

岸基GNSS用于洪涝水位及大气可降水量监测研究

刘 宁, 江 波, 张双成, 盛 磊, 张 毅, 王恒利, 郝耘庆, 刘 攀, 辛勇军

Research on the monitoring of flood water levels and precipitable water vapor using shore-based GNSS

LIU Ning, JIANG Bo, ZHANG Shuangcheng, SHENG Lei, ZHANG Yi, WANG Hengli, HAO Yunqing, LIU Pan, and XIN Yongjun

引用本文:

刘宁, 江波, 张双成, 等. 岸基GNSS用于洪涝水位及大气可降水量监测研究[J]. 全球定位系统, 2025, 50(2): 61–69. DOI: [10.12265/j.gnss.2025023](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2025023)

LIU Ning, JIANG Bo, ZHANG Shuangcheng, et al. Research on the monitoring of flood water levels and precipitable water vapor using shore-based GNSS[J]. *Gnss World of China*, 2025, 50(2): 61–69. DOI: [10.12265/j.gnss.2025023](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2025023)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2025023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MGEX站多系统GNSS反演大气可降水量精度评估

Performance evaluation of atmospheric precipitable water vapor inversion of mutil-system GNSS at selected MGEX stations

全球定位系统. 2022, 47(5): 100–110

基于LightGBM算法的大气可降水量预测方法研究

Research on precipitable water vapor prediction method based on LightGBM algorithm

全球定位系统. 2024, 49(5): 110–119

地基BDS/GNSS水汽监测在水利领域的研究进展与展望

Research progress and prospects of ground-based BDS/GNSS water vapor monitoring in the field of water conservancy

全球定位系统. 2024, 49(1): 19–33

GNSS-R水位监测研究进展与其在我国水利行业应用展望

Research progress of GNSS-R water level monitoring and its application prospect in China's water conservancy industry

全球定位系统. 2024, 49(1): 34–44

不同加权平均温度模型对大气可降水量影响分析

Influence analysis of different weighted mean temperature models on precipitable water vapor

全球定位系统. 2023, 48(3): 72–76

不同饱和水汽压模型对GNSS反演可降水量的影响分析

Analysis of influence of different saturated water vapor pressure models on GNSS inversion precipitable water

全球定位系统. 2020, 45(6): 55–63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2025023

岸基 GNSS 用于洪涝水位及大气可降水量 监测研究

刘宁¹, 江波¹, 张双成¹, 盛磊², 张毅³, 王恒利¹, 郝耘庆⁴, 刘攀¹, 辛勇军¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 苏交科集团股份有限公司, 南京 211100; 3. 上海市地矿工程勘察(集团)有限公司, 上海 200072; 4. 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 西安 710001)

摘要:近年来, 洪涝灾害频发, 给社会带来严重影响, 而洪涝灾害期间往往伴随着显著的河流水位变化和大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 变化. 本文以 2024 年发生在巴西阿雷格里港的洪涝灾害为例, 选取 GNSS 站观测数据, 分别开展了洪涝水位和 PWV 监测研究. 结果表明, 暴雨前 SPH4 站水位反演与水文站数据的相关系数为 0.993, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.02 m; 暴雨期间, 河流两岸的 SPH4 站与 IDP1 站的水位反演结果相关系数达到 0.997, RMSE 为 0.06 m, 降雨峰值与水位峰值存在 2~5 d 不等的时间差. GNSS 站反演的 PWV 与探空站实测 PWV 的相关系数为 0.992, RMSE 仅为 1.9 mm, PWV 值达到峰值的 5 h 内出现降雨最大值. 实验证明, 岸基 GNSS 设备能够准确反演出洪涝水位变化和 PWV 变化, 在洪涝灾害的预防和监测方面具有广阔的应用前景.

关键词: 岸基 GNSS; 洪涝灾害; 全球导航卫星系统干涉反射测量 (GNSS-IR); 水位监测; 大气可降水量 (PWV)

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 1008-9268(2025)02-0061-09

0 引言

水位变化信息是防汛抗旱、水资源管理及全球气候变化研究的重要数据之一. 当前, 全球变暖导致极端天气事件和洪涝灾害愈发频繁, 对人类的生命财产和环境安全构成严重威胁, 因此开展高精度的水位监测至关重要. 传统的河流水位监测方法主要有人工观测、浮子式水位计、雷达水位计、水文站综合监测等, 虽然这些监测手段被广泛的应用到工程实践中, 但存在成本较高、监测范围较小, 安装与维护复杂等不足, 不能完全适应水文监测向智慧化发展的趋势^[1-2]. 随着 GNSS 系统的不断发展和完善, 全球导航卫星系统干涉反射测量 (Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry, GNSS-IR) 作为一种新型的遥感手段在水位/潮位变化^[3-4]、土壤湿度^[5-6]、积雪深度^[7-8]等地表环境变化监测等方面表现良好, 尤其是在水位监测方面, 弥补了传统监测方法的不足,

具有低成本, 监测范围广, 长期稳定等优点^[9-10].

2013 年, Larson 等^[4]使用 GNSS 接收机采集的数据反演海面高度变化, 并将其结果与验潮站数据进行了对比, 发现两者之间的相关系数高于 0.97. 随后 Lofgren 等^[11]在 2014 年采用优化后的算法对 5 个测站的潮位变化进行了反演, 结果表明在潮位变化显著的区域, 改进算法的计算结果更为出色. 张双成等^[12]在 2016 年使用岸基 CORS 站 SC02 站的数据进行潮位反演, 与验潮站结果之间的相关系数优于 0.98. 2018 年匡翠林等^[13]又使用 SC02 站的数据反演得到了长达 14 年的海平面变化的时间序列, 并与验潮站结果具有良好的一致性. Wang 等^[14]提出基于信号强度观测值的海面高度反演新方法, 该方法能够实现分米级至厘米级的反演精度, 并且能够有效弥补信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 数据缺失时的不足. 马中民^[15]在黄河盐锅峡使用普通型 GPS 接收机反演水位, 与实测值的均方根误差 (root mean square error,

收稿日期: 2025-02-18

资助项目: 国家自然科学基金 (42474028, 42074041); 江苏省科技成果转化专项资金项目 (BA2022009)

通信作者: 江波 E-mail: 1431544143@qq.com

RMSE) 为 0.21 m. 桑文刚等^[16]、宋敏峰等^[17]将 GNSS-IR 技术应用到水库水位反演, 同样取得了较高的反演精度. 随着北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 不断完善, 越来越多的学者开始将 BDS 数据应用到 GNSS-IR 领域, 挖掘其应用潜力与价值. Jin 等^[18]首次利用 BDS B1I、B2I 和 B3I 频率的 SNR 数据与三频相位组合反演海平面高度, 与验潮站结果具有高度的一致性. 张光霁等^[19]通过不同方法评估了 BDS 在水位反演中的性能, 结果表明, BDS 在水位反演方面的表现与 GPS 系统不相上下. 王峰等^[20]利用 BDS B1I 和 B3I 信号的反射特性, 成功实现了对河流流速的测量. 为进一步提高水位反演精度和时间分辨率, 多模多频数据与算法融合不断应用于该领域. Wang 等^[21]提出一种多站点多信号的组合反演方法, 并将其应用到南水北调工程中的一个水库, 反演结果与真实值之间的 RMSE 仅为 6 mm, 是全球首个达到此精度的实例. Liu 等^[22]提出使用鲁棒卡尔曼滤波的方法, 并在云平台上反演水位, 实现了高精度、高时间分辨率和自动化解算. 此外, 小波分析^[23-24]、神经网络模型^[25-26]等方法也在不断地应用到 GNSS-IR 水位反演中, 推动其向智慧化方向发展, 展现了 GNSS-IR 技术在水位监测领域的巨大潜力和广阔前景.

在洪涝灾害期间, 降雨往往是引发水位变化的主要驱动因素, 而大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 是衡量大气中水汽含量的一个重要指标, 是降水形成和降水量多少的关键因素之一. 自 Bevis 等^[27]在 1992 年首次正式提出了 GNSS 气象学的概念, 并成功使用 GPS 数据反演 PWV 以来, 国内外学者针对 GNSS 反演 PWV 的精度及其应用展开了广泛而深入的研究. 2000 年, 王小亚等^[28]用 GPS 数据计算上海地区的 PWV, 发现与探空站结果误差小于 1 mm, 且与实测降雨有很好的对应关系. 施闯等^[29]使用河南省 GNSS 站数据计算 2021 年 7 月暴雨期间的 PWV 并进行分析, 研究表明 PWV 在极端降雨发生前 1~3 h 多出现陡增, 高数值 PWV 地区的降雨强度普遍较高. 郭秋英等^[30]利用山东 CORS 站的 BDS 观测数据进行 PWV 的反演并与探空站的数据进行对比, 两者之间的相关系数为 0.98, 进一步分析得到 PWV 的变化与暴雨的形成存在高度的相关性, 可以用于暴雨的预警研究. Zhao 等^[31]使用浙江地区 GNSS 站数据反演 PWV 并提出一种降水预测的方法, 结果表明 GNSS 数据反演的 PWV 在短期和临近降水预报方面有很大的潜力. 除此之外, 众多学

者的研究同样表明 PWV 变化与降水的变化存在一定的相关性^[32-33].

虽然 GNSS 数据用于水位反演和 PWV 反演均取得了良好的结果, 但已有研究均针对 GNSS 技术用于水位或水汽的单一参数求解, 忽略了岸基 GNSS 本身可同时实现水位监测及水汽反演的能力, 进而通过水位及水汽的时空变化特征来进行洪涝灾害的监测预警. 因此本文旨在利用岸基 GNSS 设备的数据, 反演出洪涝灾害期间河流水位变化以及 PWV 的变化情况, 并结合降雨数据进行分析, 探究这三者之间的联系.

1 水位及 PWV 监测的 GNSS 遥感方法

1.1 GNSS-IR 水位反演原理

图 1 为 GNSS-IR 水位反演原理图, 其中 GNSS 接收机可以接收到来自卫星的直射信号和经过水面的反射信号, 两者之间的路程差为 d , 由几何知识可得

$$d = 2H \sin \theta \quad (1)$$

式中: H 为反射高度, 即 GNSS 接收机天线相位中心 (antenna phase center, APC) 到水面的垂直距离; θ 为卫星高度角.

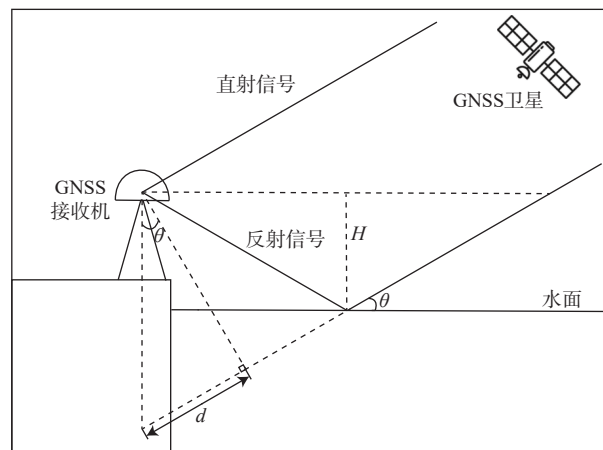


图 1 GNSS-IR 水位反演原理

SNR 是 GNSS 接收机观测数据中信号功率与噪声功率的比值, 值越大表示数据质量越好, 在进行水位反演时, SNR 通常由直射信号与反射信号叠加干涉形成. 可由下式表示:

$$\text{SNR}^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \phi \quad (2)$$

式中: A_d 代表直射信号的振幅; A_r 代表反射信号的振幅; ϕ 代表直射信号与反射信号之间的相位差, 可由路程差求得, 即

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{4\pi H \sin \theta}{\lambda} \quad (3)$$

式中, λ 为卫星信号波长。

在 (2) 式中, 因为 $A_d \gg A_r$ 所以 (2) 式可以表达为

$$\text{SNR}^2 = A_d^2 + 2A_d A_r \cos \phi \quad (4)$$

式 (4) 可以使用低阶多项式拟合直射信号分量, 去除直射信号后得到去趋势项信噪比 dSNR, 可表示为

$$\text{dSNR} = \cos \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin \theta + \Phi \right) \quad (5)$$

式中, Φ 为 dSNR 的初始相位。

由 (3) 式可以求得频率与反射高度之间的关系:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial \sin \theta} = \frac{2H}{\lambda} \quad (6)$$

式 (5) 又可写为

$$\text{dSNR} = \cos(2\pi f \sin \theta + \Phi) \quad (7)$$

基于上述推导可以得知, 在使用 GNSS 数据反演水位时, 可以先对 SNR 序列进行式 (7) 计算出其频率, 再通过式 (6) 求出反射高度, 最后归算到当地的水位高度。而对于非均匀变化的去趋势项信噪比序列, 可以通过 Lomb-Scargle 谱 (Lomb-Scargle Periodogram, LSP) 分析求得频率 f ^[4]。

1.2 地基 GNSS PWV 反演原理

在使用地基 GNSS 站反演 PWV 的过程中, 关键在于获取高精度的天顶湿延迟 (zenith wet delay, ZWD)。而 ZWD 可由天顶总延迟 (zenith total delay, ZTD) 减去静力学延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD) 获取:

$$\text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD} \quad (8)$$

其中, ZHD 常用的计算方法有 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型和 Black 模型, 这里选择使用最广的 Saastamoinen 模型来计算:

$$\text{ZHD} = \frac{2.2768 P_s}{1 - 0.0025 \cos(2\varphi) - 0.00028h} \quad (9)$$

式中: P_s 为测站地面气压, 单位为 hPa; φ 为测站地理纬度, 单位为 rad; h 为测站海拔高度, 单位为 km。

ZWD 与 PWV 存在正比关系, 基于这一关系可

以求得测站天顶方向的 PWV:

$$\text{PWV} = \Pi \cdot \text{ZWD} \quad (10)$$

式中: Π 是一个无量纲的转换系数, 与对流层水汽加权平均温度 T_m 有关, 一般计算时 T_m 取 256.18 K, 即 Π 取常数 0.15。

2 实例分析

2.1 实验区域

阿雷格里港是巴西南部大西洋岸的重要港口和圣保罗以南最大的城市, 同时也是南里奥格兰德州的首府, 位于帕图斯湖北口 5 条可航河流的交汇处。2024 年 4 月 29 日起, 该城市遭遇了前所未有的极端降雨事件, 连续多日的强降雨导致瓜伊巴河等河流水位急剧攀升, 达到了历史峰值。此次暴雨所引发的洪水肆虐, 不仅淹没了城中心地带及众多街区, 还导致大范围区域的水电供应中断, 严重影响了上万居民的正常生活。该自然灾害持续时间较长, 直至 5 月下旬, 仍有暴雨事件发生, 进一步加剧了灾情的严峻性。

Silveira 等^[34] 在阿雷格里港河流两岸部署了 3 个 GNSS-IR 水位监测站 SPH4、IDP1 和 VDS1 站并提供了 2024 年 4 月 1 日至 2024 年 5 月 31 日的数据, 3 个站均可用于水位反演, 并且在距离 SPH4 站 1.4 km 处存在一处水文站, 可用来检验水位反演结果的准确性, 点位分布如图 2 所示。

鉴于 GNSS-IR 水位监测站提供的 NMEA 格式数据在 PWV 反演中存在一定的限制, 因此选择了地理位置接近的 GNSS 观测站 POAL 站来进行 PWV 反演工作。通过对 ERA5 再分析资料进行预处理, 采用反距离加权法求得 4 个测站上空的 PWV 时间序列, 其结果如图 3 所示, GNSS-IR 站与 POAL 站的 PWV 变化趋势高度一致, POAL 站的 PWV 时间序列能够准确地反映 3 个水位监测站的 PWV 变化规律。同时, 为了校验 PWV 反演结果的精确度, 附近的 1 个探空站被用作参考标准, ERA5 反演 PWV 与探空站实测 PWV 之间的相关系数为 0.984, RMSE 仅为 3 mm。此外, 还收集了距离最近气象站的降雨数据, 以便进行更深入的分析。各站点的具体分布情况如图 2 所示, 测站之间的距离如表 1 所示。

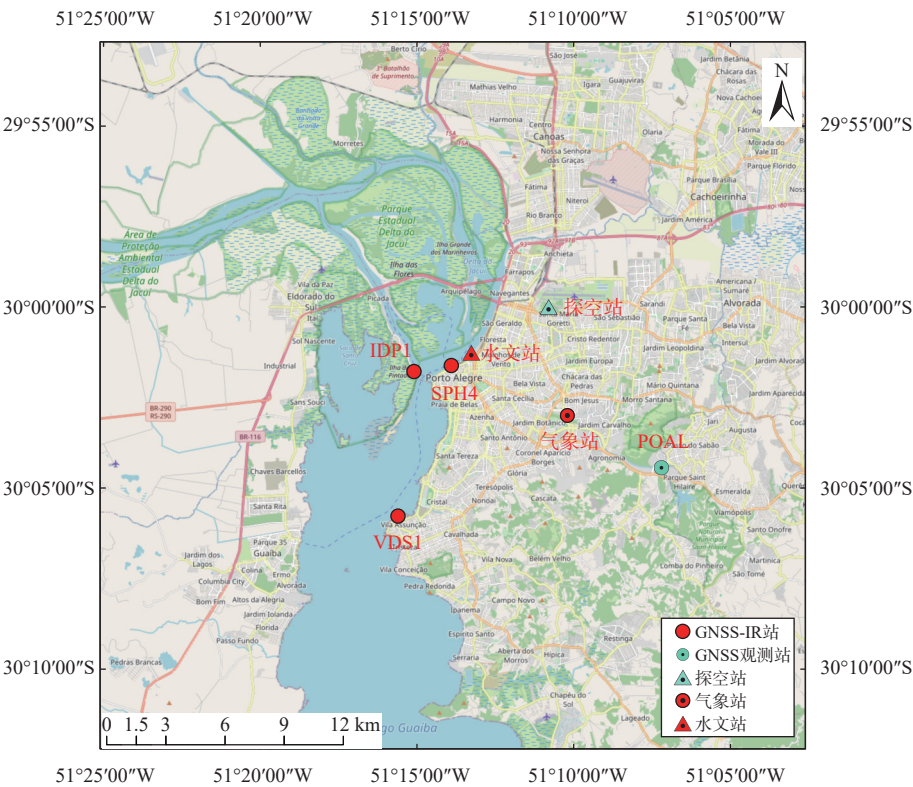


图 2 研究区域站点分布

表 1 各测站之间距离 km

站点名称	SPH4	IDP1	VDS1	POAL	水文站	探空站	气象站
SPH4	0.00	2.23	9.46	13.83	1.40	6.72	7.48
IDP1	2.23	0.00	8.61	15.70	3.56	8.83	9.51
VDS1	9.46	8.61	0.00	15.85	10.60	15.26	11.66
POAL	13.83	15.70	15.85	0.00	13.15	11.63	6.36
水文站	1.40	3.56	10.60	13.15	0.00	5.32	6.79
探空站	6.72	8.83	15.26	11.63	5.32	0.00	6.52
气象站	7.48	9.51	11.66	6.36	6.79	6.52	0.00

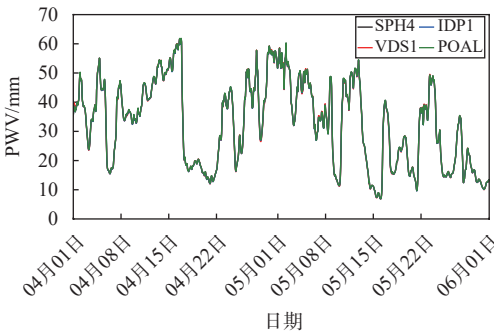


图 3 2024 年不同测站 ERA5-PWV 对比

2.2 数据处理

2.2.1 GNSS-IR 水位反演

根据上述原理方法对 3 个测站的数据进行处理,使用 Larson 提供的 GNSSREFL 开源软件^[35]从 NMEA 格式数据中提取出 SNR、仰角 (Elevation)、方位角 (Azimuth) 等数据,根据菲涅尔反射区设置相应的高度角和方位角限制,随后使用 LSP 频谱分析法得到初始水位反演结果,对初始结果使用移动平均窗口和线性插值并归算到当地水平面后即获得水位时间序列结果,数据处理流程如图 4 所示,GNSS-IR 站周围环境^[34]及其菲涅尔反射区如图 5 所示,3 个测站水位反演结果与水文站的实测结果对比如图 6 所示。

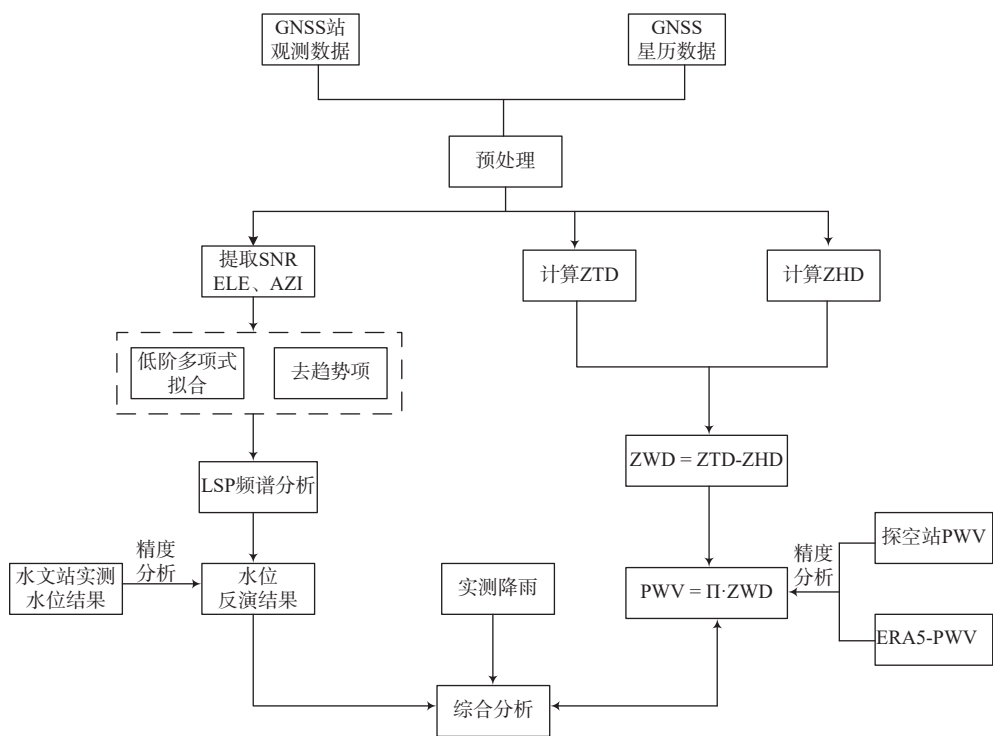


图 4 数据处理流程

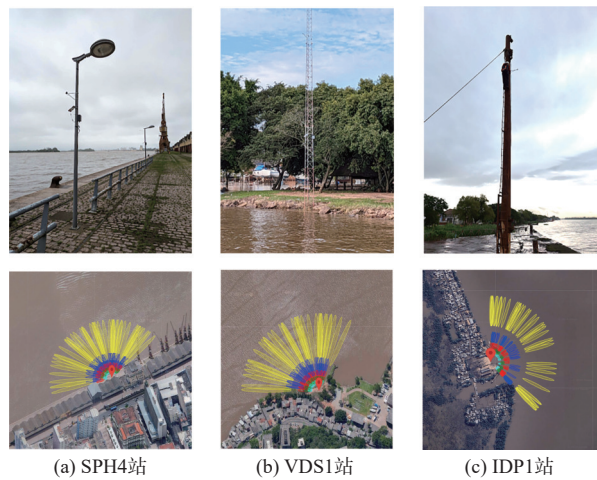


图 5 GNSS-IR 站及菲涅尔反射区

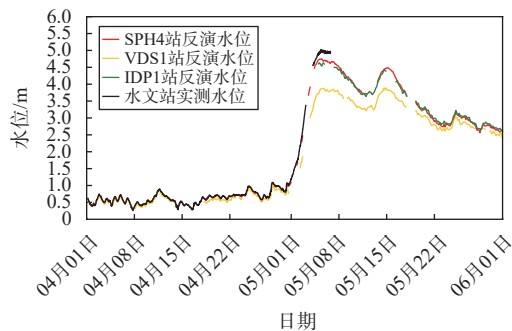


图 6 2024 年 GNSS-IR 站反演水位与水文站水位对比

通过对水位数据的对比分析,发现在 4 月 29 日暴雨事件前,SPH4 站和 VDS1 站的水位变化趋势与

水文站的水位变化趋势高度一致.此外,对 4 个站点的水位数据分别从相关系数和 RMSE 2 个精度指标进行统计分析,进一步验证 GNSS-IR 反演水位的可靠性,其结果如表 2 所示.具体而言,在暴雨发生之前,SPH4 站与水文站之间的水位相关系数高达 0.993, RMSE 仅为 0.02 m,这表明两者之间的水位变化趋势几乎完全一致.同样,VDS1 站与水文站之间的水位相关系数也达到了 0.976, RMSE 为 0.07 m,显示出高度的相关性.这些数据强有力地表明,GNSS-IR 技术在水位反演中的高精度表现,为后续水位反演的准确性提供了坚实的理论支撑.

表 2 水位精度评估

站点	RMSE/m	相关系数
SPH4/水文站	0.02	0.993
VDS1/水文站	0.07	0.976
SPH4/VDS1	0.06	0.980
SPH4/IDP1	0.06	0.997

注:除SPH4/IDP1为5月6日至5月31日,其余均为4月1日至4月29日

在 4 月 29 日暴雨事件发生后,河流水位迅速攀升,尽管地理位置的差异导致 SPH4 站、VDS1 站以及水文站的水位涨幅不同,但它们的水位变化趋势依然保持高度一致.自 5 月 6 日起水文站数据缺失,这在一定程度上限制了对该时间段水位变化特征的分

析,但 SPH4 站、IDP1 站位于河流同一位置的两岸,在 5 月 6 日至 5 月 31 日期间 2 个站之间水位结果的 RMSE 为 0.06 m,相关系数为 0.997,这充分验证了两站点水位结果的准确性和可靠性.相比之下,VDS1 站由于其所处的河道相对更宽等因素,其水位变化幅度相对于 SPH4 站有所降低.但从整体来看,VDS1 站与 SPH4 站水位变化趋势依然呈现出一致性.

2.2.2 地基 GNSS PWV 反演

使用 GAMIT/GLOBK 软件对 POAL 站和 IGS 站 (CORD、LPGS、UFPR) 数据进行高精度处理,得到 POAL 站 4 月 1 日至 5 月 31 日逐小时的 PWV 值.

为了验证 GNSS 站反演得到的 PWV 结果的准确性,选择了距离该 GNSS 站最近的探空站数据作为参考值进行验证.由于探空站在 5 月 3 日后缺失数据,无法对剩余时间段 PWV 结果进行进一步验证,因此选用 ERA5 提供的数据计算 PWV 作为另一种验证手段,三者之间的时间序列对比结果如图 7 所示.

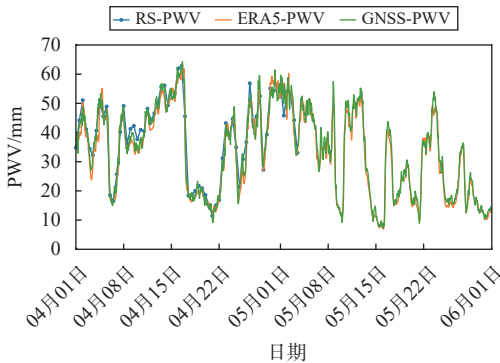


图 7 2024 年 PWV 结果对比

针对 GNSS 站反演的 PWV(GNSS-PWV)、探空站提供的 PWV(RS-PWV)、ERA5 计算的 PWV(ERA5-PWV),进行了 RMSE 和相关系数的计算,具体结果如表 3 所示.由计算结果可以得知,GNSS-PWV 与 RS-PWV 之间的相关系数高达 0.992, RMSE 仅为 1.9 mm,探空站数据缺失后 GNSS-PWV 与 ERA5-PWV 之间的相关系数和 RMSE 分别为 0.988 和 2.6 mm,计算结果表明 GNSS 站反演的 PWV 具有较高的准确性,可用来进一步分析使用.

表 3 PWV 精度评估

PWV	RMSE/mm	相关系数
GNSS-PWV/RS-PWV	1.9	0.992
ERA5-PWV/RS-PWV	3.0	0.984
GNSS-PWV/ERA5-PWV	2.6	0.988

3 结果分析

3.1 降雨对水位变化的影响

图 8 为 3 个 GNSS-IR 站反演的水位变化与当地实测降雨时间序列结果,可以清晰地观察到在 4 月 29 日至 5 月 2 日、5 月 10 日至 5 月 13 日、以及 5 月 23 日至 5 月 24 日这 3 个时间段内,出现连续的强降雨事件,随后河流的水位也相应地发生显著变化,因此将 4 月 29 日至 5 月 27 日定为极端降雨洪水期.具体而言,4 月 29 日至 5 月 2 日期间累计降水量高达 364.4 mm,其中 4 月 30 日的单日降雨量就达到 109 mm.受此影响,SPH4 站点的水位在 5 月 5 日 9 时达到本次洪水期间的最高值 4.785 m,与降雨前的最低水位相比上涨 4.283 m;同时,VDS1 站点的水位也在 5 月 5 日达到最大值 3.948 m,与降雨前的水位相比上涨 3.543 m,与 SPH4 站涨幅相差 0.740 m.本次连续降雨事件中,小时降雨量最大值出现的时间与水位最大值出现的时间如表 4 所示,可见小时降雨达到最大值后的 5 天左右河流水位达到最高值.由于下游的帕图斯湖具有一定的蓄洪能力,河流水位在达到最大值后逐渐下降.然而,随着新一轮连续降雨的到来,水位再次出现明显的上升.

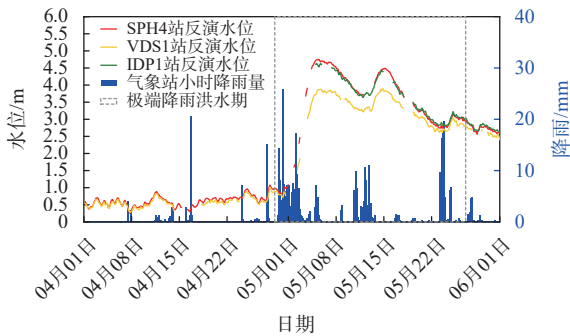


图 8 2024 年 GNSS-IR 站水位变化及降雨时间序列结果

表 4 极端降雨期间小时降雨量与水位最大值时间

小时降雨量最大值时间	水位最高值时间	
	SPH4	VDS1
4月30日06时	5月5日09时	5月5日13时
5月12日19时	5月15日03时	5月14日17时
5月23日18时	5月25日00时	5月25日00时

在 5 月 10 日至 5 月 13 日期间,累计降雨量达到 141 mm,随后 SPH4 和 VDS1 2 个站点的水位分别上升 0.895 m 和 0.980 m,水位最高值出现在小时降雨最大值后的 2 d 左右.而在 5 月 23 日至 5 月

24 日期间,累计降雨量更是达到 147.3 mm,其中 5 月 23 日的单日降雨量高达 126.2 mm,成为本次洪水期间的最高降雨值.随后,SPH4 和 VDS1 2 个站点的水位在 5 月 25 日分别上涨 0.620 m 和 0.605 m,水位最高值同样出现在小时降雨最大值后的 2 d 左右.

此外,在其他降雨事件后,水位也均有不同程度的上升现象.这些数据不仅证实了降雨与水位变化的紧密关系,还清晰的揭示出降雨事件与水位升高之间存在明显的先后顺序.

3.2 PWV 变化与降雨关联性分析

由图 9 可以观察到降雨时间与 PWV 之间的密切关系.具体而言,在 4 月 29 日至 5 月 2 日的连续降雨事件之前,PWV 值出现了显著的上升趋势,并在 4 月 30 日达到最大值 61.5 mm,累计增长 33.2 m,随后出现小时降雨最大值.在整个连续降雨期间,PWV 值普遍维持在 50 mm 以上的高水平,并且有着明显的波动,PWV 最大值与小时降雨最大值出现的时间如表 5 所示.5 月 2 日降雨结束后 PWV 值出现了明显的下降,表明水汽得到了有效释放.

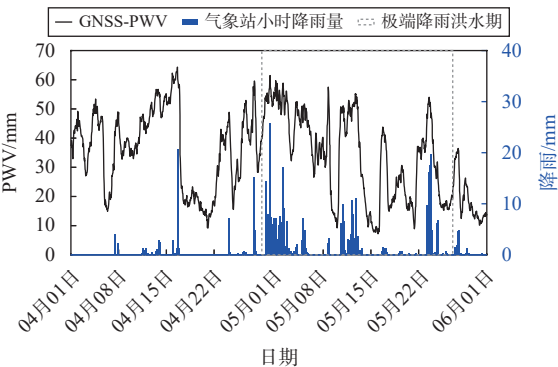


图 9 2024 年 PWV 变化及小时降雨时间序列结果

表 5 极端降雨期间 PWV 与小时降雨最大值时间

PWV最大值时间	小时降雨量最大值时间
4月30日05时	4月30日06时
5月12日17时	5月12日19时
5月23日13时	5月23日18时

在 5 月 10 日至 5 月 13 日连续降雨开始前 13 h, PWV 值开始攀升,至降水产生时累计增长 41.5 mm,平均变化速率高达 4 mm/h, PWV 值达到最大值 2 h 内,出现小时降雨量最大值.降水期间, PWV 值稳定在 50 mm 左右,降雨结束后 PWV 值又出现了明显的下降,恢复到降雨前的水平.类似的现象也出现在 5 月 23 日至 5 月 24 日的降雨过程中,降雨前 PWV 值逐渐上升, PWV 值达到最大值 5 h 内,出现小时降

雨量最大值.降雨期间, PWV 值保持较高状态,降雨结束后又逐渐回落.

综上所述,降雨事件与 PWV 值的变化存在着紧密的联系,降雨产生前往往伴随着 PWV 值的快速上升, PWV 值达到最大值后 5 h 内会出现降雨最大值,连续的降雨期间 PWV 值往往会维持在较高水平,降雨结束后随着水汽的释放, PWV 值又会逐渐减小.然而,需要强调的是, PWV 的变化并非降雨事件发生的绝对因素,两者之间的关系仍需结合其他因素进行深入研究.

4 结束语

本文通过对 GNSS-IR 站进行水位反演并分析降雨对水位的影响以及对 GNSS 站的数据进行大气可降水量反演并分析其与降雨之间的联系,可得出以下结论:

1) SPH4 站与 VDS1 站水位反演结果在 4 月 29 日暴雨前与水文站的水位结果变化趋势相同,并且 RMSE 分别达到 0.02 m 和 0.07 m,相关系数高达 0.993 和 0.976.而在 5 月 6 日水文站数据缺失后, SPH4 站的水位反演结果与 IDP1 站的结果之间的相关系数达到 0.997.这一结果表明, GNSS-IR 技术反演的水位结果具有较高的准确性,足以在极端降雨期间进行水位反演,并能在水文站数据缺失时提供有效的补充.

2) GNSS 站反演的 PWV 结果与探空站的 PWV 结果之间的相关系数高达 0.992, RMSE 仅为 1.9 mm.在探空站数据缺失的情况下,该结果与 ERA5 数据计算的 PWV 之间的相关系数和 RMSE 分别为 0.988 和 2.6 mm.这表明地基 GNSS 站可用于极端降雨期间 PWV 反演.

3) 降雨是影响河流水位变化的主要原因,并且往往存在一定的滞后性,降雨峰值与水位峰值存在 2~5 d 不等的时间差.此外,降雨事件往往伴随着 PWV 的显著变化:在降雨前 PWV 值会显著上升,达到最大值后的 5 h 内会出现降雨最大值;降雨期间 PWV 值维持在较高水平;降雨结束后, PWV 值则逐渐下降.因此,使用岸基 GNSS 设备进行水位和 PWV 监测能够有效的预警和监测洪涝灾害的发生,为防灾减灾提供有力支持.

参考文献

[1] 杨振宇,李坚,陈静妹.图像识别技术在水位监测中的比测分析[J].水资源研究,2020,9(2): 218-225.

- [2] 张朋杰, 庞治国, 路京选, 等. GNSS-R 水位监测研究进展与在我国水利行业应用展望 [J]. *全球定位系统*, 2024, 49(1): 34-44.
- [3] 郭斐, 李佰瀚, 张治宇, 等. 利用 GNSS 反射信号监测海面高度变化——基于法国 BRST 站 2019~2021 年数据 [J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(3): 548-558.
- [4] LARSON K M, LÖFGREN J S, HAAS R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver[J]. *Advances in space research*, 2013, 51(8): 1301-1310. DOI: [10.1016/j.asr.2012.04.017](#)
- [5] ZHOU X, ZHANG S C, ZHANG Q, et al. Research of deformation and soil moisture in loess landslide simultaneous retrieved with ground-based GNSS[J]. *Remote sensing*, 2022, 14(22): 5687. DOI: [10.3390/rs14225687](#)
- [6] EDOKOSSI K, CALABIA A, JIN S, et al. GNSS-reflectometry and remote sensing of soil moisture: a review of measurement techniques, methods, and applications[J]. *Remote sensing*, 2020, 12(4): 614. DOI: [10.3390/rs12040614](#)
- [7] OZEKI M, HEKI K. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases[J]. *Journal of geodesy*, 2012, 86(3): 209-219. DOI: [10.1007/s00190-011-0511-x](#)
- [8] YU K, BAN W, ZHANG X, et al. Snow depth estimation based on multipath phase combination of GPS triple-frequency signals[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2015, 53(9): 5100-5109. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2417214](#)
- [9] 万玮, 陈秀万, 李国平, 等. GNSS-R 遥感国内外研究进展 [J]. *遥感信息*, 2012, 27(3): 112-119.
- [10] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2007(11): 955-960.
- [11] LÖFGREN J S, HAAS R. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations[J]. *EURASIP journal on advances in signal processing*, 2014, 2014(1): 50. DOI: [10.1186/1687-6180-2014-50](#)
- [12] 张双成, 南阳, 李振宇, 等. GNSS-MR 技术用于潮位变化监测分析 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(9): 1042-1049.
- [13] 匡翠林, 刘凯, 周要宗. 基于 GPS 信噪比数据观测海平面变化研究 [J]. *海洋测绘*, 2018, 38(6): 37-40.
- [14] WANG N, XU T, GAO F, et al. Sea-level monitoring and ocean tide analysis based on multipath reflectometry using received strength indicator data from multi-GNSS signals[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2022, 60: 1-13. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3219074](#)
- [15] 马中民, 张双成, 刘奇, 等. 普适型 GPS 用于黄河盐锅峡水位监测分析 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 2021, 13(2): 187-193.
- [16] 桑文刚, 刘迎春, 何秀凤, 等. 库区 GNSS-R 精细化反演水面高度及其验证研究 [J]. *全球定位系统*, 2022, 47(1): 43-48.
- [17] 宋敏峰, 何秀凤. 基于 GNSS-IR 技术高精度水库水位监测研究 [J]. *无线电工程*, 2021, 51(10): 1099-1103.
- [18] JIN S, QIAN X, WU X. Sea level change from BeiDou navigation satellite system-reflectometry (BDS-R): First results and evaluation[J]. *Global and planetary change*, 2017, 149: 20-25. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2016.12.010](#)
- [19] 张光霁, 匡翠林, 戴吾蛟, 等. 基于北斗/GNSS-R 的厘米级水位测量 [J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(4): 34-40.
- [20] 王峰, 郑琦, 杨东凯, 等. GNSS 反射计河流参数测量研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(12): 3771-3779.
- [21] WANG X, HE X, XIAO R, et al. Millimeter to centimeter scale precision water-level monitoring using GNSS reflectometry: application to the south-to-north water diversion project, China[J]. *Remote sensing of environment*, 2021, 265: 112645. DOI: [10.1016/j.rse.2021.11264](#)
- [22] LIU Z, DU L, ZHOU P, et al. Cloud-based near real-time sea level monitoring using GNSS reflectometry[J]. *GPS solutions*, 2023, 27(2): 65. DOI: [10.1007/s10291-022-01382-5](#)
- [23] 陈殊, 何秀凤, 王笑蕾, 等. 基于小波分析的多模多频 GNSS-MR 潮位反演 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(4): 365-370.
- [24] 苏晓容, 张云, 韩彦岭, 等. 岸基 GNSS 单天线潮位高度小波分析反演 [J]. *导航定位学报*, 2019, 7(4): 87-93.
- [25] 赵涛, 叶世榕, 罗歆琪, 等. GNSS-IR 潮位反演中高仰角数据质量控制方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2024, 49(1): 68-76.
- [26] LIMSUPAVANICH N, GUO B, FU X. Application of RNN on GNSS Reflectometry Sea level monitoring[J]. *International journal of remote sensing*, 2022, 43(10): 3592-3608. DOI: [10.1080/01431161.2022.2100231](#)
- [27] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 1992, 97(D14): 15787-15801. DOI: [10.1029/92JD01517](#)
- [28] 王小亚, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海地区 GPS/STORM 试验与结果 [J]. *全球定位系统*, 2000(3): 6-10.
- [29] 施闯, 周凌昊, 范磊, 等. 利用北斗/GNSS 观测数据分析“21·7”河南极端暴雨过程 [J]. *地球物理学报*, 2022, 65(1): 186-196.
- [30] 郭秋英, 赵耀, 黄守凯, 等. 基于北斗 PWV 的暴雨时空变化特征分析 [J]. *全球定位系统*, 2022, 47(5): 111-117.
- [31] ZHAO Q, YAO Y, YAO W. GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*,

- 2018, 167: 124-133. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.11.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.013) [J/OL]. GPS solutions, 2024, 28(4): 165. DOI: [10.1007/s10291-024-01694-8](https://doi.org/10.1007/s10291-024-01694-8)
- [32] 余洋, 万蓉, 付志康, 等. 基于地基 GNSS 观测的典型暴雨过程水汽特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 2024: 1-10.
- [33] 张振, 李黎, 田莹, 等. 连续运行参考站网的暴雨过程时空变化分析 [J]. 测绘科学, 2020, 45(8): 19-25.
- [34] SILVEIRA L N, ALMEIDA J V H, YAMAWAKI M, et al. Wide-swath satellite altimetry reveals the 2024 Porto Alegre extreme flood was intensified by backwater effect across choked river section[J]. Authorea, 2024. DOI: [10.22541/au.171769020.08746753/v1](https://doi.org/10.22541/au.171769020.08746753/v1)
- [35] LARSON K M. Gnsstreff: an open source software package in python for GNSS interferometric reflectometry applications

作者简介

刘宁 (1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为 GNSS 水汽探测方法研究. E-mail: liuning-chd@163.com

江波 (2001—), 男, 硕士, 研究方向为 GNSS 反射测量与应用. E-mail: 1431544143@qq.com

张双成 (1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向为对地观测与防灾减灾. E-mail: shuangcheng369@chd.edu.cn

Research on the monitoring of flood water levels and precipitable water vapor using shore-based GNSS

LIU Ning¹, JIANG Bo¹, ZHANG Shuangcheng¹, SHENG Lei², ZHANG Yi³, WANG Hengli¹,
HAO Yunqing⁴, LIU Pan¹, XIN Yongjun¹

(1. College of Geological Engineering and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. JSTI Group Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Shanghai Geological Engineering Exploration (Group) Co., Ltd., Shanghai 200072, China; 4. Shaanxi Provincial Water Resources and Electric Power Survey and Design Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710001, China)

Abstract: In recent years, flood disasters have occurred frequently and serious impacts have been brought to society. During flood disasters, significant changes in river water levels and precipitable water vapor (PWV) are often accompanied. Taking the flood disaster in Porto Alegre, Brazil in 2024 as an example, data from GNSS stations were selected, and research on flood water level and water vapor monitoring was conducted. The results indicate that, before the rainstorm, the correlation coefficient between the water level inversion at the SPH4 station and the data from the hydrological station is 0.993, and the root mean square error (RMSE) is 0.02 m. During the rainstorm, the correlation coefficient between the water level inversion results of the SPH4 station and the IDP1 station on both sides of the river reaches 0.997, and the RMSE is 0.06 m. There is a time difference of 2 to 5 days between the rainfall peak and the water level peak. The correlation coefficient between the PWV value inverted by the GNSS station and the PWV value measured by the radiosonde station is 0.992, and the RMSE is only 1.9 mm. The maximum rainfall occurs within 5 h when the PWV value reaches its peak. The experiment demonstrates that shore-based GNSS equipment can accurately invert the changes in flood water levels and precipitable water vapor, and broad application prospects are held in the prevention and monitoring of flood disasters.

Keywords: shore-based GNSS; flood disasters; GNSS-IR; water level monitoring; precipitable water vapor (PWV)