

刘梦杰¹ 张卫星² 张镇驿² 楼益栋² 梁宏³ 曹云昌³

CRA40 在中国地区 GNSS 水汽反演中的适用性评估与分析

摘要

基于中国气象局发布的 CRA40 气象再分析资料,计算地基 GNSS 水汽反演中涉及气压、气温、大气水汽加权平均温度(T_m)、天顶对流层总延迟(ZTD)等关键参数,并分别以地面气象站(气压、气温)、无线电探空测站(T_m)以及地基 GNSS 测站(ZTD)为参考,对这些参数在中国地区的精度和可靠性开展了系统的评估.计算结果与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)最新一代 ERA5 产品的计算结果进行比较,结果表明:基于 CRA40 计算的测站处气压和 ZTD 的平均 RMS(均方根)分别为 0.91 hPa 和 13.5 mm,略差于 ERA5;计算的测站处气温和 T_m 平均 RMS 分别为 2.67 K 和 1.47 K,略优于 ERA5.三类参数(气压、气温、ZTD)的日变化总体趋势与实际观测符合较好.

关键词

GNSS 水汽反演; CRA40; ERA5; 日变化

中图分类号 P228;P407

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-18

资助项目 国家自然科学基金(41804023,41774036,41961144015)

作者简介

楼益栋(通信作者),男,博士,教授,研究方向为北斗实时高精度定位理论方法、软件研制及应用,ydlou@whu.edu.cn

1 武汉大学 测绘学院,武汉,430079

2 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心,武汉,430079

3 中国气象局气象探测中心,北京,100081

0 引言

水汽作为大气中最主要的一种温室气体,其含量和分布变化可引发多种气象现象,也会对气候变化产生重要影响,因此准确获取大气水汽信息对于气候分析和气象研究十分重要.地基 GNSS 在近 20 多年来被证明是一种获取大气水汽含量的有效手段^[1].通常将 GNSS 观测中的信号延迟归算到天顶方向获得天顶对流层总延迟(ZTD),减去天顶静力学延迟(ZHD)得到天顶湿延迟(ZWD),其中 ZHD 可由模型(如 Saastamoinen 模型^[2])精确计算,计算过程中需要测站处的精确气压.ZWD 转换为垂直可降水总量(PWV)则需要测站处的大气水汽加权平均温度(T_m).在实际应用中, T_m 的计算通常利用测站处气温 T_s .基于 T_m - T_s 转换公式^[3]获得,也可利用测站上空的大气参数廓线积分求取.因此,准确获取测站处的气压、气温/ T_m 是高精度大气水汽反演的关键.

气象再分析资料具备时间和空间完整性的优势,能有效地获取任意位置处气压、气温和 T_m ,此前已有不少研究对基于气象再分析资料的这几类参数的精度开展了较为系统的评估^[4-8],例如 Zhang 等^[9]对 ECMWF 最新发布的全球首款逐小时分辨率再分析资料 ERA5 在 GNSS 水汽反演中的适用性开展了系统评估,结果表明采用 ERA5 提供的气象参数,用于 GNSS 水汽反演在中国地区引入的额外误差不超过 1 mm.

中国气象局自 2013 年底启动了我国第一代全球大气再分析资料产品 CRA40 计划,并于近期发布.总体目标是建成我国第一代全球大气再分析业务系统,并建成 40 年(1979—2018 年)全球大气再分析数据集,质量超过国际第二代,在中国区域接近或达到国际第三代大气再分析资料水平.与国外全球大气再分析资料相比,CRA40 更强调探空、地面等中国特有常规观测资料和风云卫星资料的同化应用,对于中国地区的气象研究有重大的价值.然而目前尚无文献评估过 CRA40 在 GNSS 水汽反演中的适用性.本文主要工作如下:1)评估基于 CRA40 计算的测站处气压、气温、 T_m 和 ZTD 的精度和日变化信号的准确性;2)对比 CRA40 和 ERA5 计算的四类参数在中国地区的差异.本文首先简要介绍数据源及研究中使用的方法,然后分别展示气压、

气温、 T_m 和 ZTD 的评估结果以及 CRA40 和 ERA5 的对比结果,最后给出中国地区内通过 CRA40 获取数据的一些结论.

1 数据及方法

1.1 地面气象站观测数据

对于气压和气温的评估,采用中国气象局(CMA)2 349 个地面气象站 2016 年逐小时的观测作为参考(可以在 <http://data.cma.cn/> 获取),测站分布如图 1 所示.使用这些数据时剔除了元数据与观测记录之中测站坐标不一致的 524 个观测站的观测数据.

1.2 Radiosonde 观测数据

对于 T_m 的评估,采用 Radiosonde 观测数据计算获得的 T_m 作为参考.Radiosonde 观测数据来自于 Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA) 在中国地区的 89 个测站,测站分布如图 1. T_m 通过下式计算:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\bar{e}_{i,i+1} / \bar{T}_{i,i+1}) \Delta h_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^{n-1} (\bar{e}_{i,i+1} / \bar{T}_{i,i+1}^2) \Delta h_{i,i+1}}, \quad (1)$$

式中 $\bar{T}_{i,i+1}$ 表示第 i 到第 $i+1$ 层之间的平均气温, $\bar{e}_{i,i+1}$ 表示第 i 到第 $i+1$ 层之间的平均水汽压, $\Delta h_{i,i+1}$ 表示第 i 到第 $i+1$ 层的垂直距离.

1.3 GNSS 观测数据

对于 ZTD 的评估,采用中国大陆构造环境监测网络(CMONOC)的 269 个 GPS 测站 2016 年观测数据处理获得的 ZTD 作为参考,GPS 测站分布如图 1 所示.GPS 数据采用 PANDA 软件事后 PPP 处理模式,具体细节参考 Zhang 等^[10]使用的方法和策略.

1.4 再分析资料

本文评估了 2016 年用中国气象局发布的 CRA40(时间分辨率 6 h,空间分辨率 34 km)计算气压、温度、 T_m 和 ZTD 的精度,分别以地面气象站、Radiosonde 测站和 GNSS 测站得到的参数作为参考,并同 ECMWF 发布的全球首款逐小时分辨率的再分析资料 ERA5(时间分辨率 1 h,空间分辨率 30 km)进行对比.本文使用到的气象再分析资料产品全部为气压层产品,使用了气压、气温、比湿和势高 4 个变量.由于 CRA40 的时间分辨率为 6 h,因此对 CRA40 进行线性时间内插以获得逐小时的数据.而对于空间的插值,直接使用水平的插值由再分析资料获得

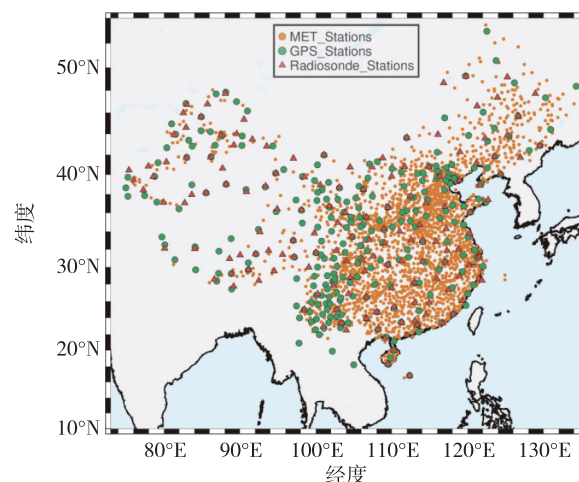


图 1 地面气象站、GPS 测站、Radiosonde 测站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations, GPS stations and radiosonde stations

站点处的数据会导致较大的与高程相关的误差,已有研究证实了这一点^[11-13].本文对不同参数的空间插值方法参考 Zhang 等^[10]的方法.

1.5 统计指标

分别以地面气象站、无线电探空测站和陆态网 GPS 测站为参考,计算基于 CRA40 和 ERA5 获取的气压、气温、 T_m 和 ZTD 误差,统计误差的平均值(BIAS)、标准差(STD)和均方根(RMS).统计中剔除了误差与误差的平均值相差大于 3 倍标准差的数据.除了误差的统计值,还对比评估了 CRA40 和 ERA5 获取的气压、气温和 ZTD 的日变化信号特征.对于 T_m ,由于 IGRA 的 Radiosonde 观测时间间隔为 12 h,所以不做日变化分析.

2 气压及气温评估

2.1 气压评估

以地面气象站数据为参考,基于 ERA5 和 CRA40 计算的所有地面气象站测站处气压误差平均 BIAS、STD 和 RMS,如表 1 所示,RMS 的地理分布如图 2 所示,误差分布直方图如图 3 所示.

从表 1 和图 3 可以看出,CRA40 获取的气压的 BIAS 优于 ERA5,但 STD 和 RMS 较 ERA5 差,平均 RMS 分别为 0.91 和 0.74 hPa.需要注意的是,CRA40 由于经过时间插值影响了准确性,如果仅统计 6 h 分辨率产品,CRA40 的 STD(0.5 hPa)和 RMS(0.6 hPa)均有明显降低,与 ERA5 的 STD(0.4 hPa)和 RMS(0.7 hPa)接近.从图 2 的 RMS 分布可

表 1 气压、气温、ZTD 和 T_m 差值的平均 BIAS、STD、RMS

Table 1 Average BIAS, STD and RMS of pressure, temperature, ZTD and T_m errors between CRA40/ERA5 and standard observations

误差	气压/hPa		气温/K		T_m /K		ZTD/mm	
	CRA40	ERA5	CRA40	ERA5	CRA40	ERA5	CRA40	ERA5
BIAS	-0.07	-0.35	0.78	0.73	0.61	0.71	0.0	-1.4
STD	0.80	0.48	2.46	2.62	1.23	1.30	12.1	10.7
RMS	0.91	0.74	2.67	2.85	1.47	1.54	13.5	11.4

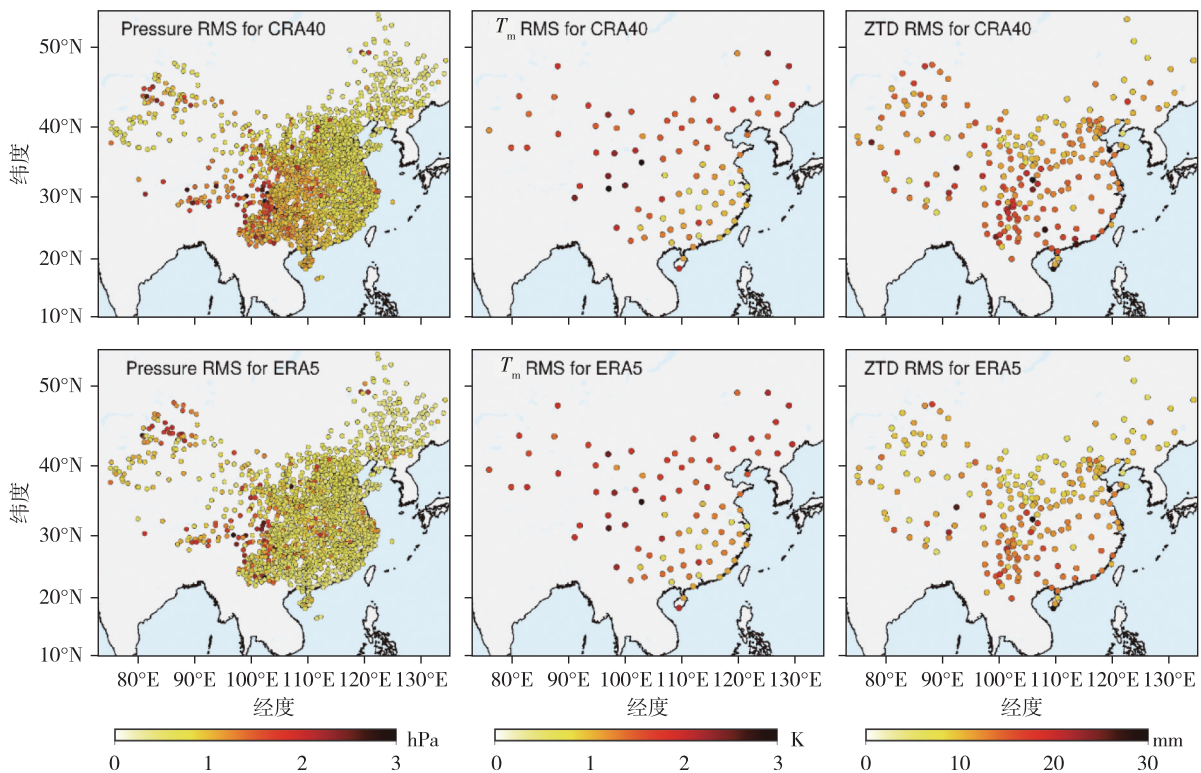


图 2 CRA40(上)和 ERA5(下)气压(左)、 T_m (中)和 ZTD(右)与标准观测值的差值的 RMS 分布

Fig. 2 RMS of pressure (left), T_m (middle) and ZTD (right) errors for CRA40 (top) and ERA5 (bottom)

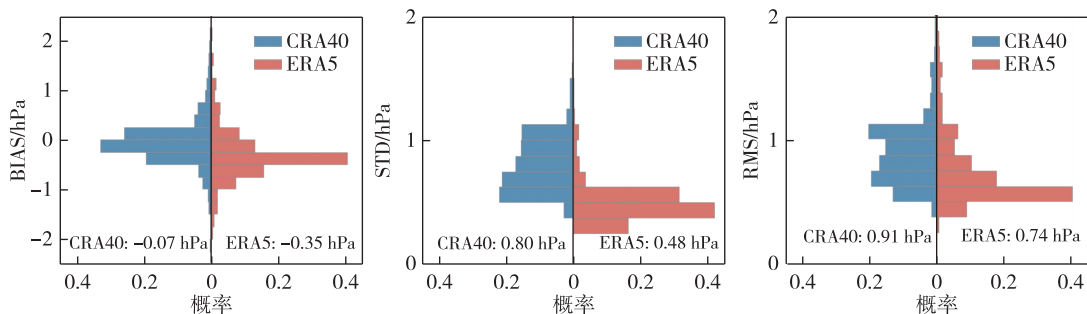


图 3 CRA40 和 ERA5 气压误差的 BIAS(左)、STD(中)、RMS(右)的分布直方图

Fig. 3 Histograms of BIAS (left), STD (middle) and RMS (right) of pressure error for CRA40 and ERA5

以看出,东部地区的精度要明显优于西部地区,这主要是由于西部地区地形较复杂引起的。

对 CRA40 获得的气压数据的日变化特征进行分

析,选取 3 个代表性测站(WMO 编号 58250、54416、51243)和 3 个日期(2016-03-08、2016-05-14、2016-10-06)的结果,分别绘制地面气象站、CRA40、ERA5 气压

的日距平值,如图4所示.从图4中可以看出,由于CRA40使用了时间线性插值,在日变化的细节表现上相对较差,相比之下,小时分辨率的ERA5能更好地反映日变化的细节,两种产品总体上与地面气象站的气压变化趋势符合,没有明显的偏移.

2.2 气温评估

与气压评估类似,统计气温差值的BIAS、STD和RMS.ERA5和CRA40的BIAS、STD和RMS的平均统计结果如表1所示.BIAS、STD和RMS的误差分布直方图如图5所示.

从图5和表1可以看出,CRA40获取的气温的BIAS略差于ERA5,而STD和RMS略优于ERA5,CRA40和ERA5的气温误差平均RMS分别为2.67和2.85 K.

对于气温,同样对比分析其日变化特征.选取与气压评估中相同的测站和日期的结果,分别绘制地面气象站、CRA40、ERA5气温的日距平值,如图6所示.由图6可以看出,同气压相比,ERA5和CRA40计算的测站处气温的日变化趋势与地面气象站符合更差,特别是54416测站在2016-05-14,后半段趋势甚至出现相反的信号特征.

3 T_m 评估

以Radiosonde测站计算的 T_m 数据为参考,基于ERA5和CRA40气压层产品通过空间内插和积分计算的所有Radiosonde测站处 T_m 误差平均BIAS、STD和RMS,如表1所示,RMS的地理分布如图2所示,误差分布直方图如图7所示.

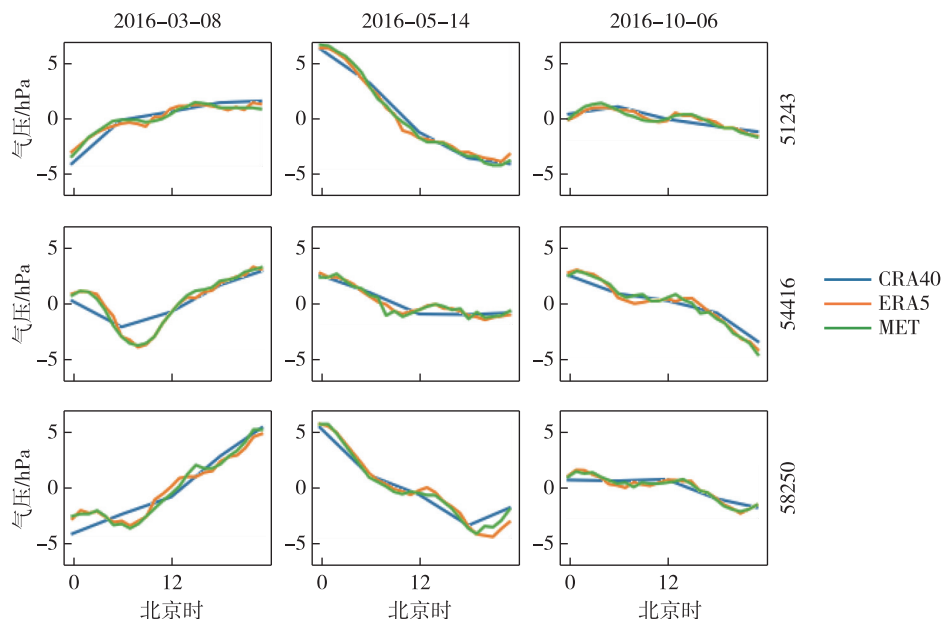


图4 在站点WMO编号58250、54416、51243(每排为同一测站)及2016-03-08、2016-05-14、2016-10-06处CRA40、ERA5、MET气压的日变化趋势

Fig. 4 Diurnal cycle of pressure over three stations (58250, 54416 and 51243) on three dates (2016-03-08, 2016-05-14 and 2016-10-06) based on CRA40, ERA5 and MET

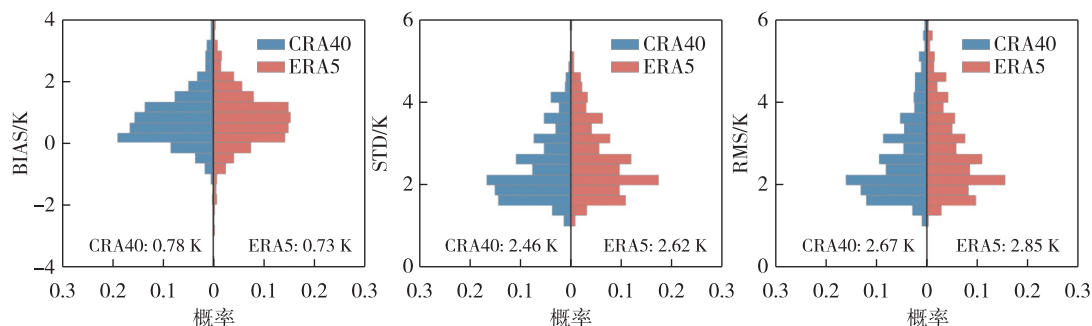


图5 CRA40和ERA5气温误差的BIAS(左)、STD(中)、RMS(右)的分布直方图

Fig. 5 Histograms of BIAS (left), STD (middle) and RMS (right) of temperature error between CRA40/ERA5 and MET

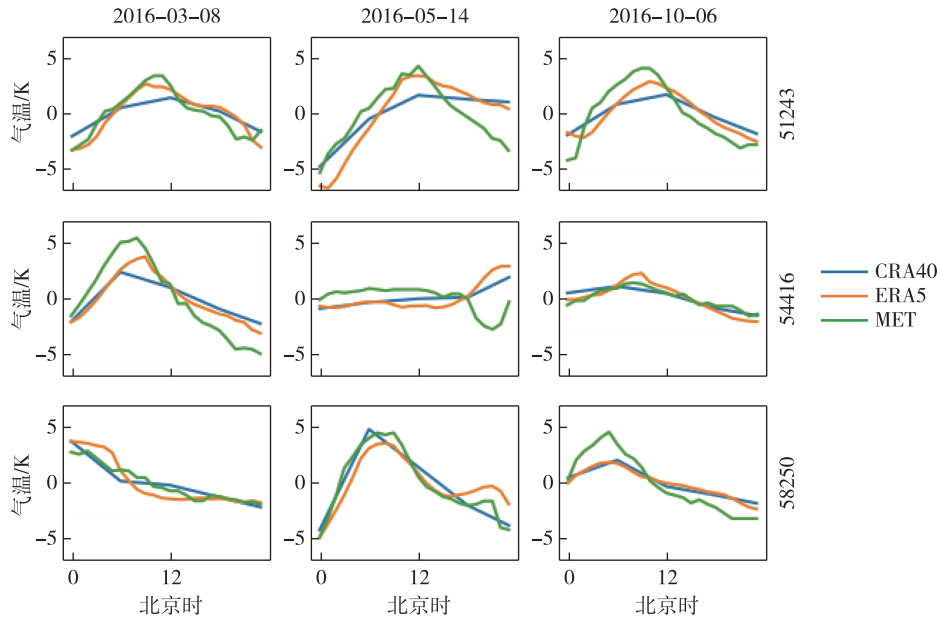


图6 在站点 WMO 编号 58250、54416、51243(每排为同一测站)及 2016-03-08、2016-05-14、2016-10-06 处 CRA40、ERA5、MET 气温的日变化趋势
Fig. 6 Temperature diurnal cycle over three stations (58250,54416 and 51243) on three dates (2016-03-08,2016-05-14 and 2016-10-06) based on CRA40,ERA5 and MET

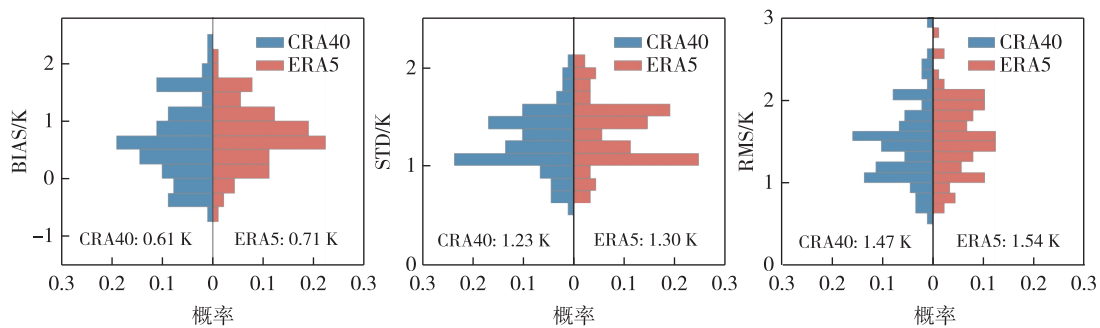


图7 CRA40 和 ERA5 的 T_m 误差的 BIAS(左)、STD(中)、RMS(右)的分布直方图
Fig. 7 Histograms of BIAS (left),STD (middle) and RMS (right) of T_m error for CRA40 and ERA5

从表 1 和图 7 中可以看出 CRA40 的精度整体略优于 ERA5,平均 RMS 分别为 1.47 和 1.54 K,从图 2 来看,二者的分布也基本一致.由于 Radiosonde 观测数据以 12 h 为间隔,本文不统计 T_m 的日变化趋势.

4 ZTD 评估

以陆态网的 GPS 测站估算结果作为评估 ZTD 的参考,CRA40 和 ERA5 的平均 BIAS、STD 和 RMS 在表 1 中给出,RMS 的分布如图 2 所示,误差分布直方图如图 8 所示.

从表 1 和图 8 可以看出,CRA40 的平均 BIAS 优于 ERA5,但平均 RMS 和 STD 均差于 ERA5,平均

RMS 分别为 13.5 和 11.4 mm.从图 2 可以看出在站点 RMS 分布上 CRA40 的 RMS 普遍差于 ERA5.

对比 ZTD 的日变化趋势,同样选取 3 个测站(编号 ahaq、gsjn、tjbd)在 3 个日期(2016-03-08、2016-05-22、2016-08-31)的结果,日距平值折线对比如图 9 所示.从图 9 中可以看出 ERA5 和 CRA40 均与 GPS 观测值符合较好.与气压评估中类似,CRA40 由于进行了时间差值,在日变化细节上有所缺失.

5 总结

本文评估了基于中国近期发布的新一代大气再分析资料 CRA40 计算气压、气温、大气水汽加权平

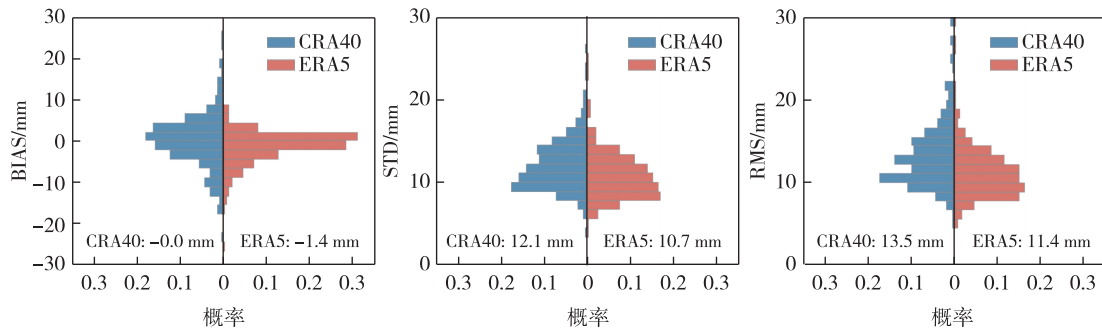


图8 CRA40和ERA5的ZTD误差的BIAS(左)、STD(中)、RMS(右)的分布直方图

Fig. 8 Histograms of BIAS (left), STD (middle) and RMS (right) for ZTD error between CRA40/ERA5 and MET

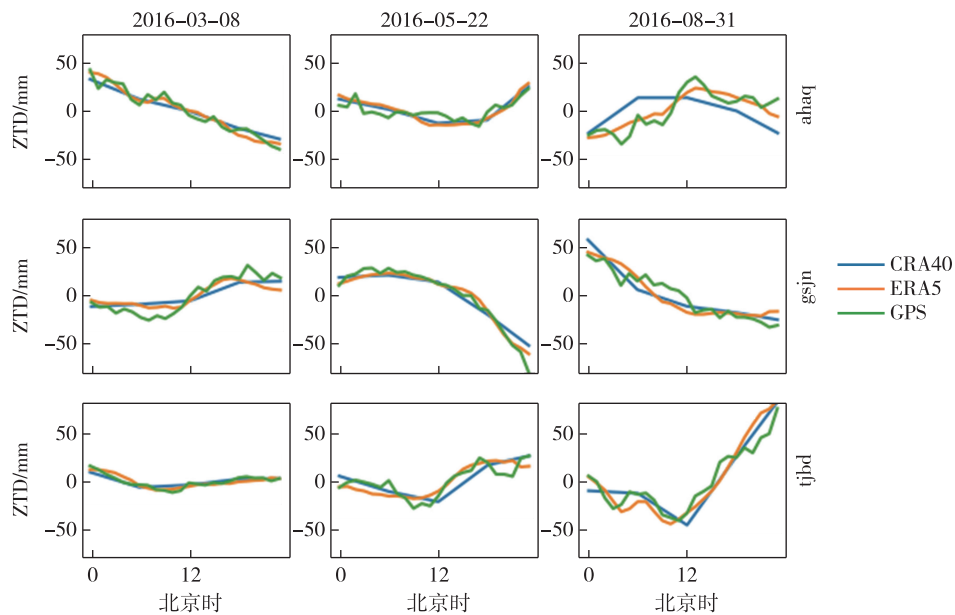


图9 在站点 txbd、gsjn、ahaq(每排为同一测站)及2016-03-08、2016-05-22、2016-08-31处CRA40、ERA5、GPS的ZTD数据的日变化趋势

Fig. 9 ZTD diurnal cycle over three stations (txbd,gsjn and ahaq) on three dates (2016-03-08,2016-05-22 and 2016-08-31) based on CRA40,ERA5 and GPS

均温度(T_m)、天顶对流层总延迟(ZTD)等关键参数的精度,分析了CRA40在中国地区GNSS水汽反演中的适用性.在中国地区,以2000多个地面气象站参考,评估发现CRA40的气压平均BIAS、STD和RMS分别为-0.07、0.80和0.91 hPa,而ERA5为-0.35、0.48和0.74 hPa,CRA40略差于ERA5.日变化方面两种再分析资料总体趋势一致,CRA40由于时间分辨率为6h,相比于ERA5,在日变化的细节上有所缺失.在气温评估中CRA40的平均BIAS、STD和RMS分别为0.78、2.46和2.67 K,而ERA5为0.73、2.62和2.85 K,CRA40气温略优于ERA5.以89个IGRA无线电探空测站为参考的 T_m 评估,CRA40的 averages BIAS、STD和RMS分别为0.61、

1.23和1.47 K,而ERA5为0.71、1.30和1.54 K,CRA40略优于ERA5.以中国地区200多个陆态网GPS测站为参考的ZTD评估中,CRA40的 averages BIAS、STD和RMS分别为0、12.1和13.5 mm,而ERA5为-1.4、10.7和11.4 mm,CRA40差于ERA5,两种气象再分析资料计算的ZTD日变化均同GPS ZTD符合较好.

参考文献

References

[1] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386
 [2] Saastamoinen J. Atmospheric correction for the

- troposphere and stratosphere in radio ranging satellites [M]//The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2013: 247-251
- [3] 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
- [4] Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor [J]. Climate Dynamics, 2005, 24(7/8): 741-758
- [5] Betts A K, Köhler M, Zhang Y C. Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalyses with observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D2): D02101
- [6] Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data [J]. Journal of Climate, 2011, 24(4): 965-991
- [7] Fujiwara M, Wright J S, Manney G L, et al. Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(2): 1417-1452
- [8] Zhang W X, Lou Y D, Huang J F, et al. Multiscale variations of precipitable water over China based on 1999–2015 ground-based GPS observations and evaluations of reanalysis products [J]. Journal of Climate, 2018, 31(3): 945-962
- [9] Zhang W X, Zhang H, Liang H, et al. On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93 (10): 1897-1909
- [10] Zhang W X, Lou Y D, Haase J S, et al. The use of ground-based GPS precipitable water measurements over China to assess radiosonde and ERA-interim moisture trends and errors from 1999 to 2015 [J]. Journal of Climate, 2017, 30(19): 7643-7667
- [11] Ma L J, Zhang T J, Li Q X, et al. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground-based measurements in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113 (D15): D15115
- [12] Reuten C, Moore R D, Clarke G K C. Quantifying differences between 2-m temperature observations and reanalysis pressure-level temperatures in northwestern North America [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(4): 916-929
- [13] Zhou C L, He Y Y, Wang K C. On the suitability of current atmospheric reanalyses for regional warming studies over China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(11): 8113-8136

On the applicability of CRA40 in GNSS precipitable water vapor retrieval over China

LIU Mengjie¹ ZHANG Weixing² ZHANG Zhenyi² LOU Yidong² LIANG Hong³ CAO Yunchang³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079

² GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079

³ Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The key parameters including air pressure, air temperature, water vapor weighted mean temperature (T_m) and Zenith Total Delay (ZTD), which are involved in GNSS precipitable water vapor retrieval, are estimated based on CRA40 released by China Meteorological Administration. The accuracy and reliability of the estimated key parameters over China are comprehensively evaluated, taking data of ground meteorological station, radiosonde station and GNSS station as reference. The performance of CRA40 is compared with the latest ECMWF global reanalysis, ERA5. The results illustrate that CRA40 performs slightly worse than ERA5 in aspects of air pressure and ZTD, with average Root Mean Squares (RMS) of 0.91 hPa and 13.5 mm, respectively. While CRA40 is generally superior to ERA5 in air temperature and T_m estimation, with RMS of 2.67 K and 1.47 K, respectively. The diurnal variations of three parameters including air pressure, air temperature and ZTD estimated from CRA40 generally agree well with the in-situ measurements.

Key words GNSS precipitable water vapor retrieval; CRA40; ERA5; diurnal variation