doi: 10.11720/wtyht.2025.1468
申斌,邹晨阳,高江林,等.基于高密度电法的堤防隐患时移技术研究[J].物探与化探,2025,49(6):399-408.http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1468
Shen B,Zou C Y,Gao J L,et al.A technique for monitoring leakage hazards in dikes based on time-lapse high-resolution electrical resistivity tomography [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2025,49(6):399-408.http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1468

基于高密度电法的堤防隐患时移技术研究

申斌,邹晨阳,高江林,陈芳,胡松涛
(江西省水利科学院,江西 南昌 330029)

摘 要: 堤防渗漏隐患是威胁水利工程安全的核心问题之一,其复杂的动态演化特征显著增加了探测与监测的难度。传统监测方法如人工巡查、传感器技术、遥感及无人机技术等,普遍存在探测精度低、效率不足和穿透能力有限等问题。尽管传统地球物理无损检测方法(如高密度电法、自然电场法、探地雷达法、地震映像法、瞬态电磁法和伪随机流场法)能够在一定程度上反映渗漏分布及位置信息,但在探测精度、时间连续性和长期监测能力方面仍存在明显不足,难以满足实际工程需求。针对上述问题,本文提出基于时移电阻率法的堤防渗漏隐患监测技术,通过多时段、高精度的电阻率测量,实现对渗漏隐患的动态追踪与精细识别,为堤防安全监测提供可靠的技术支撑。结果表明:该技术能够有效识别堤防内部的异常区域,并通过分析电阻率变化趋势,评估隐患的严重程度和发展过程。与传统检测方法相比,高密度电法提供了更高的分辨率和更全面的隐患信息,为堤防管理和维护提供了科学依据。

关键词: 时移高密度电法;数值模拟;室内物理试验;三维电阻率成像
中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2025)06-0399-10

0 引言

随着城市化进程的加速和气候变化加剧,堤防作为防洪防灾的重要手段,承载着保护沿河区域人民生命财产安全的重任[1]。然而,由于堤防结构内部隐患往往不易察觉,传统的监测手段在实时性和准确性上存在一定的局限性,因此如何准确快速判断出隐患位置是迫切需要解决的问题[2]。目前堤防隐患无损探测方法是最为普遍的,如自然电场法[3]、瞬变电磁法[4]、地震波法[5]、同位素追踪法[6]、流场法[7]、探地雷达法[8]、高密度电法[9-11]等。其中,高密度电法因数据采集快、能够检测到较深的地下结构和异常区、可以提供高分辨率的地下电阻率图像以及可以有效识别堤防隐患中的渗漏隐患路径等特点,成为了目前无损探测的重要技术之一。

时移电阻率法是通过对比相同位置剖面在不同时期采集的数据,分析地下介质电阻率动态变化规律的地球物理方法。祁民等[12]提出三维数据场可视化,构建三维地质体结构,可真实地反映电性异常的三维地质结构;张清明等[13]则是基于堤坝涵管接触渗漏的探测,通过时移三维高密度电法正演,且开展三维电阻率探测物理实验,实现了对结合部位接触渗漏的有效探测;许彩琦等[14]通过正演模拟时移高密度电法,分析了停水期与行水期不同水位下反演地电断面的电性特征与变化趋势,推断渗漏隐患位置与规模,为隐患排查提供强有力依据;孙大利等[15]利用三维非结构有限元数值模拟正演方法,精细模拟典型堤坝隐患直流电场的时移变化特征,为堤坝隐患时移监测异常识别和灾害预警提供理论指导。康森等[16]提供建立边坡内灾害演化的数值模拟,模拟分析边坡内灾害源的演化,总结了边坡内灾害源演化的反演断面电场响应特征,验证了时移高密度电法在边坡内灾害源演化探测的有效性。

收稿日期: 2024-12-04; **修回日期:** 2025-03-25
基金项目: 江西省水利厅科技项目(2024262DKT01);江西省"科技+水利"联合计划项目(2022KSG01003、2023KSG01008);江西省科技厅人才培养项目(20243BCE51128);中国水利水电科学研究院水利部白蚁防治重点实验室开放研究基金(IWHR-2025TE001)
第一作者: 申斌(1998-),男,硕士研究生,主要从事堤防渗漏检测工作。Email:1318309545@qq.com
通讯作者: 邹晨阳(1990-),男,博士,主要从事岩土工程实验与研究工作。Email:chenyangzou@whu.edu.cn

岑洋等[17]通过三维电阻率成像分析有效反映出电阻率变化特征,有效揭示出渗漏通道形态,弥补了二维探测技术;李凯[18]通过比较高密度二维电阻率成像及真三维电阻率成像优劣,从而利用伪三维电阻率勘探方法可以有效识别具有连通性特征的地质异常信息和勘探目标,对突破二维成像的局限性和三维电阻率勘探的推广应用具有现实意义;张欣等[19]通过模拟堤坝渗漏,采用三维电阻率成像诊断技术对土石坝进行探测具有可行性和有效性。

目前基于高密度电法的时移技术,仅在二维高密度数值模拟研究较多,对物理实验及三维电阻率成像方面研究较少,因此,本文从时移高密度电法技术出发,建立三维堤防数值模型及三维堤坝物理模型,模拟不同类型隐患的堤防模型,通过数据插值处理得到有效三维电阻率图像,通过数值/物理模拟相互验证,实现对堤防隐患的时移监测效果,为堤防隐患监测和预警提供强力的支持依据。

1 时移高密度电法原理

时移高密度电法是在常规高密度电法中增加一个时间维度,在同一个地点采用相同的电极排列方式在不同的时间重复进行二维数据采集。数据处理时反演出同一地点不同时刻与初始时刻的差异,从而研究地下介质电阻率随时间的变化。

先常规反演获取基准结果,再对多组时序监测数据反演,对比差异并经 sufer 成像得到时移反演成果,其基本公式计算如下:

$$\rho_s = \rho_i - \rho_0, \tag{1}$$

式中:ρ_s 为残值电阻率;ρ_0 表示基准时刻的视电阻率;ρ_i 表示后一时刻的视电阻率。

2 堤防隐患渗漏数值模拟

2.1 数值模型构建及参数设定

图 1 为堤防模型及网格剖分示意,堤防模型坝高 7.5 m,坝顶宽 3 m,坝底宽 30 m,堤防隐患设置宽为 1.5 m,高 1.5 m,渗漏隐患的倾斜角度 0.5°。本文主要的研究区域是有限元域中的渗漏通道和坝体,为取得更加精确的解,对渗漏通道和堤防进行网格化加密。

本文将迎水面的水体电导率设定为恒定值

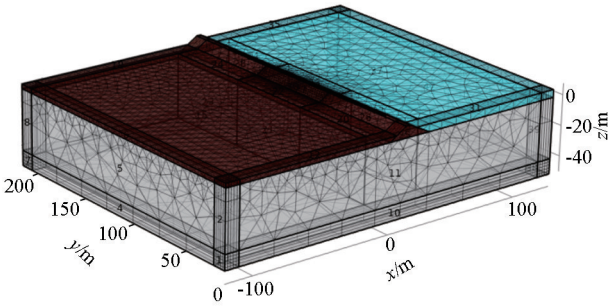


图 1 堤防模型网格剖分示意

Fig.1 Schematic of grid division for embankment model

0.05 S/m,并假设这一电导率不受渗漏或温度变化的影响。通过计算得到含水量分布,再结合 Archie 公式进行数值模拟,可以获得整个坝体的电导率和电阻率的分布。模型中介电常数通过 Topp 经验公式计算得到。本文假定基岩的孔隙度为 0,大坝的孔隙度为 0.1,渗漏通道的孔隙度为 1,水的动态粘度设为 0.001 Pa · s。而对于离子浓度,假设水体和渗漏通道的初始盐离子浓度为.13 mol/m^3,而迎水面的水体离子浓度则会发生变化。

其中 Archie 公式[20]及 Topp 经验公式[21]如下:

$$\sigma = a^{-1}\varphi^m S^n \sigma_{\text{孔隙水}}, \tag{2}$$

$$K_a = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3, \tag{3}$$

相关参数见表 1,包含的相关物性参数有孔隙度、渗透率、相对介电常数、动态粘度、电导率及盐离子浓度[22]。

表 1 模型中大坝的物理参数设置

Table 1 Model physical parameter of the dam in the model settings

物性名称	水	渗漏通道	坝体	基岩
孔隙度	0.1	1	0.2	0.02
渗透率	0.1	0.1	5×10^{10}	10^{16}
相对介电常数	0.001	0	0	0
动态粘度/(Pa · s)	Topp 公式	Topp 公式	Topp 公式	Topp 公式
电导率	0.05	Archie 公式	Archie 公式	Archie 公式
盐离子浓度	0.13	0.13	0.13	/

2.2 典型堤坝模型的物性特征分析

图 2 展示了无渗漏通道条件下堤防内部多物理场的分布特征,主要包括压力场、渗流场(达西流速、压力水头、含水饱和度)以及电学参数场(电阻率、离子浓度、孔隙度、相对介电常数)等物理量的分布规律。研究结果表明,在迎水面与背水面水位差的驱动作用下,堤防内部的达西速度、含水饱和

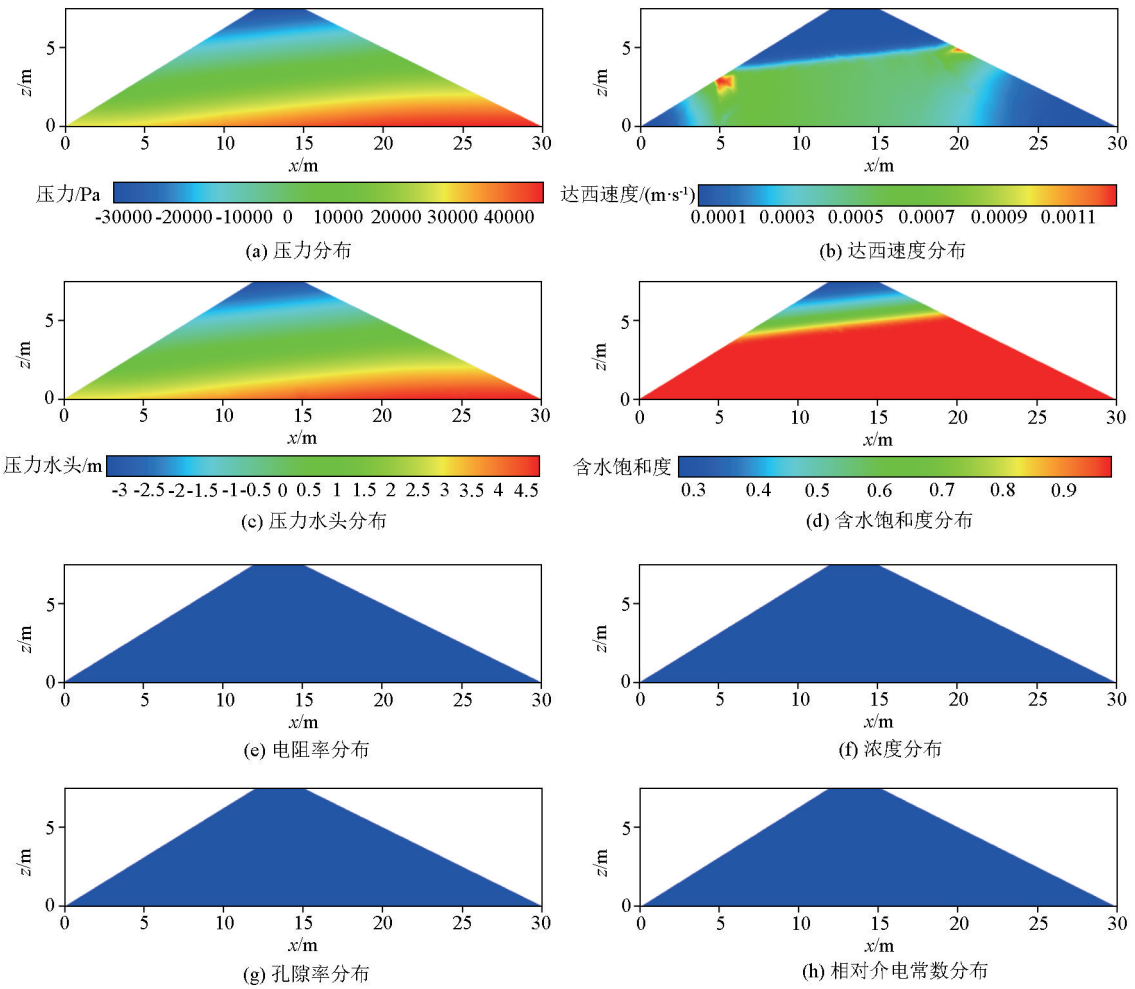


图 2　典型堤防模型物性参数分布($y=0$)

Fig.2　Distribution of physical property parameters of a typical embankment model ($y=0$)

度、压力及压力水头均呈现显著的层状分布特征。具体而言,堤防内部的压力分布呈现随深度增加而递增的趋势,且压力水头分布与压力分布具有一致性,其数值沿迎水面向背水面方向呈递减规律。在无渗漏通道的典型堤防中,离子浓度场分布均匀,离子浓度数值恒定为 3。由于堤防孔隙度设定为恒定值 0.1,其内部达西流速最大可达 7.0×10^{-3} m/s。对于正常工况下的堤防,含水饱和度分布与水位变化呈现明显的相关性,通过含水饱和度分布图可准确识别自由界面(即浸润线)的空间位置。此外,电阻率分布呈现稳定状态,相对介电常数维持在 11,未出现明显波动。

图 3 为典型堤防模型不同时刻电阻率分布情况,坝体电阻率变化与渗漏发育过程相关,由于渗漏通道内含水率增加,导电性较大,渗漏通道位置电阻率远小于坝体电阻率。

2.3　堤防隐患时移三维电阻率成像

在堤防坝体布置多条高密度测线,并采用 Matlab 对电阻率数据进行插值处理,将处理结果利用 Voxler 软件进行三维成图,选取典型初始时刻及最后时刻异常体空间分布与三维切片图(图 4),并绘制 yz 方向的动态残值电阻率切片图(图 5)。

图中残值电阻率约为 0 Ω · m 的区域代表基岩部分,而残值电阻率呈负值的区域则标识了渗漏通道的位置(由于渗漏通道的形成导致电阻率下降,从而使残值电阻率变为负值)。

从图 4 可知,异常体空间分布整体规则,与模型异常体相近,结果较吻合,从三维电阻率图像中提取低阻异常区,可以直接观察低阻异常区在空间中的形态,从而确定渗漏通道在坝体内部的位置,并估算渗漏的影响范围。从图 5 结果可以观察渗漏隐患发展过程及分布范围,动态切片图能够清晰反映出堤防内部电阻率立体分布特征,直观展示出堤防电阻率低阻异常区域。

2.4　结果分析

数值模拟首先进行了渗漏隐患电阻率、尺寸、渗漏位置、渗漏隐患埋深敏感性分析,接着利用时移高密度电法进行渗漏隐患探测及监测渗漏的发育过

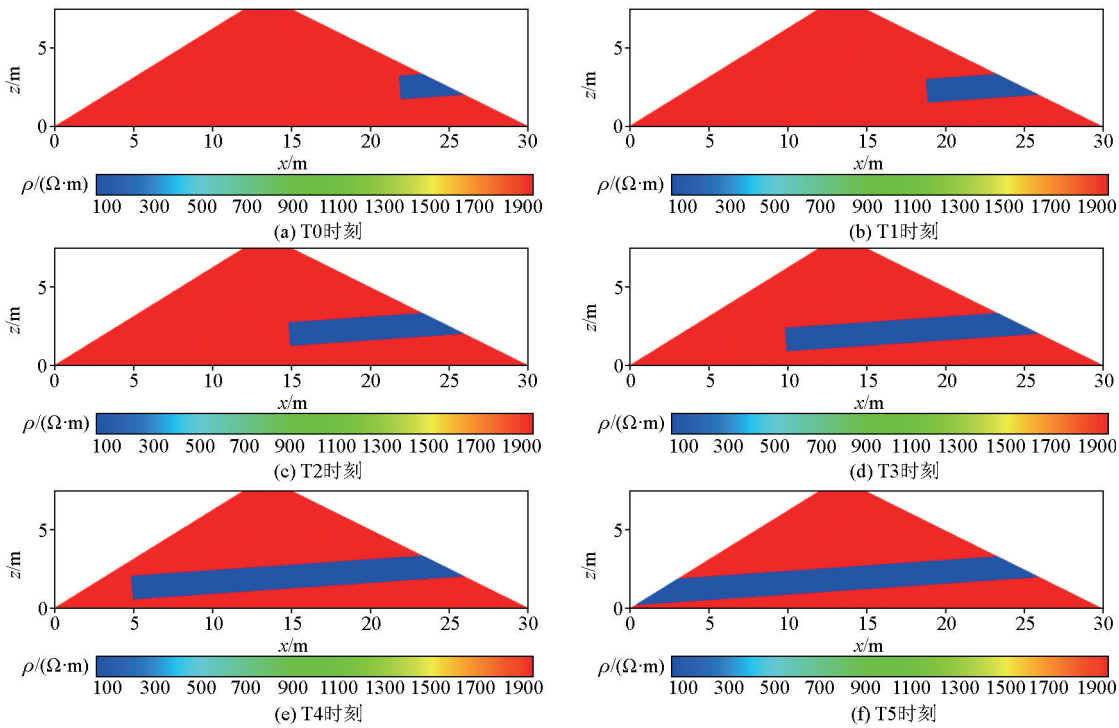
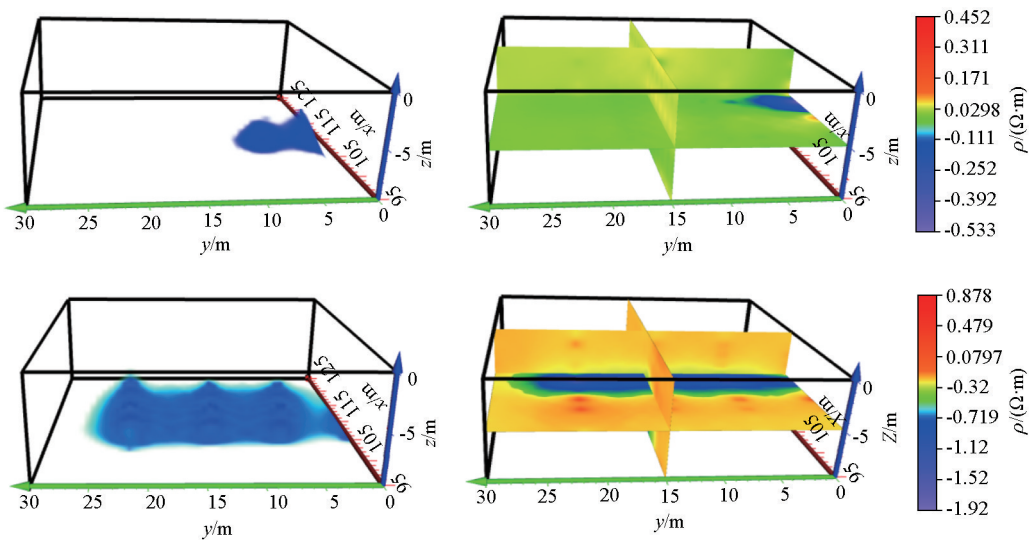


图 3　典型堤防模型不同时刻电阻率分布($y=0$)

Fig.3　Distribution of resistivity at different times for a typical embankment model ($y=0$)



a—初始时刻空间异常体;b—初始时刻三维切片;c—末尾时刻空间异常体;d—末尾时刻三维切片

a—initial time spatial anomaly body;b—initial three-dimensional slicing;c—end time spatial anomaly body;d—end time three-dimensional slicing

图 4　渗漏隐患空间异常体分布及三维切片

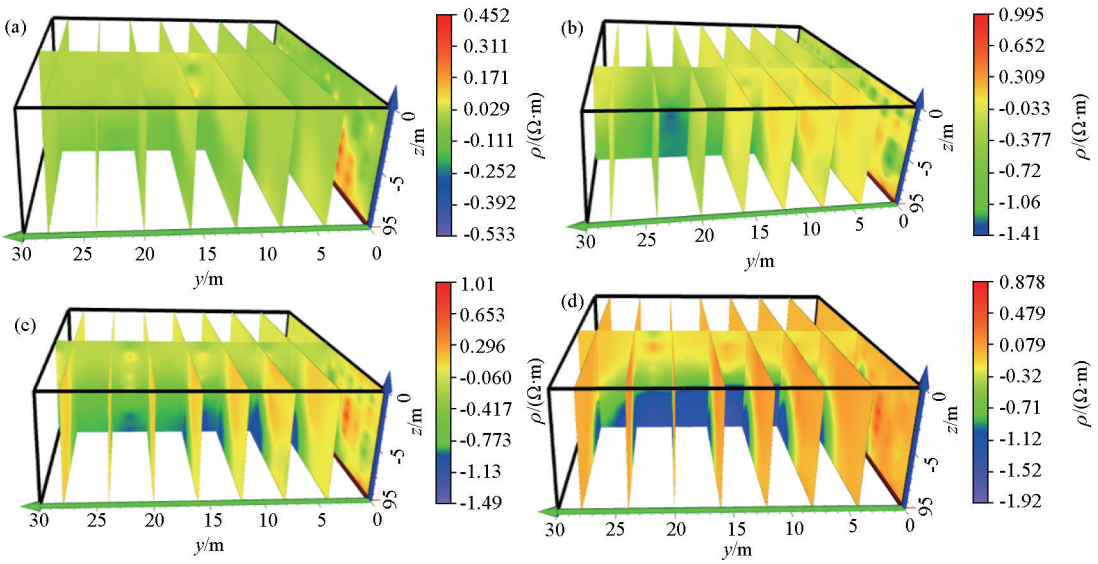
Fig.4　Distribution and 3D slice of spatial anomalies in leakage hazards

程。应用切片技术能够精确地查看堤防内部任意位置的电阻率分布,从而更准确地确定渗漏通道在堤防中的位置和发展情况。

3　物理模拟

3.1　物理模型构建

物理模型参照数值模型进行构建,在坝体放置10 条由土工布包裹碎石的渗漏通道,利用 4 条高密度测线进行渗漏通道检测。在物理模型中,每条测线共布设 30 个电极,电极间距 3 cm,一共为 120 个电极,渗漏通道长 45 cm,直径 2 cm,渗漏通道距离坝顶 10 cm,如图 6a 所示,渗漏通道倾斜约 4°,如图 6b所示,高密度测线布置位置如图 6c 所示。

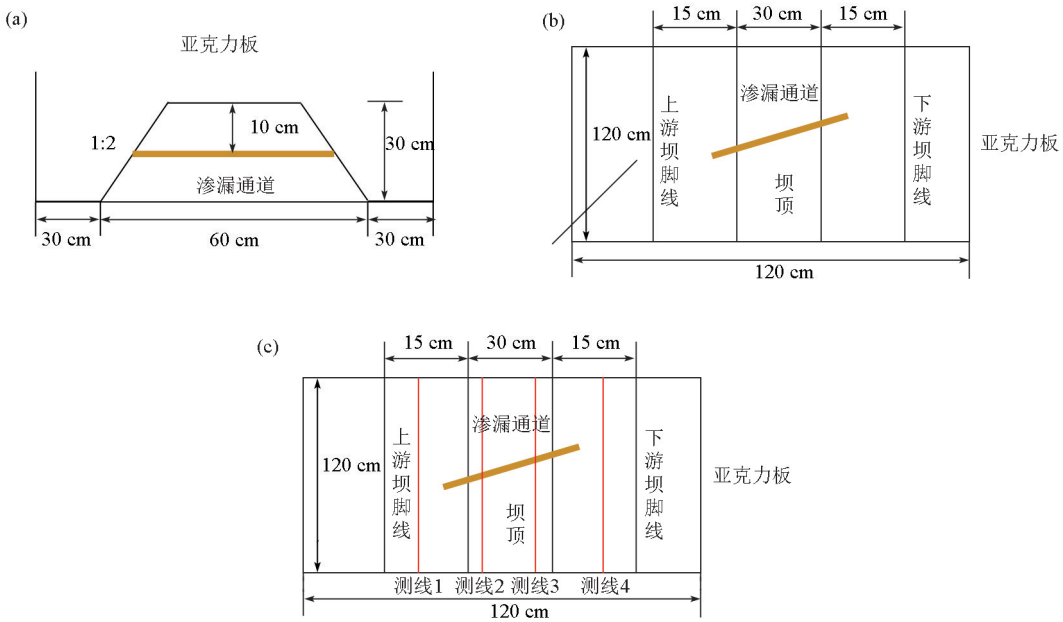


a—T0 时刻残值三维切片;b—T1 时刻残值三维切片;c—T2 时刻残值三维切片;d—T3 时刻残值三维切片

a—three-dimensional slice of residual value at time T0; b—Three dimensional slice of residual value at time T1; c—Three dimensional slice of residual value at time T2; d—Three dimensional slice of residual value at time T3

图 5　渗漏隐患动态残值电阻率切片

Fig.5　Slice diagram of dynamic residual resistivity for leakage hazards



a—渗漏隐患位置;b—渗漏隐患倾斜角度;c—测线布置

a—location of leakage hazard; b—leakage hazard inclination angle; c—line layout

图 6　堤防的物理模型

Fig.6　Physical model of embankment

3.2　装置类型对渗漏隐患区域敏感性分析

在模型制作完成后,首先进行总的电极数和接地电阻检查,确保电法仪参数正确,分别选择温纳排列、偶极—偶极排列、斯伦贝谢尔排列进行数据采集,设置最大隔离系数为 16,开始电极为 1,供电电压为 100 V。

温纳排列方式的电阻率对数反演结果如图 7a 所示。该方法探测深度较深,表层电阻率分层明显,上层为坝体,而下层的高阻值可能是由于底部亚克力板的影响所致。偶极排列方式的电阻率对数反演结果如图 7b所示。该方法探测深度较浅,在深度 0.04~0.1 m 的位置和水平 0.45~0.6 m 的位置出现了高阻异常,且与实际埋设的渗漏隐患位置相符。斯伦贝谢尔排列方式的电阻率对数反演结果如图 7c所示。该方法探测深度较深,与温纳排列相似,但对高阻异常的分辨率较低,因此不适用于小模型的探测。

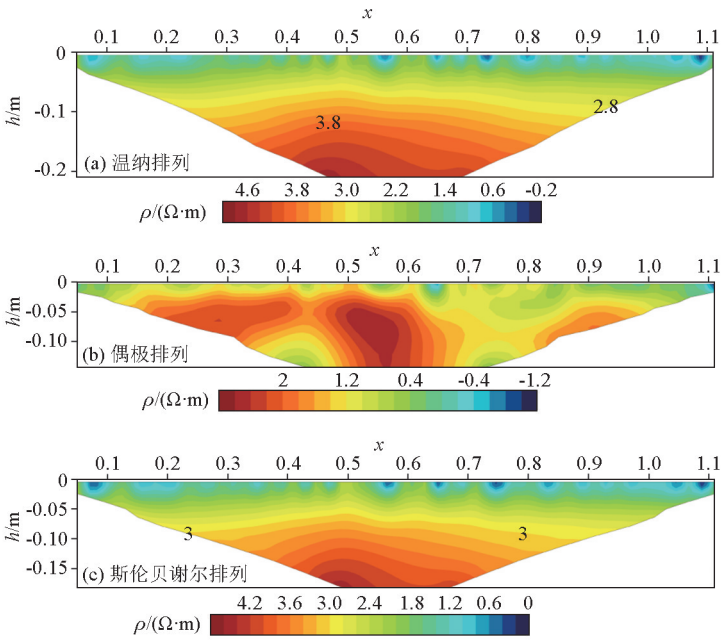


图 7　三种排列方式反演结果

Fig.7　Inverted results of three arrangements

3.3　渗漏演化发育过程分析

图 8 为不同测线反演结果,其中图 8a 为迎水面测线 1,隐患位置位于0.32~0.42 m,图 8d 为背水面测线 4,隐患位置为 0.43~0.53 m。通过高密度探测结果可有效识别渗漏的具体位置,且可以有效地体现出渗漏隐患的发育路径,为实现渗漏隐患有效监测提供有效依据。

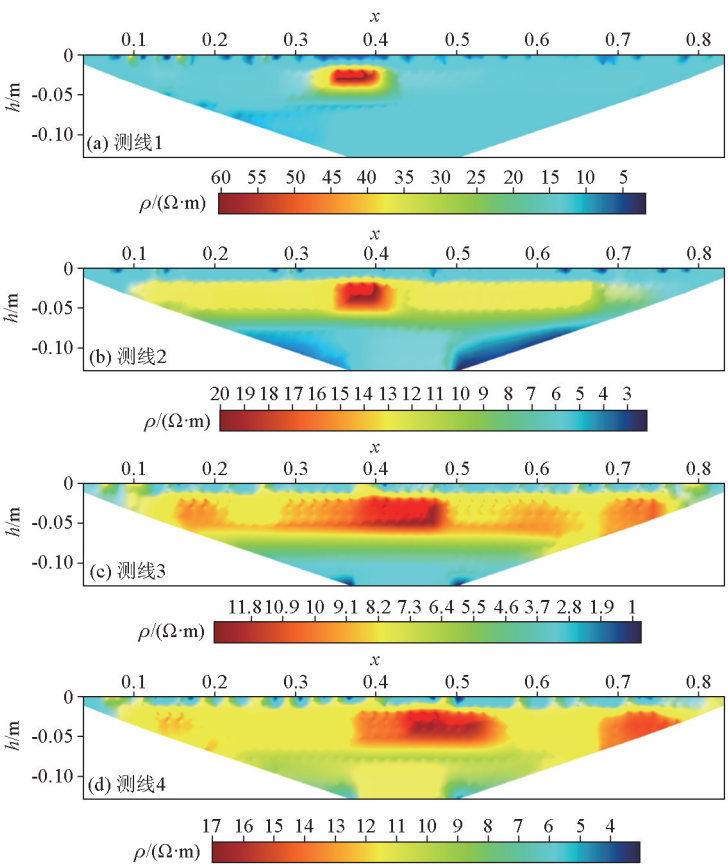


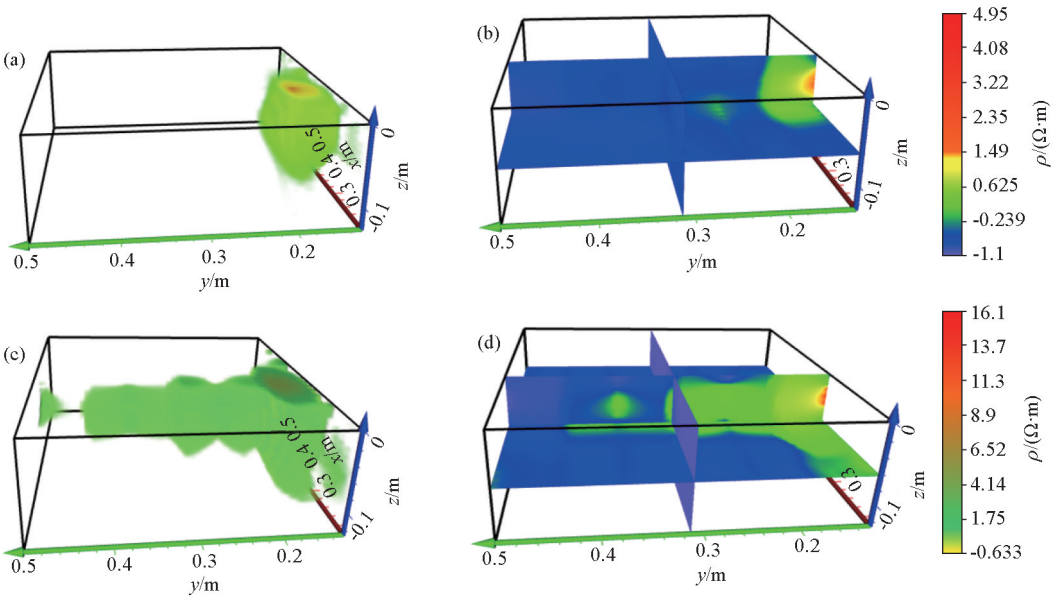
图 8　不同测线反演结果

Fig.8　Inverted results from different survey lines

3.4　堤防隐患时移三维电阻率成像

在室内模型实验中,研究了水位下降对电阻率变化的影响,研究监测渗漏通道的位置及其发育过程。实验中,高水位时测得的电阻率作为基准电阻率,此时通道内的含水率较高,电阻率较低。随着水位的下降,渗漏通道内含水率降低,电阻率则相应升高,从而使得与残值电阻率呈现正相关关系。通过控制水位变化,渗漏通道内的含水率发生变化,进而影响电阻率。

本文选取典型初始时刻及最后时刻异常体空间分布与三维切片(图 9),并绘制 yz 方向的动态残值电阻率切片(图 10)。

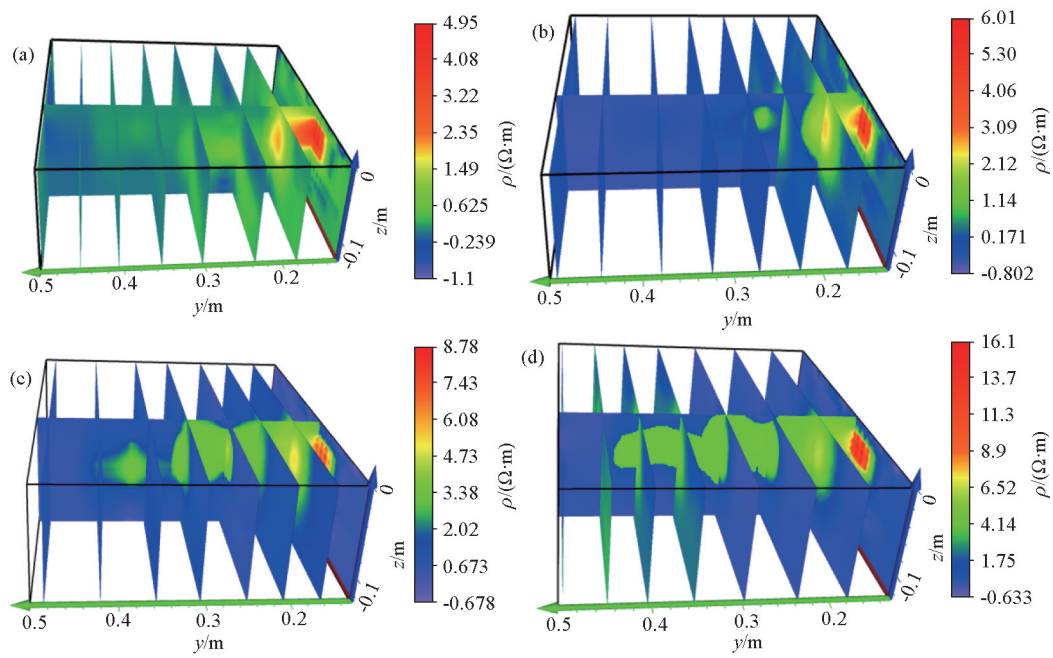


a—初始时刻空间异常体;b—初始时刻三维切片;c—末尾时刻空间异常体;d—末尾时刻三维切片

a—initial time spatial anomaly body; b—initial three-dimensional slicing; c—end time spatial anomaly body; d—end time three-dimensional slicing

图 9　渗漏隐患空间异常体分布及三维切片

Fig.9　Distribution and 3D slice of spatial anomalies in leakage hazards



a—T0 时刻残值三维切片;b—T1 时刻残值三维切片;c—T2 时刻残值三维切片;d—T3 时刻残值三维切片

a—three-dimensional slice of residual value at time T0; b—three dimensional slice of residual value at time T1; c—three dimensional slice of residual value at time T2; d—three dimensional slice of residual value at time T3

图 10　渗漏隐患动态残值电阻率切片

Fig.10　Slice diagram of dynamic residual resistivity for leakage hazards

从图 9 可知,异常体空间分布结果较差,但结果较吻合,从三维电阻率图像中提取低阻异常区,可以直接观察低阻异常区在空间中的形态,从而确定渗漏通道在坝体内部的位置,并估算渗漏影响范围。从图 10 结果可以观察渗漏隐患发展过程及分布范围,动态切片图能够清晰反映出堤防内部电阻率立体分布特征,直观展示出堤防电阻率低阻异常区域。

3.5 结果分析

综合室内试验和分析,水位变化可以帮助判断渗漏通道的位置及其发展过程,通过观察正相关异常的残值电阻率分布趋势,可以大致确定异常体的位置和范围。

然而,物理模型的探测结果与数值模拟结果存在一些差异,主要原因如下:首先,受实验环境的限制,导致物理模型结构较简单且压实度不均;其次,模型规模较小,电极布置长度和数量有限,反演深度较浅,且测线两端靠近绝缘水缸,可能对电场分布产生影响,从而干扰探测结果;最后,模拟中在水位上升时,坝体底部与水缸底部的密实性不足,导致部分水从底部渗透,特别是在迎水面渗透的更快,使得三维电阻率成像中迎水面出现了较大的低阻异常区域。

4 实例分析

九江市永修县郭东联圩 7+950-8+050 段在 2024 年 7 月经历了连续的强降雨,导致桩号背水面位置出现了多处险情。因此对该处布置时移高密度测线,动态观测堤防内部典型参数的变化情况。

图 11 为 3 次不同时间段的探测结果,对比可见,3 组实测数据周围土体电阻率变化波动较小,而渗漏隐患位置电阻率变化较大,有明显的低阻异常区域。

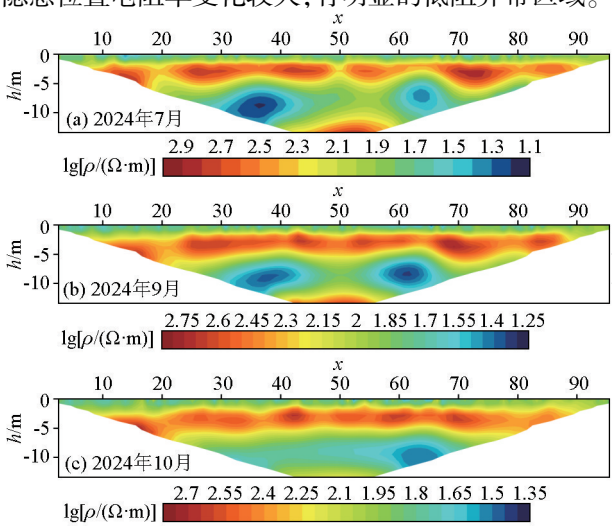
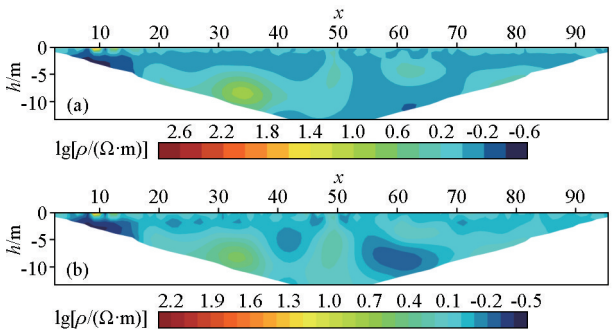


图 11 不同时刻反演结果

Fig.11 Inversion results at different time points

图 12 为时移反演结果,基准电阻率数据为 2024 年 7 月份采集的数据。采用残值数据处理,可见明显电阻率异常演变趋势,推断在有效探测深度内堤身存在渗漏隐患。



a—7 月至 9 月电阻率差值;b—7 月至 10 月电阻率差值

a—difference in resistivity between July to September; b—difference in resistivity between July to November

图 12 不同时刻残值时移电阻率反演结果

Fig.12 Residual time shifted resistivity inversion results at different time points

5 结语

5.1 结论

1)高密度电阻率法对不同尺寸渗漏隐患的探测存在局限性,尤其是对小尺度渗漏隐患的识别能力较差,且存在体积效应,导致渗漏异常区域定位不准确。但是通过时移技术结合背景数据相减,能够有效保留渗漏区域数据,显著提高渗漏隐患的动态监测能力。利用电阻率—时间变化曲线和三维可视化技术进一步验证探测结果的可靠性,为渗漏隐患的定位和动态演化分析提供直观依据;

2)不同排列装置类型对小尺度渗漏隐患的探测效果存在显著差异。温纳排列在分层效果上表现较好,但难以识别渗漏异常体;斯伦贝谢尔排列探测深度较大,但对高阻异常的分辨率较低;偶极排列在小尺度渗漏隐患探测中表现最佳,能够准确定位渗漏异常位置。同时对不同排列方式的探测深度、横向分辨率、纵向分辨率、抗干扰能力、数据采集效率及数据处理复杂程度进行了有效对比,在实际工程中,应根据具体需求选择合适的装置类型;

3)时移电阻率法能够有效监测堤防内部电阻率的变化,尤其是在汛期和枯水期的对比中,疑似渗漏隐患位置的电阻率变化显著,而坝体整体电阻率变化较小。时移电阻率法通过引入时间维度,能够更准确地捕捉渗漏隐患的动态演化过程,为堤防安

全隐患的实时监测和预警提供科学依据;测线移动式时移电阻率法在实际应用中存在误差,主要原因是电极位置和深度的偏移。未来研究应优化数据采集方法,减少电极位置变化对探测结果的影响,进一步提高时移电阻率法的精度和可靠性。

5.2　展望

本文利用数值模拟结合物理模拟方法,对高密度电法时移技术进行一定程度研究,由于物理实验条件有限及笔者个人能力有限,并没有对该方法进行全面的研究,在某些地方还需要改进:

文中物理模型渗漏通道应进行定性分析,对不同材质和不同规格的渗漏通道模型进行模拟;

理论模型与实际工作环境存在一定脱节,如何利用更少的高密度数据获取更精确的地质信息,是今后研究的重点。

参考文献(References):

[1] 吕玉增,阮百尧.高密度电法工作中的几个问题研究[J].工程地球物理学报,2005,2(4):264-269.
Lyu Y Z,Ruan B Y.Discuss several problems about high density resistivity[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2005,2(4):264-269.

[2] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576-584.
Yan J Y,Meng G X,Lyu Q T,et al.The progress and prospects of high-density electrical methods[J].Geophysical and Chemical Exploration,2012,36(4):576-584.

[3] 何尚富,邓居智,刘遂明,等.库坝渗漏隐患的自然电场三维正演及时空演化特征[J].地球物理学进展,2023,38(6):2392-2408.
He S F,Deng J Z,Liu S M,et al.Three-dimensional forward modeling and temporal and spatial evolution characteristics of self-potential field of reservoir dam leakage hidden danger[J].Progress in Geophysics,2023,38(6):2392-2408.

[4] 王佟童,王媛,任杰,等.等值反磁通瞬变电磁法在长江堤防渗漏隐患探测中的应用[J].江苏水利,2024(2):58-62.
Wang T T,Wang Y,Ren J,et al.Application of equivalent inverse flux transient electromagnetic method in the detection of leakage hidden danger of the Yangtze River dike[J].Jiangsu Water Resources,2024(2):58-62.

[5] 张平松,吴健生.中国隧道及井巷地震波法超前探测技术研究分析[J].地球科学进展,2006,21(10):1033-1038.
Zhang P S,Wu J S.Research and analysis of forward prediction technology using seismic reflection wave in tunnel and laneway in China[J].Advances in Earth Science,2006,21(10):1033-1038.

[6] 伍轶鸣,秦民君,潘昭才,等.相关流量追踪法测井技术在塔里木盆地的应用[J].石油天然气学报,2014,36(11):101-105,7.
Wu Y M,Qin M J,Pan Z C,et al.Application of well logging technology of relevant flow-rate tracking method in Tarim basin[J].Journal of Oil and Gas Technology,2014,36(11):101-105,7.

[7] 黄杨.拟合流场法探测堤坝渗漏的三维有限元分析[D].桂林:桂林理工大学,2023.
Huang Y.Three dimensional finite element analysis of detecting dam leakage using fitting flow field method [D].Guilin:Guilin University of Technology,2023.

[8] 乔旭,齐振洪,杨智华,等.探地雷达在华阳一矿隐伏断层构造探测中的应用[J].煤炭与化工,2024,47(4):62-67.
Qiao X,Qi Z H,Yang Z H,et al.Application of ground penetrating radar in the detection of hidden fault structure in Huayang No.1 Mine[J].Coal and Chemical Industry,2024,47(4):62-67.

[9] 孙卫民,孙大利,李文忠,等.基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J].长江科学院院报,2019,36(10):157-160,184.
Sun W M,Sun D L,Li W Z,et al.Technology of detecting dyke's hidden danger using time-lapse high-density resistivity method[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2019,36(10):157-160,184.

[10] 李文忠,孙卫民,周华敏.堤防隐患时移高密度电法探测技术探究[J].人民长江,2019,50(9):113-117,174.
Li W Z,Sun W M,Zhou H M.Research on time-shift high-density electrical method for detecting hidden dangers in dikes[J].Yangtze River,2019,50(9):113-117,174.

[11] 李飞,程久龙,陈绍杰,等.基于时移高密度电法的覆岩精细探测方法研究[J].矿业科学学报,2019,4(1):1-7.
Li F,Cheng J L,Chen S J,et al.Fine detection of overburden strata based on time lapse high density resistivity method[J].Journal of Mining Science and Technology,2019,4(1):1-7.

[12] 祁民,张宝林,梁光河.高密度电法的三维数据场可视化[J].地球物理学进展,2006,21(3):981-986.
Qi M,Zhang B L,Liang G H.The visualization of three dimension data field sof high-density electrical technique[J].Progress in Geophysics,2006,21(3):981-986.

[13] 张清明,徐帅,王锐,等.基于时移 3D 高密度电法的堤坝涵管接触渗漏探测研究[J].人民黄河,2021,43(12):135-138.
Zhang Q M,Xu S,Wang R,et al.Study on contact leakage detection of dam culvert based on time-lapse 3D high density resistivity method[J].Yellow River,2021,43(12):135-138.

[14] 许彩琦,张建智.时移高密度电法在堤防隐患无损探测中的应用[J].工程勘察,2023,51(2):73-78.
Xu C Q,Zhang J Z.The application of time-shifted high-density electrical method in non-destructive detection of hidden dangers in embankments [J].Engineering Survey,2023,51(2):73-78.

[15] 孙大利,李貅,齐彦福,等.基于非结构网格三维有限元堤坝隐患时移特征分析[J].物探与化探,2019,43(4):804-814.
Sun D L,Li X,Qi Y F,et al.Time-lapse characteristics analysis of hidden dangers of three-dimensional finite element levees based on unstructured grids[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(4):804-814.

[16] 康森,赵自豪.时移高密度电法在露天矿边坡灾害源探测中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2023(21):111-113.
Kang S,Zhao Z H.The application of time-shifted high-density electrical method in the detection of slope hazards in open-pit mines [J].Inner Mongolia Coal Economy,2023(21):111-113.

[17] 岑洋,许孝臣,江晓益,等.三维高密度电法在土石坝渗漏探测中的应用[J].地质论评,2021,67(S1):1-2.
Cen Y,Xu X C,Jiang X Y,et al.Application of three-dimensional high-density electrical method in leakage detection of earth-rock dam[J].Geological Review,2021,67(S1):1-2.

[18] 李凯.伪三维电阻率成像技术在煤矿采空区勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2024,21(2):226-237.
Li K. Application of pseudo three-dimensional resistivity tomography technology in coal mine goaf exploration[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2024,21(2):226-237.

[19] 张欣,赵明阶,汪魁.土石坝渗漏的三维电阻率成像诊断试验[J].水电能源科学,2016,34(8):94-98.
Zhang X,Zhao M J,Wang K.Experimental study on 3D electrical resistivity tomography for diagnosing leakage in earth rock-fill dam[J].Water Resources and Power,2016,34(8):94-98.

[20] Archie G E.The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J].Transactions of the AIME,1942,146(1):54-61.

[21] Topp G C,Davis J L,Annan A P.Electromagnetic determination of soil water content:Measurements in coaxial transmission lines[J].Water Resources Research,1980,16(3):574-582.

[22] 刘遂明,陈辉,何尚富.土石坝自然电场的三维数值模拟分析[J].资源环境与工程,2024,38(3):331-338.
Liu S M,Chen H,He S F.Three-dimensional numerical simulation of spontaneous electricfield of embankment dams[J].Resources Environment & Engineering,2024,38(3):331-338.

A technique for monitoring leakage hazards in dikes based on time-lapse high-resolution electrical resistivity tomography

SHEN Bin, ZOU Chen-Yang, GAO Jiang-Lin, CHEN Fang, HU Song-Tao
(*Jiangxi Academy of Water Science and Engineering*, *Nanchang* 330029, *China*)

Abstract: Leakage hazards in dikes are recognized as a core issue threatening the safety of water conservancy projects. Their complex dynamic evolution characteristics significantly increase the difficulty of detection and monitoring. Traditional monitoring methods, such as manual inspection, sensor technology, remote sensing, and unmanned aerial vehicle technology, are generally characterized by low detection accuracy, insufficient efficiency, and limited penetration capability. Traditional geophysical nondestructive testing methods, including high-resolution electrical resistivity tomography, self-potential method, ground-penetrating radar method, seismic imaging method, transient electromagnetic method, and pseudo-random flow field method, can somewhat reveal the leakage distribution and location information. However, they still fall short in detection accuracy, temporal continuity, and long-term monitoring capability, failing to meet actual engineering needs. In response to the above limitations, this study proposed a technique for monitoring leakage hazards in dikes based on time-lapse high-resolution electrical resistivity tomography. Through high-precision resistivity measurements over multiple periods, the proposed technique enables dynamic tracking and precise identification of leakage hazards, providing reliable technical support for dike safety monitoring. The results indicate that the proposed technique can effectively identify abnormal areas within dikes and assess the severity and development process of hazards by analyzing the resistivity variation trend. Compared to traditional detection methods, the proposed technique achieves higher resolution and more comprehensive hazard information, offering a scientific basis for dike management and maintenance.

Key words: time-lapse high-resolution electrical resistivity tomography; numerical simulation; laboratory physical experiment; three-dimensional electrical resistivity imaging

(本文编辑:王萌)