

研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i02.7-14

亮点:

- 融合三种地球物理方法，互补克服单一探测多解性。
- 构建多场全深度探测体系，覆盖浅表至中深部渗流异常。
- 监测与检测融合诊断，精准评估抽水蓄能电站渗流安全。

*通讯作者邮箱:

1339275030@qq.com

英文引用: Quanling Li et al., 2026. IStudy on Qualitative Evaluation of Dam Seepage Based on Synergy of Multiple Non-Destructive Testing Methods. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (02), 7-14.

中文引用: 李全领等., 2026. 多种无损检测方法协同的大坝渗流定性评价研究. 工程科学与实践, 2 (02), 7-14.

稿件处理节点:

| | |
|----|------------|
| 接收 | 2026年5月20日 |
| 修订 | 2026年5月24日 |
| 接受 | 2026年5月26日 |
| 发表 | 2026年6月3日 |

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名4.0国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及DOI信息。

多种无损检测方法协同的大坝渗流定性评价研究

李全领¹, 周峰明^{2,3}, 赵新奇^{4*}

¹ 方城县水利发展服务中心, 南阳 473200

² 郑州大学, 郑州 450001

³ 南阳豫资投资发展集团有限公司, 南阳 473000

⁴ 南阳豫资汉山水库建设管理有限公司, 南阳 473200

摘要 渗流安全是水利工程运行稳定性的关键控制因素，单一地球物理探测方法常因物理机制局限存在多解性强、探测深度与分辨率难以兼顾等问题，无法全面精准识别大坝内部隐蔽性渗流隐患。为提升渗漏隐患探测的可靠性与全面性，本文提出一种融合高密度电法（HDR）、地质雷达（GPR）与多道面波分析（MASW）的多方法协同探测技术路径。该方法依托电磁、电性和弹性多物理场响应特征的互补性，发挥高密度电法对中深层含水性敏感、地质雷达浅层结构探测精度高、多道面波分析可反映土体密实度的技术优势，通过有序递进的数据采集、独立反演、叠合对比与综合推断流程，构建了覆盖浅表至中深部的全方位渗流异常识别体系。以泰安抽水蓄能电站上水库坝体为工程实例开展现场应用验证，结果表明：地质雷达探测范围内未发现同相轴错断、反射波杂乱等异常，浅层无空洞、塌陷等结构缺陷；高密度电法显示坝体电阻率整体均匀，局部高阻区经研判为土质变化或碎石分布，不存在具有渗漏风险的低阻异常带；面波法探测结果反映土体波速随深度递增，密实度良好，无明显低速疏松区域。研究表明，多地球物理方法融合不仅有效克服了单一技术的多解性，显著提升了隐患识别的可靠性与全面性，也为水利工程的安全巡检与风险评估提供了一套高效、无损的技术方案，具有重要的工程应用价值和推广前景。

关键词: 渗流安全；地球物理方法；高密度电法；地质雷达；抽水蓄能电站

Study on Qualitative Evaluation of Dam Seepage Based on Synergy of Multiple Non-Destructive Testing Methods

Quanling Li¹, Fengming Zhou^{2,3} and Xinqi Zhao^{4*}

¹ Fangcheng Water Conservancy Development Service Center, Nanyang 473200

² Zhengzhou University, Zhengzhou 450000

³ Nanyang Yuzi Investment Development Group Co., Ltd., Nanyang 473000

⁴ Nanyang Yuzi Hanshan Reservoir Construction Management Co., Ltd., Nanyang 473200

Abstract Seepage safety is a critical controlling factor for the operational stability of hydraulic engineering. Single geophysical detection methods often suffer from inherent limitations of physical mechanisms, such as strong non-uniqueness and the trade-off between detection depth and resolution, making it impossible to comprehensively and accurately identify hidden seepage hazards inside dam bodies. To improve the reliability and comprehensiveness of seepage hazard detection, this paper proposes a multi-method collaborative detection technical approach integrating High-Density Resistivity (HDR), Ground Penetrating Radar (GPR) and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Based on the complementarity of the response characteristics of electromagnetic, electrical and elastic multi-physical fields, this

method gives full play to the technical advantages of HDR in sensitivity to medium-deep water content, GPR in high-precision shallow structural detection, and MASW in reflecting soil compactness. Through an ordered and progressive workflow of data acquisition, independent inversion, superposition comparison and comprehensive inference, a full-range seepage anomaly identification system covering shallow to medium-deep depths is constructed. Field application verification was carried out taking the upper reservoir dam of Tai'an Pumped Storage Power Station as the engineering case. The results show that no anomalies such as event discontinuity or chaotic reflected waves were found within the GPR detection range, indicating no structural defects such as cavities or collapses in the shallow layer. The HDR results reveal that the overall resistivity of the dam body is uniform; the local high-resistivity zones are judged to be caused by soil property variation or gravel distribution, and no low-resistivity anomaly zones with seepage risks exist. The MASW detection results reflect that the soil wave velocity increases with depth, the soil compactness is good, and no obvious low-velocity loose zones are observed. The study demonstrates that the integration of multiple geophysical methods not only effectively overcomes the non-uniqueness of single techniques and significantly improves the reliability and comprehensiveness of hazard identification, but also provides an efficient and non-destructive technical solution for the safety inspection and risk assessment of hydraulic engineering, which has important engineering application value and broad promotion prospects.

Keywords: seepage safety; geophysical methods; high-density resistivity (HDR); ground penetrating radar (GPR); pumped storage power station

1. 引言

渗流安全是大型水利工程运行稳定性的核心控制要素，而此类工程普遍具有跨越地质单元多、服役周期长、水文地质条件复杂等特点，运行过程中受地质环境演变、周期性荷载作用、水位波动及降雨入渗等多重因素耦合影响，极易形成空洞、渗漏通道、土体疏松等隐蔽性渗流隐患，若未能及时识别将严重威胁工程结构完整性与长期运行安全。传统检测手段如钻孔取样、开挖探查等，不仅检测成本高、效率低、空间覆盖范围有限，且具有明显的破坏性，无法满足运行中水利工程大规模、高频次、非侵入式的渗流隐患排查需求。单一地球物理方法虽具备无损、高效的技术优势，但受限于自身物理机制，存在多解性强、探测深度与分辨率难以兼顾等固有缺陷，难以全面精准刻画复杂的地下渗流系统。因此，发展多方法协同的地球物理无损检测技术，已成为当前水利工程渗流安全评估领域的迫切需求与研究热点。

地质雷达、高密度电法、面波法是当前水利工程地球物理无损检测领域应用最成熟的三种技术，三者基于不同的物理原理实现对工程内部结构的探测，检测侧重点与适用范围各有差异。地质雷达依托电磁波传播特性实现浅层缺陷精准识别，高密度电法借助介质电阻率差异判别中深层含水隐患，面波法利用弹性波传播规律评估深层介质密实度。系统研究三种方法的技术特性、研究现状及联合应用优势，对提升水利工程安全检测的全面性与准确性具有重要意义。本文深入剖析了三种检测方法的核心优势与应用基础，再结合泰安抽水蓄能电站工程实例验证其联合应用效果，为水利工程渗流安全检测实践提供理论与技术支撑。

2. 方法原理与适用性分析

2.1. 高密度电法 (HDR)

高密度电法勘探的原理是在地表通过供电电极向地下注入直流电流，形成人工电场；随后利用测量电极配合仪器观测该电场在地表的分布特征，从而研究地下不同地质体因电性差异所引起的电场变化。具体而言，将探测剖面划分为二维网格模型，通过反演算法求解每个网格单元的电阻率，生成一个理论上的电阻率伪剖面；再将该伪剖面与实测电阻率剖面进行拟合，通过迭代计算不断修正模型参数，逐步减小两者之间的差异，直至达到预设的标

准，即获得一个与实测数据高度吻合的理想反演结果。

因此高密度电法是通过利用的各种介质电阻率的不同来实现土体内部异常的判别。如电阻率剖面图上存在相对低阻区或者高阻区，则说明该位置存在和周围介质不一样的物体，不含水的空洞、坑道、孤立的大石头、建筑回填垃圾等表现为高阻，而含水的空洞、坑道表现为低阻，据此可实现渗流是否正常的判别。在不均匀沉降方面，当地下介质分布均匀时，电阻率等值线表现为条带状分布，反之则说明地下介质不均匀。HDR 探测深度大（可达 30–50 m），能有效识别深层含水区；但其横向分辨率较低，且低阻异常可能由黏土、饱水层等多种因素引起，因此存在多解性。

高密度电法可获取坝体内部的电阻率特征值。由于坝体的渗流状态既受水位、降雨等外部环境因素影响，也与填筑密度、含水量等内部土体参数密切相关，而电阻率的变化能够有效反映渗流状态的改变，因此电阻率数据不仅显著受土体填筑密度和含水量的影响，也与水位、降雨等外部因素密切相关。聂艳侠^[1]等则是运用实验，分析了电阻率与土体饱和度之间的联系，即电阻率与土体干密度与含水量之间的关系，结果表明，土壤电阻率与干密度与含水量之间存在着定量关系式，两者之间关系密切。Coulibaly^[2]、Sjodahl^[3]等使用电阻率成像仪分别探测加拿大与瑞典南部的工程内部含水饱和度后亦获得了类似的结论。通过对电阻率数据研究，现有文献均表明利用电阻率数据可实现渗流安全的评估。刘道涵^[4]、姚纪华^[5]及王祥^[6]等在开展对土体电阻率试验后，均表明应用土体电阻率方法能有效的探测到土体中的渗流通道或缺陷的大致位置，为评价和监测土体结构的稳定提供了一种较为有效的技术手段。因此本文选用坝体电阻率数值表明坝体内部渗流情况，并将其设为指标评价体系的指标之一。

2.2. 地质雷达 (GPR)

地质雷达探测原理是利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式来探测隐蔽介质分布。当发射天线向被测物发射高频宽带短脉冲电磁波时，遇到不同电特性的介质就会有部分电磁波能量返回，接收天线接收反射回波，并由主机记录下来，同时记录反射时间，形成雷达剖面图。

电磁波在介质中传播时，其路径、电磁波场强度以及波形将随所通过介质的电磁特性及其几何形态而发生变化。因此，根据接收到的电磁波特征，即波的旅行时间（亦称双程走时）、幅度、频率和波形等，通过对雷达图像的处理和分析，可以推断出介质的内部结构以及目标体的深度、形状等特征参数。当出现土层塌陷、空洞、渗流等异常时，其介电常数与周围介质不同，反射信号增强，雷达剖面上将会形成弧形反射、同相轴错断、反射波杂乱等现象，这就为查找缺陷和地下构筑物提供了物理基础。GPR 横向与垂向分辨率高（可达厘米级），适用于探测近地表空洞、面板脱空等渗流诱发的结构缺陷；但其探测深度受介质电导率限制，在含水或黏性土层中衰减快，通常仅适用于 <5 m 的浅层探测。

对其数据的变化进行分析可实现渠道内部渗流状态的分析，如薛建^[7]、高士佩^[8]、任爱武^[9]等均是利用了探地雷达的方法，实现堤坝工程内部土体渗流状态的无损检测，并为堤坝的有效管理与维修加固提供了科学决策的依据。因此应将其设为指标评价体系的指标之一。

2.3. 面波法 (MASW)

地表震源不仅能激发纵波和横波，还会因纵波与横波的相互干涉和叠加而发生波型转换，导致地下介质质点沿特定轨迹运动，从而形成一种能量较强、主要集中在地表附近的波动，即面波。如图 2-1 所示，在均匀半空间介质中传播时，面波质点在垂直于波传播方向的平面内振动，其振动轨迹呈逆时针旋转的椭圆。当平面 SV 波以大于临界角的角度入射到自由表面时，所产生的反射 P 波将沿自由表面前进，表现为一种不均匀波。

面波法利用的是不同的介质，速度的不同，都会在剖面上形成异常区域，为查找缺陷和地下构筑物提供了物理基础。根据激发的震源的不同，瑞雷波法可分为主动源和天然源。主动源面波（瞬态法）是采用锤击激发瑞雷波，产生一定频率范围的瑞雷波，不同频率的瑞雷波叠加在一起，以脉冲的形式向前传播。通过对瑞雷波波速的分布情况分析，进而获得隐患的判断及分布情况。（MASW 对深层（10–30 m）土体密实度变化敏感，可间接反映长期渗流造成的土体劣化；但其对水体本身不直接响应，且解释依赖于速度-岩性经验关系，需结合其他方法约束。）

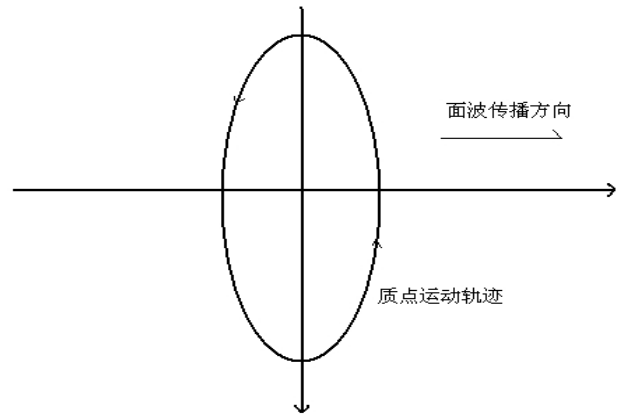


图 2-1 均匀半空间介质中面波的传播

Hai Y.J^[10]等利用电阻率法与瞬态面波法对矿山尾矿坝的渗流隐患进行了相关的试验，结果表明，在检测可能存在的渗漏位置的时候，这两种方式的相互结合能够取得较好的结果。而 Bin Liu^[11]等则是更进一步，利用电阻率数据和面波数据实现了堤坝工程内部一维、二维模型的高质量综合输出，并对基岩深度、土壤厚度、含水量变化、可能的渗流路径以及岩溶特征进行了特征识别，并在实例应用中，取得了较好的结果。因此应将其设为指标评价体系的指标之一。

2.4. 多方法融合的必要性与技术路径

单一地球物理方法受限于其物理机制与探测条件，难以全面刻画复杂的渗流系统，而多方法融合则可通过物理场互补、空间尺度衔接与解释互验，显著提升隐患识别的可靠性。其必要性主要体现在三方面：一是克服多解性，例如高密度电法（HDR）中的低阻异常可能源于渗漏通道或正常饱水黏土层，若探地雷达（GPR）在同一位置显示杂乱反射、多道面波分析（MASW）显示低速，则三者共同指向“含水疏松体”，极大增强渗漏通道的判别可信度；二是拓展探测维度，HDR 与 MASW 主要提供垂向信息，GPR 则具备优异的横向分辨率，三者结合可构建三维地下物性模型；三是实现相互验证与约束，一种方法的成果可作为另一方法反演的初始模型或约束条件，从而提升反演的稳定性与精度。

在技术路径上，融合并非简单堆砌数据，而是一个逻辑严密、有序递进的解释过程：首先在数据采集阶段尽可能使三种方法测线重合或平行，确保探测对象一致；其次分别对各方法数据进行独立处理

低阻异常带。

面波法 (MASW)：其判别依据是横波速度剖面是否反映出因土体疏松或不均匀沉降导致的高速异常区。若地下介质波速随深度增加而整体提高，未见明显的低速疏松区域，说明土体密实度良好，结构稳定。

4.2. 地质雷达

布置 4 条测线，测线号分别为左岸：LZ1、LZ2，右岸：LY1、LY2。4 条测线的测试范围如下：

各测线下穿附近的雷达剖面图见图 4-1~4-4，图中黑线为下穿的位置。

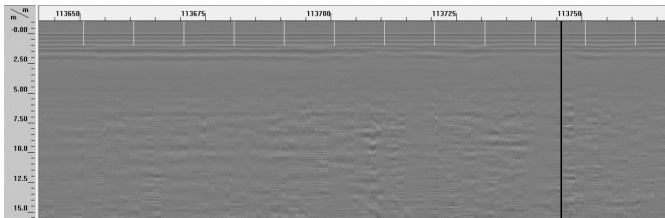


图 4-1 地质雷达 LZ1 测线成果图

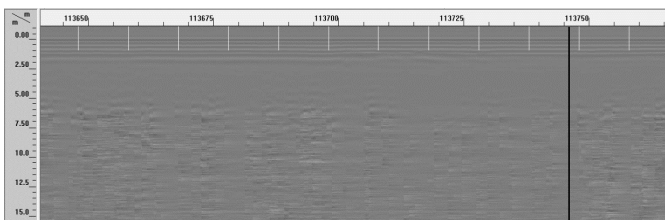


图 4-2 地质雷达 LZ2 测线成果图

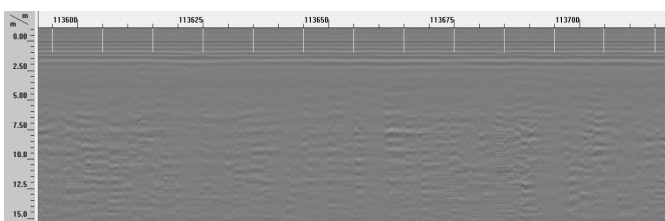


图 4-3 地质雷达 LY1 测线成果图

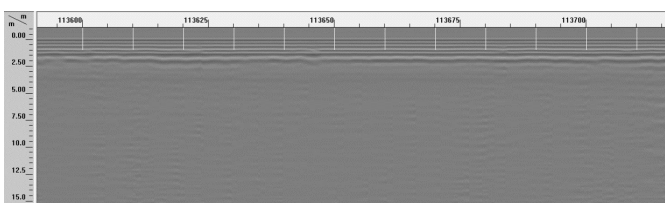


图 4-4 地质雷达 LY2 测线成果图

经对 LZ1、LZ2、LY1、LY2 四条测线的雷达剖面进行分析，未发现同相轴错断、反射波杂乱、

强反射双弧线等异常，说明在地质雷达探测范围内，地下土质无空洞、塌陷等明显缺陷。

4.3. 高密度电法

高密度电法完成 2 条测线，左岸测线号为 GZ1，电阻率剖面见图 4-5；右岸测线号为 GY1，电阻率剖面见图 4-6。

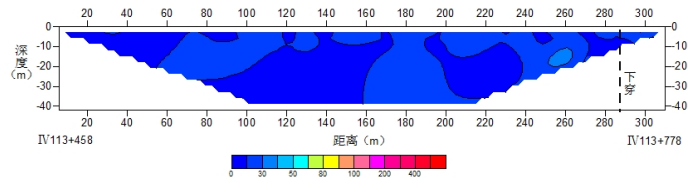


图 4-5 高密度电法 GZ1 测线电阻率剖面图

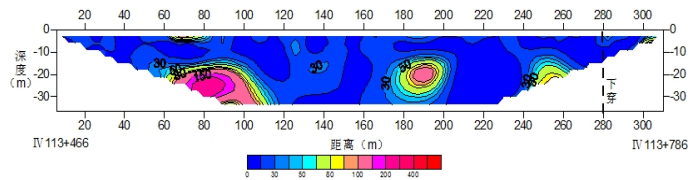


图 4-6 高密度电法 GY1 测线电阻率剖面图

测线 GZ1：从电阻率剖面图 (图 4-5) 上可以看出，整体电阻率较低且均匀，电阻率基本在 $40\Omega\cdot m$ 以下，说明在探测范围内，地下土质较均匀，无明显缺陷。

测线 GY1：从电阻率剖面图 (图 4-6) 上可以看出，大部分电阻率在 $40\Omega\cdot m$ 以下。在水平距离 $60\sim 110m$ 、深度 $15\sim 33m$ ，水平距离 $180\sim 200m$ 、深度 $12\sim 28m$ ，水平距离 $245\sim 260m$ 、深度 20 以下，为相对高阻，电阻率超过了 $50\Omega\cdot m$ ，说明地下存在高阻异常。水平距离 $180\sim 200m$ 、深度 $12\sim 28m$ 为一闭合高阻区，有可能为碎石区，建议后期定期检测；其他两个部位的高阻根据整体剖面去看，应是土质变化引起的，缺陷的可能性较小。

综上，2 条测线在下穿工程附近都无明显异常，存在缺陷的可能性小。

4.4. 面波法

MZ1 测线

测线位于左岸路外侧坡顶草地，测试 30 点，测试成果图见下图 4-7，图中黑色虚线为下穿工程可能位置。由图中看出，尽管波速较乱，但从整体来看，从上至下，深度 5m、深度 10m、深度 17m、深度

27m 及以下深度，波速逐渐提高，说明在探测范围内地下介质比较均匀，无明显缺陷。

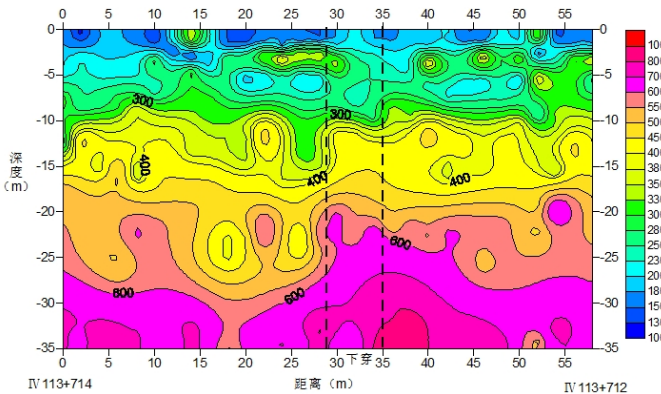


图 4-7 面波 MZ1 测线波速剖面图

MY1 测线

测线位于右岸路外侧坡顶草地，其测试成果图为图 4-8，图中黑色虚线为下穿工程可能位置。由图中看出，地下介质随深度的增加波速整体逐渐提高，说明在探测范围内，土质密实度较好，无明显缺陷。

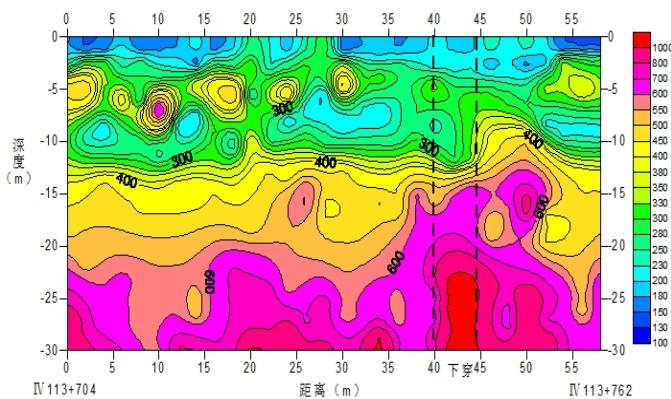


图 4-8 面波 MY1 测线波速剖面图

综上，对 MZ1、MY1 两条测线的分析表明，在探测范围内的土体密实度较好，无明显缺陷。

4.5. 结论

本研究跳出单一地球物理技术的应用局限，从多物理场响应互补的底层逻辑出发，系统验证了高密度电法、地质雷达与多道面波分析在渗流隐患探测中的协同机制。不同于以往多方法简单叠加的应用模式，本研究明确了三种技术的探测边界与异常对应关系，建立了“电性含水性异常 - 电磁结构异常 - 弹性密实度异常”的多参数组合判别规则，通过不同物理场信息的交叉约束，从根本上解决了单一方法解释多解性的行业痛点。

泰安抽水蓄能电站上水库的工程实践表明，该协同探测体系能够适配断裂带发育、岩体风化不均的复杂地质条件，实现对坝体从浅表 5 米到中深部 30 米的连续无盲区探测。本次检测在坝体关键断面未发现空洞、渗漏通道或土体疏松等典型渗流缺陷，三种方法的探测结果在空间上高度一致，为工程安全状态判定提供了独立且相互印证的物探证据，也验证了该技术体系在复杂水利工程中的适用性。

本研究形成的标准化融合解释流程，可直接复制应用于水库大坝、堤防、渠道等各类水利工程的渗流安全排查。未来可进一步结合无人机航测、钻孔原位测试等手段，构建“空-地-孔”一体化的三维探测体系，实现对水利工程渗流隐患的更精准定位与全生命周期动态评估，但若需要更加精准的定量分析，仍需结合长时间监测数据来进行判定。

参考文献

- [1] 聂艳侠, 胡黎明, 温庆博. 土壤电阻率与饱和度定量关系的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1):3441-3448.
- [2] Coulibaly Yaya, Belem Tikou, Cheng LiZhen. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine[J]. 矿业科学技术学报(英文版), 2017, 27(04):701-710.
- [3] Sjoedahl P, Dahlin T, Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden[J]. Environmental Geology, 2005, 49(2):267-273.
- [4] 刘道涵, 罗士新, 陈长敬. 高密度电阻率法在丹江口水源区尾矿坝监测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(01):215-219.
- [5] 姚纪华, 罗仕军, 宋文杰, 等. 综合物探在水库渗漏探测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(02): 456-462.
- [6] 王祥, 宋子龙, 姜楚, 等. 综合物探法在小排吾水库大坝渗漏探测中的应用[J]. 大坝与安全, 2015(06):51-54+62.
- [7] 薛建, 易兵, 成锁, 金念, 朱士. 灰坝渗漏的地球物理探测方法[J]. 物探与化探, 2008(01):83-86.
- [8] 任爱武, 柯柏荣, 程建设, 等. 岩溶地区水库渗漏原因分析与无损检测验证[J]. 水利学报, 2014, 45(S2):119-124+129.
- [9] 高士佩, 徐毅, 赵钢, 等. 基于探地雷达隐患检测的堤防渗流数值模拟[J]. 人民长江, 2017, 48(S1):152-155.
- [10] Hai Yan Ju, Jiang Qian Zhao, Jian Hua Li, et al. Application of the Comprehensive Geophysical Prospecting Techniques in Hidden Trouble Detection of Tailings Dam[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1799:2562-2565.

[11] Bin Liu, Xiugen Jiang. Detection of anti-seepage effect of building stress wall structure based on transient Rayleigh surface wave method[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(16):1-9.

[12] 蒋海峰. 基于集对分析的南水北调线性工程运行安全诊断技术研究[D]. 华北水利水电大学, 2021.