

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024100

孙铭涵, 庞治国, 张朋杰. 湖南省地基北斗卫星导航系统大气可降水量反演及降水分析[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(4): 28-33. SUN Minghan, PANG Zhiguo, ZHANG Pengjie. Inversion and precipitation analysis of atmospheric precipitation in the ground-based Beidou system of Hunan Province[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(4): 28-33. (in Chinese)

# 湖南省地基北斗卫星导航系统 大气可降水量反演及降水分析

孙铭涵 庞治国 张朋杰

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心), 北京 100038)

**摘要:**水汽是影响天气变化的重要因子, 灾害天气的发生往往伴随着水汽含量、空间分布的急剧变化。针对目前关于地基北斗卫星导航系统(BDS)反演大气可降水量(PWV)研究相对较少现状, 进一步验证 BDS PWV 的反演精度和 PWV 与实际降水的关系, 利用湖南探空站和邻近的连续运行基准站(CORS)数据, 构建湖南本地化大气加权平均温度( $T_m$ )模型, 基于此模型进行水汽反演, 分析 BDS 水汽探测的精度, 与实际降水结合探究 PWV 与降水之间的响应关系。结果显示: 与探空数据相比, CORS 测站解算的 BDS PWV 均具有较强的相关性, 均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)均在 4 mm 以内, 符合水汽监测的要求; PWV 与实际降水之间存在明显的联系, 降水前 6~12 h 水汽快速聚集为降水发生提供充足的条件, PWV 为 60 mm 可以作为降水预报的阈值。因此, 利用 BDS 对水汽的持续监测在降水、水旱灾害监测预报中可以发挥重要作用。

**关键词:**北斗卫星导航系统(BDS); 大气可降水量(PWV); 精度分析; 降水分析; 大气加权平均温度( $T_m$ )

中图分类号: P228; P412; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2024)04-28-06

## 0 引言

水汽是大气中最活跃的成分, 绝大部分的水汽集中在对流层中, 对流层水汽形态变化影响降水有关天气系统的产生<sup>[1]</sup>, 研究水汽含量、分布及变化规律对灾害天气形成、演变过程具有重要意义, 有助于短临降水、水旱灾害等极端天气的监测与预报预警。在监测中通常使用大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)来衡量大气水汽含量, 其传统探测手段主要包括探空资料、微波辐射计、卫星遥感等<sup>[2]</sup>, 但这些手段普遍存在时空分辨率低、易受外部环境影响、数据滞后等缺点, 难以满足降水、灾害天气监测与预报高精度、高时空分辨率的需求。随着中国自主研发、独立运行的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite Sys-

tem, BDS)的全球组网完成和强势发展, 联合美国全球定位系统(GPS)、欧洲伽利略卫星导航系统(Galileo)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS)形成了四大全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)并存且提供服务的格局, GNSS 水汽探测技术迅速发展, 成为水汽探测的一种新兴手段<sup>[3]</sup>。与传统手段相比, 具有全天时、全天候、高精度、高时空分辨率、近实时等优势。

GNSS 水汽监测的可靠性和精确性的验证与评价一直是研究的热点问题。文献[4]基于无线电探空资料对 GPS PWV 反演进行验证, 发现两者之间存在较高的相关性。曹寿凯等<sup>[5]</sup>在青藏高原地区对 GPS 水汽反演精度进行验证, 结果显示与探空资料精度相当, 均方根误差(RMSE)在 2~3 mm。文献[6]基于 GPS 与无线电探空资料具有相近的精

收稿日期: 2024-03-20

第一作者信息: 孙铭涵, 女, 硕士研究生, E-mail: sunminghan@edu.iwhr.com。

通信作者信息: 庞治国, 男, 正高级工程师, E-mail: pangzg@iwhr.com。

基金项目: 中国卫星导航系统重大专项(GFZX030303020127)。

度,分析了PWV变化与强降水的敏感性,表明PWV对降水有一定的指示作用。GPS水汽监测在全球范围内得到广泛验证与应用,与GPS相比,北斗系统全面建成投入使用的时间相对较晚,在水汽监测中的研究较短,对北斗系统在区域水汽反演中的准确性的验证仍具有重要价值,对验证北斗系统的可靠性、提升北斗系统服务能力具有重要意义。Li等<sup>[7]</sup>对BDS PWV反演精度展开评估,与GPS相比均方根误差为2 mm。郭秋英等<sup>[8]</sup>利用全球多个不同位置的测站对BDS水汽监测能力进行验证,证明了北斗三号系统(BDS-3)在水汽反演中具有较高的精度,与GPS结果相比RMSE优于2 mm。赵琨等<sup>[9]</sup>分析了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)与北斗系统的水汽探测性能, RMSE在4 mm以内,精度低于GPS反演精度。郑志卿等<sup>[10]</sup>发现北斗水汽探测精度略低于GPS和Galileo,满足水汽监测精度需求。北斗系统在不同气候、地形条件的区域水汽探测的精度和稳定性,在极端天气、网络状况差的条件下对于连续实时的水汽探测的精度,依然是需要不断论证的问题。

本文构建了新的湖南本地化大气加权平均温度( $T_m$ )模型,对先前的经验模型进行验证分析。以湖南省探空站和邻近连续运行基准站(CORS)为研究对象,选取时间序列为2022年6月,对BDS数据进行解算获取BDS PWV,结合探空资料验证分析BDS PWV反演精度,并结合实际降水量分析BDS PWV与降水之间的联系,旨在验证BDS数据水汽探测的能力,为实现高精度、高时空分辨率北斗水汽探测的业务化应用奠定基础,通过PWV与实际降水的响应关系为水利领域极端降水、旱涝灾害监测预报与防御提供支持。

## 1 研究区及数据介绍

湖南省降水充沛,雨热同期,夏季高温多雨,平均温度26~29℃,年平均降水量1 100~1 800 mm,其中以6—7月降水最多。境内河网密集,湘、资、沅、澧“四水”贯穿全省,三面环山,中部、北部低平,整体表现为西高东低、南高北低。受气候、水系、地形等因素的影响,湖南省是自然灾害的高发区,尤以洪涝灾害最为严重,而省内人类活动主要分布在河流、湖泊周边,洪涝灾害一旦发生势必会造成严重的损失。因此,研究湖南省的水汽时空分布与变化特征对于当地气候变化、降水预报及人类活动具有重要的意义。

本文整理分析了湖南省2022年6月的PWV数据和降水数据。其中,PWV数据主要源于湖南省的3个探空站(长沙站、怀化站和郴州站)和相邻的3个CORS测站,测站信息如表1所示。探空站每日两次释放探空气球获取探空站上空的气象数据,分别在协调世界时(UTC)00时和12时。CORS站接收多卫星系统的原始观测数据,在解算过程中使用北斗卫星系统观测数据,采用精密单点定位法解算BDS数据,数据的时间分辨率为5 min。此外,在PWV反演算法中地表温度为主要使用的气象数据,由于湖南地区大多数CORS站未安装气象传感器,无法直接获取测站处的地表温度对水汽进行探测。因此,试验中测站处所需的地表温度、降水数据均源于ECMWF生产的ERA5再分析数据集,时间分辨率为1 h。

表1 湖南省探空站和CORS测站信息

探空站		CORS测站		两站距离/km
站号	站名	测站编号	站名	
57687	长沙站	CSKC	长沙长勘院站	23.08
57749	怀化站	HHSQ	怀化站	4.71
57972	郴州站	CZGY	郴州桂阳站	29.40

## 2 PWV反演方法

### 2.1 $T_m$ 计算

$T_m$ 是反演BDS PWV的重要参数之一。 $T_m$ 主要获取方法包括常数值法、数值积分法和模型法等<sup>[11]</sup>。①常数值法认定 $T_m$ 为固定的常数,对不同地区不同气候条件的适应性较差,在高精度PWV反演中并不适用。②数值积分法是基于实测气象资料获取高精度 $T_m$ 数值的方法,普遍应用于计算探空站的 $T_m$ 值,时间分辨率较低,普适性较差。③模型法是目前最常用的 $T_m$ 数据获取方法,模型简单,适用性更强,许多学者在研究中基于区域、季节等要素构建了不同的大气加权平均温度模型。最常用的模型当属线性加权平均温度模型: $T_m = a \times T_s + b$ ,其中 $T_s$ 为地表温度,单位为K。李黎等<sup>[12]</sup>基于2012—2014年湖南省3个探空数据构建了湖南本地化的 $T_m$ 模型,其模型参数: $a=0.65, b=87.09$ 。

本文将基于湖南长沙、怀化、郴州3个探空站获取的2020—2022年高空气象数据,利用数值积分法计算探空站上空的 $T_m$ 值,见式(1),结合ERA5再分析数据获取的测站同时空条件下的 $T_s$ 数据构建本地化的 $T_m-T_s$ 模型,并对

李黎的模型精度进行验证,分析其模型在区域的适用性情况。

$$T_m = \frac{\sum_i^n (\frac{e_i}{T_i}) \Delta h_i}{\sum_i^n (\frac{e_i}{T_i^2}) \Delta h_i} \quad (1)$$

式中: $e_i$ 为第*i*层大气平均水汽压,hPa; $T_i$ 为第*i*层大气平均温度,K; $\Delta h_i$ 为第*i*层大气厚度。众多研究表明, $T_s$ 对 $T_m$ 值的估算贡献最大,两者具有较强的线性相关关系。图1为湖南省 $T_m$ 与 $T_s$ 的散点图,拟合出的 $T_m-T_s$ 单因子模型: $T_m = 0.66 \times T_s + 90.33$ ,其相关系数 $r^2$ 为0.857 1,证明了 $T_m$ 与 $T_s$ 之间存在良好的正相关关系。利用本文构建的 $T_m-T_s$ 模型估算湖南地区3个探空站处的 $T_m$ 值,将其与李黎构建的单因子 $T_m$ 模型估算结果进行比较。

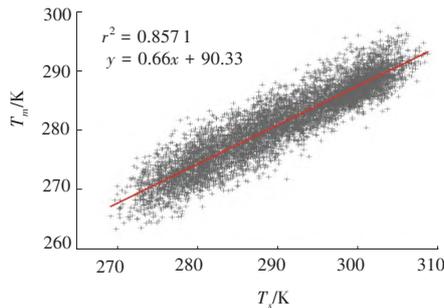


图1  $T_m-T_s$ 相关关系

图2为两种模型 $T_m$ 估算值与真实值的偏差统计直方图,图2(a)显示李黎构建的模型偏差主要分布在 $-8 \sim -2$  K,少部分数据偏差达到 $-14 \sim -10$  K,结合表2其模型RMSE为5.85 K,平均绝对误差(MAE)为5.35 K,表明李黎的模型在近年 $T_m$ 值估算中精度较差,而误差大于5 K即会造成水汽含量存在2%左右的偏差,影响最终水汽反演的精度,因此,在实际应用中需要对李黎的模型进行校正;图2(b)显

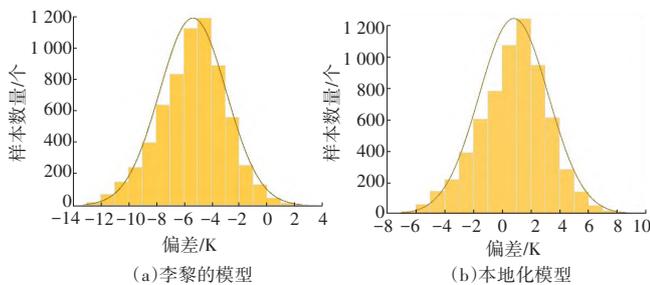


图2 两种模型估算值与真实值偏差

示本文构建的本地化 $T_m-T_s$ 模型偏差主要分布在 $-2 \sim 4$  K,结合表2模型RMSE、MAE分别为2.55 K、2.05 K,证明本文构建的模型预估值更加接近真值,符合实际应用中对高精度BDS PWV反演的需求。在此基础上基于本文构建的湖南本地化 $T_m-T_s$ 模型结合ERA5数据获取CORS站地表温度数据进行BDS PWV反演。

表2  $T_m$ 模型精度分析

$T_m$ 模型	样本数/个	RMSE/K	MAE/K
$T_m = 87.09 + 0.65T_s$	6 576	5.85	5.35
$T_m = 90.33 + 0.66T_s$	6 576	2.55	2.05

## 2.2 PWV计算方法

### 2.2.1 基于探空资料

利用高空大气各层比湿和气压数据计算PWV,水汽探测精度较高,但其数据空间分辨率与探空站的分布有关,导致数据时空分辨率较低,并不适宜于区域水汽探测,故该方法普遍应用于验证GNSS、遥感等其他水汽探测手段的精度。利用探空数据获取各层气象数据计算探空站点处的PWV值,计算方法如式(2)所示:

$$RS_{PWV} = \frac{\int q dp}{g} = \frac{1}{g} \sum_i^n \left( \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \right) (p_{i+1} - p_i) \quad (2)$$

式中: $RS_{PWV}$ 为利用探空站计算的PWV,cm; $q$ 为各层的比湿, $g/kg$ ; $p$ 为各层的气压,hPa; $g$ 为当地的重力加速度, $cm/s^2$ 。

### 2.2.2 基于BDS数据

利用精密单点定位技术对BDS数据进行解算,得到高精度的天顶对流层总延迟(ZTD)数据。依据Saastamonien模型计算天顶静力学延迟(ZHD)数据<sup>[13]</sup>,求解天顶湿延迟(ZWD),可根据公式 $ZWD = ZTD - ZHD$ 计算。BDS PWV与ZWD之间的关系为:

$$\begin{cases} BDS_{PWV} = \Pi \times ZWD \\ \Pi = \frac{10^6}{\rho R_V \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2' \right)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $BDS_{PWV}$ 为利用CORS测站反演的PWV; $\Pi$ 为大气水汽转换系数; $\rho$ 为液态水的密度; $R_V$ 为水汽的气体常数,其值为461.495 J/(kg·K); $k_2'$ 、 $k_3$ 为大气折射率常数,其值分别

为 16.48 K/hPa 和  $3.776 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ 。

### 3 PWV 分析

#### 3.1 PWV 精度分析

探空资料计算 PWV 时间分辨率为每日 UTC 00 时和 12 时。由表 1 可知, CORS 测站与探空站之间的距离均在

30 km 范围之内, 可利用探空站实际探测 PWV 数据作为真值对 BDS PWV 反演精度进行评估。对于每一个 CORS 测站, 同步获取的 UTC 00 时和 12 时的 BDS 数据经解算得到 ZWD 数据, 结合转换系数将其转换为 PWV。将探空 PWV 与邻近的 CORS 测站的 PWV 反演结果进行对比, 对比结果如图 3 所示。

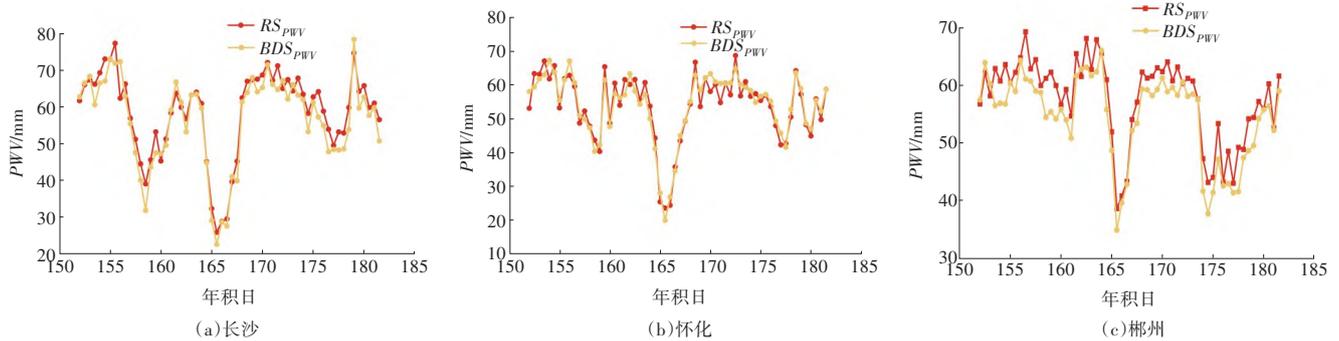


图3 RS\_PWV与BDS\_PWV时间序列

由图 3 可以看出, 3 个 CORS 测站的 PWV 反演结果与对应探空站的反演结果在整体趋势上基本一致,  $BDS_{PWV}$  普遍低于  $RS_{PWV}$ , 且 00 时刻的相对误差普遍小于 12 时刻的相对误差, 反演精度更高; 除此, 水汽含量较低时一致性更好。CSKC、HHSQ 和 CZGY 站的 PWV 差值的相关系数  $r^2$  分别为 0.93、0.92、0.88;  $RMSE$  分别为 3.77、2.88、3.92;  $MAE$  分别为 3.08、2.36、3.25 (表 3)。3 个 CORS 测站的 PWV 反演结果与探空 PWV 具有较强的相关性, 且  $RMSE$  和  $MAE$  均小于 4 mm, 满足水汽监测的精度要求, 证明了 BDS 反演的 PWV 具有较高的精度, 可以反映区域大气水汽含量, 区域内 CORS 站空间数量远大于探空站点数量, 相较于探空资料具有更高的时空分辨率。水汽的含量及空间分布不均且变化较快, 不同地理位置上空的水汽含量差异性较大, 结合表 1 发现, HHSQ 站与怀化探空站之间相距较近, 故而对比较发现 HHSQ 站的 PWV 反演精度相对较高, 而 CSKC、CZGY 站与长沙、郴州探空站之间距离较远, 反演精度明显劣于 HHSQ 站的反演精度。说明利用探空 PWV 作为真值进行

BDS PWV 反演精度的研究与分析, 对空间距离相距较远的测站存在一定的局限性。

#### 3.2 PWV 与降水事件分析

基于 BDS 数据在 PWV 反演中具有较高的精度, 为研究 PWV 与实际降水间的关系, 输出 CSKC、HHSQ 和 CZGY 3 个测站 2022 年 6 月逐时 PWV 值时间序列, 同时利用 ERA5-逐小时数据获取同一地理位置的降水量数据, 从而进一步分析 PWV 与实际降水之间的关系, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, PWV 与降水之间存在较为明显的相关关系。降水发生时, 水汽含量处于较高水平, PWV 值为 60 mm 可作为降水预报的阈值。据报道, 2022 年 6 月 1—6 日, 湖南多地遭遇持续时间长、降水强度大的强降水过程, 图 4 显示在此期间 3 个 CORS 站上空 PWV 均保持较高水平, 围绕 60 mm 上下波动, 为降水的发生提供了充足的水汽, 说明水汽含量长时间处于较高水平, 有极大的可能性会产生长时间的降水。

图 4(a) 显示, 长沙 6 月的几次降水事件发生在年积日 152~157 (6 月 1—5 日)、161 (6 月 10 日)、168~174 (6 月 17—23 日)、179~182 (6 月 28—30 日), 在降水发生前 PWV 值有一个增长期, 当水汽积累达到阈值时降水发生, 随之 PWV 值少量减少, 降水过程中 PWV 值不断波动变化, 降水结束 PWV 值逐渐减少到较低水平, 直至下一次降水事件发生前

表 3 基于  $RS_{PWV}$  的  $BDS_{PWV}$  精度评价结果

测站名	$r^2$	$RMSE/\text{mm}$	$MAE/\text{mm}$
CSKC	0.93	3.77	3.08
HHSQ	0.92	2.88	2.36
CZGY	0.88	3.92	3.25

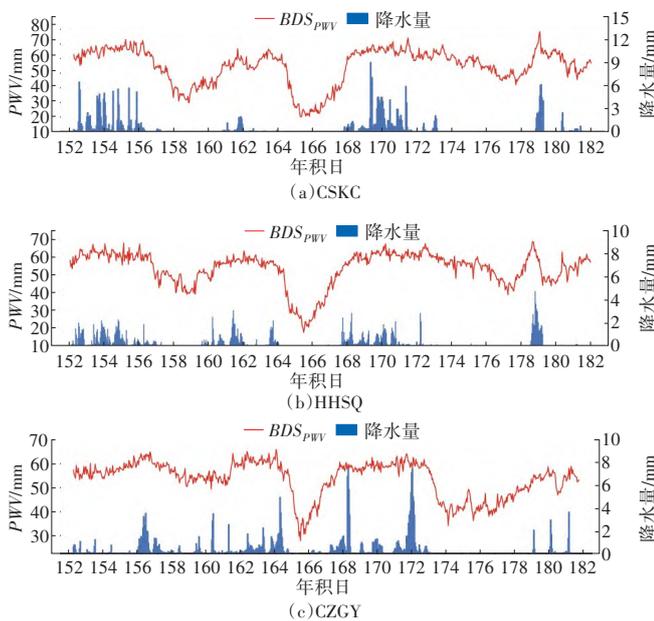


图4 BDS\_PWV与降水时间序列

重新聚集水汽到达较高的水平产生降水。图4(b)显示,怀化6月整体PWV与降水的响应关系与长沙类似,在年积日178~179(6月27—28日)发生一次降水事件可以较为直观地反映出降水发生前后较短时间内的水汽变化情况,降水前6~12 h水汽含量不断攀升,水汽快速聚集达到峰值,此时降水事件发生,降水量2 mm左右,随后水汽含量快速下降,此时降水量逐渐增加,每小时累计降水量3~5 mm,在2~3 h后降水量达到峰值,小时累计降水量5 mm。随着水汽积累到一定程度且降水达到峰值,水汽含量持续减少到54 mm左右并保持相对稳定,此时降水量减少,降水过程趋于稳定。图4(c)显示,郴州6月的PWV与降水之间的关系不同于长沙和怀化,郴州在年积日152~164(6月1—13日)、166~173(6月15—22日)持续降水且降水量较为平均,其间PWV值维持在55~65 mm,一直处于较高水平,促使降水持续发生;年积日167(6月16日)降水量较少,日累计降水量7.73 mm,降水等级为小雨,而此时PWV值在40~50 mm,并没有达到降水的阈值,证明PWV只能作为一个因素反映降水情况,实际降水事件发生情况与降水量多少是多因素共同作用的结果。在降水预报预警中可将PWV作为其中一个重要的输入参数,为降水预报模型的构建提供新的指标和参考。此外,BDS高精度水汽反演结果可作为参数构建新的干旱指数<sup>[14]</sup>,对于降水的高精度预测,结合干旱指数可以有效提升干旱预报精度;降水作为洪涝灾害监测与

预报的一项重要指标,PWV高精度反演推动洪水预报模型的构建与完善,对洪涝灾害监测与防御具有重要意义。

## 4 结 论

本文构建了新的湖南本地化 $T_m-T_s$ 模型用于BDS PWV反演,利用探空数据与BDS数据反演PWV进行对比验证,结果显示两者之间具有较强的相关性,证明了BDS水汽反演的可靠性与准确性,可用于区域内多测站的水汽反演,构建区域水汽场,能够有效解决探空数据时空分辨率低的问题。结合湖南CSKC、HHSQ和CZGY 3个测站的实际降水数据,对PWV与降水之间的关系展开分析,探究PWV对降水的响应情况,得出以下结论。

(1)此前李黎学者提出湖南本地化的 $T_m$ 模型,对模型精度进行验证发现模型在试验阶段对 $T_m$ 值的估算能力较差,在此基础上,本文构建了新的湖南本地化的 $T_m-T_s$ 模型: $T_m = 0.66 \times T_s + 90.33$ 。与探空数据对比验证显示, $RMSE$ 和 $MAE$ 分别为2.55 K和2.05 K,表明该模型在湖南地区 $T_m$ 值估算具有较高的精度。

(2)探空数据作为真值验证BDS PWV反演精度,3个测站的 $RMSE$ 、 $MAE$ 均小于4 mm,相关系数为0.88~0.93,两者的一致性较强,满足水汽探测的精度要求。表明BDS PWV可反映湖南地区真实的PWV,利用BDS数据可有效探测实际水汽含量,获取湖南地区的高时空分辨率的水汽信息。

(3)降水的发生往往伴随着水汽的快速积累,水汽含量维持在较高水平不断波动的情况下降水事件发生的概率越大,反映了水汽不断累积在一定程度上会产生实际降水;而在水汽含量处于较低水平时,降水发生的可能性大大减小。

(4)PWV与实际降水之间存在较强的相关性,两者在时间变化趋势上存在一定联系,可为降水预报提供一个新的参数,通过观测降水前6~12 h水汽积累情况对降水事件的发生进行预测,为洪涝灾害灾前预防提供重要数据支持,结合多气象因素及区域下垫面情况、经济状况和防灾抗灾能力可对区域洪涝灾害风险进行预测预评估,对提高防灾减灾能力具有重要意义。

(5)BDS PWV反演空间分辨率与CORS站的数量和空间分布相关,在区域水汽场构建中空间分辨率不足,未来可以考虑融合卫星遥感数据等多源数据提升水汽反演的空间分辨率,构建高精度、高时空分辨率的区域水汽场,为

区域整体化降水预报增添助力。

## 参考文献

- [1] 曹睿,何海,吴志勇,等.长江中下游地区季节尺度气象干旱预测概念模型[J].中国防汛抗旱,2021,31(6):11-15.
- [2] 姚宣斌,赵庆志.GNSS对流层水汽监测研究进展与展望[J].测绘学报,2022,51(6):935-952.
- [3] 张克非,李浩博,王晓明,等.地基GNSS大气水汽探测遥感研究进展和展望[J].测绘学报,2022,51(7):1172-1191.
- [4] SATO K, TSUDA T, SUSILO, et al. Comparison of precipitable water vapor derived from GPS and radiosonde data for Indonesia[J]. Journal of Disaster Research, 2013, 8(1): 141-142.
- [5] 曹寿凯,魏加华,乔祺,等.地基GPS的大气可降水量反演精度验证[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):520-527.
- [6] CAMPOS T B, SAPUCCI L F, EICHHOLZ C, et al. The sensitivity of GPS precipitable water vapor jumps to intense precipitation associated with tropical organized convective systems[J]. Atmosphere, 2023, 14(2):262.
- [7] LI M, LI W W, SHI C, ET AL. Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1): 150-162.
- [8] 郭秋英,侯建辉,刘传友,等.基于北斗三号的大气水汽探测性能初步分析[J].全球定位系统,2021,46(1):89-97,111.
- [9] 赵琨,罗力,杨凤芸.利用北斗 CORS 反演大气可降水量的精度分析[J].测绘科学,2021,46(11):12-17.
- [10] 郑志卿,张克非,李龙江,等.基于 MGEX 站多系统 GNSS 反演大气可降水量精度评估[J].全球定位系统,2022,47(5):100-110.
- [11] 龚绍琦.中国区域大气加权平均温度的时空变化及模型[J].应用气象学报,2013,24(3):332-341.
- [12] 李黎,宋越,易金花,等.湖南三地加权平均温度分区分时模型研究[J].测绘科学,2018,43(1):54-58,65.
- [13] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin géodésique, 1973, 107(1): 13-34.
- [14] 卢洪健,赵兰兰.基于大数据挖掘的区域干旱预报方法及应用研究[J].中国防汛抗旱,2023,33(12):40-46.

## Inversion and precipitation analysis of atmospheric precipitation in the ground-based Beidou system of Hunan Province

SUN Minghan, PANG Zhiguo, ZHANG Pengjie

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038; 2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources(Flood and Drought Disaster Prevention Center), Beijing 100038)

**Abstract:** Water vapor is an important factor affecting weather changes, and the occurrence of disaster weather is often accompanied by sharp changes in water vapor content and spatial distribution. In response to the relatively limited research on the inversion of atmospheric precipitable water vapor (PWV) using the ground-based BeiDou system(BDS), this article further verifies the accuracy of BDS PWV inversion and the relationship between PWV and actual precipitation. A localized atmospheric weighted mean temperature ( $T_m$ ) model was constructed using data from sounding stations and adjacent stations of the Continuous Operating Reference Station (CORS) in Hunan province. Based on this model, water vapor inversion was carried out to analyze the accuracy of BDS water vapor detection and explore the response relationship between PWV and precipitation by combining with actual precipitation. The results showed that the BDS PWV calculated by CORS stations is provided with a strong correlation in compared with sounding data, with root mean square error and average absolute error of both within 4 mm. The inversion results meet the requirements of water vapor monitoring. There is a clear connection between PWV and actual precipitation. The rapid accumulation of water vapor 6 h to 12 h before precipitation provides sufficient conditions for precipitation to occur, and PWV of 60 mm can be used as a threshold for precipitation forecasting. Therefore, continuous monitoring of water vapor using the BeiDou system can play an important role in monitoring and predicting precipitation, water and drought disasters.

**Keywords:** BeiDou Navigation Satellite System(BDS); precipitable water vapor(PWV); accuracy analysis; precipitation analysis; atmospheric weighted mean temperature( $T_m$ )

编辑 田亚男