

曹云昌,胡姮,马翠平等,2020. 基于多元数据的地基GNSS水汽观测对比分析. 中国地震,36(4):780~787.

基于多元数据的地基GNSS水汽观测对比分析

曹云昌¹⁾ 胡姮¹⁾ 马翠平²⁾ 梁静舒¹⁾
赵盼盼³⁾ 王海深¹⁾ 涂满红¹⁾ 梁宏¹⁾

1) 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2) 河北省气象局,石家庄 050021

3) 成都信息工程大学,成都 610225

摘要 在“超大城市垂直综合气象观测技术研究及实验”中,利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA Interim再分析数据集,对2018年北京观象台的地基导航卫星气象观测(GNSS/MET)、探空和微波辐射计观测的水汽总量(PWV)进行了对比分析,结果表明,3种观测和ECMWF模式分析具有较好的相关性,可以较好地监测北京水汽的变化。与ECMWF模式对比,GNSS/MET、探空和微波辐射计的偏差分别为0.54mm、1.94mm、-0.65mm,均方根误差分别为3.55mm、3.60mm、6.08mm;若以探空作为参考,GNSS/MET、ECMWF和微波辐射计的偏差分别为-1.39mm、-1.94mm、-2.58mm,均方根误差为2.85mm、3.59mm、6.79mm。由此可见GNSS/MET、探空和ECMWF模式分析的水汽具有较好的质量。从对比结果看,GNSS/MET在相关性、偏差和均方根误差方面均表现突出,和探空、ECMWF相当,而微波辐射计差别明显,均方根误差最大,但剔除雨日后,资料质量得到提高,表明微波辐射计资料的应用需要注意降水条件,反演算法需在今后进行改进。

关键词: 水汽总量 GNSS/MET 地基微波辐射计 ECMWF 评估

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0780-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

大气中水汽含量虽然不多,但其在天气变化过程中是一个极为重要的角色。水汽是大气温室效应的因素之一,也是大气的重要组成部分,其变化强烈影响着水循环、气溶胶成分以及云的形成(Gui et al, 2017)。除了会引起云、雾、雨、雪等一系列的天气现象,水汽的相变同时会通过潜热和感热的释放,影响着各种天气现象的发生、发展和大气各种时空尺度的运动,所以,水汽是了解大气环流动力学和地气系统能量收支的重要内容(丁一汇, 1991)。在陆地与海洋之间的水循环过程中,大气水汽由蒸发到凝结,吸收热量或者释放热量,从而起到调整地球能量的作用,影响地球大气系统温度以及环流的分布模式。Kump(2001)指出,虽然CO₂和其他温室气体的增长受到特别关注,但相对于水汽,其对气候变暖的实际影响相

[收稿日期] 2020-06-08; [修定日期] 2020-08-18

[项目类别] 国家自然科学基金(41804023, 419611440)、科技部重点研发计划(2017YFC1501700)共同资助

[作者简介] 曹云昌,男,1968年生,研究员,研究方向为导航卫星气象学。E-mail: caoyc@126.com

马翠平,通讯作者,女,1963年生,研究员,主要从事环境气象研究。E-mail: 1135075259@qq.com

对较小。据研究,大气中约 70%的加热归结于大气水汽的温室效应(Philipona et al,2005)。为适应不断深入的天气气候研究和应用,迫切需要精准连续的大气水汽观测,但是截至目前,作为温压湿风雨气象观测,湿度观测仍然是气象观测的短板(Wylie et al,1992,郝民等,2015)。

地面湿度观测仅仅局限在地表,不能全面反映垂直空间大气的水汽分布状况。全球无线电探空湿度资料作为最基本、可直接使用的水汽观测,由于观测成本非常昂贵以及有限的台站数量和一天 2 次的观测时次,导致其时空分辨率远远不能满足精准数值模式预报的需求。同时,湿度传感器观测也存在着诸多问题,如,元件易受到太阳辐射影响造成湿度偏干(Bian et al,2011),校准误差大和温度补偿不合理,探空仪在环境急变(如入云出云)后元件易受冰水污染造成湿度观测的失效(冒晓莉等,2016),虽然探空仪在高空低温条件下存在低湿测量的不确定性(王碧波,等 2012),但其仍然是遥感资料的传统对比参考。鉴于无线电探空对全球天气和气候业务的重要性,世界气象组织每 4 年对各国业务使用的探空仪进行对比评估,一方面为全球用户使用探空资料提供参考,另一方面督促相关国家采取措施,改进设备和高空观测业务质量(世界气象组织,2011)。

地基微波辐射计是近年发展起来的地基遥感设备,其通过观测来自于 22GHz(适合潮湿地区反演)和 183GHz(适合干环境反演)处辐射强度和分布信息得到连续的大气对流层水汽廓线,有望成为探空水汽观测的有效补充(张文刚等,2015)。关于地基微波辐射计的温湿度观测,国内外学者大多基于探空开展对比评估,给出了一些湿度观测质量的初步结论(刘晓璐等,2019)。

随着全球卫星导航系统在气象学中的应用,GNSS 水汽观测技术逐渐发展起来(Bevis et al,1992),当 GNSS 发出的信号穿过大气层中对流层时,受到对流层的折射影响,GNSS 信号发生弯曲和延迟,其中信号的弯曲量很小,而信号的延迟量很大,通过延迟量计算得到我们所需的大气折射率。大气折射率是与水汽压力有关的函数,最后可以得到水汽含量信息,精度可达 1~2mm(刘焱雄等,2000)。其具有高时空分辨率、全天候监测、观测区域广、低运营成本等优点,作为地基水汽遥感观测,有望在未来的水汽观测中发挥作用(曹云昌等,2006;liang 等,2015)。

目前基于地基的大气水汽观测,在观测业务上各有特点,其准确性各不相同,准确评估其观测误差,无论对于水汽观测,还是相关应用研究,均具有重要的应用价值。本文针对“超大城市垂直综合气象观测技术研究及实验”中北京站 GNSS/MET、探空、地基微波辐射计反演的大气水汽总量进行了交叉对比,并结合 ECMWF 资料进行评估,给出了以上观测资料的误差情况。

1 实验、资料获取与数据处理

1.1 大城市观测实验

“超大城市垂直综合气象观测技术研究及实验”由中国气象局气象探测中心牵头实施,项目在北京地区布设了多种观测设备,旨在获取北京大城市下垫面的大气参数特征,其中以北京观象台的观测设备最为齐全。

在北京观象台(116°17'E,39°56'N)布设的 GNSS/MET 设备为 NetR9 型 GNSS 接收机,

气象仪为 WUSH-PTU300,水汽解算采用中国气象局气象探测中心开发的 GNSS 水汽解算软件 CGVAPS(China GNSS Vapor System),该软件以 GAMIT 为基础,采用滑动窗口网解模式,并优化了模型的输入参数和对流层天顶总延迟的质量控制。

北京观象台探空设备为 GTS1 型数字探空仪(邢毅等,2009),L 波段雷达-电子探空仪系统以自动跟踪方式工作,气球施放后由计算机对雷达实施程序控制,自动跟踪探空仪,地面设备计算机自动接收、处理探空、测风信号并生成业务应用文件,无需人工干预。GTS1 型数字探空仪温度测量组件采用半导体热敏电阻,气压采用硅压阻,湿度采用碳膜湿敏电阻。

地基微波辐射计是在观测实验中新布设的遥感观测设备,用于观测大气在垂直和水平方向上的温湿分布,设备为 HTG4。微波辐射计在使用前,首先经过外置液氮定标,采用液氮作为绝对定标过程中的冷点,配合内部定标黑体,通过软件自动实现液氮绝对定标。在使用过程中,采用噪声源定标,设置 2 个噪声源:2 个绝对标准(冷/热)定标后确定噪声二极管的等效噪声温度,实现仪器日常自动相对定标。在反演时利用观测到的亮温数据,通过神经网络反演,输出天顶方向地面至 10km 各层的温度、湿度、液态水的廓线数据。

2017 年,“超大城市垂直综合气象观测技术研究及实验”项目启动,自 2018 年开始进行超大城市气象要素的连续观测实验。本文收集了北京观象台 2018 年 1 月 1 日~12 月 24 日的 GNSS、探空、微波辐射计观测和 ECMWF 再分析资料,对各种观测资料的水汽总量进行了对比。

1.2 资料和数据处理

1.2.1 探空资料计算大气水汽总量

本文使用 L 波段探空数据中的温度 T 、水的三相点温度 T_0 ,计算出水面饱和水汽压 E_w

$$\begin{aligned} \lg E_w = & 10.79574 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - 5.0281 \lg \frac{T}{T_0} + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)} \right] + \\ & 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)} - 1 \right] + 0.78614 + \\ & 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)} - 1 \right] + 0.78614 \end{aligned} \quad (1)$$

再由饱和水汽压计算出实际水汽压 e

$$e = E_w \left(\frac{U}{100} \right) \quad (2)$$

其中, U 为相对湿度。

大气中绝对湿度 q 的计算公式为

$$q = 216.7679 \times \frac{e}{T} \quad (3)$$

最后,根据高度将绝对湿度 q 累加,得到总的水汽质量 PWV

$$PWV = \frac{1}{\rho g} \int_0^{p_s} q dp \quad (4)$$

其中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, p_s 为地面气压, p 为大气压强。

1.2.2 ECMWF 计算水汽总量

欧洲数值预报中心 ECMWF 全球再分析融合了预报模式资料和地面、高空及雷达卫星

观测数据,是目前公认的评估分析各种气象遥感观测产品的基准数据集。本文应用了 ERA Interim 数据集,格点经纬度分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。

利用 ECMWF 资料计算水汽总量与探空基本相同,首先对地面到各规定层积分求得各个格点上的水汽总量,然后采用经纬度双线性内插将站点所在的周边 4 个格点内插到站点(北京观象台)上。

1.2.3 地基 GNSS 反演大气水汽总量

GNSS 无线电波在大气中的传输因受到大气介质的折射而沿曲线前进,与真空中相比,其传播速度发生延迟效应。总延迟距离 ΔL 与大气折射率有关

$$\Delta L = \int_s N ds \tag{5}$$

式中, N 为无线电波沿曲线 s 传播时经过大气的折射率,其与大气的状态有以下关系

$$N = \left(-4.03 \times 10^6 \frac{n_e}{f} \right) + \left(77.6 \frac{P_d}{T} \right) + \left(70.4 \frac{P_v}{T} + 3.739 \frac{P_v}{T^2} \right) \tag{6}$$

其中, n_e 为大气中的电子密度, f 为电波的频率, P_d 为干空气的部分气压, P_v 为湿空气的部分气压, T 为大气温度。

将式(6)右端前 2 项从总延迟中抽离出来,得出剩余水汽部分的总湿延迟 ΔL_w 。

总天顶湿延迟 ZWD(Zenith Wet Delay)与总湿延迟的关系为

$$ZWD = \Delta L_w \csc \theta \tag{7}$$

其中, θ 为天顶角。大气中的垂直(z)总水汽量为

$$PWV = \int \rho_v dz \tag{8}$$

其中, ρ_v 为空气中的水汽密度。经推导,ZWD 与 PWV 有以下关系

$$PWV = \Pi \times ZWD \tag{9}$$

其中,比例系数 Π 可表达为

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2 - \omega k_1 \right)} \tag{10}$$

式中, k_1, k_2, k_3, ω 为物理常数, ρ 为水的密度, R_v 为大气常数(水汽),而 T_m 为大气的平均温度。 T_m 与地面温度 T_s 和温度廓线有关,使用较普遍的为 Bevis 经验公式: $T_m = 70.2 + 0.72T_s$ 。在 CGVAPS 中,对于不同的地区,采用适合中国不同纬度的 T_m 与 T_s 之间的函数关系式(王晓英等,2011)。

1.2.4 微波辐射计反演的水汽总量

微波辐射计的产品反演使用北京观象台的历史探空资料,建立产品的反演模型,利用产品反演模型,根据实时观测的各通道亮温,进行各种参数的反演。其中,水汽总量产品由水汽通道的亮温反演而来。

2 大气水汽总量对比分析

2.1 北京大气水汽总量月平均值的变化

北京观象台地处中纬度,属温带大陆性季风气候,全年四季水汽变化显著,图 1 给出了

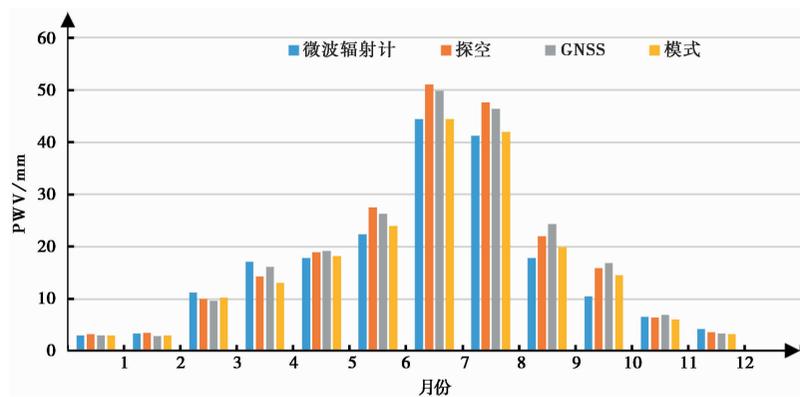


图 1 2018 年北京气象台 GNSS/MET、探空、微波辐射计、ECMWF 模式水汽总量月均变化

2018 年由微波辐射计、探空、GNSS/MET 观测的月平均水汽总量和欧洲数值预报中心再分析的结果。由图 1 可以看出,北京夏季 7、8 月水汽充沛,平均值达到 40~50mm,而冬季仅为 5mm 左右,春季、秋季迅速增加或减少。

从 GNSS/MET、微波辐射计、探空和 ECMWF 模式的分析结果看,水汽总量月平均值在夏季有一定的差别,冬季由于水汽较少,差别不大。

2.2 与 ECMWF 模式的水汽总量对比

ECMWF 再分析资料是基于模式和多种观测的多源数据的融合,一般将其作为描述大气状态的基准数据集。对比 GNSS/MET、探空、微波辐射计的总水汽量与 ECMWF 再分析结果(图 2),可以看出三者与 ECMWF 模式分析结果符合较好,特别是探空和 GNSS/MET。相比而言微波辐射计差别明显,并且观测存在异常点,表明其反演算法存在一定问题,仍有待完善。

GNSS/MET、探空、微波辐射计与 ECMWF 模式的相关性,如表 1 所示,可以看出其均具有较好的相关性,相关系数大于 0.90,但探空、GNSS/MET 与 ECMWF 模式具有更好的相关性,达到了 0.99。从三者的偏差来看,GNSS/MET 存在 0.54mm 的正偏差,探空存在 1.94mm 的正偏差,微波辐射计存在 0.65mm 的负偏差。对于均方根误差,GNSS/MET 和探空相当,在 3mm 左右,而微波辐射计的误差明显偏大,达到了 6mm。

对比 GNSS/MET 和探空,二者的相关性和均方根误差相近,但探空偏差略大;而微波辐射计虽然偏差较小,但均方根误差较大。

2.3 与探空的水汽总量对比

探空观测作为一种遥测在点观测,传统上被认为是高空遥感观测的基准,可以对 ECMWF 模式分析进行交叉验证。以探空作为参考,对比 GNSS/MET、ECMWF 模式和微波辐射计的水汽总量,如表 2 所示。

由此可见,表 2 与表 1 的结果基本一致,若以探空作为参考,GNSS/MET 的相关性、偏差和均方根误差在 3 种资料中均为最优。

虽然微波辐射计可以在小、中雨时反演获取数据,但由于存在水膜污染微波罩,造成辐射亮温的偏差,从而引起水汽总量反演误差。为此,在上述数据中剔除了小、中雨日共 35 组

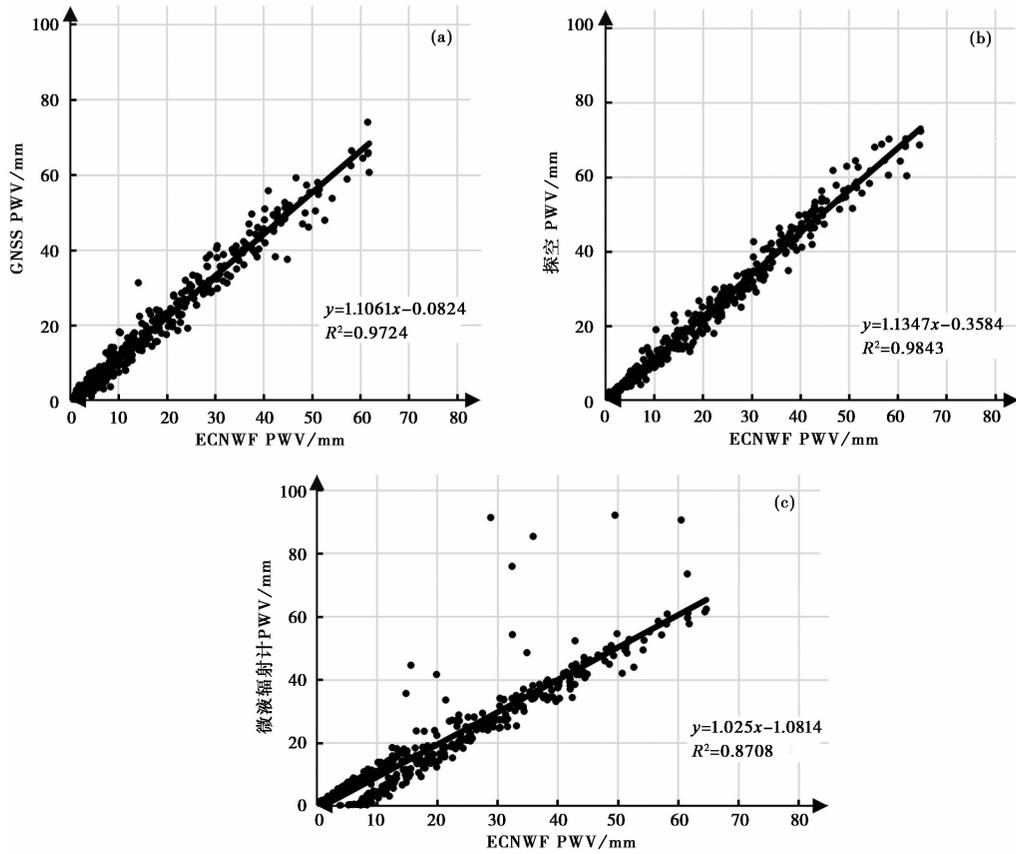


图 2 GNSS/MET、探空和微波辐射计的水汽总量与 ECMWF 的相关图

表 1 与 ECMWF 模式的对比结果

对比项	相关系数	偏差/mm	均方根误差/mm	相对均方根误差/%	平均值/mm	样本量
GNSS/MET	0.99	0.54	3.55	20	17.85	449
探空	0.99	1.94	3.60	21	19.24	529
微波辐射计	0.93	-0.65	6.08	35	16.66	531

表 2 与探空的对比结果

对比项	相关系数	偏差/mm	均方根误差/mm	相对均方根误差/%	平均值/mm	样本量
GNSS/MET	0.99	-1.39	2.85	15	17.85	449
ECMWF 模式	0.99	-1.94	3.59	19	17.31	531
微波辐射计	0.93	-2.58	6.79	35	16.66	531

数据,重新进行统计,得到微波辐射计与探空的对比统计结果,如表 3 所示。

由表 3 可见,剔除小、中雨后,相关系数提高了 3%,相对均方根误差提高了 6%,偏差略有增加。这说明在使用微波辐射计数据时,需要剔除雨日数据来保证数据的质量。但也要

表 3 微波辐射计与探空的对比结果

对比项	相关系数	偏差/mm	均方根误差/mm	相对均方根误差/%	平均值/mm	样本量
不区分晴雨	0.93	-2.58	6.79	35	16.66	531
仅晴天	0.96	-3.00	5.01	29	14.42	496

看到,即使剔除了雨日数据,微波辐射计数据的相对误差也是 GNSS/MET 的 2 倍,相对探空和 GNSS/MET,其准确性还有待提高。

3 结论和讨论

通过对比北京 2018 年全年的水汽总量资料,可以得到如下结论:

(1) 与 ECMWF 模式分析对比,GNSS/MET、探空、微波辐射计的相关系数分别为 0.99、0.99、0.93。从三者的偏差来看,GNSS/MET 存在 0.54mm 的正偏差,探空存在 1.94mm 的正偏差,微波辐射计存在 0.65mm 的负偏差。三者的均方根误差则分别为 3.55mm、3.60mm 和 6.08mm。

(2) 以探空作为参考,GNSS/MET、ECMWF 模式和微波辐射计的相关系数分别为 0.99、0.99 和 0.93,偏差分别为-1.39mm、-1.94mm 和-2.58mm,均方根误差为 2.85mm、3.59mm 和 6.79mm。GNSS/MET 的相关性、偏差和均方根误差在 3 种资料中均表现最优。

(3) 在 4 种资料中,微波辐射计观测的差别明显,均方根误差最大。剔除小、中雨后,相关系数提高了 3%,相对均方根误差提高了 6%,数据质量有所提高。说明在使用微波辐射计数据时,需要剔除雨日数据来保证数据的质量,同时,微波辐射计的反演算法需要进一步完善。

(4) 通过对比分析可以看出,GNSS/MET、探空和 ECMWF 模式具有相当的精度和误差,无论采用 ECMWF 模式对比,还是与探空进行对比,GNSS/MET 的水汽观测表现良好,说明其水汽资料具有较高的质量。

最后需要指出的是,本研究只针对北京 2018 年全年的资料进行了分析,结论是初步的,今后仍需要更多地区的多年资料来进一步对比。

参考文献

- 曹云昌,方宗义,夏青,等,2006. 中国地基 GPS 气象应用站网建设展望. 气象,32(11):42~47.
- 丁一汇,1991. 高等天气学. 北京:气象出版社.
- 郝民,龚建东,王瑞文,等,2015. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正. 气象学报,73(1):187~199.
- 刘晓璐,刘东升,郭丽君,等,2019. 国产 MWP967KV 型地基微波辐射计探测精度. 应用气象学报,30(6):731~744.
- 刘焱雄,陈永奇,Le H B,2000. 可降水份的误差分析. 武汉测绘科技大学学报,25(2):105~107,112.
- 冒晓莉,张加宏,肖韶荣,等,2016. 基于流体动力学的探空仪 GTS1 湿度测量误差修正研究. 地球物理学报,59(12):4791~4805.
- 世界气象组织仪器和观测方法报告(107),2011. WMO 高质量探空系统的国际对比. http://www.wmo.int/pagesprogwww/IMOPpublications/IOM-107_Yangjiang.pdf.
- 王碧波,李俊有,白星,等,2012. L 波段探空系统常见问题及应急处理. 内蒙古农业科技,(5):107.
- 王晓英,戴仔强,曹云昌,等,2011. 中国地区地基 GPS 加权平均温度 T_m 统计分析. 武汉大学学报·信息科学版,36(4):

- 412~416.
- 邢毅,张志萍,曹云昌,等,2009. RS92 型 GPS 探空仪的性能实验与分析. 气象科技, **37**(3):336~340.
- 张文刚,徐桂荣,万蓉,等,2015. 基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析. 暴雨灾害, **34**(4):367~374.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al, 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res Atmos*, **97**(D14):15787~15801.
- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al, 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH. *Adv Atmos Sci*, **28**(1):139~146.
- Gui K, Che Z, Chen Q L, et al, 2017. Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. *Atmos Res*, **197**:461~473.
- Kump L R, 2001. What drives climate? *Nature*, **408**(6813):651~652.
- 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. *Geod Geodyn*, **6**(2):135~142.
- Philipona R, Dürr B, Ohmura A, et al, 2005. Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe. *Geophys Res Lett*, **32**(19):L19809.
- Wylie R G, Lalas T, 1992. Measurement of Temperature and Humidity. Technical Note, No. 194, WMO-No.759. Geneva: World Meteorological Organization.

Comparison of Precipitable Water Vapors from Different Data Sources Based on the GNSS Meteorological Retrieval

Cao Yunchang¹⁾ Hu Heng¹⁾ Ma Cuiping²⁾ Liang Jingshu¹⁾ Zhao Panpan³⁾
Wang Haishen¹⁾ Tu Manhong¹⁾ Liang Hong¹⁾

1) Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China

2) Hebei Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050021, China

3) Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610225, China

Abstract In the vertical integrated observation research and experiment for the metropolitan cities, the ECMWF reanalysis data are analyzed to evaluate the precipitable water vapor (PWV) observations of GNSS/MET, radiosonde, and water vapor radiometer (WVR) at the Beijing Observatory in 2018. Our results show that the correlation coefficients are as much as 0.90 with the ECMWF reanalysis. The PWV biases of the GNSS, the radiosonde and the WVR to the ECMWF are 0.54mm, 1.94mm, -0.65 mm respectively. The RMSEs are 3.55mm, 3.60mm, 6.08mm respectively. In comparison with the radiosonde, the biases of the GNSS, the ECMWF and the WVR are -1.39mm, -1.94mm, -2.58mm, and the PWV RMSEs are 2.85mm, 3.59mm, 6.79mm, respectively. It suggests that GNSS/MET PWV is of relatively high quality, perfectly matching with the radiosonde and the ECMWF, whereas the WVR PWV is of relatively poor quality. When data of rainy days are removed, the quality is improved both in bias and in RMSE for the WVR. It implies that the limitation of the WVR in its application, and further research on the retrieval algorithm of the WVR is needed in the future.

Keywords: Precipitable water vapor; GNSS/MET; Radiosonde; ECMWF; Evaluation