



莫智翔<sup>1,2</sup> 黄玲<sup>1,2</sup> 郭希<sup>1,2</sup> 黄良珂<sup>1,2</sup> 刘立龙<sup>1,2</sup> 庞周洲<sup>1</sup> 邓云飞<sup>1</sup>

# 利用 ERA5 资料进行桂林地区 GNSS 水汽反演精度分析

## 摘要

由于桂林地区地基 GNSS 站并未配置气象传感器,致使大量 GNSS 观测数据无法在大气水汽(PWV)监测中发挥作用.针对这一情况,本文将欧洲中期天气预报中心(ECMWF)最新发布的 ERA5 再分析资料中测站处的气压和温度气象数据加入到 GNSS 水汽反演中,并将反演结果与利用地面气象站反演的 GNSS 水汽做对比,以此评估 ERA5 在桂林地区反演 GNSS 水汽的精度和适用性.结果表明:1)以桂林地区 2017 年 10 个地面气象站的实测气压和温度数据为参考值,ERA5 地表气压和温度的年均偏差分别为  $-0.35$  hPa 和  $0.86$  K,年均均方根误差(RMSE)分别为  $0.65$  hPa 和  $1.66$  K,该精度可用于 GNSS 水汽反演;2)以 2017 年 6—7 月 GNSS 利用地面气象站反演的 PWV 为参考值,ERA5 反演的 GNSS PWV 的偏差和 RMSE 分别为  $0.17$  mm 和  $0.35$  mm,且两者具较好的相关性和一致性.由此表明,ERA5 地表温压产品可应用于桂林地区 GNSS 水汽反演,这些研究结果可为桂林地区的 GNSS 水汽反演及数据源的选用提供重要的参考依据.

## 关键词

ERA5;全球导航卫星系统;大气水汽;桂林地区

中图分类号 P227

文献标志码 A

收稿日期 2020-12-31

资助项目 国家自然科学基金(41864002,41704027,41664002);广西“八桂学者”岗位专项;广西自然科学基金(2017GXNSFDA198016,2017GXNSFBA198139,2018GXNSFAA281182);广西空间信息与测绘重点实验室基金(16-380-25-01,15-140-07-19)

## 作者简介

莫智翔,男,硕士生,研究方向为 GNSS 气象学.zxmo@glut.edu.cn

黄良珂(通信作者),男,博士,副教授,研究方向为 GNSS 气象学.lkhuang666@163.com

## 0 引言

大气水汽(Precipitable Water Vapor, PWV)是地球大气中的重要组成部分,其变化与降水直接相关,并在大气能量传输、天气系统演变、大气辐射收支、全球气候变化等多种气象演变中扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>.目前,在气候研究及天气预报中的一项基本工作就是要精确探测出大气水汽的分布及其变化规律,达到监测和预报的目的.因此,系统全面地监测并分析水汽的时空分布对研究各种复杂的气候特征、短期天气预报和气候灾害预警具有重要意义.

传统的大气水汽探测方法主要包括无线电探空站、微波辐射计、雷达观测和卫星遥感等,但使用费用昂贵,且时空分辨率低,离监测和预报中小尺度灾害性天气的要求还有很大差距.随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术在气象探测领域的应用,地基 GNSS 能较好地弥补传统大气水汽探测技术在时空分辨率上的不足,并有效提供精细化气象预报所需要的高精度、大容量、近实时的大气水汽资料<sup>[2]</sup>.

然而,利用 GNSS 技术进行大气水汽反演往往需要获得相应的地面气压和地面温度等气象数据,但由于大部分 GNSS 观测站建设时没有安装气象传感器,致使这些数据无法应用于气象变化研究.再分析资料因为其庞大的数据量和高时空分辨率,可以有效弥补地面气象观测资料时空分布不均匀的缺陷,被诸多学者作为补充数据源来获取 GNSS 反演水汽所需的气象参数,并验证了这种方法的可行性和可靠性<sup>[3]</sup>.文献[4]以中国地区 24 个气象站的气压、气温和相对湿度实测资料为标准评估了 ERA-Interim 再分析资料应用于 GPS PWV 计算的精度.文献[5]利用山东及周边地区的观测数据,对 ERA5 再分析数据在山东地区的适用性进行了初步分析,并与 ERA-Interim 再分析数据进行对比.文献[6]利用江淮地区 15 个观测站的观测资料对 ERA-Interim 再分析资料在江淮地区的适用性进行了对比分析.文献[7]利用探空数据评估了 ERA5 再分析资料温压产品在中国地区的精度,并将 ERA5 温压产品用于反演逐小时 GNSS PWV 资料.

ERA5 是欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)最新发布的第五代全球气候再分析数据集,该数据集可提供高时空分辨率的温度和气压等气象数据,但目前尚没有利用 ERA5 再分析资料应用于桂林地区 GNSS 水汽反演

1 桂林理工大学 测绘地理信息学院,桂林,541006

2 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室,桂林,541006

并进行相应精度评估的相关文献,故需开展针对桂林地区利用 ERA5 再分析资料计算 GNSS PWV 的精度进行评估与分析.本文以桂林地区 2017 年 10 个地面气象站及 GNSS 观测数据为例,评估利用 ERA5 地表气压和温度进行 GNSS 水汽反演的精度,可为后续 ERA5 数据在桂林地区的使用和开展相关方面的 GNSS 水汽研究提供参考依据.

## 1 数据来源及处理方法

### 1.1 数据来源

ERA5 是 ECMWF 提供的最新大气再分析资料,其水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,垂直分辨率为 37 层,时间分辨率可达 1 h (<https://cds.climate.copernicus.eu/>).本文采用的是 2017 年 ERA5 地表气压和温度气象资料以及对应的地表位势高资料.探空站资料可提供探空气球每天在 0 时和 12 时探测两次的实测的地表以及分层的气象数据,该数据可从美国怀俄明州立大学网 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) 上下载,其实测的 PWV 资料常用来评估其他水汽产品.实测的气压、温度资料来自地面气象站观测,其时间分辨率为 1 h,可在中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 上下载获取.所用的 GNSS 观测数据采集自桂林地区 2017 年 6—7 月的 GNSS 站,其时间分辨率也为 1 h.所用站点的位置如图 1 所示.

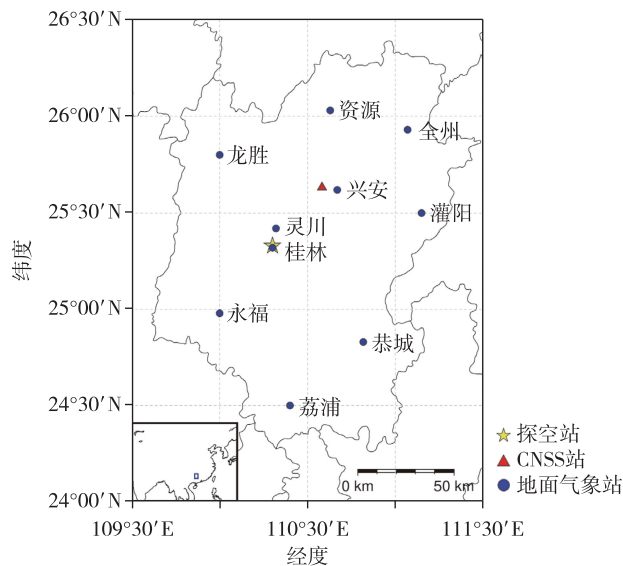


图 1 桂林地区地面气象站、探空站和 GNSS 站分布

Fig. 1 Distribution of Guilin's ground meteorological stations, radiosonde and GNSS station

### 1.2 GNSS 水汽反演

GNSS 反演大气水汽 PWV (量值记为  $x_{\text{PWV}}$ ) 与天

顶湿延迟 (ZWD, 量值记为  $y_{\text{ZWD}}$ ) 的基本关系式<sup>[8]</sup>为

$$x_{\text{PWV}} = \Pi \cdot y_{\text{ZWD}}, \quad (1)$$

式中  $\Pi$  为无量纲水汽转换系数.

本文首先利用 GAMIT/GLOBK 高精度 GNSS 数据处理软件解算桂林地区 GNSS 原始观测数据得到对流层天顶总延迟量 ZTD, 解算的 ZTD 数据经过国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 的高精度 ZTD 产品验证, 其均方根误差 (RMSE) 在 5 mm 左右, 具有较高的精度和可靠性. 根据 Saastamoinen 模型由气压值计算出天顶静力延迟量 ZHD (量值记为  $y_{\text{ZHD}}$ )<sup>[9]</sup>:

$$y_{\text{ZHD}} = \frac{2.2767P_s}{1 - 0.00266\cos(2\varphi) - 0.00028h_0}, \quad (2)$$

式中:  $P_s$  为地面气压, 单位为 hPa;  $\varphi$  为测站的纬度;  $h_0$  为大地高, 单位为 km; 计算出的  $y_{\text{ZHD}}$  单位为 mm.

GNSS 数据解算出的 ZTD (量值记为  $y_{\text{ZTD}}$ ) 减去由 Saastamoinen 模型计算出的 ZHD 而间接获得 ZWD, 即式(3)所示:

$$y_{\text{ZWD}} = y_{\text{ZTD}} - y_{\text{ZHD}}. \quad (3)$$

利用常用的 Bevis 模型(式(4)), 通过温度 ( $T_s$ ) 算出大气加权平均温度 ( $T_m$ ) 值, 再据计算得到的  $T_m$  值, 代入式(5)则可算出水汽转换系数  $\Pi$ :

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s, \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m + k'_2)]}, \quad (5)$$

式中:  $\rho_w = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  为液态水的密度;  $R_v = 461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  为水汽气体常数;  $k'_2, k_3$  为大气物理参数, 经验值通常分别为  $22.13 \pm 2.20 \text{ K/hPa}$ 、 $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5 \text{ K/hPa}$ .

地面站一般不与再分析资料的格网点重合, 且站点高程基准也与格网点不同, 因此需要先进行高程基准的统一, 再将格网点插值到站点位置上. 再分析资料采用的高程系统为位势高, 地面气象站采用海拔高, GNSS 站则为大地高, 海拔高与位势高之间的差异对气象参数的高程改正影响较小, 可忽略不计, 但大地高和位势高之间的差异则不可忽视, 对此可采用 EGM2008 模型实现高程基准的统一<sup>[10-11]</sup>. 由于站点与其附近 4 个格网点的高程不一致, 因此需要对气温和气压数据进行垂直方向上的插值改正, 插值公式<sup>[12]</sup>分别如下:

$$T = T_0 - \gamma(h_1 - h_2), \quad (6)$$

$$P = P_0 \left[ 1 - \frac{\gamma(h_1 - h_2)}{T_0} \right]^{\frac{g \cdot M}{R \cdot \gamma}}, \quad (7)$$

$$g = 9.8063 \cdot \left\{ 1 - 10^{-7} \frac{h_1 + h_2}{2} [1 - 0.0026373 \cdot \cos(2\varphi) + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot \cos^2(2\varphi)] \right\}, \quad (8)$$

式中: $T$ 和 $T_0$ (K)分别表示在高度为 $h_1$ 和 $h_2$ (m)时对应的温度值; $P$ 和 $P_0$ (hPa)分别表示在高度为 $h_1$ 和 $h_2$ 时对应的气压值; $\gamma$ 为垂直递减率,一般取平均常数 $-0.0065$  K/m; $M$ 为干空气的摩尔质量,通常取值为 $0.0289644$  kg/mol; $R$ 为理想气体常数,通常取值为 $8.31432$  N·m/(mol·K); $g$ 为重力加速度。

根据上述方法计算出最近4个格网点在站点高度处的气象参数后,采用双线性插值法进行水平方向的插值,最终获得GNSS站处的气象参数值。

## 2 精度评估

本文以桂林地区2017年10个地面气象站的气压和温度资料为参考值,评价ERA5再分析资料温度和气压的精度,并使用偏差(bias,其量值记为 $\varepsilon_{\text{bias}}$ )与均方根误差(RMSE,其量值记为 $\varepsilon_{\text{RMSE}}$ )作为精度指标,其公式为

$$\varepsilon_{\text{bias}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{O_i} - X_{R_i}), \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{O_i} - X_{R_i})^2}, \quad (10)$$

式中: $N$ 为数据的样本数; $X_{O_i}$ 表示观测值; $X_{R_i}$ 为参考值。

### 2.1 ERA5 资料温压精度评估

本文利用桂林地区2017年10个地面气象站的气压和温度资料来验证ERA5再分析资料地表气压和温度的精度,对所求的偏差和RMSE进行了统计,统计结果如表1和图2所示。

表1 桂林地区地面气象站资料检验ERA5  
气压和温度的精度统计

Table 1 Bias and RMSE of ERA5 pressure and temperature tested by ground meteorological stations in Guilin

气象参数	偏差			RMSE		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
气压/hPa	-0.74	-0.04	-0.35	0.48	0.95	0.65
温度/K	0.19	1.44	0.86	1.31	2.07	1.66

由表1可知:与10个地面气象站实测的气压相比,由ERA5资料获取的气压年均偏差为 $-0.35$  hPa(最大值恭城站 $-0.04$  hPa,最小值永福站 $-0.74$  hPa),全部站点上的年均偏差均为负值,说明ERA5

资料的气压值要稍低于实测值;气压年均RMSE为 $0.86$  hPa(最大值永福站 $0.95$  hPa,最小值恭城站 $0.48$  hPa)。与10个地面气象站实测的温度相比,由ERA5资料获取的温度年均偏差为 $0.86$  K(最大值龙胜站 $1.44$  K,最小值恭城站 $0.19$  K),全部站点上的年均偏差均为正值,说明ERA5资料的温度值要稍高于实测值;温度年均RMSE为 $1.66$  K(最大值龙胜站 $2.07$  K,最小值恭城站 $1.31$  K)。总之,ERA5资料气压和温度产品的精度较为稳定、可靠。

由图2可知,位于桂林西南地区的永福站、荔浦站及桂林东部地区的灌阳站上ERA5气压的年均绝对偏差和RMSE要高于桂林其他地区,其年均偏差和RMSE分别在 $-0.6$  hPa和 $0.9$  hPa左右,桂林中部及北部地区的年均绝对偏差和RMSE则相对较小。位于桂林西北地区的龙胜站及桂林东部地区的灌阳站上ERA5温度的年均偏差和RMSE要高于桂林其他地区,其年均偏差和RMSE分别在 $1.4$  K和 $2$  K左右,桂林中部地区的年均偏差和RMSE则相对较小。总体上ERA5气压和温度的精度随纬度和经度变化不明显,多个站点均保持良好的精度,其中在桂林中部地区精度表现较好。

为了进一步分析在桂林地区ERA5气压和温度的精度随时间变化的特征,均匀选取桂林地区4个地面气象站上ERA5气压、温度的偏差和RMSE分别做日均统计,进而分析ERA5气压、温度的偏差和RMSE的时间变化特征。气压和温度的误差具体统计结果分别如图3和图4所示。

从图3可知,ERA5气压的年均绝对偏差和RMSE除了资源站在全年变化不大外,在其他大部分站点上均有明显的季节变化,峰值发生在冬季,谷值发生在夏季,其精度在冬季波动最大,但是全年大部分的绝对偏差和RMSE均分布在 $2$  hPa以内,且全年具有明显的负偏差。由图4可知,ERA5温度的年均绝对偏差和RMSE的季节变化和气压一样,温度的绝对偏差和RMSE在夏季达到最低而冬季的值相对较高,其精度在冬季变化也较为明显,但其波动幅度相比气压较大,且全年具有明显的正偏差,这与桂林地区复杂的气候条件有一定联系。尽管如此,其绝对偏差和RMSE在全年的大部分时间均低于 $4$  K。

### 2.2 基于ERA5资料的GNSS PWV精度评估

对2017年6—7月桂林地区的1个离桂林探空站最近的GNSS站解算的ZTD数据,分别用离其最近的兴安气象站提供的实测气压、温度和ERA5资

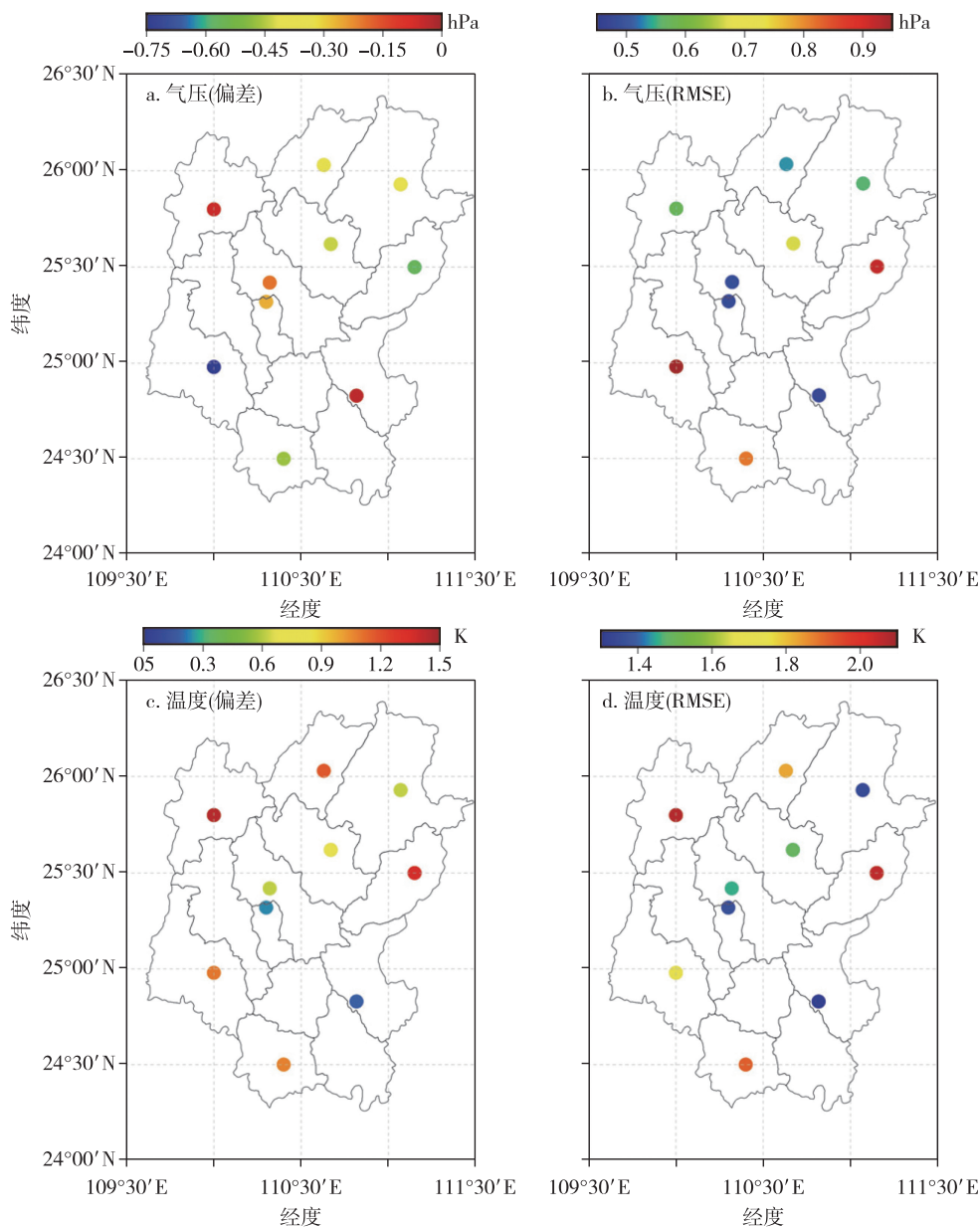


图2 利用地面气象站检验桂林地区 ERA5 气压和温度的年均偏差和 RMSE 分布  
Fig. 2 Annual average bias and RMSE of ERA5 pressure (a,b) and temperature (c,d) tested by ground meteorological stations in Guilin

料提取的气象参数计算出各自的逐小时 GNSS PWV (分别简称为 MET-PWV 和 ERA5-PWV). 在得出 MET-PWV 值后,经过桂林探空站实测的 PWV 资料验证,其平均偏差和 RMSE 分别为-0.77 mm 和 3.5 mm,具有较高的精度和可靠性.因此,以 MET-PWV 为参考值,对 ERA5-PWV 的精度进行评估来验证利用 ERA5 温压反演的 GNSS PWV 可靠性,两者随时间变化及对比结果如图 5 所示.

由图 5 可知,ERA5-PWV 与 MET-PWV 整体变化趋势、峰值和谷值基本吻合,具有很好的一致性.对 ERA5-PWV 与 MET-PWV 进行概率统计分析,得

到两种数据的相关系数  $R$  为 0.99,为强相关,说明这两种数据具有很高的一致性.ERA5-PWV 的平均偏差和 RMSE 分别为 0.17 mm 和 0.35 mm,两者数据偏离程度相差不多,ERA5-PWV 与 MET-PWV 精度相当.此外,2017 年 6—7 月这个时间段桂林地区处于水汽变化剧烈、降雨频发时期,而尽管如此 ERA5-PWV 仍保持较好精度.以上分析说明利用 ERA5 地表温压资料反演的 GNSS PWV 精度良好,可以借助 ERA5 获取相应的 GNSS PWV 时间序列.这对桂林地区气候变化的研究具有重要的意义.

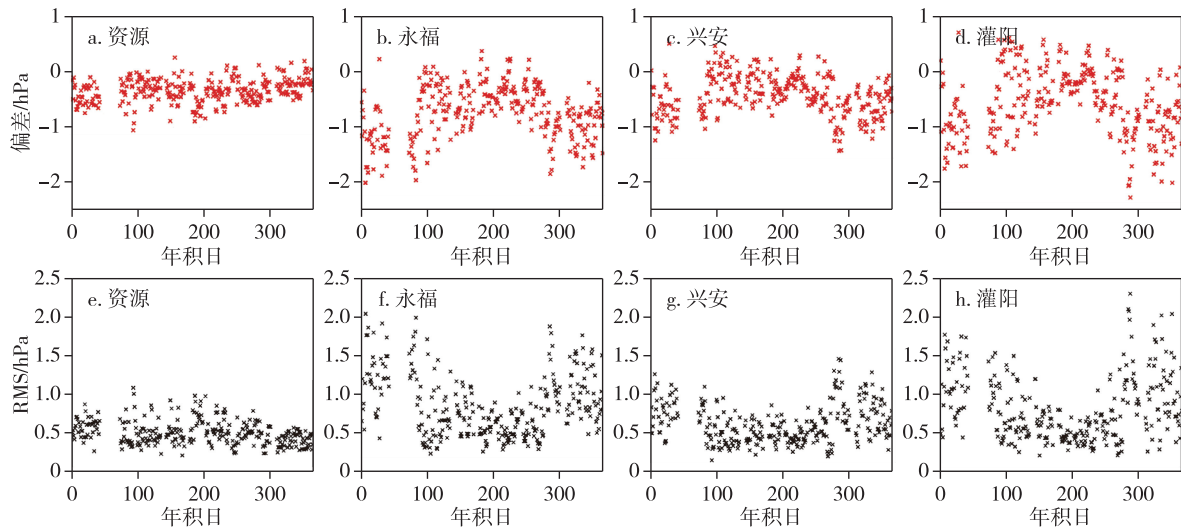


图3 桂林地区4个地面气象站上ERA5气压资料的日均偏差和RMSE变化

Fig. 3 Daily bias and RMSE of ERA5 pressure at 4 ground meteorological stations in Guilin, (a) and (e) for Ziyuan, (b) and (f) for Yongfu, (c) and (g) for Xing'an, (d) and (h) for Guanyang

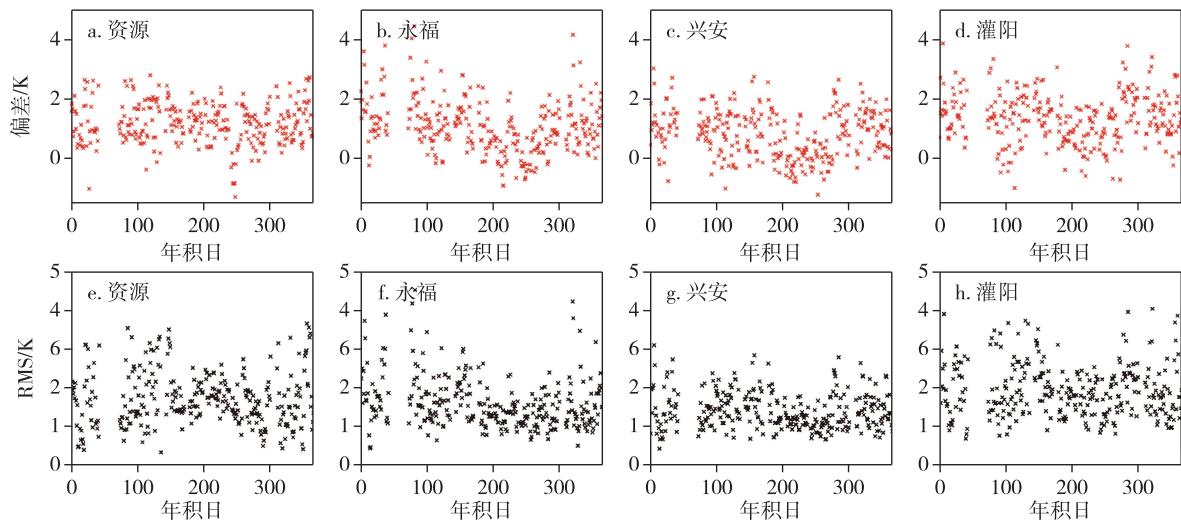


图4 桂林地区4个地面气象站上ERA5温度资料的日均偏差和RMSE变化

Fig. 4 Daily bias and RMSE of ERA5 temperature at 4 ground meteorological stations in Guilin, (a) and (e) for Ziyuan, (b) and (f) for Yongfu, (c) and (g) for Xing'an, (d) and (h) for Guanyang

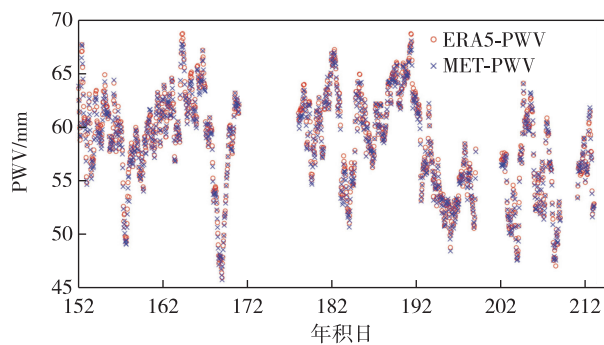


图5 ERA5-PWV和MET-PWV对比时间序列

Fig. 5 Time series of ERA5-PWV and MET-PWV

### 3 结论

本文利用2017年ERA5再分析资料和分布在桂林地区10个地面气象站的实测气压、温度资料,研究和评估了ERA5再分析资料在桂林地区获取地表气压、温度并计算GNSS PWV的精度,结果表明:

1)与实测气压相比,ERA5地表气压和温度精度较高,10个测站年均偏差分别为-0.35 hPa和0.86 K,年均RMSE分别为0.65 hPa和1.66 K;

2)总体上ERA5地表气压和温度在桂林中部地区好于周边地区,且气压和温度的精度夏季高于

冬季;

3) 利用 ERA5 温压反演的 GNSS PWV 与利用实测气象资料计算的 PWV 值相比,平均偏差和 RMSE 分别为 0.17 mm 和 0.35 mm,且两者差异较小。

总之,ERA5 再分析资料地表气压和温度产品的精度较高,在桂林地区水汽变化剧烈的夏季反演出的 GNSS 水汽仍具有较高的精度.该研究结果可为桂林地区高精度 GNSS 水汽反演及数据源选择提供重要的参考依据。

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 姚宜斌,张顺,孔建.GNSS 空间环境学研究进展和展望[J].测绘学报,2017,46(10):1408-1420  
YAO Yibin, ZHANG Shun, KONG Jian. Research progress and prospect of GNSS space environment science [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1408-1420
- [ 2 ] 黄良珂,彭华,刘立龙,等.顾及垂直递减率函数的中国区域大气加权平均温度模型[J].测绘学报,2020,49(4):432-442  
HUANG Liangke, PENG Hua, LIU Lilong, et al. An empirical atmospheric mean temperature model considering the lapse rate function for China [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(4):432-442
- [ 3 ] Wang J H, Zhang L Y, Dai A G, et al. A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground based GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D11): D11107
- [ 4 ] 赵静暘,宋淑丽,朱文耀.ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS-PWV 计算的精度评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(8):935-939  
ZHAO Jingyang, SONG Shuli, ZHU Wenyao. Accuracy assessment of applying ERA-Interim reanalysis data to calculate ground-based GPS/PWV over China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8):935-939
- [ 5 ] 孟宪贵,郭俊建,韩永清.ERA5 再分析数据适用性初步评估[J].海洋气象学报,2018,38(1):91-99  
MENG Xiangui, GUO Junjian, HAN Yongqing. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1):91-99
- [ 6 ] 王传辉,姚叶青,时刚.江淮地区 ERA-Interim 再分析与观测温度资料对比分析[J].气象,2018,44(9):1220-1228  
WANG Chuanhui, YAO Yeqing, SHI Gang. Comparative analysis of ERA-Interim temperature reanalysis data and observations over Jianghuai region [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9):1220-1228
- [ 7 ] Zhao Q Z, Yang P F, Yao W Q, et al. Hourly PWV dataset derived from GNSS observations in China [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(1):231
- [ 8 ] Asken J, Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data [J]. Radio Science, 1987, 22(3):379-386
- [ 9 ] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. Bulletin Géodésique, 1972, 105(1):279-298
- [ 10 ] Jiang P, Ye S R, Chen D Z, et al. Retrieving precipitable water vapor data using GPS zenith delays and global reanalysis data in China [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5):389
- [ 11 ] 章传银,郭春喜,陈俊勇,等. EGM 2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J].测绘学报,2009,38(4):283-289  
ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM 2008 and its application analysis in Chinese mainland [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4):283-289
- [ 12 ] Wang X M, Zhang K F, Wu S Q, et al. Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121:833-852

## Accuracy of ERA5 reanalysis data in retrieving GNSS precipitable water vapor over Guilin

MO Zhixiang<sup>1,2</sup> HUANG Ling<sup>1,2</sup> GUO Xi<sup>1,2</sup> HUANG Liangke<sup>1,2</sup>

LIU Lilong<sup>1,2</sup> PANG Zhouzhou<sup>1</sup> DENG Yunfei<sup>1</sup>

1 College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006

2 Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541006

**Abstract** Guilin's ground-based GNSS station cannot be fully exploited in Precipitable Water Vapor (PWV) monitoring, owing to its omission of meteorological sensors. Here we use the pressure and temperature data from ERA5 reanalysis as well as from Guilin's ground meteorological stations to retrieve the GNSS PWV, so as to evaluate the accuracy and applicability of ERA5 in GNSS PWV retrieval in Guilin. The results show that referenced with data of Guilin's 10 ground meteorological stations in 2017, the ERA5 data of surface pressure (annual bias: -0.35 hPa, an-

nual RMSE:0.65 hPa) and temperature (annual bias:0.86 K, annual RMSE:1.66 K) are accurate enough for GNSS PWV retrieval.As for the GNSS PWV retrieval results,the ERA5 approach has an average bias of 0.17 mm and RMSE of 0.35 mm,which is well correlated and consistent with meteorological station approach.The above results validate the accuracy and applicability of ERA5 surface temperature and pressure products in GNSS PWV retrieval in Guilin,and provide reference for GNSS PWV retrieval and data selection in other regions.

**Key words** ERA5;Global Navigation Satellite System (GNSS);Precipitable Water Vapor (PWV);Guilin