Vol.9, No.1 Jun., 2022

论探地雷达技术在海岸带调查中的应用*

穆 珂 唐 诚* 李艳芳

(中国科学院环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所),山东烟台 264003)

摘 要 传统的海岸带物理勘探方式主要是通过浅层岩心或地表挖掘等调查方式实现的,这种勘探方式不但费时 费力,而且施工成本高、数据质量低、数据分辨率低。最重要的是侵入式的勘探会破坏原有的地形地貌,导致勘探区域 的区域完整性保护较差。对于海岸带地区来说,在调查研究的基础上,保护其环境不遭受破坏是至关重要的。相比于 传统方式,新兴的非侵入性地球物理技术受到学者的关注,例如探地雷达。探地雷达在测量和数据采集方法有着其无 可比拟的优势,比如经济、高效和数据质量高等。本文聚焦于探地雷达在海岸带科研活动应用的机遇与挑战,为海岸 带相关的地质研究提供新的技术方法,增长相关学者对探地雷达的认识和了解,将其更好的应用于海岸带调查当中。 关键词 海岸带环境;物理勘探;探地雷达

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是 一种比较年轻的浅层地球物理勘探技术,其原理是 向地底发射高频电磁波脉冲,从而获得该区域地貌 地质信息。由于地底不同沉积物介质产生的电性参 数有差异,当电磁波遇到介电常数存在差异的界面 会发生反射和散射。通过探地雷达接收散射回波信 号,根据回波时间、振幅和形状对介质的性质、结构 和形状等因素进行推测反演下垫面介电常数特 性^[1]。探地雷达的结构包括发射天线和接收天线 两部分,其原理如图1所示。工作时,发射天线发射 一定频率的电磁波,电磁波向下传递,遇到不同介电 常数的界面会产生不同的反射波,接收天线接收反 射波信号并计算反射波波速进而得到介质介电常数 及其对应深度信息^[2]。

介电常数计算公式如下:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2,\tag{1}$$

式中, ε 为介质的介电常数,v为电磁波在土壤当中的 波速,c为真空中电磁波的传播速度(0.3 m ns⁻¹)。



Fig. 1 Principle of ground-penetrating radar ^[3]

作为一种新兴的地球物理方法,探地雷达有着 其独到的优势,例如操作简单、便捷,抗干扰能力强, 其次就是适用于不同场所、探测分辨率高等^[3]特点 而被广泛应用到工程应用的各个方面。近地表构造 的快速、精确测图等领域都有探地雷达的身影。例 如含水层和土壤研究、土木工程、采矿、考古学、废物 处理等。此外探地雷达可以用于探测浅层地下秘密

收稿日期:2022-03-15

^{*}国家自然科学基金项目(41806029)资助

[†] 通讯作者: E-mail: ctang@ vic. ac. cn

作者简介:穆珂(1999一),男,硕士研究生,主要从事地理信息与地图学研究。E-mail:mk19990202@163.com

管道、埋地服务位置、探测空洞或空腔、测绘基岩深度、断层和裂隙逢、定位混凝土中的钢筋、岩土调查等。作为一种快速工具,探地雷达可以利用高分辨率图像揭示浅层地下的复杂情况,并为广泛的地球和环境管理提供了一种新的地球物理工具^[4]。

探地雷达根据其探测的原理,目前主要集中于 电磁波在有损介质中的传播性质的理论研究当中。 影响电磁波在地质介质中的传播和衰减主要是电磁 波的电导率和介电常数。衰减(信号损失),是信号 频率、介电常数和磁导率的函数,与材料的介电常数 和电导率呈现正相关。空气、水和石英的相对介电 常数(以预测材料为介质与以真空为介质,制成的 同尺寸电容器电容量之比)分别约为1、4.5 和 80。 由于地底介质的复杂性,例如各向异性、不均匀性和 强衰减性,其研究难度和传统的探空雷达相比要大 得多。雷达波在地下的传播过程较为复杂,存在各 种噪声和杂波的干扰,因此如何正确的识别各种杂 波与噪声从而提取有用信息是进行 GPR 信号解译 的重要过程。

目前数字图像处理技术飞速发展,探地雷达的 未来发展趋势肯定会伴随着深度学习技术和大数据 框架,在检测速度和目标验证准确性方面肯定会有 质的突破。探地雷达涉及的领域十分广泛,深入到 各个领域的研究和工程项目当中。

上世纪 60 年代探地雷达被用作极地冰川和冰 盖的测深,另外在绘制永久冻土层地表地质结构和 电学性质当中也有探地雷达的应用^[5,6]。探地雷达 可以用在土壤边界识别、沉积模式分析^[7,8];Botha 等^[9]通过识别埋藏的沉积单元之间的地层关系和 利用探地雷达对沙丘和典型风积砂地层的探测调 查,以此来研究沙丘内部形态的差异性;Dara 等^[10] 通过探地雷达绘制河流河床沉积物结构;Sambuelli 等^[11]在意大利都灵北坎迪亚的冰渍湖进行水上探 地雷达测量,以此来估计水深、水量和沉积物类型。 探地雷达目前广泛应用于探测土层厚度、土壤分层 和沉积物分布。

1 探地雷达在海岸带调查中的应用

目前对于松散海岸沉积地层序列、内部沉积结

构和地质考古的研究,一般方法主要依赖于野外暴 露记录、浅层岩心和地表挖掘来确定地质结构,但这 种方法存在一定的缺陷。由于沿海的沙丘受其植被 的固定作用,土壤表面十分稳定,不容易受到侵蚀影 响,往往是正面沙丘在重大风暴的侵蚀下才会出现 适合研究、面积广泛的暴露,用以进行调查取样和科 研记录。另一方面,大量浅层岩心的提取和挖方作 业往往费时费钱,而且抽取的岩心数量有限、间距过 大,大间距的岩心提取让后期的研究工作也变得困 难,井壁取心或钻井取心的工作方式限制其只能获 取地底内部沉积结构的有限信息。此外,海岸带环 境勘探不同于大洋勘探,海岸带环境探勘往往要考 虑勘探环境的保护和前后完整性一致性,所以传统 的侵入性地球物理勘探技术在海岸带的应用往往不 可取或者不适宜。

作为一种非侵入性获取大范围浅层地下数据的 方法,探地雷达在海岸研究方面,尤其是地理学、地 质学和考古学方面有很大应用前景。目前,探地雷 达已经成功的应用于确定海岸带各种松散沉积物的 范围、厚度、地层和内部沉积结构的探测。探地雷达 技术也可以对海岸带环境污染问题进行研究,例如 对地下水污染进行污染源溯源、水污染模拟和污染 预测,以达到对淡水资源的保护和对污染区更高效 的治理。此外探地雷达对于海水入侵和海堤安全隐 患探查也有相关研究成果。

1.1 沉积物分析

GPR 在海岸带沉积环境方面的应用可以分为 三大类:地层层序和沉积识别、极端天气沉积物追 踪、古海岸线位置追踪等等。

砂体堆积模式、几何形状、孔隙度和渗透率屏障 的探测结果对于地下油气开采的优化至关重要。传 统的地层调查方法,例如野外暴露记录,一方面通过 对大规模暴露数据进行分析,另一方面其原始数据 是二维数据,不足以详细描述单个砂体的三维几何 形态及其内部结构。虽然浅层岩心技术可以获取三 维数据,但其代价昂贵,而且需要对数据进行内核间 插值的后处理作业,才可以获得空间连续数据,数据 可靠性差。而浅层地震勘探数据即使分辨率符合标 准,但是无法识别单个砂体的详细层理结构。对比

而言,探地雷达技术有着其不可替代的优势。探地 雷达提供了一种相对便宜、便携和省时的方法,一般 来说,探地雷达的分辨率远高于浅层高分辨率地震 反射的分辨率,100 MHz 频率下分辨率为1 m^[12],可 以生成用于沉积学和储层模拟研究的高分辨率浅层 地下数据,分辨率甚至可以达到几十厘米级别,该技 术在沉积孔隙被空气或者淡水填充饱和的粘土沉贫 乏沉积物研究当中最为有效。如果沉积物当中含盐 孔隙水或粘土含量高,探地雷达的渗透深度和分辨 率都会严重降低。通过紧密间隔的探地雷达数据网 格所绘制的雷达序列和雷达相,可以量化沉积物及 其内部几何结构和非匀质性。探地雷达的解释过程 和传统雷达的解释过程类似,但凭借着更高的分辨 率,探地雷达可以识别反射面端点,并在米级尺度上 定义雷达序列。从层序地层学角度来看,雷达层序 本质上和床层序和副层序同价[13]。

Teixeira 等利用探地雷达对海滩进行沉积物环 境的重建和分析,通过对雷达图的分析,可以识别地 层的层序及其沉积^[14]。根据得到的一系列剖面,可 以获得该地层序列和地下水位信息。研究结果表 明,探地雷达可以用来分析海岸动力过程,从而可以 区分进积滩沉积。Teixeira 等利用 200 MHz 天线获 得的剖面清晰地显示了地下水位和一个反射面,这 可能与有机质的突变和孔隙水含盐的显著增加有 关。尽管盐度增加限制了信号渗透,但仍然可以区 分其内部的进积,以及沙质沉积物沉积的岩层特征。 该研究对潮汐对地下水及其含盐量变化的影响提供 了新方法。

利用探地雷达对沉积物分析还可应用于极端天 气沉积物追踪。极端事件就是一个事件在这一年的 特定地点和时间是罕见的。极端的定义因人而异, 海岸带区域当中常见的极端天气有气旋、极端降雨、 干旱、海洋热浪、潮汐洪水、海浪洪水、暴风雪和小面 积海冰等。极端天气会导致物理、自然、社会或经济 破坏,甚至其初级灾害影响会导致次级灾害影响的 产生,所以对极端天气的追踪模拟十分重要。

对于早期极端天气例如早期气旋的研究,有助 于灾害预警和制定灾害后勤管理,进而可以提前做 好灾害防护准备。通过野外沉积记录对古早时期的 极端天气进行分析和记录,可以判断出早期极端天 气的规模和特征,进而与现在的极端气候进行联系, 用于研究现在的气候模式。这种方法目前难以实现 的原因在于,距离现在的时间的太过久远,古早极端 天气的沉积和形态特征保存下来的质量较差,使其 记录的过程复杂而且困难。

早期学者使用探地雷达研究冲积平原时,发现 其可以利用于了解沉积层组的内部结构,以达到追 踪古河道和重建河流动力学^[15]。Loveson 等^[16]发 现探地雷达有测量极端天气的沉积特征和内部沉积 结构的能力。探地雷达可以展现海岸带的表层细节 和地貌特征,这可以用来确定和定位极端天气所造 成的地貌和沉积特征。因此,将探地雷达数据连同 海滩剖面和地貌图结合起来,可以追踪由于极端天 气发生的各种沉积期和沉积特征。该测量方式的限 制因素主要有:

- 1) 地下水盐度特征(海水饱和度);
- 2) 深度 2~4 m 以下会造成雷达信号衰减;
- 3) 0~8 m 平均海平面,会出现地面低频噪声。

咸水的入侵会导致探地雷达信号减弱,因为咸 水的具有较高的电导率,导致电磁波大大衰弱,从而 无法进行深地层沉积测量。同样,随着探测深度的 增加,探地雷达的信号也会慢慢衰减,从而影响探测 精度和探测效率。探地雷达的调查深度范围受地面 导电率的限制,随着导电率的增加,波的传输深度就 会减弱。当波穿透地面时,电磁能被耗散成热能,使 得信号在更深的地方失去强度。地面低频噪音同样 会通过影响信噪比来干扰探地雷达测量的精度。

此外,研究表面探地雷达技术可以用来追踪海 相地层位置和古海岸线。古海岸线变迁研究对探讨 海岸古地理、古环境演化及未来海平面变化具有重 要意义^[17]。全新世大暖期海侵边界的位置确定对 研究区域古沉积环境演化和应对未来不确定的海平 面上升、对海岸带地区造成的影响提供了重要的基 础性前提^[18]。确定古海岸线的位置方法通常由地 貌、考古和历史资料相结合的形式。地貌方法一般 有古海侵蚀、贝壳堤、牡蛎礁和侵蚀痕迹等,这种方 法可以较为准确地确定部分区域的古海岸线位置信 息。对于标志物缺乏的区域,一般通过地质钻孔取 样的形式为确定古海岸线位置提供信息,但钻孔取 样由于其本身的缺陷,导致不同的学者得出的古海 岸线位置不一致,甚至相差数公里之多,这种位置的 不确定性对于未来预测海平面和深入研究工作带来 影响。

目前已有研究人员通过 GPR 雷达图像识别出 海侵边界体系,结合传统的钻孔和浅钻方法,获得海 侵沉积层的层位位置变化信息。例如刘艳霞等对全 新世大暖期莱州湾东-南岸古海岸线位置追踪,从 而对区域沉积环境演化和未来海平面影响、对海岸 带地区的影响的提供重要基础前提,所选的实验场 地为莱州湾东具有钻孔数据和典型古海岸线地貌标 志的区域,采用探地雷达追踪大暖期海侵边界。探 地雷达的优点结合合适的钻孔数据可以用于海相 层、古海岸线位置的精确定位,证实了探地雷达技术 追踪古海岸线和海相地层位置的可行性。

探地雷达技术快捷方便,和钻孔资料、古海岸标 志物信息相结合,可以用来精确定位古岸线位置。 对古海岸线位置不确定的区域,使用探地雷达和传 统方法相结合的方法形式可以提供其层序地层信 息。

1.2 水土污染分析

在许多环境污染问题当中,例如地下水污染,都 可以利用探地雷达进行研究。

地下水很容易受到化学有毒物质渗透、垃圾填 埋和受污染河流渗透从而造成污染。对于砾石沉积 物的研究可以更好地了解地下水循环,进而对各种 污染物的输送过程进行短期或长期的预测。传统的 钻孔岩心描述和泵送测试所获得的沉积学信息很稀 疏,往往只能提供有限的非均匀性几何图形。探地 雷达则对砾石沉积中的沉积构造和岩相提供了有用 的技术手段。探地雷达雷达反射图像可以再现沉积 构造的几何形状,特别是可以清楚地描绘出河流汇 流或槽冲的几何形状。另外,探地雷达还可以识别 辫状河结构特征(冲淤沉积、河道沉积)和岩相组 合。在一定条件下,探地雷达还可以预测水力非均 匀性质、各向异性和水力性质的数量级^[19]。

印度 TCCL 公司生产铬基无机化学物,自 1996 年以来工厂周边累积大量的(1.5×10⁵ t)富含 Cr⁶⁺ 的固体废料,涉及范围为 0.014 km²,厚度为 4 m。 长期以来,累积的铬废物(Cr⁶⁺)慢慢从工厂的垃圾 场当中渗出,造成下游的土壤和地下水污染。Sankaran 等^[20]利用探地雷达扫描、钻孔、土壤化学分析 地下水样品和钻孔示踪分析在铬废物堆放地和周围 湖泊堤坝进行试验,用以解读地下地质和 Cr⁶⁺污染 的垂直范围。

利用 GPR 对地下堤坝进行探测有助于在堤坝 上游确定处理存储和处置设施的合适位置,该设施 被证明是天然的污染物地下屏障^[16]。通过对挖掘 的土壤样品进行分析,验证了探地雷达图像中的突 然污染物异常垂直分布,通过水样分析也可以进一 步验证探地雷达图像的准确性。

另外,根据探地雷达的地球物理调查,可以将污 染区域划定淡水区和污染区,由此制定相应的政策, 对淡水区进行保护和对污染区进行治理。Sahebrao 等对河流沿岸的皮革厂地下水质污染进行研究,利 用探地雷达图像扫描可以清楚的表明深度3.2 m的 表层土壤,和深达8 m的未受干扰的均匀介质。探 地雷达扫描图像当中的均匀介质、地下水的低导电 率和高电阻率表征了干净地下水,扫描图像清楚的 显示了由于探地雷达信号反射而产生的干扰异常, 表明了该地区的高导电性和存在污染介质,由此可 用探地雷达划分淡水区和污染区,其划分结果和电 阻率断层扫描和地下水的电导率(EC)和地下水总 溶解固体(TDS)结果分析基本一致,证明了其可靠 性^[4]。

1.3 海水入侵研究中的探地雷达

沿海地区由于自然和人为原因,地下含水层或 河流地区发生海水倒灌,使咸潮影响带扩大并发生 海水补给地下水的现象,称为海水入侵^[21]。海水入 侵的诱因较为复杂,往往是多方面因素综合导致,其 中包含了人为因素和自然因素,自然因素包括气象 灾害、地质变化和海浪潮汐影响,人为因素包括气象 灾害、地质变化和海浪潮汐影响,人为因素包括地下 水的超量开采、滩涂开发、采砂采矿和筑坝蓄水等。 海水入侵导致沿海城市的淡水资源供需失衡,地下 水盐度增高,水质恶化。世界各地的许多沿海含水 层,特别是浅层含水层,经历了由自然和人类引起的 严重海水入侵^[22-27]。

海水入侵定期监测通常是利用海岸地区钻探监 测井网络来实现,但这种方法操作复杂,安装成本高 昂,而且数据覆盖率有限。确定地下水资源和海水 入侵的另外一种方法就是非侵入性地球物理方 法^[28-30],电阻率测量经常被用于与海水入侵调查有 关的研究^[31-33],许多研究人员利用海水饱和地层和 淡水饱和地层之间的巨大电阻率对比来研究沿海地 区的海水入侵问题。Wilson 等^[34]使用垂直电测法 成功的绘制了海水/淡水界面。

Satish 等利用电阻率断层扫描(ERT)和探地雷 达(GPR)相结合的方式对研究区的电阻率断层进 行扫描,以此来研究跟踪海水侵入淡水含水层的途 径。ERT 是划定海水-淡水界面和绘制沿海地区海 水入侵的强有力工具^[35-37]。探地雷达提供了一个 高分辨率探测的能力,可在几米的范围内探测地物 特征,利用 ERT 剖面显示的电阻率来区分地层以下 为海水或淡水,低电阻率表明是海水,高电阻率表明 是盐-淡水混合区。探地雷达使用电磁(EM)辐射 对地表下的特征进行成像,可以感知地下结构的反 射信息,干燥沙子的介电常数很低,海水的介电常数 较高,当 GPR 信号脉冲从干沙(介电常数为5)到湿 沙(介电常数为30),会产生强烈的、明亮的可见反 射,当从干沙(介电常数为5)到石灰岩(介电常数为 7)时,会产生非常微弱的反射,以此来确认海水入 侵及其途径。ERT 数据和 GPR 数据相关联,以便更 准确地区分淡水和海水区,从而确定海水从海岸到 内陆地区的入侵情况。

1.4 海堤工程隐患探测

海堤,又称为海塘,是一种沿海的特殊堤坝工, 修建于海岸之上,其功能是防止海水入侵,具有阻隔 海水的作用。海堤需要承受海浪、潮汐和风暴潮的 冲击和土地沉降带来的自身结构变化。由于沿海地 区海岸地质多为泥沙砾石,使得海堤往往修筑于软 弱的地基之上,而且后期修筑的海堤往往建在早期 海堤之上,这导致海堤工程本身结构及其赋予环境 都十分复杂^[38,39]。因此对海堤工程进行隐患排查, 是确保海堤工程安全运行及充分发挥工程效能的重 要环节,对保护沿岸地区的经济建设和人民的生命 财产安全具有重要意义^[38,39]。

海堤隐患探测主要是利用地球物理方法,通过 检测堤坝的电学、声学、温度或其他指标,判断内部 是否存在洞穴、裂缝、松散体、高含砂层、护坡脱空层、古河道、砂砾石层和渗漏、管涌等隐患^[40]。

传统海堤隐患探测仪器有大地电导率和探地雷 达等。介质的电导率与介质类型及其结构、空隙度、 含水量、密实程度及温度等一系列因素有关,当堤坝 产生隐患(如软弱层、洞穴、水流通道、物质松散) 时,会导致地下介质的导电性结构发生变化,由此可 以利用导电率的变化来反映堤坝内部的非匀质性, 大地电导率可以初步探查堤坝的各自隐患。探地雷 达则利用无线电波来确定地下介质分布,通过激发 天线发射高频电磁波,电磁波在地下介质中向下传 播的过程中,遇到界面发生发射和投射,反射波向上 传播到达地面被接受天线所接受。分析雷达信号记 录当中有无反射信号或反射特性差异,从而获知地 下有无电磁界面异常或异常体的深度,实现对目标 体的内部进行探测。可以充分利用探地雷达光谱图 像运动学和动力学信息,全面分析和确定各层的深 度,以及隐患的性质和范围^[41]。

探地雷达在海堤隐患探测中,一般的隐患判断 依据为^[42]:

当电磁波由空气进入堤坝表面时,会在雷达
 图谱图像的上方产生一组水平状的振幅较强、信号
 均匀、同相轴连续的波形。

2)当填土密实度较好时,散射信号较弱,振幅 较小,没有多次波,如果填压欠密实或出现松散体 时,强散射信号的同相轴会产生较大的形变,且不连 续、无规则、较分散。

 3)出现脱土或裂隙时,会在脱空表面产生一组 与堤坝表面层信号极性相反、振幅较大的强散射信
 号,三振相特征明显易形成多次波。

 4)当堤坝内部出现含水带时,会导致散射信号 增强,电磁波在进入含水带时会形成极性与表面信 号相同的散射波。

传统的无损物理探测手段在堤坝工程的安全隐 患探测技术方面取得很多成果,由于物探方法反演 具有多解性,利用单一的物探方法难以解释海堤的 隐患情况,而且单一的测量方式往往存在弊端,很难 完全适用于堤坝工程的隐患探测。不同的探测仪器 存在其各自的优缺点,探地雷达的探测速度最快,对 地下管道的敏感度较高,另外,探地雷达可以提高海 堤整体、连续的剖面。大地电导率的探测速度较差, 但操作简单、携带方便。秦鹏等将探地雷达和大地 电导率仪相结合,对钱塘江海堤工程进行研究。首 先利用大地电导率进行初步探测,定位电导率异常 值位置,然后利用探地雷达对异常位置进行再次探 测,保证测量图像的精度,由探地雷达检测成像显示 的电导率异常物体形状规则,来判断是否为自然破 坏或人为破坏。该方法提高了检测效率和准确性, 弥补了单个仪器测量的缺陷。两者的组合可以快速 识别海堤的安全问题,对于可能存在的安全隐患,探 地雷达可以精确成像,同时避免了盲目开挖对堤坝 造成的破坏^[43]。

2 结论与展望

相比于传统的侵入式物理勘探方法,非侵入式 物理勘探方法为学者研究海岸带地貌、地质和环境 管理等方面提供了新的思路,而且具有操作简单、便 捷、低成本、场景适用性强和勘探分辨率高的优点。 GPR 目前已经在海岸地质、地貌和考古学取得很大 成就,特别是在海岸沉积学分析、海水入侵、极端天 气沉积物和古岸线追踪当中被广泛应用。

作为一种可靠、快速和低成本的地球物理方法, 探地雷达在海岸带相关研究中可以产出高质量、高 分辨率和高成效的数据。目前,海岸带地球物理勘 探趋势是将新的技术和旧的事物联合起来,达到取 长补短。例如将传统的岩层钻孔取芯和 GPR 相结 合,得到更加精确的数据质量和数据成果,这些数据 为海岸带综合管理、环境保护与评价、岸线规划等提 供宝贵的基础资料。随着探地雷达应用领域的不断 扩展和研究的不断深入,其应用前景将变得十分广 阔,值得学者在海岸带领域不断探索、创新和发展。

参考文献

- [1] Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth Science Reviews, 2004, 66(3/4): 261-330
- [2] 刘成功, 贾小旭, 邵明安. 地球物理方法在土壤水文过程研究中的应用与展望. 土壤, 2022, 54(1):1-8. Liu C G, Jia X Y, Shao M A. Application and prospect of geophysical methods in study of soil hydrological processes. Soils, 2022, 54(1):1-8
- [3] 魏剑涛. 探地雷达的分析和研究. 大连:大连理工大学, 2000.

Wei J T. Analysis and study of Ground-penetrating radar. Dalian : Dalian University of Technology, 2000

- [4] Sonkamble S, Chandra S. GPR for earth and environmental applications: case studies from India. Journal of Applied Geophysics, 2021(1): 104422
- [5] Bailey J T, Evans S, Robin G. Radio Echo Sounding of Polar Ice Sheets. Nature, 1964, 204(4957): 420-421
- [6] Annan A P, Davis J L. Impulse radar sounding in permafrost. Radio Science, 2016, 11(4): 383-394
- [7] Xu X, Wang F, Xin K, et al. Soil layer thickness detection in land rearrangement project by using GPR data // International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE, 2012
- [8] Lindhorst S, Betzler C, Hass H C. The sedimentary architecture of a Holocene barrier spit (Sylt, German Bight): swash-bar accretion and storm erosion. Sedimentary Geology, 2008, 206(1):1-16
- [9] Botha G A, Bristow C S, Porat N, et al. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa. Geological Society London Special Publications, 2003, 211(1): 29-46
- [10] Dara R, Kettridge N, Rivett M O, et al. Identification of floodplain and riverbed sediment heterogeneity in a meandering UK lowland stream by ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, 2019, 171: 103863
- [11] Sambuelli L, Bava S. Case study: a GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. Journal of Applied Geophysics, 2012, 81: 48-56
- McCann D M, Jackson P D, Fenning P J. Comparison of the seismic and ground probing radar methods in geological surveying // IEE Proceedings F-Communications, Radar and Signal Processing. IET, 1988, 135(4): 380-391
- [13] Gawthorpe R L, Collier R, Alexander J, et al. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. Geological Society, 1993
- [14] Teixeira T, Lorenzo H, da Costa A, et al. GPR radar imaging of water table, salty water, and sand stratigraphy in a coastal zone in Rio de Janeiro. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4758: 697-702
- [15] Altdorff D, Epting J, Kruk J, et al. Delineation of fluvial sediment architecture of subalpine riverine systems using noninvasive hydrogeophysical methods. Environmental Earth Sciences, 2013, 69 (2): 633-644
- [16] Loveson V J, Gujar A R, Barnwal R, et al. GPR studies over the tsunami affected Karaikal beach, Tamil Nadu, south India. Journal of Earth System Science, 2014, 123(6): 1375–1385
- [17] James T, Gowan E J, Hutchinson I, et al. Sea-level change and

paleogeographic reconstructions, southern Vancouver Island, British Columbia, Canada. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(13/14): 1200-1216

- [18] 刘艳霞,黄海军,祁雅莉,等.全新世大暖期莱州湾东-南岸 古海岸线位置追踪.应用基础与工程科学学报,2014,22
 (2):252-265. Liu Y X, Huang H J, Qi Y L, et al. Transgression boundary identification in the east-south coast of Laizhou Bay during the holocene megathermal period. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 252-265
- [19] Huggenberger P. Radar facies: recognition of facies patterns and heterogeneities within Pleistocene Rhine gravels, NE Switzerland. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 75(1): 163-176
- [20] Sankaran S, Rangarajan R, Kumar K K, et al. Geophysical and tracer studies to detect subsurface chromium contamination and suitable site for waste disposal in Ranipet, Vellore district, Tamil Nadu, India. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(4): 757 -764
- [21] 郭占荣,黄奕普. 海水入侵问题研究综述.水文,2003(3):10
 -15. Guo Z R, Huang Y P. Comprehensive Study on Seawater Intrusion. Hydrology, 2003(3):10-15
- [22] Salama R B, Fitzpatrick O. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. Hydrogeology Journal, 1999
- [23] Bobba A G. Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level change in the Godavari Delta, India. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47 (S1): S67-S80
- [24] Westbrook S J, Rayner J L, Davis G B, et al. Interaction between shallow groundwater, saline surface water and contaminant discharge at a seasonally and tidally forced estuarine boundary. Journal of Hydrology, 2005, 302(1/2/3/4): 255-269
- [25] Giambastiani B M, Antonellini M, Oude Essink G H, et al. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. Journal of Hydrology, 2007, 340(1): 91-104
- [26] Somay M A, Gemici N. Assessment of the salinization process at the coastal area with hydrogeochemical tools and Geographical Information Systems (GIS): Seluk Plain, Izmir, Turkey. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, 201(1): 55-74
- [27] Mccoy C A, Corbett D R. Review of submarine groundwater discharge (SGD) in coastal zones of the Southeast and Gulf Coast regions of the United States with management implications. Journal of Environmental Management, 2009, 90(1): 644-651
- [28] Al-Garni M A, El-Kaliouby H M. Delineation of saline groundwater and sea water intrusion zones using transient electromagnetic (TEM) method, Wadi Thuwal area, Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 4(3a4): 655-668
- [29] Nenna V, D Herckenrath, Knight R, et al. Application and evaluation of electromagnetic methods for imaging saltwater intrusion in

coastal aquifers: Seaside Groundwater Basin, California. Geophysics, 2013, 78(2): B77-B88

- [30] El-Kaliouby H, Abdalla O. Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. Journal of Applied Geophysics, 2015, 115: 59-64
- [31] Wanniarachchi D, Perera L. Geophysical investigation of saline water intrusion into fresh water aquifers: a case study in La Digue West Coast, Seychelles, 2017
- [32] Adepelumi A A, Ako B D, Ajayi T R, et al. Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria. Environmental Geology, 2009, 56(5): 927-933
- [33] Hodlur G K, Dhakate R, Sirisha T, et al. Resolution of freshwater and saline water aquifers by composite geophysical data analysis methods. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2010, 55(3): 414-434
- [34] Wilson S R, Ingham M, Mcconchie J A. The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. Journal of Hydrology, 2006, 316(1/2/3/4): 301-312
- [35] Edet A, Okereke C. A regional study of saltwater intrusion in southeastern Nigeria based on the analysis of geoelectrical and hydrochemical data. Environmental Geology, 2001, 40 (10): 1278-1289
- [36] Balia R, Ardau F, Barrocu G, et al. Assessment of the Capoterra coastal plain (southern Sardinia, Italy) by means of hydrogeological and geophysical studies. Hydrogeology journal, 2009, 17(4): 981–997
- [37] A L K, B R B, A A B M, et al. Geophysical and hydrochemical study of the seawater intrusion in Mediterranean semi arid zones.
 Case of the Korba coastal aquifer (Cap-Bon, Tunisia). Journal of African Earth Sciences, 2010, 58(2): 242-254
- [38] 秦植海,秦鹏.海堤地基固结系数反演与工后沉降分形模型预测. 岩土力学, 2012, 33(6):1747-1793. Qin Z H, Qin P. Consolidation coefficient inversion of seawall foundation and prediction of its post construction settlement based on fractal theory. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1747-1753
- [39] 葛双成,张莎,梁国钱,等.海塘工程安全检测技术及应用实例.水利水电科技进展,2007,27(1):64-67. GeSC, Zhang S, Liang G Q, et al. Safety monitoring technology and its application to sea dyke projects. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1):64-67
- [40] 杜晨程, 邵阳英, 胡勇峰, 等. 物探技术在海塘隐患探测的应用探讨. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(3): 28-34. Du C C, Shao Y Y, Hu Y F, et al. Application of geophysical prospecting in seawall hazard detection. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2014, 26(3): 28-34
- [41] Ge S, Xu J, An C, et al. Ground penetrating radar detection of hidden defects in the seawall // 9th International Workshop on Ad-

vanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). IEEE, 2017

- [42] 杨磊,周杨,郭志生.基于雷达散射特征的堤防隐患诊断技术研究.水利水电技术,2011,42(12):97-100. Yang L, Yang Z, Guo Z. Study on technique of diagnosis on dike hidden troubles based on radar scattering characteristics. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011,42(12):97-100
- [43] 秦鹏,高健,程春梅,等.大地电导率仪-探地雷达组合物探法在海堤工程隐患探测中的应用.科技通报,2017,33(7): 233-236. Qin P, Gao J, Shu H, et al. Application of earth conductivity detector and ground penetrating radar to leakage detection of seawall. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(7): 233-236

ON THE APPLICATION OF GROUND-PENETRATING RADAR TECHNOLOGY IN COASTAL ZONE SURVEY

Mu Ke Tang Cheng[†] Li Yanfang

(Key Laboratory of Coastal Environment Processessand Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai, Shandong 264003, China)

Abstract The traditional way of physical exploration of coastal zone is mainly realized by survey methods such as shallow core or surface excavation, which is not only time-consuming and laborious, but also has high construction cost, low data quality and low data resolution. Most importantly, the intrusive exploration will destroy the original topography and geomorphology, resulting in poor protection of regional integrity of the exploration area. For the coastal zone area, it is crucial to protect its environment from damage based on investigation and research. Compared with traditional methods, emerging non-invasive geophysical techniques have received attention from scholars, such as ground-penetrating radar. Ground-penetrating radar has unparalleled advantages in measurement and data acquisition methods, such as economy, efficiency, and high data quality. This paper focuses on the opportunities and challenges of ground-penetrating radar in coastal zone research activities, providing a new technical approach for coastal zone related geological research, increasing the knowledge and understanding of ground-penetrating radar for better application in coastal zone investigations.

Key words Coastal environment; Physical exploration; Ground-penetrating radar