引文格式：魏以宽,周军元,刘索格,等. 空天地洞一体化监测基准构建研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 110-114. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.024

空天地洞一体化监测基准构建研究

——以黄土坡临江I号崩滑体为例

魏以宽[1]，周军元[1*]，刘索格[2]，修延霞[1]，邹崇尧[1]
（1. 湖北省测绘工程院，湖北 武汉 430074；2. 中国地质大学（武汉），湖北 武汉 430074）

摘　要：为实现统一监测基准的滑坡监测和高精度地表地洞形变联合分析，基于湖北省北斗地基增强系统和2000国家大地坐标系（CGCS2000）开展了空天地洞一体化滑坡监测方法体系研究。将GNSS、地基InSAR、无人机LiDAR点云、精密工程测量监测数据关键点配准至CGCS2000坐标系，在巴东县黄土坡特大型滑坡体临江I号的应用验证了前缘GNSS监测点位的形变明显大于后缘点位，探明了地表金堂宾馆与地下监测隧洞的形变映射关系，为地质灾害治理的技术路线与实现形式提供了参考。

关键词：滑坡监测；多源数据融合；监测基准；北斗地基增强
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0110-05

Research on the Construction of Integrated Space-Air-Surface-Underground Monitoring Benchmark: A Case Study of Huangtupo Linjiang No.I Landslide Body

WEI Yikuan[1], ZHOU Junyuan[1], LIU Suoge[2], XIU Yanxia[1], ZOU Chongyao[1]
(1. Hubei Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430074, China;
2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: To achieve the joint analysis of unified monitoring benchmark landslide monitoring and high-precision surface and underground deformation, based on the Hubei Province Beidou ground-based augmentation system and China geodetic coordinate system 2000 (CGCS2000), we studied an integrated space-air-surface-underground landslide monitoring method system. We registered the key monitoring points from GNSS, ground-based InSAR, UAV LiDAR point cloud and precision engineering surveying to the CGCS2000 coordinate system. The results show that the deformation of front edge GNSS monitoring points of the Linjiang No.I large-scale landslide in Badong County is significantly greater than that of the rear edge points, and the deformation mapping relationship between the surface Jintang Hotel and the underground monitoring tunnel has been clarified, providing references for the technical routes and implementation forms of geological disasters management.

Key words: landslide monitoring, multi-source data fusion, monitoring benchmark, Beidou ground-based augmentation system

高精度区域坐标基准框架是国家经济建设和大型工程建设的基础。融合北斗数据可提升区域基准框架的可靠性，进一步发挥了全球卫星导航系统（GNSS）在区域基准框架和数据服务动态监测和维护中的作用[1]。自2000国家大地坐标系（CGCS2000）发布以来，各省市级测绘基准主管部门逐步利用集GNSS、通信、气象数据采集等技术于一体的北斗地基增强系统（GBAS）开展区域CGCS2000坐标基准建设和维持工作[2]。GBAS是GNSS实现高精度导航与位置服务的支撑平台，也是建立坐标框架、监测地壳运动科学和工程应用的重要基础[3-5]。将GBAS与CGCS2000坐标基准相结合开展地质灾害监测研究可拓展我国北斗系统的应用空间，验证北斗系统在高精度导航定位领域的可用性，具有重要的现实意义[6]。

1　一体化监测基准构建研究现状

地质灾害的早期识别是实现监测、评估、防治等工作的重要前提。近年来基于光学遥感和InSAR的地质灾害隐患普查、基于机载LiDAR和无人机航拍的地质灾害隐患详查、基于地面调查和监测的地质灾害隐患核查、基于天-空-地多源遥感数据的滑坡隐患识别取得了较好的成效[7-8]。目前面向滑坡监测的一体化监测基准建设存在以下问题：①监测项目大多依赖单一技术，如以光学遥感、InSAR为主的天基监测手段擅

项目来源：湖北省自然资源厅科研计划资助项目（ZRZY2024KJ03）。
第一作者简介：魏以宽（1989—），工程师，主要从事北斗地基增强系统建设与运维工作，E-mail：wei1kuanx@gmail.com。
通信作者：周军元（1977—），工程硕士，高级工程师，主要从事航测与GIS项目生产管理工作，E-mail：171837328@qq.com。

长广域的“面”监测，无法实现细部精准监测且回访周期长；以机载LiDAR为主的空中监测手段易受观测条件影响且作业成本高昂；地表GNSS监测则聚焦于“点”，多用于已探明的滑坡体；深部滑坡隧洞测量多采用精密工程测量，自动化程度低且数据采集周期较长。②多种监测技术缺少统一的坐标基准框架，多源数据融合不足，各类监测手段的空间分辨率与时间分辨率无法统一；同时由于各板块运动速率不一致，导致局部区域参考框架难以有效维持[9-10]，区域监测基准点存在相对运动，可能将误差传递至监测区，造成滑坡监测的误判。

滑坡变形区采用局部固定基准可以较好地反映测区内各点间的相对变化，但无法获得测区整体的变形趋势[11-13]。基于CGCS2000坐标系建立监测基准，并将地表和地下的多源异构监测数据统一至该监测基准下进行分析，不仅可以实现洞内外基准一体化监测，而且能通过CGCS2000坐标基准消除由不稳定区域位移引起的误差，更加准确地评估滑坡体的变化情况。

2　研究方法

针对现有滑坡监测方法存在的地表—地下多源监测数据基准不统一、各类数据联合分析不充分等问题，本文提出了一种地表–地下多源数据滑坡监测坐标基准统一方法。其中GNSS监测主要通过地表点状布设的观测墩进行长期连续的自动化观测，并可利用GBAS计算某一时间的绝对位置坐标成果，形成连续的时间序列，实时定位精度为厘米级，空间分辨率为站点的天线相位中心，时间分辨率可灵活设置（1 s至数年）；机载LiDAR利用无人机对监测区地表发射激光脉冲、接收反射信号，获得地面目标的三维空间坐标信息，根据比例尺、工作场景的不同，成像精度为数厘米至米，空间分辨率点云密度约为700个/m^2，根据作业周期时间分辨率为数天至数年；地基InSAR利用合成孔径雷达干涉测量技术进行长期连续的自动化观测，监测精度达到毫米级，单像元空间分辨率由观测设备至目标的视线向距离确定（距离1 000 m时，单像元尺寸约为0.5 m×5 m），主要为“面”监测，时间分辨率根据设备设置，一般为数小时；精密工程测量通过布设控制网、测量标志进行距离测量、高程测量，综合获得点位坐标，作业需要大量人工，较难实现完全自动化测量，平差后精度可达毫米级，时间分辨率一般为数月至数年不等。

基于GBAS的GNSS监测具有可直接获得绝对坐标、精度可靠、连续观测、自动化程度高等优势，更适合一体化监测基准。以GNSS天线相位中心和强制对中观测墩为“天”、“洞”观测的关键点，实现“点—点”的对应关系，直接获取CGCS2000坐标；以像控标志点、InSAR角反射器为“空”、“地”观测的关键点，通过关键点的原有坐标与CGCS2000坐标计算七参数转换关系，统一至CGCS2000坐标基准，实现“点—面（点云）”的转换，最终构建滑坡位移场监测一体化坐标基准。各类监测数据关键点的采集方式见表1。

表1　多源监测手段关键点采集方式

	监测手段	关键点	关键点坐标采集方式
天	GNSS监测	GNSS天线相位中心	北斗地基增强静态数据处理
空	机载LiDAR	像控标志点	北斗地基增强网络RTK
地	地基InSAR	地基InSAR角反射器	北斗地基增强网络RTK
洞	精密工程测量	强制对中墩	北斗地基增强静态数据处理

由于GNSS监测和精密工程测量的关键点采集可直接获得CGCS2000坐标，则认为静态处理精度即为该工作的精度指标，洞内精密工程测量的精度通过导线精度和水准精度计算。机载LiDAR和地基InSAR数据通过七参数转换后，以一部分未参与计算的控制点作为外部检核点，通过比较这些点转换后坐标与其已知坐标进行检核。

3　实验内容

黄土坡特大型滑坡体（以下简称黄土坡）位于长江三峡中段西陵峡与神农溪口之间的过渡地带，距巴东县老城区2 km，是一处由古滑坡体和崩滑堆积体组成的特大型滑坡。其前缘涉水的滑坡体被称为临江I号崩滑体（以下简称临江I号）。中国地质大学（武汉）于2009年开始建设巴东野外大型综合实验场，采用实验隧洞群的形式全面展示临江I号的地质结构和空间形态。倪卫达等[14]采用饱和—非饱和渗流有限元算法获取其在水库运营期间地下水渗流场的动态变化过程，进而研究崩滑体的变形和稳定性演化规律。结果表明，临江I号整体稳定性较好，但浅层滑坡在降雨和库水位下降过程中存在局部失稳的可能。本文以临江I号为研究对象，开展了构建滑坡位移场监测一体化坐标基准验证、实地数据采集和测试。临江I号地理位置见图1。从项目实测数据和中国地质大学湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站（以下简称巴东地灾研究站）收集的历史数据中获取坐标基准、时空分辨率、起止时间均不同的空天地洞多源异构监测数据集，选取同步观测时段进行比对和分析。数据

集内容见表2。

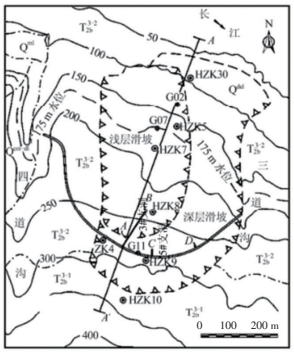


图1　临江I号地理位置图

3.1　GNSS形变监测

本文采集了巴东地灾研究站提供的布设于临江I号表面的8台GNSS监测设备2019—2024年的观测数据（P1~P7、P9），并联合周边的GBAS站点（图2）进行基线处理和三维约束平差。

3.2　无人机LiDAR点云配准

利用DJI M350 RTK无人机全程接入湖北省GBAS对测试区进行LiDAR点云数据采集，实时获取CGCS2000坐标基准下无人机的航迹坐标；再通过前方交会对点云数据进行初步地理编码并赋予先验

表2　多源监测数据集内容

监测手段	时间分辨率	空间分辨率	坐标系统	起止时间
机载LiDAR	–	700点/m²	雷达站心	2024年6月
GNSS监测	60 min	离散点位	CGCS2000	2019年1月—2024年11月
地基InSAR	90 min	0.5 m×5 m	雷达站心	2020年4月—2024年1月
精密工程测量	2个月	离散点位	全站仪站心	2022年4月—2024年10月

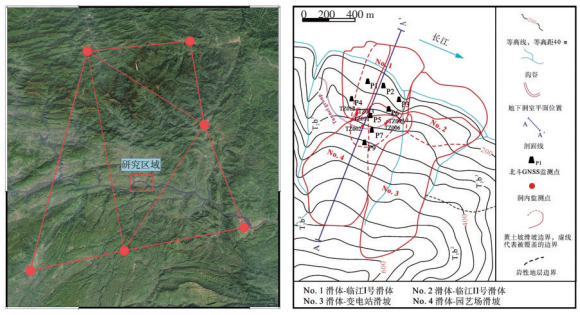


图2　研究区周边GBAS基准站分布与GNSS监测分布图

审图号：GS(2024)0568

CGCS2000坐标，同时在滑坡地表布设10个地面像控点，并使用RTK设备采集CGCS2000坐标；然后基于地面像控点，利用LiDAR点云后处理软件对点云坐标进行精细纠正；最终将无人机LiDAR点云以及生成的去植被数字地表模型统一至CGCS2000坐标基准。

3.3　地基InSAR形变监测

中国地质大学（武汉）湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站在巴东县黄土坡滑坡综合实验场区域布置了一套地基合成孔径雷达，通过地基合成孔径雷达干涉测量技术获得黄土坡滑坡地表大量雷达像元在不同时间段内相对于地基合成孔径雷达视线向的位移时间序列。本文以12 h为时间间隔，解算历年位移，并利用地面均匀分布的9个地基InSAR角反射器进行配准；再通过前方交会、后方交会、贴地处理等方法得到正确的CGCS2000坐标和1985高程基准正常高。

3.4　隧洞内精密工程测量数据采集

由于隧洞内无法直接观测GNSS卫星，也无法通过星基/地基InSAR进行监测，因此隧洞内采用精密工程测量进行监测。在隧洞出口处建设稳定的测量基准观测墩进行GNSS卫星观测，获得洞外观测墩点位的CGCS2000坐标；再以观测墩作为基准传递点，与洞内基准点通视，并利用三等导线测量、二等水准测量对滑坡体内部的隧道监测点位进行精确测量。本文在临江I号隧洞两端各修建一个GNSS静态观测墩，以江对面已有观测墩为定向点进行C级网观测，网型如图3所示。联合GBAS进行基线处理和三维约束平差，获得GNSS静态观测墩和定向点的CGCS2000坐标。以静态观测墩为附合导线起点，通过黄土坡隧洞群布设的4个全站仪强制对中墩（DC01~DC04）进行三等导线测量和二等水准测量，导线以C002为起点，附合导线（图4）观测了隧洞内的导线点（CZ004~CZ027），并联测了DC01~DC04墩，以贯通整个隧洞群。



图3　传递CGCS2000基准至临江I号隧洞群的C级网分布

审图号：GS(2024)0568

以全站仪强制对中墩为洞内监测基准，进一步采集洞内形变监测点和三维激光扫描配准点（贴纸点记为TZ）的CGCS2000坐标。此外，对洞内全站仪历史监测数据进行测站改正，通过观测墩与定向点的

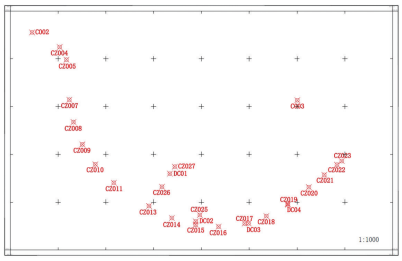


图4　隧洞内导线点位分布情况

CGCS2000坐标建立历史数据的站心坐标与CGCS2000坐标的映射关系，进而进行点云坐标转换，获得匹配至CGCS2000坐标基准下的历史监测数据成果。

4　精度评定

本文以临江I号为研究对象，在实验区内建立了空天地洞一体化监测基准，将星基/地基InSAR影像、无人机LiDAR点云生成的数字地表模型、GNSS连续监测数据、隧洞精密工程测量监测点的多源异构监测成果统一至CGCS2000坐标基准下。GNSS监测引入HBCORS基准站联合平差解算，将监测点的绝对位置由原来的单点定位亚米级提升至厘米级，点位中误差平均值为X=5.24 mm、Y=5.50 mm、Z=5.32 mm。机载LiDAR采用CGCS2000像控点纠正，作业过程中接入HBCORS获得实时CGCS2000位置信息。地基InSAR通过前方交会与后方交会的角反射器配准和坐标转换，雷达回波影像见图5，图中彩色方块为雷达回波，尺寸代表实地边长2 m的正方形区域，颜色越蓝表示雷达波的信噪比越大，说明该回波是由角反射器反射并被雷达接收，可以看出，坐标转换后两个方向、雷达波信噪比较大的回波的CGCS2000坐标均与角反射器CGCS2000坐标保持重合。由于单个雷达像元尺寸为0.5 m×5 m，则可认为地基合成孔径雷达的CGCS2000坐标基准统一精度达到了亚像元精度。在精密工程测量方面，水准联测路线总长为2.5 km，测站数为82个，高差闭合差为0.99 mm，经平差后每个测站可保证优于0.1 mm的测量精度；导线联测的测站数为15个，平面坐标闭合差为16.31 mm，经平差后可达到测站平均1.09 mm、最弱测站1.81 mm的平面定位精度。综上所述，可以认为CGCS2000坐标基准由洞外引至洞内整体实现了毫米级精度。

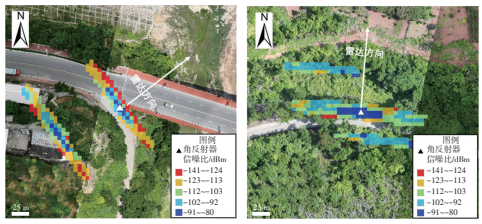


图5　使用角反射器对地基InSAR影像的配准效果

本文对历史数据进行了转换和配准，以一部分未参与计算的控制点为外部检核点，对16个点位进行检核。结果表明，转换后的坐标误差平均值为X=2.2 mm、Y=6.6 mm、H=1.3 mm，误差最大值为X=3.7 mm、Y=6.9 mm、H=1.7 mm，可以证明整体监测精度和转换精度的可靠性。

5　结果分析

通过统一基准对隧洞内部进行基于CGCS2000坐标基准的精密工程测量，结果表明，2024年6—10月的3期成果中大部分导线相对稳定，形变均为毫米级，而主洞K0+700 m附近的导线点CZ010、CZ015、CZ026点位平面发生了超过10 mm的形变。

结合地表GNSS监测情况可知，临江I号从2020年至今仍在进行缓慢的蠕变，体现为平面方向北的位移和垂直方向的沉降；且前缘P3、P6号GNSS监测点位的形变明显大于后缘的P7、P9号点位（图6），P1~P9点为地表GNSS监测点，TZ006~TZ013为隧洞内贴纸监测标志。该结论与唐辉明等[15]提出的前缘受库水位升降影响较大而中后部滑带变形受到降雨影响显著一致。同时，隧洞内监测数据从2022年4月开始，整体趋势与地表相同，通过地表GNSS和深部精密工程测量等方法对临江I号进行长时序地表监测，结果也表现出良好的一致性。

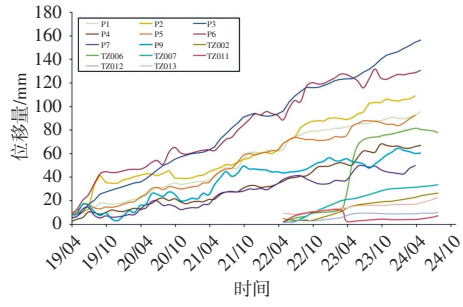


图6　地表—地下点位累积位移情况

通过采集上述多源监测数据，并统一配准至CGCS2000坐标系统下，可实现“地表—地下”融合的关联建模。由图7可知，地表大部分坡体均有不同程度的沉降（蓝色区域），说明临江I号现阶段地表仍存在缓慢沉降趋势；金堂宾馆在InSAR监测下呈现较明显的沉降趋势，在垂向映射至隧洞内的K0+700 m区域TZ007为隧洞内的明显形变点，二者在形变趋势上具有显著的一致性，建议对金堂宾馆区域开展连续的精密监测，以研判其是否会造成临江I号整体失稳，并有针对性地采取搬迁、拆除等措施。

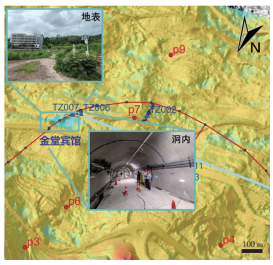


图7 “地表—地下”融合建模

注：红线为隧洞走向，红点为地表GNSS关键点，蓝点为隧洞内关键点。

本文首次对黄土坡临江I号隧洞内进行了CGCS2000坐标基准下的联测工作，赋予每个强制对中观测墩准确的CGCS2000坐标；后续可利用该强制对中观测墩进一步深入研究隧洞内的细部形变体，同时根据地质灾害三查体系要求，对已探明的显著形变区域开展更加系统的核查工作。由于本项目多源数据的时间跨度较大，数据时间分辨率不一致，成果的精度和可靠性仍需在后续工作中予以研究和讨论。

6 结 语

坐标框架是拓展人类活动、促进社会发展的地球空间信息基础设施，能为深空探测、城市建设、救灾减灾等提供基础数据，为开展全球变化探测与科学研究提供统一的高精度空间基准，具有重要的科学意义和应用价值[4]。本文研究建立了多源异构监测数据统一的监测基准，以解决不同地表、地下监测技术成果基准不一致、信息不均衡导致的地表与地下形变难以联合解析的问题，为滑坡地质灾害监测、治理和决策提供了一定的依据。基于GBAS开展滑坡监测方法研究和应用场景示范，对于湖北省北斗产业化高质量发展、地质灾害防治和生态文明建设等具有重要的理论和实际意义。

参考文献

[1] 党亚民,蒋涛,杨元喜,等. 中国大地测量研究进展(2019—2023)[J]. 测绘学报,2023,52(9):1 419-1 436

[2] 魏子卿. 2000中国大地坐标系[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(6):1-5

[3] 张鹏,武军郦,孙占义. 国家测绘基准体系基础设施建设[J]. 测绘通报,2015(10):9-11

[4] 姜卫平. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 379-1 388

[5] 麦绿波,徐晓飞,梁昀,等. 北斗地基增强系统标准体系的构建[J]. 中国标准化,2016(14):118-124

[6] 肖玉钢,姜卫平,陈华,等. 北斗卫星导航系统的毫米级精度变形监测算法与实现[J]. 测绘学报,2016,45(1):16-21

[7] 张勤,赵超英,陈雪蓉. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J]. 测绘学报,2022,51(6):885-896

[8] 许强,董秀军,李为乐. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966

[9] 蒋光伟,程传录,郭春喜,等. 地球参考框架ITRF2008在中国大地基准中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(2):86-90

[10] 王斌,蒋光伟,孙洋洋,等. 板块运动异向性的区域参考框架维持[J]. 测绘科学,2022,47(12):16-22

[11] 王铎,黄观文,杜源,等. 顾及运动状态改正的GNSS滑坡监测基准站切换方法[J]. 测绘学报,2022,51(10):2 117-2 124

[12] 王国权,鲍艳. 基于区域参考框架的GNSS滑坡监测[J]. 测绘学报,2022,51(10):2 107-2 116

[13] 范小洁,赵鹏,邹崇尧,等. 利用北斗网络RTK变形监测的关键技术研究[J]. 地理空间信息,2024,22(10):104-107

[14] 倪卫达,唐辉明,胡新丽,等. 黄土坡临江I号崩滑体变形及稳定性演化规律研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):2 961-2 970

[15] 唐辉明,鲁莎. 三峡库区黄土坡滑坡滑带空间分布特征研究[J]. 工程地质学报,2018,26(1):129-136

(上接第97页)

[7] 蔡阳. 数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J]. 水利信息化,2023(3):1-7

[8] 崔培,张涛,曾斌,等. 数字孪生水利动态时空数据底板构建研究[J]. 中国水利,2025(2):52-64

[9] 郑任泰,左仲元,贺涛,等. 基于BIM的数字孪生流域数据底板建设[J]. 水利规划与设计,2025(2):90-95

[10] 钱峰,付静,陈德清,等. 水利遥感卫星应用星座构建与应用研究[J]. 中国水利,2025(1):15-20

[11] 牛广利,李天旸,杨恒玲,等. 数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J]. 长江科学院院报,2023,40(3):181-185

[12] 黄艳,喻杉,罗斌,等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. 水利学报,2022,53(3):253-269

[13] 刘昌军,刘业森,武甲庆,等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域知识平台建设探索[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(3):34-41

[14] 刘文锴,龚天浩,胡青峰,等. 基于无人机仿地倾斜摄影的南水北调深挖方与高填方渠段三维重建[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(3):51-58

[15] 赵保成,徐健,徐坚,等. 基于无人船的多波束系统水下地形测量应用[J]. 地理空间信息,2023,21(9):65-68

[16] 王乐,张小磊,张磊. 面向数字孪生渲染的云边端协同技术[J]. 计算机技术与发展,2025,35(7):190-195