

直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究

孙平贺

(中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙410083)

摘要: 钻探技术是污染场地调查中唯一可直接获取地层样品的科学手段。其中直推钻探技术具有无冲洗介质、机动灵活、推进速度快、样品干扰小等优点。本文在已有国内外研究基础上,对比分析了西班牙TEC15和美国7822DT两类直推钻机的结构、推进工艺特点,后者具有较高静推进力和起拔力;研究了单管和双管两种直推钻具的结构组成和取样过程,并指出由于单管内设PVC取样衬管,可有效保持土样的完整性,效率较高;分析了核磁共振(NMR)、土体水力测试(HPT)、膜界面探测(MIP)的技术原理和设备组成,MIP对污染物三维浓度探测具有更大技术优势;分析了国内直推钻探技术与设备的发展状况,并结合我国污染场地的地质条件和研究现状,指出能够实现精准控制的、便携式的推进钻探和原位检测一体化装备和技术验证是主要的发展趋势。

关键词: 污染场地;环境调查;钻探技术;直接推进;环境钻探

中图分类号: P634;X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0095-08

Study on application status of direct push drilling technology in contaminated site investigation

SUN Pinghe

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Drilling technology is the only scientific method that can directly obtain formation samples in the investigation of contaminated sites. Direct push drilling technology has the advantages of no drilling fluid, flexible maneuverability, fast drilling speed, and small sample interference. Based on the existing domestic and foreign study, this paper compares and analyzes the structure and propulsion process characteristics of the Spanish TEC15 and the United States 7822DT rigs. The latter has higher static propulsion and pull-out force. Single pipe and double pipe are studied, and the structural composition and sampling process of the two direct push drilling tools. The results indicate that because the PVC sampling sleeve is set in the single pipe, the integrity of the soil sample can be effectively maintained and the efficiency is high. Nuclear magnetic resonance (NMR), soil hydraulic testing (HPT), membrane interface detection (MIP) technical principles and equipment composition are introduced, and MIP has greater technical advantages for the three-dimensional concentration detection of pollutants. The development status of domestic direct push drilling technology and equipment is also analyzed, combined with the geological conditions of contaminated sites in China and research status, pointed out that the portable integrated equipment and technical verification of advanced drilling and in-situ detection that can achieve precise control is the main development trend.

Key words: contaminated site; environmental investigation; drilling technology; direct push technology; environmental drilling

收稿日期:2020-12-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.01.013

基金项目:国家重点研发计划课题“污染场地土层精准控制液压推进系统研发”(编号:2020YFC1807203)

作者简介:孙平贺,男,汉族,1982年生,副教授,博士生导师,地质工程专业,博士,主要从事钻探技术的教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学新校区地科楼,pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式:孙平贺.直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究[J].钻探工程,2021,48(1):95-102.

SUN Pinghe. Study on application status of direct push drilling technology in contaminated site investigation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):95-102.

0 引言

污染场地是指因从事生产、经营、处理、贮存有毒有害物质,堆放或处理处置潜在危险废物,以及从事矿山开采等活动造成污染,经专业调查和风险评估后,确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地^[1-3]。根据全国污染场地调查的最新数据,当前我国场地污染的面积、污染物种类、类型及含量均呈上升趋势,且具有隐蔽、不可逆、污染源复杂、处置难等特点,如图1所示。另外随着产业结构的不断升级优化,遗留的大量污染场地成为建设用地,根据“土壤污染防治法”的环境调查制度要求,亟待开展污染场地的调查与修复工作。然而,管理上一直存在“轻调查、重修复”的观念,加之技术发展历程短,使我国的污染场地调查仍缺乏相关的标准体系,技术上缺少自主研发先进调查装备与工艺。

钻探技术是唯一可以现场获取样品实物的科学手段。钻探取样的规范性、样品采集的准确性、样品检测的可靠性等都直接影响场地实际污染状

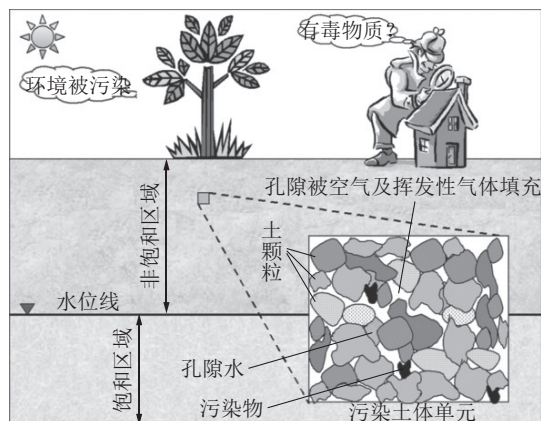


图1 场地污染源赋存特征

Fig.1 Occurrence characteristics of contaminated site

况的评估结果。从取样对象划分主要包括土体取样、水体取样和气体取样^[4-6]。取样要求包括钻探成本低、采取率高、钻进速度快、对样品无扰动或少扰动、不产生二次污染等。从取样工艺上分类,主要包括回转钻探、螺旋钻探、冲击钻探、声波钻探和直推钻探等^[7-10],如表1所示。

表1 污染场地调查常用钻探方法

Table 1 Common drilling methods for contaminated site investigation

工艺分类	适用地层	优点	不足
回转钻探	除卵砾石外的各类土层	技术成熟,适用范围广	地层易受到冲洗液的污染
冲击钻探	各类土层	钻进效率高、深度大	钻孔易偏斜,不同地层钻屑易混淆
螺旋钻探	软土地层	钻进效率高、周围环境影响小	地层扰动明显
声波钻进	各类土层	钻进效率高	操作技术要求高,司钻需要培训上岗并照操作规范精心操作 ^[11-13]
直推钻探	浅部地层	钻进效率高、设备灵活便捷	驱动力大、钻深有限

在上述钻探方法中,直推钻探技术具有不需要冲洗介质、推进效率高、方便灵活、对目标层样品干扰小等优点,被国内外广泛采用。目前这类设备我国主要依赖进口,自主创新研发的设备和工艺还处于起步阶段,本文结合国外GP直推钻机^[5]结构特点、取样钻具、原位检测及国产化发展趋势等展开论述。

1 直推钻机

1.1 直推钻探技术

直推钻探技术(Direct Push Drilling)是通过人力或者机械力将钻具直接压入地下的一种钻探和取样方法,最早起源于荷兰^[14-15]。在钻探过程中,如

果地层的阻力较小,钻机的给进力来自液压油缸的静压力,并根据导轨的预设角度,将钻杆柱无回转推入目地层,主要适用于均质的软土地层;如果钻遇地层阻力较大,通过静压力难以有效推进时,直推钻机的振动器会产生一定频率的冲击力,配合油缸的静压力作用实现有效推进,主要适用于非均质的回填地层、砂砾石层等^[16-19]。

直推钻探深度一般不超过30 m,不需要采用水基或者气体冲洗介质,避免了地层的二次污染和样品的交叉污染。钻探过程中无需回转,减少了对污染场地样品的干扰,能够最大限度保持其原状性。

1.2 直推钻机特点

直推钻机经历了小型、中型和中大型的发展过

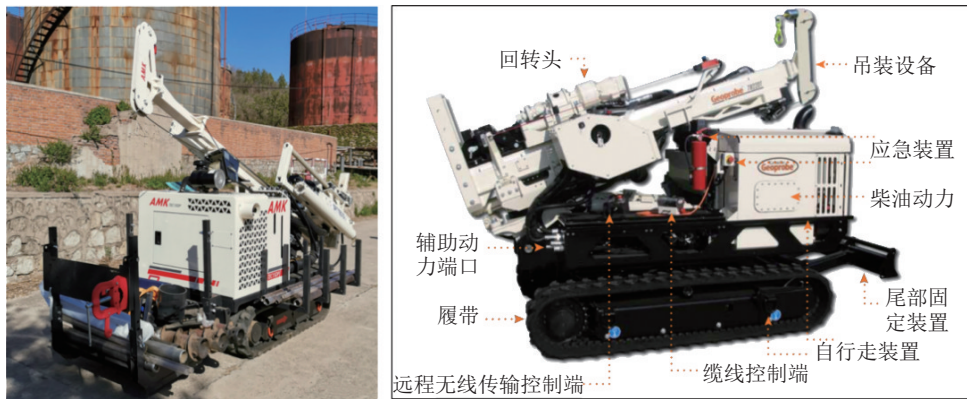
程^[20-22],如图 2 所示。国外代表性钻机以西班牙的 TEC15 型和美国的 7822DT 型为主,如图 3~4 所示。二者均为污染场地调查用的取样钻机,可以实现土壤和水的取样钻探。二者均具有结构紧凑、功

能多样、灵活便捷等特点,可在一些其它钻探取样受限的区域进行作业。钻机主要由探测组件、动力系统、液压系统、电气系统和取样钻具等部分组成。



图 2 直推钻机类型

Fig.2 Types of direct push drilling rigs



(a) 西班牙TEC15型钻机

(b) 美国7822DT型钻机

图 3 直推钻机结构

Fig.3 Structure of direct push drilling rigs

此外,二者均具有超高冲击频率,能够确保对目地层产生较小压缩,实现原状分析的目的。钻机可采用有线/无线两种操控模式,实现受限空间的现场调查。设备配置有高度集成的控制面板,不仅能够对设备进行准确操控,配备的电子诊断系统还能对各类钻探故障进行实时辨识,急停装置支持紧急状态下的安全保障。美国 GP7822DT 型钻机的最大展开高度为 4.75 m,长度为 4.32 m,宽度为 1.78 m,并配有吊装设备,方便钻具的运移。整机采用久保田柴油动力,设备功率为 42 kW,油缸最大静推进力可达 160 kN,提升力可达 214 kN。西班牙的

TEC15 型和美国的 7822DT 型钻机参数对比见表 2^[5]。

2 直推钻具

根据钻遇地层、推进压力、速度、深度和土样要求等条件,可分别采用单管直推钻具和双管直推钻具两种形式,如图 5 所示^[23-24]。钻具结构主要包括上部推进盖帽、中部取样管(内外管)、推进端头、减震阻尼器等部分。

采用单管钻具推进时,可采用 57 mm 十字液动冲击钻头破除表层后,将组装好的钻具上端连接推

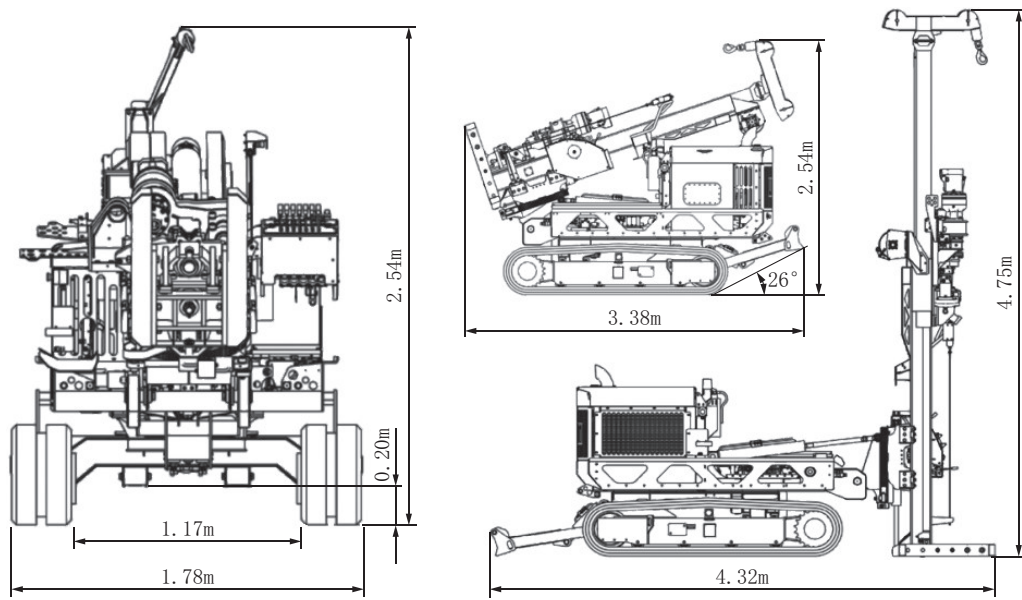


图4 美国7822DT型钻机外型尺寸

Fig.4 Dimensions of the United States 7822DT drilling rig

表2 直推钻机参数对比

Table 2 Parameters comparison between direct push drilling rigs

钻机类型	推进力/kN	提升力/kN	钻进深度/m	冲击频率/Hz	设备功率/kW
TEC15	50	30	30	30	15
7822DT	160	214	20	34	42

进盖帽,再根据钻遇地层的特点,分别采用油缸静压力或者一定频率的冲击荷载将钻具推进地层。当底部推进端头到达预定深度时,停止推进或冲击,取出外管推进盖帽和顶杆,提出钻具取样。如此反复,直至完成整个钻孔的取样任务。

采用双管钻具推进时,亦可采用57 mm十字液动冲击钻头进行地表的破除,当双管钻具的外管切削端到达预定的设计深度时,停止推进或冲击,取出内部钻杆和取样管,完成一个回次的推进取样。再将连接内杆的新内管重新放入外管固定位置,确保具有足够长度的内外管,加外管推进盖帽后并对好冲锤定位帽,再根据钻遇地层的特点,分别采用油缸静压力或者一定频率的冲击荷载将钻具推进地层预设深度,停止推进或冲击,取出内部钻杆和取样管,完成第二个回次的推进取样。如此反复,直至完成整个钻孔的取样任务,如图6所示。

在传统深部地质岩心钻探中,双管取样的效率、岩心保真性等要比单管更优,特别是在胶结性较差的地层钻探中,这一点更为显著。但在浅部土层取样推进中,由于单管内部设有PVC衬管,相比于双管不仅能够有效保护土样的完整性,并且能充分利用钻机的推进压力,从而实现高效率、大深度、连续取样的推进目的,如表3所示。

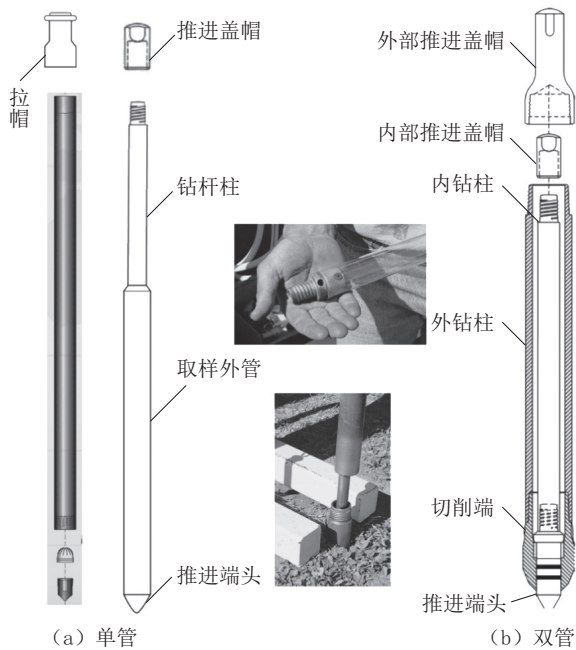


图5 单管(a)和双管(b)组合结构

Fig.5 Structures of single tube(a) and double tube(b)



图 6 直推钻具取样效果

Fig.6 Samples in direct push drilling tubes

表 3 单管和双管直推钻具对比

Table 3 Comparison of single tube and double tube

钻具功能特点	单管	双管
采集单个土样、气体或地下水样	可行且更快	可行
连续采集多个土样	可行	可行
兼容多个传感元件和测井工具,例如:MIP膜界面探头	可行	可行
确定采样孔段后,采集地下水样	可行	可行
低功率条件下的快速取样推进作业	可行	
具有更大的推进深度	可行	
存在多个非水相液体污染物时,采集多个土体样品	可行	

3 原位检测技术与设备

在污染场地调查过程中,土体中的有机物质极易挥发,实验室异位、延时检测难以反映场地原位污染范围和程度。一些挥发性卤代烃污染物,如三氯甲烷,一旦遇到空气、日光和水,极易分解生成氯化氢和有毒的光气^[25],因此搭载直推钻机和钻具开展原位检测是十分必要的。

3.1 核磁共振技术与设备

核磁共振(NMR)技术是一种相对较新的原位土层测试方法,主要基于孔隙流体中的氢质子对一系列磁扰动的响应来间接表征地层的物性特征,如

图 7 所示。在含水土层中,它提供有关总水分含量或饱和区总孔隙率以及孔径分布的信息,这些数据可用于估计地层渗透率和土壤湿度。该技术将采样间隔时间提高到分钟级别,从而可以在相对较短的时间内对土层物性进行高分辨率分析。

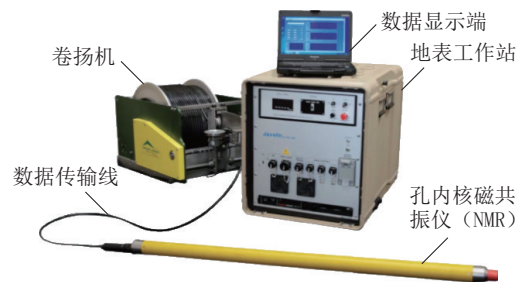


图 7 核磁共振设备

Fig.7 Nuclear magnetic resonance tool

3.2 直推土体水力测试技术与设备

直推土体水力测试技术(Hydraulic profiling tool,HPT)也是另外一种搭载于直推钻机中的原位测试手段。当孔内仪器推进端头向下钻探时,水通过管路以一定速率注入 HPT 仓体,并通过注入窗口渗入地层中,如图 8 所示。

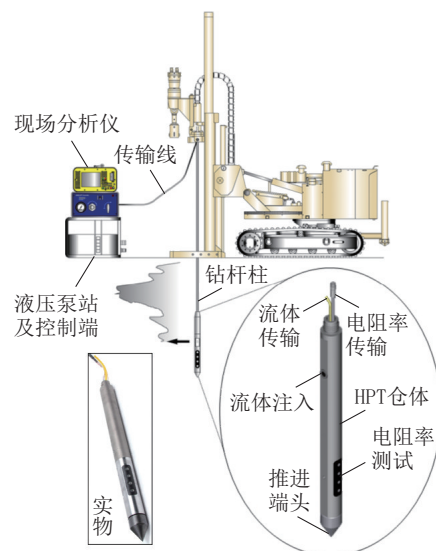


图 8 直推土体水力测试设备

Fig.8 Hydraulic profiling tool

注水压力通过地表或者在滤管后方的传感器进行动态测量,注水速率可由地表控制器进行测量与调控。根据所测量到的注水速率和注水压力,对土体的渗透率 K 进行垂向计算,实现推进中连续动

态测试的目的。

3.3 膜界面探测技术与设备

膜界面探测技术(Membrane Interface Probe, MIP)主要由探头、载流气体管线、密闭室、半透膜、加热单元、控制模块和末端分析仪等部分组成^[5],如图9所示。其主要的原理是利用不锈钢加热单元将目标层与半透膜之间的土体加热至100~120℃,此时土体中的挥发性有机物经过半透膜进入密闭室,并由载流气体(氮气)将污染物带至地表的末端分析仪进行定量分析、存储、记录和输出,该技术能

够精确描述污染场地地下污染物的三维浓度分布情况。此外,还可以同偶极传感器联合搭载在直推钻机中,用于测量周围环境的电导率(EC)。

末端检测仪器还可以搭载光离子化检测器(PID)、火焰离子化检测器(FID)、卤素特殊检测器(XSD)和质谱仪(TOF-MASS)等^[26],有效提高了MIP对不同类型挥发性有机物的检测灵敏度和探测范围,且不同检测器性能范围的互补使得该系统从低污染水平到高污染水平的范围内都可以满足调查采样现场检测要求。

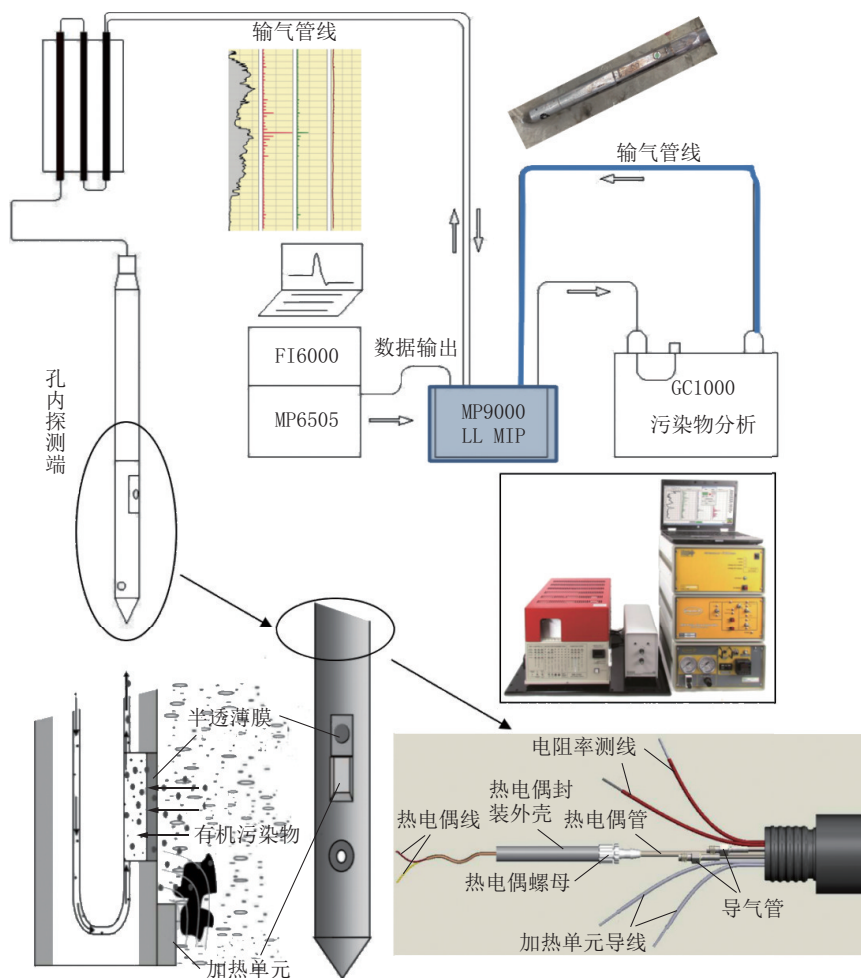


图9 膜界面探测设备

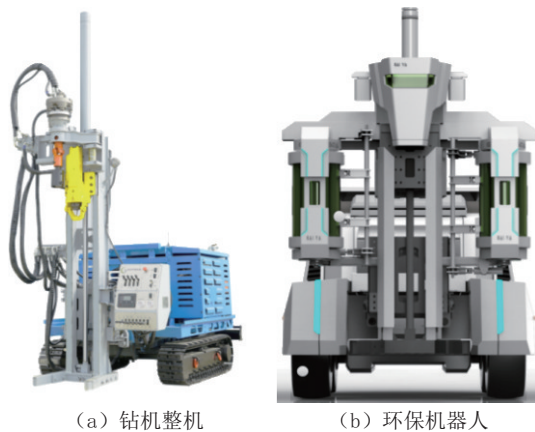
Fig.9 Membrane interface probe tool

4 国内直推钻探技术的发展

随着国内产业结构的升级,原建设在城市中的污染企业大量外迁,原有场地转变为商业或居民用地,对这些场地的污染状况调查与修复使得国内直

推钻探技术和设备研发开始兴起^[9]。2018年科技部“污染场地土壤及地下水原位采样新技术与新设备”专项指南中明确:开发适用于我国场地土壤弱扰动原位采样全液压直推式钻进设备,研制挥发性

有机污染物膜界面探测器等原位检测工具,制定污染场地土壤与地下水原位采样技术规范。后由江苏盖亚环境工程有限公司牵头,联合国内9家单位展开攻关,目前已完成了整机的批量生产,如图10(a)所示,可达到直推压力164 kN、起拔力246 kN的钻探要求,并在此基础上提出了智能化、模块化、集成化的环保机器人^[11],如图10(b)所示。此外,南京贻润环境科技有限公司、浙江清阳环境工程有限公司、北京建工集团等在设备和技术上也取得了一定成果^[12]。



(a) 钻机整机 (b) 环保机器人

图10 国产直推钻探设备

Fig.10 Domestic direct push drilling rigs

2020年科技部实施了“污染场地土层剖面钻进探测一体化技术与装备”专项,并再次由江苏盖亚牵头,联合中南大学等8家单位开展实施工作。主要目标是解析有机物扩散机制和半透膜材料动力学参数,研发满足土层剖面探测需求的多种半透膜材料。研发污染场地土层精准控制推进系统,研制连续钻进探测一体化装备,开展应用示范,编制相关技术指南等,目前该项目正在实施中。

5 结论与建议

场地污染作为当今环境污染的重要组成部分,对其开展准确调查不仅关乎我国的可持续发展战略,也直接影响人民的生产和生活质量,更涉及子孙后代的长期延续,而钻探技术是场地调查中获取地层样品的唯一科学手段。

(1)直推钻探技术具有无冲洗、机动好、效率高、干扰小等优点,被国内外广泛采用。集成化、模块化的设计是直推钻机的设计理念,智能化和精准

控制是发展趋势。

(2)在浅部地层推进中,由于单管内设PVC取样衬管,可有效保持土样的完整性。

(3)膜界面探测(MIP)对污染场地污染物三维浓度探测具有更大技术优势和应用前景。

(4)能够实现精准控制的推进钻探和原位检测一体化装备和技术验证是主要的发展趋势。

由于我国污染场地具有复杂的地质条件,很多区域污染成因不明,加之场地调查的投入有限,研发适合我国污染场地的推进—检测一体化装备既是难点也是热点。融合钻探、地质、力学、机械、电子、信息等多学科技术开展高精度、高保真、多种受限条件下的便捷式推进钻机亟待解决。

参考文献(References):

- [1] ASTM D6286/D6286M - 20, Standard guide for selection of drilling and direct push methods for geotechnical and environmental subsurface site characterization[S]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2020.
- [2] Liu X H, Li Q, Song R R, et al. A multilevel U-tube sampler for subsurface environmental monitoring [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1194.
- [3] Gastone, Francesca and Rajandrea Sethi. Injection of guar gum micro-sized zero-valent direct push field study [Z]. 2013: 191-196.
- [4] Sousa J C G, Ribeiro A R, Barbosa M O, et al. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 344: 1-13.
- [5] Geoprobe. Direct push technology[DB/OL]. 2020. <http://geoprobe.com/literature>.
- [6] 孔祥科, 马骏, 韩占涛, 等. 直接推进技术在有机污染场地调查中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 115-119. KONG Xiangke, MA Jun, HAN Zhantao, et al. Application of direct push technology to organic contaminated site investigation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (3) : 115-119.
- [7] 彭新明, 周国庆, 李安, 等. Geoprobe 直推式土壤钻机在涌砂层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6): 60-64. PENG Xinming, ZHOU Guoqing, LI An, et al. Application of Geoprobe direct push & rotary rig in sampling in quicksand layers [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 60-64.
- [8] 梁龙, 蔡国成, 王劲松, 等. 污染场地勘察钻探取样设备及工艺应用探讨[J]. 工程勘察, 2018, 46(7): 16-21. LIANG Long, CAI Guocheng, WANG Jinsong, et al. Discussion on application of the equipment and technique for drilling

- sampling in the survey of contaminated site[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018, 46(7):16-21.
- [9] 李炯,王瑜,周琴,等.环境取样钻机的关键技术及发展趋势研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(9):81-87.
LI Jiong, WANG Yu, ZHOU Qin, et al. Research on key technology and development trend of environmental sampling rig[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(9):81-87.
- [10] 曹雪宁.直推式取样钻具优化设计研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2020.
CAO Xuening. Study on the optimum design of the direct push sampling drilling tool[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [11] 秦沛,李海明,刘春生. Geoprobe直推钻机在城市水土环境地质调查中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(3):1-8.
QIN Pei, LI Haiming, LIU Chunsheng. Application of Geoprobe drilling rig in investigation of the urban soil and water environment[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(3):1-8.
- [12] 王晓丽,郑春苗,刘改胜,等.利用直接推进技术测定渗透系数的最新进展[J].*水文地质工程地质*, 2012, 39(1):8-12.
WANG Xiaoli, ZHENG Chunmiao, LIU Gaisheng, et al. A review of recent developments in using direct-push technologies for rapid, high resolution hydraulic conductivity measurements [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1):8-12.
- [13] 韩萌,孙平贺,徐金鉴,等.美国声波钻进规程 ASTM D6914/D6914M-16 浅析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(10):141-146.
HAN Meng, SUN Pinghe, XU Jinjian, et al. Analysis of sonic drilling standard ASTM D6914/D6914M-16 [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(10):141-146.
- [14] ASTM D6282-98, Standard guide for direct push soil sampling for environmental site characterizations[S]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2014.
- [15] ASTM D6235-18, Standard practice for expedited site characterization of vadose zone and groundwater contamination at hazardous waste contaminated sites [S]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2018.
- [16] ASTM D4547-15, Standard guide for selection of sampling equipment for waste and contaminated media data collection activities [S]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2016.
- [17] Wang Y, Zhou Q, Liu B, et al. Design and model analysis of the sonic vibration head[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(5):2121-2131.
- [18] 俞超,徐彬彬,贾绍宽,等.30HB型多功能环境勘察钻机[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10):135-138.
YU Chao, XU Binbin, JIA Shaokuan, et al. 30HB multifunctional environmental investigation drilling rig [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10):135-138.
- [19] 冉灵杰.浅层土壤环境取样钻进技术研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2019.
RAN Lingjie. Research on drilling technology of soil environment sampling in shallow layer[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [20] 赵磊.取样技术在挥发性有机物污染土壤治理中的应用研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2009.
ZHAO Lei. Study of sampling about treatment in soil contaminated by volatile organic compound[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [21] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(3):686-692.
- [22] Silva, Livia Previatello da, Van Lier Q D J, et al. Retention and solute transport properties in disturbed and undisturbed soil samples[J]. *Rev. Bras. CiêNc. Solo*, 2016, 40:1-10.
- [23] Lens P., Hemminga M. Nuclear magnetic resonance in environmental engineering: Principles and applications[J]. *Biodegradation*, 1998(9):393-409.
- [24] Butler J J, Healey J M, Mccall G W, et al. Hydraulic tests with direct-push equipment[J]. *Ground Water*, 2010, 40(1):25-36.
- [25] LGN A, AMBA B, VLG A, et al. Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 178:104049.
- [26] Kurup P U. Novel technologies for sniffing soil and ground water contaminants [J]. *Current Science*, 2009, 97(8):1212-1219.

(编辑 韩丽丽)