

doi: 10.12097/gbc.2022.03.017

探地雷达在白洋淀湖底地层结构探测中的技术攻关与实践

王春辉, 田蒲源, 郭淑君, 孙晟

WANG Chunhui, TIAN Puyuan, GUO Shujun, SUN Sheng

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051

Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China

摘要: 白洋淀湖底地层调查对于白洋淀生态地质调查、湖底生态清淤及湿地生态保护具有非常重要的现实意义。为系统探明白洋淀湖底地层结构, 从区域尺度对湖底地层实现完整刻画, 为钻探调查提供精确的靶区数据支撑, 创新了探地雷达应用范围, 采用船载方式, 透过水体开展了湖底地层勘查。剖析白洋淀湖底结构探地雷达勘探技术难点, 分析了含底泥和不含底泥 2 种情形下水上勘探电磁波的传播特征和湖底原生地层的地球物理响应条件, 建立了淀水+淤泥层+湖底原生地层的湖底简化结构模型。通过对比国内外主流探地雷达系统不同硬件设备的勘探能力与适应条件, 优选出双皮划艇搭载 50 MHz 低频组合天线的工作模式, 结合适用于水下电磁波弱信号提取的数据处理技术, 获得了白洋淀湖底 15 m 深度范围的地层结构数据。结果表明, 此种工作模式适用于湖区水深小于 5 m 的水域, 原生地层电磁波整体呈现弱反射特征, 湖底 15 m 深度范围内存在 2~3 组砂层反射界面。淤泥层会大大削弱湖底原生地层的电磁波反射强度。存在厚砂层的水域, 电磁波会形成强反射波组, 砂层展布形态刻画清晰, 砂层厚度变化在 0~3 m 之间。本研究实现了湖底地层结构建模分析、天线勘探模式优选、数据处理过程优化等技术集成。该技术成果为白洋淀湖区地下水与地表水三维地质建模提供了基础依据, 为湖底地层钻探勘查提供了靶区支撑, 有力推动了白洋淀湿地水-陆一体化探测技术方法体系的构建。

关键词: 白洋淀; 水上探地雷达技术; 勘探深度; 淤泥层; 湖底砂层

中图分类号: P62; P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0651-07

Wang C H, Tian P Y, Guo S J, Sun S. Technical breakthrough and practice of ground penetrating radar in the exploration of Baiyangdian lake bottom stratum structure. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 651-657

Abstract: The investigation of the Baiyangdian lake bottom strata holds significant practical importance for the ecological geological survey, ecological silt removal, and wetland ecological protection of Baiyangdian. In order to systematically identify the stratigraphic structure of Baiyangdian lake at a regional scale and provide accurate target data support for drilling investigations, this paper introduces an innovative application range of ground penetrating radar (GPR) and conducts a ship-based stratigraphic survey through the water body. This study analyzes the technical challenges associated with exploring the lake bottom structure using GPR. It examines the characteristics of electromagnetic wave propagation and geophysical response conditions in two scenarios: with sediment and without sediment. A simplified model is established, consisting of diaster-water + silt layer + lake bottom primary formation. By comparing the exploration capability and adaptation conditions of different hardware equipment of mainstream ground penetrating radar systems at home and abroad, this paper optimizes the working mode by employing double kayaks equipped with a 50 MHz low-frequency combined antenna. Additionally, it combines suitable data processing technology for extracting weak signals from underwater electromagnetic waves. As a result, stratigraphic structure data at a depth of 15m are obtained for Baiyangdian lake. The findings indicate that this model is applicable to areas within the lake where water depth is less than 5 m; here, weak reflection

收稿日期: 2022-03-11; 修订日期: 2022-12-17

资助项目: 中国地质调查局项目《西部陆海新通道地质安全风险调查评价》(编号: DD20221813)、《三峡库区城镇高陡危岩崩塌风险减缓技术示范》(编号: DD20242410)

作者简介: 王春辉(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事工程与环境地球物理勘查工作。E-mail: 378699768@qq.com

characteristics are observed in electromagnetic waves emitted by primary formations at the lake bottom along with 2 ~ 3 groups of sand reflection interfaces at depths up to 15 m. The presence of silt layers significantly attenuates electromagnetic wave reflection intensity originating from primary strata at the lake bottom.

Key words: Baiyangdian lake; ground penetrating radar technology in water; exploration depth; silt layer; sand layer under the lake bottom

《河北雄安新区规划纲要》在起步区空间布局为“北城、中苑、南淀”的总体空间格局。“南淀”即利用白洋淀生态资源和燕南长城遗址文化资源,其定位是塑造传承文化特色,展现人文生态景观,保障防洪安全的白洋淀滨水岸线(中共河北省委、河北省人民政府编制,2018)。雄安新区成立后,各大科研院所先后启动了一系列基础地质调查和地球物理勘查工作,主要研究方向为雄安新区三维地质结构及深部热源机制(欧阳等,2022;王凯,2022;张杰等,2022)。本项工作依托中国地质调查局2019—2021年实施的“白洋淀生态地质调查”项目,主要任务是查明白洋淀淀区浅表层地质结构、湿地特征及生态环境地质问题(袁国礼等,2023)。在地球物理探测技术方法上,尝试性地引入水上探地雷达技术,以揭示白洋淀湖底地层结构。

本文剖析了电磁波水上传播的影响因素,探索适用于白洋淀湖泊湿地的水上探地雷达工作模式,以及适用于水上电磁波弱信号的数据处理技术。解读淀水模型电磁波地球物理响应,并在典型湖区取得湖底15 m以浅原生地层实测数据。

1 白洋淀水上探地雷达探测技术难点与攻关

水上探地雷达应用可借鉴经验相对较少,国内应用案例仅限于河流剖石量探测,与白洋淀湖底地层结构探测相比,河道剖石勘探难度要小得多(丁凯等,2005;王复明等,2008;Baek et al., 2017; Kämäri et al., 2017;蔡少峰,2019)。由于白洋淀特殊的地质环境条件,加之淤泥层的存在,电磁波在淀水中的穿透能力明显低于南方地区河流湖泊(郭秀军等,2009;Baek et al., 2017;张开伟等,2019;赵永辉,2019)。这些决定了白洋淀湖底地层结构探测的工作难度。白洋淀湖底沉积层以第四系砂粘土介质为主,其介电常数符合第四系介质的一般规律,表1给出了淀区常见介质物性参考值(Maas, 2013; Ardekani, 2014)。

水上探地雷达法工作原理与地面探地雷达法基本相同,采集模式均采用二维连续剖面法。水上工

作需借助船体,采集效率更高。使用高精度GPS实时记录航线信息,天线移动可采取皮划艇搭载和沉于水下2种工作模式。同时,需要制定专门的水上作业安全保障措施。相对而言,沉水雷达勘探模式更逼近探测目标,但沉水雷达涉及天线密闭防水、姿势控制等问题,设备硬件尚不成熟,因而采用皮划艇漂浮天线模式。皮划艇搭载雷达天线工作模式(图1)面临的问题是需要克服水体对电磁波的衰减,该模

表1 白洋淀常见介质物性参数参考值

Table 1 Reference values of physical properties of common dielectrics in the deposition area

介质名称	相对介电常数(无量纲)	电磁波速度/(mm·ns ⁻¹)	电阻率/(Ω·m)
空气	1	300	∞
水	81	33	30 ~ 10000
耕种土	2.6 ~ 15	77	5 ~ 20
干砂	3 ~ 6	120 ~ 170	20 ~ 200
湿砂	25 ~ 30	55 ~ 60	15 ~ 50
粉质粘土	8 ~ 12	60	8 ~ 25
粘土	8 ~ 12	60	5 ~ 20



图1 双皮划艇搭载水上雷达数据采集现场

Fig. 1 Data acquisition site of double kayaked GPR water detection

式适用于水深小于 5 m 水域, 否则水下原生地层信号将难于识别。在雷达天线频率选择上仅能选取中心频率低于 100 MHz 的天线系统。

水上探测一般不存在各类城市电磁干扰问题, 天线也较少受到侧向和空中干扰影响。水上数据采集时应尽量保持天线平稳, 大的波浪很可能造成直达波的畸变。由于电磁波在水中传播形成的振铃效应, 电磁波在水面与湖底之间会形成一组频率极低且能量很强的谐波信号(主频约为 8 MHz), 使原始数据的直观可读性大大降低, 需要采取背景去噪等特殊数据处理技术提取有效信号。同时, 在数据处理过程中, 需要利用标志层对比等手段, 进行弱反射信号拾取。

2 电磁波在水上传播的影响因素

(1) 水体的存在制约了电磁波的勘探深度

水是自然界中介电常数最大的介质(表 1)。水对于电磁波的强衰减特性制约了其在水上探测的勘探能力。以 GSSI 公司 100 MHz 主频天线为例, 该天线在白洋淀大堤的探测深度为 12~15 m, 在白洋淀水域的探测深度为 2.5 m。水域勘探深度降低了 5 倍多。表 2 给出了白洋淀区域不同主频电磁波水陆勘探能力对比数据。可以看出, 淀水的衰减严重影响了电磁波的勘探深度, 而对垂向分辨率的影响较弱(Filippo et al., 2023)。

(2) 白洋淀水体对电磁波衰减作用较强

白洋淀淀区壕沟纵横, 河淀相通, 水体富营养化中等, 加之沉水植物对电磁波的散射作用, 电磁波在淀水中的穿透能力较弱。以 GSSI 公司 100 MHz 主频天线为例, 其在佛山东平河的水下勘探深度为 7~8 m, 在白洋淀淀区的勘探深度仅 2.5 m。

(3) 湖底淤泥层易形成电磁波强反射层

白洋淀经历史沉积形成了一层淤泥层, 厚度 0.03~0.60 m, 平均厚度 15~20 cm。湖底淤泥层是一层连续分布且相对致密的薄层, 其电磁波回波能量强, 会对电磁波传播形成屏蔽, 影响水下原状地层反射信号的识别(Ardekani et al., 2014)。

(4) 湖底原生介质砂泥比差异影响电磁波勘探效果

水上雷达的勘探效果, 除以上影响因素外, 湖底原生沉积物的介电差异贡献很大。砂与粘土间的电磁波反射强度高于粘土与粉质粘土的反射强度, 厚砂层电磁波反射强度明显高于薄砂层(图 2)。总体上, 砂泥比越高, 电磁波勘探效果越明显, 该认识与陆域勘探接近。水上勘探中, 较小的砂泥比在电磁波剖面往往表现为较弱的反射信息, 信噪比相对低。这在水域勘探中相当常见。

3 淀水模型与地球物理特征

3.1 有淤泥模型

白洋淀淀区地层垂向结构的特殊性在于, 在实施清淤前, 淀水与原状沉积物之间均有一层淤泥。从物性分析, 淤泥为黑色、灰黑色淤泥质粉砂质粘土, 含水率高, 呈流塑或软塑状, 富含植物碎屑及有机质。含淤泥时淀水垂向模型可简化为水体→淤泥→过渡层→湖底原生沉积层(图 3)。含淤泥情况下, 实测电磁波单道波形见图 3。结果表明, 该反射波组很好地刻画了含淤泥时的淀水垂向结构。单道曲线由上而下依次为水面直达波、淀水与淤泥反射界面、淤泥与过渡层反射界面、过渡层与原状沉积物反射界面, 以及水下砂与粘土层间的反射界面(Topp et al., 1980; Lambot, 2014)。

表 2 探地雷达水陆探测勘探能力对比结果

Table 2 Comparison of land and water detection capabilities of GPR

勘探方式	中心频率/MHz	模糊区	测程/ns	测深/m	垂直分辨率
地面探测($E_r=9$)	300	25 cm	150~300	2~3	15 cm
	100	50 cm	300~500	20	40 cm
	50	1 m	800	40	0.5~2 m
水上探测($E_r=40$)	300(沉水雷达)		150~300	2	20 cm
	100	水体, 非勘探目标	300~500	5	40~50 cm
	50		800	15	0.5~2 m

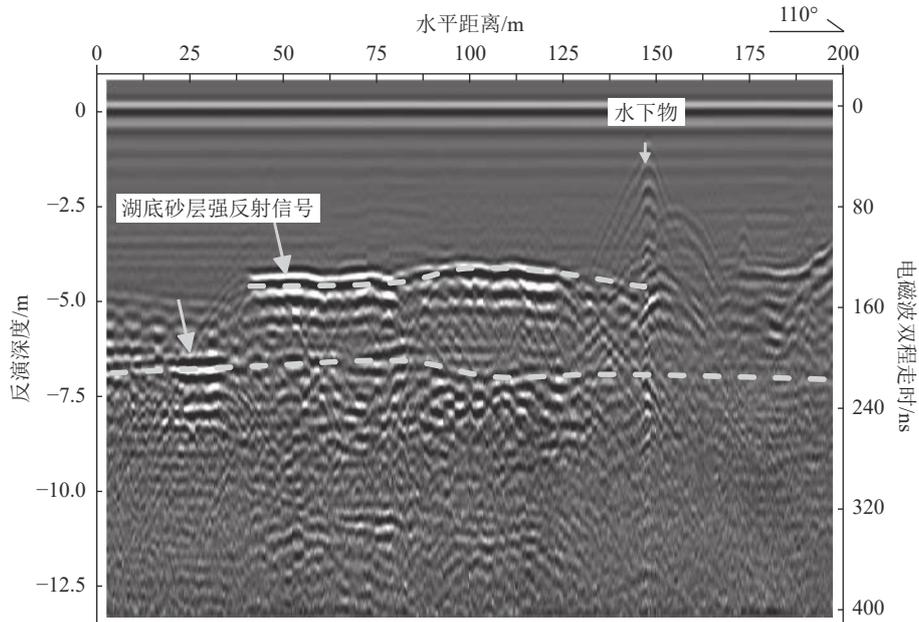


图2 水下砂层探地雷达时间剖面(池鱼淀圈头乡以东,砂层厚度约2 m)

Fig. 2 The GPR time profile of underwater sand laye

进一步分析发现,双箭头对应的3组反射波组反射强度和子波相态十分接近。对于主频为50 MHz的雷克子波,尚不能分辨淤泥层和过渡层厚度,而仅能给出其分界面。图4为含淤泥区域水上雷达勘探结果(与单道波形对应)。电磁波时间剖面有效地揭示了水下多层砂层界面分布位置,有效解译深度约为15 m(湖底原生介质深度)。

3.2 无淤泥模型

将无淤泥淀水垂向结构简化水体(含沉水植被)+水下原状沉积层,并选取清淤区开展试验。实测其电磁波响应见图5。对比无淤泥区域与有淤泥区域的电磁波响应,无淤泥时淀水底部与原状沉积物仅出现一层明显的电磁波反射界面。当与淀水底部接触的原状沉积物为砂层时,该反射层反射强度大,界面清晰,而当水底以下为粉质粘土、粉砂质粘土等介质时,该界面反射强度明显较弱,甚至难于识别(Goodman et al., 1994; Maas et al., 2013; Johnston et al., 2018; De Coster et al., 2019)。

图6为清淤后航道的水上雷达探测结果。分析电磁波时间剖面,其特征为湖底与原状沉积的粉质粘土层反射强度相对较弱,而水下砂层与粉质粘土层反射界面相对较强,揭示了至少3组砂层反射界面。

4 池鱼淀水上雷达试验

本次经过系统试验,对比了国内外主流探地雷达设备在白洋淀淀区的勘探能力,最终明确了水上雷达探测采用GR_IV型雷达主机,双皮划艇搭载50 MHz分体低频天线(收发距为1.8 m)的工作模式。进而在安新县圈头乡以东池鱼淀水域实施湖底地层结构勘探。

池鱼淀水域开阔,位于东岸的千里堤是该区域重要的水上交通航道。在该水域实施水上雷达探测试验,可以揭示湖底的砂层位置。分析该区水上探地雷达数据,湖底地层电磁波反射特征不相同。分析电磁波剖面特征,湖底砂层可能表现为以下几种地球物理特征:①连续强反射波同相轴(图2、图7);②连续弱反射波同相轴(图4、图6);③多组连续出现的绕射波双曲线。通过电磁波形态可有效识别砂层埋深、厚度、展布等信息(Alastair et al., 2021)。

5 结论

本文提出的技术方法体系,实现了湖底地层结构建模分析、天线勘探模式优化、数据处理过程优选等技术集成。该技术成果为白洋淀淀区地下水与地表水三维地质建模提供基础依据,有力推动了湖泊

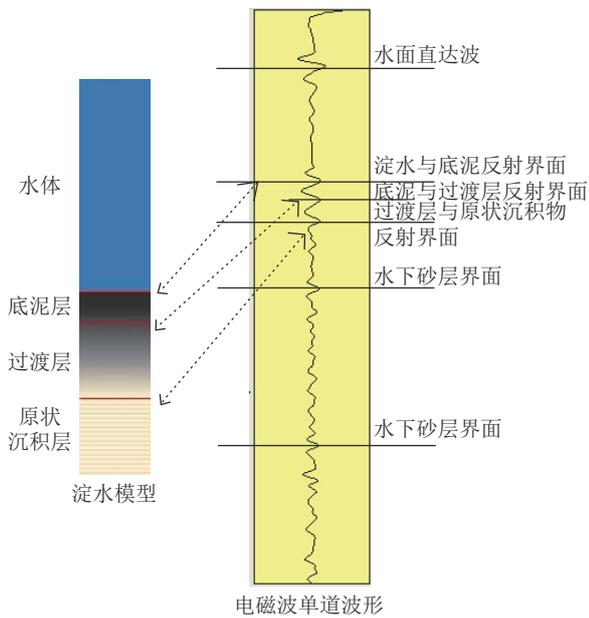


图 3 有淤泥模型电磁波响应

Fig. 3 Electromagnetic wave response of silt model

湿地水-陆一体化技术方法体系构建进程。

(1)通过理论研究及一系列探索性试验,获取了北方湖泊水下原生地层电磁波数据。对于白洋淀水域,双皮划艇搭载 50 MHz 低频组合天线模式适用于湖底深度小于 5 m 的水域,有效勘探深度可达到 15 m,且清淤后水域探地雷达勘探效果优于含底泥水域。

(2)安新县圈头乡以东池鱼淀探地雷达勘探结果表明,该区域湖底发育较连续砂层,砂层厚度 1~3 m,

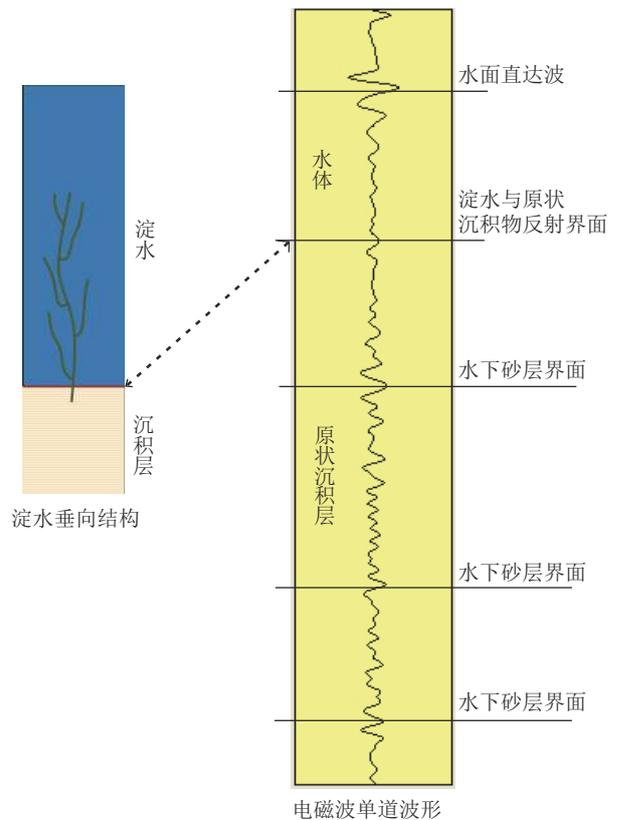


图 5 无淤泥模型电磁波响应

Fig. 5 Electromagnetic wave response of silt-free mod

为中砂、粗砂。

致谢: 本文写作过程中受到中国地质调查局水文地质环境地质调查中心朱庆俊教授的悉心指导,在此表示衷心感谢。

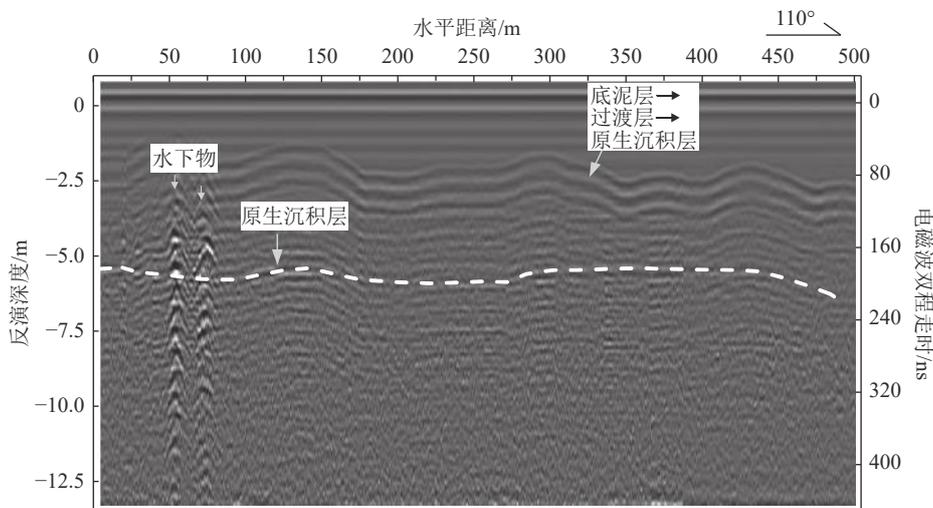


图 4 含淤泥区域水上雷达勘探探地雷达时间剖面

Fig. 4 Time profile of GPR water exploration in muddy area

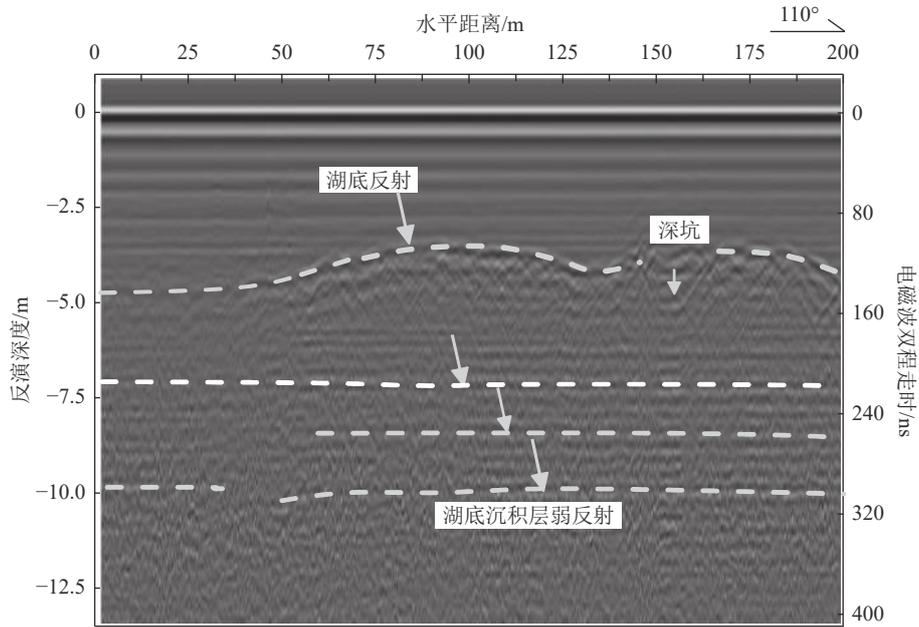


图6 无淤泥区域探地雷达勘探剖面

Fig. 6 GPR profile of silt-free mode

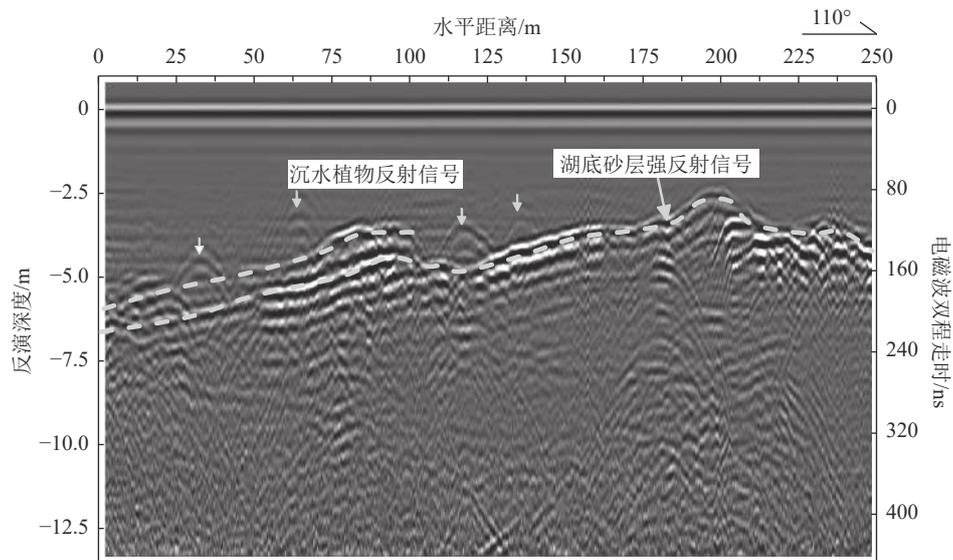


图7 白洋淀湖底砂层探地雷达响应图像(湖底连续沉积厚砂层)

Fig. 7 GPR profile of sand layers at the bottom of Baiyangdian Lake

参考文献

- Ardekani M, Druyts P, Lambot S. 2014. Recovering the structure of a layered soil, including layer thickness and dielectric permittivity, using the interfaces and objects backscatter detected in GPR b-scans[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2014), Brussels: 397-400.
- Baek S, Kim S, Known J, et al. 2017. Ground penetrating radar for fracture mapping in underground hazardous waste disposal sites: a case study from an underground research tunnel, South Korea[J]. *Appl.*

Geophys., 141: 24-33.

- De Coster A, L Pérez J, Medina M. 2019. Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 162: 138-151.
- Filippo B, Lukas K, Bjørn K M, et al. 2023. Mapping inland water bathymetry with Ground Penetrating Radar (GPR) on board Unmanned Aerial Systems (UASs)[J]. *Journal of Hydrology*, 616: 128789.
- Goodman D. 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology[J]. *Geophysics*, 59(2): 224-232.
- Johnston B, Ruffell A, McKinley J, et al. 2018. Detecting voids within a

- historical building facade: a comparative study of three high frequency GPR antenna[J]. *Cult. Herit.*, 32: 117–123.
- Kämäri M, Alho P, Colpaert A, et al. 2017. Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river[J]. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 137: 17–29.
- Lambot S, André F. 2014. Full-wave modeling of near-field radar data for planar layered media reconstruction[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52 (5): 2295–2303.
- Maas C, Schmalzl J. 2013. Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar[J]. *Computers & Geosciences*, 58(2): 116–125.
- Ruffell A, Parker R. 2021. Water penetrating radar[J]. *Journal of Hydrology Journal of Hydrology*, 597: 1–13.
- Topp G C, Davis J L, Annna A P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines[J]. *Water Resource Research*, 16(3): 574–582.
- 蔡少峰. 2019. 探地雷达在河流水下地形及基岩探测中的试验研究[J]. *工程地球物理学报*, 16(5): 680–685.
- 丁凯, 查恩来, 周紧东, 等. 2005. 应用地质雷达进行水下抛石探测的试验研究[J]. *水利学报*, 12(增刊): 560–565.
- 郭秀军, 王森, 孙振水, 等. 2009. 基于探地雷达技术的水下淤泥层高分辨率探测研究[C]//山东省地球物理六十年学术交流会. 青岛: 中国海洋大学: 639–647.
- 欧阳, 张杰, 冯杰, 等. 2022. 地质-地球物理三维可视化建模及其应用——以雄安新区为例[J]. *华东地质*, 43(3): 286–296.
- 王复明, 尚向阳, 钟燕辉. 2008. 探地雷达在河流水深探测中的应用研究[J]. *人民黄河*, 30(4): 17–18.
- 王凯. 2022. 基于综合地球物理探测的雄安新区地热地质结构及深部热源机制研究[D]. 吉林大学博士学位论文.
- 袁国礼, 侯红星, 刘建宇, 等. 2023. 服务生态文明的生态地质调查工作方法浅析[J]. *西北地质*, 56(3): 30–38.
- 赵永辉. 2019. 探地雷达在水下考古中的机遇与挑战[J]. *中国港口*, S1: 125–133.
- 张杰, 杨毅, 王凯, 等. 2022. 综合地球物理在雄安新区三维地质结构探测中的应用与成果[J]. *物探化探计算技术*, 44(6): 742–750.
- 张开伟, 吴园平, 王世森, 等. 2019. 基于探地雷达技术的水下沉积地形探测应用研究[J]. *人民长江*, 50(7): 117–122.
- 中共河北省委、河北省人民政府编制. 2018. 《河北雄安新区规划纲要》[R].