DOI:10.13203/j.whugis20260081 文章编号:1671-8860(2026)05-1070-01

多源数据的GNSS反演陆地水储量方法及其监测极端水文事件研究

王 泽 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉 430079

Research on GNSS-Inverted Terrestrial Water Storage Using Multi-Source Data and Its Application in Monitoring Extreme Hydrological Events

WANG Ze GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

中图分类号:P237 文献标识码:D

准确量化不同时空尺度下的陆地水储量(terrestrial water storage,TWS)变化(TWS change,TWSC),不仅有助于深化对全球水循环机制的理解,还能为水资源管理、极端水文事件的监测、预警和风险评估提供科学依据。TWS监测的主要手段如传统气象水文监测站或水文模型仅能监测TWS的某一分量,难以获取区域连续的总TWSC;重力卫星GRACE(gravity recovery and climate experiment)/GRACE-FO(GRACE-follow on)虽能提供大尺度的TWSC信息,但其时空分辨率较低,难以满足精细尺度下TWS动态监测的需求;全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)为高精度近实时获取TWSC及极端水文事件监测应用提供了新的技术手段。然而现有方法仅适用于小区域且站网分布密集均匀的场景,且针对极端水文事件的量化分析仍存在难以精确捕捉其时空特征及动态影响的不足。为此,本文重点开展联合多源数据的稀疏GNSS基准站网反演高精度、高时空分辨率TWSC的理论方法和联合反演框架研究。在此基础上,联合GRACE和水文数据反演典型极端水文事件期间的TWSC,深入分析极端水文事件的时空演化特征及其物理机制,并探索其与气象水文要素、大气动力学过程的耦合效应,定量评估极端水文事件对TWSC的综合影响。主要内容如下:

1)系统梳理了TWSC监测的主要方法,涵盖基于GNSS、GRACE/GRACE-FO、传统气象水文观测以及全球水文模型等监测技术及其研究进展。深入分析了GNSS、GRACE以及气象水文数据在TWSC监测及其在极端水文事件应用中的优势与局限性。在此基础上,详细介绍了地球重力场及负荷形变理论基础,基于球谐系数法和Mascon方法的时变重力场反演模型,以及基于弹性负荷理论采用格林函数和球谐Slepian基函数方法反演TWSC的基本理论公式;简要阐述了基于水储量变化的极端水文事件监测方法,为全面理解TWSC的监测技术体系提供了理论支撑。

2)提出了一种融合多源数据的GNSS地表质量负荷约束反演新方法。针对大区域稀疏分布的GNSS基准站网,首先提出基于最小和最平缓模型的GNSS地表质量负荷反演方法,可纳入多种参考模型作为背景场进行联合反演。在此基础上,进一步提出基于二次罚函数的增广拉格朗日乘子约束反演方法,通过拉格朗日乘子引入原位观测数据,对反演结果进行定量边界约束。相比传统方法,在站点稀疏分布情形下可使反演结果精度提高13.3%~38.3%,证实了所提出的约束反演方法的可靠性和有效性。并以雨季降水数据为约束,反演了云南地区TWS的时空变化。

3)提出了一种利用大区域稀疏GNSS基准站网和GRACE/GRACE-FO联合反演TWS的实用框架。针对稀疏GNSS站网反演TWS易出现聚集效应的难题,引入GRACE Mascon解作为先验背景场,结合稀疏GNSS站网获取均质可靠的大陆尺度TWSC,解决了反演不聚焦的问题。首先采用ERA5高分辨率仿真模型进行试验,结果表明,与仅GNSS和传统方法相比,GNSS & GRACE联合反演的TWS呈现了良好的空间连续性,与输入模型之间的相关系数达0.78~0.82,验证了联合反演框架的可靠性。随后采用中国地壳运动观测网络249个GNSS站和戈达德航天中心GRACE Mascon解联合反演了2011—2022年中国大陆区域TWS的时空变化,成功监测到近12年的洪水和干旱事件。TWS异常月变化再现了2022年中国大陆复合极端水文事件的动态演化过程。不同流域的水文站日水位变化与该事件的发生、持续时间和结束高度一致,证实了联合反演结果的有效性。在此基础上,通过分析大气环流模态异常与极端水文事件的耦合效应,探索了该极端事件背后的大气动力学机制。

4)建立了一种水文数据约束的GNSS联合反演TWS模型。该框架通过拉格朗日乘子引入水文数据,对局部区域反演格网进行定量约束,解决了GNSS站点局部稀疏区域反演精度和空间分辨率较低的难题。在冻雨事件中,结合水库水位数据约束,利用湖北和湖南地区CORS站网反演了TWS的时空变化。该框架实现了大地测量技术与水文数据的深度融合,为TWS反演提供了新思路。

作者简介:王泽,2025年6月毕业于武汉大学,获工学博士学位(指导教师:姜卫平教授),研究方向为GNSS陆地水储量反演及极端水文事件监测。wangze_geo@163.com

引文格式:WANG Ze.Research on GNSS-Inverted Terrestrial Water Storage Using Multi-Source Data and Its Application in Monitoring Extreme Hydrological Events[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(5): 1070. DOI: 10.13203/j.whugis20260081.(王泽.多源数据的GNSS反演陆地水储量方法及其监测极端水文事件研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):1070.DOI:10.13203/j.whugis20260081.)