

堤坝蚁巢综合物探技术研究进展

谭磊^{1,2,3,4}, 彭渊³, 张平松¹, 徐虎³, 江晓益³, 胡雄武¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001; 2. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江杭州 310020; 3. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江杭州 310020; 4. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江杭州 310020)

摘要:通过梳理不同时期土石坝蚁巢的类型与规模, 阐述了蚁巢的结构特点及成灾模式, 总结了蚁巢物探的物理基础; 着重介绍了直流电阻率法、探地雷达技术、地震勘探法等蚁巢探测中的应用现状, 从成果维度、探测效率、工作强度、探查精度等视角论述了探测方法的适用条件, 指出现有物探技术还不能有效支撑蚁巢的高精度、高效率、立体化探测, 并提出了普查-详查-治理-监控的蚁患综合物探服务架构。立足于蚁巢探查技术的客观需要, 提出未来蚁巢物探技术应聚焦研制蚁巢发育阶段的1:1病害物理模拟装置及隐患图谱, 研发适应堤坝地形的蚁巢探测装备及正反演算法, 构建堤坝蚁害常态化巡查体系及时移电阻率监控系统。

关键词:堤坝; 蚁巢; 物探技术; 渗漏探测; 探地雷达; 电阻率法

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0007-09

Research progress on integrated geophysical exploration technology for termite nests in embankments and dams// TAN Lei^{1,2,3,4}, PENG Yuan³, ZHANG Pingsong¹, XU Hu³, JIANG Xiaoyi³, HU Xiongwu¹ (1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 3. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 4. Key Laboratory of Hydraulic Disaster Prevention and Mitigation of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: By reviewing the types and scales of termite nests in different periods of earth-rock dams, the structural characteristics and disaster modes of termite nests are expounded, and the physical properties based on the geophysical exploration of termite nests are summarized. The application status of methods such as the direct current resistivity method, ground penetrating radar technology and seismic exploration method in termite nest exploration is emphatically introduced. The application conditions of the methods are discussed from the perspectives of achievement dimension, detection efficiency, work intensity and detection accuracy. It is pointed out that the existing geophysical exploration technologies are still insufficient to support high-precision, high-efficiency, and three-dimensional detection of termite nests. Therefore, a comprehensive geophysical exploration service framework for termite nest detection is proposed, including survey, detailed investigation, management, and monitoring. Based on the objective needs of termite nest detection technology, it is proposed that future geophysical detection technology should focus on the development of 1:1 physical simulation device for disease and hidden danger map of termite nest development stages, the development of termite nest detection equipment and forward and inverse algorithms adapted to dam terrain, and the construction of a regular inspection system for dam termite damage and time-lapse resistivity monitoring system.

Key words: embankment dam; termite nest; geophysical exploration technology; leakage detection; ground penetrating radar; resistivity method

土栖白蚁生活在温暖、潮湿、隐蔽的巢穴内。我国淮河以南的热带和亚热带地区的水工建筑物为白蚁繁衍提供了适宜的温度、湿度、食物等生存条

件^[1], 水库、堤防、渠堤、山塘、土海塘等土质结构也有利于白蚁等害堤动物^[2]的大规模筑巢。蚁巢系统破坏了工程主体结构在空间上的连续性和整体

基金项目:浙江省水利厅科技计划项目(RB2403); 浙江省基础公益研究计划项目(TGG24D040001); 安徽省高等学校科学研究重大项目(2024AH040064); 浙江省水利河口研究院院长科学基金项目(ZIHE21Y006)

作者简介:谭磊(1988—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程探测技术研究。E-mail: ltan126@126.com

通信作者:张平松(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事地球物理勘探研究。E-mail: pszhang@sohu.com

性,在高水位时极易诱发散浸、渗漏、管涌、跌窝甚至溃堤垮坝等险情,影响人民群众的生命财产安全^[3]。据统计,在1998年发生特大洪水的长江中下游地区,总计6181个管涌、跌窝等隐患中有80%与白蚁病害有关^[4],严重威胁了堤坝在汛期超标准洪水下的安全运行。截至2021年底,全国共有各类水库97036座,5级及以上共33.1万km堤防的98.1%为土质结构,白蚁活动区域内的水库约占总量的90%,与此同时,白蚁隐患约占所有害堤动物隐患的76%。由此可见,白蚁灾害已成为我国水库、堤防的主要动物病害,分布广泛,严重威胁新时代水利高质量发展。此外,随着全球极端气候事件呈现广发、频发、重发等特点,白蚁的活动范围及危害区域也在不断扩大,加上我国相当一部分水库长期处于超龄服役阶段,在蚁巢病害、强降雨、大坝老化等多灾害耦合作用下,水利工程发生渗漏、决口、溃坝等灾害事件的概率也在不断增大。为保障水利工程的长久运行和效益发挥,及时开展土石坝白蚁整治工作显得愈发迫切和重要,高效、精准地查明白蚁蚁巢是实施蚁害处置及蚁患消除的关键。

我国对白蚁危害堤防的记载可追溯到公元前241年的《吕氏春秋》,其后一些著作、诗集、史书等都有关于白蚁导致溃坝灾害事故的描述,在与白蚁斗争的过程中总结出了堤坝白蚁识别及挖槽的经验和方法,特别是明清时期的河工在白蚁常态巡查和定期签堤等方面已建立起规范化的制度,并根据洞穴的大小采取了分类处理措施^[5]。新中国成立以来,各级水行政主管部门和流域管理机构一直重视水利工程的白蚁防治工作,在防治药物、蚁群调查、蚁害预防、勘察器械等方面取得了明显成效^[6],但是蚁巢检查主要还是以传统的挖巢、钎探、锹铲法为主,严重降低了白蚁治理的工作效率,盲目挖掘也存在蚁巢不能被全部揭露的问题,并且白蚁危害具有长期性、反复性、广泛性、严重破坏性等特点,经常对堤坝实施大面积开挖作业必然降低工程的防渗性能和结构稳定性^[7]。随着理论技术、仪器设备、解译能力等的不断提升,物探技术在土石坝隐患探测方面取得了明显成效^[8-9],一些学者也积极把放射性勘探、微波遥感、电阻率法、探地雷达、声波探测等技术应用于堤坝白蚁探测,有效提升了蚁巢精准化探查的水平,并且现场探查不受季节、汛期的限制,有助于推动堤坝的常年常态化检测以实现对隐患的早期发现^[10]。但是由于大坝填筑材料较为复杂,并且在运行过程中可能遭受一定的破坏,间接的物探手段在判断蚁巢的范围、大小、位置方面可能存在不确定性,造成对巢穴的漏判、误判、错判等不良后果。为

此,本文在简述蚁巢的空间结构及物性差异的基础上,分析现有可行性物探技术的优缺点,并指明蚁巢物探技术的发展方向,以期为土石坝蚁巢探查技术的研究提供参考。

1 白蚁蚁巢综合物探的物性基础

1.1 蚁巢系统的结构特征

土栖白蚁种群中的黑翅土白蚁和黄翅大白蚁是威胁堤坝安全的主要害虫。白蚁通过在堤坝填土中营造巢穴而建立起地下群居空间,复杂的成年巢穴系统主要由主巢、副巢、蚁道、泥被和候飞室等空洞通道组成^[11]。土栖白蚁的蚁巢主要营建在下游坝坡,蚁巢均位于正常蓄水位所形成的浸润线以上,但也会随常水位的变化而略有改变,横向长度约为坝顶宽度的1/3,深度约为堤身高度的1/3。蚁巢的深度与场地的结构与材料也有一定的关系,通常堤坝成龄蚁巢的深度在2.5m以上,水库大坝的成龄蚁巢的深度相对较浅,但仍比山丘林地的蚁巢深,并且堤坝内蚁巢的结构相对较为复杂,从而造成堤坝的完整性受到严重破坏,成为堤坝险情发生的重大危险源。实践中还发现,白蚁不能在沙土中筑巢,为堤坝白蚁的防治提供了新的思路。

蚁巢灾害的发生、发展是不断恶化的过程,白蚁蚁巢系统在修筑的过程中随堤坝的结构、填筑材料以及堤坝扩建、改建、加固等程度而呈现不同的形态,甚至蚁道的形态、走向、尺寸与库水位变化也有一定的联系。主巢和蚁道之间的组合关系可概化成直通式结构、虹吸式结构和串联式结构^[12]。其中串联式结构的埋深介于直通式与虹吸式之间,隐患分布范围相对较广且险情相对复杂,在长期渗透作用下易造成堤坝出现跌窝、崩塌及溃坝的严重灾害,是堤坝蚁巢防治中最受关注的蚁巢结构。

1.2 蚁巢的物性差异

蚁巢系统以主巢为中心,四周环绕着众多的副巢,在主巢、副巢、分飞孔以及取水孔等之间分布着纵横交错的蚁道,整体呈现类似海绵结构的非规则几何体,与周围的堤坝材料介质的物性具有一定差异,并且蚁巢系统主要分布于堤坝坝面以下、浸润线之上的填土里,从而导致蚁巢的物性也会随着库水位的变化而改变,这为蚁巢的探测及监测提供了重要依据^[13]。另外,从白蚁的生物学习性来看,声音、温度、湿度、pH值、CO₂浓度等环境因素都对白蚁的生活产生影响,这也为白蚁蚁巢的探测提供了新的思路。

在低水位时,蚁巢与周围介质的物性区别在于:

a. 导电性。蚁巢内的填充物主要为白蚁体液

和黄土筑成的椭球体状的空巢,且蚁巢是防水的,则蚁巢的电阻率比周围土壤高几十倍,在电阻率断面图像上表现为规则或非规则的圆形或半圆形状,当蚁道规模较大时,也可见杂乱的高阻区。

b. 密度差异。堤坝内的蚁巢局部改变了土层结构,相较于筑坝碾压的土石坝,蚁巢空腔具有压实度低、空隙较多、密度较低的特征,从而反映出蚁巢部位弹性波波速较低的特征,与周围介质存在波阻抗的差异。不过蚁巢的生化胶结土密度高于周围土体,天然密度基本在 1.5 t/m^3 以上。

c. 介电性。电磁波在堤坝内部传播时,蚁巢与周围介质的介电性存在差异,造成电磁波的传播速度和方向发生改变,从而产生波的散射、折射、透射等现象,因此通过观测反射波的波动学特征可以识别蚁巢的位置、深度、规模以及走向等。

以上物性差异是在正常蓄水位或者更低水位下的蚁巢探测的物性基础,但当库水位超过取水口、主巢的高程时,地球物性会随之改变。通常情况下,蚁巢内充满水时,电阻率值会明显降低;密度会有一定的升高,但不会超过堤坝的密度;电磁波反射波组较为均匀,但是频率有所降低。另一方面,从蚁巢系统的物质组成和结构特点来看,主巢、副巢内部结构呈现致密-疏松、坚硬-柔软、潮湿-偏潮等状态交错分布,并且蚁巢的空间结构、组成成分、充盈程度、赋存土体等与白蚁种群、龄期也具有较大的关联性,从而导致蚁巢与周围介质的差异具有明显的变异性,为蚁巢的精准探测带来一定的不确定性^[14]。不过当蚁巢为萎缩多腔巢时,萎缩的老年巢和死巢与周围介质之间将逐渐脱离,并且遗留下的空洞相对较大,探测成果的可靠性将得到改善。

2 堤坝蚁巢综合物探技术应用现状

2.1 直流电阻率法

直流电阻率法通过供电电极向地下注入稳定的电流,利用测量电极获取测量点之间的电位差,从而计算出地下介质的视电阻率分布,结合地质资料推断出地质体的赋存状态、空间分布以及组合关系等内容。直流电阻率法本质上是依据静电场的传播理论,通过在地面观测电流场经过坝体与蚁巢所显现的电位差异识别蚁巢的存在,是物探技术中应用较早、理论较为完善的探测手段,包括电剖面法、电测深法、高密度电法等,也是最先在蚁巢探测中取得较好成果的技术^[15]。张春华^[16]利用电剖面法中的中间梯度法对方园水库的4处白蚁巢穴进行了探测试验工作,取得了很好的探测效果;邓习珠等^[17]采用电测深法查找长江大堤梁公堤段蚁巢洞穴,探测出

的洞穴深度与开挖结果基本吻合。20世纪90年代以来,同时具备电测深法和电剖面法特点的高密度电法逐渐发展起来,开启了堤坝蚁巢探测向高效、直观、便捷化发展的新篇章。自1996年起,刘思源^[18]对湖南省300 km堤防和土坝开展探测试验研究,指出高密度电法对堤坝表层裂缝、小沟槽和鼠洞探测效果欠佳;涂广红等^[19]通过物理模拟和现场探测试验证明了高密度电法探测白蚁主巢的可行性,并提出三维高密度电法是田野白蚁探测的发展方向;臧德记等^[20]采用高密度电法对大泉水库、马洼土坝的白蚁巢穴进行探测试验,结果表明白蚁巢穴的视电阻率值明显高于周围土体;贾海磊等^[21]利用高密度电法对石臼湖堤防进行抢险和渗漏风险评估,成功预测了堤防发生渗漏、管涌的区域。

自直流电阻率法用于探测堤坝隐患以来,在解决工程问题的同时,探测理论、技术、装备也在不断发展,从而更好地满足工程需要。曾昭发等^[22]归纳了典型水利工程隐患的物探模型,认为蚁巢应属于高阻-低介电常数-低吸收模型,并建议探测应优先采用高密度电法、电磁法、地质雷达等;针对堤坝几何体与电场理论的模型空间有差异,朱自强等^[23]采用物理模型试验研究了球体和柱体模型的电阻率变化特征,并提出了堤坝地形的视电阻率改正方法。2004年1月,武汉春江生物科技股份有限公司与中国地质大学共同研制了YHT-1型白蚁隐患探测仪,其后经改进的BY-II型白蚁隐患探测仪在浙江、湖北、山西等地的蚁巢探测中取得了较好的成果^[24];中国地质大学机械与电子信息学院董浩斌和罗田县白蚁防治研究所也联合研制了YCT-1型地下蚁巢探测仪;雷旭友等^[25]把超高密度电法用于土洞、煤窑采空区、岩溶的勘探中,FlashRES64电法仪采集的信息量较常规电法仪高40倍以上,为蚁巢的探测提供了新的思路。

直流电阻率法是最成熟的探测手段,尤其高密度电法在直观识别蚁巢的空间结构方面具有不可比拟的优势,但由于蚁巢与周围介质的电阻率反差不明确,在不同时期的探测效果存在差异。此外,高密度电法探测成果具有明显的体积效应,周边的碎石、块石等填筑材料易造成高阻干扰,并且分辨率随着深度的增大不断降低,在探测一些规模小且埋深大的蚁巢时,可能存在效果较差的弊端。

2.2 探地雷达技术

探地雷达技术是以探测地下不同介质的电磁性质(介电常数、电导率、磁导率)的差异为物理前提的一种射频电磁技术。探地雷达发射天线发射的电磁波在地层中传播时,如遇到电磁性质不同的物体

(目标),电磁波将发生前向和后向的散射现象。散射波在多个目标之间以及目标内部还会形成新的散射,一部分向地面传播的散射波将被接收天线接收。随着收、发天线的移动,地下介质的电磁波扫描记录不断被记录下来,经过数学处理和综合分析可推断出地下介质的赋存结构,同时也能识别蚁巢、空洞等目标体^[26-27]。

堤坝内部的蚁巢、蚁道与周围坝体土之间存在介电常数和导电性差异,电磁波穿过两种介质的界面时,将产生强反射的现象,这为探地雷达探测蚁巢提供了物性基础。Xu等^[28]采用美国地球物理勘探设备公司的SIR-10型探地雷达开展了堤坝蚁巢试验,结果表明中心频率500、300 MHz天线的探测深度分别为2.5、3.1 m以上,并总结出主巢、菌圃群、单个菌圃、蚁道、土壤分界面的影像特征,从而开辟了探地雷达探测白蚁蚁巢的先河;吴晋等^[29]根据实测蚁巢的反射波组特征归纳了典型图像特征;史新伟等^[30]采用中电科(青岛)电波技术有限公司生产的LTD-2100型探地雷达对白龟山水库白蚁蚁巢进行了探测,验证准确率达到60%以上;李浩等^[31]采用不同病害的均质土坝物理模型试验,研究了探地雷达图像特征,并建立了识别病害图谱的分析方法。

随着电子信息技术的进步,探地雷达收发天线与主机之间可通过无线信号进行指令与采集信号的传输,从而实现车载、机载等探地雷达装备的快速发展,为堤防等线性工程蚁巢的高效普查提供了保障。但是,当库水位较高时,探地雷达发射天线探测深度与精度之间的矛盾也越发突出,并且堤坝填土的含水率、密实度、填筑材料及地表的平整度都会对探测成果产生影响^[32];堤坝内部的原始空洞、地面障碍物以及金属结构也会对电磁波信号产生不利影响,在实际的工作中也要加深对蚁巢典型图谱的认识;具体探测时还需保证雷达天线与地面充分耦合,但堤坝的斜坡式结构对探地雷达成果的定位与解译具有不利的影响,亟需开展考虑堤坝结构的电磁波成像及精准探测体系的研究。

2.3 地震勘探法

2.3.1 浅层地震反射波法

浅层地震反射波法主要基于地震波在弹性介质中的传播规律建立,人工激发的地震波在向地下传播过程中,遇到弹性分界面时发生反射,通过检波器接收地震波反射信号,并由浅层工程地震仪记录,通过对采集的地震反射记录进行频谱分析、滤波、反褶积、速度分析、动校正叠加及时深转换等处理,从而获得反映地下地质结构的地震剖面,达到近地表地质勘查的目的^[33]。

王静^[34]综合探地雷达技术、浅层地震反射波法探测了勐邦水库白蚁蚁巢的分布情况;覃政教等^[35]把浅层地震反射波法用于探测隐伏的土洞,土洞在反射剖面上呈现易于识别的“牛眼”状,便于现场的快速识别。但是,蚁巢具有埋深较浅、结构复杂、异常体较小等特点,采用多次覆盖式测量易引起反射波的相位发生畸变,小道间距的多道信号采集也难以适应堤坝快速探测的需求。

2.3.2 地震映像法

地震映像法采用了发射波中的最佳偏移技术,在保持偏移距不变的情况下,沿测线逐点采集小偏移距、小点距的直达波、发射波、折射波、面波等弹性波信号,以此识别地下地质体或地质界面的形态及变化特征。由于采用类似探地雷达的单道接收方式,具有操作便捷、采集速度快、数据处理简单、适用于多种波形的综合分析等特点^[36]。王治华等^[37]利用地震映像法获得了青春水库白蚁巢穴的波列图像。

总体来说,地震映像法是一种适合于强电磁干扰地区蚁巢快速探测的方法,现场采集需要的设备及人员较少,工作强度相对浅层地震反射波法有明显降低,能较好地反映蚁巢在平面上的位置,但不能确定蚁巢的深度^[38],相对探地雷达技术的工作效率仍然较低,不宜全线使用。

2.3.3 面波勘探法

面波勘探法可以分为主动源面波法和被动源面波法,主动源面波法采集的是人工激发的地震波脉冲信号,被动源面波法采集的则是背景噪声引起的振动信号^[39]。工程中的主动源瑞雷面波法采用锤击作为震源获取频散曲线,通过提取面波不同频率的相速度反演出地下介质不同深度的剪切波速度,由于能量主要集中在自由地表附近一个波长范围内,并以球面扩展的形式传播,具有能量集中、衰减慢、传播距离远等优势。因其对地质结构的勘探精度高,并且不受地表电磁信号的干扰,在工程地质勘察和防灾减灾等领域越来越受到重视^[40]。被动源面波法是通过直线形、L形、十字形、圆形、三角形等台阵在地表采集地震活动、构造运动、风浪潮汐、车辆行驶、机械振动等自然现象和人类活动所触发的振动信息^[41],提取微动信号中的频散信息,根据获得的地下介质横波信息推断出地层分布、不均匀体等,与主动源面波法相比,具有对环境的适应能力强、探测深度大等优势。

王书增等^[42]在地震映像法探测的基础之上,在反射弧顶端的位置处增加面波法勘探点,探测成果与白蚁巢穴的发育特征吻合度高;刘国峰等^[43]利用

被动源面波法在内蒙古浅覆盖区进行了勘探试验,结合主动源面波法的探测成果可对研究区实施更大范围的三维勘探,为低成本的面积性勘探实施提供了新的选择。

单个面波勘探点只能反映堤坝上某一位置处垂向面波速度的变化,探测结果存在较大的随机性,难以揭示大面积堤坝的隐患体;多道主动源面波法能实现二维剖面的连续测量,但现场布设较为复杂,不适合长距离的推广应用;被动源面波法主要优势在于无需人工激发地震波,相对更加经济、安全,但获取单点稳定频散曲线需要耗费大量时间,采集到的地震波频率较低且信号较弱,并且在浅层也存在一定的盲区,不适合查找浅地表的蚁巢。

2.4 国内外物探技术的创新应用

随着堤坝标准化的推进,堤坝硬化、金属构筑物、机械噪声等都会对物探技术产生干扰,同时物探技术本身在探测精度、空间分辨率以及多解性等方面还存在局限性。总之,单一探测手段在识别蚁巢方面还不完善,综合物探技术的联合应用得到工程界越来越多的认可。例如:葛双成等^[44]采用高密度电法和主动源面波法对长潭水库开展了坝体蚁巢探测,探测成果显示电阻率、频散曲线和剪切波速度均未见蚁巢的异常特征;赫健等^[45]基于自然电场法和高密度电法联合探测的成果推断出天子岗水库副坝不存在白蚁的侵害;陆俊等^[46]利用高密度电法和探地雷达技术综合探测堤坝白蚁隐患,探明了3个主巢和副巢、空腔及蚁道若干,体现了综合物探技术工作效率高,不受死巢、活巢限制的优势。综合物探技术的联合应用一定程度上提高了蚁巢探测的精度和可靠性,但多种物探技术增添了工程探测的成本和工作量,如何让物探技术实现高效率、高精度、高可靠度是重要的研究课题。

李栋等^[47]采用低放射性强度的¹³¹I与¹⁹⁸Au对家白蚁进行标记,满足了白蚁生物学特征和探巢灭蚁研究的需要;陈文樵等^[48]提出了放射性同位素示踪探测蚁巢的方法,通过在诱饵内加入一定量的放射性同位素,采用FD-71型闪烁辐射仪或FL-2型乙、丙种辐射仪定时定点探测辐射指数的扩展范围,并根据辐射指数的高峰点判断出蚁巢。但是,在具体应用中,放射性同位素对人类、动物的危害是不容忽视的,使用时间也局限于白蚁繁殖期,并且对于较深的土栖型白蚁蚁巢,放射性标记能否被地面检测设备感知也是值得商榷的。

此外,一些学者从白蚁的活动习性、取食规律和蚁巢内的温度、pH值以及CO₂、CH₄、H₂浓度等角度进行了探索性试验^[49]。黄晓光^[50]利用声频探测器

获取了木构件内白蚁噬咬木纤维时发出的声音,根据峰值发生的次数及集中程度来确定白蚁分布的位置,但该方法必须事先统计白蚁进食声音的音频范围和频谱特征,还要保证探测时无外界振动干扰;1993年,中国科学院广州地理研究所、广东省昆虫研究所、广东省水电厅等单位研发出微波遥感探测白蚁蚁巢新技术,经验证准确无误^[51],但成果未见推广;根据白蚁气味的特点,采用训练犬定位地下白蚁的成功率超过95%,而且能够区分白蚁和其他害虫,以及被白蚁侵袭过的木材^[52];根据土白蚁巢内CO₂气体的浓度是空气的20~333倍的特点,探测蚁巢成功率达到100%;澳大利亚Termatrac公司为了检测建筑物干木材中的白蚁而研发的T3i白蚁探测仪是集微波雷达、湿度传感和远程激光热度感应为一体的非侵入式探测器^[53];Mori等^[54]利用带有红外线的数码侦察袖珍相机研究了意大利北部不同季节、不同种群哺乳动物共享洞穴的生活习性;Nanda等^[55]研制了一种利用声学 and 温度信号的白蚁检测系统,对木板内的白蚁数量进行了无损检测,试验表明声学 and 温度联合检测白蚁的准确率达到93.83%。但是,以上基于白蚁习性开发设备探测的焦点主要侧重于判断白蚁的存在及数量,并不具有探测蚁巢的功能。

2.5 主要物探技术的适用性

目前,蚁巢探测技术主要是从相关行业引进的,从实际应用效果来看,高密度电法和探地雷达技术探测效果相对较好,是对不同阶段蚁巢物理特性较为敏感的技术手段。但是,高密度电法探测效率相对较低,长线路堤防工程所带来的工程量给高密度电法的规模化使用带来了严重挑战,并且随着水利标准化的实施,坝顶硬化等工作场景也制约了蚁巢直流电阻率法探测技术的发展。探地雷达技术是探测精度较高的快速检测手段,随着仪器设备、三维成像理论不断发展,三维探地雷达的推广应用为蚁巢的精细化、立体化探测提供了新的契机,但是蚁巢主要位于堤坝的下游坝坡,特殊的几何结构对探地雷达装备的轻便化提出了新要求。以瑞典ImpulseRadar公司生产的三维探地雷达为例,中心频率170 MHz、12通道的雷达天线重约100 kg,中心频率450 MHz的8通道天线重42.5 kg,当堤坝下游坝坡较陡、草皮较茂盛时,自下而上的测线将难以实施人力测量,不利于对堤坝蚁巢的精细化探测。由此可见,由于蚁巢结构的复杂性、物性的不确定性等原因,当前单一或综合物探技术在重复性探测蚁巢方面仍存在较大的不足。表1总结了蚁巢物探技术的优缺点。

表 1 主要蚁巢物探技术的特点及适用性

物探技术	成果维度	物性参数	探测效率	工作强度	探测精度	适用条件
电剖面法	一维横向	电阻率	低	高	低	仅从单一方向上反映出物性的变化,不宜采用
电测深法	一维垂向	电阻率	低	高	低	仅从单一方向上反映出物性的变化,不宜采用
高密度电法	二维剖面	电阻率	较高	相对高	较高	在地表无硬化的普查阶段使用
高密度电法	三维空间	电阻率	低	高	高	精查蚁巢位置,成像要求高
探地雷达技术	二维空间	介电常数	高	低	高	快速普查,覆盖范围小
探地雷达技术	三维空间	介电常数	高	高	高	立体化探测蚁巢,探测深度浅
浅层地震反射波法	二维剖面	纵波速度	低	高	低	有较强的金属干扰,不宜采用探地雷达的区域
地震映像法	二维剖面	波速	较高	低	较高	有较强的金属干扰,不宜采用探地雷达的区域
主动源面波法	二维垂向	瑞雷波速	低	高	低	有较强的金属干扰,不宜采用探地雷达的区域
被动源面波法	一维垂向	瑞雷波速	低	高	低	浅层存在盲区,不适用

综上所述,蚁巢探测是一项系统性、长期性、复杂性工作,构建普查-详查-治理-监控的蚁患探测综合物探服务技术是全面、精准、高效探测蚁巢的前提。本文提出的蚁患综合物探服务架构(图 1)以面向检查堤坝的部位为主体,有力突出探地雷达高效率、高精度的特点,规避了现有探地雷达设备与堤坝地形不适应的问题,结合高密度电法在空间维度和时间维度易于实现动态监测的优势,按照蚁害防治的不同阶段,从预防、排查、治理及运维阶段提出相应的综合探测技术,力求对蚁巢发育过程中空间形态、连通情况和边界范围实现科学探测与动态监控。

3 研究展望

在全球气候变暖且日趋复杂的背景下,白蚁等害堤动物危害的范围、强度呈扩大趋势,并且随着时间的推移,我国大多数土质水利工程也将进入超限服役期,为保障水库堤坝的安全运行和防洪安全,白蚁防治工作将成为水利工程一项制度化、专业化、常态化的运维内容,从而迫使蚁巢的物探技术及装备将进入全新的发展阶段。理论分析及实践充分证明,物探技术是蚁巢探测最具有前景的高效、无损、透视、经济的调查手段,但当前物探技术与蚁巢的精细化探测的需求差距较大,单一或综合性物探技术

都不能支撑堤坝蚁巢的高效、精准探测。为切实推进水利工程蚁害的防治工作,未来需要从以下几点进一步提升蚁巢物探技术体系:

a. 研制不同白蚁发育阶段的 1 : 1 病害物理模拟试验装置,构建多种物探技术的蚁巢标准图谱及图像深度学习模型。白蚁蚁巢系统的结构非常复杂,针对不同时期蚁巢的结构、规模、埋深及关联程度研制出堤坝蚁巢系统的物理模型,对开展蚁巢物探技术可行性、有效性研究极其重要。随着机器学习算法的快速发展,利用人工神经网络学习蚁巢探测的典型隐患图谱并开发出智能成像软件,为普查、详查阶段蚁患的快速识别提供重要依据。

b. 研发轻便化、适应堤坝地形的蚁巢探测装备,深入研究考虑堤坝结构的地球物理场正反演理论。近年来,航空电磁法探测设备、拖曳式电阻率仪、车载/机载地球物理探测设备取得了较快进展,尤其是车载/机载三维探地雷达技术为堤坝蚁患的高效、精准、轻便探测提供了新的思路,后续应进一步提升探测设备观测系统以适应堤坝隐患探测的需求。当前地球物理的探测理论的假设是地下介质为各向同性的无限体,与堤坝横截面为梯形的特殊结构明显不符,特别是蚁巢主要位于下游坝坡上,特殊的位置为地球物理的精细化解译带来了新的挑战。

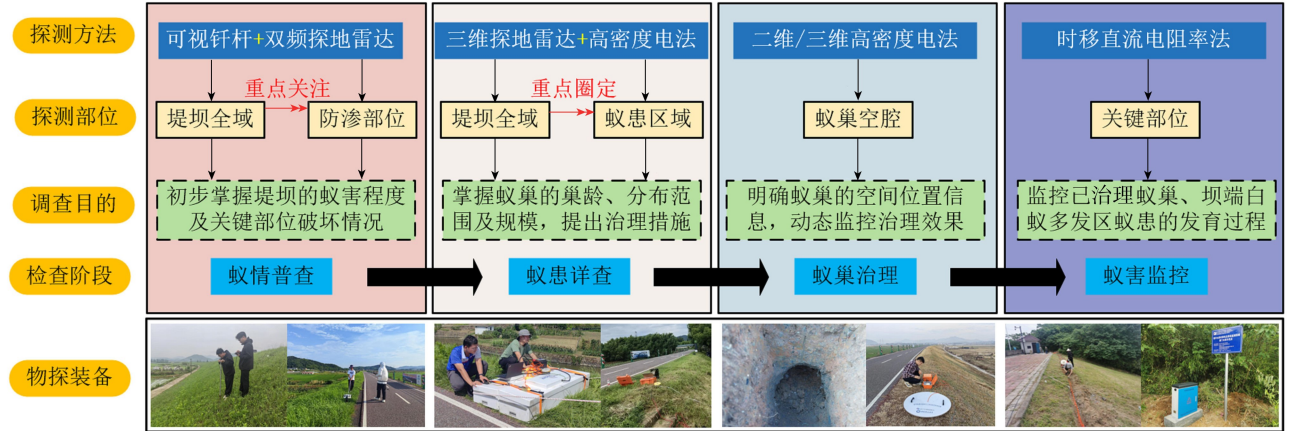


图 1 堤坝蚁患综合物探服务架构

因此,提升地球物理探测技术特别是直流电阻率法在识别蚁巢异常位置、规模、埋深和范围等关键信息的精度和准确度,深入研究地球物理场在堤坝内部的传播规律及成像方法尤为重要。

c. 建立堤坝蚁害地球物理常态化检测体系,集成到水利工程天空地水工监控系统。蚁巢直径由小到大、深度由浅及深、结构由简单到复杂、渗漏通道由外向内等都是由量变向质变演化的过程,通过定期、不定期开展堤坝蚁害的动态巡测是追踪隐患的重要手段,并且多次探测一定程度上也提高了成果的精度,实现病害的跟踪评价。随着数字水库、孪生水利工程建设不断推进,利用时移电阻率法等新型感知手段远程监控堤坝内部二维、三维电阻率随时间的变化趋势,结合渗流、位移、变形、水位、雨量等参数及白蚁活动迹象,可为全面掌握蚁害隐患部位的时空演化过程与应急治理提供技术支撑。

参考文献:

[1] AHMED B M, FRENCH J R J. An overview of termite control methods in Australia and their link to aspects of termite biology and ecology [J]. Pakistan Entomologist, 2008, 30 (2): 101-118.

[2] 靳正雅, 钱沉鱼, 杜澄举, 等. 白蚁、黏土与生态环境相互作用研究进展 [J]. 林业科学, 2023, 59 (1): 143-150. (JIN Zhengya, QIAN Chenyu, DU Chengju, et al. Research progress on the interaction among termites, clay, and ecological environments [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59 (1): 143-150. (in Chinese))

[3] 姚文花, 高加成, 甘新民, 等. 蚁害险情的现场模拟及破坏特征分析 [J]. 人民黄河, 2010, 32 (8): 16-17. (YAO Wenhua, GAO Jiacheng, GAN Xinmin, et al. Field simulation on dangerous situation of ants damage and analysis on characteristics of destruction [J]. Yellow River, 2010, 32 (8): 16-17. (in Chinese))

[4] 李栋, 田伟金, 黎明, 等. 论白蚁管涌(漏)与水利管涌的区别和处理 [J]. 昆虫学报, 2004, 47 (5): 645-651. (LI Dong, TIAN Weijin, LI Ming, et al. Distinction between termite-induced piping in dykes and that caused by physical factors, and its treatment [J]. Acta Entomologica Sinica, 2004, 47 (5): 645-651. (in Chinese))

[5] 卢勇, 张强. 明清时期堤坝白蚁危害与防治研究 [J]. 黄河文明与可持续发展, 2022 (2): 196-206. (LU Yong, ZHANG Qiang. Study on the harm and prevention of termites in dams in the Ming and Qing dynasties [J]. Yellow River Civilization and Sustainable Development, 2022 (2): 196-206. (in Chinese))

[6] 高加成, 刘世文, 甘新民. 锥探灌浆技术治理蚁穴通道系统 [J]. 水利水电技术, 2005, 36 (1): 80-83. (GAO Jiacheng, LIU Shiwen, GAN Xinmin. Use of awl

exploration grouting technique to eliminate ant-nest systems in dykes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36 (1): 80-83. (in Chinese))

[7] 李国英. 水利工程白蚁等害堤动物危害及防治调研报告 [J]. 中国水利, 2023 (15): 1-5. (LI Guoying. Investigation report on the harm and prevention of levee animals such as termites in water conservancy projects [J]. China Water Resources, 2023 (15): 1-5. (in Chinese))

[8] 苏怀智, 周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (1): 1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (1): 1-10. (in Chinese))

[9] 沈添耀, 董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 63-69. (in Chinese))

[10] CHLAIB H K, MAHDI H, AL-SHUKRI H, et al. Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 103: 121-131.

[11] LI Ying, DONG Zhiyong, PAN Dongzi, et al. Effects of subterranean termite nest architectures on earth embankment seepage and stability [J]. Paddy and Water Environment, 2020, 18 (2): 367-384.

[12] 高加成, 姚文花, 刘作京, 等. 堤坝蚁穴通道的工程分类与特性 [J]. 中国水利, 2011 (16): 48-50. (GAO Jiacheng, YAO Wenhua, LIU Zuoqing, et al. Classification and features of termitic passage in dam and embankment [J]. China Water Resources, 2011 (16): 48-50. (in Chinese))

[13] 沈宗顺, 方辉达, 朱如南, 等. 综合物探方法探测堤坝白蚁巢的应用探讨 [J]. 安徽地质, 1999, 9 (4): 312-314. (SHEN Zongshun, FANG Huida, ZHU Runan, et al. Integrated geophysical exploration methods used for search of termite nest in dam and wall [J]. Geology of Anhui, 1999, 9 (4): 312-314. (in Chinese))

[14] 邓刚, 李维朝, 张茵琪, 等. 堤坝白蚁巢穴探测技术的现状和展望 [J]. 中国水利, 2023 (15): 13-18. (DENG Gang, LI Weichao, ZHANG Yinqi, et al. Current state and prospects of detection technology for termite nests in embankments and dams [J]. China Water Resources, 2023 (15): 13-18. (in Chinese))

[15] 郭伟. 用电法找土蚁巢 [J]. 物探与化探, 1985, 9 (1): 69-70. (GUO Wei. The detection of native formicary by

- means of electrical survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1985, 9 (1): 69-70. (in Chinese))
- [16] 张春华. 电法勘探在堤坝隐患探测中的应用[J]. 水力发电, 1985 (7): 30-33. (ZHANG Chunhua. The application of electric prospecting in the detection of hidden dangers in dykes[J]. Water Power, 1985(7): 30-33. (in Chinese))
- [17] 邓习珠, 肖明, 曹思文. 堤坝隐患电法探测技术的应用[J]. 江西水利科技, 1990(2): 35-39. (DENG Xizhu, XIAO Ming, CAO Siwen. Application of electric detection technology for hidden dangers in dykes [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 1990(2): 35-39. (in Chinese))
- [18] 刘思源. 高密度电阻率法探测堤坝隐患初探[J]. 湖南水利水电, 2000(4): 23-26. (LIU Siyuan. A preliminary study on detecting hidden danger of dyke by high density resistivity method[J]. Hunan Hydro & Power, 2000(4): 23-26. (in Chinese))
- [19] 涂广红, 王传雷, 江为为. 田野白蚁主巢的高密度电法探测实例[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 279-283. (TU Guanghong, WANG Chuanlei, JANG Weiwei. The instance of detecting nests of termites in the fields with 2-D resistivity imaging method [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 279-283. (in Chinese))
- [20] 臧德记, 李军, 汤大祥, 等. 高密度电阻率法在白蚁巢穴探测中的应用[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 103-106. (ZANG Deji, LI Jun, TANG Daxiang, et al. Application of high density resistivity method to detection of termite nest [J]. Water resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 103-106. (in Chinese))
- [21] 贾海磊, 李军, 张敏, 等. 高密度电法在堤防渗漏抢险探测中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 165-172. (JIA Hailei, LI Jun, ZHANG Min, et al. Application of high density resistivity method to detection for risk-elimination of embankment seepage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10): 165-172. (in Chinese))
- [22] 曾昭发, 王者江, 薛建, 等. 水利工程隐患的地球物理模型及地球物理方法的应用[J]. 工程勘察, 2001(3): 35-37. (ZENG Zhaofa, WANG Zhejiang, XUE Jian, et al. Application of geophysical model and geophysical method to hidden disasters in hydraulic engineering [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(3): 35-37. (in Chinese))
- [23] 朱自强, 邹声杰, 杜华坤, 等. 堤坝地形对直流视电阻率曲线影响的实验研究[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 106-109. (ZHU Ziqiang, ZOU Shengjie, DU Huakun, et al. Experimental study of the influence of the dyke topography on the apparent resistivity [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(2): 106-109. (in Chinese))
- [24] 李秋剑, 钟俊鸿, 刘炳荣, 等. 土栖性白蚁的防治技术研究概况[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 74-77. (LI Qiujian, ZHONG Junhong, LIU Bingrong, et al. Review of researches on prevention and eradication technology for soil-dwelling termites [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(2): 74-77. (in Chinese))
- [25] 雷旭友, 李正文, 折京平. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 340-347. (LEI Xuyou, LI Zhengwen, ZHE Jingping. Applications and research of the high resolution resistivity method in exploration of caves, mined regions and Karst region [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 340-347. (in Chinese))
- [26] 涂善波, 郭士明, 耿青松, 等. 郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 9-16. (TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, et al. Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 9-16. (in Chinese))
- [27] 刘澜波, 钱荣毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2606-2617. (LIU Lanbo, QIAN Rongyi. Ground penetrating radar: a critical tool in near-surface geophysics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2606-2617. (in Chinese))
- [28] XU Xingxin, ZENG Qiaosong, LI Dong, et al. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams [J]. Engineering Geology, 2010, 111 (1/2/3/4): 31-42.
- [29] 吴晋, 徐兴新, 吴相安, 等. 各类水利工程隐患的探地雷达影像识别与分析[J]. 水利水电技术, 1998, 29(8): 25-30. (WU Jin, XU Xingxin, WU Xiang'an, et al. Identification and analysis of the GPR image features of hidden dangers in water conservancy projects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(8): 25-30. (in Chinese))
- [30] 史新伟, 何向东, 张志军, 等. 探地雷达技术在白蚁巢穴探测中的应用[J]. 河南科技, 2015(4): 80-82. (SHI Xinwei, HE Xiangdong, ZHANG Zhijun, et al. Application of ground penetrating radar (GPR) technology in the detection of termites nest [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015(4): 80-82. (in Chinese))
- [31] 李浩, 舒志乐. 均质土坝内病害探地雷达探测研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(3): 73-78. (LI Hao, SHU Zhile. Study on the ground penetrating radar detection in homogeneous earth dam [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(3): 73-78. (in Chinese))
- [32] 荆茂涛, 李志林, 张浩然, 等. 漳卫南运河滩害防治技术研究与实践[J]. 中国水利, 2023(15): 49-53. (JING

- Maotao, LI Zhilin, ZHANG Haoran, et al. Research and practical application of badger damage prevention and control techniques in the Zhangweinyun River [J]. China Water Resources, 2023(15): 49-53. (in Chinese))
- [33] 刘江平,王莹莹,刘震,等. 近地表反射和折射法的进展及应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3286-3305. (LIU Jiangping, WANG Yingying, LIU Zhen, et al. Progress and application of near-surface reflection and refraction method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3286-3305. (in Chinese))
- [34] 王静. 地球物理方法在白蚂蚁穴探查中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(7): 56-58. (WANG Jing. Application of geophysical method in white ant cave detection [J]. Yangtze River, 2003, 34(7): 56-58. (in Chinese))
- [35] 覃政教,钟晓群,陈滋康,等. 浅层地震反射法探测隐伏土、溶洞的初步效果[J]. 中国岩溶, 1992, 11(1): 63-69. (QIN Zhengjiao, ZHONG Xiaoqun, CHEN Zikang, et al. Preliminary results of shallow seismic reflection method for detecting hidden caves [J]. Carsologica Sinica, 1992, 11(1): 63-69. (in Chinese))
- [36] 王兆宁. 地震映像法在铁路隧道隧底岩溶探测中的应用[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 80-82. (WANG Zhaoning. Application of seismic imaging method in detecting karst at bottom of railway tunnel [J]. Railway Engineering, 2018, 58(6): 80-82. (in Chinese))
- [37] 王治华,仇恒永,杨振涛,等. 地震映像法及其应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(6): 696-700. (WANG Zhihua, QIU Hengyong, YANG Zhentao, et al. Seismic photography and its application [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, 32(6): 696-700. (in Chinese))
- [38] 高山,孙超君,邓社根,等. 分淮入沂松散复杂堤防隐患探测技术研究[J]. 江苏水利, 2018(5): 11-17. (GAO Shan, SUN Chaojun, DENG Shegen, et al. Research on Huai-Shu River hidden trouble detection technology of loose and complex dyke [J]. Jiangsu Water Resources, 2018(5): 11-17. (in Chinese))
- [39] 张伟,吕勇,梁东辉,等. 主-被动源地震面波勘探方法在岩溶区浅覆盖层探测中的应用[J]. 地质通报, 2022, 41(2/3): 416-424. (ZHANG Wei, LYU Yong, LIANG Donghui, et al. Application of active and passive-sourced seismic surface wave exploration to the detecting of shallow overburden karst area [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2/3): 416-424. (in Chinese))
- [40] 王千年,车爱兰,冯少孔,等. 高密度面波法在堆石体结构密实度检测中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(10): 1574-1579. (WANG Qiannian, CHE Ailan, FENG Shaokong, et al. Application of high-density Rayleigh-wave exploration to evaluation of rockfill density [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(10): 1574-1579. (in Chinese))
- [41] 高级,张海江,查华胜,等. 台阵和噪声源分布对微动成像的影响及其在盐矿溶腔探测中的应用[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2489-2506. (GAO Ji, ZHANG Haijiang, ZHA Huasheng, et al. The effect of different arrays and noise source distribution on microtremor imaging and its application in solute salt mine cavity detection [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(6): 2489-2506. (in Chinese))
- [42] 王书增,谭春,陈刚,等. 面波法在堤坝隐患勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 262-266. (WANG Shuzeng, TAN Chun, CHEN Gang, et al. The application of Rayleigh-wave exploration on detecting hidden dam troubles [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 262-266. (in Chinese))
- [43] 刘国峰,刘语,孟小红,等. 被动源面波和体波成像在内蒙古浅覆盖区勘探应用[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 937-948. (LIU Guofeng, LIU Yu, MENG Xiaohong, et al. Surface wave and body wave imaging of passive seismic exploration in shallow coverage area application of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 937-948. (in Chinese))
- [44] 葛双成,章晓桦,刘超英,等. 堤坝隐患物理探测方法及其应用[J]. 浙江水利科技, 2005(5): 36-39. (GE Shuangcheng, ZHANG Xiaohua, LIU Chaoying, et al. Detecting hidden trouble of dam and dike with physical method [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2005(5): 36-39. (in Chinese))
- [45] 赫健,孙从炎,陈夷. 自然电场法和高密度电阻率法在天子岗水库坝坝渗漏隐患探测中的应用[J]. 浙江水利科技, 2007(5): 45-47. (HE Jian, SUN Congyan, CHEN Yi. Using natural electric field method and high density electronic resistivity method to measure hidden danger of seepage [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2007(5): 45-47. (in Chinese))
- [46] 陆俊,李军,臧德记,等. 综合物探法探测堤坝白蚁隐患的关键技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 16-21. (LU Jun, LI Jun, ZANG Deji, et al. Key technology research for detecting termites in dykes and dams by integrated geophysical method [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 16-21. (in Chinese))
- [47] 李栋,赵元,石锦祥,等. 用低放射性强度¹³¹I与¹⁹⁸Au标记家白蚁的试验[J]. 昆虫学报, 1982, 25(3): 284-288. (LI Dong, ZHAO Yuan, SHI Jinxiang, et al. Experiments of labelling termite *Coptotermes formosanus shiraki* with low dosage of ¹³¹I and ¹⁹⁸Au [J]. Acta Entomologica Sinica, 1982, 25(3): 284-288. (in Chinese))
- [48] 陈文樵,罗忆. 白蚁蚁巢的寻找及挖掘[J]. 中国档案, 2002(2): 35-37. (CHEN Wenqiao, LUO Yi. Finding and digging the nest of termites [J]. China Archives, 2002(2): 35-37. (in Chinese))

(下转第 47 页)

2022,42(1):11-20. (in Chinese))

[5] MATA J,DE CASTRO A T,DA COSTA J S. Constructing statistical models for arch dam deformation[J]. Structural Control and Health Monitoring,2014,21(3):423-437.

[6] HU Jiang,WU Suhua. Statistical modeling for deformation analysis of concrete arch dams with influential horizontal cracks[J]. Structural Health Monitoring,2019,18(2):546-562.

[7] LI Fuqiang, WANG Zhenyu, LIU Guohua, et al. Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams[J]. Structure and Infrastructure Engineering,2015,11(12):1616-1631.

[8] WANG Shaowei,XU Cong,LIU Yi,et al. Zonal intelligent inversion of viscoelastic parameters of high arch dams using an HEST statistical model [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2022,12(1):207-223.

[9] 黄耀英,何一洋,沈振中,等. 大坝监测量最佳统计模型优选方法 [J]. 水利学报,2022,53(2):154-164. (HUANG Yaoying, HE Yiyang, SHEN Zhenzhong, et al. Optimization method of optimal statistical model of dam monitoring data [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(2):154-164. (in Chinese))

[10] PRAKASH G,BALOMENOS G P. A Bayesian approach to model selection and averaging of hydrostatic-season-temperature-time model[J]. Structures,2021,33:4359-4370.

[11] GAMSE S,ZHOU Wanhuan,TAN Fang,et al. Hydrostatic-season-time model updating using Bayesian model class selection[J]. Reliability Engineering & System Safety,2018,169:40-50.

[12] 牛景太,周华,吴邦彬,等. 考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):29-35. (NIU Jingtai,ZHOU Hua,WU Bangbin, et al. Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(1):29-35. (in Chinese))

[13] 胡江,马福恒,王春红. 特高拱坝变形监测的分区及其模型构建方法 [J]. 河海大学学报 (自然科学版),2021,49(2):148-154. (HU Jiang, MA Fuheng, WANG Chunhong. Zoned deformation monitoring and its model building method for super high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):148-154. (in Chinese))

[14] 王少伟,包腾飞,胡坤. 基于 PCA 的高混凝土坝变形空间融合监控模型[J]. 水利水电技术,2018,49(8):123-127. (WANG Shaowei,BAO Tengfei,HU Kun. PCA-based monitoring model for spatial integration of deformation of high concrete dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(8):123-127. (in Chinese))

[15] 魏博文,柳波,徐富刚,等. 融合 PSO-SVM 的混凝土拱坝多测点变形监控混合模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(3):396-407. (WEI Bowen,LIU Bo, XU Fugang,et al. Multi-point hybrid model based on PSO-SVM for concrete arch dam deformation monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2023,48(3):396-407. (in Chinese))

[16] CLYDE M A. Bayesian model averaging and model search strategies[M]//BERNARDO J M,BERGER J O,DAWID A P,et al. Bayesian Statistic 6. Oxford:Oxford Academic,1999:157-185.

[17] WARD JR J H. Hierarchical grouping to optimize an objective function[J]. Journal of the American Statistical Association,1963,58(301):236-244.

[18] MADIGAN D, RAFTERY A E. Model selection and accounting for model uncertainty in graphical models using Occam's window[J]. Journal of the American Statistical Association,1994,89(428):1535-1546.

(收稿日期:2023-10-19 编辑:俞云利)

(上接第 15 页)

[49] YANASE Y,MIURA M,FUJII Y,et al. Evaluation of the concentrations of hydrogen and methane emitted by termite using a semiconductor gas sensor [J]. Journal of Wood Science,2013,59(3):243-248.

[50] 黄晓光. 声频探测器的原理及其在白蚁探测中的应用 [J]. 中华卫生杀虫药械,2005,11(5):355. (HUANG Xiaoguang. Theory of audio explorer and its application in termites exploration [J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments,2005,11(5):355. (in Chinese))

[51] 李栋. 微波遥感探测堤坝白蚁巢获得成功 [J]. 水利水电技术,1993(6):9. (LI Dong. Microwave remote sensing was successful in detecting dyke termite nests [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1993(6):9. (in Chinese))

[52] BROOKS S E,OI F M,KOEHLER P G. Ability of canine termite detectors to locate live termites and discriminate them from non-termite material [J]. Journal of Economic Entomology,2003,96(4):1259-1266.

[53] EVANS T A. Assessing efficacy of TermatracTM: a new microwave based technology for non-destructive detection of termites (isoptera) [J]. Sociobiology,2002,40(3):575-583.

[54] MORI E,MENCHETTI M,BALESTRIERI A. Interspecific den sharing: a study on European badger setts using camera traps [J]. Acta Ethologica,2015,18(2):121-126.

[55] NANDA M A,SEMINAR K B,NANDIKA D,et al. Development of termite detection system based on acoustic and temperature signals [J]. Measurement,2019,147:106902.

(收稿日期:2023-12-13 编辑:俞云利)