



我国地基GNSS/MET水汽观测站网建设进展与挑战

梁宏 曹云昌 罗晋 王乙竹 万晓敏 屈梅芳

Advances and challenges in developing the ground-based GNSS/MET water vapor observation network in China

LIANG Hong, CAO Yunchang, LUO Jin, WANG Yizhu, WAN Xiaomin, QU Meifang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-018>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

联合GNSS大气可降水量与实测降水的气象干旱监测：以湖北省GNSS站为例

Meteorological drought monitoring combined with GNSS precipitable water vapor and measured precipitation: a case study of GNSS stations in Hubei Province

暴雨灾害. 2025, 44(2): 236–245 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-073>

近10 a高原切变线研究进展综述

Review on the research advances of the Tibetan Plateau shear line in the last decade

暴雨灾害. 2021, 40(6): 569–576 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.001>

地基云遥感反演进展及挑战

Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing

暴雨灾害. 2021, 40(3): 243–258 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.003>

青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai

暴雨灾害. 2025, 44(1): 41–51 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-240>

基于葵花8号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析

Comparison of convective cloud characteristics during two torrential rain events in Shenyang based on Himawari-8 satellite data

暴雨灾害. 2020, 39(2): 125–135 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.003>

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province

暴雨灾害. 2024, 43(5): 532–541 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-116>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

梁宏,曹云昌,罗晋,等.2026.我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设进展与挑战[J].暴雨灾害,45(3):305–317. LIANG Hong, CAO Yunchang, LUO Jin, et al. 2026. Advances and challenges in developing the ground-based GNSS/MET water vapor observation network in China [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):305–317 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–018

我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设进展与挑战

梁宏^{1, 2, 3}, 曹云昌^{1, 2, 3}, 罗晋⁴, 王乙竹⁵, 万晓敏⁶, 屈梅芳⁷

(1. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2. 临近空间环境特性及效应全国重点实验室, 北京 100081; 3. 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081; 4. 云南省大气探测技术保障中心, 昆明 650034; 5. 贵州省气象数据中心, 贵阳 550002; 6. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081; 7. 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘 要: 地基全球卫星导航系统气象 (GNSS/MET) 水汽观测站网已成为我国综合气象观测系统的重要组成部分。然而,我国站网布局与欧美日等发达地区或国家仍然存在差距,尚未满足 WMO 推荐的覆盖中小尺度天气系统的需求。另外,观测装备性能需要进一步提升,以增加抗电磁干扰能力和信号捕获跟踪水平。在国家推进北斗卫星导航系统(以下简称“北斗”)在气象等重点行业规模化应用的政策背景下,如何建设、布局和发展该观测站网以及如何结合气象部门优势和特点发挥该观测站网的最大价值是目前面临的重要问题。针对上述问题,本文回顾了自 2008 年以来国内地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设进展,阐述了目前其面临的挑战。近 20 a 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网快速发展,站点数量从 2008 年 87 站增加至 2024 年底 1 000 余站。2025 年底总站点数量超过 2 300 个,其中 1 650 余站实现“北斗”信号接收以及对流层水汽和电离层参量观测一体化,站点平均间距在我国东部地区达到 50~80 km,西部地区约 100 km。目前已建立较完整的观测数据质量控制流程和指标体系,大气可降水量 (PWV) 业务产品误差小于 2 mm,满足世界气象组织 (WMO) 提出的最优性价比指标要求,在数值天气预报、天气诊断会商等业务中发挥了重要作用。在此基础上,对该站网的升级优化和观测产品应用进行了展望,以期为我国地基 GNSS/MET 水汽观测业务站网发展提供有价值的参考依据。

关键词: 全球卫星导航系统气象; 大气可降水量; 观测站网; 中小尺度天气系统

中图法分类号: P411

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–018

Advances and challenges in developing the ground-based GNSS/MET water vapor observation network in China

LIANG Hong^{1, 2, 3}, CAO Yunchang^{1, 2, 3}, LUO Jin⁴, WANG Yizhu⁵, WAN Xiaomin⁶, QU Meifang⁷

(1. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 2. State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-space, Beijing 100081; 3. Engineering Technology Research Center for Meteorological Observation, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 4. Yunnan Atmospheric Observation Technology Support Center, Kunming 650034; 5. Guizhou Meteorological Data Center, Guiyang 550002; 6. Earth System Modeling and Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 7. Meteorological Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022)

Abstract: The ground-based global navigation satellite system meteorology (GNSS/MET) water vapor observation network has become an important part of China's integrated meteorological observation system. However, there is still a considerable gap between China's network layout and those of developed regions or countries such as Europe, the United States, and Japan. And, it has not yet met the WMO's recommended coverage for meso- and micro-scale weather systems. Furthermore, the performance of observation instruments needs to be further improved to enhance its anti-electromagnetic interference ability and signal capture and tracking capabilities. With the promulgation of the national policy promoting the large-scale application of the Beidou navigation satellite system (BDS) in key sectors such as meteorology, this paper discusses how to construct, deploy, and develop this network, and how to maximize its value by

收稿日期: 2025–02–07; 定稿日期: 2025–07–26

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2442214, 42174027); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J061); 中国气象局气象探测中心观测试验计划项目 (GCSYJH13-04); 北部湾大气水分循环综合观测试验项目 (BEIGAWEX2023to2028)

第一作者: 梁宏, 主要从事地基 GNSS/MET 水汽观测技术研究。E-mail: liangh@cma.gov.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

leveraging the strengths and characteristics of the meteorological departments. To address these issues, this paper reviews the progress in the construction of domestic ground-based GNSS/MET water vapor observation networks since 2008 and elaborates on the current challenges it faces. The ground-based GNSS/MET water vapor observation network in China has developed rapidly, with the number of stations increasing from 87 in 2008 to more than 1 000 by the end of 2024. The total number of stations is expected to exceed 2 300 by the end of 2025. More than 1 650 stations will be equipped with BDS signal receiving technology and achieve integrated monitoring of atmospheric parameters in both the troposphere and ionosphere. In eastern China, the average distance between stations will be 50-80 km, while in the western regions, it will be about 100 km. Currently, a relatively complete observation quality control procedure and the indices for the observation data have been established, with the uncertainty of precipitable water vapor (PWV) operational products being less than 2 mm, meeting the requirements of the optimal cost-effectiveness indicators proposed by World Meteorological Organization (WMO). These products have played a significant role in operational numerical weather prediction, weather diagnosis, and other meteorological services. Finally, this paper gives a perspective on the upgrade, optimization, and product applications of the network. This study can provide valuable reference basis for the development of the ground-based GNSS/MET water vapor observation network in China.

Key words: GNSS/MET; precipitable water vapor; observation network; meso- and micro-scale weather systems

引 言

水汽是地球大气中主要的自然温室气体,在全球能量收支过程中扮演关键角色。从 1990 年代开始,全球大气可降水量(PWV)呈增加趋势,增加率约 $7\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (Douville et al., 2021),同期极端日降水量增加率与 PWV 增加率相当,而同期极端小时降水量增加率可达 PWV 增加率的 2 倍 (Guerreiro et al., 2018),进而可导致更加频繁的极端降水和洪涝事件。精密水汽监测是极端降水精准预报的重要条件之一。世界气象组织(WMO)全球气候观测系统(GCOS)计划将 PWV 列为基本气候变量,要求获取高质量、连续且均一的 PWV 观测数据 (GCOS, 2015),地基全球卫星导航系统气象(GNSS/MET)水汽观测技术是实现该目标的重要手段。Bevis 等 (1992) 在总结前人研究成果的基础上,首次提出了全球定位系统气象(GPS/MET)概念。紧随美国全球定位系统(GPS),俄罗斯格洛纳斯系统(GLONASS)、欧洲伽利略系统(Galileo)、中国北斗卫星导航系统(BDS)等三个全球卫星导航系统(GNSS)也实现全球导航、定位和授时等服务 (Teunissen and Montenbruck, 2017),从而使得单一的 GPS 气象(GPS/MET)拓展为 GNSS/MET。

GNSS 卫星发射的 L 波段 (1 164~1 300 MHz, 1 559~1 610 MHz) 无线电信号经过地球大气对流层时,由于对流层折射引起的传播速度变化及传播路径弯曲而产生附加时延,该附加时延折算成光路后的路径长度称为对流层延迟,对该延迟量的探测精度可达毫米数量级。大气分子可分为极性分子(如水汽、一氧化碳等)和非极性分子(如氮气、氧气和氩气等),极性分子对 L 波段信号的折射率约为非极性分子的 20 倍,水汽是大气中最主要的极性分子。天顶方向的对流层延迟即天顶对流层延迟(ZTD)可

分成静力延迟和湿延迟,湿延迟与 PWV 之间具有精密换算关系,基于此可获得毫米精度的 PWV 观测值 (Bevis et al., 1992)。实际上,GNSS/MET 具有更广的涵义,即利用 GNSS 信号进行气象要素探测,包括探空测风 (Nash et al., 2011)、地基探测大气水汽和电离层电子总含量等变量以及天基探测大气折射率、温度、湿度、电子密度廓线和地表土壤湿度、海表海风海浪等变量 (Teunissen and Montenbruck, 2017)。

地基 GNSS/MET 水汽探测技术具有全天候、高精度、高时间分辨率(可达分钟级)、均一性好和低成本等独特优势 (Rocken et al., 1993; Wolfe and Gutman, 2000; Guerova et al., 2016)。国际 GNSS 服务组织(IGS)发布的全球跟踪站 ZTD 最终产品误差为 4 mm (<https://igs.org/products/#troposphere>),对应的 PWV 误差为 0.6~0.8 mm (Ning et al., 2016)。近年来该技术广泛应用于对流层水汽探测,事实证明其为 PWV 高精度业务探测重要技术之一 (Jones et al., 2020),满足 GCOS 计划技术可行和经济可行的要求,被列为首要水汽观测技术手段 (GCOS, 2015)。

近年来地基 GNSS/MET 水汽观测产品已被广泛应用于数值天气预报 (Guerova et al., 2016; 梁宏等, 2020; Gong et al., 2023)、短临预报 (Bonafoni et al., 2019; 安琳等, 2025)、气候变化监测 (Mear et al., 2018; 吴尧等, 2024)、暴雨和冰雹监测 (李如琦等, 2022; 武冰路等, 2023)、干旱监测 (Zhao et al., 2020, 2023)、高大山脉水汽变化特征研究 (刘晶等, 2024)、探空和卫星观测检验 (Liu et al., 2006; Zhang et al., 2019) 等方面。此外,在加强地基 GNSS/MET 水汽和电离层观测基础上,还可进一步挖掘其在积雪深度、土壤湿度和雪水当量等变量观测中的应用潜力 (WMO, 2019)。北斗卫星导航系统(以下简称“北斗”)是中国着眼于国家安全和经济社会发展需要,

自主建设、独立运行的卫星导航系统。2022 年国务院将气象列为“北斗”赋能的重点行业,将“北斗”深入融入气象信息基础设施(国务院新闻办公室,2022)。GNSS/MET 水汽观测作为“北斗”气象行业应用的重点方向,该观测站网如何建设、布局和发展以及如何结合气象部门优势和特点发挥其最大价值是目前面临的重要问题。针对这些问题,本文回顾了国内地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设进展,总结目前业务上面面临的挑战,展望未来发展,以期为该观测业务发展提供参考依据。

1 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设历程概述

我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网经历了科学试验、区域业务网建设和国家级业务网建设 3 个阶段。

(1) 科学试验阶段。北京大学和中国科学院上海天文台等单位率先基于地基 GPS/MET 水汽探测基本原理和方法开展本地化试验(李成才等,1999;王小亚等,1999)。2000 年国家卫星气象中心、北京大学和北京市气象局在北京联合开展了地基 GPS/MET 水汽观测试验(曹云昌等,2005),2002 年国家卫星气象中心和北京大学在安徽联合开展了地基 GPS/MET 水汽观测试验(毕研盟等,2004;曹云昌等,2005)。

(2) 区域业务网建设阶段。2002 年由中国科学院上海天文台牵头的上海地区 GPS 综合应用网正常运行,该网由 14 个 GPS 水汽观测站组成,服务涉及气象水汽观测、大地测量、地壳形变、城市地理信息等领域(宋淑丽和朱文耀,2003;宋淑丽,2004)。2006 年中国气象局北京城市气象研究所牵头建立了 14 个 GPS 水汽观测站,并通过共建和共享等方式整合了京津冀等地各部门的地基 GPS 气象站网资料,实现组网运行(张朝林,2006)。2005—2009 年中日科学家联合开展了中日合作 JICA (Japan International Cooperation Agency) 项目,建成了青藏高原大气综合监测网,其中包括由 26 个 GPS 水汽观测站组成的水汽观测网(张人禾和徐祥德,2012)。

(3) 国家级业务网建设阶段。2008 年中国气象局通过台站自建、台站共建、数据共享等多种方式,建立了国家级地基 GNSS/MET 水汽观测业务观测网络,并发布了名为《GPS/MET 数据传输规范》(气发〔2008〕367 号)的数据传输规范文件,为观测数据传输奠定了业务基础。2010 年随着《全球定位系统气象观测 (GPS/MET) 站观测规范》(气测函〔2010〕350 号)这一业务规范文件的发布,地基 GNSS/MET 水汽观测站网正式成为我国综合气象观测系统的重要业

务组成部分,其站点数量从 2008 年的 87 站增加至 2024 年底的 1 000 余站(图 1),其中 2010 年中国地震局联合中国气象局、中华人民共和国教育部和中国科学院等 5 部委完成了中国大陆构造环境监测网络建设,当年站点数量快速增加(甘卫军等,2012)。另外,2023 年由于部分省份共享台站设备老化、数据传输链路故障等原因,观测站点数量有所下降。从其多年站点分布变化(图 2)看,2010 年站点较少(图 2a),具有区域集中特征,东部地区主要集中在京津冀、山西、湖北、江西和江苏等地,西部地区站点分布较为零散。另外,通过国际援建项目,我国在境外老挝和缅甸也建立了一些观测站点。到 2015 年,站点分布发生显著变化(图 2b),东部地区大部分省份实现观测网络覆盖,西部地区站点密度也明显增加,但个别省份还是站点稀少,例如浙江、陕西、广西和贵州等。2020 年,华南站点密度增加,特别是广东省(图 2c)。2024 年,华东站点密度明显变化,安徽省大部分站点因跨部门共享问题退出业务(图 2d)。2022 年之前,地基 GNSS/MET 站网主要采用美国 TRIMBLE、瑞士 LEICA、日本 TOPCON 等厂家生产的高精度大地测量型设备,GNSS 接收机型号包括 TRIMBLE NETR9、LEICA GR25、TPS NET-G3A 等,GNSS 天线为扼流圈天线,型号包括 TRM59900.00、LEIAR25.R4、TPSCR.G3 等,以 GPS 信号为主要观测技术体制。此外,气温、气压等观测数据从同址或邻近的气象站获取。

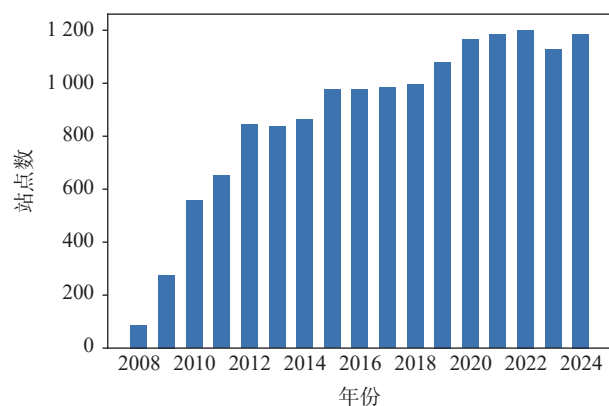


图 1 2008—2024 年我国地基 GNSS/MET 水汽观测站点数逐年变化

Fig. 1 Annual variations of the total number of ground-based GNSS/MET water vapor observation stations in China from 2008 to 2024

2020 年 7 月我国独立自主研制的 BDS 正式向全球提供导航、定位和授时等服务,其应用在许多领域逐步成熟,国家大力推动“北斗”在交通、农业、气象等重点行业的规模化应用。按照《综合气象观测业务发展“十四五”规划》的部署要求,新建的地基

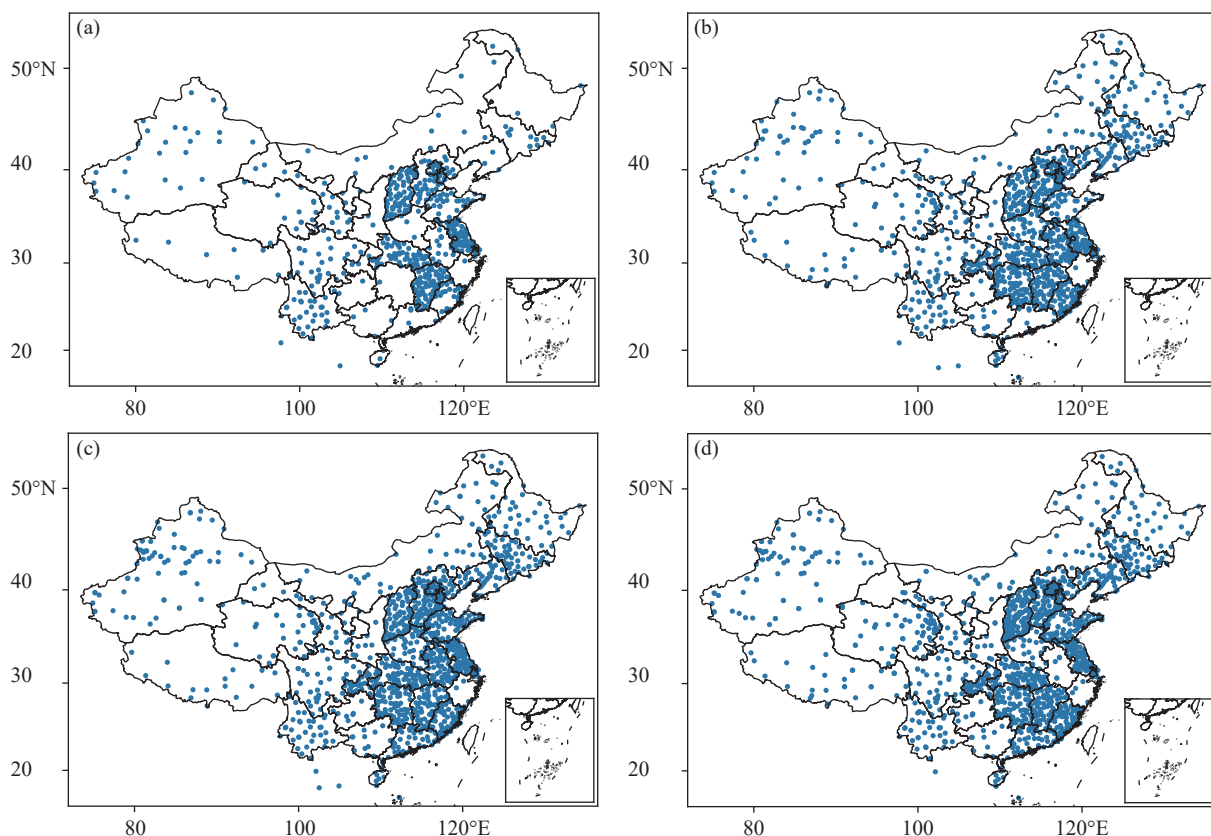


图 2 2010 年 (a)、2015 年 (b)、2020 年 (c) 和 2024 年 (d) 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站点 (实心圆点所示) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the ground-based GNSS/MET water vapor observation stations (shown by solid dots) in China in (a) 2010, (b) 2015, (c) 2020, and (d) 2024

GNSS/MET 水汽观测站点全部采用国产设备, 包括 GNSS 大地测量型接收机、扼流圈天线和温压湿 3 要素气象仪, 以 BDS 信号为主要观测技术体制, 且实现水汽和电离层综合一体化观测。在国家级气象站新建或改造地基 GNSS/MET 水汽观测站点 1 650 余个, 2025 年底全国地基 GNSS/MET 水汽观测站点超过 2 300 个, 将极大改善站网布局以及对流层水汽和电离层活动观测业务能力。

在新一代地基 GNSS/MET 水汽观测站点建设过程中, 充分借鉴国际和国内 (如中国大陆构造环境监测网络) 相关站网建设的成功经验, 结合气象行业的实际需求、条件以及气象站环境法律保护的优势, 采取由钢筋混凝土浇筑的高标准土层墩作为观测基础 (图 3), 严格保护观测基础设施, 针对对流层水汽、电离层活动和地下水储量等相关气候变量, 可开展长达百年的连续、稳定和均一观测, 高质量的观测数据还可以共享到其他部委, 实现一网多用。新建站点均具有 GNSS 全部民用信号接收能力, 具体信号频点、通道和观测码说明见国际 GNSS 服务组织 (IGS) 发布的技术文件 (IGS, 2023)。目前提供服务的在轨 GNSS 卫星总数量为 110 余颗, 其中 GPS 卫星数量为 29 颗, GLONASS 卫星数量为 19 颗, Galileo 卫星

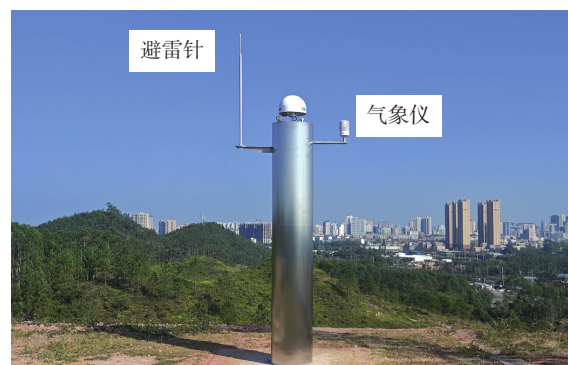


图 3 广西钦州新一代地基 GNSS/MET 水汽观测站 (避雷针位于正北, 气象仪位于正南)

Fig. 3 New generation ground-based GNSS/MET station at Qinzhou in Guangxi province (The lightning rod is located to the north, and the weather instrument is located to the south)

数量为 25 颗, BDS 卫星数量为 39 颗。BDS 由地球静止轨道卫星、倾斜地球同步轨道卫星和中圆地球轨道卫星组成, 而 GPS、GLONASS 和 Galileo 均由中圆地球轨道卫星组成。

然而, 目前我国东部地基 GNSS/MET 站点较密集区域站点平均间距为 50~80 km, 西部地区约为 100 km, 我国站网布局与欧美日等发达地区或国家仍然存在不小差距 (表 1), 尚未满足 WMO 推荐的地

表 1 中国与世界发达地区或国家的地基 GNSS/MET 站网密度对比

Table 1 Comparison of the ground-based GNSS/MET station density between China and developed regions or countries in the world

地区或国家	台站数		站间距/km		覆盖率及站点分布情况		是否满足WMO要求*
	2023年	2025年	2023年	2025年	2023年	2025年	
中国	1 126	>2 300	东部50~80; 西部>150	东部50~80; 西部100	46%; 站点分布 不均匀	93%; 站点分布 较均匀	否
美国	—	—	约20	约20	接近100%; 均匀	接近100%; 均匀	是
日本	—	—	约20	约20	100%; 均匀	100%; 均匀	是
欧盟	—	—	约20	约20	100%; 均匀	100%; 均匀	是

注: *WMO建议地基GNSS/MET站网在关键区域实现中小尺度系统覆盖,即站点平均间距约20 km;“—”表示无数据。

基 GNSS/MET 水汽观测覆盖中小尺度天气系统的需求 (WMO, 2019)。

2 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设进展

2.1 观测数据质量控制

地基 GNSS/MET 水汽观测站网能否发挥应有的观测效益取决于四个方面: 台站原始观测数据 (伪距和载波相位等) 质量; GNSS 卫星轨道和钟差产品的准确性; ZTD 和 PWV 等水汽产品反演业务系统的可靠性; 水汽产品质量控制水平。

台站原始观测数据质量取决于设备性能、探测环境 (包括净空环境和电磁环境)、数据传输、运行保障和计量检定等因素。GNSS 卫星轨道和钟差产品的准确性取决于各 GNSS 分析中心的产品服务能力。水汽产品反演业务系统的可靠性依赖于模型对不合格观测数据剔除能力、观测数据预处理效率、接收天线和卫星天线相位中心订正模型准确配置、数据处理策略和系统自纠错能力等。水汽产品质量控制水平取决于质量控制流程设计和质量控制方法。

基于伪距和载波相位观测量解算 ZTD 时, 常用的解算方法包括双差网解、双差基线解和精密单点定位。国际知名数据处理软件包括武汉大学研发的 PANDA (Liu et al., 2003; Shi et al., 2008)、美国麻省理工学院牵头研发的 GAMIT (Herring et al., 2018)、瑞士伯尔尼大学研发的 BERNESSE (Dach et al., 2015) 等。在原始观测数据质量良好的条件下, 如果数据处理参数设置合理, 不同数据处理软件解算的 ZTD 估计结果基本一致。近年来武汉大学还开发了开放访问的 GNSS 气象集成工具 (GMET), 成为大地测量和气象应用研究的重要辅助手段 (Zhang et al., 2024)。

为提升综合气象观测系统的数据质量, 2023 年中国气象局发布了《综合气象观测系统仪器装备运行质量通报办法》(气测函〔2023〕7 号), 地基 GNSS/

MET 水汽观测纳入业务质量考核。同时, 参考国际相关科学研究以及业务技术应用成果 (IGS, 2015; Wang et al., 2019; Jones et al., 2020), 结合观测业务实际情况, 针对原始观测数据和水汽产品数据, 研制了质量控制方法和指标。GNSS/MET 原始观测包括观测文件、导航文件和气象文件 3 类文件, 在这些文件的数据格式符合要求的前提下, 高度截止角取 10° 、采样频率为 30 s 的 1 h 长度观测文件和导航文件中的数据质量需满足数据完整率、数据有效率、多路径误差以及周跳比等指标。气象文件中的气压和气温等要素观测质量需满足气象行业标准 (中国气象局, 2020), 业务系统解算 ZTD 和 PWV 产品需满足质量控制指标 (表 2), 这些指标在发现观测业务问题中发挥了重要作用。近年来, 通过中国气象局各级探测业务部门联动, 有效解决了绝大部分站点的 GNSS/MET 观测质量问题, 业务考核站中的问题站点数从 2023 年初约 130 站减少至 2024 年底约 5 站, 其观测数据质量大幅提升。

经过多年发展, 地基 GNSS/MET 水汽观测业务质量控制流程日益完善 (图 4)。首先, 对 GNSS/MET 台站上传的观测文件、导航文件和气象文件进行数据格式检查, 分别形成数据格式合格的伪距、载波相位、原始信号强度、广播星历、气温和气压观测数据。其次, 结合广播星历, 对伪距、载波相位、原始信号强度观测数据开展历元完整率检查、观测有效率检查、多路径误差检查、载噪比检查和周跳比检查, 形成合格的观测文件和导航文件。基于此, 针对气压和气温观测数据, 进行缺测检查、界限值检查、时间一致性检查, 形成合格的气象文件。最后, 基于质量控制后的伪距、载波相位观测数据, 结合 IGS 分析中心发布的卫星轨道和钟差产品文件以及辅助文件 (包括极移、章动和差分码偏差等文件), 利用双差网解、双差基线解或精密单点定位方法解算 ZTD, 进而结合质控后的气压和气温数据计算 PWV, 最终利用

表 2 我国地基 GNSS/MET 水汽观测质量控制指标及要求

Table 2 Quality control indicators and requirements for water vapor observation from the ground-based GNSS/MET stations in China

指标	定义	要求
数据完整率	在某段时间内,接收机观测数据的实际时间长度与理论时间长度的比值	$\geq 90\%$
数据有效率	在某段时间内,接收机观测记录中所有观测频率(信号)观测值均完整的历元数据量与理论历元数据量的比值	$\geq 80\%$
各频点多路径误差	由非直达导航信号引入的测距误差	≤ 0.5 m
各频点载噪比	载波信号功率与噪声功率谱密度之比	≥ 35 dBHz
周跳比	在某段时间内,接收机观测数据的实际历元数据量与发生周跳历元数据量的比值	≥ 100
ZTD	天顶对流层延迟变化范围	1 000~3 000 mm
ZTD_sigma*	天顶对流层延迟内符合误差	≤ 18 mm
Δ ZTD	1 h内天顶对流层延迟变化绝对值	≤ 100 mm
气压**	气压有效范围	300 hPa~1 100 hPa
气压变化**	2 h内气压变化绝对值	≤ 10 hPa
气温**	气温有效范围	-80 $^{\circ}$ C~60 $^{\circ}$ C
气温变化**	2 h内气温变化绝对值	8 $^{\circ}$ C
PWV	大气可降水量变化范围	0~100 mm
Δ PWV	1 h内大气可降水量变化绝对值	≤ 15 mm

注: *表示ZTD内符合误差阈值是基于双差网解技术解算结果统计得出,对于双差基线解或精密单点定位解算的ZTD,其内符合误差阈值要小一些; **依据中国气象局(2020)。

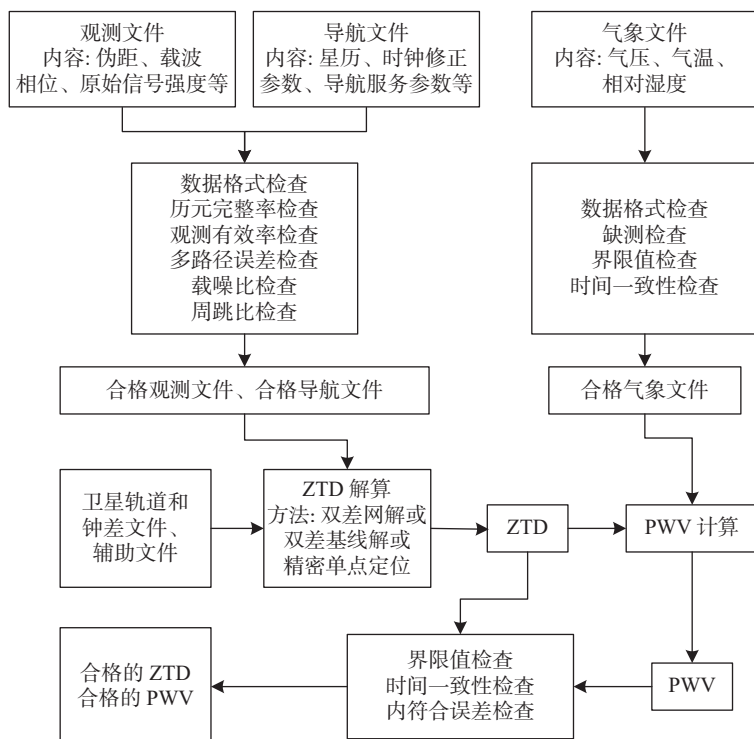


图 4 我国地基 GNSS/MET 水汽观测质量控制流程图

Fig. 4 Flowchart of quality control of the ground-based GNSS/MET water vapor observation in China

界限值检查、时间一致性检查和内符合误差检查等方法对 ZTD 和 PWV 进行质量控制,形成合格的 ZTD 和 PWV 业务产品。

图 5 给出 2024 年 11 月 20 日 02 时(世界时,下同)地基 GNSS/MET 观测数据质量监控结果。从中

可见,除山东有些台站和 1 个境外站的历元完整率低于 70% 之外(图 5a),全国绝大部分台站的历元完整率大于 95%,数据传输故障是导致历元完整率低的主要原因。山东、四川部分台站的数据有效率低于 80%,全国大部分台站的数据有效率超过 90%,大

部分超过 95% (图 5b)。历元完整率低会导致数据有效率低, 另外接收机内部伪距或载波相位解码软件

故障也是导致数据有效率低的重要原因。江西、青海、内蒙、新疆个别台站的多路径效应误差超 0.5 m,

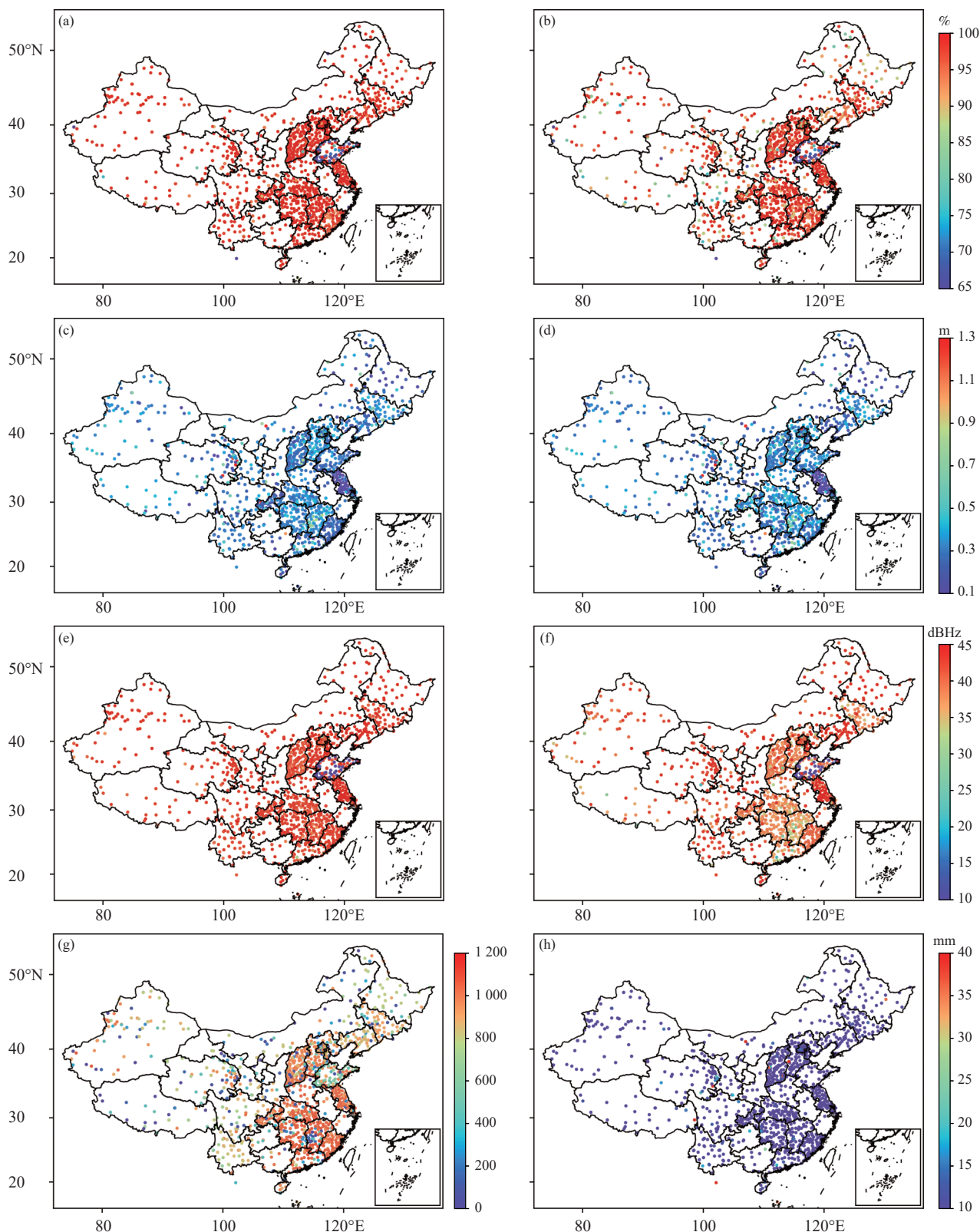


图 5 2024 年 11 月 20 日 02 时我国地基 GNSS/MET 观测数据的数据完整率 (a)、数据有效率 (b)、L1 频点 (c)、L2 频点 (d) 多路径误差, L1 频点 (e)、L2 频点 (f) 载噪比, 周跳比 (g) 和 ZTD 内符合误差 (h) 分布

Fig. 5 Distribution of (a) data integrate rate, (b) data validity rate, multipath errors at (c) L1 frequency and (d) L2 frequency, carrier-to-noise ratios at (e) L1 frequency and (f) L2 frequency, (g) cycle slip, and (h) ZTD formal error of China's Ground-based GNSS/MET observation data at 02:00 UTC on November 20, 2024

估计这些台站受到较严重的遮挡或电磁干扰,但全国大部分台站均满足小于 0.5 m 的要求(图 5c—d)。对于载噪比(图 5e—f),山东部分台站较低,主要原因是省级数据共享单位在数据转发过程中数据编码错误,而全国绝大部分台站均满足 ≥ 35 dBHz 的要求。对于周跳比(图 5g),江西、内蒙、西藏和新疆等省个别台站小于 100,大部分台站满足 ≥ 100 的要求。ZTD 内符合误差分布(图 5h)显示,大部分台站小于 15 mm,质量良好,个别台站结果较差,山东省有些台站缺测,这是因为这些台站数据质量差,在解算 ZTD 产品过程中模型无法收敛。需要强调的是,许多台站的观测数据来自于省级测绘部门的共享数据,该时次大部分问题台站并非纳入业务考核的台站。其他观测时次的观测数据质量基本类似(图略)。整体上,我国地基 GNSS/MET 观测数据质量较高,若采用双差网解技术,在 GNSS 轨道产品精确的前提下,原始观测数据(伪距和载波相位观测值等)质量决定 ZTD 估计结果的精度。因此,在地基 GNSS/MET 观测业务中,须严格保证原始观测数据质量。

2.2 水汽观测产品误差评估

以 ERA5 再分析资料计算的 ZTD 和 PWV 为参考,评估了 2023 年地基 GNSS/MET 相应产品的精度。基于 ERA5 再分析资料计算 ZTD 和 PWV 的方

法见文献(Haase et al., 2003, Zhang et al., 2019)。对比地基 GNSS/MET 水汽产品与 ERA5 再分析资料发现,全国误差分布较均匀,大部分台站 ZTD 和 PWV 平均偏差分别为 $-5\sim 12$ mm 和 $-2\sim 2$ mm(图 6a、b),均方根误差分别小于 18 mm 和 3 mm(图 6c、d),西部地区误差较小,东部误差较大(图 6a—d),这与东部地区 PWV 较大且变化剧烈有关。另外,以 2023 年全国同址探空站观测的 ZTD 和 PWV 为参考,作进一步评估发现,误差空间分布特征与以 ERA5 再分析资料做比较的误差空间分布特征相似,全国误差分布较均匀(图 7a、b),ZTD 和 PWV 的均方根误差分别小于 15 mm 和 2.5 mm(图 7c、d),整体上西部地区 ZTD 和 PWV 的均方根误差均小于 12 mm 和 2 mm(图 7),东部地区均方根误差相对较大,这与东部地区 PWV 较大且变化剧烈及探空仪漂移有关。

2.3 水汽观测产品在天气预报业务中的应用

地基 GNSS/MET 观测的 ZTD 和 PWV 产品在天气预报业务中的应用主要包括在数值天气预报模式中的同化应用和在天气会商中的应用。实现 PWV 产品在中国气象局业务数值预报模式(CMA-GFS 和 CMA-MESO)中业务同化是不断迭代的过程。2013—2014 年完成了基于区域模式 CMA-MSEO(V4.0)的 PWV 产品同化影响试验和评估,实现了 PWV 产品

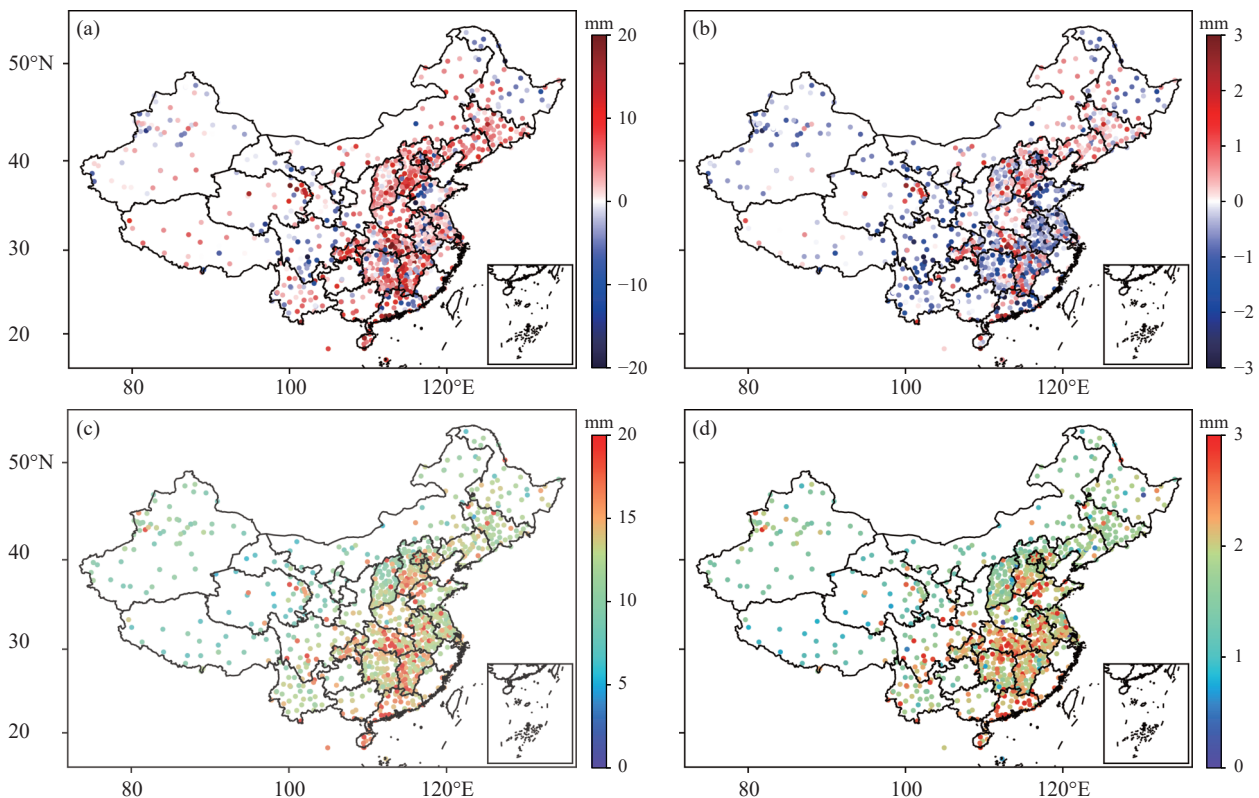


图 6 我国地基 GNSS/MET 观测与 ERA5 再分析资料的 ZTD(a、c)、PWV(b、d) 平均偏差(a、b) 和均方根误差(c、d) 分布
Fig. 6 The (a, b) average deviations and (c, d) root mean square errors of (a, c) ZTD and (b, d) PWV between ground GNSS/MET observation and ERA5 reanalysis data in China

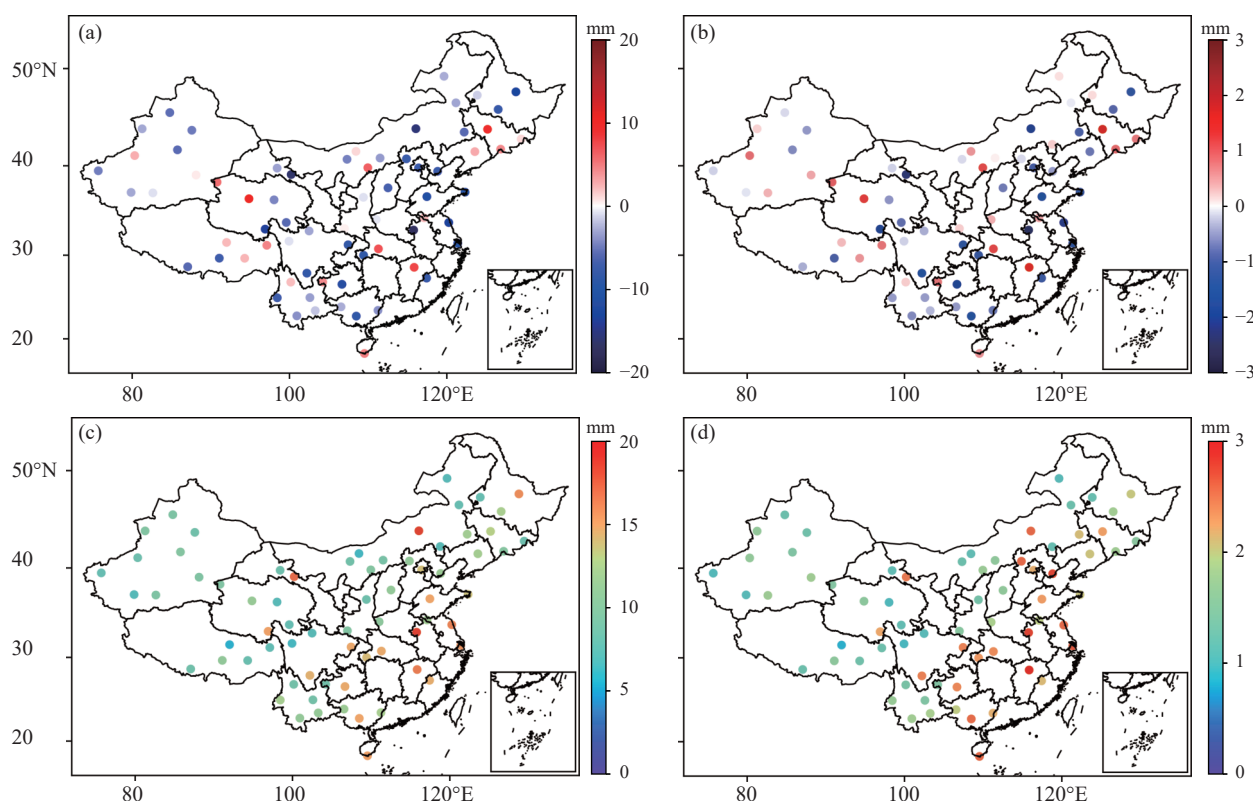


图7 我国地基 GNSS/MET 观测与探空观测的 ZTD (a, c)、PWV(b, d) 平均偏差 (a, b) 和均方根误差 (c, d) 分布

Fig. 7 The (a, b) average deviations and (c, d) root mean square errors of (a, c) ZTD and (b, d) PWV between China's ground-based GNSS/MET observations and radiosonde observations in China

在区域模式中的业务同化应用 (Liang et al., 2015)。2017—2018 年基于全球模式 CMA-GFS 研发了 PWV 产品预处理模块,开展了观测算子正确性检验,完成了 PWV 产品同化影响试验和评估,实现了 PWV 产品在全球模式中的准业务同化应用。2019—2020 年优化了 PWV 产品的质量控制算法,实现了 PWV 产品在全球模式中的业务同化应用。目前水汽观测产品是中国气象局业务数值预报模式日常同化的重要观测数据种类之一,质控后的 PWV 产品同化率较高。为了进一步验证 PWV 同化应用效果,本文利用 2023 年 7 月份 PWV 产品,基于 3 km 水平分辨率的 CMA-MESO (V5.1),采用与业务系统相同配置,开展全观测同化试验,结果表明水汽观测资料同化对未来 3 h 累积降水预报评分 (即公平成功指数) 改进显著 (图 8)。另外,在中央气象台早间天气会商以及极端强降水短临预报方面, PWV 产品也发挥了重要业务价值, PWV 二维场与 850 hPa 风场叠加产品是目前预报员早间会商中的常用产品。

3 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设面临的挑战

目前我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设主要面临如下挑战:

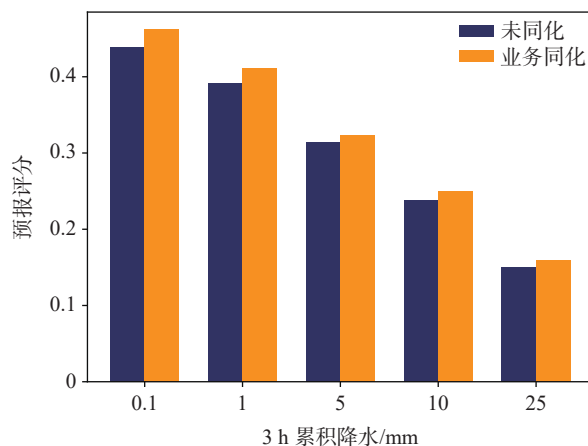


图8 CMA-MESO (V5.1) 同化与未同化 PWV 产品的 3 h 累积降水预报评分

Fig. 8 Forecast scores of 3-h accumulated precipitation by CMA-MESO (V5.1) assimilated and unassimilated PWV product

(1) 观测站网空间密度不够。WMO 利用观测系统能力分析与评估工具 (OSCAR) 对 PWV 观测需求进行了滚动评估,评估指标主要包括最低阈值、最优性价比和最优目标 (OSCAR, 2024)。评估结果表明,对于全球数值预报和实时监测需求,最优性价比和最优目标对应的空间分辨率指标分别为 50 km 和 15 km;对于区域高空间分辨率数值预报需求,最优性价比和最优目标对应的指标分别为 5 km 和 0.5 km;

对于临近预报需求,最优性价比和最优目标对应的指标分别为 10 km 和 5 km。2025 年在我国东部地区实现 50~80 km 空间分辨率站网覆盖。未来需要进一步提升地基 GNSS/MET 水汽观测站网密度,特别是水汽输送通道、重大流域和重要山脉迎风坡等关键区域的站网密度。

(2) 观测产品的精度需要进一步提升。基于 OSCAR 评估结果,对于气候变化监测,最优性价比和最优目标对应的 PWV 观测不确定度指标分别为 0.5 mm 和 0.1 mm,最优性价比对应的 PWV 观测稳定性指标为 $0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;对于全球数值预报和实时监测、区域高分辨率数值预报以及临近预报,最优性价比和最优目标对应的指标分别为 2 mm 和 1 mm。目前实时业务 PWV 观测的不确定度为 1~2 mm。通过改善观测设备对信号的跟踪能力,进一步提升原始观测数据质量,有助于降低 PWV 观测的不确定度。

(3) 观测设备抗电磁干扰能力不能满足复杂电磁环境条件下正常工作的需求。观测设备的信号捕获灵敏度和信号跟踪灵敏度分别要求优于 -136 dBm 和 -139 dBm (中国卫星导航系统管理办公室, 2023)。GNSS 卫星工作信号频段为 1 164~1 300 MHz、1 559~1 610 MHz,由于经济和军事等活动对通讯需求快速增加,这些频段受到电磁干扰的情况时有发生,导致观测设备无法正常捕获或跟踪信号,难以有效剔除干扰信号,包括带内干扰和带外干扰,是目前地基 GNSS/MET 水汽观测设备改进遇到的重要挑战 (Teunissen and Montenbruck, 2017)。国际上,比利时著名的 GNSS 设备生产厂家 Septentrio 在抗电磁干扰技术方面处于领先地位,值得参考借鉴。

(4) 观测站网一网多用的理念欠缺。WMO 发布的 GCOS 计划建议地基 GNSS/MET 站网应具备一网多用的功能,可同时服务气象、地震、测绘和交通等行业 (GCOS, 2015)。国际上著名的区域站网均采用了这一理念,例如美国板块边界观测网络 (PBO) (Herring et al., 2016; Bock et al., 2023)、日本国土地理院观测站网 (GEONET) (Kometani et al., 2005) 和欧洲区永久观测站网 (EPN) (Jones et al., 2020) 等。在 2021 年之前自建的地基 GNSS/MET 站点重点考虑水汽监测功能,对其他功能考虑不够,未来需要建设综合其他功能的气象观测站网,进而使其社会经济价值最大化。

(5) 观测产品开发和产品应用研究不足。我国地基 GNSS/MET 观测数据积累接近 20 a,该数据集对于区域大气再分析资料构建、干旱指数构建和极端降水事件研究等具有重要价值。利用原始观测数据中的反射信号探测陆表参数,如积雪深度和土壤湿

度等,其算法需进一步优化。利用更高密度站网的 PWV 观测数据改进区域高空间分辨率数值模式预报水平的方法需进一步改进。

4 我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网发展展望

水汽是成云致雨的基本条件,空气饱和成云过程可分为增湿过程(如水汽输送等)、冷却过程(如气团抬升、大尺度降温等)、混合过程(如冷暖气团交汇、湍流夹卷等) (Stull, 2015)。暴雨形成的关键条件包括充足水汽供应、强烈上升运动和足够长持续时间 (Neelin et al., 2022)。天气系统的高度非线性使得数值天气预报对初始条件高度敏感 (Lorenz, 1963),增加大气精密监测数据供给是提升初始条件准确度的关键途径。技术可行和经济可行是气象装备实现规模化应用的重要前提。地基 GNSS/MET 水汽观测技术具有全天候、低成本、高精度和高时间分辨率(可达分钟级)等优点 (Jones et al., 2020),这符合“技术可行和经济可行”的要求,其作为 PWV 精密监测的锚定技术手段,可为极端降水预报改进提供重要支撑。针对我国地基 GNSS/MET 站网未来发展,展望如下:

在装备发展和站网布局方面,地基 GNSS/MET 观测设备将全部实现国产化和“北斗”化,借助气象高质量发展战略实施的契机,进一步改进装备的功能和性能,提升原始观测信号质量,进而提高 PWV 的观测精度。同时,随着社会发展,电磁环境日益复杂,增强抗电磁干扰能力是未来设备性能改进的重要点。我国地基 GNSS/MET 水汽观测站网将进一步增强重要水域流域、山脉迎风坡、河谷、夏季风水汽输送路径 (图 9) 等关键区的水汽监测能力。此外,发展志愿气象观测,统筹利用社会化观测资源(如铁塔、5G 基站和城市楼宇观测等),升级优化全国地基 GNSS/MET 水汽观测站网也势在必行。另外,新建地基 GNSS/MET 水汽观测站网建设需借鉴国际上一网多用的设计思想,采用高标准土层墩作为观测基础,瞄准百年连续观测,除满足天气和气候变化监测需求外,未来还可与地震等部门共享高质量基础数据,充分发挥该站网的功能。

在观测产品开发方面,要把握几个重点:一是发展融合人工智能的组网层析三维大气水汽业务关键技术,实现全国关键区域三维立体大气湿折射率或水汽密度实时监测,结合风廓线雷达和天气雷达等组合的三维风场观测,实现水汽输送精密监测,特别是提升与极端降水密切相关的低空急流水汽输送的

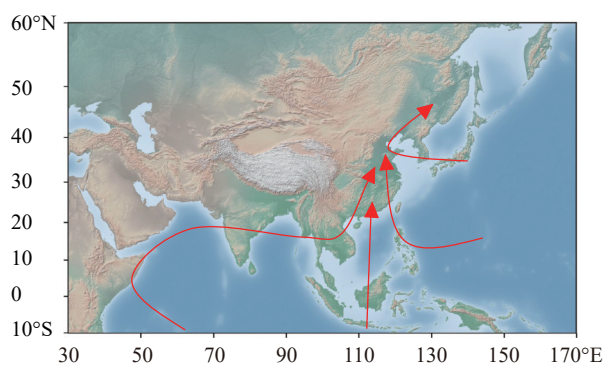


图9 夏季风水汽输送主要路径(引自丁一汇等, 2020)(红色箭头表示水汽输送路径)

Fig. 9 Main transmission paths of summer monsoon moisture transport (Adapted from Ding et al., 2020) (red arrow indicates water and steam transmission path)

监测能力(丁一汇, 2019; 孟智勇等, 2019; 丁一汇等, 2020)。二是利用多种方法(如精密单点定位、双差网解、双差基线解)开展历史原始数据重处理,开展 PWV 时间序列补插和均一化处理,建立 PWV 科学数据集。三是发展基于反射信号监测积雪深度、雪水当量、表层土壤湿度和植被含水量等陆表参量(Wan et al., 2015, 2022; Larson, 2016; WMO, 2019; Yang et al., 2019)以及基于载噪比监测冰雹(Aichinger-Rosenberger et al., 2023)等业务关键技术,不断挖掘原始观测数据(伪距、载波相位和载噪比等)应用潜力(Liu et al., 2022),提升观测网络的气象应用价值。

其产品应用方面,要将重点放在服务数值天气预报、天气诊断会商、人工影响天气、干旱监测以及年代际时间尺度水汽变化精密监测上。在 GNSS 轨道和钟差产品精确的前提下,原始观测数据质量决定 ZTD 和 PWV 产品的精度,在观测业务中必须严格保证原始观测数据质量。总之,未来地基 GNSS/MET 水汽观测网络将在气象业务中发挥更大的作用,并扩大“北斗”在气象行业中的应用规模。

参考文献 (References):

- 安琳,权晨,沈晓燕,等.2025.青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析[J]. *暴雨灾害*,44(1):41–51. An L, Quan C, Shen X Y, et al. 2025. Analysis of water vapor characteristics of the “8-18” short-duration heavy rainfall event in Qinghai [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(1): 41–51 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–240
- 毕研盟,毛节泰,杨光林,等.2004.地基 GPS 遥感观测安徽地区水汽特征[J]. *气象科技*,32(4):225–228. Bi Y M, Mao J T, Yang G L, et al. 2004. Remote sensing of atmospheric water vapor characteristics in Anhui province using ground-based GPS [J]. *Meteorological Science and Technology*,32(4):225–228 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.2004.04.006
- 曹云昌,方宗义,夏青.2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J]. *应用气象学报*,16(1):54–59. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,16(1): 54–59 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7313.2005.01.006
- 丁一汇,柳艳菊,宋亚芳.2020.东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. *水科学进展*,31(5):629–643. Ding Y H, Liu Y J, Song Y F. 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China [J]. *Advances in Water Science*,31(5):629–643 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.001
- 丁一汇.2019.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. *暴雨灾害*,38(5): 395–406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(5):395–406 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.05.001
- 甘卫军,李强,张锐,等.2012.中国大陆构造环境监测网络的建设与应用[J]. *工程研究*,4(4):324–331. Gan W J, Li Q, Zhang R, et al. 2012. Construction and application of tectonic and environmental observation network of China's mainland [J]. *Journal of Engineering Studies*, 4(4):324–331 (in Chinese). doi:10.3724/SP.J.1224.2012.00324
- 国务院新闻办公室.2022.新时代的中国北斗[Z]. [2022-11-04]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/04/content_5724523.htm. The State Council Information Office of the People's Republic of China. 2022. China's BeiDou Navigation Satellite System in the New Era [Z]. [2022-11-04]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/04/content_572-4523.htm (in Chinese)
- 李成才,毛节泰,李建国,等.1999.全球定位系统遥感水汽总量[J]. *科学通报*,44(3):333–336. Li C C, Mao J T, Li J G, et al. 1999. Remote sensing atmospheric integrated water vapor using ground-based GPS [J]. *Science Bulletin*,44(3):333–336 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0023–074X.1999.03.024
- 李如琦,李桢宇,李海花,等.2022.塔克拉玛干沙漠南缘两次极端暴雨的气流模型与水汽输送特征[J]. *沙漠与绿洲气象*,16(6):1–10. Li R Q, Li A B, Li H H, et al. 2022. Air flow model and water vapor transport characteristics of two extreme rainstorms in the southern edge of Taklimakan Desert [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,16(6):1–10 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.06.001
- 中国卫星导航系统管理办公室.2023.全球卫星导航系统 (GNSS) 定向设备性能要求及测试方法:BD 420073-2022 [S] China Satellite Navigation System Management Office. 2023. Performance Requirements and Testing Methods for Global Navigation Satellite System (GNSS) Directional Equipment:BD 420073-2022 [S]. Beijing:China Standard Press (in Chinese)
- 梁宏,曹云昌,梁静舒,等.2020.地基 GNSS 遥感探测气象应用[J]. *中国地震*,36(4):744–755. Liang H, Cao Y C, Liang J S, et al. 2020. A review of the ground-based GNSS remote sensing in meteorological applications [J]. *Earthquake Research in China*,36(4):744–755 (in Chinese)
- 刘晶,杨莲梅,李俊江,等.2024.中昆仑山北坡水汽含量的计算及特征分析[J]. *暴雨灾害*,43(2):224–233. Liu J, Yang L M, Li J J, et al. 2024. Calculation and characteristic analysis of water vapor content in the north slope of the Middle Kunlun Mountains [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(2):224–233 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–053
- 宋淑丽,朱文耀.2003.区域 GPS 网实时计算可降水量的若干问题[J].中

- 国科学院上海天文台年刊,24:20–27. Song S L, Zhu W Y. 2003. Some problems about real-time retrieving PWV from local GPS network [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*,24:20–27 (in Chinese)
- 宋淑丽. 2004. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海天文台):118. Song S L. 2004. Sensing three dimensional water vapor structure with ground-based GPS network and the application in meteorology [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences:118 (in Chinese)
- 孟智勇,张福青,罗德海,等. 2019. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究:天气篇[J]. *中国科学:地球科学*,49(12):1875–1918. Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology [J]. *Science China Earth Sciences*,49(12):1875–1918 (in Chinese). doi:10.1360/SSTe-2019-0175
- 王小亚,朱文耀,严豪健,等. 1999. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. *大气科学*,23(5):605–612. Wang X Y, Zhu W Y, Yan H J, et al. 1999. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,23(5):605–612 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.11
- 武冰路,赵京波,纪策,等. 2023. 多源观测资料在冰雹监测预警中的应用[J]. *沙漠与绿洲气象*,17(5):79–85. Wu B L, Zhao J B, Ji C, et al. 2023. Application of multi-source observation data in hail monitoring and warning [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,17(5):79–85 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.010
- 吴尧,肖天贵,假拉. 2024. 8 月高原季风对成都降水的影响研究[J]. *高原山地气象研究*,44(2):133–142. Wu Y, Xiao T G, Jia L. 2024. Study on the influence of plateau monsoon on precipitation in Chengdu in August [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(2):133–142 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.02.017
- 张朝林. 2006. 环北京四维大气水汽实时监测的“天眼”——环北京地基全球定位系统气象监测平台投入应用[J]. *中国高校科技与产业化*,8:44–45. Zhang C L. 2006. The “eye in the sky” for real-time monitoring of four-dimensional atmospheric water vapor around Beijing—the ground-based global positioning system meteorological monitoring platform around Beijing was put into use [J]. *Chinese University Technology Transfer*,8:44–45 (in Chinese). doi:10.16209/j.cnki.cust.2006.08.012
- 张人禾,徐祥德. 2012. 青藏高原及东缘新一代大气综合探测系统应用平台——中日合作 JICA 项目[J]. *中国工程科学*,14(9):102–112. Zhang R H, Xu X D. 2012. Applying platform for the new generation of the comprehensive atmospheric observing system over the Tibetan Plateau and its eastern region—a China-Japan cooperative JICA Project [J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*,14(9):102–112 (in Chinese)
- 中国气象局. 2020. 气象观测资料质量控制—地面: QX/T 118—2020 [S]. 北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration. 2020. Quality Control of Meteorological Observation Data - Ground: QX/T 118-2020 [S]. Beijing:China Standard Press (in Chinese)
- Aichinger-Rosenberger M, Aregger M, Kopp J, et al. 2023. Detecting signatures of convective storm events in GNSS-SNR: Two case studies from summer 2021 in Switzerland [J]. *Geophysical Research Letters*,50:e2023GL104916. doi:10.1029/2023GL104916
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. *Journal of Geophysical Research*,97(D14):15787–15801. doi:10.1029/92JD01517
- Bock Y, Fang F, Knox A, et al. 2023. Extended Solid Earth Science Esdr System (ES3): algorithm theoretical basis document (ATBD) [R]. http://garner.ucsd.edu/pub/measuresESESES_products/ATBD/ES-ESES-ATBD.pdf
- Bonafoni S, Biondi R, Brenot H, et al. 2019. Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review [J]. *Atmospheric Research*,230:104624 doi:10.1016/j.atmosres.2019.104624
- Dach R, Lutz S, Walser P, et al. 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2 [R]//User manual, Astronomical Institute, University of Bern. Bern: Bern Open Publishing. doi:10.7892/boris.72297
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. 2021. Water Cycle Changes [R]//In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I To The Sixth Assessment Report Of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 1055–1210. doi:10.1017/9781009157896.010
- GCOS. 2015. Status of the Global Observing System for Climate [R]//WMO/GCOS-195:373. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/status-of-global-observing-system-climate>
- Gong Y, Liu Z, Chan P W, et al. 2023. Assimilating GNSS PWV and radiosonde meteorological profiles to improve the PWV and rainfall forecasting performance from the Weather Research and Forecasting (WRF) model over the South China [J]. *Atmospheric Research*,286:106677. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106677
- Guerreiro S B, Fowler H J, Barbero R, et al. 2018. Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes [J]. *Nature Climate Change*,8:803–807. doi:10.1038/s41558-018-0245-3
- Guerova G, Jones J, Douša J, et al. 2016. Review of the state-of-the-art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,9:5385–5406. doi:10.5194/amt-9-5385-2016
- Haase J, Ge M, Vedel H, et al. 2003. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the western Mediterranean [J]. *Journal of Applied Meteorology*,42(11):1547–1568. doi:10.1175/1520-0450(2003)042<1547:AAVOGT>2.0.CO;2
- Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, et al. 2016. Plate boundary observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products [J]. *Reviews of Geophysics*,54:1–50. doi:10.1002/2016RG000529
- Herring T A, King R W, Floyd M A, et al. 2018. GPS Analysis at MIT [R]//Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute Of Technology:168. http://geoweb.mit.edu/gg/docs/GAMIT_Ref.pdf
- IGS. 2015. IGS Site Guidelines [R]. <http://igsorg.zendesk.com/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
- IGS. 2023. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format (Version 4.01) [S]. http://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.01.pdf
- Jones J, Guerova G, Douša J, et al. 2020. Advanced GNSS Tropospheric Products for Monitoring Severe Weather Events and Climate [R]//COST Action ES1206 Final Action Dissemination Report: 577

- Kometani T. 2005. GPS Earth observation network system [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*,71(11):1339–1343. doi:10.2493/jjspe.71.1339
- Larson K M. 2016. GPS interferometric reflectometry: Applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews:Water*,3: 775–787. doi:10.1002/wat2.1167
- Liang H, Cao Y C, Wan X M, et al. 2015. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China [J]. *Geodesy and Geodynamics*,6(2):135–142. doi:10.1016/j.geog.2015.03.001
- Liu J, Liang H, Sun Z, et al. 2006. Validation of the moderate-resolution imaging spectroradiometer precipitable water vapor product using measurements from GPS on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*,111:D14103. doi:10.1029/2005JD007028
- Liu J N, Ge M R. 2003. PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*,8:603–609. doi:10.1007/BF02899825
- Liu R L, Zhong B, Li X P, et al. 2022. Analysis of groundwater changes (2003–2020) in the North China Plain using geodetic measurements [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*,41:101085. doi:10.1016/j.ejrh.2022.101085
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,20:130–141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- Mears C A, Smith D K, Ricciardulli L, et al. 2018. Construction and uncertainty estimation of a satellite-derived total precipitable water data record over the world's oceans [J]. *Earth and Space Science*,5:197–210. doi:10.1002/2018EA000363
- Nash J, Oakley T, Vömel H, et al. 2011. WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems [R]/Instruments and Observing Methods Report No.107 (WMO/TD-No.1580). <http://library.wmo.int/viewer/50499/#page=1&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=>
- Neelin J D, Martinez-Villalobos C, Stechmann S N, et al. 2022. Precipitation extremes and water vapor [J]. *Current climate change reports*,8: 17–33. doi:10.1007/s40641-021-00177-z
- Ning T, Wang J, Elgered G, et al. 2016. The uncertainty of the atmospheric integrated water vapor estimated from GNSS observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,9:79–92. doi:10.5194/amt-9-79-2016
- OSCAR. 2024. Requirements Defined for Integrated Water Vapour (IWV) [R]. https://space.oscar.wmo.int/variables/view/integrated_water_vapour_iwv
- Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. 1993. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system [J]. *Geophysical Research Letters*,20(23):2631–2634. doi:10.1029/93GL02935
- Shi C, Zhao Q, Geng J, et al. 2008. Recent Development Of Panda Software In Gns Data Processing [R]/Li D, Gong J, Wu H. International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA). International Society for Optical Engineering (SPIE Proceedings), 7285: 558–566. doi:https://doi.org/10.1117/12.816261
- Stull R. 2015. Meteorology for Scientists and Engineers (Third Edition) [M]. Vancouver: The University of British Columbia:924
- Teunissen P J G, Montenbruck O. 2017. Handbook of Global Navigation Satellite Systems [M]. Switzerland:Springer International Publishing: 1327. doi:10.1007/978-3-319-42928-1
- Wan W, Larson K M, Small E E, et al. 2015. Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content [J]. *GPS Solutions*, 19:237–248. doi:10.1007/s10291-014-0383-7
- Wan W, Zhang J, Dai L, et al. 2022. A new snow depth data set over northern China derived using GNSS interferometric reflectometry from a continuously operating network (GSnow-CHINA v1.0, 2013–2022) [J]. *Earth System Science Data*,14(8):3549–3571. doi:https://doi.org/10.5194/essd-14-3549-2022
- Wang J H, Rannat K, Jones J. 2019. Global Navigation Satellite System (GNSS)-Precipitable Water (PW) Omnibus [R]/GRUAN-TD-6(v2.0). http://www.gruan.org/gruan/editor/documents/gruan/GRUAN-TD-6_GNSS-PW_v2.0_2019-08-21.pdf
- WMO. 2019. Vision for the WMO Integrated Global Observing System in 2040 [R]/WMO-No.1243. https://library.wmo.int/viewer/57028/download?file=1243_en.pdf&type=pdf&navigator=1
- Wolfe D E, Gutman S I. 2000. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA:network design and results [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(4):426–440. doi:10.1175/1520-0426(2000)017<0426:daosbg>2.0.co;2
- Yang T, Wan W, Chen X, et al. 2019. Land surface characterization using BeiDou signal-to-noise ratio observations [J]. *GPS Solutions*,23(32): 112–118. doi:10.1007/s10291-019-0824-4
- Zhao Q Z, Ma X W, Yao W Q, et al. 2020. A drought monitoring method based on precipitable water vapor and precipitation [J]. *Journal of Climate*,33(24):10727–10741. doi:10.1175/JCLI-D-19-0971.1
- Zhao Q Z, Liu K, Sun T T, et al. 2023. A novel regional drought monitoring method using GNSS-derived ZTD and precipitation [J]. *Remote Sensing of Environment*,297:113778. doi:10.1016/j.rse.2023.113778
- Zhang W, Lou Y, Cao Y, et al. 2019. Corrections of radiosonde-based precipitable water using ground-based GPS and applications on historical radiosonde data over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,124:3208–3222. doi:10.1029/2018JD029662
- Zhang W, Lou Y, Zhou Y, et al. 2024. GNSS meteorological ensemble tools (GMET): a free-access online service for GNSS meteorological applications [J]. *GPS Solutions*,28:202. doi:10.1007/s10291-024-01743-2

(责任编辑 唐永兰)