

# 中国沿海 HY-2A 校正微波辐射计水汽含量 数据精度检验方法

范士杰<sup>1</sup>, 史航<sup>1</sup>, 孙浩<sup>1</sup>, 刘焱雄<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:**为评价“海洋二号”卫星(HaiYang-2A, HY-2A)校正微波辐射计(Calibration Microwave Radiometer, CMR)近海水汽产品精度, 以中国沿海全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)业务观测站数据和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代大气再分析资料(ECMWF Reanalysis 5, ERA5)作为验证数据。首先对选取的 GNSS 业务观测站数据和 CMR 水汽含量数据进行时空匹配, 两者的观测时间一致、空间范围取为 100 km; 然后利用精密单点定位方法反演 GNSS 业务观测站上空的大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV), 同时对 1 h 分辨率的 ERA5 再分析资料内插计算, 得到 CMR 水汽数据点处的 ERA5 PWV; 最后以 GNSS PWV 和 ERA5 PWV 为参考, 分析 2015 年 CMR 水汽产品精度和偏差时空分布。结果表明, CMR 水汽含量和 GNSS PWV、ERA5 PWV 之间的相关系数  $r$  均高于 0.96, 平均均方根误差分别为 3.17 mm 和 1.58 mm, 具有较高的精度; CMR 水汽含量相对于 GNSS PWV 和 ERA5 PWV 的偏差不随季节变化而变化, 但 CMR 水汽含量数据精度随纬度的增加而有所提高。

**关键词:**“海洋二号”卫星(HY-2A); 校正微波辐射计; 大气可降水量; 中国沿海 GNSS 业务观测; 第五代大气再分析资料(ERA5)

中图分类号: P714<sup>+</sup>.2; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0505-08

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210922001

**引用格式:** 范士杰, 史航, 孙浩, 等. 中国沿海 HY-2A 校正微波辐射计水汽含量数据精度检验方法[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 505-512. FAN S J, SHI H, SUN H, et al. An accuracy test method of HY-2A calibration microwave radiometer water vapor content data along China's coast[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 505-512.

水汽是大气的基本参量, 它的相变直接影响大气的运动和变化。研究大气水汽含量的时空变化对于理解天气变化和过程具有重要意义<sup>[1]</sup>。海洋是大气中水汽的主要来源和水汽输送的主要载体。海洋环境复杂, 目前对海洋水汽监测不足, 难以获得高时空分辨率的海洋水汽含量数据, 所以海洋水汽含量的探测精度难以满足科学研究和预报应用等的需求。因此, 有必要扩展海洋水汽含量的探测方式, 以提高海洋水汽含量数据的时间与空间分辨率。

我国海岸线漫长, 沿海地区台风、暴雨等海洋灾害天气频发。大气水汽在极端降水天气的形成和发展中扮演着十分关键的角色, 水汽含量的异常变化往往伴随着强降雨天气。观测和研究大气水汽含量在不同时间尺度上的变化特性对于深入理解极端降水天气的形成机制、开展预警预报及未来变化规律预测十分关键<sup>[2]</sup>。高精度、高时空分辨率、连续实时的大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)的大小和演变趋势可以提前预示降水的出现时间和降水性质, 对暴雨、台风等极端天气预报及预警有重要的指示意义<sup>[3]</sup>。在全球变暖的大趋势下, 全球海平面监测与海面水汽含量探测显得尤为重要, 如何提高海洋水汽含量的探测

收稿日期: 2021-09-22

资助项目: 国家自然科学基金项目——GNSS 气象校核海洋二号卫星水汽的模型研究(41876106); 山东省自然科学基金项目——基于多源水汽的山东半岛暴雪监测及预警研究(ZR2019MD005)

作者简介: 范士杰(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事 GNSS 精密单点定位、GNSS 气象学方面研究. E-mail: fshijie@upc.edu.cn

(王燕 编辑)

能力成为了气象研究中的关键性问题<sup>[4]</sup>。

目前,获取海洋水汽含量信息的常用方式有船载全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、探空站观测和测高卫星水汽微波辐射计反演等。船载GNSS观测费用昂贵,且精度容易受到海洋环境的影响;探空站获取的水汽含量信息通常被当作水汽含量的真值,但其缺点是时间分辨率低;测高卫星搭载的微波辐射计也可以获取水汽含量数据,其时空分辨率高,具有很高的应用价值。“海洋二号”卫星(HaiYang-2A, HY-2A)是我国第一颗海洋动力环境卫星,其搭载的校正微波辐射计(Calibration Microwave Radiometer, CMR)可以获得海洋水汽含量等参数,有效监测海面上空天气和气候变化,丰富了我国海洋水汽含量的探测手段。Zheng等<sup>[5]</sup>利用2011年10月1日至2013年3月31日Jason-1/2卫星上的微波辐射计水汽含量数据对HY-2A CMR水汽含量数据进行验证,两者之间的偏差为1.86 mm,表明HY-2A CMR水汽产品适用于大部分开放的海域。Zhao等<sup>[6]</sup>对2011年10月至2013年11月的HY-2A CMR在轨数据进行试验,利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的数据进行验证,发现两者的湿延迟差异为1.88 cm。Liu等<sup>[7]</sup>利用船载GNSS反演的PWV验证HY-2A CMR水汽含量数据,得到其平均差值为0.6 mm,均方根误差为0.8 mm,表明2种观测方式具有良好的一致性, HY-2A可以为大气研究提供高精度的PWV测量值。Wu等<sup>[8]</sup>使用数值天气模型对2014年4月至2017年5月的HY-2A CMR水汽产品进行了综合评估,得到其平均均方根误差为2.65 mm,说明当CMR的3个频段正常工作时,其水汽产品具有较高的准确性。

然而,利用船载GNSS观测检验HY-2A CMR水汽产品存在着数据交叉点较少的局限性。自然资源部2009年起在中国沿海增设GNSS业务观测站,于2010年建成了中国沿海GNSS业务观测系统<sup>[9]</sup>,连续的岸基GNSS观测,可以为HY-2A CMR水汽产品的精度检验提供丰富的数据。本文利用中国沿海GNSS业务观测系统和ECMWF发布的最新第五代大气再分析资料(ECMWF Reanalysis 5, ERA5),对HY-2A CMR海洋水汽含量数据进行误差分析和精度检验,为CMR水汽产品在我国东部沿海地区的气象应用提供科学依据。

## 1 试验数据及水汽含量信息提取方法

### 1.1 HY-2A CMR水汽含量数据

HY-2A CMR有3个工作频率:18.7 GHz、23.8 GHz和37.0 GHz,其水汽含量反演原理是先利用多元线性回归模型将天线温度转换为亮温并进行校正,再利用全球经验数据库,基于物理辐射模型,建立水汽含量数据和亮温之间的回归经验模型,从而获取大气水汽信息数据<sup>[10-11]</sup>。常用的CMR水汽产品是经过亮温重采样和反演得到的2B级数据,存储格式为hdf格式<sup>[12]</sup>。由于长期在轨运行,从2017年6月开始, HY-2A CMR的18.7 GHz工作频率变得极不稳定,导致反演的水汽含量数据出现较大偏差<sup>[13]</sup>。因此,本文选取质量较好的2015年数据作为试验数据。

根据沿海GNSS业务观测站的位置坐标,选择与GNSS业务观测站距离在100 km范围内的区域进行水汽含量数据的空间匹配,提取HY-2A CMR水汽含量数据;并对CMR原始数据进行预处理,剔除陆地和降雨标识的异常数据,只保留海洋标识的CMR海面水汽含量数据进行精度检验。另外,对于近岸受亮温污染的CMR海面水汽含量数据,预处理时利用3倍中误差原则直接剔除。

### 1.2 中国沿海GNSS业务观测

中国沿海GNSS业务观测系统布设了56个连续运行观测站,为海洋环境监测和天气变化提供数据资料<sup>[14]</sup>。本文选取黄海沿岸的成山头站、石岛站、小麦岛站、日照站,东海沿岸的朱家尖站、南麂站、长门站,南海沿岸的云澳站、遮浪站和海南岛沿岸的海口站、三亚站,共计11个GNSS业务观测站。具体位置如表1所示。

表 1 GNSS 业务观测站位置

Table 1 The location of GNSS operational observation stations

| GNSS 业务观测站 | 经度          | 纬度         | GNSS 业务观测站 | 经度          | 纬度         |
|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| 成山头站       | 122°41'49"E | 37°23'23"N | 长门站        | 119°35'18"E | 26°08'10"N |
| 石岛站        | 122°25'14"E | 36°51'56"N | 云澳站        | 117°05'55"E | 23°23'48"N |
| 小麦岛站       | 120°25'34"E | 36°03'13"N | 遮浪站        | 115°34'08"E | 22°39'22"N |
| 日照站        | 119°34'12"E | 35°21'54"N | 海口站        | 110°16'29"E | 20°01'04"N |
| 朱家尖站       | 122°25'39"E | 29°53'37"N | 三亚站        | 109°29'51"E | 18°14'43"N |
| 南麂站        | 121°04'40"E | 27°27'43"N |            |             |            |

利用精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)方法进行地基 GPS 水汽反演,获取 GNSS 业务观测站上空 PWV。基于 PPP 的地基 GPS 水汽反演的数据处理策略为:GPS 观测数据的采样间隔为 30 s,卫星高度截止角设置为 10°;采用 IGS(International GNSS Service)事后精密星历和钟差产品以及传统双频无电离层组合观测模型;接收机钟差作为白噪声处理;对流层干延迟利用 Saastamoinen 模型估算,湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)分量作为待估参数;同时考虑卫星天线相位中心偏差、接收机天线相位中心偏差、相对论效应、海洋负荷、潮汐改正等因素的影响;采用序贯最小二乘法进行平差解算,得到 ZWD 的最佳估值;最后利用转换因子(与测站地理位置以及气象参数有关,其中气压、温度等气象参数由 GPT(Global Pressure and Temperature)模型<sup>[15]</sup>计算得到),将 ZWD 转换为 PWV。

利用上述经过空间匹配的 HY-2A CMR 水汽含量数据,选取与 CMR 水汽观测时间最为接近的 GPS PWV 数据。然后以 GPS PWV 为参考,对 CMR 水汽含量数据进行误差分析和精度评价。

### 1.3 ERA5 再分析数据

ERA5 产品是由 ECMWF 于 2017 年发布的第五代全球气候再分析资料,其中包括从 1979 年至今的柱水汽含量(Total Column Water Vapor, TCWV),该水汽产品的时间分辨率为 1 h,网格分辨率为 0.25°×0.25°<sup>[16]</sup>。提取与 HY-2A CMR 水汽含量数据相匹配的 ERA5 水汽含量数据的方法为:首先根据 CMR 水汽含量数据的观测时间,选择一天内最接近的某小时的 ERA5 TCWV 数据;然后根据 CMR 水汽数据点的位置坐标,选取距离最近的 4 个网格点的 TCWV,进行双线性内插即可得到 CMR 水汽数据点处的 PWV<sup>[17]</sup>,记作 ERA5 PWV。由于本文讨论的是 CMR 海面水汽含量数据,因此可忽略 ERA5 网格点 TCWV 和 CMR 海面水汽含量数据点之间的高程差异。最后以 ERA5 PWV 为参考,对 HY-2A CMR 水汽含量数据进行误差分析和精度评价。

## 2 HY-2A CMR 海面水汽含量数据检验

### 2.1 3 种水汽含量数据的相关性分析

以成山头站、南麂站、云澳站和海口站四个 GNSS 业务观测站为例,将标识为海洋的 HY-2A CMR 水汽含量数据分别与匹配的 GPS PWV 和 ERA5 PWV 进行对比,开展相关性分析,结果如图 1 和图 2 所示。

由图 1 可知,4 个业务观测站的 GPS PWV 与匹配的 CMR 海面水汽含量数据之间的相关系数均超过 0.96,表明两者具有良好的相关性。由图 2 可知,4 个 GNSS 业务观测站附近海域的 CMR 海面水汽含量与内插计算得到的 ERA5 PWV 值之间的相关系数均超过 0.98,表明 CMR 海面水汽含量与 ERA5 PWV 的相关性优于 GPS PWV,其原因应与水汽产品的数据匹配方法有关,即 CMR 水汽含量与 ERA5 PWV 的数据点位置重合,而 CMR 水汽含量与 GPS PWV 数据点位置的距离为 100 km 以内。

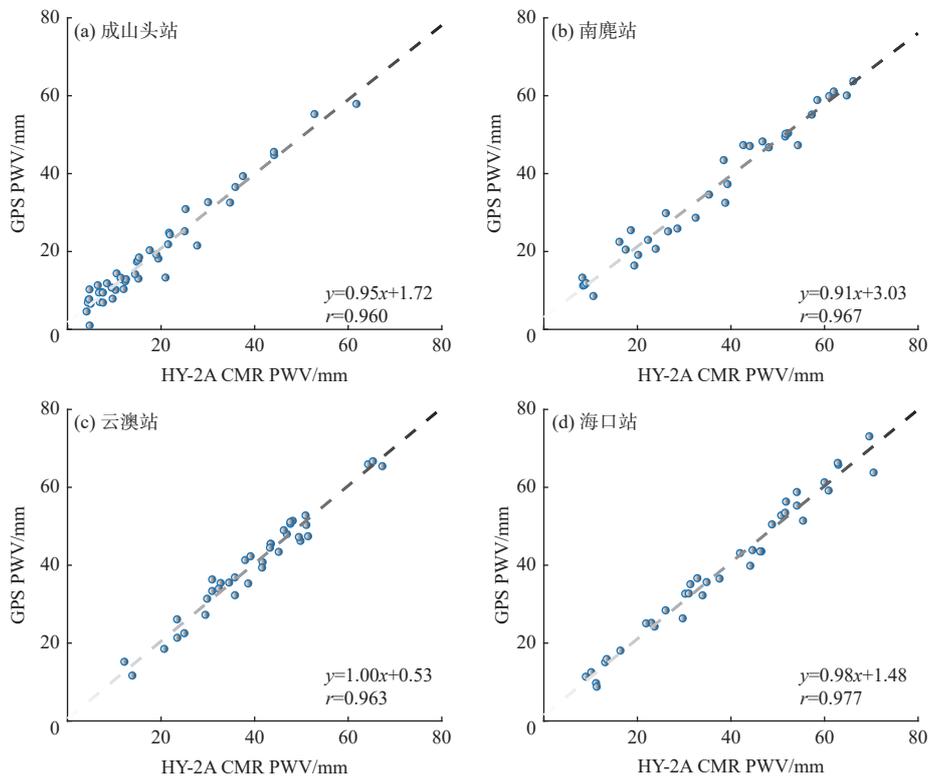


图 1 HY-2A CMR 海面水汽含量与 GPS PWV 相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between HY-2A CMR sea water vapor content and GPS PWV

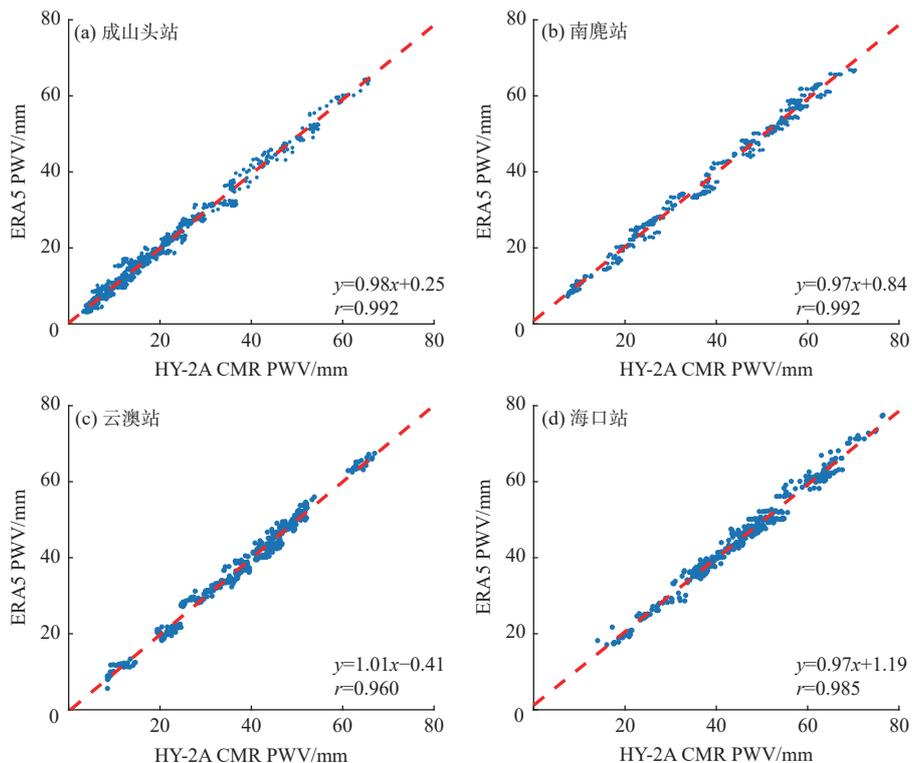


图 2 HY-2A CMR 海面水汽含量与 ERA5 PWV 相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between HY-2A CMR sea water vapor content and ERA5 PWV

## 2.2 HY-2A CMR 海面水汽含量的误差分析

分别以 GPS PWV 和 ERA5 PWV 为参考值, 计算 CMR 海面水汽含量相对于 GPS PWV 和 ERA5 PWV 的偏差。以成山头站、日照站、石岛站、小麦岛站四个 GNSS 业务观测站为例, 分析 2015 年 CMR 海面水汽含量及其与 GPS PWV 和 ERA5 PWV 偏差随时间的变化, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 4 个 GNSS 业务观测站附近海域 CMR 水汽含量分布均存在明显的季节性变化特征, 其中春季和冬季的水汽值较小, 夏季水汽丰富且水汽含量存在明显的变化。而 CMR 水汽含量相对于 GPS PWV 和 ERA5 PWV 的偏差随时间的变化较为稳定, 不受季节变化的影响, 说明 CMR 水汽产品具有良好的稳定性。

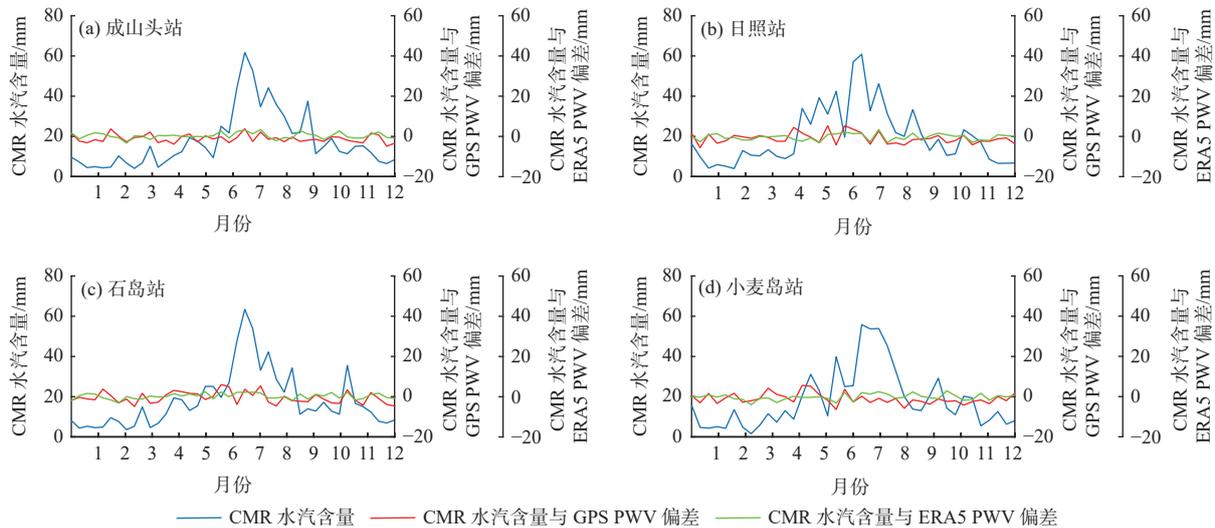


图 3 HY-2A CMR 海面水汽含量数据及其相对于 GPS PWV 和 ERA5 PWV 的偏差随时间的变化

Fig. 3 The time-variation deviation of sea surface water vapor content derived from HY-2A CMR relative to GPS PWV and ERA5 PWV

## 2.3 HY-2A CMR 海面水汽含量数据的精度评价

将 HY-2A CMR 海面水汽含量数据相对于 GPS PWV 和 ERA5 PWV 的误差进行统计分析, 以平均偏差 (Average Deviation, AD)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和标准差 (Standard Deviation, STD) 作为数值指标, 对 CMR 海面水汽含量数据进行精度评价。

由 HY-2A CMR 水汽含量数据相对于各业务观测站 GPS PWV 的误差统计结果 (表 2) 可以看出: 各测站 CMR 水汽含量的平均偏差负值较多, 表明 HY-2A CMR 水汽值总体上略小于 GPS PWV; 11 个测站 CMR 水汽含量数据相对于 GPS PWV 的平均偏差为  $-0.38$  mm, 说明整体上 CMR 水汽含量与 GPS PWV 具有较好的一致性; 11 个测站的平均 STD 为 3.08 mm、平均 RMSE 为 3.17 mm, 说明 CMR 海面水汽含量数据相对于 GPS PWV 具有较高的精度; 上述结果也验证了中国沿海 GNSS 业务观测系统可以为 HY-2A CMR 水汽产品的精度检验提供连续、高精度的水汽含量数据支持。

由各 GNSS 业务观测站附近海域 CMR 水汽含量数据相对于 ERA5 PWV 的误差统计结果 (表 3) 可以看出, 各测站附近 CMR 水汽含量的偏差多为正值, 表明 CMR 水汽值总体上略大于 ERA5 PWV; 11 个测站 CMR 水汽含量数据相对于 ERA5 PWV 的平均偏差为 0.12 mm, 表明两者的一致性较好; 11 个测站的平均 STD 为 1.55 mm、平均 RMSE 为 1.58 mm, 说明 CMR 海面水汽含量数据相对于 ERA5 PWV 的精度相比 GPS PWV 更高。

表 2 HY-2A CMR 水汽含量数据相对于 GPS PWV 的误差(mm)统计

Table 2 Error (mm) statistics of HY-2A CMR water vapor content data compared to GPS PWV

| GNSS 业务观测站 | AD    | STD  | RMSE | GNSS 业务观测站 | AD    | STD  | RMSE |
|------------|-------|------|------|------------|-------|------|------|
| 成山头站       | -1.06 | 2.03 | 2.26 | 长门站        | -1.93 | 3.36 | 3.79 |
| 石岛站        | -0.40 | 2.92 | 2.91 | 云澳站        | -0.30 | 3.21 | 3.20 |
| 小麦岛站       | -1.09 | 2.78 | 2.95 | 遮浪站        | -0.91 | 3.42 | 3.26 |
| 日照站        | -0.83 | 2.67 | 2.77 | 海口站        | 1.77  | 2.98 | 3.34 |
| 朱家尖站       | 0.53  | 3.56 | 3.52 | 三亚站        | -0.01 | 3.50 | 3.41 |
| 南麂站        | 0.05  | 3.50 | 3.45 |            |       |      |      |

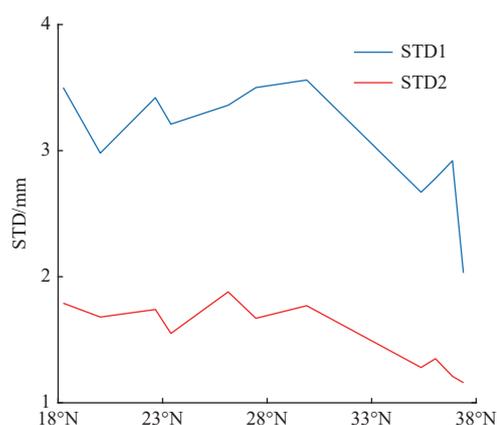
表 3 HY-2A CMR 水汽含量数据相对于 ERA5 PWV 的误差(mm)统计

Table 3 Error (mm) statistics of HY-2A CMR water vapor content data compared to ERA5 PWV

| GNSS 业务观测站 | AD    | STD  | RMSE | GNSS 业务观测站 | AD   | STD  | RMSE |
|------------|-------|------|------|------------|------|------|------|
| 成山头站       | 0.10  | 1.16 | 1.18 | 长门站        | 0.15 | 1.88 | 1.92 |
| 石岛站        | 0.23  | 1.21 | 1.24 | 云澳站        | 0.17 | 1.55 | 1.56 |
| 小麦岛站       | 0.17  | 1.35 | 1.40 | 遮浪站        | 0.44 | 1.74 | 1.78 |
| 日照站        | -0.29 | 1.28 | 1.33 | 海口站        | 0.30 | 1.68 | 1.70 |
| 朱家尖站       | -0.33 | 1.77 | 1.80 | 三亚站        | 0.36 | 1.79 | 1.80 |
| 南麂站        | 0.11  | 1.67 | 1.67 |            |      |      |      |

综合分析表 2 和表 3 的误差统计结果可以看出, CMR 水汽含量相对于 GPS PWV 的平均 STD 和 RMSE 均约为相对于 ERA5 PWV 的 2 倍, 这主要是因为 ERA5 PWV 和 HY-2A CMR 水汽含量数据的时空匹配较为准确, 而 CMR 轨迹与 GNSS 业务观测站的空间匹配距离为 100 km, 水汽的空间分布较为复杂, 由此带来 CMR 水汽含量和 GPS PWV 之间产生一定的空间匹配误差, 影响了 CMR 水汽含量相对于 GPS PWV 的精度评价结果。

结合表 1 中各 GNSS 业务观测站的纬度值以及表 2 和表 3 的误差统计结果发现, 各站 CMR 海面水汽含量的 STD 值由北向南呈现逐渐增大的趋势(图 4)。由图 4 可以看出, CMR 水汽含量的 STD 值总体随纬度增加而减小, CMR 海面水汽含量数据精度随着纬度的增加而有所提高, 具有一定的空间分布特征。分析其原因可能是与低纬度地区水汽含量丰富、变化速率较快、水汽分布更加复杂等因素有关。



注: STD1 为 CMR 水汽含量相对于 GPS PWV 的标准差, STD2 为 CMR 水汽含量相对于 ERA5 PWV 的标准差。

图 4 HY-2A CMR 水汽含量相对于 ERA5 PWV 和 GPS PWV 的 STD 随纬度的变化

Fig. 4 Variation of STD of HY-2A CMR water vapor content relative to ERA5 PWV and GPS PWV with latitude

### 3 结 语

HY-2A CMR水汽产品作为一种重要的海洋水汽数据资源,丰富了海洋水汽的观测手段,提高了海洋水汽观测的时间和空间分辨率。本文利用中国沿海GNSS业务观测系统和ERA5再分析数据,对CMR海面水汽含量数据进行精度检验,得出以下主要结论。

1)HY-2A CMR海面水汽含量与中国沿海业务观测站GPS PWV具有良好的一致性,两者的相关系数均高于0.96;CMR海面水汽含量相对于GPS PWV的平均偏差为-0.38 mm,表明CMR水汽值总体上略小于GPS PWV;CMR海面水汽含量相对于GPS PWV的平均STD为3.08 mm、平均RMSE为3.17 mm,表明CMR海面水汽含量数据相对于GPS PWV具有较高的精度。

2)HY-2A CMR海面水汽含量与ERA5 PWV之间的相关系数均高于0.98,CMR海面水汽含量相对于ERA5 PWV的平均偏差为0.12 mm、平均STD为1.55 mm、平均RMSE为1.58 mm;该结果优于CMR海面水汽含量与GPS PWV的对比结果,这与CMR海面水汽含量与GPS PWV数据的空间匹配尺度(100 km)有关。

3)对HY-2A CMR水汽含量数据相对于GPS PWV和ERA5 PWV的偏差进行时序分析,发现其没有季节性变化特征,说明CMR水汽产品精度具有良好的稳定性;对CMR海面水汽含量相对于GPS PWV和ERA5 PWV参考值的标准差进行空间相关性分析,发现CMR海面水汽含量数据的精度随着纬度的升高而有所提高,具有一定的空间分布特征。

本文研究结果验证了HY-2A CMR水汽含量数据的精度,并证实了中国沿海GNSS业务观测系统可以为HY-2A CMR水汽产品精度检验提供技术手段和数据支撑。

#### 参考文献 (References):

- [1] 范士杰, 臧建飞, 刘焱雄, 等. GPT/2模型用于GPS大气可降水汽反演的精度分析[J]. 测绘工程, 2016, 25(3): 1-5. FAN S J, ZANG J F, LIU Y X, et al. Accuracy analysis on GPS precipitable water vapor inversion using GPT/2 models[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(3): 1-5.
- [2] 施闯, 张卫星, 曹云昌, 等. 基于北斗/GNSS的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1112-1119. SHI C, ZHANG W X, CAO Y C, et al. Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1112-1119.
- [3] 陈明东. GPS/PWV在台风“玛莉亚”袭闽期间的变化特征研究[J]. 测绘通报, 2019(1): 93-96. CHEN M D. Study on the variation characteristics of GPS/PWV during the typhoon “Maria” landing in Fujian[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1): 93-96.
- [4] 马雄伟, 赵庆志, 姚顽强, 等. PWV对全球气候变化的响应研究[J]. 测绘通报, 2019(增刊1): 54-59. MA J W, ZHAO Q Z, YAO W Q, et al. PWV response to global climate change[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(Suppl.1): 54-59.
- [5] ZHENG G, YANG J S, REN L. Retrieval models of water vapor and wet tropospheric path delay for the HY-2A calibration microwave radiometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(7): 1516-1528.
- [6] ZHAO J, ZHANG D H, WANG Z Z, et al. The validation of HY-2A ACMR retrieval algorithms and product[C]//IGARSS 2016—2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2016: 411-413.
- [7] LIU Y, LIU Y X, CHEN G X, et al. Evaluation of HY-2A satellite-borne water vapor radiometer with shipborne GPS and GLONASS observations over the Indian Ocean[J]. GPS Solutions, 2019, 23(3): 87-95.
- [8] WU Z L, WANG J G, LIU Y X, et al. Validation of 7 years in-flight HY-2A calibration microwave radiometer products using numerical weather model and radiosondes[J]. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1616-1632.
- [9] 王朝阳, 周兴华, 张化疑, 等. 沿海GNSS观测网中BERNESE软件处理方案比较[J]. 海洋测绘, 2015, 35(1): 52-55. WANG Z Y, ZHOU X H, ZHANG H Y, et al. Comparison of Bernese software processing schemes: a case study in coastal GNSS observing network[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2015, 35(1): 52-55.
- [10] 王振占, 张德海, 赵谨, 等. HY-2A卫星大气校正微波辐射计在轨数据定标和检验研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 44-52. WANG Z Z, ZHANG D H, ZHAO J, et al. In-orbit calibration and validation of atmospheric correction microwave radiometer on HY-2A satellite[J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(7): 44-52.
- [11] 李延明, 姜敏, 余锐, 等. 海洋二号卫星微波辐射计系统设计[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 39-43. LI Y M, JIANG M, YU R, et al. Sys-

- tem design of microwave radiometer of HY-2A satellite[J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(7): 39-43.
- [12] 国家卫星海洋应用中心. HY-2A卫星校正微波辐射计数据用户手册[EB/OL]. [2021-07-23]. <http://www.nsoas.org.cn/>. National Satellite Ocean Application Service. User manual of HY-2A satellite calibration microwave radiometer data[EB/OL]. [2021-07-23]. <http://www.nsoas.org.cn/>.
- [13] 吴志露. GNSS优化HY-2A卫星水汽信息方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2019. WU Z L. Research on the improvement of water vapor information from Haiyang-2A based on GNSS[D]. Nanjing: Hohai University, 2019.
- [14] 范士杰, 刘焱雄, 乔方利, 等. 沿海GPS业务观测在海底地震监测中的应用[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 30-38. FAN S J, LIU Y X, QIAO F L, et al. Application of coastal operational GPS system to sea quake monitoring[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(1): 30-38.
- [15] 刘智敏, 李斐, 郭金运, 等. GPT2模型用于SDCORS反演可降水汽精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(3): 305-309. LIU Z M, LI F, GUO J Y, et al. Method and application research on vision measurement for deformation monitoring[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(3): 305-309.
- [16] 吴旭祥. 基于地基GNSS的大气水汽反演方法研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020. WU X X. Research on atmospheric water vapor retrieval methods based on ground-based GNSS[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [17] 张永林, 蔡昌盛. 基于再分析资料ERA5的对流层延迟估计方法及精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(1): 62-65. ZHANG Y L, CAI C S. Method and accuracy assessment of zenith tropospheric delay derived from ERA5 reanalysis data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(1): 62-65.

## An Accuracy Test Method of HY-2A Calibration Microwave Radiometer Water Vapor Content Data Along China's Coast

FAN Shi-jie<sup>1</sup>, SHI Hang<sup>1</sup>, SUN Hao<sup>1</sup>, LIU Yan-xiong<sup>2</sup>

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** In order to evaluate the accuracy of HY-2A (HaiYang-2A) CMR (Calibration Microwave Radiometer) offshore water vapor products, the data of GNSS (Global Navigation Satellite System) operational observation stations along the coast of China and the reanalysis data of ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5) are used as validation data. Firstly, the selected GNSS operational observation station data and CMR water vapor content data are spatial and temporal registered. The observation time of the two data is consistent, and the spatial distance is less than 100 km. Then, the PWV (Precipitable Water Vapor) over the GNSS operational observation station is retrieved by using the precise point positioning method, and the ERA5 PWV at the position of CMR water vapor content data is derived by interpolating the 1h resolution ERA5 reanalysis product. Finally, taking GNSS PWV and ERA5 PWV as references, the temporal and spatial distribution of accuracy and deviation of HY-2A CMR water vapor content products in 2015 is analyzed. The results show that the correlation coefficient  $r$  between CMR water vapor content and GNSS PWV and ERA5 PWV is higher than 0.96, and the average root mean square error is 3.17 mm and 1.58 mm respectively, which indicate a high accuracy of CMR water vapor content. There is no seasonal variability in the deviation of CMR water vapor content from GNSS and ERA5 PWVs, however, an increasing accuracy of CMR water vapor content with increasing latitude.

**Key words:** HaiYang-2A (HY-2A); calibrated microwave radiometer; atmospheric precipitable water vapor; China coastal GNSS operational observation; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5 (ERA5)

**Received:** September 22, 2021