

吴琼, 窦芳丽, 郭杨, 等, 2020. FY-3C 微波成像仪海上大气可降水产品质量检验[J]. 气象, 46(1): 73-79. Wu Q, Dou F L, Guo Y, et al, 2020. Validation of FY-3C MWRI total precipitable water products[J]. Meteor Mon, 46(1): 73-79 (in Chinese).

## FY-3C 微波成像仪海上大气可降水产品质量检验<sup>\*</sup>

吴 琼<sup>1,2,3</sup> 窦芳丽<sup>3</sup> 郭 杨<sup>3</sup> 谷松岩<sup>3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

**提 要:** 中国自主研发的第二代极轨气象卫星的首颗业务星风云三号 C 星(FY-3C)于 2013 年 9 月 23 日发射升空。微波成像仪(MWRI)作为 FY-3C 上携带的重要微波载荷之一, 能够实现对大气、海洋和陆地的全天时监测。其中, MWRI 海上大气可降水量(TPW)产品在数值预报模式以及气候变化研究中具有很重要的应用价值, 但是应用效果的好坏往往受产品精度的制约。使用长达 4 年的卫星观测资料, 通过 MWRI TPW 业务产品和无线电探空及专用传感器微波成像仪(SSMIS) TPW 业务产品的比较, 对 MWRI TPW 产品(包括轨道产品、日产品和月产品)的质量进行检验。结果表明, 轨道产品和地面实际观测的探空数据的平均相对误差在 7% 左右, 均方根误差为 2.6 mm; 日产品和 SSMIS 日产品的均方根误差约为 3 mm, 和探空日产品的均方根误差小于 2.1 mm; 月产品和 SSMIS 月产品的均方根误差小于 1.3 mm。表明 FY-3C MWRI TPW 业务产品长期以来一直稳定运行且精度较高, 具备实际应用潜力。

**关键词:** FY-3C/MWRI, 大气可降水, 无线电探空, 均方根误差

**中图分类号:** P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.007

## Validation of FY-3C MWRI Total Precipitable Water Products

WU Qiong<sup>1,2,3</sup> DOU Fangli<sup>3</sup> GUO Yang<sup>3</sup> GU Songyan<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO),

Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** FY-3C is the second generation polar meteorological satellite which was developed by China independently and launched in 2013. MWRI (microwave radiance imager) is an important microwave load which can monitor air, ocean and land. As a product of MWRI, TPW (total precipitable water) can be used in numerical weather prediction and climate research. But, the effect of the application relies on the accuracy of TPW. Based on the 4-year satellite observation data, the quality of TPW products is validated by comparing the TPW products with the radiosonde TPW or SSMIS TPW products. As a result, the RMSE (root mean square error) of orbit product is 2.6 mm and the average relative error is 7%. What's more, the RMSE of day product is 3 mm and 2.1 mm when separately compared with SSMIS and radiosonde. The accuracy of month product is stable and the RMSE is less than 1.3 mm. Above findings show that FY-3C MWRI TPW products have a high precision and good stability, and have the application ability in weather and climate field.

**Key words:** FY-3C/MWRI, total precipitable water, radiosonde, RMSE (root mean square error)

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(4190050303, 41475030 和 41775020)共同资助

2018 年 9 月 10 日收稿; 2019 年 10 月 31 日收修定稿

第一作者: 吴琼, 主要从事星载主被动微波遥感研究. Email: wuqiong@cma.gov.cn

## 引 言

风云三号 C 星(FY-3C)是我国第二代极轨气象卫星的首颗业务星,于 2013 年 9 月 23 日发射升空。FY-3C 搭载了包括红外分光计、微波湿度计、太阳辐射测量仪等在内的 12 台遥感仪器,可实现对全球大气、陆地和海洋的综合探测。微波成像仪(micro-wave radiance imager, MWRI)作为 FY-3C 上的三台被动微波载荷之一,延续了和风云三号 A/B 星(FY-3A/FY-3B)相同的设计,探测频点包括 10.65、18.7、23.8、36.5 和 89 GHz,每个频点包括垂直和水平两种极化方式,通过不同的通道或通道组合,微波成像仪可以获得海表温度、陆表温度、土壤水分、地面降水量和大气可降水量(total precipitable water, TPW)等重要地球物理参数(张森等,2017)。

TPW 是表征大气中水汽含量的重要指示因子,在天气和气候领域具有很重要的应用价值(黄小燕等,2018)。卫星遥感水汽的手段有光学和微波两大类。其中,光学遥感的分辨率一般较高,但是受云的影响很大,只能探测到晴空无云情况下的 TPW;而微波具有一定的穿透能力,除强降水以外,基本上可获得全天候的 TPW。微波反演 TPW 的基本原理是从微波辐射信息中提取出大气的信息。陆地表面因为比辐射率比较大,因此从辐射信息中区分地面和大气具有一定的难度,而海洋表面的比辐射率相对较低,所以海上 TPW 反演的精度要明显高于陆地。鉴于此,FY-3C 微波成像仪现有的 TPW 产品仅针对海洋区域。

FY-3C MWRI TPW 产品经过在轨测试以后成为首批实现业务化运行的产品,目前已经在国家卫星气象中心的数据服务网上实时发布。MWRI TPW 共包含轨道产品(准实时产品)、全球  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  等经纬度投影的日平均产品和月平均产品 3 种,这些产品描述了在无降水以及海冰条件下海洋上空大气柱内的 TPW。随着 FY-3C MWRI 仪器整体性能的提升以及反演算法的不断改进,FY-3C TPW 产品的反演精度相比 FY-3A 以及 FY-3B 有了明显的提高,具备了应用潜力。一般来说,在产品广泛应用之前,必须对产品的精度和稳定性进行合理的评估。虽然 FY-3C MWRI 的 TPW 产品于在轨测试期间曾经进行过严格的质量检验,但是质量检验的有效数据长度仅有 2 个月。因此,在轨测试

期间的测试结果并不能完全准确地反映该产品的整体情况,即该产品长期的质量和稳定性尚未进行合理评估。

## 1 FY-3C MWRI 大气可降水产品反演算法

FY-3C MWRI TPW 的产品反演采用了经验统计算法,该算法使用 18.7V、18.7H、23.8V、23.8H、36.5V 和 36.5H 共 6 个通道的卫星观测亮温和时空匹配的无线电探空数据来建立回归方程,如式(1)所示(陈洪滨等,1996;刘松涛和严卫,2006;Wentz and Meissner,2007):

$$TPW = \alpha_0 + \sum_{i=1}^6 \alpha_i \ln(290 - T_{Bi}) \quad (1)$$

式中: $T_{Bi}$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ )表示不同极化通道的亮温,单位为 K; $\alpha_i$  ( $i=1, \dots, 6$ )是相应的回归系数;TPW 的单位为 mm。经验统计算法自 20 世纪 80 年代以来,被扫描微波分光计(scanning microwave spectrometer, SCAMS)、多通道扫描微波辐射计(scanning multichannel microwave radiometer, SMMR)以及专用传感器微波成像仪(special sensor microwave imager/sounder, SSMIS)等广泛应用于海上大气可降水量的反演中(Alishouse et al,1990)。

探空数据选用的是美国国家气候数据中心(National Climate Data Center)发布的全球站点无线电探空数据集(Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA;Wentz and Meissner,2000)。这套数据集包含了全球 2700 个探空站点 1905 年至今的多层次、多要素逐日探空资料。该数据集应用质量控制方法对数据进行质量控制,并提供免费的在线下载和技术支持;是目前全球范围内时空密度最高、资料最为完整的一套高质量探空站点资料数据集(陈哲等,2013)。

FY-3C MWRI 在进行水汽反演时共使用了 42 个 IGRA 探空站点(图 1),这些站点都分布在小岛或者船上。在数据使用之前,对探空数据进行了一些数据处理(Wentz,1997;李乐乐等,2006):(1) 只选择没有降水的情况(1000 hPa 相对湿度  $< 95\%$  并且海表相对湿度  $< 95\%$ );(2) 如果探空数据的有效观测高度达不到 500 hPa,则进行剔除;(3) 通过插值计算出海平面到观测站点高度之间的水汽总量,水汽总量积分从海平面开始。

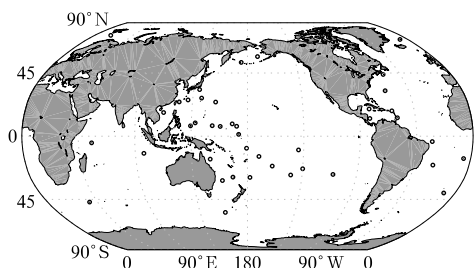


图 1 42 个探空站点的全球分布  
(圆圈: 探空站点位置)

Fig. 1 Distribution of the 42 radiosonde sites for TPW retrieval and validation  
(circles: radiosonde sites)

同样,将 FY-3C MWRI 的观测亮温经过降水以及海冰像元剔除以后,再通过和探空数据进行时空匹配(空间间隔 $<0.1^\circ$ ,时间间隔 $<2\text{ h}$ )就能拟合得到式(1)中的回归系数,建立反演方程,得到轨道产品。

日产品是在轨道产品的基础上,经过 ease-grid 等积割圆柱投影、多轨道合成和日平均处理后得到的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  分辨率的日平均 TPW 产品。对重复投影的高纬度区域,将多次投影值做平均处理。月产品是在日产品的基础上,经过多轨道合成和月平均处理后得到的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  等经纬度投影的月平均 TPW 产品。

## 2 检验数据和方法

TPW 产品的质量检验方法和其他定量遥感产品一样,可以通过和地面实际观测、数值预报模式再分析资料或者国外同类遥感产品的交叉比对来进行(尹延通等,2017;胡菊昞等,2017),使用的评价指标有均方根误差、相关系数、平均偏差以及绝对误差等,这些指标能够直接反映反演值和真值的差异,应用最为广泛。

### 2.1 无线电探空数据

无线电探空数据是评价卫星遥感 TPW 反演精度的权威数据。这些质量检验的探空站点和图 1 中建立回归系数时用到的探空站点是一致的,但是时间上彼此独立。探空站点释放探空气球的时间固定在每日的 00、06、12 和 18 时,不同探空站点释放的次数为 1~4 次不等。探空站点的水汽数据主要用来进行 FY-3C MWRI TPW 轨道产品和日产品检

验。

### 2.2 F17 SSMIS 大气可降水产品

SSMIS 是美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellites Program, DMSP-F17)上携带的专用传感器微波成像仪,它被用来进行 FY-3C MWRI TPW 日产品和月产品的精度检验。SSMIS 的日产品和月产品资料来源于处理和分析全球微波资料国际领先的遥感系统(Remote Sensing System),分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

### 2.3 检验方法

首先,选取 2014 年和 2015 年两年的 TPW 轨道产品和探空数据,时空匹配以后,生成匹配数据集,评价轨道产品的反演精度;同时分析反演精度的月变化特征和反演精度随纬度的变化特征。其次,选择 2016 年 1—12 月全年的日产品数据,剔除缺测资料以后,统计每日的均方根误差,分析误差在时间序列上的变化特征。同时,选择与 01001 和 01028 这两个位于高纬度地区的探空站点空间匹配( $<0.5^\circ$ )的日产品数据,通过散点图和均方根误差评价日产品的精度。最后,选择 2014 年 5 月到 2018 年 2 月的月产品数据,以均方根误差作为主要指标,评价月产品的精度并分析月产品的变化特征。

## 3 检验结果与分析

### 3.1 轨道产品精度评价

经时空匹配(空间间隔 $<0.1^\circ$ ,时间间隔 $<2\text{ h}$ )以后,TPW 轨道产品和探空数据共有 10401 个匹配点,两者的散点图如图 2 所示,从图中可以看出,大部分散点相对比较集中,说明反演的 TPW 和无线电探空实际观测具有较好的一致性。从指标上来看,轨道产品和无线电探空 TPW 的相关系数达到 0.9912,均方根误差为 2.616 mm,平均相对误差为 7.34%,平均偏差为 0.6549 mm,满足产品设计指标的要求。另外,图 2 显示当探空的  $TPW < 20\text{ mm}$  时,拟合直线两侧没有偏差很大的散点,但是,随着 TPW 的增大,开始出现一些偏差明显超过 10 mm 的散点。并且,当探空的  $TPW < 20\text{ mm}$  时,TPW 的均方根误差、相关系数、平均偏差等指标都明显优于  $TPW > 20\text{ mm}$  时的情况,说明 TPW 的轨道产品

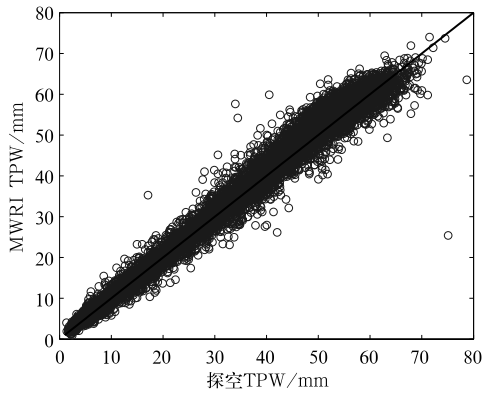


图 2 MWRI TPW 轨道产品  
与探空数据 TPW 对比

Fig. 2 Comparison between MWRI TPW  
orbit products and radiosonde TPW

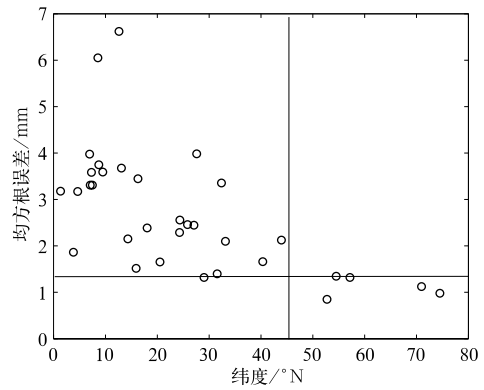


图 3 42 个无线电探空站点的  
均方根误差随纬度的变化

Fig. 3 The change of RMSE with  
longitude at 42 radiosonde sites

在 TPW 较小时的反演精度较高。

水汽的分布有纬度特征,一般来讲,低纬度地区的水汽比较充足,高纬度地区的水汽相对较少。既然 TPW 的轨道产品呈现出低值的反演精度较高,高值的反演精度较低的现象,表明 TPW 的轨道产品精度也有随纬度变化的特征。图 3 是反演的 TPW 在不同探空站点的均方根误差随探空站点纬度变化的散点图。图中显示,高纬地区的均方根误差要明显小于低纬。均方根误差  $< 1.2$  mm 的 5 个站点的纬度都超过  $45^{\circ}\text{N}$ 。另外,在 42 个站点中,有  $1/4$  的站点的均方根误差超过了图 2 中所示的平均值(2.6 mm),表明图 2 中偏差比较大的散点很可能都集中在这几个站点,而这些站点的纬度均低于  $30^{\circ}\text{N}$ 。通过对图 2 和图 3 的共同分析可以总结出, MWRI TPW 的轨道产品在水汽含量较少的高纬度区域反演精度较高,在水汽含量较多的低纬度区域反演精度略差。

从轨道产品反演精度的稳定性上来讲(图 4),

2014 年 1 月到 2015 年 12 月均方根误差一直在  $2\sim 3$  mm 变化。并且,2014 年的均方根误差变化没有呈现出明显的特征,2015 年的均方根误差则从 4 月开始先缓慢上升,到 8 月以后再缓慢下降,表明轨道产品的反演精度可能存在一个季节变化的特征,不过因为资料长度比较短,这个结论还需进一步考证。

### 3.2 日产品精度评价

日产品代表了水汽的日平均。检验 MWRI TPW 的日产品有两种手段,一是使用无线电探空站点的日平均资料,另外一个使用国外同类遥感仪器 SSMIS 的 TPW 日产品。就第一种方式而言,因为高纬度地区存在轨道的重复覆盖,日平均资料里可能包含了一些时间差异比较大的轨道产品的投影。在 42 个无线电探空站点中,除了站点号为 01001 和 01028 这两个站点的纬度超过  $70^{\circ}\text{N}$  以外,其余站点的纬度基本上都低于  $50^{\circ}\text{N}$ 。并且,这两个站点基本上一日有四次常规探空观测,因此用这两

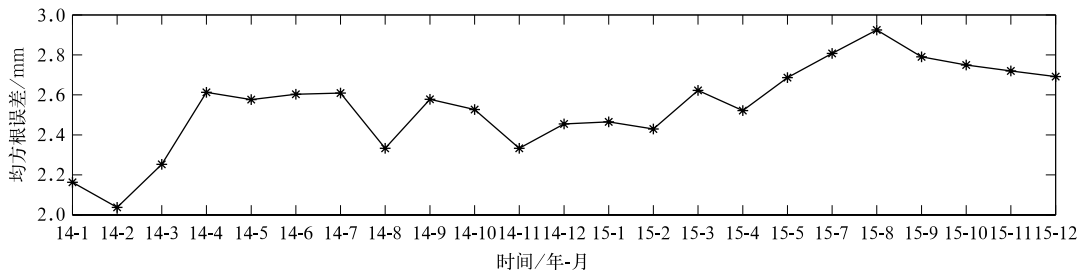


图 4 不同月的轨道产品均方根误差变化

Fig. 4 The change of RMSE with time

个站点四次观测的平均值表示探空水汽的日平均。选择 2016 年 FY-3C MWRI TPW 的日产品和无线电探空的日平均进行比较,统计出的均方根误差、相关系数以及平均偏差等指标如表 1 所示。为了更好

地对比,还同时比较了 SSMIS 的日产品和无线电探空的日平均。图 5 是在 01028 这个站点上 MWRI 日产品和 SSMIS 日产品分别与探空日平均的散点图。

表 1 FY-3C TPW 的日产品和无线电探空数据误差

Table 1 The error for a comparison between FY-3C TPW and radiosonde TPW

站点号	载荷	匹配样本数/个	均方根误差/mm	相关系数	平均偏差/mm
01001	FY-3C MWRI	341	2.1483	0.8162	1.0123
01028	FY-3C MWRI	333	1.0362	0.9336	0.0408
01001	DMSP SSMIS	291	1.7934	0.8342	0.2374
01028	DMSP SSMIS	267	1.3703	0.8742	-0.3586

就 MWRI 而言,01028 这个站点的各项指标明显优于 01001,和轨道产品相比,TPW 日产品的均方根误差要比轨道产品小,但是相关系数却远远不如轨道产品高。主要可能是因为轨道产品的时空匹配精度要明显高于日产品。尽管探空站点的日产品和卫星的日产品都是平均产品,但是进行平均的这一点并没有经过严格意义上的时间匹配(因为 FY-3C MWRI TPW 的日产品没有时间信息),而且空间上  $0.5^\circ$  的差异也能导致水汽的剧烈变化。因此日产品在进行质量检验的时候,最大的问题是无法保证时空上的高度匹配。当然,这不单是 MWRI 面临的问题,SSMIS 也存在同样的问题。所以 SSMIS 的日产品与探空日平均的相关系数也较低。另外,表 1 显示 SSMIS 在 01001 这个站点的各项指标都比 MWRI 好,但是在 01028 这个站点,SSMIS 的指标却明显不如 MWRI。这也可以从图 5 中明显看出来,SSMIS 的散点相比 MWRI 存在一个明显向

下的偏离,并且 MWRI 的散点更为收敛,SSMIS 则比较分散。

使用探空站点来检验日产品能作为日产品的一种评价手段,但是因为符合条件的探空站点很少,所以评价的结果还不足以完全反映日产品的整体情况,为此,还需要进一步开展交叉比对。交叉比对使用的数据是 SSMIS 2016 年全年的 TPW 日产品。将 MWRI 的日产品和 SSMIS 的日产品进行比较以后,得到了均方根误差的日变化(图 6)。

TPW 日产品的均方根误差在  $2.3\sim 3.8$  mm 变化。虽然 SSMIS 的日产品和 MWRI 的日产品在空间上完全匹配,但是无法保证 FY-3C 的轨道和 DMSP F17 的轨道观测同一区域时在时间上的一致性,因此水汽之间的差异很大。另外,和国外其他遥感仪器如 Windsat、GMI 和 AMSR2 等微波日产品的交叉比对也显示出了相似结果。这表明,对日产品的交叉比对而言,如果不进行严格的时间匹配,选择

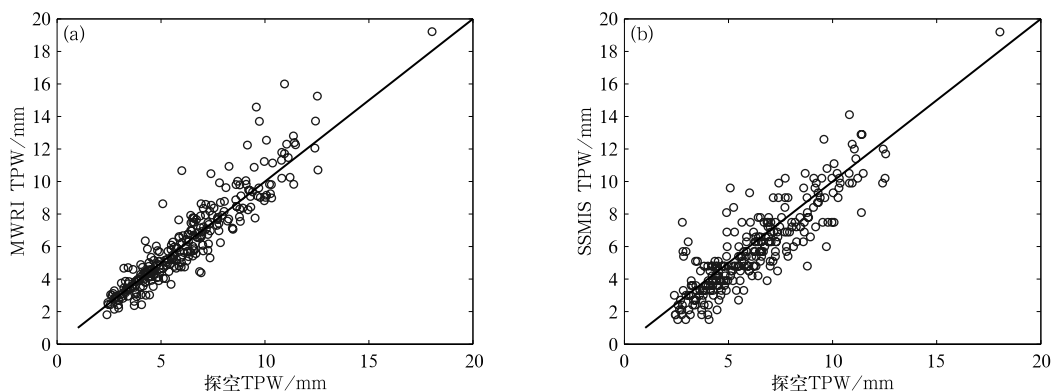


图 5 日产品与探空数据 TPW 散点图对比

(a)MWRI TPW 和探空,(b)SSMIS TPW 和探空

Fig. 5 Comparison between TPW day products and radiosonde TPW

(a) MWRI TPW and radiosonde TPW, (b) SSMIS TPW and radiosonde TPW

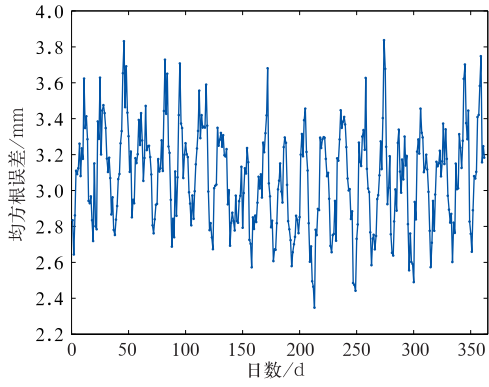


图 6 MWRI TPW 和 SSMIS TPW 日产品的均方根误差变化  
Fig. 6 Comparison between MWRI TPW and SSMIS TPW day products

哪个仪器来进行比较其实差别不大,但是如果能够进行时间匹配,不同卫星轨道之间的一致性就很重要,因为这直接影响到匹配的样本数量。

在目前的情况下,如果使用 2016 年全年日产品的平均值来代表日产品精度,这个值大概在 3 mm 左右,虽然也能满足指标要求,但是事实上是被低估

的。因此,为了更合理地评价日产品精度,在后续业务产品变更中需要考虑增加日产品的时间信息。

### 3.3 月产品精度评价

交叉比对是进行月产品精度评价的有效手段。SSMIS 的月产品相比探空,能获得较长时间序列的稳定数据,因此可以用来进行 MWRI TPW 月产品的检验。检验的数据长度共有 35 个月,评价的主要指标是月平均的均方根误差,结果如图 7 所示。

TPW 月产品的均方根误差变化较小,基本稳定在 1.1~1.3 mm,平均偏差小于 5%。其中,2018 年 2 月 MWRI 的月产品分布和 SSMIS 的月产品分布如图 8 所示。

总的来讲,MWRI TPW 月产品和 SSMIS 月产品的分布趋势很相似,但是 MWRI 的值略微有一些偏大。另外,因为 SSMIS 经过较严格的质量控制,导致整个图像上出现了很多数据缺测的区域(白点)。但是整体来讲,MWRI TPW 月产品的质量还是较为稳定的。

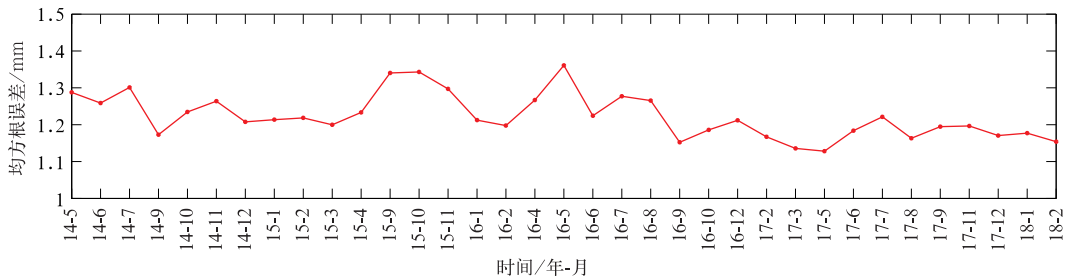


图 7 MWRI TPW 和 SSMIS TPW 月产品的均方根误差变化  
Fig. 7 Comparison between MWRI TPW and SSMIS TPW month products

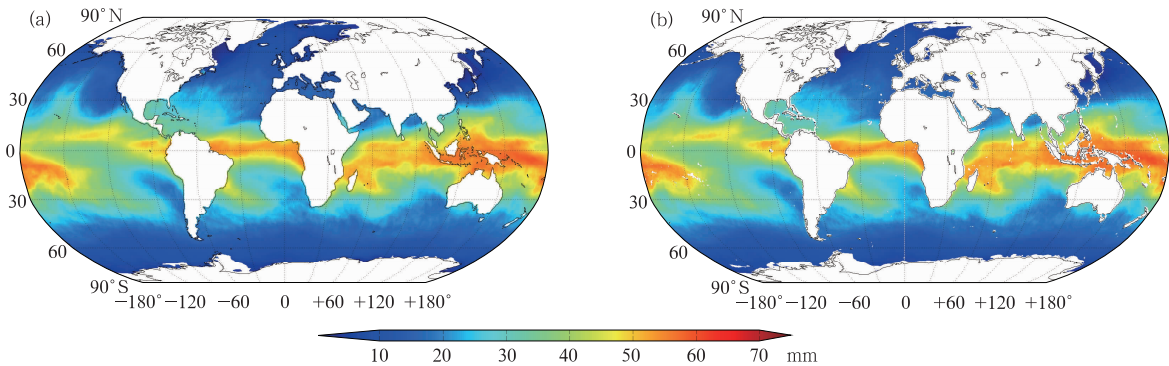


图 8 2018 年 2 月 MWRI TPW(a)和 SSMIS TPW(b)月产品分布  
Fig. 8 Comparison between MWRI TPW (a) and SSMIS TPW (b) month products in February 2018

## 4 结论和讨论

本文介绍了 FY-3C MWRI TPW 产品的反演算法,在此基础上,利用无线电探空数据以及 SSMIS 的日/月产品对 FY-3C MWRI TPW 的轨道产品、日产品和月产品进行了较为细致的质量检验,总体来讲,该产品的精度很好地满足了设计指标的要求。但是,关于该产品,还有一些值得讨论的地方:

(1) 在目前的反演算法中,对探空数据和 L1 级亮温数据虽然进行了一定的质量控制,但是和 SSMIS 相比,质量控制的程度还远远不够,这在一定程度上限制了产品的精度。另外,对统计方法而言,反演的回归系数还需要不定时的进行重新拟合,以提高反演的精度。当然, FY-3C MWRI TPW 产品的精度除了受反演算法影响以外,还受限于定标精度、降水检测以及海冰检测等,所以提高产品精度依然任重而道远。

(2) FY-3C MWRI TPW 日产品交叉比对的结果虽然满足设计指标的要求,但是因为经过严格的时空匹配,所以日产品的精度是被低估的。因此,为了对日产品的精度有更加客观的评价,需要考虑在现有产品中添加时间信息。

(3) 自从使用物理统计算法以后, SSMIS 水汽产品的均方根误差从 2.4 mm 降低到了 1.2 mm 左右,表明物理统计算法对提高水汽产品的质量有很明显的效果,在未来的业务产品中,有必要对反演算法进行进一步改进。

(4) FY-3C MWRI TPW 产品的质量整体还是比较稳定的,并且 FY-3C MWRI TPW 部分站点的日产品和探空数据的一致性明显优于 SSMIS,表明 FY-3C MWRI TPW 产品在气候上的应用具有潜在价值。

### 参考文献

陈洪滨,吕达仁,魏重,等,1996. 空基微波辐射计遥感晴天大气可降水量:不同通道组合和亮温函数形式的效果的比较分析[J]. 大气科学,20(6):757-762. Chen H B, Lu D R, Wei C, et al, 1996. Comparison of the effects of different microwave channel combinations and TB functions in the algorithm for retrieving precipitable water in the clear atmosphere[J]. Sci Atmos Sin, 20(6): 757-762(in Chinese).

陈哲,高杰,杨旭,2013. IGRA 全球站点探空数据集介绍及其资料质量状况分析[J]. 气象与环境学报,29(5):106-111. Chen Z, Gao J, Yang X, 2013. Introduction of IGRA dataset and analysis of its data quality[J]. J Meteor Environ, 29(5): 106-111 (in Chinese).

胡菊咏,唐世浩,刘海磊,等,2017. FY-3C VIRR 大气可降水产品生成和检验[J]. 遥感学报,21(6):842-852. Hu J Y, Tang S H, Liu H L, et al, 2017. Production and validation of FY-3C VIRR total precipitation water products[J]. J Remote Sens, 21(6): 842-852 (in Chinese).

黄小燕,王圣杰,王小平,2018. 1960—2015 年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. 气象,44(9):1191-1199. Huang X Y, Wang S J, Wang X P, 2018. Variations of precipitable water in Northwest China during 1960—2015[J]. Meteor Mon, 44(9): 1191-1199(in Chinese).

李乐乐,管磊,陈锐,2006. 基于星载微波辐射计的海洋大气参数反演算法研究[J]. 中国海洋大学学报,36(S1):205-211. Li L L, Guan L, Chen R, 2006. Study on algorithm for the retrieval of oceanic and atmospheric parameters from satellite microwave radiometer measurement[J]. Period Ocean Univ China, 36(S1): 205-211(in Chinese).

刘松涛,严卫,2006. 星载微波辐射计反演洋面非降水云区水汽总量的研究[J]. 气象科技,34(3):319-325. Liu S T, Yan W, 2006. Study of integrated water vapor in non-raining cloud areas over oceans from satellite-borne microwave radiometric measurements[J]. Meteor Sci Technol, 34(3): 319-325(in Chinese).

尹延通,刘高飞,关吉平,等,2017. 基于探空和 SSMIS/S 资料的 AMSR-2 海上大气可降水产品检验与评估[J]. 海洋科学,41(4):65-74. Yin Y T, Liu G F, Guan J P, et al, 2017. Validation and evaluation of AMSR-2-derived total precipitable water over sea surface using radiosonde and SSMIS/S data[J]. Marine Sci, 41(4): 65-74(in Chinese).

张森,覃丹宇,邱红,2017. 基于 FY-3C/MWTS-II 数据估计西北太平洋热带气旋强度[J]. 气象,43(5):573-580. Zhang M, Qin D Y, Qiu H, 2017. Estimating intensity of tropical cyclone over the western North Pacific based on FY-3C/MWTS-II data[J]. Meteor Mon, 43(5): 573-580(in Chinese).

Alishouse J C, Snyder S A, Vongsathorn J, et al, 1990. Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/1[J]. IEEE Trans Geosc Remote Sens, 28(5): 811-816.

Wentz F J, 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager[J]. J Geophys Res, 102(C4): 8703-8718.

Wentz F J, Meissner T, 2000. AMSR ocean algorithm, algorithm theoretical basis document, version 2[R]. Santa Rose: Remote Sensing System.

Wentz F J, Meissner T, 2007. Supplement 1 algorithm theoretical basis document for AMSR-E ocean algorithms[R/OL]. Remote Sensing Systems Tech. (2018-04-10). [http://www.remss.com/support/rss\\_tech\\_reports\\_by\\_year.html](http://www.remss.com/support/rss_tech_reports_by_year.html).