



### 京津冀地区FY-4A水汽校正模型研究

王 勇, 姜诺涵, 刘严萍, 刘 晓, 占 伟

#### Study on FY-4A PWV correction model in Beijing-Tianjin-Hebei region

WANG Yong, JIANG Nuohan, LIU Yanping, LIU Xiao, and ZHAN Wei

引用本文:

王勇, 姜诺涵, 刘严萍, 等. 京津冀地区FY-4A水汽校正模型研究[J]. 全球定位系统, 2022, 47(3): 119–126. DOI: 10.12265/j.gnss.2021092604

WANG Yong, JIANG Nuohan, LIU Yanping, et al. Study on FY-4A PWV correction model in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Gns World of China, 2022, 47(3): 119–126. DOI: 10.12265/j.gnss.2021092604

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021092604>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 京津冀地区GNSS对流层延迟空间插值研究

Study on GNSS zenith tropospheric delay spatial interpolation in Beijing-Tianjin-Hebei region

全球定位系统. 2019, 44(1): 101–107

#### 基于小波变换的地震前后GNSS ZTD异常变化分析

Abnormal change of GNSS ZTD before and after earthquake based on wavelet transform

全球定位系统. 2019, 44(3): 62–68

#### 基于BDS精密星历产品的水汽探测性能分析

Performance analysis of water vapor detection based on BeiDou precise ephemeris products

全球定位系统. 2019, 44(5): 91–99

#### 大气负荷对我国GNSS站地壳垂向形变影响分析

Analysis of Vertical Crustal Displacements Due to Atmospheric Loading Effects at GNSS Stations in China

全球定位系统. 2018, 43(4): 14–18

#### 不同饱和水汽压模型对GNSS反演可降水量的影响分析

Analysis of influence of different saturated water vapor pressure models on GNSS inversion precipitable water

全球定位系统. 2020, 45(6): 55–63

#### 青岛地区CORS反演水汽中大气加权平均温度模型的建立

Research of Local Model of Weighted Mean Temperature of CORS Water Vapor Retrieval in Qingdao

全球定位系统. 2018, 43(3): 88–94



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2021092604

# 京津冀地区 FY-4A 水汽校正模型研究

王勇<sup>1,2</sup>, 姜诺涵<sup>1</sup>, 刘严萍<sup>3</sup>, 刘晓<sup>1</sup>, 占伟<sup>4</sup>

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384;

2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;

3. 天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384;

4. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 融合全球卫星导航系统 (GNSS) 与风云气象卫星 FY-4A 可获得高精度高空间分辨率的水汽分布信息. 利用中国大陆构造环境监测网络 (CMONOC) 提供的 GNSS 观测资料开展京津冀地区 FY-4A 水汽校正研究. 首先对京津冀地区进行区域划分, 按区域分季节开展 GNSS 水汽与 FY-4A 水汽的相关性分析; 其次分区域、分季节选择不同的函数模型结合 GNSS 水汽资料构建 FY-4A 水汽校正模型; 然后采取区域模型、单站点模型与实测 GNSS 水汽开展模型的可靠性检验; 最后通过分区域 FY-4A 水汽校正和图像叠加, 获得校正后的京津冀地区 FY-4A 水汽分布. 研究表明: FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的相关性较好, 区域 FY-4A 水汽校正模型精度与单站点模型精度相当, 可取代单站点模型用于 FY-4A 的水汽校正. 基于 CMONOC 的分区域函数模型在一定程度上提高 FY-4A 水汽精度, 为短期天气预报和合成孔径雷达 (InSAR) 大气校正提供参考.

**关键词:** 中国大陆构造环境监测网络; 全球卫星导航系统 (GNSS); 风云气象卫星; 水汽; 校正模型

中图分类号: P227

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2022)03-0119-08

## 0 引言

京津冀地处华北平原, 经济发展迅速<sup>[1]</sup>. 近年来, 京津冀饱受暴雨、城市内涝等自然灾害的影响<sup>[2]</sup>. 随着京津冀一体化和雄安新区规划等政策的实施, 未来城市对防洪预警的要求更加严格, 准确的短期天气预报十分必要<sup>[2-4]</sup>. 大气可降水量 (PWV) 的分布与变化是影响区域气候环境和天气特征的重要因素之一, 因其复杂的时空变化, PWV 难以精确测定和预报<sup>[5]</sup>. PWV 的时空差异变化也影响雷达传播信号使其产生延迟, 是影响合成孔径雷达 (InSAR) 干涉测量精度的主要误差源之一<sup>[6-7]</sup>. 目前利用全球卫星导航系统 (GNSS) 反演水汽已逐渐发展成熟<sup>[8-9]</sup>, 具有高精度和全天候能力的优势. GNSS 反演的 PWV 具有较高的空间分辨率, 已成为气象学观测的重要来源之一. GNSS PWV 与无线电探空、水汽辐射计水汽的变化一致, 偏差为 1~2 mm<sup>[10-12]</sup>, 可满足气象应用的精度要求. WANG 等验证了 FY-4A 水汽产品的准确性和实

用性, FY-4A 水汽的均方根误差 (RMSE) 在 24:00 时较高 (1.79~6.04 mm), 在 12:00 时较低 (1.49~4.4 mm), 其均方根误差 (RMSE)<sup>[13]</sup> 远大于 GNSS 水汽的 RMSE. FY-4A 是静止气象卫星, 因受降水、气溶胶、水汽、地表反射光谱不确定等影响, 影响了 FY 水汽产品的测量精度<sup>[14-16]</sup>. 国内外关于 FY-4A 水汽产品校正的研究较少, 为了充分利用 FY-4A 水汽产品的高时空分辨率优势并用于短期天气预报和 InSAR 大气校正, 有必要开展 FY-4A 水汽校正研究.

鉴于 FY-4A 水汽存在偏差以及京津冀地区防洪预警的必要性, 本文将开展京津冀地区的 FY-4A 水汽校正研究. 通过对京津冀地区进行区域划分, 开展区域 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的比较, 根据相关性选择合适的模型函数, 构建各季节京津冀区域 FY-4A 水汽校正模型, 以期天气预报及 InSAR 大气校正提供参考.

收稿日期: 2021-09-26

资助项目: 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLGED-2021-2-4); 天津市科技计划项目 (21KPHDR00070); 天津市教委科研计划项目 (2021ZD001)

通信作者: 王勇 E-mail: wangyongjz@126.com

## 1 研究区域与研究数据

### 1.1 研究区域

京津冀地区包含北京和天津 2 个直辖市以及河北省,该地区地势总体走向为西北高、东南低,平原、盆地、丘陵、山地一应俱全,其中坝上高原属蒙古高原一部分,平均海拔在 1 200~1 500 m,燕山及太行山地海拔多在 2 000 m 以下,燕山以北为张北平原,其余为河北平原,河北平原为华北平原一部分,其海拔在 100 m 以下,研究区域涉及 CMONOC 观测站点 16 个.受地理位置、海拔、气候类型、季节等因素的影响,京津冀地区水汽值存在时空差异.综合考虑地理位置、海拔、气候类型、相关性等因素,将京津冀地区划分为 4 个区域. GNSS 站点分布及区域划分如图 1 所示.

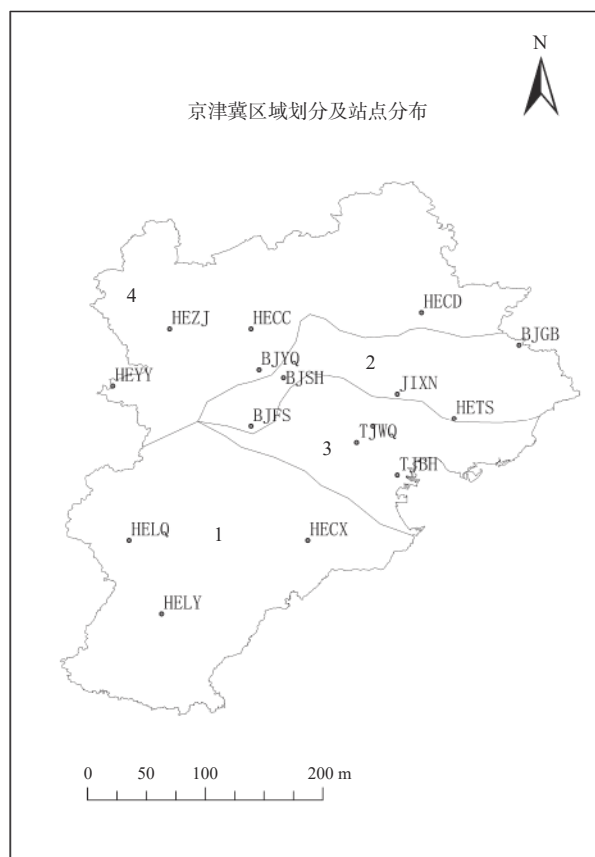


图 1 京津冀地区 GNSS 站点分布及区域划分

### 1.2 研究数据

研究数据包含 GNSS 水汽与 FY-4A 水汽,数据时间为 2019-03—2020-02,由于水汽存在较为明显的

季节性差异,将研究数据时间分为春、夏、秋、冬四个季节,划分时间为:春季为 3 月~5 月;夏季为 6 月~8 月;秋季为 9 月~11 月;冬季为 12 月及次年 2 月.

#### 1.2.1 GNSS 水汽获取

GNSS 水汽数据由 CMONOC 观测数据和气象数据,经过高精度定位定轨软件 GAMIT10.61 结合精密星历、松弛解模式,以天为单位对 GNSS 观测数据计算获得.星历为国际 GNSS 服务 (IGS) 精密星历,RELAX 解算模式,卫星高度角  $10^\circ$ ,天顶对流层延迟 (ZTD) 解算设置为每小时估算一个值. GNSS 测站间的距离超过 500 km,获得的 ZTD 为绝对观测值,因此可用于水汽计算. ZTD 包括静力学延迟 (ZHD) 和对流层湿延迟 (ZWD). ZHD 结合测站纬度、大地高和气压观测数据,利用 Saastamoinen 模型精确计算获得,ZWD 为 ZTD 与 ZHD 的差值,代入公式  $PWV = \Pi \times ZWD$  可获得 PWV,转换系数  $\Pi$  可由 Bevis 公式计算获得.反演获得的 GNSS 水汽时间序列图,对于个别时间点的 GNSS 水汽值异常,给予删除预处理<sup>[17]</sup>.

#### 1.2.2 FY-4A 水汽获取

风云卫星遥感数据服务网可提供 FY-4A 水汽产品 (<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>),下载 2019-03—2020-02 FY-4A 水汽产品.由于 FY-4A 水汽数据的坐标是行列号,而 GNSS 站点坐标是经纬度,不能直接对数据进行点提取,利用卫星遥感数据服务网的经纬度查找表将 GNSS 站点的经纬度坐标转为行列号,获取与 GNSS 站点相同坐标格网的 FY-4A 数据;FY-4A 水汽单位为 mm,更新频率为 60 min、15 min、不定时,空间分辨率为 4 km.

由于 GNSS 水汽与 FY-4A 水汽的时间采样率不同,FY-4A 水汽时间采样率优于 GNSS 水汽,为方便计算与分析,将 FY-4A 水汽做每小时的平均值.

## 2 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽比较

### 2.1 FY-4A 水汽精度评定

为了评定 FY-4A 水汽的精度,以及开展其与 GNSS 水汽的相关性,本文以 GNSS 测站水汽为基础,开展 FY-4A 水汽精度评定及其与 GNSS 水汽的相关性分析.从每一个区域随机选择一个站点进行 GNSS 水汽与 FY-4A 水汽比较,如图 2 所示.

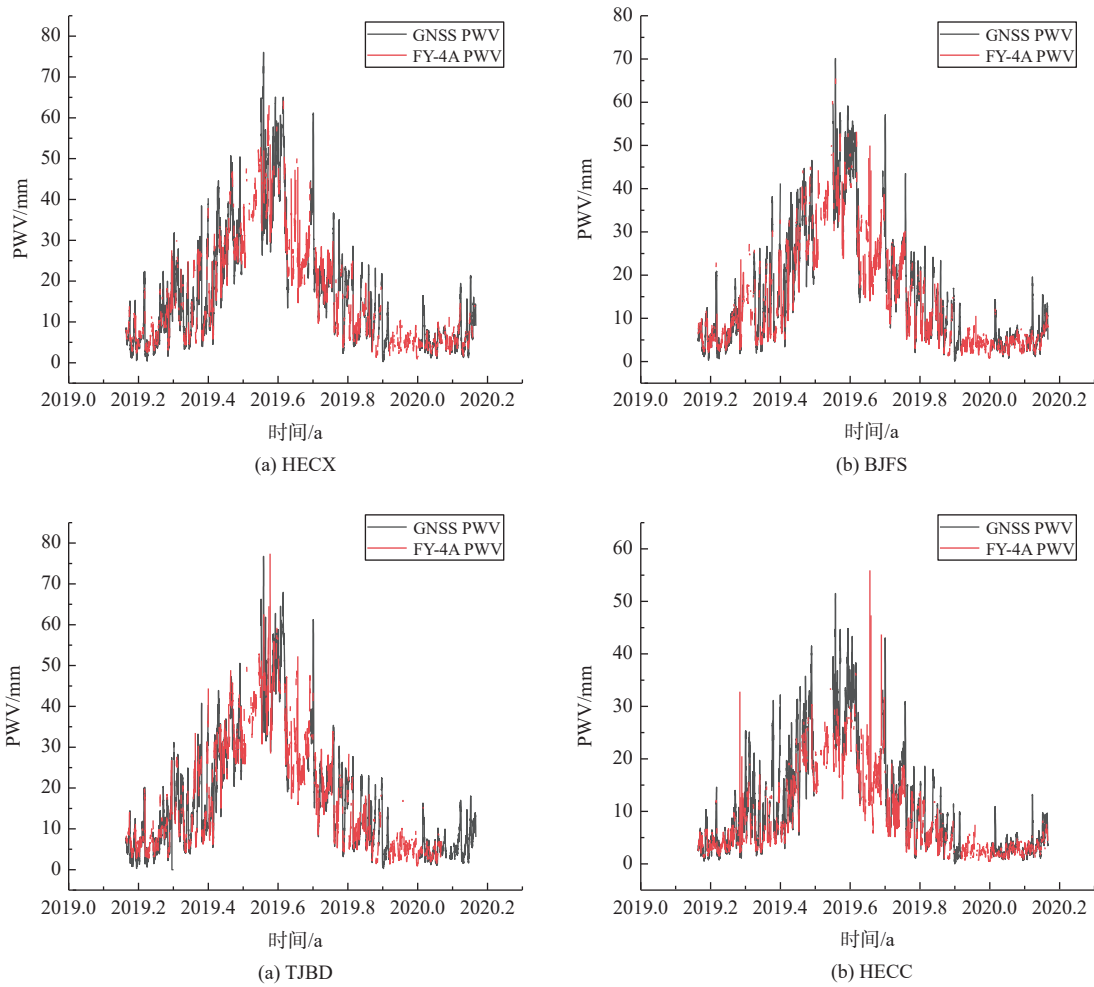


图 2 GNSS 水汽与 FY-4A 水汽比较

由图 2 可知, 4 个站点的 GNSS PWV 与 FY-4A PWV 趋势基本一致, 且呈明显的季节性差异。

按照季节开展 GNSS 站点计算 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的相关性和 RMSE, 如表 1 所示。

表 1 FY-4A 水汽精度评定及其与 GNSS 水汽的相关性

区域类型	站点名称	春		夏		秋		冬	
		相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm
1	HECX	0.951	2.230	0.935	4.42	0.964	2.57	0.929	0.980
	HELQ	0.913	2.800	0.929	3.90	0.967	1.95	0.919	1.020
	HELY	0.948	2.550	0.941	4.21	0.954	2.74	0.933	0.933
	BJFS	0.930	2.160	0.926	4.27	0.967	2.03	0.889	1.020
2	BJSH	0.924	2.250	0.889	4.81	0.970	2.11	0.904	1.090
	HETS	0.947	2.560	0.871	4.93	0.966	2.70	0.926	0.880
	JIXN	0.925	2.480	0.876	4.53	0.976	2.18	0.885	1.280
	BJGB	0.909	2.430	0.895	4.27	0.974	2.18	0.877	1.070
3	TJBD	0.948	2.140	0.882	4.45	0.966	2.13	0.903	0.930
	TJBH	0.951	2.270	0.896	4.80	0.961	2.41	0.912	0.890
	TJWQ	0.956	2.040	0.895	4.51	0.870	1.51	0.900	0.970

表 1 (续)

区域类型	站点名称	春		夏		秋		冬	
		相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm
	BJYQ	0.909	1.920	0.875	4.10	0.947	2.22	-	-
	HECC	0.898	1.690	0.914	3.80	0.937	2.24	0.868	0.890
4	HECD	0.899	2.180	0.876	4.67	0.965	2.38	0.869	0.910
	HEY Y	0.885	0.885	0.927	2.85	0.943	1.91	0.855	0.810
	HEJZ	0.890	1.840	0.918	4.31	0.928	2.63	0.853	0.820

注: BJS H 站点 GNSS 水汽数据不足, 故无法得到相关性及 RMSE, 上述相关系数均通过显著性检验。

由表 1 可知, 京津冀地区 16 个站点四个季节 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的相关性较好, 相关性均约为 0.85~0.98, 其中秋季相关性最好; BJS H、HETS、JIXN、TJBD、TJBH、TJWQ 六个站点冬季水汽的相关性优于夏季水汽的相关性, BJFS、BJGB、HECC、HECD、HECX、HELQ、HELY、HEY Y、HEJZ 九个站点夏季水汽的相关性优于冬季水汽的相关性。FY-4A 水汽和 GNSS 水汽之间存在一定的偏差。由于夏

季水汽值大, 夏季的 RMSE 大于其他季节。从整体来看, 高海拔站点的 RMSE 大于低海拔站点的 RMSE。

## 2.2 区域 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽相关性分析

FY-4A 水汽存在一定的偏差, 需要进行校正, 如果对每个站点分别进行建模校正, 工作量大且使用不方便, 如能实现区域校正工作量则大为减少。采用分季节、分区域进行 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的相关性、RMSE 计算, 计算结果如表 2 所示。

表 2 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的相关性与 RMSE 统计

区域类型	春		夏		秋		冬	
	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm	相关性	RMSE/mm
1	0.938	2.54	0.923	4.18	0.959	2.44	0.925	1.01
2	0.951	2.38	0.897	4.52	0.964	2.26	0.902	1.07
3	0.892	1.89	0.905	3.97	0.945	2.30	0.848	0.86
4	0.925	2.21	0.888	3.95	0.964	2.16	0.965	1.24

注: 区域类型编号与表 1 对应, 上述相关系数均通过显著性检验。

由表 2 可知, 京津冀地区 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽在各季节均存在较好的相关性, 且相关性约为 0.9。各区域 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽在各个季节的相关性没有太大的差距, 相关性最差的季节出现在夏季和冬季, 相关性最好的季节均出现在秋季。FY-4A 水汽和 GNSS 水汽之间存在一定的偏差。夏季的 RMSE 均大于其它季节, 冬季的 RMSE 小于其他季节。PWV 的 RMSE 一般随水汽的增加而增加, 因此水汽的准确性呈季节性模式, 夏季 RMSE 较高, 冬季 RMSE 较低。

由表 2 可知, FY-4A 水汽与 GNSS 水汽存在一定的偏差, 因而有必要校正 FY-4A 水汽精度。而 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽存在相关性, 说明可利用 GNSS 水汽进行 FY-4A 水汽校正。FY-4A 水汽与 GNSS 水汽在不同区域、不同季节的相关性有差异,

FY-4A 水汽和 GNSS 水汽呈明显的线性关系。因此, 实验在不同季节两者之间均采用线性回归模型。

## 3 FY-4A 水汽校正模型

### 3.1 FY-4A 水汽校正模型构建

由于 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽在不同区域、不同季节的相关性的差异, FY-4A 水汽校正模型需要分季节、分区域进行构建。

研究数据除了用于模型构建外, 还需预留部分数据用于模型可靠性检验。论文随机选择 80% 样本数据用于模型构建, 20% 样本数据用于模型验证, 因建模和检验数据的时间不同, 其检验属于外符合检验。表 3 以 FY-4A 水汽作为自变量, GNSS 水汽因变量, 经过不同的模型试验验证对比, 获得了 4 个区域不同季节的 FY-4A 水汽校正模型。

表 3 FY-4A 水汽校正模型统计

区域类型	季节及模型	$b_0$	$b_1$	季节及模型	$b_0$	$b_1$
1	春	-0.725	1.006	秋	0.016	0.955
	夏	-0.074	0.936	冬	-0.163	1.020
2	春	-0.368	1.045	秋	-0.415	1.038
	夏	2.541	0.932	冬	0.102	1.062
3	春	0.169	0.945	秋	-0.161	0.941
	夏	1.014	0.924	冬	-0.157	1.007
4	春	-0.593	1.053	秋	-0.587	1.034
	夏	2.296	0.929	冬	0.018	1.092

注:  $b_0$ 、 $b_1$ 为以FY-4A水汽作为自变量, GNSS水汽作为因变量, 构建的线性模型系数。

### 3.2 FY-4A 水汽校正模型可靠性验证

构建了 FY-4A 水汽校正模型, 需检验其可靠性. 使用提前预留的 20% FY-4A 和 GNSS 水汽数据进行模型的可靠性检验. 通过校正模型获得 FY-4A 水汽校正值, 与 GNSS 水汽相比较, 计算校正后两者的 RMSE 与平均偏差, 校正后的 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的 RMSE 与平均偏差如表 4 所示.

由表 4 知, FY-4A 水汽经模型校正后, 各区域、各季节 RMSE 均有不同程度的减小. FY-4A 水汽产品的误差大小与水汽值的高低有关, 与校正前相比, 各区域夏季的 RMSE 减小最多, 夏季模型的校正效果优于其他季节, 冬季的 RMSE 减小程度相对较小, 但其精度最高, 这是由于冬季降水少, 水汽值相对较低, FY-4A 水汽的精度高.

表 4 校正后 FY-4A 水汽与 GNSS 水汽的 RMSE 统计

mm

区域类型	季节							
	春		夏		秋		冬	
	RMSE	平均偏差	RMSE	平均偏差	RMSE	平均偏差	RMSE	平均偏差
1	2.12	-0.500	4.19	-2.146	1.90	-0.945	0.96	-0.003
2	1.87	-0.085	3.38	2.227	2.14	0.892	0.84	0.138
3	2.60	-0.427	3.91	-1.311	2.10	-1.098	1.05	-0.161
4	2.08	-0.044	4.48	-0.099	2.26	-0.057	1.00	-0.020

## 4 中国大陆地区 FY-4A 水汽校正产品获取

### 4.1 区域 FY-4A 水汽校正模型取代单站点校正模型

FY-4A 水汽校正模型, 并将校正前后的 RMSE 做差值, 说明了校正模型可提高区域 FY-4A 水汽校正精度. 区域模型是否适用于每个站点, 仍需单站点验证. 针对区域模型用于单点校正效果的验证, 检验站点的选取依据在各区域类型分布相对均匀之处随机选取, 具有一定的代表性. 以夏季模型为例. 首先对单站点建模, 建模方法与区域建模方法相同. 利用单站点的 20% 检验数据, 比较单站点校正模型与区域校正模型的精度, 计算区域模型、单站点模型与实测 GNSS 水汽之间的 RMSE, 如表 5 所示.

由表 5 可知, 利用区域模型对单站点 FY-4A 水汽进行校正, 其模型精度与单站点模型的精度相差不大, 表明两种校正模型精度相当, 利用区域模型去代替单站点模型对站点的 FY-4A 水汽进行校正, 可以大大减少工作量.

表 5 区域模型用于单站点校正与单站点模型直接校正的 RMSE 对比

mm

区域类型	站点名称	单站点模型	区域模型
1	HELY	3.16	3.91
2	JIXN	3.36	4.48
3	TJWQ	3.40	4.19
4	HECC	3.16	3.38

### 4.2 基于 CMONOC 的 FY-4A 水汽校正产品获取

前文各区域模型的建立及校正都是基于点状数据, 而 FY-4A 水汽是具有较高空间分辨率的面状格网数据. 通过区域 FY-4A 水汽校正模型, 在保证 FY-4A 高空间分辨率的基础上, 对区域 FY-4A 水汽产品进行整体校正, 获取中国大陆地区 FY-4A 水汽校正产品. 从 2019—2020 年未使用的数据中, 选择四季的某一天开展中国大陆地区 FY-4A 水汽校正产品获取及精度检验. 以 2019 年 3 月 4 日、7 月 14 日、10 月 7 日和 2020 年 1 月 30 日为例, 通过对 FY-4A 水汽产品进行辐射定标、投影转换、图像校正、图像拼接等步骤后, 得到校正前 FY-4A 水汽空间分布图. 再

通过 ArcGIS 中的栅格计算器,分区域进行校正,最后进行区域 FY-4A 水汽图像拼接,获得校正后的

FY-4A 水汽产品,如图 3 所示。

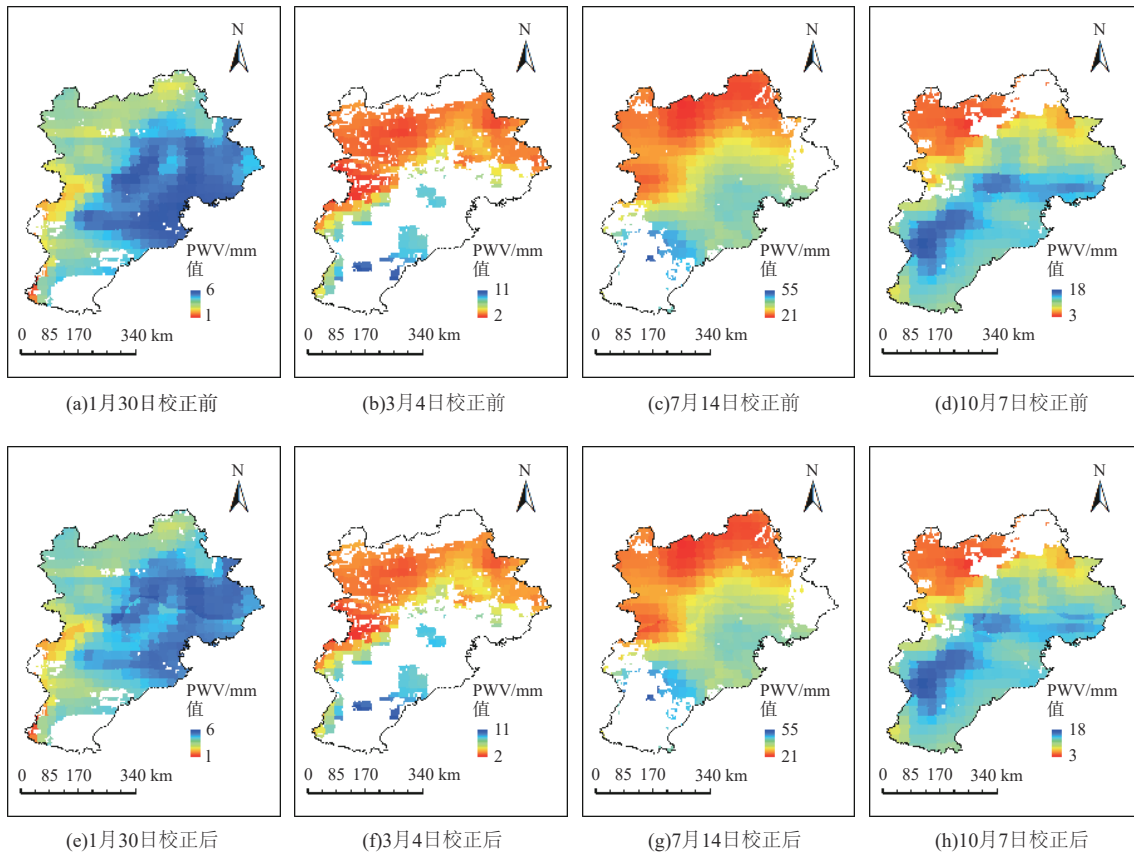


图 3 校正前后 FY-4A 水汽分布对比

从图 3 可知,京津冀水汽分布具有一定的地理差异,其基本分布特征为从东部沿海向西部内陆逐渐变化. FY-4A 水汽在校正后变化最为明显的为山区.这是因为山区水汽值偏高,受到水汽的影响, FY-4A 水汽值的误差较大,具有较大的校正空间,因此具有较为明显的校正效果.

为验证其精度,提取 FY-4A 格网与 CMONOC GNSS 站点坐标相同的水汽值,分别与 GNSS 水汽进行比较,计算校正前后 FY-4A 水汽和 GNSS 水汽之间的 RMSE 并做差,表 6 为所选时间 4 个区域 FY-4A 水汽校正前后 RMSE 的差值比较.

由表 6 可知,通过应用校正模型,所选时间 4 个区域的校正前后 RMSE 差值为正.从时间上来看,校正效果最好的是 7 月 14 日和 10 月 7 日,在雨季范围内且第 2 区域校正效果最为明显,可能因为第 2 区域属于山区海拔较高,水汽值较大, FY-4A 水汽误差比其他区域的误差大,校正空间大. 3 月 4 日和 1 月 30 日,校正后 FY-4A 水汽和 GNSS 水汽的 RMSE 与校正前相差不大,这是因为此二时间段的水汽值较低.

表 6 校正前后均方根误差差值比较 mm

区域类型	时间			
	1月30日	3月4日	7月14日	10月7日
	RMSE 差值	RMSE 差值	RMSE 差值	RMSE 差值
1	0.01	0.04	0.33	0.21
2	0.04	0.04	0.52	0.20
3	0.03	0.07	0.29	0.24
4	0.03	0.03	0.09	0.02

## 5 结 论

本文通过对 CMONOC 观测资料的处理、分析,结合 GNSS 气象学相关知识,开展 FY-4A 水汽校正研究,得到以下结论:

1) 分区域分季节利用 GNSS 水汽对 FY-4A 水汽进行校正,得到 FY-4A 水汽校正模型,校正后 FY-4A 水汽的精度得到提高.

2) 对单站点构建校正模型,校正后 FY-4A 水汽精度与应用区域模型校正后的 FY-4A 水汽精度相差

不大.当对精度要求不高或该站点缺少数据时,可以用区域模型代替单站点模型进行FY-4A水汽校正.

3) 对面状数据应用校正模型,所得结果可以为InSAR大气校正提供参考.

**致谢:**感谢中国大陆构造环境监测网络中心为本文研究提供CMONOC站点GNSS观测数据和气象数据!

## 参考文献

- [1] 王勇,郝振航,娄泽生,等.京津冀地区GNSS对流层延迟空间插值研究[J].全球定位系统,2019,44(1):101-107.
- [2] 路洁,刘晶,刘明阳,等.近55年京津冀地区降水多尺度分析[J].水利水运工程学报,2020(6):23-31.
- [3] HUANG L K, MO Z X, XIE S F, et al. Spatiotemporal characteristics of GNSS-derived precipitable water vapor during heavy rainfall events in Guilin, China[J]. *Satellite navigation*, 2021, 2(1): 13. DOI: 10.1186/s43020-021-00046-y
- [4] GONG S Q, HAGAN D F, LU J, et al. Validation on MERSI/FY-3A precipitable water vapor product[J]. *Advances in space research*, 2018, 61(1): 413-425. DOI: 10.1016/j.asr.2017.10.005
- [5] 张卫星.中国区域融合地基GNSS等多种资料水汽反演、变化分析及应用[D].武汉:武汉大学,2016.
- [6] 王江涛,邓喀中,范洪冬,等.基于MODIS与GPS的D-InSAR大气延迟改正量提取[J].测绘科学技术学报,2012,29(4):271-275.
- [7] 鄢子平,李振洪. InSAR大气水汽改正模型的应用研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(7):723-726.
- [8] 王勇,柳林涛,许厚泽,等.利用GPS技术反演中国大陆水汽变化[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(2):152-155.
- [9] 赵庆志.地基GNSS水汽反演关键技术研究及其应用[J].测绘学报,2018,47(3):424.
- [10] YAO Y B, SHAN L L, ZHAO Q Z. Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 12465. DOI: 10.1038/s41598-017-12593-z
- [11] WANG Y, LIU Y P, LIU L T, et al. Retrieval of the change of precipitable water vapor with zenith tropospheric delay in the chinese mainland[J]. *Advances in space research*, 2009, 43(1): 82-88. DOI: 10.1016/j.asr.2007.07.050
- [12] 马赛,岳迎春,上官明,等.基于GNSS的MODIS大气可降水量校正模型[J].南京信息工程大学学报,2021,13(2):154-160.
- [13] WANG Y Z, LIU H L, ZHANG Y, et al. Validation of FY-4A AGRI layer precipitable water products using radiosonde data[J]. *Atmospheric research*, 2021(253): 105502. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105502
- [14] 李炳.基于多源数据分析日本水汽时空分布特征[D].成都:西南交通大学,2020.
- [15] 徐娜,胡秀清,陈林. FY-2水汽通道光谱响应测量大气污染评估和订正[J].光谱学与光谱分析,2017,37(8):2325-2330.
- [16] 燕振宇,马学谦.青海高原不同地区大气水汽含量对比分析[J].干旱气象,2018,36(3):365-372,422.
- [17] 刘备,王勇,娄泽生,等. CMONOC观测约束下的中国大陆地区MODIS PWV校正[J].测绘学报,2019,48(10):1207-1215.

## 作者简介

王勇(1978—),男,博士,教授,研究方向为GNSS数据处理与应用.

姜诺涵(1996—),女,硕士,研究方向为GNSS气象学.

刘严萍(1979—),女,博士,讲师,研究方向为GNSS气象学.

刘晓(1997—),女,硕士,研究方向为GNSS气象学.

## Study on FY-4A PWV correction model in Beijing-Tianjin-Hebei region

WANG Yong<sup>1,2</sup>, JIANG Nuohan<sup>1</sup>, LIU Yanping<sup>3</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, ZHAN Wei<sup>4</sup>

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China;

3. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

4. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Integrating Global Navigation Satellite System (GNSS) and Fengyun meteorological satellite FY-4A can obtain high-precision and high-spatial resolution water vapor distribution information. This paper used the GNSS observation data from crustal movement observation network of China (CMONOC) to carry



out the FY-4A water vapor correction study in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Firstly, the Beijing-Tianjin-Hebei region was divided into four regions, and the correlation analysis between GNSS precipitable water vapor (PWV) and FY-4A PWV was carried out by regions and seasons. Secondly, different function models were selected by region and season and combined with GNSS PWV data to construct the FY-4A PWV correction models. Then, the GNSS PWV was compared with the results of the regional model and the single-site model respectively to carry out the reliability test of the model. Finally, the corrected FY-4A PWV distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei region was obtained through regional FY-4A PWV correction and mosaiced. Research shows that the FY-4A PWV has a good correlation with GNSS PWV, and the accuracy of the regional FY-4A PWV correction model is equivalent to that of the single-site model, which can replace the single-site model for the FY-4A PWV correction. The regional model based on CMONOC GNSS PWV can improve the accuracy of FY-4A PWV to a certain extent, and provide references for the short-term weather forecast and InSAR atmospheric correction.

**Keywords:** crustal movement observation network of China; Global Navigation Satellite System (GNSS); Fengyun meteorological satellite; precipitable water vapor; correction model

~~~~~  
(上接第 118 页)

with 4G long term evolution (LTE), denser network deployments and wider transmission bandwidth of 5G can bring about a significant improvement in positioning accuracy. Hopefully, 5G positioning can mitigate coverage and accuracy problems of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in difficult environments such as indoor and urban canyons. This article describes the differences between 5G and 4G in the measurement domain. Then the precision of Sub-6G (FR1) and high frequency mm wave (FR2) ranging measurements with Cramér-Rao bound is assessed. Followed by the description of positioning algorithms, eleven scenarios are listed with typical simulation parameters based on 3GPP specifications and commercial network configurations. The simulation results show that the precision of network synchronization is the main factor affecting the positioning quality. If the time synchronization error is 50 ns, 5G positioning precision is over 10 m. A larger bandwidth can significantly improve the ranging precision of 5G signals if the time synchronization problem can be solved by ideal synchronization or double-differencing with positioning nodes near a user end. Under ideal conditions, 5G FR1 can achieve an accuracy of about 1 m, and FR2 can achieve an accuracy of 0.16 m.

**Keywords:** 5th generation mobile communication technology (5G); positioning; millimeter wave; high-precision; precision assessment