

Integrated application of hydrological control network and precision leveling in basin settlement monitoring

Liangqing Huo

Shanxi Dezhou Geological Exploration Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 030600, China

Abstract

With the advancement of water conservancy projects, urbanization, and intensified climate change impacts, basin-wide land subsidence has become increasingly severe, posing threats to water security and infrastructure stability. Hydrological control networks and precision leveling surveys, as critical technologies for surface deformation monitoring, play pivotal roles in subsidence monitoring and risk prevention. This paper reviews their theoretical foundations and technical frameworks, analyzes challenges in basin subsidence monitoring, and proposes an integrated strategy combining both techniques to achieve high-precision, wide-coverage, and dynamic monitoring. Case studies demonstrate that their deep integration significantly enhances data accuracy, spatial resolution, and dynamic early warning capabilities, providing robust technical support for geological disaster prevention, water safety, and regional sustainable development.

Keywords

Hydrological control network; Precision leveling survey; Basin subsidence monitoring; Surface deformation; Joint observation; Data fusion

水文控制网与精密水准测量在流域沉降监测中的融合应用

霍亮清

山西德泽厚地质勘查有限公司, 中国·山西·晋中 030600

摘要

随着水利工程建设、城市化推进和气候变化影响加剧,流域区域地面沉降问题日益严重,威胁水资源安全和基础设施稳定。水文控制网与精密水准测量作为地表形变监测的重要技术手段,在沉降监测与风险防控中发挥关键作用。本文梳理了两者的理论基础与技术体系,分析流域沉降监测需求与技术难点,提出融合两项技术开展高精度、广覆盖、动态化监测的综合策略。典型案例表明,二者深度融合可显著提升监测数据精度、空间分辨率与动态预警能力,为地质灾害防控、水利安全和区域可持续发展提供有力技术支撑。

关键词

水文控制网; 精密水准测量; 流域沉降监测; 地表形变; 联合观测; 数据融合

1 引言

流域地面沉降是由地下水过量开采、土壤压缩、水文变化及人类活动等多因素共同作用下产生的地表高程降低现象。沉降不仅威胁防洪、供水、交通等基础设施安全,还会加剧地裂缝、内涝与地质灾害,对区域经济社会发展和生态环境安全带来深远影响。传统的流域沉降监测手段多以水准测量、GPS、InSAR等单一技术为主,存在覆盖范围有限、空间分辨率不足或动态监测能力不强等局限。近年来,随着水文控制网精度提升和精密水准测量技术进步,两者的深度融合为高精度、大尺度、动态化的流域沉降监测提供了新途径。如何构建科学高效的控制网体系,联合精密水准测量技

术,实现流域地表沉降的实时感知与预警,已成为地质灾害防控和水资源安全管理的重要课题。本文围绕水文控制网与精密水准测量的技术融合,系统分析其理论基础、关键流程、实际应用与发展趋势,力图为流域沉降监测创新提供理论依据和技术支持。

2 水文控制网与精密水准测量的理论基础

2.1 水文控制网的基本原理与体系构建

水文控制网是指以高精度定位点为核心、按照流域地形地貌和水文特征科学布设的区域大地测量网络。其主要作用是为流域范围内的各类水文测站、水利设施和地表监测点提供统一的高程基准和坐标控制。控制网的布设需充分考虑水系分布、地质结构、沉降易发区与关键工程点,确保网络结构稳定、数据可扩展、观测链路合理。现代水文控制网多采用多级、分区、网格化布局,结合GNSS定位、精密水

【作者简介】霍亮清(1986-),女,中国山西长治人,本科,从事水文地质、测量研究。

准和永久性标志点,提高点位的时空稳定性和整体可靠性。

2.2 精密水准测量的技术要素与精度保障

精密水准测量作为地面高程变化监测的黄金标准,具有分辨率高、抗干扰强、成果权威等优势。其核心是利用高精度水准仪和配套测量标尺,对水文控制点及关键变形点间高差进行多次、往返观测,通过闭合环线和误差平差,获得毫米级高程变化结果。精密水准测量强调观测条件的严格控制、观测路径的合理设计、设备维护和定期校准,充分消除仪器误差、大气折光、地壳运动等系统误差,确保测量成果的准确可靠。

2.3 融合应用的理论基础与优势分析

将水文控制网与精密水准测量融合,能够实现流域范围内高精度、大范围、动态连续的沉降监测。控制网为水准测量提供统一基准和空间框架,精密水准测量则确保变形数据的高精度获取。两者的结合有助于动态追踪流域地表高程变化,精准识别沉降分布与演化趋势,为流域管理和灾害预警提供全面、系统的数据支撑。融合应用理论强调多源数据互补、测量结果联合平差、动态基准体系维护和智能分析,极大提升流域沉降监测的技术水平。

3 流域沉降监测的需求、挑战与技术现状

3.1 流域沉降监测的现实需求

流域地面沉降监测已成为区域水利安全、生态保护和城镇规划不可或缺的基础工作。随着地下水资源过度开采、城市扩张和极端气候事件频繁发生,流域范围内的地面沉降风险持续上升,对基础设施、公共安全和生态环境构成严峻威胁。高精度、广覆盖、动态化的沉降监测体系能够为防洪抗灾、地质灾害预警、水资源科学调度和工程建设提供实时数据支撑。近年来,黄淮海平原、长三角、珠三角等重要经济区流域,已将地面沉降监测作为水利工程管理、国土空间规划和生态安全评估的重要组成部分。系统的沉降监测不仅有助于及时发现隐患、指导风险防控,还为流域可持续发展和科学决策提供坚实基础。

3.2 沉降监测面临的主要技术挑战

尽管地面沉降监测技术不断进步,但实际应用仍面临多重技术难题。首先,流域地貌复杂多样,水文地质条件千差万别,致使监测网络的布设与维护难度较大。其次,沉降过程空间分异显著且具有突发性和隐蔽性,传统点式或线状监测手段难以覆盖流域范围内所有敏感区和关键节点。再次,大尺度高密度、长期连续观测对设备投入、运维能力和技术保障提出更高要求,相关经费和人力压力不容忽视。此外,沉降监测数据体量庞大,处理和解释环节需融合多源观测信息,科学识别地质、水文、人类活动等多因素的沉降成因和发展趋势,对数据集成、模型分析和智能诊断能力提出更高挑战。

3.3 当前主要监测技术与应用现状

目前,流域沉降监测常用技术包括精密水准测量、

GNSS 动态定位和 InSAR 雷达遥感。精密水准测量技术以其极高的垂直精度和成果权威性,广泛应用于地面沉降基础监测,但作业强度大、周期长,难以实现广域高频观测。GNSS 技术支持动态、高精度、高频次的三维变形监测,适宜布设于重要设施与重点区段,但对城市峡谷、遮挡区和短周期微变形监测仍有局限。InSAR 雷达遥感技术具备大范围、非接触、周期短、分辨率高等优点,特别适用于大面积流域动态监测,但数据质量易受地物覆盖、气象条件等影响,需与地面测量成果联合校验和多源数据融合。实际应用中,多技术集成、互为补充的监测模式成为提升流域沉降监测效能的重要方向。

4 水文控制网与精密水准测量的融合实施路径

4.1 流域水文控制网的优化布设

在流域沉降监测体系构建中,水文控制网的优化布设至关重要。应依据主要河流走向、地质结构、沉降易发区分布、重点基础设施和居民点空间格局,科学选取控制点位置。优先选择地质稳定、抗外界扰动能力强的基岩点或人工加固点,设为永久性基准点,并建立多级次、网格化的控制网结构,提升网络的空间均匀性与数据冗余度。通过在流域内分布主基准点、二级水准点及若干辅助观测点,构建空间参考一体化体系,实现全域沉降监测的无缝覆盖。控制网应与 GNSS 连续观测站、水准点、综合测量标志等互为补充,确保测量数据的空间统一和可追溯。定期复核控制点的稳定性,开展标志维护和历史数据比对,保障基准体系的长期可靠性与成果的精度一致性,为沉降监测与流域管理提供坚实支撑。

4.2 精密水准路线的科学设计与联合观测

精密水准测量是地面沉降动态监测的核心技术环节,其路线设计应以控制网为基础,重点围绕沉降敏感区、关键工程设施和主要水文测站布设高密度水准路线。路线规划需充分考虑闭合回路、路径优化、空间覆盖和重要区域加密等原则,确保观测路径科学、高效。实际观测时,采取多时相、多路径、多回测的联合观测模式,通过严格的精密平差计算,利用控制网约束提升整体数据精度与可比性。联合 GNSS 定位观测及 InSAR 遥感外业校核,可实现观测成果的多源互证与动态变化的实时感知,增强监测体系对突发沉降和微小变形的敏感性。通过科学的路线设计与多技术联合观测,显著提升流域地面沉降监测的空间分辨率与成果权威性。

4.3 多源数据融合与动态解译

融合监测体系需将水准测量、GNSS 连续定位、InSAR 卫星遥感等多源数据进行空间配准、误差修正及成果联合平差,实现不同监测技术的优势互补。依托水文控制网的统一空间基准,各类数据成果可实现精确叠加和动态对比,支持流域沉降演化的时空分析。利用大数据分析与人工智能建模,对沉降数据进行趋势预测、异常识别和空间聚类,及时发现潜在风险点和异常沉降区。结合地质结构、水文变化、

地下水利用、气象驱动等多学科数据,综合解译地面沉降成因,为区域地质灾害防控、水资源调度和城市安全管理提供科学决策依据。多源融合与智能解译显著提升了沉降监测的科学性、前瞻性与服务能力。

5 典型流域案例与融合应用成效分析

5.1 某典型平原流域控制网与沉降监测应用

以我国东部某典型平原流域为例,区域内地势平坦、人口密集、城市与农业用地广泛,地下水资源开发强度大,地面沉降风险突出。针对上述特点,项目组结合地质结构、水文条件和历史沉降资料,系统规划并科学布设了三级水文控制网,包括国家一级水准点、区域骨干控制点和地方密集监测点,全面覆盖河流沿线、城市建成区和主要农田灌溉区。在控制网基础上,定期开展高精度水准测量和GNSS实时定位监测,建立起区域地面沉降动态数据库和智能预警平台。通过多年连续观测,监测结果显示,区域年均地面沉降速率可实现毫米级高精度追踪,有效识别出沉降热点与异常区域。监测数据为城市防洪工程安全性评价、重大基础设施选址和规划调整提供了科学依据。相关部门据此优化地下水开采管理、完善地表变形预警响应机制,显著提升了平原流域地质环境安全保障能力和城市韧性建设水平。

5.2 复杂山区流域的融合观测与风险管控

针对西南山区地形起伏大、地质构造活跃、降雨强度高、灾害隐患多等特征,区域监测面临空间分布不均、监测难度大等实际挑战。为此,采用精密水准测量与InSAR卫星遥感技术融合,形成多尺度、立体化的动态观测体系。结合区域地表变形敏感点、重要水工建筑和主要滑坡隐患区,合理布设地面水文控制点和变形监测标志,定期开展精密水准测量,获取高精度地面高程变化数据。同时,充分利用InSAR对大范围地表形变的高频、自动观测优势,实现对地质灾害易发区的面域监控。依托水文控制网与多技术集成,监测平台可对滑坡、堰塞湖、边坡变形等突发沉降风险进行实时识别和预警。系统观测数据在灾害应急响应、工程加固、风险评估等环节提供有力决策支撑。近年来,该山区流域融合监测模式成功预警并处置多起滑坡灾害,切实提升了区域地质灾害综合防控能力和流域安全保障水平。

5.3 城市化流域的监测体系创新

在长三角等城市化高度发达流域,受地铁、高层建筑、

地下空间开发和大规模用水影响,地面沉降问题复杂多变,对城市基础设施和生态环境构成严峻挑战。监测体系创新以建设区域级水文控制网和密集水准点为基础,全面整合地下水水位、地面沉降传感器、建筑物变形监测等多源数据,实现数据流、业务流和预警流的有机融合。依托大数据与物联网技术,建立动态数据库与监测信息管理平台,实施地面沉降的实时监控和智能预警。监测成果被广泛应用于城市地下工程、轨道交通建设、建筑安全评估和地表下沉治理,推动了从单点观测向区域联动、从事后响应向主动防控的转型。以某地铁沿线为例,沉降监测与预警平台及时发现并修正了工程施工带来的沉降隐患,保障了工程和周边环境的安全。整体来看,城市化流域的多层级融合监测体系为城市安全运行、规划管理和生态修复提供了坚实的数据支撑和决策依据,提升了城市流域管理的科学性和前瞻性。

6 结语

水文控制网与精密水准测量的融合应用,是提升流域沉降监测精度、效率与动态预警能力的重要途径。通过科学布设控制网、优化水准路线、推进多技术集成和数据融合,可实现对流域地表形变的全域、实时、精细化监测。未来,需进一步加强大数据、人工智能等新技术与监测体系的深度融合,完善动态基准和智能预警机制,推动流域沉降监测由工程化向智能化、系统化方向转型,为区域水安全、工程防灾与可持续发展提供更有力的技术支撑和决策依据。

参考文献

- [1] 胡祥祥,石亚亚,安乐平,等.基于SBAS-InSAR监测融合MGWR与地理探测器的黄河流域地面沉降驱动机制研究——以天水市秦州区为例[J/OL].地质科技通报,1-19[2025-09-23].
- [2] 田泉,林敦灵,刘洋,等.永定河流域地表沉降监测及生态补水影响分析[J].测绘科学,2022,47(09):95-101+137.
- [3] 刘瀚阳.典型抗生素在淮河流域(安徽段)水生生态系统中的分布特征、沉降趋势及其风险评估[D].安徽师范大学,2020.
- [4] 张涛,王文利,王建文,等.我国精密水准测量高精度海潮负荷改正模型的建立及其对水准测量结果的影响研究[J].大地测量与地球动力学,2025,45(07):746-753.
- [5] 高建东,安江雷.精密水准测量在区域地面沉降监测中的应用[J].科技创新与应用,2023,13(04):190-192+196.