

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.04.007

全球海洋大气柱水汽含量遥感融合数据产品生成

孙伟富¹, 赵宇佳², 陈磊^{2,3}, 张杰¹, 吴培强¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 3. 中国科学院海洋研究所 工程技术部, 山东 青岛 266071)

摘要: 本研究利用国际在轨 SSMIS、WindSat、AMSR-E、ASMR2 和国产 HY-2A 微波辐射计多源遥感大气柱水汽含量观测数据, 基于最优插值算法, 生成了 2003–2015 年全球海洋每日 0.25° 分辨率的大气柱水汽含量多源遥感融合产品, 以及 2012–2015 年未使用 HY-2A 微波辐射计数据的全球海洋每日 0.25° 遥感融合产品。利用无线电探空水汽含量观测数据, 对生成的全球海洋大气柱水汽含量融合产品进行精度检验。结果表明, 总体上, 13 年间均方根误差和标准差小于 3 mm, 平均偏差小于 0.6 mm, 平均绝对偏差小于 2 mm, 相关系数大于 0.98; 使用 HY-2A 微波辐射计数据产品会使融合结果的精度出现微小的降低; AMSR2 和 HY-2A 微波辐射计数据的联合使用对于替代 AMSR-E 数据具有积极意义。

关键词: 全球海洋; 大气柱水汽含量; 遥感; 辐射计; 最优插值

中图分类号: P732; P414.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-6932(2022)04-0418-09

Generation of remote sensing fusion product of global ocean columnar atmospheric water vapor

SUN Weifu¹, ZHAO Yujia², CHEN Lei^{2,3}, ZHANG Jie¹, WU Peiqiang¹

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;
2. College of Marine and Information Space, China University of Petroleum (Hua dong), Qingdao 266580, China;
3. Engineering and Technology Department Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the optimal interpolation (OI) algorithm, a daily fusion product of high-resolution global ocean columnar atmospheric water vapor with a resolution of 0.25° from 2003 to 2015 was generated from multisource remote sensing observations of SSMIS, WindSat, AMSR-E, ASMR2 and HY-2A microwave radiometers. Daily/0.25° fusion product not using HY-2A RM data are also generated from 2012 to 2015. Using the water vapor observation data of radiosonde, the accuracy of all the global ocean columnar atmospheric water vapor fusion products was validated. The comparative results show that the *RMSE* and *Std* are better than 3 mm, the overall *Bias* is smaller than 0.6 mm, the *MAD* is better than 2 mm, and *R* is better than 0.98. *RMSE* will increase slightly when HY-2A RM data is used, whereas the increase is so small that it can be ignored. The combined use of AMSR2 and HY-2A RM data is positive for the replacement of AMSR-E data.

Keywords: global ocean; columnar atmospheric water vapor; remote sensing; radiometer; optimum interpolation

水汽是地球上含量最丰富的温室气体, 是全球水分及能量循环的关键纽带^[1], 且随着时间、空间变化而快速变化。水汽是影响全球定位系统

(Global Positioning System, GPS) 和全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 定位精度的重要因素之一^[2], 对气候预测、全球气候

收稿日期: 2021-08-28; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFA0600102)

作者简介: 孙伟富 (1983—), 博士, 工程师, 主要从事海洋遥感产品生成与应用研究。电子邮箱: sunweifu@fio.org.cn

通讯作者: 赵宇佳。电子邮箱: zhaoyujia12138@163.com

变化、全球水循环以及辐射传输研究均具有重要意义^[3-4]。目前，对水汽含量的观测手段主要包括以无线电探空仪^[5]、地基 GPS^[6]、地基微波辐射计为代表的地基手段及以光学遥感图像^[7]、星载微波辐射计^[8]为代表的卫星遥感手段。地基手段测量数据的时空覆盖率低；光学遥感图像受天气影响大，无法实现全天候观测，且空间覆盖范围小，星载微波辐射计扫描刈幅可达 1 000 km，可覆盖全球 90% 以上的海域，为全球海洋大气柱水汽含量监测提供了重要的数据支持。大范围、近实时的大气柱水汽含量数据获取，主要依赖星载微波辐射计，目前能够观测大气水汽的在轨星载微波辐射计主要有：Aqua AMSR-E、TRMM TMI、DSMP SSM/I 和 Coriolis WindSat 等。受云量和雨量的影响，这些单星微波辐射计的有效数据时空覆盖范围不同，为了获取覆盖全球海洋的大气柱水汽含量每日数据产品，采用多源卫星数据进行数据融合是理想的办法。

目前，水汽融合工作主要集中在气象卫星遥感图像融合方面，1982 年 Huber 提出了稀疏表示方法，王雷等^[9]借鉴稀疏表示理论，提出了一种基于耦合稀疏表示的红外和水汽云图融合方法，融合效果优于传统像素平均和小波变换方法。刘凯等^[10]将多分辨率分析和多尺度几何分析融合方法运用到红外和水汽图融合中，融合图像具有良好的视觉效果，突出了水汽边缘信息。而利用卫星水汽单星产品数据生成海洋大气柱水汽含量遥感融合产品的研究较少，可查资料中仅有遥感系统（Remote Sensing System，RSS）使用 SSM/I^[11]、TMI^[12]和

ASMR-E^[8]等微波辐射计数据，制作了 1° 空间分辨率的月均全球海洋大气柱水汽含量产品，但是该产品的时间分辨率过低。为了更好地反映水汽的时空变化规律，支撑全球气候变化和水循环研究，研制高时间分辨率的全球海洋大气柱水汽含量遥感融合产品非常必要。海面风场和海表温度卫星遥感数据融合方法为本研究的开展提供了技术保障，主流的融合算法包括逐步订正法^[13]、混合分析法^[14]、客观分析法^[15-16]、卡尔曼滤波法^[13]和最优插值方法^[17-20]等，受实测资料的限制，逐步订正法和混合分析法所生成的融合产品时效性较差，空间分辨率较低；客观分析法受单星数据精度和时空分辨率的影响，融合产品易产生噪声；卡尔曼滤波法同时考虑了融合产品的时空分辨率和精度，但是该方法计算量较大，生成覆盖全球海洋的大气柱水汽含量产品用时较长；而最优插值方法在兼顾考虑了融合产品精度和覆盖度的情况下，计算量大幅小于卡尔曼滤波法。

本研究利用在轨 SSMIS、WindSat、AMSR-E、ASMR2^[21]和 HY-2A^[22]（HY-2A RM）微波辐射计多平台大气柱水汽含量观测数据，基于最优插值算法，生成 2003—2015 年的全球海洋每日 0.25° 高分辨率大气柱水汽含量多源遥感融合产品，为了验证国产 HY-2A 微波辐射计水汽含量数据对融合结果的影响，本研究同时生成了未使用 HY-2A 数据的 2012—2015 年全球海洋每日 0.25° 遥感融合产品，利用无线电探空仪观测数据，对生成的大气柱水汽含量融合产品进行精度检验。本研究主要技术流程如图 1 所示。

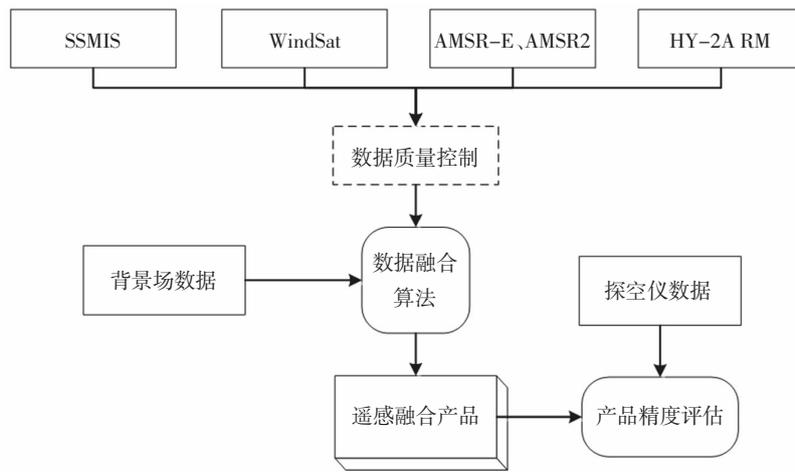


图 1 水汽含量融合产品生产技术流程图

1 数据

1.1 卫星遥感数据

在全球海洋大气柱水汽含量融合产品生成过程中,使用了国外星载辐射计 AMSR-E、AMSR2、WindSat、SSMIS 单星数据产品,并加入我国第一颗海洋动力环境卫星海洋二号 (HY-2A) 微波辐射计水汽含量数据产品。上述星载辐射计水汽数据的基本信息见表 1。

表 1 星载辐射计水汽含量遥感数据

传感器	时空分辨率	时间范围	空间范围
AMSR-E	Daily/25 km	2003.01—2011.10	全球海洋
AMSR2	Daily/25 km	2012.07—2015.12	全球海洋
WindSat	Daily/25 km	2003.01—2015.12	全球海洋
SSMIS	Daily/25 km	2003.01—2015.12	全球海洋
HY-2A RM	沿轨/97 km	2011.10—2015.12	全球海洋

微波辐射计 SSMIS、WindSat、AMSR-E 和 AMSR2 数据均由 RSS 提供,其产品空间分辨率为 0.25° ,数据产品中包括水汽含量、风速和云液水等信息。研究提取了水汽含量数据,并进行了数据质量控制,剔除了异常值和默认值,保留了正常范围内 ($0\sim 70\text{ mm}$) 的数据。HY-2A 微波辐射计数据是由国家卫星海洋应用中心 (National Satellite Ocean Application Service, NSOAS) 提供的 L2 级产品数据,包括 HY-2A 微波辐射计的各种海气参量产品,研究提取了水汽含量数据、观测经纬度和扫描时间,并进行了质量控制,保留了正常范围内 ($0\sim 70\text{ mm}$) 的数据。为了保证融合结果的准确性,针对上述所有微波辐射计水汽数据,进一步剔除了与对应背景场数据绝对偏差大于 10 mm (大于 3 倍标准差) 的数据。

1.2 背景场数据

背景场数据使用的是欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的水汽含量再分析数据。ECMWF 的水汽含量月平均资料数据集按照 00、06、12、18 时等 4 个时次分别统计,区域范围覆盖全球,且已网格化为 1° 的资料场。剔除绝对偏差大于 10 mm (大于 3 倍标准差) 的数据。

1.3 无线电探空仪数据

收集了美国国家气象数据中心 (National Climate Data Center, NCDC) 提供的超过 1 000 个全球探空仪站点数据,并根据海陆掩模,获取了 90 个位于海洋区域的站点,提取了其在 2003—2015 年测量的全部大气廓线数据,进而计算了大气柱水汽含量值,并对计算结果进行了有效性检查,剔除了不在正常范围 ($0\sim 70\text{ mm}$) 内的异常值,生成了每个探空站点日均水汽含量数据。探空仪站点空间分布如图 2 所示。

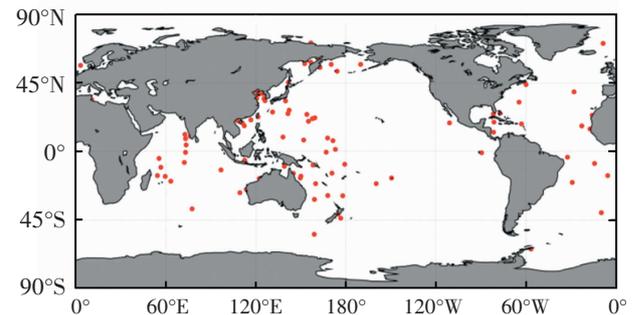


图 2 无线电探空站点分布

2 水汽含量遥感产品生成与验证方法

2.1 水汽含量遥感产品融合算法

水汽含量融合产品生产采用最优插值算法。最优插值算法是在对背景场、观测值和分析场均为无偏估计的前提下,求解分析方差最小化的一种方法^[19],被广泛应用于海面温度^[23]、风场^[24]等数据产品生产。根据最优插值算法,最终融合产品网格点 k 上的数值,即水汽含量融合值 A_k 有:

$$A_k = B_k + \sum_{i=1}^N (O_i - B_i) W_{ki} \quad (1)$$

式中: B_k 和 B_i 为 ECMWF 提供的背景场数据 (初猜值), O_i 为微波辐射计测量的水汽含量值, $O_i - B_i$ 为辐射计反演值与背景场数值的差值,即观测值增量, W_{ki} 为相应的最小平方权重因子,由分析场水汽含量方差和最小化得到,当某格点附近没有辐射计观测数据时,权重为 0,直接填充背景场数据; N 为融合产品网格 k 附近的观测点数目。由最小二乘原理,对权重因子有:

$$W_{ki} \sum_{j=1}^N M_{ij} = \langle \pi_i, \pi_k \rangle \quad (2)$$

式中: $M_{ij} = \langle \pi_i, \pi_j \rangle + \varepsilon_i^2 \delta_{ij}$, $\langle \pi_i, \pi_j \rangle$ 为背景场相关误

差的期望值; ε_i 为点 i 处数据误差与背景场标准偏差的比值, 取 0.5。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

背景场相关误差的期望值可表示为:

$$\langle \pi_i \pi_j \rangle = \exp \left[\frac{-(x_i - x_j)^2}{\lambda_x^2} + \frac{-(y_i - y_j)^2}{\lambda_y^2} \right] \quad (4)$$

式中: x, y 分别代表网格数据的经向和纬向距离,

λ_x 和 λ_y 为水汽含量的经向和纬向相关尺度, 分别取 238 km 和 179 km^[9], 解线性方程组 (2) 即可获得网格点 k 的各权重因子。融合算法的执行流程如图 3。

2.2 融合产品精度检验方法

利用无线电探空仪数据对全球海洋水汽含量数据产品进行精度检验时, 需对同一天同一站点的探空数据进行平均, 探空数据观测日期与待检验的水汽含量融合产品同步, 数据匹配的空间窗口为 0.1° 。

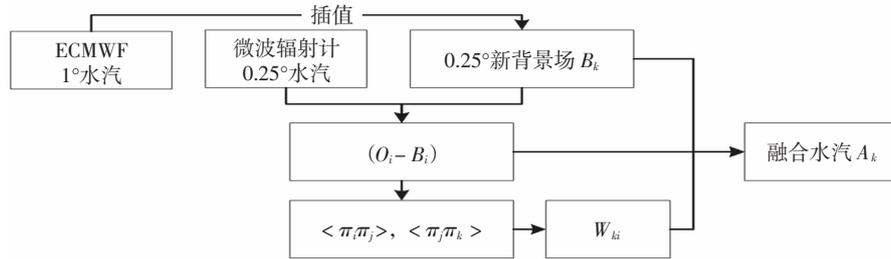


图 3 水汽含量融合算法执行流程

质量评价指标为平均偏差 (*Bias*)、平均绝对偏差 (*MAD*)、标准差 (*Std*)、均方根误差 (*RMSE*) 和相关系数 (*R*) 等, *Bias* 是融合水汽与探空实测水汽的系统偏差, 表示融合水汽对探空实测水汽的离散程度, *MAD* 可避免偏差正负抵消的情况, 能够更好地反映系统偏差, *Std* 可反映偏差对 *Bias* 的离散程度, *RMSE* 用来反映融合水汽相对于探空实测水汽的精度。其中主要参数定义如公式(5)–(8):

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2} \quad (6)$$

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(A_i - \bar{A}) - (\bar{B} - \bar{B})]^2}{N}} \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}} \quad (8)$$

式中: N 表示融合水汽与探空实测水汽匹配的数据总数, A 表示融合水汽观测值, B 表示探空实测水汽观测值。

3 水汽含量遥感融合产品生成与分析

3.1 遥感融合产品结果

利用国产 HY-2A 和国际 SSMIS、WindSat、

AMSR-E、ASMR2 微波辐射计大气柱水汽含量单星数据, 基于最优插值算法, 生成了 2003–2015 年共 13 年的全球海洋大气柱水汽含量遥感融合产品数据, 产品的时间分辨率为 1 天, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间范围为 2003 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日, 为了验证国产 HY-2A 微波辐射计水汽含量数据对融合结果的影响, 同时生成了 2012–2015 年未使用 HY-2A 数据的全球海洋每日 0.25° 遥感融合产品。所有产品格式为 NetCDF, 其中包括水汽含量和经纬度网格数据 (网格数为 720×1440), 以及数据产品生产单位、生产日期、时间等相关信息。数据产品记录三组数据字段: 经度 (*lon*)、纬度 (*lat*)、水汽含量 (*water_vapor*)。其中经度范围为 $179.875^\circ\text{W} - 179.875^\circ\text{E}$, 小数位保留 3 位, 数据类型为浮点型; 纬度范围为 $89.875^\circ\text{S} - 89.875^\circ\text{N}$, 小数位保留 3 位, 数据类型为浮点型; 水汽含量数据有效范围为 $0 \sim 70000$, 填充值为 -999 , 比例因子为 0.001 , 数据类型为整数型; 2010 年 1 月 1 日的全球海洋大气柱水汽含量融合产品样例如图 4 所示。

3.2 HY-2A 微波辐射计水汽数据对融合结果的影响

为研究 HY-2A 微波辐射计 L2 级水汽含量数据对融合结果的影响, 利用无线电探空仪水汽含量数据, 针对 2012–2015 年融合了 HY-2A 微波辐射计水汽含量数据和未融合 HY-2A 微波辐射计水汽含量数据的两种全球海洋大气柱水汽含量融合产

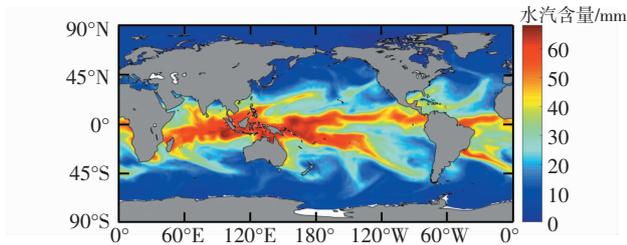


图4 水汽含量融合样例数据(2010年1月1日)

品,分别进行了精度验证。验证过程中,空间窗口为 0.25° ,时间窗口为1 h,共获得匹配数据11 851对,两种融合产品的 *Bias*、*MAD*、*Std*、*RMSE*、*R* 见表2。

从表2可以看出,使用HY-2A微波辐射计的水汽数据,对融合结果会产生一定的负面影响,具体表现为:*MAD*和*Std*增大约0.02 mm,*RMSE*增大约0.01 mm,相关系数*R*下降约0.01,但仍高于

0.98。虽然HY-2A微波辐射计数据的使用会使全球海洋大气柱水汽含量融合产品的精度出现一定程度的下降,但是下降程度极小,引起的*RMSE*相对误差不足1%。在精度影响不大的情况下,HY-2A微波辐射计数据的使用可以有效替代国际同类卫星遥感数据,并增强国产卫星数据的应用水平。AMSRE于2011年下半年停止数据服务,本研究利用AMS2和HY-2A微波辐射计数据对其进行了有效替代。

图5给出了2012—2015年间使用HY-2A和未使用HY-2A微波辐射计水汽含量数据的两种全球海洋大气柱水汽含量融合产品的 *Bias*、*Std*、*RMSE* 以及其对应差值逐月演变数据,图例中的绿折线 *x* 代表使用HY-2A微波辐射计数据的水汽融合产品,红折线 *y* 代表未使用HY-2A微波辐射计

表2 HY-2A微波辐射计数据对水汽融合产品精度的影响

数据使用	年份	匹配数据量	<i>Bias</i> /mm	<i>MAD</i> /mm	<i>Std</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>
未融合 HY-2A	2012	3014	0.26	1.54	2.14	2.15	0.99
	2013	2969	0.34	1.70	2.40	2.43	0.99
	2014	2998	0.60	1.84	2.50	2.58	0.99
	2015	2870	0.40	1.94	2.67	2.70	0.99
融合了 HY-2A	2012	3014	0.24	1.56	2.15	2.16	0.99
	2013	2969	0.30	1.72	2.42	2.44	0.99
	2014	2998	0.57	1.87	2.52	2.59	0.98
	2015	2870	0.37	1.96	2.70	2.73	0.98

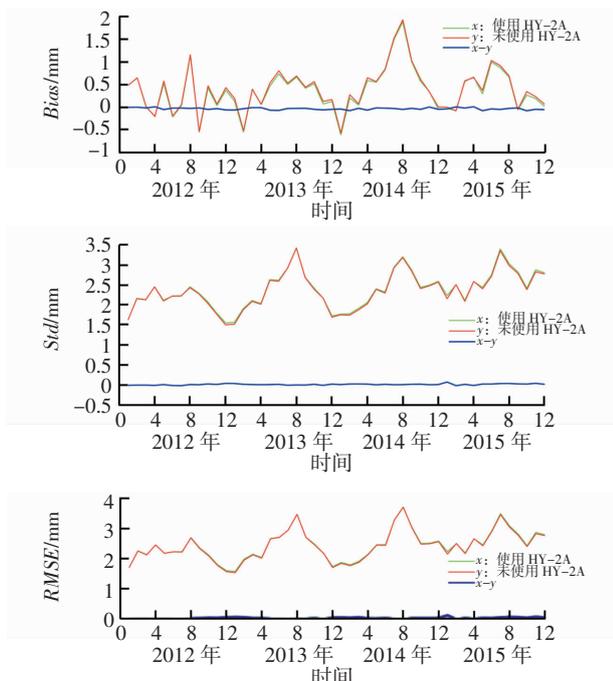


图5 两种融合产品 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的逐月演变

数据的水汽融合产品,蓝折线 ($x-y$) 代表这两种数据产品的差值。从图5可以看出,两种产品的 *Bias*、*Std*、*RMSE* 相当,一致性吻合较好, *x* 的 *Bias* 要略低于 *y*, 而 *x* 的 *Std* 和 *RMSE* 要略高于 *y*, 差值结果均接近于0。

表3详细给出了两种水汽含量融合产品 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的逐月差值统计信息,可知 *Bias* 的逐月差值总体上偏向于负值, *Std* 和 *RMSE* 的逐月差值总体上均偏向于正值,这与表2的年均统计信息具有一致性,反映了HY-2A微波辐射计数据的使用不仅会在年均尺度上对融合产品产生一定的影响,而且在逐月尺度上同样会导致融合产品的精度降低,但降幅极小,引起的月 *RMSE* 相对误差不足1%。

3.3 近13年融合产品精度检验

利用无线电探空仪观测数据,以 0.25° 空间窗口,1 h时间窗口,对生成的2003—2015年全球海

洋大气柱水汽含量融合数据与相应探空仪数据进行了匹配，共获得匹配数据 37 951 对，计算了逐年水汽数据的 *Bias*、*MAD*、*RMSE* 和 *R*，如表 4 所示。

从表 4 可以看出，水汽含量融合结果的 *RMSE* 和 *Std* 总体上小于 3 mm，*Bias* 具有一定的正偏差，总体小于 0.6 mm，*MAD* 总体小于 2 mm，*R* 大于 0.98。研究针对 2003—2015 年遥感融合水汽含量与探空水汽含量进行了绝对误差分布分析，更直观

地显示了这 13 年间全球海洋大气柱水汽含量与水汽探空数据的比较结果（图 6），可以看出遥感水汽含量与探空数据的绝对误差呈正态分布，略偏向于正值，13 年间的平均 *Bias* 为 0.51 mm，95%置信区间为（0.49 mm，0.54 mm），13 年间的平均 *Std* 为 2.63 mm，95%置信区间为（2.61 mm，2.64 mm），两种水汽含量数据的相关性较好。

表 3 两种融合产品 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的差值逐月演变

参数	年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
<i>Bias</i>	2012	0.00	0.00	-0.01	0.01	-0.05	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.05	-0.03	-0.06
	2013	-0.06	-0.03	-0.01	-0.01	-0.06	-0.07	-0.03	-0.02	-0.02	-0.04	-0.06	-0.04
	2014	-0.04	-0.07	-0.02	-0.06	-0.01	-0.02	-0.03	-0.05	-0.02	-0.05	0.01	-0.04
	2015	-0.03	0.01	-0.02	0.01	-0.07	-0.03	-0.05	-0.02	-0.01	-0.08	-0.04	-0.05
<i>Std</i>	2012	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	-0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05
	2013	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.03
	2014	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02
	2015	0.08	-0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.03
<i>RMSE</i>	2012	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
	2013	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
	2014	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	-0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
	2015	0.08	-0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.05	0.02

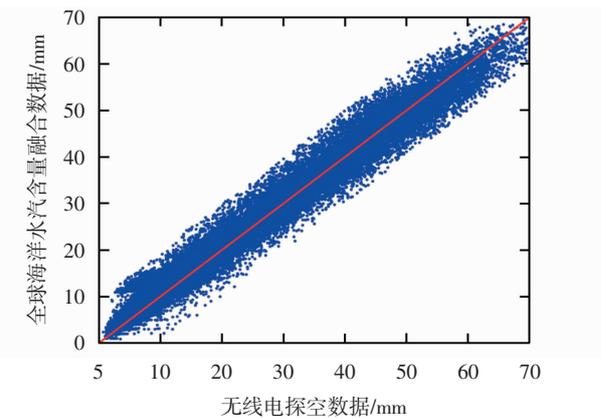
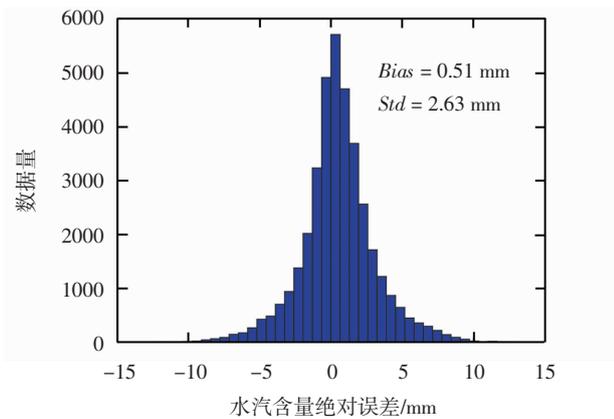


图 6 2003—2015 年水汽含量融合产品与探空仪数据比较的结果

在 2003—2015 的数据年融合过程中，AMSR-E 于 2011 年下半年停止数据服务，后期由 AMSR2 和 HY-2A 微波辐射计数据替代。13 年间的融合产品中，2003—2010 年间的融合数据完全由 AMSR-E、WindSat 和 SSMIS 数据融合而成，2011 年的融合数据存在 AMSR-E、HY-2A 微波辐射计数据混合使用的情况，2012—2015 年间，AMSR-E 数据完全由 AMSR-2 和 HY-2A 微波辐射计数据替代。为研究 AMSR-2 和 HY-2A 微波辐射计数据联合替

代 AMSR-E 数据的能力，开展了 2003—2010 年和 2012—2015 年这两种水汽融合数据的比对分析。2003—2010 年的平均 *Bias* 为 0.60 mm，95%置信区间为（0.57 mm，0.64 mm），平均 *Std* 为 2.70 mm，95%置信区间为（2.67 mm，2.72 mm）；2012—2015 年的平均 *Bias* 为 0.38mm，95%置信区间为（0.34 mm，0.42 mm），平均 *Std* 为 2.50 mm，95%置信区间为（2.48 mm，2.53 mm），两种产品的绝对误差分布见图 7。结合表 4 可见，2012—2015 年

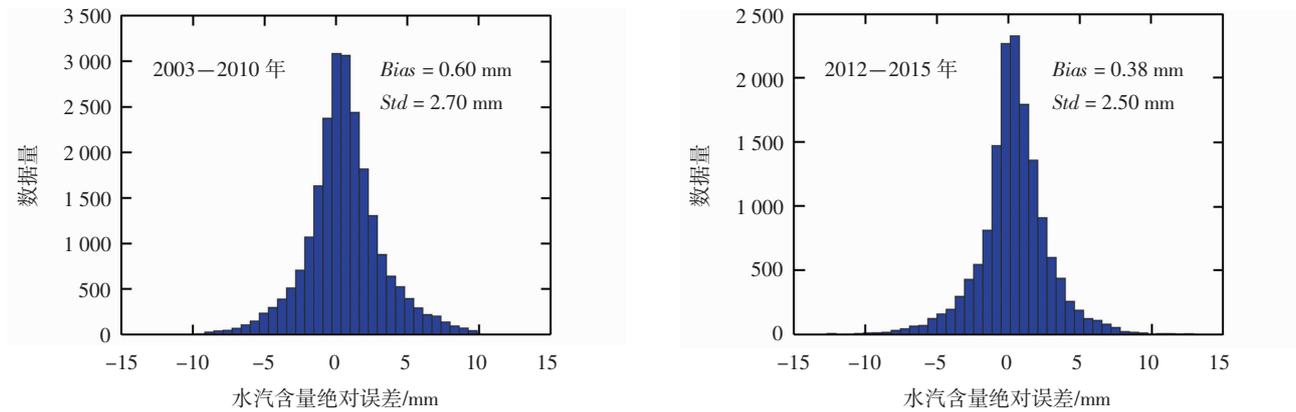


图 7 不同数据源融合产品绝对误差对比

表 4 全球海洋水汽含量精度统计

年份	匹配数据量	<i>Bias</i> /mm	<i>MAD</i> /mm	<i>Std</i> /mm	<i>RMSE</i> /mm	<i>R</i>
2003	2365	0.50	2.07	2.79	2.84	0.99
2004	2961	0.52	1.94	2.60	2.65	0.99
2005	2916	0.87	2.04	2.66	2.80	0.99
2006	2771	0.99	2.52	3.17	3.33	0.98
2007	2616	0.36	2.24	3.02	3.04	0.99
2008	2847	0.48	2.04	2.78	2.83	0.98
2009	3036	0.66	1.80	2.43	2.53	0.99
2010	3490	0.43	1.53	2.11	2.15	0.99
2011	3098	0.41	1.84	2.67	2.70	0.99
2012	3014	0.24	1.56	2.15	2.16	0.99
2013	2969	0.30	1.72	2.42	2.44	0.99
2014	2998	0.57	1.87	2.52	2.59	0.98
2015	2870	0.37	1.96	2.70	2.73	0.98

的融合产品无论在 *Bias*、*Std*、*RMSE* 以及置信区间范围上，都要优于 2003–2010 年的融合产品，AMSR-2 和 HY-2A 微波辐射计数据的联合使用对于替代 AMSR-E 数据具有积极意义。

表 5 详细给出了两种利用不同数据源生成的水汽含量融合产品 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的逐月差值统计信息，*A* 代表 2003–2010 年区间平均，*B* 代表 2012–2014 年区间平均，(*A*–*B*) 代表区间平均的逐月差值。可知 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的逐月差值总体上偏向于正值，这与表 4 的年均统计信息具有一致性，反映了 AMSR2 和 HY-2A 微波辐射计数据的联合使用不仅会提高年均尺度上融合产品的精度，在逐月尺度上同样会提高融合产品的精度。

4 结论

水汽是全球能量收支和水循环研究中的重要参量，影响海洋辐射、潜热和全球水循环。分析和理解水汽的时空变化规律，对全球气候变化具有重要意义。本研究利用国际在轨 SSMIS、WindSat、AMSR-E、ASMR2 和国产 HY-2A 微波辐射计多源遥感水汽含量观测数据，基于最优插值算法，发展水汽含量多源遥感融合技术，生成了 2003–2015 年全球海洋每日 0.25° 分辨率大气柱水汽含量自主多源遥感融合产品。为了研究国产 HY-2A 微波辐射计水汽含量数据对融合结果的影响，同时生成了 2012–2015 年未使用 HY-2A 数据的全球海洋

表 5 不同数据源融合产品 *Bias*、*Std* 和 *RMSE* 的差值逐月演变

参数		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
<i>Bias</i>	<i>A</i>	0.26	0.36	0.30	0.52	0.58	1.03	0.97	0.95	0.95	0.57	0.45	0.32
	<i>B</i>	0.00	0.06	0.26	0.28	0.47	0.59	0.73	1.09	0.21	0.45	0.16	0.12
	<i>A-B</i>	0.26	0.29	0.04	0.24	0.12	0.44	0.24	-0.15	0.74	0.12	0.29	0.19
<i>Std</i>	<i>A</i>	2.09	2.17	2.24	2.54	2.62	2.92	3.14	3.18	3.40	2.68	2.31	2.13
	<i>B</i>	1.80	2.09	2.07	2.28	2.40	2.48	2.87	3.03	2.67	2.34	2.34	2.17
	<i>A-B</i>	0.29	0.08	0.17	0.26	0.22	0.44	0.27	0.16	0.73	0.34	-0.03	-0.04
<i>RMSE</i>	<i>A</i>	2.14	2.21	2.29	2.64	2.69	3.11	3.32	3.37	3.56	2.77	2.36	2.19
	<i>B</i>	1.84	2.13	2.09	2.32	2.44	2.58	2.99	3.25	2.73	2.38	2.34	2.18
	<i>A-B</i>	0.30	0.08	0.20	0.32	0.25	0.53	0.32	0.12	0.83	0.39	0.02	0.01

每日 0.25° 遥感融合产品, 利用无线电探空仪水汽含量观测数据, 对生产的全部全球海洋大气柱水汽含量融合产品进行精度检验, 得出以下结论:

(1) 2003—2015 年, 全球海洋大气柱水汽含量融合产品与探空水汽数据相比, 大气柱水汽含量融合结果的 *RMSE* 和 *Std* 总体上小于 3 mm, *Bias* 具有一定的正偏差, 总体小于 0.6 mm, *MAD* 总体小于 2 mm, *R* 大于 0.98。遥感水汽含量与探空数据的绝对误差呈正态分布, 略偏向于正值, 两种水汽含量数据的相关性较好。

(2) 使用和未使用 HY-2A 微波辐射计数据的两种全球海洋大气柱水汽含量融合产品的一致性较好; 使用 HY-2A 微波辐射计数据, 会使全球海洋大气柱水汽含量融合产品的精度出现一定程度的下降, 但是下降程度极小, *MAD* 和 *Std* 约增大 0.02 mm, *RMSE* 约增大 0.01 mm, *RMSE* 相对误差不足 1%。

(3) 研究了 AMSR-E 停止数据服务后, AMSR2 和 HY-2A 微波辐射计数据替代 AMSR-E 的可能性。结果发现, 联合使用 AMSR2 和 HY-2A 微波辐射计数据开展水汽融合, 所获融合产品的精度在 *Bias*、*Std*、*RMSE* 以及置信区间范围都要优于使用 AMSR-E 数据的水汽融合产品, AMSR-2 和 HY-2A 微波辐射计数据的联合使用对于替代 AMSR-E 数据具有积极意义。

致谢: 感谢遥感系统 (Remote Sensing System, RSS) 为本研究提供的 SSMIS、WindSat、AMSR-E、AMSR2 等微波辐射计数据, NSOAS 提供的 HY-2A

L2 级微波辐射计数据以及 NCDC 提供的无线电探空仪数据。

参 考 文 献

- [1] SHERWOOD S C, ROCA R, WECKWERTH T M, et al. Tropospheric water vapor, convection, and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(2): 2500–2522.
- [2] LIU Z, LI M, ZHONG W, et al. An approach to evaluate the absolute accuracy of WVR water vapor measurements inferred from multiple water vapor techniques[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72(12): 86–94.
- [3] HELD I M, SODEN B J. Water vapor feedback and global warming[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(1): 441–475.
- [4] SODEN B J, WETHERALD R T, STENCHIKOV G L, et al. Global cooling after the eruption of Mount Pinatubo: A test of climate feedback by water vapor[J]. *science*, 2002, 296(5568): 727–730.
- [5] MILOSHEVICH L M, VÖMEL H, WHITEMAN D N, et al. Absolute accuracy of water vapor measurements from six operational radiosonde types launched during AWEX - G and implications for AIRS validation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(D9): 1155–1164.
- [6] 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.
- [7] LIU Z, WONG M S, NICHOL J, et al. A multi-sensor study of water vapor from radiosonde, MODIS and AERONET: a case study of Hong Kong[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(1): 109–120.
- [8] HØYER J L, KARAGALI I, DYBKJAER G, et al. Multi sensor validation and error characteristics of Arctic satellite sea surface temperature observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 335–346.
- [9] 王雷, 金炜, 何艳. 采用冗余字典稀疏表达的红外与水汽云图

- 融合[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014(3):32-36.
- [10] 刘凯, 寇正. 气象卫星红外云图与水汽图的融合技术研究[J]. 红外, 2013, 34(5):8-15.
- [11] WANG J R, MANNING W. Near concurrent MIR, SSM/T-2, and SSM/I observations over snow-covered surfaces[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 457-470.
- [12] HIROSHIMA K. Rainfall observation from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite[J]. Journal of Visualization, 1999, 2(1): 93-98.
- [13] 王可光, 张建华, 王彩欣. 西北太平洋常规 SST 资料的客观分析方法研究(I. 旬平均船舶报资料分析)[J]. 海洋预报, 2000, 17(4):52-59.
- [14] REYNOLDS R W, MARSICO D C. An improved real-time global sea surface temperature analysis.[J]. Journal of Climate, 1993, 6(1): 114-119.
- [15] WU X, MENZEL W P, WADE G S. Estimation of sea surface temperatures using GOES-8/9 radiance measurements. [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 80(6): 1127-1138.
- [16] GUAN L, KAWAMURA H. Merging satellite infrared and microwave SSTs: methodology and evaluation of the new SST[J]. Journal of Oceanography, 2004, 60(5): 905-912.
- [17] REYNOLDS R W, RAYNER N A, SMITH T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. Journal of Climate, 2002, 15(13): 1609-1625.
- [18] REYNOLDS R W, SMITH T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation[J]. Journal of Climate, 1994, 7(6): 929-948.
- [19] SUN W, WANG J, LI Y, et al. New gridded product for the total columnar atmospheric water vapor over ocean surface constructed from microwave radiometer satellite data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2402.
- [20] 奚萌. 基于最优插值算法的红外和微波遥感海表温度数据融合[D]. 北京: 国家海洋环境预报研究中心, 2011.
- [21] ZABOLOTSKIKH E, MITNIK L, REUL N, et al. New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1 AMSR2 [C]// Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. IEEE, 2014: 161-166.
- [22] JIANG X, LIN M, LIU J, et al. The HY-2 satellite and its preliminary assessment[J]. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(3): 266-281.
- [23] MARTIN M, DASH P, IGNATOV A, et al. Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part I: A GHRSSST multi-product ensemble (GMPE)[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2012, 77: 21-30.
- [24] KAKO S, ISOBE A, KUBOTA M. High-resolution ASCAT wind vector data set gridded by applying an optimum interpolation method to the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(D23): 23107.

(本文编辑:王少朋)