

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.01

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

张凯翔

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

摘要: 中国具有地质构造复杂,地貌类型多样,山区面积比例高等特点。近年来,在全球气候变化背景下,大量重大工程建设、不合理的资源开发和人类活动,导致各类地质灾害频发,严重影响了民生改善和小康社会建设进程,为地质灾害风险管控带来了挑战。开展地质灾害监测预警研究,能够为灾害风险管控、监测预警、防治减灾工作提供重要的科学依据。本文由中国地质灾害监测预警研究入手,着重分析讨论了我国地质灾害发育概况、监测预警既有成果和研究现状。然后从地质灾害监测预警的主要内容、主要技术方法和主要监测预警模型的发展和现状三个方面,讨论了“3S”技术在地质灾害监测预警中的研究现状和实际应用;最后详细讨论了目前基于“3S”技术的地质灾害监测预警平台在三峡库区和国家防灾减灾工作中的应用情况。本文最终结论认为,“3S”技术的地质灾害监测预警系统在各行业防灾减灾工作中的应用已日趋成熟,未来的地质灾害监测预警系统将以“3S”技术为基础,集观测、研究、风险评估、预报预警、预防治理为一体,有机结合各相关学科和大数据、人工智能、互联网+技术,通过对地质灾害的过程进行仿真模拟,分析诱发灾害的因素和发生强度,提高地质灾害预报的时间、地点、发生强度的准确性。

关键词: 地质灾害;监测预警;“3S”技术

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0001-11

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

ZHANG Kaixiang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: China is characterized by complex geological structure, diverse landform types, and a high proportion of mountainous areas. In recent years, under the background of global climate change, a large number of major engineering constructions, unreasonable resource development and human activities have led to frequent occurrences of various geological disasters, which have seriously affected the improvement of people's livelihood and the construction of a well-off society, and brought about geological disaster risk management and control. Carrying out geological disaster monitoring and early warning research can provide important scientific basis for disaster risk management and control, monitoring and early warning, disaster prevention and mitigation. This article starts with the research on monitoring and early warning of geological disasters in China, focusing on analyzing and discussing the general situation of the development of geological hazards in my country, the existing results of monitoring and early warning and the current research status. Then this article discusses the current research status and practical application of “3S” technology in the

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目: 滑坡易发性评价中的空间多尺度问题研究(41807297, 2019—2021); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目: Lidar 和无人机不良地质调查系统智能化技术研究之危岩落石智能调查与评估系统(2019K027, 2019—2021)

作者简介: 张凯翔(1989-), 男, 湖北武汉人, 测绘科学与技术专业, 博士, 工程师, 主要从事遥感工程地质勘察相关研究。E-mail: dr_setsuna@163.com

monitoring and early warning of geological disasters from the three aspects of the main content, main technical methods, and the development and current status of the main monitoring and early warning models of geological disasters; finally, the application of the current geological disaster monitoring and early warning platform based on “3S” technology in the Three Gorges Reservoir Area and the national disaster prevention and mitigation work is discussed in detail. The final conclusion of this article is that the application of geological disaster monitoring and early warning systems based on “3S” technology in disaster prevention and mitigation in various industries in China has become increasingly mature. The future geological disaster monitoring and early warning system will be based on “3S” technology, integrating observation, research, risk assessment, forecasting and early warning, prevention and management, and organically combining various related disciplines with big data, artificial intelligence, and internet + technology; by simulating the process of geological disasters, analyzing the factors and intensity of inducing disasters, improving the accuracy of the time, location and intensity of geological disaster forecasting.

Keywords: geological disaster; monitoring and early warning; “3S” technology

0 引言

地质灾害是在内、外动力或人为动力作用下,地球发生异常能量释放、物质运动、岩土体变形位移以及环境异常变化等,对人类生命财产、环境造成破坏和损失的地质现象或过程。由于地质灾害具有突发性、多发性、群发性、渐变性及影响持久的特点,其造成危害对人类生活及安全的影响较为突出^[1]。特别是进入 21 世纪以来,随着世界气候环境发生变化和人类活动能力及范围的扩张,地质灾害在自然动力和人为动力的双重作用下,呈现频发态势。

1 中国地质灾害监测预警概况

1.1 中国地质灾害发育概况

由于分类的角度与标准不同,地质灾害类别十分复杂。按照地质灾害形成原因,可分为自然地质灾害和人为地质灾害,前者包括地震、火山、崩塌、断层错动等,后者包括开采沉陷、建筑荷载沉降、工程滑坡等。按照地质环境或地质体变化速度,又可分为突发性和缓变性地质灾害,前者包含地震、崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝、地面沉降、地面塌陷^[2],即习惯上的狭义地质灾害,主要发生在西南山区、河谷两侧、高速公路和铁路两侧及黄土高原地区;后者包括水土流失、土地沙漠化等,又称环境地质灾害主要发生在中部、沿海城市和西北干旱地区以及辽宁、内蒙等地。

按照地质灾害发生区的地形地貌特征,可分为山地地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等;平原地质灾害,如地质沉降等。按危害程度和规模大小分为特大型、大型、中型、小型地质灾害险情和地质灾害灾情 4 个等

级。突发性地质灾害,如地震、崩塌、滑坡、泥石流等,由于具有周期短、威胁大、破坏强、成因复杂等特点,是当前地质灾害监测技术的主要研究热点对象^[3]。

中国山地丘陵区约占国土面积的 65%,地质条件复杂,构造活动频繁,崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害隐患多,防范难度大,是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一。根据 2020 年自然资源部中国地质调查局地质环境监测院发布的 2019 年全国地质灾害通报,数据显示 2019 年全国共发生地质灾害 6 181 起,其中滑坡 4 220 起、崩塌 1 238 起、泥石流 599 起、地面塌陷 121 起、地裂缝 1 起和地面沉降 2 起,共造成 211 人死亡、13 人失踪、75 人受伤,直接经济损失 2.77×10^9 元。与 2018 年相比,地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数和直接经济损失分别增加 108.4%、100.0% 和 88.4% (表 1)。

表 1 2019 年与上年地质灾害基本情况对比

Table 1 Comparison of the basic situation of geological disasters in 2019 and the previous year

	发生数量/起	死亡失踪/人	直接经济损失/亿元
本年	6 181	224	27.7
上年	2 966	112	14.7
较上年增减数量	3 215	112	13.0
较上年增减比例/%	108.4	100.0	88.4

与前 5 年平均值相比,地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数和直接经济损失均有所减少,分别减少 21.4%、28.2% 和 14.2% (表 2)。

从分布区域来看,2019 年发生的地质灾害主要分布在全国 29 个省(自治区、直辖市)。其中,湖南、江西和四川等省(自治区、直辖市)所发生的地质灾害数

害开展。

根据地质灾害监测的空间尺度,可分为小尺度单体性的灾害点实时监测和大尺度区域性的整体监测^[8]。小尺度单体性的灾害点实时监测以常规专业仪器监测为主,以人工简易监测为辅。根据灾害体的具体情况选择监测内容,一般分为变形监测、应力应变监测、地下水监测和诱发因素监测^[11],但各单体地质灾害所选用的手段不一定相同,要根据实际情况进行有效组合以便达到最佳效果。大尺度区域性的扫描监测主要是以遥感和 GNSS 监测为主,通常以月或年为单位进行监测,主要目的是掌握大范围的地质背景演

变过程,为地质灾害危险性区划和区域风险分析服务。

地质灾害监测技术的进步和发展具体表现在以下两个方面:①监测内容的不断扩充与完善,从外部变形到内部应力,从地下水到诱发因素,涵盖了地质灾害的各种致灾因子,从单个监测参数分析到多种监测参数优化组合,使监测的准确性得到较大提高。②监测手段的进步,现代电子技术的成果已广泛应用于新型监测仪表器具中,各种材料和结构的传感器设备,优化了监测仪器的结构性能,提高了监测精度和稳定性,从而扩展了整体监测内容。

不同地质灾害类型的监测内容和手段见表 3。

表 3 常见地质灾害及其监测内容

Table 3 Common geological hazards and their monitoring contents

灾害类型	灾害定义	灾害特点	监测内容和手段
滑坡	斜坡上的土体或岩体,在重力作用下,发生的整体或分散下滑的地质灾害现象	突发性强,危害性大,易受外界诱发因素的影响(地震、温度、降水及人类活动等)	位移、应力应变、地下水及地表水、地声、放射元素、环境因素、宏观现象
崩塌	岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象	发生速度快,作用短促而强烈,破坏大;个体规模差异大,运动复杂	外部变形及位移、内部变形及物理场变化、动力条件与环境因素
泥石流	山沟谷中,由暴雨、雪融水等水源激发的含有大量的泥沙、石块的特殊洪流	突发性强,危害性大,受降水影响明显,具有崩塌、滑坡和洪水破坏的双重作用	泥位、倾斜、流速、地声、降水量、孔隙水压力
地裂缝	在内外动力作用下,岩土层发生破裂,并在地表形成一定长度和宽度裂缝的地质现象	地球内应力作用的裂缝活动具有分段性、间歇性、继承性及条带状分布,裂缝两侧兼有差异形变、扭曲及旋转变形的特点	地下水动态、应力场、形变场、岩土体力学性
地面沉降	在自然和人为因素共同作用下,区域性地面标高降低的一种环境地质现象	形成缓慢、持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大	水准、地下水动态、基岩标、GNSS、InSAR、LiDAR 和分层标、钻孔伸长计等
采矿沉陷	采矿区顶部岩层在自重作用下发生弯曲、张裂、冒落,并在地表形成塌陷坑或塌陷洼地而造成的灾害	具有累进性和突发性,诱发次生灾害,塌陷盆地平面一般呈椭圆形或圆形	水准、全站仪、三角高程、GNSS、InSAR、LiDAR 等

监测内容按监测参数的类型为 4 大类,即变形、物理与化学场、地下水和诱发因素。

(1) 变形监测

变形监测是以测量位移形变信息为主的监测方法,包括:地表相对位移监测、地表绝对位移监测(大地测量、GNSS 测量等)、深部位移监测和宏观地质调查。该类技术具有应用范围广、监测精度高的特点,常作为常规监测技术用于地质灾害监测中:崩塌、滑坡、泥石流和地面沉降等地质灾害常进行地表位移监测以观测整体变形趋势;而具有明显深部滑移特征的崩塌滑坡通常还要进行深部位移监测。由于该类技术获得的是灾害体位移形变的直观变形信息,因此往往成为灾害预测预报的主要依据之一。

(2) 物理与化学场监测

监测灾害体物理场、化学场等场变化信息的监测技术方法包括:应力场监测、地声监测、电磁场监测、放射性元素(氦气、汞气)测量等地球化学方法以及地脉动测量。地质灾害体的物理、化学场发生变化,往往同

灾害体的变形破坏联系密切,相对于位移变形,具有超前性。

(3) 地下水监测

地下水监测是以监测地质灾害地下水活动、富含情况、水质特征为主的监测方法。主要监测内容包括地下水位(或地下水压力)监测、孔隙水压力监测和地下水水质监测等。大部分地质灾害的形成、发展均与灾害体内部或周围的地下水活动关系密切,同时在灾害生成的过程中,地下水的本身特征也会发生相应变化。

(4) 诱发因素监测

主要包括以监测地质灾害诱发因素为主的监测技术方法:气象监测、库水位监测、地震监测、人类工程活动监测等。降水、库水位变化是地质灾害,尤其是崩塌、滑坡和泥石流的重要诱发因素。降水量的大小、时空分布特征是评价区域性地质灾害主要判别指标之一;人类工程活动是现代地质灾害如地面沉降、采空区塌陷的主要诱发因素之一,因此地质灾害诱发因素监测也是地质灾害监测技术的重要组成部分。

2.2 地质灾害监测预警主要技术方法

地质灾害专业监测技术方法,包含了传统大地测量技术和高精度地质灾害空间监测技术。而地质灾害监测设备是基于地质灾害专业检测技术方法,为地质灾害研究防治和预测预报提供科学数据的主要设备,而监测设备的升级发展又推动了地质灾害研究工作的进展。

(1)从监测设备和灾害体的相对空间关系进行划分,监测设备可以分为接触类和非接触类。

接触类是指必须安装于灾害体现场或进行现场施测的监测仪器。如滑坡深部位移监测仪、物理和化学场监测仪等。该类仪器所获得的信息多为灾害体内部信息,信息量丰富。非接触类是现场安装简易标志或直接于灾害体外围施测的监测仪器。该类监测方法多以获得灾害地表的绝对变形信息为主,易采用组网监测。特别是突发性地质灾害前后,该方法能安全、快捷获取灾害体相关参数信息,为灾后救援、重建提供帮助。常用的非接触类监测方法有激光微位移监测、测量机器人、遥感雷达监测等。

(2)从监测组织方式进行划分,监测设备可以分为简易监测、仪表监测、控制网监测、自动遥测。

简易监测:采用简易的量测工具(如皮尺、钢尺、卡尺)对灾害体地表的裂缝等部位进行监测。仪表监测:采用机测或电测仪表(安装、埋设传感器)对滑坡进行地表及深部的位移、应力、地声、水位、水压、含水量等信息监测。控制网监测:在滑坡变形破坏区及周边稳定地带,布设大地测量或 GNSS 卫星定位测量控制点网,进行滑坡绝对位移三维监测。自动遥测:利用有线和无线传输技术,对仪表监测所得信息进行远距离遥控自动采集、传输,可实现全天候不间断监测。

传统地面大地测量设备,如全站仪、水准仪测量及近景摄影测量等,长期以来在地质灾害形变监测和预警中,发挥了重要的作用,监测对象具体,针对性强,更适合单体性地质灾害的监测。

但随着地质灾害的增多,人类对地质灾害的大范围监测预警及灾害监测更新的时效性需求增强,而现代空间对地观测技术为大范围的地质灾害的监测预警手段带来了革命。现代空间对地观测技术在大范围地质灾害监测预警方面具有独特优势,可提供大范围内灾害体连续实时的监测数据,极大提高了对地质灾害的监测与预警能力。充分利用各种对地观测技术,从信息化角度支持防灾减灾行动,已被列入政府重要工作内容^[12]。

合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR),是20世纪80年代发展起来的一种空间对地观测技术,进入21世纪以后得到广泛应用,尤其是在地质灾害研究领域成为不可或缺的技术之一。InSAR技术是利用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)卫星获取的同一地区两幅复数影像来进行干涉,由于两幅影像获取时刻卫星姿态不同造成的干涉相位差中包含了卫星到地面点的距离信息,因此可以用来测量地面点三维位置和变化信息^[13-14]。InSAR技术通过对一定周期内的重访SAR影像数据进行处理,可实现大范围地表变化信息的探测。InSAR技术的地表形变监测精度可达毫米级,通过大量SAR影像的时间序列相位形变信息的分析,能够有效实现不稳定块体的识别和探测。虽然地表植被、雨雾变化等会引起时间和空间失相干,对InSAR监测精度和结果造成影响,但是随着InSAR时序分析技术的发展^[15],如永久散射体技术(Persistent Scatterers InSAR, PS-InSAR)、相干点目标方法(Coherence Point Target InSAR, CPT-InSAR)、临时相干点(Temporal Coherence Point InSAR, TCP-InSAR)、短基线集方法(Small Baseline Subset, SBAS)和SqueeSAR技术等,上述限制因素影响已逐渐降低。目前已有多种高分辨率、不同波段、多重访问周期SAR卫星在轨运行,进一步提高了InSAR技术的监测能力和应用领域;同时基于大数据和云计算平台的地理信息网络服务系统正在被广泛研究,基于InSAR技术的地质灾害准实时探测和监测也成为可能。

机载激光雷达(Light Laser Detection and Ranging, LiDAR)系统作为一种新型的航空遥感技术,集合了激光测距、计算机技术、惯性导航系统和动态GNSS差分定位技术为一身,并通过测量激光脉冲的往返时间,结合高精度的定位姿态数据,获取地面三维激光点云坐标。LiDAR技术具有全天候观测、强抗干扰、短时间内获取海量、高精度三维点云的优势,使得快速、低成本、大面积地面测量成为可能,为地质灾害监测提供了一种新方法。利用LiDAR技术能够生成高精度的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),并基于高精度DEM开展地质灾害定性或定量分析。近年来LiDAR技术的发展迅速,国内学者在滑坡、危岩体、活动断裂等地质环境领域得到了广泛的应用^[16-17]。尤其在滑坡应用方面,利用LiDAR生成的DEM提取精细的地形地貌参数,借助LiDAR山体阴影图及坡度和粗糙度图,能够准确地识别滑坡滑动的范围,并准确圈

定出滑坡后缘、滑坡侧缘、滑舌等滑坡要素^[18]。同时结合多期 LiDAR 点云数据,还可对滑坡表面位移进行监测,获取滑坡的真实动态、总体变形趋势等特点。机载 LiDAR 技术在应用上受到植被及监测环境影响,如滑坡、危岩体表面有大量的植被覆盖时,LiDAR 无法测量到地形表面,虽然后期可经过各种滤波方法进行处理,但仍会对最终成果精度产生影响。其次,遇到云雨等较差天气时,LiDAR 扫描会受到限制,形变监测精度会受到影响。虽然 LiDAR 的应用范围较小,主要侧重于针对性较强的小范围地质灾害调查及监测,不适用于大范围地质灾害调查,且难以捕获灾害体前期的微小形变,然而 LiDAR 技术发展至今,已逐渐成为一种重要的地质灾害体信息获取方法,具有很大挖掘空间。

通过高分辨率遥感(High Resolution Remote Sensing)技术对地质灾害进行分析、识别、监测,进而建立地质灾害动态监测系统,是防灾减灾的一个重要途径。随着现代航天技术和信息技术的高速发展,遥感技术在空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率及辐射分辨率等方面都得到了迅猛发展,尤其是国内外商业高分辨率遥感卫星的相继发射,意味获取同一地区的高空间分辨率遥感影像将越来越容易、周期越来越短、精度越来越高。由于高分辨率卫星影像包含了丰富的地表物体几何结构及纹理信息等,能够直观、形象、全面地表现地质灾害特征,多时像遥感影像还能实现对地质灾害发生、发展等过程的多视角、多尺度动态观测,因此高分辨率遥感技术为地质灾害调查与监测研究提供了崭新的手段。遥感技术应用于地质灾害监测,最早起源于 20 世纪 70 年代。自 1972 年美国发射了第一颗陆地卫星后,遥感技术得到了迅速发展。美国、加拿大、德国等将遥感技术应用在地质灾害监测,通过研究遥感技术在泥石流、崩塌、滑坡等地质灾害监测与防治方面的特点,较为系统地总结了不同类型、不同规模地质灾害遥感影像的解译尺度和分类方法,为遥感地质灾害研究提供了权威的参考。中国学者利用高分辨率遥感技术研究地质灾害也取得了许多重要的成果。唐川等^[19]利用 QuickBird 遥感影像对昆明东川城区进行土地覆盖类型解译,然后泥石流灾害损失评估的途径和方法进行了探讨。赵琪等^[20]通过分析高分辨率遥感影像来获取建筑物的属性信息,并结合现场调查数据,建立震害矩阵预测震害,最后通过计算综合地震危险指数来评价该区域的综合抗震能力。王福涛等^[21]利用快速获取的震前和震后航空、航天等多源

遥感数据、地形地貌和地质构造数据,首先结合次生地质灾害在高分辨率多光谱影像上的形态、结构和纹理特征,对地震重灾区次生地质灾害的数量和空间分布进行了有效监测,然后应用 GIS 技术对这些次生地质灾害的空间分布规律,特别是同区域地质构造、烈度和地形地貌之间的关系进行了综合分析和评估。总之,高分遥感技术在地质灾害的调查、监测、预警及评估中都发挥着重要的作用,不仅提供了灾害有关的数据信息,还可以辅助开展地质灾害的治理,是地质灾害防灾减灾不可或缺的重要手段。

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)具有全天候、高精度和自动化获取地表三维坐标和速度的能力,且定位速度快、不受站点间通视条件限制,定位误差不随时间积累的特点,在灾害监测领域得到广泛应用^[22-24]。GNSS 用于灾害监测的作业方式可分为周期性静态测量和连续性实时动态测量。当灾害体形变速率非常缓慢或者在一定的时间和空间周期内认为是稳定时,即可采用周期性静态 GNSS 测量,监测周期根据灾害体的形变速率而定。GNSS 连续性实时动态测量则是将 GNSS 接收机直接安装在灾害体上,进行连续观测,具有较高的时间分辨率、可以获得实时动态形变结果。目前地质灾害 GNSS 监测存在硬件成本高、实时性差、实时监测精度低三大技术瓶颈。随着中国北斗系统和欧盟伽利略系统逐步建设和完善,天空可用卫星数超 80 颗,利用覆盖面较广的移动互联网和 GNSS 融合监测技术,引入云平台加传感器的技术理念,研究低成本小型化的高精度滑坡监测传感器技术,实现基于北斗云平台的实时在线高精度监测。

综上所述,将 GNSS、InSAR、无人机以及其他传感器监测技术融合,进行多尺度点面综合处理,可实现灾害体时间域和空间域的全覆盖,融合处理中需要对多传感器信息可靠性进行校验,构建多传感器下统一的时空基准,最终实现多尺度全天候的高精度监测信息提取。目前国内外已有的成功案例包括:Roering 等利用差分干涉测量(D-InSAR)、机载 LiDAR 和历史航空影像对加利福尼亚北部鳗鱼河流域滑动缓慢的大型滑坡进行了分析研究,确定并获得了 2007 年 2 月到 2008 年 2 月期间 5 个大型滑坡平均下滑速率^[25]。Chen 等利用 LiDAR 数据对由地震引发的滑坡而造成地形变化进行监测,结合航空摄影相片和地形图提取高分辨率的 DEM,计算了滑坡体积^[26]。欧洲空间局资助的 SLAM(Service for Landslide Monitoring)项目利用

D-InSAR, PS-InSAR, 干涉点目标分析 (IPTA) 方法获取了毫米级精度的地表形变规律, 并结合传统光学影像分析和地质分析方法开展滑坡敏感性、危险性制图^[27-28]。

2.3 地质灾害监测预警模型

由于地质灾害的复杂性, 预报预测一直是世界性的研究难题。国内外许多学者为了研究地质灾害付出了大量辛勤劳动, 提出了各种各样的方法, 这些探索性工作所走过的历程, 整体可分为3个阶段: 20世纪60至70年代, 主要以经验判断为主, 根据地质灾害的变形破坏现象, 利用简单测量手段获得信息, 建立经验公式, 对地质灾害进行趋势分析; 80至90年代, 随着监测技术的发展, 开始利用测量仪器进行精确监测, 而且由于现代数理力学理论与模型的大量引入, 预报预测方法和模型研究取得了显著进展; 90年代以后, 多种监测预警方法开始综合研究与应用, 强调实时监测和实时预报, 地质灾害监测预警的技术手段得到飞速发展。

日本学者斋藤迪孝是滑坡预报的先驱代表之一, 他在1965年提出的预报滑坡的经验公式^[29]是滑坡预报研究工作的起点, 开启了滑坡预报经验式预报阶段。他通过大量的试验得出了均质土坡蠕变破坏三阶段理论, 建立了加速蠕变的微分方程, 该方法曾对日本的高场山滑坡进行了成功的预报。

随着概率论、数理统计、灰色系统理论、模糊数学等数学理论的诞生和广泛应用, 许多学者大量引入各种数学方法和模型, 建立了多种预报模型, 因此地质灾害统计分析预报迅速发展为划分地质灾害危险性区域问题的研究, 并逐渐形成了利用数学统计分析模型、水文模式与地质力学耦合模式相结合的方法来对地质灾害发生的概率进行预测。与此同时随着计算机技术发展而兴起的元胞自动机模型、结合全球定位系统的地理空间信息技术都为灾害监测预警发展提供有效的技术支撑。

中国在此方面的研究起步较晚, 并且研究的主要工作是以山洪、滑坡、泥石流等地质灾害信息的研究为主。针对中国不同区域、不同地质情况以及不同气候条件导致灾害发生的规律性等问题, 相关学者和专家展开了相当多的研究工作, 不同学科的理论开始被不断引入到地质灾害的研究中, 以通过掌握灾害发生机理等主要问题来实现灾害预报工作。

20世纪90年代以后, 专家学者们开始意识到根据位移-时间曲线的拟合外推只能是对灾害近期行为趋势作出有限的外推, 在众多内外因素共同作用下, 很难进行准确可靠的长期预报。因此学者们开始重视从

物理现象和物理模型分析入手进行预报的探索, 同时进入21世纪后随着监测手段的多样化, 地质灾害模型研究逐渐融合了多源数据, 通过研究各种影响地质灾害的因素权重, 并计算具体的数学概率。专家学者们通过大量的信息统计分析, 认为山洪、滑坡泥、石流等地质灾害的暴发是由于该区域本身的地质结构、外界降雨以及人类对环境影响等因素共同作用。而在地质灾害发生前, 区域内的一些地理和气象信息都会发生明显变化, 这些因素对地质灾害的发生都有特殊的权重关系, 只有把这些因素的权重比例系统化, 明确各因素在灾害中的具体影响, 才能在灾害预测和分级预警中取得较高的精确度。

例如, 吴益平等^[30]应用物元理论, 提出了滑坡灾害风险预测物元综合评判的基本流程, 建立了滑坡灾害风险综合评判的物元模型, 并以危险性预测为例讨论了物元集合的建立、等级关联度的确定等关键技术问题。运用物元模型与GIS技术相结合, 对三峡水库蓄水条件下巴东新县城的滑坡灾害进行了危险性、易损性、风险性综合预测研究, 证明了物元模型在区域滑坡灾害风险预测中的应用可行性。

牛瑞卿、彭令等^[31-32]对于区域滑坡以三峡库区秭归至巴东段为研究区, 利用粗糙集理论对初始评价因子进行属性约简, 去掉冗余或干扰信息, 得到核心评价因子, 并以此作为支持向量机的输入特征集, 构建支持向量机模型, 实现滑坡区域易发性评价; 对于单体滑坡利用核主成分分析法对滑坡位移影响因子进行特征提取, 以获得的主成分作为支持向量机的特征向量, 建立支持向量机模型, 其中模型参数通过粒子群算法进行选择优化, 构建出核主成分分析和粒子群优化支持向量机协同模型, 对滑坡相对位移进行预测。

目前, 地质灾害已进入了综合预报和实时预报的阶段, 并且逐渐迈向实用化和系统化。计算机和网络技术为地质灾害海量数据的获取、存储、管理和分析及预测预报提供了高效的技术平台和方法^[33]。借用计算机和网络技术开发专业性的预测预报平台, 预测预报模型通过编程实现, 使得预测预报实现信息化、系统化应用。

2.4 基于“3S”技术的地质灾害监测预警平台

近年来, 各种不同的地质灾害监测预警系统已在全国许多地区投入应用, 这些系统能够对降雨量、岩土表面位移、岩土含水率、空气温湿度等影响地质灾害发生的多种因素进行监控, 并对地质灾害信息进行管理, 从而为相关部门提供防灾减灾决策。例如, 清华大学、

西安交通大学、成都山地所、上海微电所等已经初步建立了地质灾害系统研究平台并且取得了很大的进展^[34]。沈阳东软、陕西颐信等企业也投入无线智能传感器的研究中^[35],极大推动了地质灾害监测预警系统的发展。

随着全国范围地质灾害调查、监测、防治等工作的持续开展,各种调查图件、监测数据、预警信息、报告图表等资料数据大量积累。同时由于无人机、智能装备等新技术的引入和发展,地质灾害监测成果资料的数据格式逐渐复杂多样,数据体量也呈现爆发式增长。为了有效管理与利用这些数据资料,地质灾害研究者开始将专家系统理论、“3S”技术等方法应用于地质灾害监测预警中,在实践中开发研究地质灾害监测预警系统理论。

传统方法主要是通过现场勘察获取孕灾信息,如水文地质条件、地形地貌、植被覆盖等,往往会耗费巨大的人力、物力和财力。而“3S”技术的发展为快速、廉价、动态地进行孕灾背景信息的监测提供了可能^[36]。

在“3S”地质灾害监测信息系统中,RS 动态地提供地质灾害空间数据源和更新数据,为 GIS 提供空间数据和反映目标属性的专题数据;GIS 则是遥感中数据处理的辅助信息,用于信息的自动提取。GNSS 为 GIS 获取地质灾害目标要素的空间坐标数据;而 GIS 则是综合处理这些地质灾害数据的理想平台,并且反过来提升 RS 与 GNSS 获取信息的能力,它们是一个有机的整体。“3S”技术相结合,能充分发挥 GNSS 技术数据采集速度快精度高、RS 技术覆盖范围广和 GIS 技术优越的图形、属性数据处理的特点,有效的实现地质灾害的动态监测^[37]。

为了及时有效防治三峡库区地质灾害,保护三峡工程和库区人民生命财产安全,三峡库区地质灾害防治工作指挥部于 2005 年 7 月编制完成“三峡库区三期地质灾害防治监测预警工程崩塌滑坡专业监测系统和预警指挥系统专项设计”。自此之后十多年间,陆续设计完成“三峡库区地质灾害遥感监测系统”、“空天地内多元立体协同观测与探测系统”、“斜坡地质灾害信息提取与分析系统”、“滑坡灾害多源信息提取与分析系统”、“三峡库区地质灾害防治信息与决策支持系统”等基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统^[38]。这些系统采用“3S”集成技术,采用多源遥感数据和非遥感数据融合,以各种不同时相的遥感影像及解释数据库、大比例尺地理数据库、灾害地质数据库、土地利用(及变更)数据库、植被及其地面覆盖物数据库、人

类工程活动数据库为核心,长期服务于三峡库区地质灾害隐患分析、防控监测工作中。除此之外,随着最后一颗北斗卫星成功发射,北斗卫星系统完成全球组网,也进一步提升了基于北斗卫星系统的三峡库区地质灾害监测预警系统的预警监测能力^[39]。

近些年来,为了更加客观科学地开展重大地质灾害监测分析和损失评估工作,民政部国家减灾中心针对高分辨率、激光雷达、倾斜摄影等新型遥感载荷和观测模式获取的多种遥感数据,开展了关键技术攻关和业务流程研究,形成了典型地质灾害遥感调查评估系统;同时他们联合高校共同建立和完善了“天-地-现场”一体化监测评估指标体系,将遥感技术与现场调查核查、基于地理信息科学的二三维时空动态数据库与分析技术、基于导航定位的位置服务与智能手持终端系统等紧密结合,逐渐形成与互联网+、大数据思维有机融合,并面向决策服务和公共服务的综合减灾空间平台,不断提升了时空灾害信息精准服务水平。

3 总结

世界各国对地质灾害所涉及的知识研究方向不尽相同,在系统设计实现是所采用的原理、模型、预报方法等也都不相同,这就使得各国在预警预报的精度上存在着差异。地质灾害监测是一项复杂系统工程,就目前而言,虽然地质灾害预警预报工作取得了相关进展,但是仍存在许多的问题,要真正做到对地质灾害的及时、准确预报还有相当长的路要走。

随着航空航天技术、计算机技术及网络通信技术的发展,多元化的观测手段、高性能的观测系统、先进的数据处理理论、迅捷的信息通信、海量的数据分析使得地质灾害监测预警技术发展将产生新的趋势:

(1)多技术、多学科、多监测手段的集成化趋势逐渐明显。地质灾害的发生不仅与地球物理、化学场有关,而且还有水文气象、地貌等自然环境变化有关,决定了地质灾害监测将综合多种时空技术和预测预报技术为一体进行综合监测,如集成地球物理、对地观测技术、雷达成像、计算机技术、通信技术、自动化技术等为一体,实现各技术间优势互补、信息互通、优化集成。

(2)多维度、多尺度地质监测成为趋势。目前地质灾害监测已呈现出明显的多维度化和多尺度化,首先在时间上,既有地质灾害的瞬间变化监测,又有地质灾害的长时间序列趋势变化监测;在空间上,既有全球化地质灾害监测系统,又有不同区域甚至微观的局部监测系统;维度上,既有基于单一地球物理属性的灾害

监测,又有基于多种指标体系的灾害监测。从而更加有利于掌握地质灾害的大区域地质环境演变过程及灾害发生及变化规律。

(3)建立多元预警模型系统和地质灾害分级预警模型。通过对大范围长时间广泛的灾害数据查询和统计,得出区域性地质灾害发生的相关影响因子,并建立灾害等级和可能性与这些影响因子的预警模型。通过对监测区域内的降雨量信息、重点位置的岩土表面位移、岩土含水率、空气温湿度以及当地的气候、天气情况等重要数据的分析,建立精确的灾害分级预警模型来实现灾害预警。

(4)地质灾害监测系统将继续以“3S”技术为核心,朝向数字化、自动化、可视化和网络化方向发展。智能传感器设备和以北斗卫星系统为基础的GNSS技术,实现了地质灾害特征信息采集的数字化、自动化;多源遥感观测技术则使得大范围高精度、高频率地质灾害监测变为可能;而地理空间信息技术可以为地质灾害监测提供数据管理、分析和可视化等功能。最终通过互联网技术进行云存储、云计算等,最终实现地质灾害的多渠道信息共享与发布。地质灾害的相关预警信息将通过手机客户端、政府网站、手机短信等途径发布,有效提高地质灾害预测预防水平和防灾减灾工作效率。

现代空间对地观测技术的应用极大拓展了对地质灾害监测的能力。随着以“3S”技术为代表的监测预警新理论、新技术和新方法的不断研发与应用,人们对地质灾害监测的深度和广度将会得到进一步提升,并逐步实现地质灾害的预测预警提供重要保证。未来的物联网、大数据、互联网+、云计算、人工智能等新技术,无人机多源遥感设备的小型化商用化,智能地质装备的升级发展,将对地质灾害监测预警技术带来革命性改变。地质灾害监测预警系统将具备人工智能,存在于数字网络空间中,各个相关学科可以与计算机科学和人工智能技术进行有机结合,对地质灾害的过程进行仿真模拟,分析诱发灾害的因素和发生强度,提高地质灾害预报的时间、地点、发生强度准确性,从而建立集观测、研究、风险评估、预报预警、预防治理一体化的地质灾害监测预警系统。

致谢:衷心感谢武汉地质调查中心提供的数据支持和协助,感谢中国地质大学地球物理与空间信息学院牛瑞卿教授和武汉地质调查中心叶润青博士在地质灾害调查和监测预警理论方法上的指导!

参考文献:

- [1] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 1-8. [YIN Y P. Initial study on the hazard-relief strategy of geological hazard in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 1-8. (in Chinese)]
- [2] 门玉明. 地质灾害治理工程设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011. [MEN Y M. Engineering design of geological disaster control [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)]
- [3] 韩子夜, 薛星桥. 地质灾害监测技术现状与发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 138-141. [HAN Z Y, XUE X Q. Status and development trend of monitoring technology for geological hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 138-141. (in Chinese)]
- [4] TOMÁS R, LI Z H. Earth observations for geohazards: present and future challenges [J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 194.
- [5] 林宗坚, 李德仁, 胥燕雯. 对地观测技术最新进展评述[J]. 测绘科学, 2011, 36(4): 5-8. [LIN Z J, LI D R, XU Y Y. General review on the new progress of earth observations [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4): 5-8. (in Chinese)]
- [6] 焦方晖. 崂山地质灾害监测预警系统研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. [JIAO F H. The research of monitoring and early warning system in Laoshan geological hazards[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)]
- [7] 刘传正. 地质灾害预警工程体系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 1-4. [LIU C Z. Study on the forecasting-warning engineering system for the geo-hazards mitigation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 1-4. (in Chinese)]
- [8] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11-23. [HAN J L, WU S R, WANG H B. Preliminary study on geological hazard chains[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 11-23. (in Chinese)]
- [9] 王念秦, 王永锋, 罗东海, 等. 中国滑坡预测预报研究综述[J]. 地质论评, 2008, 54(3): 355-361. [WANG N Q, WANG Y F, LUO D H, et al. Review of landslide prediction and forecast research in China[J]. Geological Review, 2008, 54(3): 355-361. (in Chinese)]

- [10] 奚晓青, 杨新宝. 地质灾害国内外研究现状浅析[J]. 中国水运:学术版, 2007, 7(9):100-102. [XI X Q, YANG X B. Analysis on the status quo of research on geological disasters at home and abroad[J]. China Water Transport, 2007, 7(9):100-102. (in Chinese)]
- [11] 黄其芳. 我国地质灾害监测预报现状综述[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(5):181-183 [HUANG Q F. A summary of the current status of geological disaster monitoring and forecasting in China[J]. West-China Exploration Engineering, 2004, 16(5):181-183(in Chinese)]
- [12] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2):142. [LIU C Z. The theory and practice of major geological disaster prevention[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2):142. (in Chinese)]
- [13] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1300-1307. [ZHANG Q, HUANG G W, YANG C S. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1300-1307. (in Chinese)]
- [14] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1989, 94(B7):9183-9191.
- [15] 何平. 时序 InSAR 的误差分析及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. [HE P. Error analysis and surface deformation application of time series InSAR [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)]
- [16] 徐景中, 万幼川, 张圣望. 基于机载激光雷达点云的断裂线自动提取方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(5):1214-1216. [XU J Z, WAN Y C, ZHANG S W. Automatic breakline extraction from LIDAR point clouds[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(5):1214-1216. (in Chinese)]
- [17] 马洪超, 姚春静, 张生德. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨[J]. 遥感学报, 2008, 12(6):925-932. [MA H C, YAO C J, ZHANG S D. Some technical issues of airborne LIDAR system applied to Wenchuan earthquake relief works[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6):925-932. (in Chinese)]
- [18] 刘圣伟, 郭大海, 陈伟涛, 等. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究[J]. 中国地质, 2012, 39(2):507-517. [LIU S W, GUO D H, CHEN W T, et al. The application of airborne lidar technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir Area[J]. Geology in China, 2012, 39(2):507-517. (in Chinese)]
- [19] 唐川, 张军, 万石云, 等. 基于高分辨率遥感影像的城市泥石流灾害损失评估[J]. 地理科学, 2006, 26(3):358-363. [TANG C, ZHANG J, WAN S Y, et al. Loss evaluation of urban debris flow hazard using high spatial resolution satellite imagery[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(3):358-363. (in Chinese)]
- [20] 赵琪, 翟永梅, 李铁铮. 高分辨率遥感图像在城市快速震害预测中的应用研究[J]. 灾害学, 2012, 27(2):72-76. [ZHAO Q, ZHAI Y M, LI T Z. Study on application of high resolution remote sensing images in rapid prediction of earthquake disaster in urban area[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(2):72-76. (in Chinese)]
- [21] 王福涛, 王世新, 周艺, 等. 高分辨率多光谱的芦山地震次生地质灾害遥感监测与评估[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1):181-185. [WANG F T, WANG S X, ZHOU Y, et al. High resolution remote sensing monitoring and assessment of secondary geological disasters triggered by the Lushan earthquake[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1):181-185. (in Chinese)]
- [22] 张勤, 黄观文, 王利, 等. GPS 在西安市地面沉降与地裂缝监测中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6):828-833. [ZHANG Q, HUANG G W, WANG L, et al. GPS monitoring and surveying on land subsidence and land fissure in Xi'an City[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6):828-833. (in Chinese)]
- [23] 吴北平, 李征航, 徐绍铨. GPS 定位技术在三峡库区崩滑地质灾害监测中的试验分析[J]. 地球科学, 2001, 26(6):648-652. [WU B P, LI Z H, XU S Q. Application of GPS satellite positioning technique to monitoring of landslides in Three Gorges dam[J]. Earth Science, 2001, 26(6):648-652. (in Chinese)]
- [24] 王利. 地质灾害高精度 GPS 监测关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. [WANG L. A study

- on key technology of high precision GPS monitoring for geological hazard [D]. Xi'an: Changan University, 2014. (in Chinese)]
- [25] ROERING JJ, STIMELY LL, MACKEY BH, et al. Using Dinsar, Airborne lidar, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19): 206 – 221.
- [26] CHEN R F, CHANG K J, ANGELIER J, et al. Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: The 1999 Tsaoiling landslide induced by the Chi-Chi earthquake [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3/4): 160 – 172.
- [27] MEISINA C, ZUCCA F, FOSSATI D, et al. Ground deformation monitoring by using the permanent scatterers technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy) [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3/4): 240 – 259.
- [28] FARINA P, COLOMBO D, FUMAGALLI A, et al. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the esa-slam project [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3): 200 – 217.
- [29] MASAHIRO, SAITO. Research on Forecasting the Time of Occurrence of Slope Failure [J]. Quarterly Report of Rtri, 1969, 17: 29 – 38.
- [30] 吴益平, 唐辉明, 殷坤龙. 物元模型在滑坡灾害风险预测中的应用 [J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 96 – 100. [WU Y P, TANG H M, YIN K L. Application of matter-element model in landslide hazard risk assessment [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4): 96 – 100. (in Chinese)]
- [31] 彭令, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 基于核主成分分析和粒子群优化支持向量机的滑坡位移预测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(2): 148 – 152 [PENG L, NIU R Q, ZHAO Y N, et al. Prediction of landslide displacement based on KPCA and PSO-SVR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 148 – 152 (in Chinese)]
- [32] 牛瑞卿, 彭令, 叶润青, 等. 基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 42(2): 430 – 439. [NIU R Q, PENG L, YE R Q, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 430 – 439. (in Chinese)]
- [33] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. 地质灾害风险分析与 GIS 技术应用研究 [J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(4): 10 – 13. [ZHU L F, YIN K L, ZHANG L, et al. Risk analysis of geo-hazard and application of the GIS technique [J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(4): 10 – 13. (in Chinese)]
- [34] 朱琨. 基于 GPRS 的雨量监测系统设计与实现 [D]. 上海: 复旦大学, 2008. [ZHU K. Design and implementation of rainfall monitoring system based on GPRS [D]. Shanghai: Fudan University, 2008. (in Chinese)]
- [35] 范鹏冉. 地质灾害应急监测预警系统的设计 [D]. 西安: 西安工程大学, 2015. [FAN P R. The design of geological disaster emergency monitoring and warning system [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2015. (in Chinese)]
- [36] 张继贤. 3S 支持下的滑坡地质灾害监测、评估与建模 [J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 1 – 5. [ZHANG J X. 3S – aided landslide hazard monitoring and modeling [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(2): 1 – 5. (in Chinese)]
- [37] 胡新丽, 唐辉明. GIS 支持的斜坡地质灾害空间预测系统框架设计 [J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 99 – 103. [HU X L, TANG H M. Frame design of space prediction and evaluation system for the slope geological hazard based on GIS [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 99 – 103. (in Chinese)]
- [38] 季伟峰. 三峡库区三期地质灾害防治监测预警的主要方法 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2008, 35(7): 14 – 17. [JI W F. Main methods of monitoring and early-warning for control of the third period of geological hazard in Three Gorges reservoir region [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(7): 14 – 17. (in Chinese)]
- [39] 甘捷. 基于北斗的三峡库区地质灾害监测预警系统研究 [C] // 第四届中国卫星导航学术年会论文集-S1 北斗/GNSS 导航应用, 2013. [GAN J. The study on monitoring and warning system for geological disaster in the Three Gorges Reservoir Area based on COMPASS [C] // Proceedings of the 4th China Satellite Navigation Conference-S1. GNSS Navigation Application, 2013. (in Chinese)]