

滑坡监测技术的研究进展与展望

杜 伟

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年5月24日; 录用日期: 2022年6月27日; 发布日期: 2022年7月5日

摘 要

滑坡通常是指由于降雨侵蚀、积水浸没、地面振动和人类活动等原因的影响, 边坡上的土块在自身重量的作用下沿边坡的脆弱带向下移动的地质结构位移变化现象。滑坡是一种不可低估的常见的、有害的地质灾害, 影响着人类的社会、经济发展和人身、财产安全, 威胁着人民的核心利益。为了减少滑坡灾害造成的损失, 提高边坡的防护能力, 有必要对边坡进行监测, 得到边坡的动态地质规律。本文综合阐述了国内近年来滑坡监测的最新进展, 如InSAR技术、三维激光扫描技术、遥感技术、GPS技术、GIS技术、近景摄影测量技术、自然电位法等, 获取滑坡灾害地质信息并分析, 提出了信息化、专业化、体系化的监测预防系统模式, 可有效指导滑坡监测工作, 并结合本人近年来的学习理论研究, 对未来的技术的突破方向问题提出展望, 对当前乃至未来不断提高突发滑坡灾害监测预警能力建设提供相关文献参考和依据。

关键词

地质灾害, 滑坡监测, 信息化建设

Research Progress and Prospect of Landslide Monitoring Technology

Wei Du

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 24th, 2022; accepted: Jun. 27th, 2022; published: Jul. 5th, 2022

Abstract

Landslide usually refers to the geological structure displacement change phenomenon that the soil block on the slope moves downward along the fragile zone of the slope under the action of its own weight due to rainfall erosion, ponding immersion, ground vibration and human activities. Landslide is a common and harmful geological disaster that can not be underestimated. It affects human so-

cial and economic development, personal and property safety, and threatens the core interests of the people. In order to reduce the loss caused by landslide disaster and improve the protection ability of slope, it is necessary to monitor the slope and obtain the dynamic geological law of slope. This paper comprehensively expounds the latest progress of landslide monitoring in China in recent years, such as InSAR technology, three-dimensional laser scanning technology, remote sensing technology, GPS technology, GIS technology, close range photogrammetry technology, natural potential method, etc., obtains and analyzes the geological information of landslide disaster, and puts forward an informative, professional and systematic monitoring and prevention system model, which can effectively guide the landslide monitoring work, and combined with my study and theoretical research in recent years, this paper puts forward the prospect of the breakthrough direction of technology in the future, and provides relevant literature reference and basis for continuously improving the monitoring and early warning capacity of sudden landslide disaster at present and even in the future.

Keywords

Geological Disaster, Landslide Monitoring, Information Construction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是一种频发的地质灾害，且危害巨大。2013年1月，云南镇雄爆发滑坡灾害，滑程约800米，堆积体积约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，造成赵家沟村民组60多间房屋被毁，46人遇难[1]。2019年7月，贵州省六盘水市水城县发生重大滑坡，43人因此身亡，滑坡方量200万平方米，造成约1.9亿直接经济损失。不仅国内地质灾害频发，国外也有不少滑坡灾害发生。2022年2月，厄瓜多尔基多市发生重大山体滑坡，28人因此死亡，约52人不同程度受伤，当地的交通和必要服务措施遭到了损坏，经济损失是无法估量的。为了能提前预防滑坡灾害的发生，众多学者开始找寻有效的滑坡监测技术，以求减少滑坡带来的损失，监测预防滑坡灾害成功的案例也有不少。例如，2020年7月，布拖县罗家坪乡爱国村村委会主席在进行滑坡监测和隐患检查时，发现在安置点处有异常响动，便立即展开防御措施。当地政府立即将该地区的187人转移到安全地区，不久，安置点上方滑坡体大面积滑动形成滑坡，由于补救及时，避免了巨大的伤亡和损失。这些案例的成功，说明滑坡的监测预防对于人类社会具有一定的意义。

我国土地面积巨大，随之而来的是地质灾害频发，其中影响最严重的是滑坡。根据权威统计，该灾害每年给我国造成约20亿元的经济损失，受损害的城镇多达400个。此外，国家的一些重点工程项目也受到滑坡灾害波及，如我国的三峡工程等重大项目。由于滑坡易发区地质条件的复杂性，许多经过处理的滑坡仍有可能发生连续变形甚至滑动，造成二次损害。所以说，对于已经发生滑坡灾害的地区仍然需要进行一定的监测。

滑坡运动具有综合性，且受多种因素影响，当前难以完全获得滑坡地质活动的动态规律，但是滑坡监测有助于掌握滑坡的演化和分析特征，随着滑坡监测技术的不断进步，使人们获得更详细的滑坡数据，对滑坡有更深入的了解。运用滑坡监测技术可以分析滑坡地质变化，获取有效的监测数据，这些数据不仅可以用来预防灾害的发生，也可以用于滑坡治理效果的检验，所以发展滑坡监测技术具有重要意义。本文初步陈述 InSAR 技术、三维激光扫描技术、遥感技术、GPS 技术、GIS 技术、近景摄影测量技术、

自然电位法等方法在滑坡监测中的应用方式，及其原理。

2. 几种重要的滑坡监测技术

2.1. InSAR 技术

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)又称雷达干涉技术，是最近 30 余年来发展起来的一项新的高精度对地观测技术，它不仅探测雷达波的后向散射，还探测雷达波的相位信息[2]。利用不同位置探测到的雷达波的相位差，可以反演地表三维空间的位置及其微小变化，广泛应用于地面沉降、开采沉陷、滑坡、构造活动、火山活动、冰川活动及地震变形等地表形变的调查和监测[2]。对于这项技术，最早可以追溯到 1974 年，随着 1991 年 ERS 卫星的发射升空，星载 InSAR 技术逐渐成熟[3]。

该技术因为其高精度和全天候的特点，所以适用于大范围的地质滑坡灾害的监测，但是 D-InSAR 还是存在着一些缺陷，它会因为地质活动、时空失相干、气温、轨道精确度等因素，影响到它对地质形变信息的监控。随着卫星科技的进步，卫星重返周期会逐渐变短，这将会导致微小形变与噪声的重叠，空间分辨率越来越高，导致噪声更为复杂，影响着 D-InSAR 技术对地质变形的监测[4]。

InSAR 是一种主动式微波遥感技术，它融合了合成孔径雷达技术和干涉测量技术[4]。该技术可以获得被测区地质表面的散射强度、相位等数据，散射强度可以反映被测区地质的含水量、粗糙程度等，相位代表被测区与传感器之间的距离。干涉技术是将同一被测区内两个或两个以上相交处的 SAR 图像进行复共轭相乘，以获得被测区的地质形变的信息。雷达干涉的模式分为：沿轨道干涉法、交叉轨道干涉法、重复轨道干涉法[3]。举个例子，使用重轨干涉最常用的方法之一，得到的干扰相位表达式如下：

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}}$$

式中， φ_{flat} 为水平相位， φ_{topo} 为地形相位(可用来恢复地形信息)， φ_{def} 为地表形变引起的相位， φ_{atmo} 为大气延迟相位， φ_{noise} 为观测噪声引起的相位[5]。平地相位、地形相位、噪声相位、大气相位可以去掉[5]。剩下得到地表形变相位，此技术可用于探测地质厘米级别的微小变形，被称为雷达差分干涉技术(D-InSAR)。其几何关系如图 1 所示：

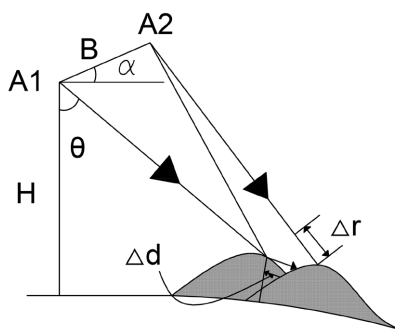


Figure 1. Geometric relation of differential interferometry [5]

图 1. 差分干涉测量几何关系[5]

从该图中可以得出以下公式

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{\text{def}}$$

式中， Δr 为所求解的地面目标点的 LOS 向形变信息， λ 为雷达波长[5]。

2.2. 三维激光扫描技术

随着激光技术的不断发展,三维激光扫描技术[6] (又称实景复刻技术)诞生了,顾名思义是通过发射激光,覆盖被测物体,从而获得被测物体表面各个点位的信息,最早可以追溯到 20 世纪 60 年代第一台激光扫描仪的诞生。相比于一般的三维信息获得技术,它具有速度快、高精度、扫描范围多、适应能力强、高穿透等优势。特别是扫描范围这一块,激光扫描可以多至几百甚至几千米,其精度也可以达到毫米级别,这些数值远远超越平常的方法[7]。

正是由于该技术有上述这些优势,它才被利用到危险区域的滑坡监测中去,以保证工作人员的安全,也可用于地下的无光地区监测。但是三维激光扫描技术还存在着一些弊端,例如在采空区,虽然该技术在这方面已经取得了阶段性的发展,但是仍需要多种技术的协调使用,多种技术要在多种仪器的配合下使用,多种仪器携带不便,使测量效率低下。扫描仪也容易受采空区内粉尘的影响,导致数据信息的采集精度下降。该技术在测量滑坡位移量方面上,也存在着一些不足,它获取滑坡坡体的位移量的时间较长,无法预测坡体的位移变化趋势,扫描范围也有限,激光也易受障碍物的遮挡造成地质三维建模的失真[8]。

三维激光扫描技术是利用扫描仪器发射激光到达被测物体,覆盖式扫描物体表面,获取被测物体的每个点位的空间信息[8]。之后将点的空间坐标输入到计算机中,结合预先扫描好的物体的二维图像,最后生成立体的图像。用三维激光扫描技术对滑坡监测体进行点云数据采集,再从监测点、断面线和三维模型三个维度对点云数据进行分析,提供整体与细节兼顾的高精度成果及信息,从而更好地满足地质灾害监测的需求。此技术是以收集地质灾害资料为主要基础,确定监测区域,研究地质灾害的形成条件,随后设计出合理规范的监测方案,对地质活动进行全面的监测。主要流程如图 2 所示:

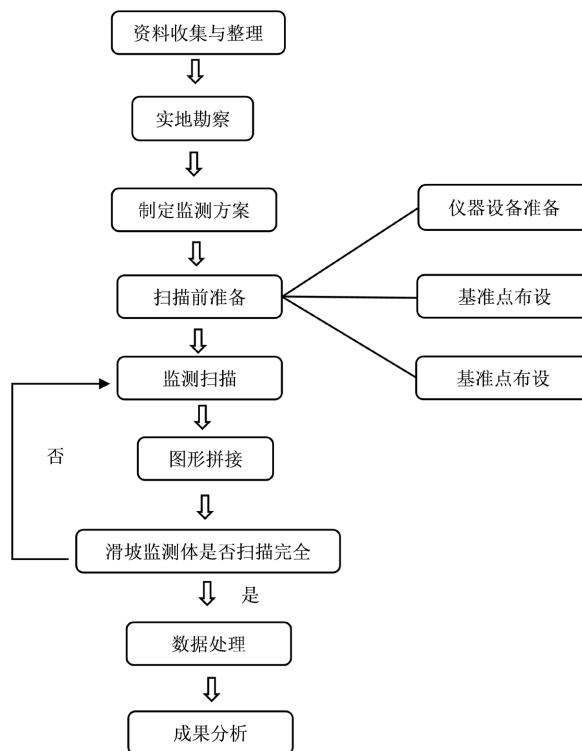


Figure 2. Geological disaster monitoring technology flow based on 3D laser scanning technology [8]

图 2. 基于三维激光扫描技术的地质灾害监测技术流程[8]

上图中从“资料收集与整理”一直到“滑坡监测体是否扫描完全”都是常规的扫描前期的准备工作，只需按照正常的操作流程即可，该图中最为关键的是数据处理部分，此部分涉及到监测实验的精确性。需要注意的是在此环节，首先要对数据进行预先处理，看被测物体是否被扫描完全，然后处理数据的噪点(即因为仪器或者环境因素而造成的误差)，最后将数据进行分类。

2.3. 遥感技术

遥感技术与普通的探测地球力场、磁场或是弹性波等性质的物理方法不同，该技术是通过飞机或者卫星来搭载遥感器从空中向被测物体发射特定波段的电磁波，利用电磁波与被测物之间的反射、散射等一系列交换活动，来确定被测物的性质。遥感技术由航空摄影演变过来，可以追溯到 20 世纪 70 年代美国的陆地卫星搭载多谱扫描仪发射升空。地质灾害日益加剧，不断威胁着人类的生命财产安全，人类急需一种可以大规模监测灾害活动的技术，于是遥感技术站上监测的舞台。美国、日本等国最先对此技术有了开展，我国在 20 世纪 80 年代开展了对遥感技术的研究[9]。遥感技术自诞生以来就被公认为具有大的发展潜力，它之后的快速发展离不开传感器和飞行载具科技的不断进步。在之后的几十年，传感器的传感范围、精确度、分辨率不断提高，飞行载具，如：飞机、卫星、无人机等的飞行范围、稳定性都有了一定的飞跃。人类对于地质灾害监测的研究，走向国际化、系列化发展，都离不开遥感技术的广泛性和综合性。雷达遥感具有非接触式大尺度空间连续覆盖和高精度变形测量的优点，已广泛应用于滑坡地质灾害领域。

雷达遥感技术作为一种全新的监测技术，它有别于传统的监测技术[10]。传统的监测技术监测范围小，对得到的监测数据处理缓慢，而且人工成本高，再加上不能很好地监测分散式的地质地貌。雷达遥感技术脱颖而出，它可以从高空大范围地、周期性地、重复地监测被测区的地质地貌，从而获取全面的地质信息，进行全面的调查研究。但也存在着不足，雷达遥感技术容易受天气的影响，例如对流大气层会使精度降低。

遥感技术对地质灾害的监测不是从单方面实现的，而是需要多方面的结合。因此在获取被测区的滑坡监测数据后，还应导入计算机，依靠专业软件来完成信息的处理。根据研究前人已经可以获取的地质灾害的显著相关特征，结合进行图形上的岩石的色调及其外形差别，来实现物理区分。此外，地层、湖泊和植被也可用作识别标志[10]。一般来说，这种技术主要是基于人机交互，不能实现完全的智能化。该技术还需要结合其他的非遥感数据资料，对被测区进行综合分析验证，才能完成最终的监测。

2.4. GPS 技术

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是一种以人造地球卫星为基础的高精度无线电导航的定位系统，它在全球任何地方以及近地空间都能够提供准确的地理位置、车行速度及精确的时间信息[11]。可用 GPS 代替常规的滑坡监测方法，并且在精度、监测速度、时效性、效益等方面都有明显优势[11]。

正是由于该技术的精确度，可以监测毫米级别的位移量，所以它也大多数被应用于一些精密工程的位移监测当中去，滑坡的变形监测就是其中一个。GPS 的缺点也是很明显，虽然该技术的水平位移精度很好，但垂直精度有所欠缺。在建筑物或者山体密集的被测地区，卫星信号无法到达被测区域，从而影响滑坡监测。在现阶段，还需要结合其他的技术，例如 GIS、近景测量技术等，一起实现对被测区域的监测。

该技术的监测方法是 GPS 监测点位布置在被测区域，监测点按照基准点和滑坡体监测点布置，这两个点位都需要布置 GPS 观测墩，通常选择危害严重、稳定性差的滑坡，在每个滑坡两侧设置基准网点[11]。监测网点的布设需要根据滑坡的物理形态等因素确定，原则上需要适合 GPS 观测。之后通过一

系列的流程,完成 GPS 数据的采集、处理,再通过观测信息的变化,来完成对滑坡灾害的监测[12]。对于 GPS 数据的处理,建议使用较高精度的 GPS 分析软件,因为如果使用一般的商用软件,得出的数学模型存在一定的缺陷,其基线解算还是网平差都不够严密,会影响滑坡监测。对流层湿分量会影响地高方向的精确度,对此可以采用差分法消除,对于残余误差,可以采取增加天顶对流层随即参数才减小误差[13]。

2.5. GIS 技术

地理信息系统(Geographic Information System, 简称 GIS)是以采集、储存、管理、显示和分析地球表面与空间、地理分布有关的数据的综合计算机信息系统,是一种分析和处理海量空间数据的技术[14]。以这项研究技术为中心,研发了一套融合性、辅助性的数据信息处理管理系统,在计算机的加持下,可以对数据分析进行一个智能化处理,经过自己处理后的数据我们可以用地图或者通过图片的形式向工程师展示。

该技术通常适用于地质灾害频发的地区,通过建立数据库,可以更好地预防监测接下来的地质滑坡等形变。但是 GIS 也由于其信息量大,很容易忽略数据的真实性,无法探索有价值的数据。庞大的数据,对其划分的依据也是有待商榷。况且大量的不真实数据与真实的有价值的数据混合在一起,会导致总体数据产生偏差,影响最终结果。因此,在 GIS 技术中对数据的深度分析是个不可忽略的问题。

影响滑坡的因素有很多,在 GIS 技术将这些因素称为滑坡影响因子,可以简称为因子,这些因子可以是气温湿度、雨水量等。要想使用 GIS 对其进行数据分析,可以选择滑坡的坡向、高程、裂隙等参数,通过 GIS 分别计算各因子取值区间与滑坡分布的关系。衡量滑坡易发程度的指标主要包括滑坡面积百分比(影响因子的不同取值区间内滑坡面积除以区间面积)、滑坡密度(1 km^2 内滑坡的个数),最后运用层次分析的方法,对数据进行处理,完成对滑坡灾害易发性的评价[15]。

2.6. 近景摄影测量技术

近景摄影测量是通过摄影测量的方法,对近距离目标摄影以确定其外形、形态和几何位置的测量技术[16]。该技术的快速发展离不开相机精度的提高,是滑坡监测中一种无需接触、迅速的测量技术[16]。它可以在很短的时间内获取测量区域的地形数据信息,因此适合于在危险区域工作。此技术最早可以追溯到十九世纪 40 年代年,第一个摄影测量系统被法国人 Laussedate 发明出,并成功利用到地形绘制中,后来此人被称为“摄影测量之父”。

该技术也可适用于危险区域的监测,但是其技术的精度与摄影机的分辨率、成像范围的大小有关,测量范围较大的区域时,其精度随着范围梯度下降。通常高精度相机成本很高,因此当使用该技术时还需要成本控制。在实际工作环境中,也有必要根据现场条件考虑仪器的稳定性。

依靠近景摄影测量技术与相机的结合,并用特定的摄影方式(旋转式、平行式)对被测区域进行摄影监测,获得较高精度的照片,用专业摄影测量软件对被测区域的监测数据进行处理,生成点云模型,然后我们通过使用自动匹配控制点,完成监测区域数据结构模型前后期的转换,依次建立 DEM 模型,最后将前期与后期的得到的模型叠加[17]。这就可以得出山体在该时间段内滑坡的绝对位移量以及位置和面积变化,完成对滑坡的监测[17]。

2.7. 自然电位法

自然电位法(Self-Potential, 简称 SP)不依赖于外部源的一种地球物理方法,可以监测分析地下水和包气带水流动情况。自然电位是自然电场下观测的相对参考电极的电位差,不同成因的电场,其地质条件可以通过电场的分布范围、强度或随时间变化的规律表示出来[18]。在实际的水文观测中,自然电位通常

是孔隙流体流动引起的流动电流源与由电势梯度引起的扩散电流源产生自然电场叠加的综合体现[19]。

该技术由于其监测的原理，所以多用于因为降雨而导致的滑坡的监测。由于是新兴的测量方法，各个步骤还不够完善。土壤的含水率、电极的安装都会在一定程度上影响测量精度。这就需要更多的案例经验积累，才能使测量更为精确，逐步变为主流的测量方式。

采用自然电位法，通过测量地质中流体流动产生的流动电位，对滑坡进行监测。依据动电机下的双电层模型，对于常见的绝大部分的地质，固体骨架与地下水进行接触时会导致失去质子，矿物的表面会呈现负电性，之后会吸附孔隙水溶液中的阳离子可以形成一种固定的吸附层，最后我们失去的质子存在于自由电解液中。当水力梯度存在时，水流将驱动扩散层中的过量正电荷在吸附层和自由电解质之间的转移，以形成流动电流源，这将产生自然电场。通过测量滑坡将要发生前地质中电场的细微变化，预估滑坡发生的可能性，从而实现对滑坡的监测。

3. 对滑坡监测技术的展望

3.1. 复合滑坡监测系统

InSAR 技术、三维激光扫描技术、遥感技术、GPS 技术、GIS 技术、近景摄影测量技术和自然电位法也将会随着研究者的努力而更加完善。精确性对于滑坡监测来说是至关重要的，往往单一的滑坡监测技术总是会有所缺陷，这种缺陷对于我们能准确地判断被测区的稳定性是不能忽视的，所以我们应该采取复合的监测方法去完成对某一区域的评估。

不同的监测方法都有其特定的优势与劣势，我们可以结合不同的监测方法，用某一技术的优势弥补另一个技术的劣势；或者取二者之长处，达到精益求精的效果[20]。例如：将 InSAR 技术和遥感技术结合起来，InSAR 技术具有持续性、精确性、广泛性等优点，而遥感技术的观测范围受限，且它的成本高，实际用起来费时费力，要是二者结合，则能得出精度更大，范围更广的地质灾害周围的地貌数据。

滑坡灾害发生的各个时期的地质特征都有所不同，可以考虑根据每个时期的发生时的特征来选取不同的监测方式，达到针对性监测[21]。例如滑坡刚刚发生时，变形较慢，这时我们需要采取一种可以长时间监测的技术；当滑坡进入快速变化阶段时，我们就需要采取另一种能够快速捕捉滑坡坡体移动的监测技术。用两个或者多个滑坡监测技术，更能帮助我们监测滑坡灾害的变化[21]。

或发展基于国产北斗卫星导航系统与 GPS 同步测量技术，随着我国卫星技术的不断发展，国产北斗卫星导航系统也在逐渐完善[22]。虽然 GPS 系统已在国内电力、通信、交通、金融、空间技术等领域广泛应用，但是我国卫星产业将会很快进入一个快速发展的阶段，会很快成为国际导航系统的重要组成部分。届时，滑坡等地质灾害的监测将会依靠北斗卫星导航系统，或者在 GPS 和北斗卫星导航系统的共同作用下完成。

3.2. 对滑坡监测数据进行深度分析

滑坡的监测系统通常可以受到多种主要因素的影响，例如雨水湿度、地质形态、气温高低等，所以我们对于滑坡的监测分析数据要进行设计一系列的处理，排除这些环境因素的干扰，获取信息更为精确有用的监控数据，所以说建立一套完善的数据技术处理方法体系发展尤为重要。这就需要学者在现有的滑坡监测技术上不断探索，依靠实验总结相应的数据处理系统，从而实现对数据的深入分析。

4. 结语

1) 本文对已有的滑坡灾害监测分析方法的应用和研究发展现状做了一个系统性的总结，陈述了包括

InSAR 技术、三维激光扫描信息技术、遥感技术、GPS 监测系统技术、基于 GIS 的监测网络技术、近景摄影测量技术和自然电位法, 简述了这些监测技术的特征, 阐述了不同技术方法的局限性、复合方法对滑坡监测的优越性、北斗卫星新技术的开发等。

2) 用单一的方法去监测滑坡灾害往往是不精确的, 随着研究的推入, 应该重视多种监测方法的混合使用, 对获得的滑坡数据进行深度分析并要了解不同监测方法的互补性。

参考文献

- [1] 殷跃平, 刘传正, 等. 2013 年 1 月 11 日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 6-15.
- [2] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [3] 云烨, 吕孝雷, 付希凯, 等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73-85.
- [4] 王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 等. D-INSAR 技术在大范围滑坡监测中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1337-1344.
- [5] Liu, G.X., Chen, Q., Luo, X.J., *et al.* (2012) Permanent Scatterer Radar Interference Theory and Method. Science Press, Beijing, 23-36.
- [6] 蒋霖, 蒋文凯, 苏成杰. 基于三维激光扫描技术的单体地质灾害监测方法与实践[J]. 大众科技, 2021, 23(7): 8-10+17.
- [7] 张大威, 刘智, 杨阳, 等. 直角反射式三维激光扫描技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 443-447.
- [8] 杜玮玮, 任富强, 常来山. 三维激光扫描技术在国内矿山领域的应用[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 154-160.
- [9] 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1699-1743.
- [10] 廖明生, 董杰, 李梦华, 等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 332-341.
- [11] 徐绍铨, 程温鸣, 黄学斌, 等. GPS 用于三峡库区滑坡监测的研究[J]. 水利学报, 2003(1): 114-118.
- [12] 胡友健, 梁新美, 许成功. 论 GPS 变形监测技术的现状与发展趋势[J]. 测绘科学, 2006(5): 155-157+10.
- [13] 曾旭平. GPS 滑坡高程监测的数据处理问题[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(3): 201-204.
- [14] 李清泉, 李德仁. 大数据 GIS [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 641-644+666.
- [15] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3978-3985.
- [16] 项鑫, 王艳利. 近景摄影测量在边坡变形监测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(6): 66-69.
- [17] 李彩林, 张剑清, 郭宝云. 利用近景摄影测量技术的滑坡监测新方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 6-8.
- [18] 刘惠国. 垮梁子滑坡钻孔地下水自然电位法研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(7): 19-22.
- [19] 胡开颜, 莫淳淳, 张益华, 等. 基于自然电位法的滑坡监测实验研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4582-4593.
- [20] 唐尧, 王立娟, 廖军, 等. 基于遥感回溯与 InSAR 技术的滑坡灾情及形变监测分析[J]. 国土资源信息化, 2020(6): 14-19.
- [21] 许威, 李鹏辉, 盛玉兴, 等. 滑坡监测方法综述与展望[J]. 安徽建筑, 2020, 27(8): 92-94+102.
- [22] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.