

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.021

基于无人机地空瞬变电磁法的 水库库区滑坡体探测研究

史俊杰

(辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 为了预防水库库区滑坡灾害、保障水库安全,以江口水库库区为研究对象,提出基于无人机地空瞬变电磁法的滑坡体探测方法。通过麦克斯韦方程组计算出水库的磁感应强度,结合磁感应强度、无人机发射的信号以及探测半径,确定探测的方位角;基于无人机地空瞬变电磁法,结合多个探测点所获取的感应电动势数据,定位滑坡体异常位置;利用 GNSS 技术和多种测量工具,对滑坡体变形量参数进行系统的计算,确定水库库区滑坡体的变形量,实现滑坡体探测。结果表明,该方法探测结果的准确性始终保持在 95% 以上,能够有效识别出高程位置的变形情况,该水库库区的滑坡体变形程度较小,且变形速率缓慢,目前处于相对稳定的状态,其危险性相对较低。

关键词: 地空瞬变电磁法;滑坡体;磁感应强度;GNSS 技术

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0149-06

Landslide Detection in Reservoir Area Based on UAV Ground-space Transient Electromagnetic Method

SHI Junjie

(Liaoning Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110006, China)

Abstract: In order to prevent slope disasters in the reservoir area and ensure the safety of the reservoir, a landslide detection method based on unmanned aerial vehicle ground air transient electromagnetic method is proposed. By taking the Jiangkou Reservoir area as the research object, this work calculated the magnetic induction intensity of the reservoir through Maxwell's equations, and determined the azimuth of the detection by combining the magnetic induction intensity, the signal emitted by the drone, and the detection radius. Based on the unmanned aerial vehicle ground to air transient electromagnetic method, combined with the induced electromotive force data obtained from multiple detection points, locate the abnormal position of the landslide body. Using GNSS technology and various measurement tools, a systematic calculation of the deformation parameters of the landslide body is carried out to determine the deformation of the landslide body in the reservoir area and achieve landslide detection. The experimental results show that the accuracy of the detection results of this method always remains above 95%, and it can effectively identify the deformation of the elevation position. The deformation degree of the landslide body in the reservoir area is small, and the deformation rate is slow. Currently, it is in a relatively stable state, and its danger is relatively low.

Keywords: ground to air transient electromagnetic method; landslide mass; magnetic induction intensity; GNSS technology

随着人类活动的日益加剧,地质灾害(如滑坡、崩塌、泥石流等)的发生频率显著增加,对人民生命财产安全和生态环境造成了严重威胁。由于气候环

境变化^[1]、人们活动范围不断增加,导致地球环境破坏程度不断加剧。进而导致各水库库区经常发生滑坡灾害。因此,开展水库库区滑坡体探测研究,对

收稿日期:2024-08-03

修稿日期:2024-09-13

作者简介:史俊杰(1981—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程地质勘察、水文地质勘察、岩土工程设计等方面工作。

E-mail: gmfab93@163.com

于预防滑坡灾害、保障水库安全具有重要意义。

在已有研究中,索奎等^[2]采用三维电阻率法,通过反演电阻率模型来推断滑坡主滑方向,再通过滑动面形式和坡脚处沉积层厚度,指出了重点预警位置,最后通过三维电阻率法探测滑坡变形量,但此方法确定的滑坡体变形量精度不够。胡涛等^[3]利用历史影像、SAR 影像和光学影像,运用光学偏移量技术,对水库库区滑坡体的模型进行二维形变,并实时监测时间序列变化特征,从而得出滑坡变形量,但此方法确定的滑坡体变形量是基于视觉感官的,存在很大程度的误差。

由于上述两种方法不能准确地对水库库区滑坡体进行探测,本文提出基于无人机地空瞬变电磁法的水库库区滑坡体探测方法。无人机地空瞬变电磁法作为一种新兴的探测技术,具有高效、精确、受地形限制小等优点,为水库库区滑坡体的探测提供了新的解决方案。无人机地空瞬变电磁法是将无人机作为搭载平台,在空中完成瞬变电磁的发射和接收。该方法利用瞬变电磁场在地下介质中的传播特性,通过测量和分析电磁场的变化规律^[2],推断地下地质结构,特别是滑坡体的分布范围、形态及性质。瞬变电磁法具有探测分辨率高且探测深度深和抗干扰能力强等特点,适用于复杂地形条件下的地质灾害勘查。

1 工程概况

1.1 研究区概况

研究区江口水库库区位于玉林市福绵区成均镇,是一个中型水库,具有年调节功能,主要用于灌溉。该水库的所控制流域面积在 430 000 m² 左右,在正常水位以下的水面面积在 10 000 m² 左右,水库回水长度为 5 万 m。江口水库所在地区气温适中,气候较为温和,常年降水量充沛。

水库库区的滑坡体表层常常出现不规则沉降形成的局部平台,伴随着大型滑坡锋面的土石松动现象,同时也不时有小型崩塌发生。这些滑坡体表层的平均坡度相当陡峭,并且这种延伸状态已经持续较长时间,导致坡面呈现出凹凸不平的状态。

由于在研究区内存在大致形态相对完整的岩体石块,且它们与被风化甚至碎裂的岩体石块之间存在一定的电性差,因此研究区域具备开展无人机地空瞬变电磁法勘探的前提条件^[4]。

1.2 数据来源

无人机按照预设测线进行飞行,同时发射瞬变

电磁信号并接收地下反射回来的电磁信号。在水库库区合适位置布置回线发射框,确保覆盖目标滑坡体区域。通过发射机系统向发射框供以双极性方波电流,产生一次磁场。无人机飞行路线及信号发射如图 1 所示。

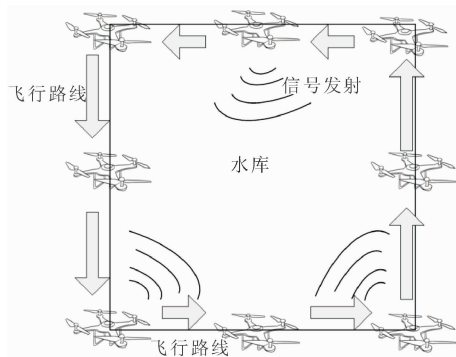


图 1 无人机飞行路线及信号发射图

在收集到电磁信号数据后,结合地质学中的电阻率原理,对不同岩性地层的电阻率值进行深入分析。电阻率作为反映物质导电性能的物理量,其大小与地下介质的成分、结构、温度和压力等因素密切相关。不同岩性地层的电阻率值如表 1 所示。

表 1 不同材料电阻率表

电阻层	材料	电阻率/($\Omega \cdot m$)
覆盖层(浅部低阻层)	素填土	0 ~ 100
覆盖层(中等电阻层)	破碎带	100 ~ 400
	粉质黏土	300 ~ 800
基岩(深部高阻层)	凝灰岩	1000 ~ 2000
	花岗岩	2000 ~ 3000

2 基于无人机地空瞬变电磁法探测水库库区滑坡体

2.1 推算水库库区磁感应强度

根据江口水库的实际地形信息,利用麦克斯韦方程组,依据水库的磁场强度、电通量密度等信息,计算出影响无人机操作的磁感应强度数据。

根据麦克斯韦方程组对宏观电磁场的规律进行描述分析,其微分形式表达式如下:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = q \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 表示该处的电场强度数值,V/m; B 表示该处

磁感应强度数值, T; t 表示时间长度, s; H 表示该处磁场强度数值, A/m; J 表示电流密度数值, A/m²; D 表示电通量密度数值, C/m²; q 表示自由电荷密度数值, C/m²。

各向同性介质关系如下所示:

$$\begin{cases} D = \varepsilon E \\ B = \mu H \\ J = \sigma E \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 表示介电常数数值, F/m; μ 表示磁导率数值, H/m; σ 表示电导率数值, S/m。

结合 $H = \nabla \times A$ 关系和矢量恒等式、洛伦兹条件, 其计算公式如下所示:

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times A = -\nabla^2 A + \nabla(\nabla \cdot A) \\ \nabla \cdot A + \sigma \phi + \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 表示矢量磁位。

将式(3)结果代入式(1)得到以下关系:

$$\nabla^2 A = \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (4)$$

由于断电后无人机发射线圈电流数值为 0, 在此情况下, 由式(2)将涡流场的边值问题^[5]表示为以下关系:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times A \right) = \mu_0 \left(\sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \\ \nabla \cdot \left(\sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

又 $B = \nabla \times A$, 令 $E + \partial A / \partial t = -\nabla \phi$, 由于 $\varepsilon_0 \approx 8.756 \times 10^{-12}$ 足够小, 忽略二阶导数项并假定标量电位比 ϕ 为 0 可得:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times A \right) = -\mu_0 \left(\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right) \\ \nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ_r 表示相对磁导率数值; μ_0 表示真空磁导率数值。

该水库采用网格细化技术, 被分解为包含 N 个四面体单元模型。对于模型中的任意一个四面体单元, 利用该四面体各节点处的磁位近似值来构造矢量磁位 A 的插值函数, 其表达式如下:

$$A^e = \sum_{k=1}^4 N_k^e A_k = \sum_{k=1}^4 (N_k^e A_{kx} i + N_k^e A_{ky} j + N_k^e A_{kz} k) \quad (7)$$

式中: A^e 为插值函数; N_k^e 为该单元在结点 k 的函数; A_k 为节点 k 的磁位近似值; A_{kx} 为节点 k 在 x 处的磁位近似值; A_{ky} 为节点 k 在 y 处的磁位近似值; A_{kz} 为节点 k 在 z 处的磁位近似值。

对上述函数进行转化, 利用加权余量的方法, 将函数转化为有限元离散化方程的形式^[6], 其方程式如下所示:

$$\left(\frac{M}{\Delta t} + \frac{2}{3}K \right) u_{n+1} + \left(-\frac{M}{\Delta t} + \frac{1}{3}K \right) u_n = 0 \quad (8)$$

式中: M 表示 $\partial A / \partial t$ 的系数矩阵函数; K 表示 a 的系数矩阵函数; u_n 表示某一时间节点上的向量解。

通过以上计算得出 $(k+1)\Delta t$ 时刻节点的磁位向量数值, 从而得到磁感应强度数值。

通过上述公式计算, 得出该水库磁感应强度为 55 μ T, 从而考虑磁感应强度对本实验的影响。

2.2 选取无人机探测方位角

考虑磁感应强度对无人机的飞行方向和角度的影响, 采用数值模拟与解析计算方法完成无人机探测方位角的计算。

结合瞬变电磁法采用的无人机探测半径范围, 对无人机探测方位角进行选取^[3]。计算多组无人机的互感系数来确定方位角, 减少无人机探测方位角对瞬变电磁探测效果的影响。方位角计算公式如下所示:

$$\begin{cases} x_1 = r_1 \cos \varphi \\ y_1 = r_1 \sin \varphi \\ z_1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_2 = r_2 \cos \theta \\ y_2 = r_2 \sin \theta \\ z_2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_1 为第 1 组无人机探测半径; r_2 为第 2 组无人机探测半径; φ 为上方无人机平面角度; θ 为下方无人机平面角度。

由上述方程式看出, 发射信号与无人机探测半径之间成正比关系^[7], 为确定发射信号与无人机探测方位角, 采用数值模拟与解析计算的方法得到不同方位角。无人机方位角与数值模拟的关系如图 2 所示。

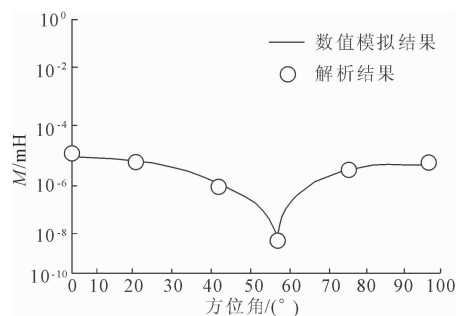


图2 无人机方位角对应图

由图 2 可知,无人机发射信号和接收线圈方位角的角度,会影响发射和接收线圈之间的互感数值。其关系为其角度以 57° 为分界线,互感数值呈现先减小后增大趋势。因此,后续探究中,无人机探测方位角设置为 57° 。

2.3 探测水库库区异常定位

根据上述中的磁感应强度和无人机探测方位角,建立测试模型,从而在模型中完成探测,确定水库库区的异常位置。

设置 2.2 中无人机方位角度数,根据瞬变电磁法扫描水库滑坡,不断改变无人机旋转发射和接收线圈的旋转角度^[8],对研究的水库滑坡体进行探测,根据响应结果,得到其不同瞬变电磁响应差异,这种差异性研究水库库区异常定位的基础理论^[9]。根据 2.2 中确定的方位角 57° ,结合 2.1 中磁感应数据,结合表 2 数据,在图 3 模型进行探测。

表 2 研究数据表

研究数据	数值
水库围岩电阻率	$\rho_0 = 100 \Omega \cdot \text{m}$
低阻异常体电阻率	$\rho_1 = 1 \Omega \cdot \text{m}$
水库模型	10 m × 10 m × 10 m
发射电流	2 A
收发距离	1 m
扫描旋转间隔	30°

以 0 为原点,按照 5 m 间距从(30,0,0)到(75,0,0)进行布设,共设 10 个测点。测试模型图如 3 所示。

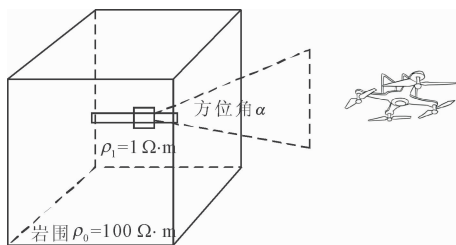


图 3 三维地质—地球物理模型图

根据上方数据,测得多测点不同探测方向(不同旋转角)对应的感应电动势曲线,见图 4。其中,横坐标为测点号,纵坐标为感应电动势。

从图 4 可以看出,在 $X = 50 \text{ m}$ 时,该处感应电动势达到峰值,其感应电动势随坐标的变化呈现先增长后下降的变化形式^[10]。因此,对 $X = 50 \text{ m}$ 测点进行分析可得, $X = 50 \text{ m}$ 处钻孔径方向与低阻异常体中心位置相同,因此说明低阻异常体对瞬变电磁场的衰减影响变小,当感应电动势增强时,有较明显

的异常特征^[11]。因此,证明在 $X = 50 \text{ m}$ 测点处发生水库库区滑坡。

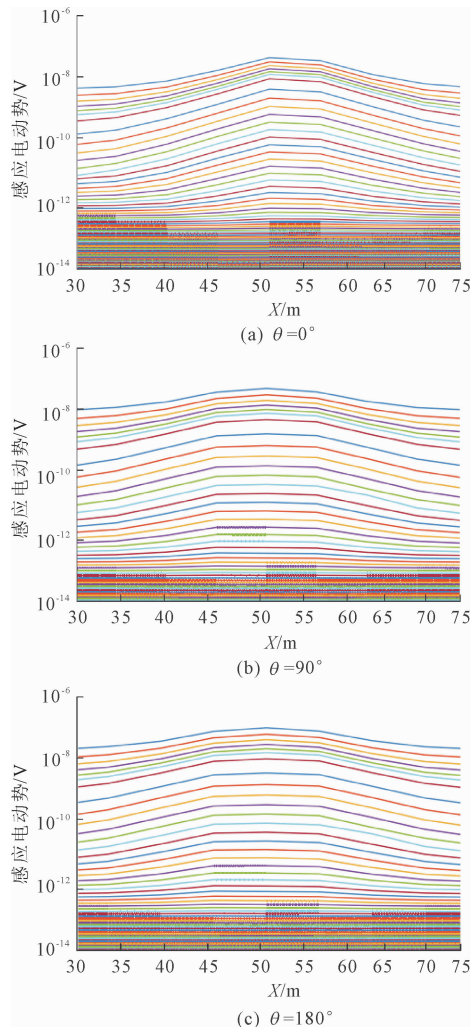


图 4 不同坐标测点磁感电动势探测图

2.4 探测水库库区滑坡体变形量

通过上述定位点的确定,使用 GNSS 技术,运用多种探测仪器进行探测,并对数据进行处理,从而完成对水库库区滑坡体变形量的探测。

在滑坡体上,根据 2.3 中的异常定位设置探测点,通过 GNSS 技术实时探测其位移变化,并定期收集和分析探测数据,以推断滑坡体的变形量。具体操作流程如图 5 所示。

图 5 中利用 GNSS 技术对滑坡体上的监测点进行高精度定位。根据 GNSS 技术提供的水平位移和垂直位移等三维坐标数据。通过 GNSS 接收机连续接收卫星信号,实时计算监测点的位置变化,将 GNSS 接收机收集的数据传输至数据处理中心^[12],利用专业软件进行解算和分析,得到滑坡体的位移时间序列和变形速率。

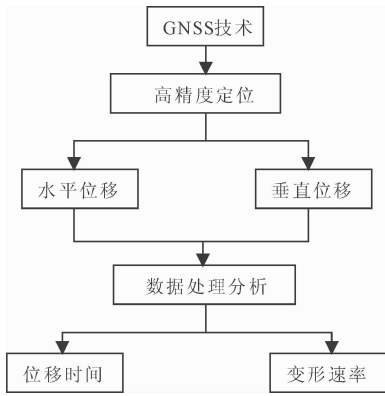


图 5 测量滑坡体变形量流程图

通过沿剖面布置多个监测点,分析滑坡体在不同深度的位移变化情况^[13]。将拉线式位移计和静力水准仪安装在滑坡边界,测量滑坡体上两点间的相对位移,测量滑坡体内部或表面的倾斜变化。将测斜仪固定在滑坡体表面,测量倾斜角度的变化。在滑坡体上选择具有代表性的剖面进行监测^[14]。三种仪器摆放位置如图 6 所示。



图 6 仪器位置图

采用统计学方法对监测数据进行分析。计算滑坡体的位移量、位移速率、变形趋势等参数,评估滑坡体的变形量。具体计算公式如表 3 所示。

表 3 滑坡体参数计算公式表

计算参数	计算公式
位移量	$\Delta x = x_2 - x_1 $ $\Delta y = y_2 - y_1 $
变形量	$m = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$
位移时间	$\Delta t = t_2 - t_1$
位移速率	$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$
变形速率	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$
变形趋势	根据计算结果完成图形绘制

注: x_1 为滑坡体水平方向第一次测量坐标, x_2 为滑坡体水平方向位移后坐标, y_1 为滑坡体垂直方向第一次测量坐标, y_2 为滑坡体垂直方向位移后坐标, t_1 为第一次测量时间点, t_2 为位移后测量测量时间点。

根据表 3 中公式对仪器中探测到的数据进行计算,从而计算出水库库区滑坡体变形量^[15]。

3 试验结果

在监测范围内,收集对各断面的监测数据并进行调查研究。在各观察断面上,每间隔一个高程抽取一个采集点位,各断面选取不少于四个取样或分析点位。从第二期起,每期以前第一阶段高程资料为基础,开展变形研究。将各点资料按照图 2 中变形测量方法加以统计,以便算出不同期水库库区坡体应变量。1 号、2 号和 3 号剖面的变形量如表 4 所示。

表 4 剖面监测数据

剖面	监测点高程位置/m	第二期变形量/mm	第三期变形量/mm	第四期变形量/mm
1	400	65.23	45.21	56.48
	450	26.74	15.54	56.45
	500	-21.56	-20.15	-35.45
2	400	56.45	64.36	45.15
	450	26.54	48.55	31.12
	500	-15.45	-45.45	-32.21
3	400	84.12	54.36	21.95
	450	65.45	24.65	10.25
	500	-32.15	-22.15	-12.54

注:表中变形量为负数代表此处变形为凹陷变形状态,其余变形为凸起变形状态。

由表 4 数据可看出探测点高程位置较高地点发生的变形均为凹陷变形,而高程较低的区域发生的变形均为凸起变形,但该水库滑坡体变形程度较小,均为毫米级变形,证明滑坡体结构变形状态呈现稳定趋势。

本试验中第一期探测时间与第二期探测时间相隔为 48 h,第二期探测时间与第三期探测时间相隔为 24 h,第三期探测时间与第四期探测时间相隔为 36 h。根据表 2 中变形速率公式进行计算,坡体剖面变形速率如表 5 所示。

由表 5 数据可看出,在高程较低处,滑坡体变形速率较快,且其变形速率呈现减少趋势,证明滑坡体结构相对稳定。

为验证本文方法的有效性,以准确性为试验指标,将基于三维电阻率监测方法和基于光学与 SAR 数据监测方法作为对照方法,与本文方法进行对比试验,试验结果如图 7 所示。

表 5 变形速率表

剖面	监测点高程位置 /m	第二期变形速率 /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	第三期变形速率 /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	第四期变形速率 /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	400	1.36	1.88	1.57
	450	0.56	0.65	1.57
	500	-0.45	-0.84	-0.98
2	400	1.18	2.68	1.25
	450	0.55	2.02	0.86
	500	-0.32	-1.89	-0.89
3	400	1.75	2.27	0.61
	450	1.36	1.03	0.28
	500	-0.67	-0.92	-0.35

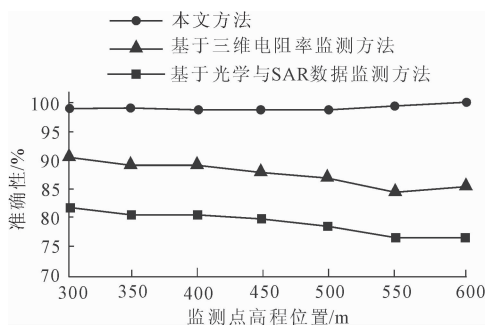


图 7 试验结果图

从图 7 可以看出,与基于三维电阻率监测方法和基于光学与 SAR 数据监测方法相比,本文方法监测结果的准确性始终保持在 95% 以上,能够有效识别出高程位置的变形情况。

4 结 论

本研究针对江口水库库区的滑坡体探测问题,提出了一种基于无人机地空瞬变电磁法的探测方法。通过理论计算与实地探测相结合的方式,不仅成功定位了滑坡体的异常位置,还对其变形量参数进行了精确的计算与分析。试验结果表明,该方法具有高度的准确性和可靠性。可为水库库区的滑坡灾害预防提供参考。在未来的研究中,将进一步优化设计方法中的探测流程和技术手段,提高数据处理和分析能力,以便更准确地掌握滑坡体的分布规律和演化趋势,为地质灾害防治工作提供更加有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 武军杰,智庆全,李 貅,等. 回线源地-空瞬变电磁系统及其在滑坡探测中的应用[J]. 地球物理学报, 2023,66(4):1758-1770.
- [2] 索 奎,刘文辉,倪云鹏,等. 三维电阻率成像在小型滑坡探测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(6):71-78,95.
- [3] 胡 涛,杨成生,侯祖行,等. 基于光学与 SAR 数据的贵州发耳镇尖山营滑坡监测研究[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(1):82-88.
- [4] 罗 术,陈争玉,蓝宇骋,等. 等值反磁通瞬变电磁法探测滑坡堆积体的应用[J]. 物探与化探,2023,47(2):523-529.
- [5] 吴 璋,张 开,李雄伟,等. 基于瞬变电磁法的煤层风氧化带探查[J]. 煤矿安全,2024,55(5):188-194.
- [6] 张莹莹,王 玉,马玉龙. 多辐射场源半航空瞬变电磁法薄层探测能力[J]. 地质与勘探,2024,60(4):785-799.
- [7] 尚彦军,金维浚,伊学涛,等. 新源县加朗普特特大型滑坡地质结构探测及老滑坡影响综合研究[J]. 工程地质学报,2022,30(3):760-771.
- [8] 程久龙,姜成麟,李 垚,等. 钻孔瞬变电磁法方位线圈扫描探测定位方法[J]. 煤炭学报,2024,49(1):616-627.
- [9] 刘永亮,张 伟,刘振宇,等. 高密度电阻率法和音频大地电磁法在猴场滑坡结构探测中的应用[J]. 中国岩溶,2024,43(2):441-453.
- [10] 徐正玉,罗朝鹏,付志红,等. 无人机航空瞬变电磁法未爆弹探测试验研究[J]. 现代雷达,2023,45(12):47-52.
- [11] 于 森. 库区堆积层滑坡地表变形规律模型试验研究[J]. 土工基础,2024,38(3):552-556,561.
- [12] 黄 荣. 无人机倾斜摄影测量技术在地灾监测中的应用[J]. 地下水,2024,46(2):179-181,267.
- [13] 关艳丽,贾荣谷,李育红,等. 水库滑坡机理及风险评估研究与展望[J]. 人民珠江,2024,45(8):10-18.
- [14] 李红星,周宝龙. 重庆市向阳水库滑坡稳定性分析与评价[J]. 水利水电快报,2024,45(3):42-46.
- [15] 王 冬,闫小龙,申永斌. 基于数值模拟的水库滑坡变形特征预报研究[J]. 水科学与工程学报,2023(3):65-68.