆盖,电阻率相对黏土、粉质黏土为相对高阻,具备开展以电阻率差异为物性前提的地球物理探测和电阻率反演结果查明填埋坑塘的物性条件。

表1 雄安新区岩性电阻率参数统计表
Table 1 Statistics of resistivity parameters in Xiongan New Area

岩性	常见电阻率值($\Omega \cdot m$)
黏土、粉质黏土	5~25
细砂、粉砂	35~90
中细砂	75~140

2 探测方法及测线布置

2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法属于电阻率法的范畴,它是以地下岩(土)体的电性差异为基础的一种探测方

法^[15-16]。该方法成本低、效率高、信息丰富、解释方便,被广泛应用在水工环地球物理调查工作中。

野外数据采集使用骄鹏公司生产的GEOPEN E60DN型高密度电阻率仪,数据采集采用温纳 α 装置,点距为2 m,隔离系数26和叠加次数2次。

2.2 等值反磁通瞬变电磁法

等值反磁通瞬变电磁法是传统瞬变电磁法发展起来的新理论新方法^[17-18]。等值反磁通瞬变电磁法采用反向对偶磁源作为发射源,并在反向对偶磁源的中间平面接收,从而消除收发互感的影响,接收到地下纯二次场响应。广泛应用公路铁路勘察、岩溶、空洞等应用领域,已取得较好的应用效果^[19-22]。

本次探测采用设备为湖南五维地质科技有限公司制造的HPTEM18高精度瞬变电磁系统,定点测量模式,根据探测深度20 m的需求,采用发射频率25 Hz,观测最晚延时10 ms,叠加次数400次,采用驻点方式测量。

2.3 测线布置

根据研究区现场位置,笔者在研究区建立相对坐标系,以研究区东南角点坐标为起始原点 $O(0,0)$,围绕填埋坑塘土路NNE方向为X坐标,垂直土路方向为Y坐标,垂直土路X方向布置高密度电阻率法测线10条,剖面长度160 m,线距10 m,线号数为由南向北离原点的距离,线号(L10~L100)由南向北依次增加;点距2 m,由东向西点号依次增加,研究区测线布置见图2,为相互验证方法的有效性,在L70剖面附近布设一条L71等值反磁通瞬变电磁法剖面,长度42 m,点距2 m,点号由东向西依次增加,由于该剖面测量时正是农田庄稼生长期,剖面测点只在土路和农田之间的空间开展,见研究区测线位置图(图2)。

3 结果分析及验证

3.1 剖面分析

对高密度电阻率法原始数据预处理后,利用软件Res2dInv进行数据处理得到反演电阻率断面图,见图3,从10条反演电阻率剖面图来看,剖面0~80 m段,呈现上部的低阻区为农田种植区,为黏土和粉质黏土;中下部中高阻区域为原砂土;80~115 m段,每条长剖面上均有一条30~40 m长、10 m左右厚的透镜状低阻异常区,呈开口向上偏平近似“C”字形,根据地电特征,该低阻异常带推测为填埋的坑塘范围,圈定其边界见图中的黑色虚线所示。圈定低阻

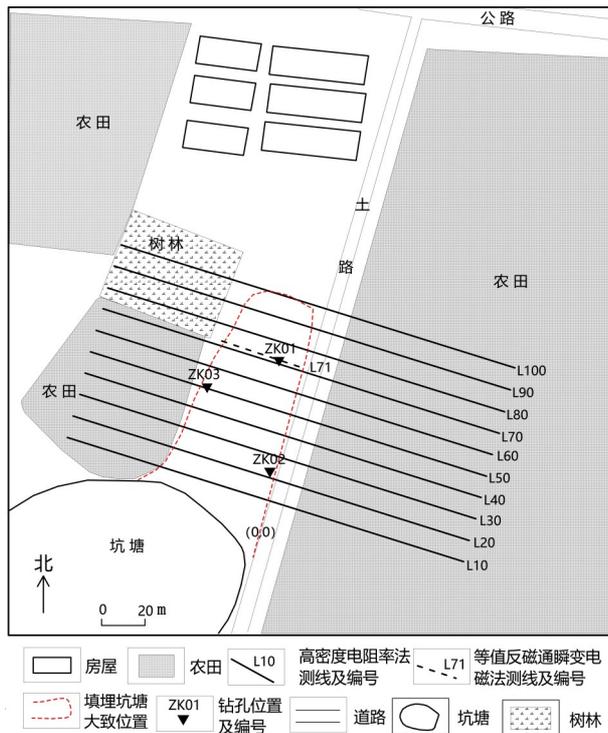


图2 研究区地物及测线位置图

Fig.2 Surface features and line location map of the study area

异常区的上部有一相对高阻的层状异常,推断该相对高阻层为生活垃圾和建筑垃圾的混合体,其下部低阻异常区推断为回填松散的粉土和黏土,可能含水。L0~L70剖面120~160 m段呈现上部低阻区为农田种植区,下部中高阻为原砂土。L80~L100剖面120~160 m段整体呈现高阻异常特征,3条剖面位于研究区西北部树林内,推断该高阻异常为树林原土的引起。剖面中高电阻率背景层为原砂土,依据该区物性统计表,原砂土推断为粉土、细砂和粉砂层。

3.2 三维特征分析

基于 Encom Discover PA 软件平台可以实现空间数据的三维可视化分析。三维可视化显示所含地质信息丰富^[23],可根据需要设定三维显示的参数,获取不同方向的切片图、等值面图、阈值等一系列直观图件,满足地质解释的需要。笔者通过三维网格化得到研究区内高密度电阻率法反演电阻率三维立体图(图4),图4a为其椅切图,X、Y方向裁剪范围为0~85 m、0~103 m,Z方向裁剪范围为11 m以浅;图4b为其阈值高低图,电阻率值裁剪范围为12.5~17.5 $\Omega \cdot m$ 。从图中可以看出有一蓝色的低阻异常体,为推断的已填埋坑塘位置,见图中虚线所示,从中可以直观地看出填埋坑塘的范围、空间展布形态、

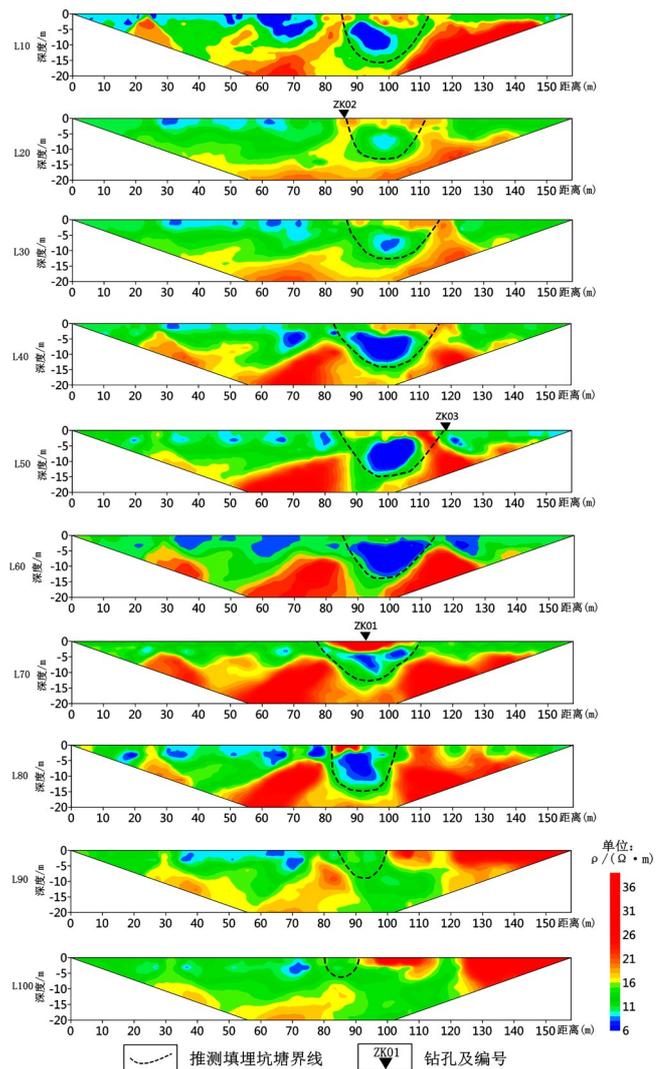


图3 高密度电阻率法反演电阻率剖面及解释图

Fig.3 Inversion resistivity profiles of high density resistivity method and interpretation results

掩埋体各层位的埋深及起伏形态等信息。

3.3 相互印证剖面

为印证高密度电阻率法探测填埋坑塘解释结果的可靠性,在高密度电阻率法L70剖面旁边布置等值反磁通瞬变电磁法剖面L71剖面进行小点距精细化探测,经过反演处理,从该剖面电阻率反演断面图5中可以看出,有一开口向上偏近近似“C”字形的低阻异常区,根据地电特征,该低阻异常带推测为填埋的坑塘,填埋坑塘的范围边界见图中的黑色虚线所示,其中该低阻异常区中上部相对高阻异常区和下部相对低阻区在反演剖面图中均有反映,等值反磁通瞬变电磁法反演填埋坑塘的几何形态、埋深和坑塘内掩埋体地层特征与高密度电阻率法解释结果基本一致,相互印证了其解释结果,说明两种地球物理方法

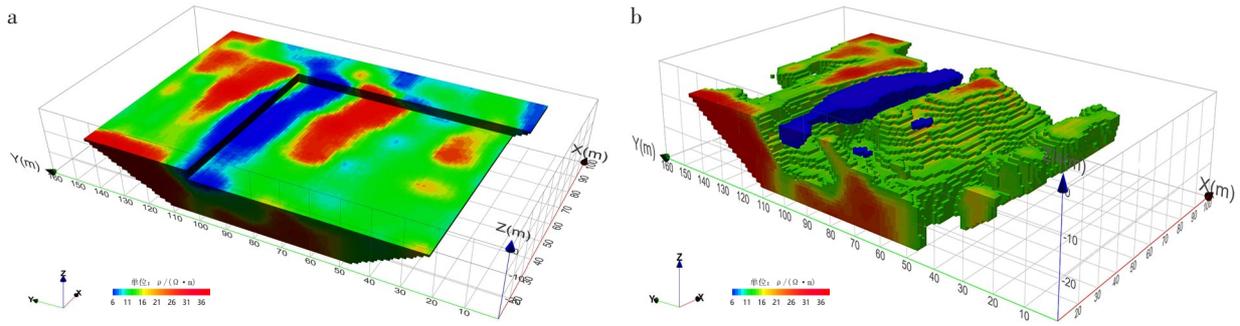


图4 高密度电阻率法反演三维立体图(a为椅切图;b为阈值高低图)

Fig.4 Three-dimensional Inversion stereogram of the high density resistivity method

(a is the chair cut stereogram; b is the threshold stereogram)

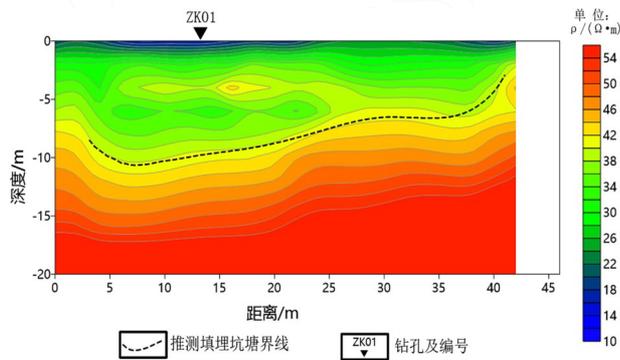


图5 等值反磁通瞬变电磁法L71剖面反演解译图

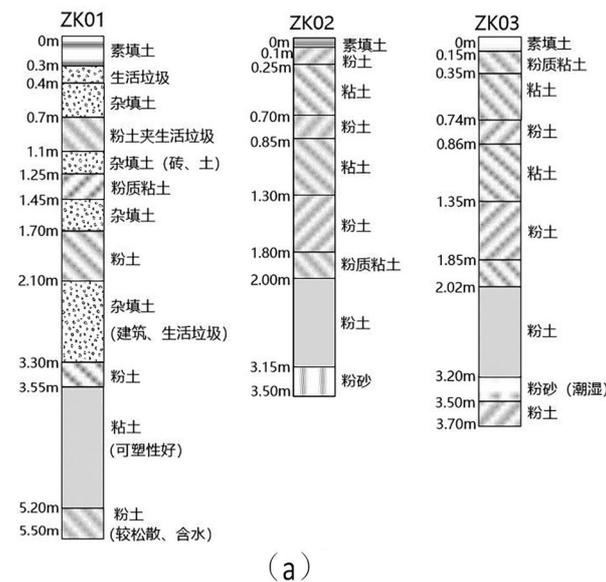
Fig.5 L71 Inversion result and interpretation of the opposing coils transient electromagnetic method

钻孔 ZK01 位于高密度电阻率法剖面 L70 和等值反磁通瞬变电磁法剖面 L71 剖面上,布置该钻孔目的是为了验证填埋坑塘的掩埋体,经槽探和钻孔验证:0~0.3 m 为素填土,0.3~0.4 m 为生活垃圾塑料袋等,见图 6b;0.4~3.3 m 为生活垃圾、建筑垃圾、杂填土的混合物,3.3~5.5 m 为回填的砂土和黏土层,可塑性好,较松散含水;5.5 m 以浅钻孔揭示地层情况与高密度电阻率法和等值反磁通瞬变电磁法反演电阻率剖面解释推断的结果基本吻合。由于洛阳铲钻孔深度受限,5.5 m 以下坑塘埋物无法判断,笔者借助研究区旁边有水坑塘出露断面岩性进行辅助验证,断面岩性见表 2,该坑塘断面位于研究区偏南方向 50 m 左右(图 2),根据断面岩性所示,7.1~12 m 为粉砂、细砂层,呈水平层理,依据该区物性统计表,该层电阻率相对高值,与高密度电阻率法和等值反磁通瞬变

解决此类问题有效可行。

3.4 槽探及钻孔验证

图 6a 为推测填埋坑塘内槽探和洛阳铲验证孔的柱状图,钻孔 ZK01、ZK02 和 ZK03 位置见图 2 和图 3。



(a)

(b)

图6 钻孔岩性柱状及槽探照片

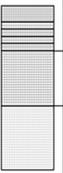
Fig.6 Lithological column of borehole and trenching photo

电磁法反演剖面高阻背景一致。

利用 ZK02、ZK03 钻孔对高密度电阻率法反演解译埋坑塘范围边界进行验证, 钻孔 ZK02 位于高密度电阻率法剖面 L20 上, ZK03 位于高密度电阻率法剖面 L50, 由两钻孔岩性柱状图可见, ZK02 钻孔 0~0.10 m 和 ZK03 钻孔 0~0.15 m 为素填土, 较松散; ZK02 钻孔 0.10~3.15 m 和 ZK03 钻孔 0.15~3.20 m 为黏土与粉土的互层, 密实、胶结程度好; ZK02 钻孔 3.15~3.50 m 为粉砂层, ZK03 钻孔 3.20~3.70 m 为粉砂与粉土层, 密实程度好, 与高密度电阻率法反演剖面解译结果一致, 同时也与附近断面岩性一致(表 2), 为没有动过的高阻原砂土, 经验证对比两处均为埋坑塘的边界位置。

表 2 断面岩性描述表

Table 2 Description table of lithology for geological cross section

实物照片	深度(m)	柱状图	岩性描述
	0		0-3.2m为粉土与粉质粘土互层; 水平层理, 表层为素填土, 松散, 含植物根系, 与下伏地层呈渐变接触。
	2		3.2-7.1m为粉质粘土及粉砂夹层; 灰黄色, 厚层状, 可塑, 水平层理。
	4		7.1-12m为细砂层; 淡灰色, 厚层状, 稍湿, 稍密, 水平层理, 与下伏地层呈突变接触。
	6		
	8		
	10		
	12		

以上三个钻孔的验证结果显示, 高密度电阻率法反演解译成果与钻孔验证结果基本吻合, 说明利用该方法探测埋坑塘的空间范围是有效的, 应用效果显著。

4 结论

(1) 本文利用高密度电阻率法尝试在雄安新区对已埋坑塘进行探测, 在反演电阻率剖面中出现的近似开口向上偏平的“C”字形的低阻异常区, 推测为埋坑塘, 其解译结果与等值反磁通瞬变电磁法剖面反演结果相互印证, 后经槽探和钻孔资料验证, 所揭露地层岩性与反演解释结果基本一致, 说明高密度电阻率法在探测雄安新区埋坑塘空间范围中有效可行。

(2) 通过高密度电阻率法在雄安新区埋坑塘的应用效果可以看出, 二维反演剖面横向和纵向都具有良好的分辨率、实现了浅部地层结构精细化探测的目的; 三维可视化显示可以根据地质人员解释的需求, 设定获得椅切图、等值面图、阈值图等一系列直观图件, 所含地质信息丰富、直观, 满足地质人

员解释的需要。

(3) 通过对高密度电阻率法在雄安新区埋坑塘的探测分析, 埋坑塘与围岩(原砂土)存在明显的物性差异, 具有低阻异常特征, 利用该方法可快速查明埋坑塘的范围、空间展布形态、坑塘内掩埋体地层特征等信息。该方法在雄安新区探测埋坑塘成功尝试, 为今后雄安新区及其它地区探测埋坑塘方法的选择和研究思路提供了借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 郝爱兵, 吴爱民, 马震, 等. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 2018, 39(5):513-522.
- [2] 马震, 夏雨波, 王小丹, 等. 雄安新区工程地质勘查数据集与三维地质结构模型构建[J]. 中国地质, 2019, 46(S2): 123-129.
- [3] 马震, 黄庆彬, 林良俊, 等. 雄安新区多要素城市地质调查实践与应用[J]. 华北地质, 2022, 45(1):58-68.
- [4] 张竞, 马震, 吴爱民, 等. 基于岩性光谱特征的雄安新区地面古河道识别研究[J]. 地球学报, 2018, 39(5):542-548.
- [5] 郭淑君, 于蕾, 任政委, 等. 高密度电阻率法在雄安新区起步区第四系地质结构精细化划分中的应用研究[J]. 华北地质, 2021, 44(1):45-51.
- [6] 田中英, 孙渊, 唐小平, 等. 地球物理多方法勘探在西安地裂缝探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(01): 92-97.
- [7] 耿淑莹, 黄向东. 高密度电阻率法在某垃圾填埋场渗漏通道探测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(07):68-72.
- [8] 曹朋军, 王天意, 侯征, 等. 综合地球物理方法探测地裂缝发育及展布[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(02):251-257.
- [9] 周正中. 综合物探方法在地裂缝探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(06):705-708.
- [10] 王旭明, 马若龙, 刘现锋, 等. 综合物探技术在垃圾填埋场渗漏探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(06):903-910.
- [11] 王鹏禹, 李磊. 地质雷达检测技术在工程地质裂缝探测调查中的应用[J]. 水利技术监督, 2011, 19(06):54-57.
- [12] 苏永军, 曹占宁, 赵更新, 等. 高密度电阻率法在雄安新区浅表古河道精细化探测中的应用研究[J]. 物探与化探, 2023, 47(1):272-278.
- [13] 邹承杰. 河北省容城县中更新世以来的钻孔沉积物地球化学特征及古气候演化[D]. 石家庄:河北地质大学, 2008.
- [14] 马岩, 李洪强, 张杰, 等. 雄安新区城市地下空间探测技术研究[J]. 地球学报, 2020, 41(4):535-542.
- [15] 李富, 欧阳渊, 刘洪, 等. 高密度电阻率法与地质雷达法在土壤厚度调查中应用效果—以西昌市土壤厚度调查为例[J]. 华北地质, 2021, 44(1):27-32.
- [16] 苏永军, 范剑, 刘宏伟, 等. 高密度电阻率法探测海水入

- 侵咸淡水界限初步调查研究-以莱州湾为例[J].地质调查与研究,2015,37(3):177-181.
- [17] 席振铎,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428-3435.
- [18] 龙霞,席振铎,周胜,等.等值反磁通原理瞬变电磁法探测薄层能力[J].地球物理学进展,2020,35(2):753-759.
- [19] 高远.等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J].物探与化探,2019,43(6):1404-1408.
- [20] 李建平.等值反磁通瞬变电磁法在高山隧道施工选线中的应用[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):143-147.
- [21] 李青,周胜,肖晓,等.基于等值反磁通瞬变电磁法的公路路基病害探测研究[J].工程地球物理学报,2019,16(1):90-96.
- [22] 周超,赵思为.等值反磁通瞬变电磁法在轨道交通勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2018,15(1):60-64.
- [23] 苏永军,黄忠峰,范翠松,等.三维高密度电法在海水入侵界面探测中应用[J].地质调查与研究,2018,41(2):134-138.

Analysis of detection effect of landfill pond by the high density resistivity method in Xiong'an New Area

SU Yongjun¹, HU Ting¹, CAO Zhanning¹, FAN Cuisong¹, HAN Bo¹,
TENG Fei¹, LIU Jihong¹, SHEN You-jia²

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China;
2. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to seek an effective geophysical detecting method for the landfill ponds in xiong'an New Area. Authors attempt to apply the high density resistivity method to the survey of the landfill ponds, the interpretation results are mutually confirmed with the inversion results of the opposing coils transient electromagnetic method, the results are verified by trenching and drilling, the range and depth of the landfill pond are basically consistent with the verified results, and the method has good resolution in both horizontal and vertical directions, it can obtain abundant geological information in shallow strata, and achieve the goal of the detailed exploration, the application effect of this method is remarkable. The successful attempt of the high density resistivity method for detecting the landfill ponds in xiong'an New Area, it offers reference and experience for the selection of methods for detecting landfill ponds in xiong'an New Area and other similar areas in the future.

Key words: high density resistivity method; opposing coils transient electromagnetic method; landfill Pond; borehole; Xiong'an New Area

