

文章编号: 2096-1618(2022)04-0449-07

基于 TC 方法青藏高原卫星与 ERA5 水汽误差分析及融合

何科¹, 白爱娟¹, 胡秀清²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:为分析中国的静止卫星 FY-4A 搭载的多通道光谱成像仪 (AGRI)、国外的极轨卫星 Terra 搭载的中分辨率光谱成像仪 (MODIS) 和 ERA5 再分析数据的水汽产品在青藏高原地区的差异, 采用 Triple-Collocation 方法, 在该地区 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空间尺度上对 AGRI、MODIS 和 ERA5 来源的大气可降水量产品进行随机误差分析, 并开展基于随机误差融合算法的研究。结果表明: 不同来源的大气可降水量产品的随机误差存在空间上的差异, 随机误差从小到大依次为 ERA5、AGRI 和 MODIS。根据该随机误差, 计算 3 种产品的融合权重系数, 随机误差越大则融合权重系数越小, 反之越大。基于该融合系数进行数据融合, 得到的融合产品在空间完整性上较卫星数据有较大改善, 并且对于 MODIS 的大气可降水量产品在青藏高原地区的应用有了较大的改善。

关键词: 卫星遥感; 大气可降水量产品; TC 方法; 误差分析; 产品融合

中图分类号: P405

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.014

0 引言

水汽是大气成云的必要条件, 是地球水循环过程的重要环节, 也是大气中最重要的温室气体^[1]。地球上水汽只占水资源的 0.001%, 约占大气成分 2%, 但由于水汽凝结和冻结的相态转换, 吸收和释放潜热, 使其成为大气最重要的能源之一^[2], 从而改变大气的热分布, 影响大气环流^[3]。因此, 对水汽的监测研究有重要价值和意义。大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 指单位面积垂直方向上空气柱内的水汽总量全部转化为降水的量^[4]。通过对其探测能够提高降雨的可预测性和对气候相关过程的理解、反馈^[5]。PWV 与降水、极端天气 (雷暴、台风等)、全球气候变化密切相关, 是用来分析大气中水汽含量的重要物理量^[6]。无线电探空仪是 PWV 的主要测量仪器, 它的精度最高, 不确定度也只有几毫米^[7]。然而, 无线电探空仪的使用昂贵、耗时, 且受天气条件的限制 (如传感器在寒冷干燥条件下性能差)。1992 年 Bevis 等^[8]首次提出 GPS 水汽探测方法, 即在已知地面位置和气压等信息时, 利用大气延迟反向推导获取 PWV^[9]。该方法提高了 PWV 探测的时空分辨率, 且探测精度也有提高^[10-13]。自 1995 年以来 GNSS/MET 反演技术不断发展, 各国相继建立地基 GNSS 站网, GNSS/MET 观测资料的实际应用也随之发展^[14-15], 主要包括天气分析、数值天气预报、卫星和探空等资料检验以及气候变化研究中的应用^[16-17]。卫星遥感方面的进展为在全球范围反演 PWV 提供了一种有效可靠的方法。PWV 反演可以用微波^[18]、近红外^[19]、热红外^[20]得到。在各

种卫星 PWV 产品中, 中分辨率成像光谱仪 (Terra/MODIS) 可降水产品是利用近红外多通道比值法对 PWV 进行反演^[21]。PWV 估计可用于近红外反射表面的区域, 如透明陆地区域、云层和有太阳闪烁的海洋区域^[22]。然而, 近红外通道无法穿透云层对云层以下的水汽进行探测, 导致在多云条件下有很大的不确定性和噪声估计^[23]。目前大多数研究仅使用有限的、不连续的, 而没有进行大规模或长期分析, 在很大程度上限制了高分辨率卫星 PWV 反演的应用^[24]。另一种估计大规模 PWV 的方法是基于全球再分析数据。欧洲中期预测中心 (ECMWF) 最新公布的 ERA5 再分析数据集, 其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 h^[25]。此外, 据报道, ERA5 数据集是对流层特征有很大改善, 对全球降水和蒸发的平衡也有很大改善, 因而有望提高全球 PWV 估算的准确性。

为最大限度发挥不同数据源的优势, 数据融合是一种有效的方法。各种数据融合方法已被开发应用于水和能源的研究^[26-27]。特别是 Zhu 等^[28]提出了增强的时空自适应反射融合模型 (ESTARFM), 在不同数据源估计的基础上提高精度和时空连续性。考虑到目标与相似像元 (或网格单元) 之间的地理距离、光谱相似性和时间相关性, 该方法既适用于同质下表皮, 也适用于异构下表皮。以上数据融合均考虑到数据产品的不确定性, 1998 年, Stoffelend 等^[29]提出了可以回避求取“真值”的数据质量评价方法, 即 Triple-Collocation (TC) 方法。该方法可以客观地估计 3 种并列数据集的随机误差, 并适用于区域及全球尺度。TC 方法已在海洋^[29-30]及水文气象^[31-32]研究领域有广泛应用。Scipal 等^[33]首次在土壤水分遥感产品精度评价中引入 TC 方法, 并修正数据系统性偏差对估计结果的影响,

使其在土壤水分数据集的不确定性研究中得以应用。Zwieback 等^[34]和 Gruber 等^[35]将 TC 方法应用到任意多个数据集的评价,同时考虑了误差间的相关性对误差估计的影响。除了对数据进行分析 and 评价以外,TC 方法的发展也为多源数据集的融合提供更可靠的理论依据。Yilmaz 等^[36]对 TC 方法在数据融合中的应用进行了初步探讨,通过 TC 方法估算的产品随机误差对土壤水分的模型产品和遥感产品进行融合。

以上表明 TC 方法在多源数据误差分析上得到较好的应用,但是 PWV 在青藏高原地区的应用较少。因此本文使用该方法对青藏高原地区的 AGRI、MODIS 和 ERA5 3 种 PWV 进行随机误差分析和数据产品融合。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

选择青藏高原主体部分作为研究区域,空间范围为 73°E~105°E 和 26°N~40°N,位于中国西南地区(图 1),该区域年平均降水 400~500 mm,5~9 月为青藏高原季风最旺盛的季节,对中国气候变化和降水的形成和发展有着极为重要的影响作用^[37]。研究区作为江河的发源地,PWV 的分布和变化与西南地区的水资源密切相关。

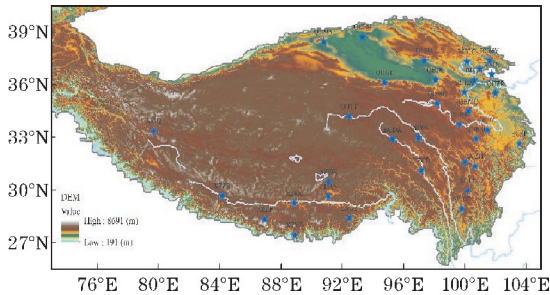


图 1 研究区域以及地基 GPS 气象站的空间分布

1.2 数据及预处理

选用 2019 年 5 月 1 日~7 月 31 日的 FY-4A/AGRI、Terra/MODIS 和 ERA5 3 种 PWV 的随机误差进行分析及融合实验,并选择 2020 年 5 月 1 日~7 月 31 日的该 3 种产品数据对融合方法进行评价。

MODIS 的 PWV 数据由 NASA 提供,其中 MOD05 数据集为水汽产品,是利用 MODIS 近红外(NIR)观测到的晴空条件下云层以上的水汽。并利用水汽吸收通

道与大气窗区通道的比值来量化总水汽的透过率,从理论上计算 PWV。由于该方法依赖近红外观测,只能在白天对反射面进行推导,因此该数据只有陆地的白天数据。MODIS 的 PWV 的空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 d。为研究整个空气柱的水汽含量,对该数据产品需要进行剔除云的处理,确保数据是在晴空条件下观测的,因此这里还需用到 MOD03 中的云掩膜产品。该产品与 MOD05 中 PWV 的时间和空间分辨率一样,在完全晴空条件下进行 MOD05 的 PWV 实验。AGRI 是搭载于 FY-4A 卫星上的多通道扫描辐射计,该仪器共计 14 个通道,反演水汽所利用的通道为热红外通道。AGRI 水汽产品的数据包括低层、中层、高层和总水汽含量,其中总水汽含量与大气可降水量定义相同,因此这里选择总水汽含量(TPW)进行研究。空间分辨率为 4 km,一天可获取 32 个时次的产品数据,基本包含每个小时内的数据。ERA5 的 PWV 数据来自 ECMWF 第五代再分析数据,其空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 1 h。

此外,还选择了青藏高原地区 35 个地面 GPS 气象监测站 2019 年 5 月 1 日~7 月 31 日的 PWV 数据,当来自 GPS 卫星的信号穿过大气层到达地面接收器时,会受到弯曲和延迟的影响。这种误差的产生部分原因是因为电离层,因为电离层的延迟取决于信号的频率,而电离层的延迟可以通过双频 GPS 接收器的观测来测量^[38]。另一方面,大气中性部分,特别是对流层引起的延迟与频率无关,不能忽略。信号路径的全天顶对流层延迟(ZTD)包含了许多气象应用中需要考虑的有价值的信息。ZTD 分为干分量或天顶静水延迟(ZHD)和天顶湿延迟(ZWD)两部分,后者与大气水汽有关^[39-40]。选择 GPS 地基观测的 PWV 作为参考值,用于 TC 方法分析卫星与 ERA5 的 PWV 的随机误差。GPS 的 PWV 时间分辨率为 1 h。

由于不同数据来源的时间分辨率和空间分辨率存在差异,为了能更好地比较分析,将卫星数据进行空间重采样,获得 0.25°×0.25°空间分辨率的卫星数据。为了比较卫星和 ERA5 数据,选择 Terra/MODIS 每天过境时间段平均进行数据匹配。Terra/MODIS 每天过境时间段对应时间分辨率为小时级的 GPS、ERA5 和 AGRI 反演得到的 PWV 产品的比较结果见表 1。在 Terra 日过境时间段平均相对整日平均偏小,且存在一定的均方根误差,因此选用 Terra 过境时间段的小时级进行日平均是有必要的。

表 1 2019 年 5 月 1 日~7 月 31 日 PWV 产品的日平均、Terra 日过境时间段平均、相关系数、平均偏差、均方根误差对比

来源	日平均/mm	Terra 日过境时段平均/mm	相关系数	平均偏差/mm	均方根误差/mm
GPS	11.57	11.00	0.96	-0.57	1.55
ERA5	9.53	9.05	0.98	-0.47	1.09
AGRI	9.33	9.06	0.94	-0.27	1.51

2 方法

2.1 Triple-Collocation 方法

在 TC 方法分析过程中,可以对 3 个及以上独立观测的数据集的随机误差进行分析评估,当 3 个数据集的误差互不相关,每个独立的数据集可以表示为

$$V_i = V + \varepsilon_i \quad i \in \{1, 2, 3\}$$
 (1)

其中, V 表示被测量物理量对应的真值, V_i 和 ε_i 分别表示第 i 个观测系统得到的数据集和对应的随机误差。在观测过程中每一个数据集可能与真值存在一定的系统误差,假设观测值和真值之间存在线性关系,因此式(1)变换为

$$V_i = \alpha_i V + \beta_i + \varepsilon_i$$
 (2)

其中 α_i 和 β_i 为第 i 个观测系统数据集与真值之间的回归系数。

输入 3 个数据集,两两之间的协方差为

$$C_{i,j} = \text{Cov}(V_i, V_j) = \alpha_i \alpha_j \sigma_V^2 + \alpha_i \text{Cov}(\varepsilon_i, t) + \alpha_j \text{Cov}(\varepsilon_j, t) + \text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$$
 (3)

其中 $\sigma_V^2 = \text{Cov}(V, V)$ 表示真值的方差。使用 TC 方法需满足 3 个假设条件:输入数据集的随机误差的数学期望为 0,即 $E(\varepsilon_i) = 0$;输入数据集的随机误差与真值之间协方差为 0,即 $\text{Cov}(\varepsilon_i, t) = 0$;输入数据集的随机误差之间互不相关,即 $\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, (i \neq j)$ 。基于以上假设,式(3)可简化为

$$C_{i,j} = \begin{cases} \alpha_i \alpha_j \sigma_V^2 & i \neq j \\ \alpha_i^2 \sigma_V^2 + \sigma_{\varepsilon_i}^2 & i = j \end{cases}$$
 (4)

由式(4),不同系统的随机误差 ε_i 为

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sqrt{C_{1,1} - C_{1,2} C_{1,3} / C_{2,3}} & i = 1 \\ \sqrt{C_{2,2} - C_{1,2} C_{2,3} / C_{1,3}} & i = 2 \\ \sqrt{C_{3,3} - C_{1,3} C_{2,3} / C_{1,2}} & i = 3 \end{cases}$$
 (5)

2.2 融合方法

基于 TC 方法评估分析得到来自不同产品不确定性的基础上,使用最小二乘法估计得到输入产品的融合权重系数。融合的基本方程如下:

$$V_m = w_1 V_1 + w_2 V_2 + w_3 V_3$$
 (6)

其中, V_m 为融合后的数据集; w_i 为来自不同观测系统融合的权重系数。通过调整 w_i 的值使融合后的 V_m 的方差最小,假设 3 个观测系统之间互不相关, V_m 的方差可表示为

$$\sigma_m^2 = w_1^2 \sigma_1^2 + w_2^2 \sigma_2^2 + w_3^2 \sigma_3^2$$
 (7)

其中, σ_m^2 为融合后数据集 V_m 的方差, $\sigma_i^2 (i \in 1, 2, 3)$ 表示输入数据引入的方差。根据 σ_m^2 最小,可以得到:

$$\frac{\partial(\sigma_m^2)}{\partial w_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3$$
 (8)

因此权重系数可简写为

$$w_1 = \frac{\sigma_2^2 \sigma_3^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2}$$
 (9)

$$w_2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_3^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2}$$
 (10)

$$w_3 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2}$$
 (11)

然后根据式(5)求解的随机误差可求解权重系数,最终得到融合产品。

3 结果分析与讨论

3.1 随机误差分析

根据式(2)每个数据集与真值之间存在一定的系统误差,采用 TC 方法对青藏高原地区 PWV 的误差进行分析。青藏高原地区 35 个地基 GPS 站(图 1)的 PWV 与所选的 3 个数据集之间的回归系数及相关统计结果如表 2 所示。根据表 2, ERA5、MODIS 和 AGRI 与 GPS 的 PWV 之间的相关系数中,最大的为 ERA5 的 0.879。其次为 MODIS 的 0.822,相关性最小的为 AGRI 的 0.817。根据 3 个数据集的回归系数得出 ERA5 和 AGRI 与 GPS 的 PWV 相比存在偏小的估计。而 MODIS 与 GPS 的 PWV 相比存在偏大估计。

表 2 2019 年 5 月 1 日-7 月 31 日青藏高原地区 35 个站点 3 个数据集与 GPS 站的 PWV 线性回归统计结果

数据集	数据匹配对数	相关系数	比例系数	偏差
ERA5	1415	0.879	1.07	1.28
MODIS	1415	0.822	0.77	1.71
AGRI	1415	0.817	1.00	1.97

将 2019 年 5 月 1 日-7 月 31 日每日青藏高原地区空间分辨率为 0.25°×0.25°像元的 ERA5、MODIS 和 AGRI 的 PWV 进行有效数据匹配,得到三匹配数据对如图 2 所示。MODIS 近红外无法对有云地区进行反演,在青藏高原地区晴空概率较低的东南侧有效数据对较少,在西部地区晴空概率较大,有效数据对较多。

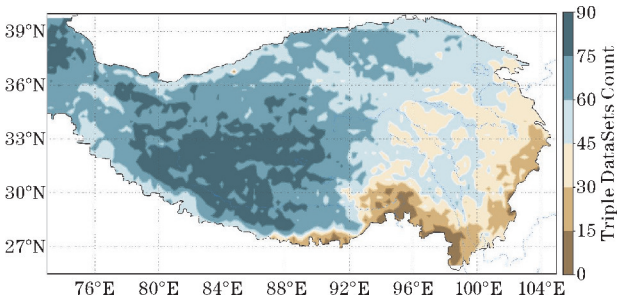


图 2 2019 年 5 月 1 日-7 月 31 日青藏高原地区 0.25 像元三匹配有效数据数量

在得到每个像元的三匹配数据集后,基于 TC 方法对每个像元进行评估分析得到 3 个数据集的随机误差分布如图 3 所示。图 3(a) 显示 ERA5 的 PWV 随机误差 $\varepsilon_{\text{ERA5}}$ 在青藏高原地区大部分地区 1 mm 以内,并且 $\varepsilon_{\text{ERA5}}$ 随空间分布的差异较小。图 3(b) 为 MODIS 的 PWV 基于 TC 方法分析得到随机误差 $\varepsilon_{\text{MODIS}}$,其空间分布特征表明 MODIS 的 PWV 随空间分布随机误差变化较大,空间上的稳定性较低。图 3(c) 表示 AGRI 的 PWV 随机误差 $\varepsilon_{\text{AGRI}}$,其空间变化范围变化在 0.1 ~ 3.5 mm,东南地区较大,西南地区较小。

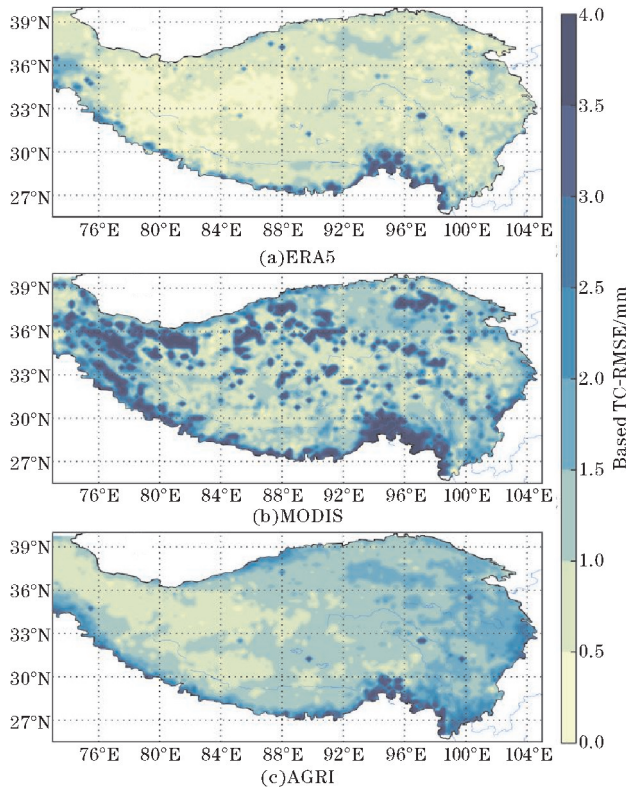


图 3 2019 年 5 月 1 日~7 月 31 日基于 TC 分析 ERA5、MODIS 和 AGRI 的 PWV 数据集随机误差空间分布

为了比较三者数据的随机误差的整体情况,统计青藏高原地区 ERA5、MODIS 和 AGRI 的随机误差的中位数、95 百分位数和平均数,如表 3 所示。根据表 3, MODIS 的随机误差较大,平均值为 2.578 mm,其次为 AGRI 平均值为 2.045 mm,随机误差最小的为 ERA5,平均值为 1.311 mm。无论是中位数还是平均数都能够反应出青藏高原地区不同数据集的随机误差整体情况,不同产品的随机误差也反应数据集的不确定性。数据不确定性最小的为 ERA5,其次为 AGRI,不确定性最大的为 MODIS。

表 3 青藏高原地区不同数据集的随机误差的中位数、95 百分位数和平均值

数据集	中位数	95 百分位数	平均值
ERA5	0.910	3.455	1.311
MODIS	1.668	7.850	2.578
AGRI	1.531	4.781	2.045

单位:mm

3.2 融合权重确定

在融合过程中,融合权重值的确定是必然的。建立不同 PWV 以及权重值的线性关系进行融合。将得到的青藏高原地区 ERA5、MODIS 和 AGRI 3 个 PWV 数据集的随机误差代入式(9)~(11),可以得到 3 个数据集在融合过程中的不同像元的融合权重系数,分布如图 4 所示。图 4 显示融合权重与基于 TC 方法分析得到的随机误差相关,随机误差越大的地方融合权重占比越大,反之随机误差越小的地方融合权重占比越小。图 4(a) 为 ERA5 的融合权重分布,其平均值为 0.560,图 4(b) 为 MODIS 的融合权重分布,其平均值为 0.224,图 4(c) 为 AGRI 的融合权重分布,其平均值为 0.216。ERA5 的随机误差较小,其融合权重较大,MODIS 和 AGRI 的随机误差相当,其融合权重的平均值差异不大。使用 TC 方法分析得到的随机误差再分配权重系数可以有效地控制融合数据的随机误差,提高数据的质量。

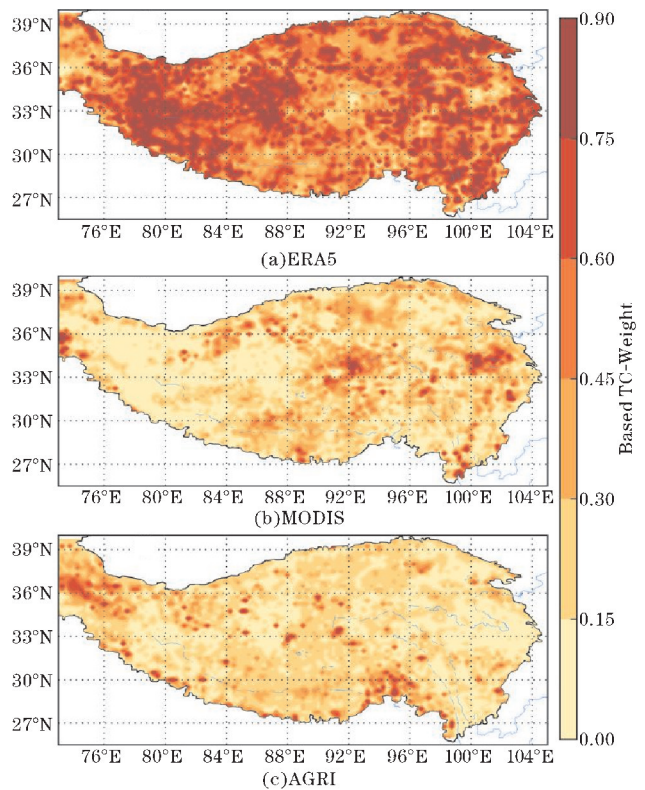


图 4 2019 年 5 月 1 日~7 月 31 日基于 TC 分析 ERA5、MODIS 和 AGRI 的 PWV 数据集融合权重空间分布

3.3 数据融合与验证

得到不同产品的融合权重后,就对青藏高原地区空间分辨率为 0.25°×0.25°的数据进行融合。图 5 为 2019 年 6 月 21 日的各 PWV 的分布,根据其分布特征,ERA5 的 PWV(图 5a)数据完整性最好,MODIS 的

PWV(图 5b)和 AGRI 的 PWV(图 5c)的数据受云层的影响,完整性相对较低。因此在融合过程中并不是每个像元都有 3 个数据存在,图 5(d)为 1 个或 2 个数据集融合区域,图 5(e)为具有 3 个数据集的融合像元所融合得到的产品,最后将具有 1 个或 2 个融合区域数据和具有三匹配融合区域的数据进行合并,最终得到一个较为完整的融合产品,如图 5(f)所示。图 5(f)中的数据集合了本文所选的 3 个数据集的信息,因此,

得到最终的融合产品相对于 MODIS 和 AGRI 具有更好的时间和空间完整性,可以弥补 MODIS 近红外通道以及 AGRI 热红外通道在有云层时无法探测的问题。目前将多源卫星遥感产品进行融合以及结合不同遥感产品的优势已成为一种将气候数据集多源整合的手段。不仅可以改善单个数据集产品的缺失问题,还可以改善数据的随机误差。

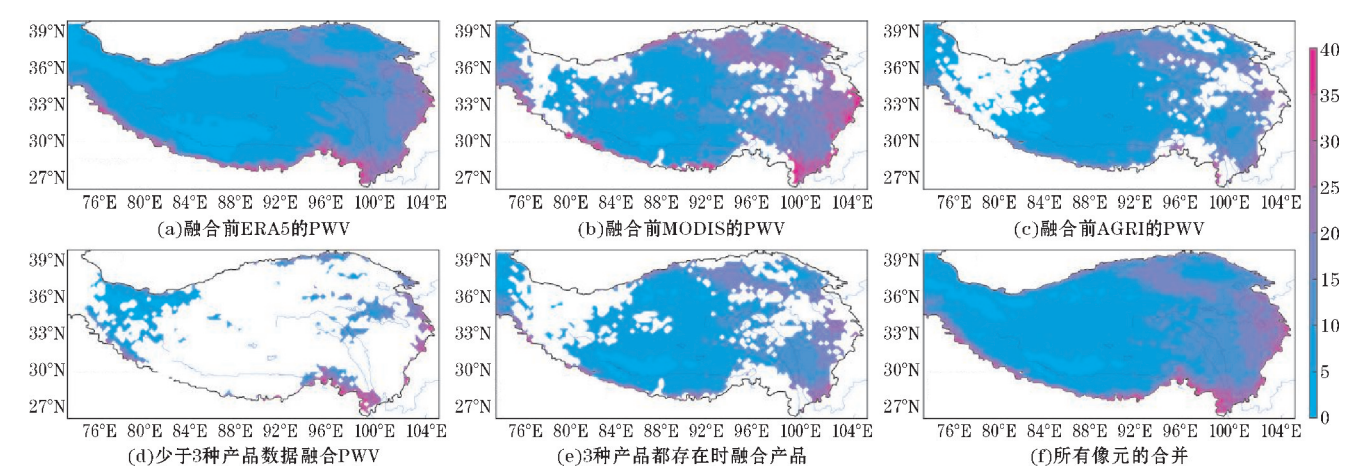


图 5 青藏高原地区 2019 年 6 月 21 日各 PWV 空间分布

为了对融合后的产品进行评估和分析,利用 2020 年对应时间段和数据产品进行融合和检验。同样选择高原地区 35 各站点的地基 GPS 站的 PWV 与融合产品进行比较(图 6)。根据图 6(a)不同产品的平均偏差可以看出,融合后的 PWV 平均偏差较 MODIS 的 PWV 明显减小,融合的 PWV 平均偏差与 ERA5、AGRI 的 PWV 相当。图 6(b)是不同产品相对地基 GPS 的 PWV 均方根误差,由图 6(b)可以分析得到,融合产品的均方根误差相对 MODIS 在较大的 PWV 站点有所改进,但在均方根误差较小的地方改进效果不明显。

4 结论

采用 TC 方法,对 Terra 和 FY-4A 卫星分别搭载的 MODIS 和 AGRI 遥感仪器在青藏高原地区测量的大气可降水量以及 ERA5 再分析的大气可降水量 3 种数据产品进行随机误差分析及融合实验。得到以下结论:

(1)由不同产品的随机误差分析结果表明,在青藏高原地区 ERA5 产品的随机误差最小,其空间变化也较小,随机误差为 1.311 mm;其次为 FY-4A/AGRI 产品,随机误差为 2.045 mm;随机误差最大的为 MODIS 产品,为 2.578 mm。

(2)不同来源的产品之间存在不同程度的随机误差,所以在将不同来源的数据进行融合前考虑到随机误差的引入,需要为其分配不同的权重系数。在分析不同产品的随机误差的基础上,计算 3 种产品的融合权重值。融合权重平均值最大的为 ERA5,而 MODIS 和 AGRI 的融合权重差异不大。主要是因为 ERA5 的随机误差最小,因此其不确定性最小,而 MODIS 和 ERA5 的随机误差较大其不确定性较大。

(3)基于 TC 方法将 3 种大气可降水量产品进行融合最终得到融合产品,空间上弥补了 MODIS 和 AGRI 无法探测有云区域的缺陷,使得数据产品较为完整。

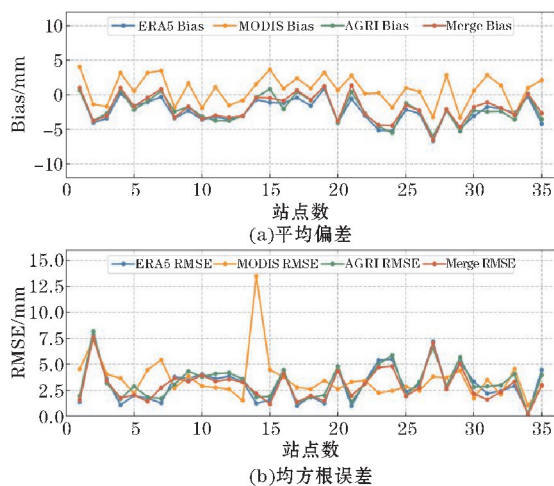


图 6 2020 年 5 月 1 日~7 月 31 日青藏高原地区 35 个站点 PWV 与地基 GPS 的 PWV 的平均偏差和均方根误差

(4)利用地基 GPS 的大气可降水量对不同产品进行评估。融合后的产品平均偏差较小,均方根误差与融合前的产品相比有较大的改善。

参考文献:

- [1] 高凤玲,崔国民,陶乐仁,等. 大气对流层水汽对温室效应的影响分析[J]. 工程热物理学报, 2014(4):722-725.
- [2] Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor[J]. Climate dynamics, 2005, 24(7-8):741-758.
- [3] 陈隆勋,龚知本,陈嘉滨,等. 东亚地区大气辐射能收支(三)——云天大气的地气系统热量收支[J]. 气象学报, 1965(1):8-19.
- [4] 王西地. 基于 GPS 和 MODIS 数据的大气可降水量算法研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [5] Giorgi F. Climate change hot-spots[J]. Geophysical research letters, 2006, 33(8).
- [6] 李星光. 极端天气条件下大气可降水量地基 GPS 反演研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- [7] Niell A E, Coster A J, Solheim F S, et al. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(6):830-850.
- [8] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D14):15787-15801.
- [9] 毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 1993(4):45-49.
- [10] 梁宏,张人禾,刘晶森. 青藏高原大气水汽探测误差及其成因[J]. 气象学报, 2012, 70(1):155-164.
- [11] 曹云昌,陈永奇,李炳华,等. 利用地基 GPS 测量大气水汽廓线的方法[J]. 气象科技, 2006, 34(3):241-245.
- [12] 梁宏,刘晶森,章建成,等. 青藏高原大气总水汽量的反演研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6):1055-1063.
- [13] 梁宏,刘晶森,李世奎. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2006(4):28-36.
- [14] 李国平,黄丁发. GPS 气象学研究及应用的进展与前景[J]. 气象科学, 2005, 25(6):651-661.
- [15] 曹云昌,方宗义,夏青,等. 中国地基 GPS 气象应用站网建设展望[J]. 气象, 2006, 32(11):42-47.
- [16] Liang H, Cao Y, Wan X, et al. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China[J]. Geodesy and geodynamics, 2015, 6(2):135-142.
- [17] 梁宏,张人禾,刘晶森,等. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究[J]. 大气科学, 2012, 36(4):795-810.
- [18] Alishouse J C, Snyder S A, Vongsathorn J, et al. Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5):811-816.
- [19] Frouin R, Deschamps P Y, Lecomte P. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1990, 29(6):448-460.
- [20] Chesters D, Uccellini L W, Robinson W D. Low-level water vapor fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) "split window" channels[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(5):725-743.
- [21] Gao B C, Kaufman Y J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D13).
- [22] King M D, Menzel W P, Kaufman Y J, et al. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2):442-458.
- [23] Chang L, Xiao R, Prasad A A, et al. Cloud mask-related differential linear adjustment model for MODIS infrared water vapor product[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221:650-664.
- [24] Shi F, Xin J, Yang L, et al. The first validation of the precipitable water vapor of multisensor satellites over the typical regions in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206:107-122.
- [25] Albergel C, Dutra E, Munier S, et al. ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations: which one performs better[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(6):3515-3532.
- [26] Afshar M H, Yilmaz M T, Crow W T. Impact of rescaling approaches in simple fusion of soil moisture products[J]. Water Resources Research, 2019, 55(9):7804-7825.
- [27] Li D, Andreadis K M, Margulis S A, et al. A Data

- Assimilation Framework for Generating Space-Time Continuous Daily SWOT River Discharge Data Products [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(6).
- [28] Zhu X, Chen J, Gao F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610–2623.
- [29] Stoffelen A. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation [J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 1998, 103(C4): 7755–7766.
- [30] O'Carroll A G, Eyre J R, Saunders R W. Three-way error analysis between AATSR, AMSR-E, and in situ sea surface temperature observations [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2008, 25(7): 1197–1207.
- [31] Vogelzang J, Stoffelen A, Verhoef A F S. On the quality of high-resolution scatterometer winds [J]. *J Geophys Res Ocean*, 2011, 116(10).
- [32] Roebeling R A, Wolters E L A, Meirink J F, et al. Triple collocation of summer precipitation retrievals from SEVIRI over Europe with gridded rain gauge and weather radar data [J]. *Journal of hydrometeorology*, 2012, 13(5): 1552–1566.
- [33] Scipal K, Holmes T, De Jeu R, et al. A possible solution for the problem of estimating the error structure of global soil moisture data sets [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24).
- [34] Zwieback S, Scipal K, Dorigo W, et al. Structural and statistical properties of the collocation technique for error characterization [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2012, 19(1): 69–80.
- [35] Gruber A, Su C H, Crow W T, et al. Estimating error cross-correlations in soil moisture data sets using extended collocation analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(3): 1208–1219.
- [36] Yilmaz M T, Crow W T, Anderson M C, et al. An objective methodology for merging satellite-and model-based soil moisture products [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(11).
- [37] Long D, Pan Y, Zhou J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 198–216.
- [38] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [J]. *Radio science*, 1985, 20(6): 1593–1607.
- [39] 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.
- [40] Rüeger J M. Refractive index formulae for radio waves [J]. *Integration of techniques and corrections to achieve accurate engineering*, 2002: 19–26.

Analysis and Fusion of Water Vapor Error between Satellite and ERA5 over the Tibetan Plateau based on TC Method

HE Ke¹, BAI Aijuan¹, HU Xiuqing²

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to analyze the Advanced Geostationary Radiation Imager (AGRI) carried by the Chinese geostationary satellite FY-4A, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) carried by the foreign polar-orbiting satellite Terra, and the water vapor products of the ERA5 reanalyzed data, the water vapor products in the Qinghai-Tibet Plateau difference, the Triple-Collocation method is used to analyze the random error of the precipitable water vapor products from AGRI, MODIS and ERA5 on the spatial scale of the region, and to carry out the research based on the random error fusion algorithm. The results show that there are spatial differences in the random errors of the precipitable water vapor products from different sources, and the random errors are ERA5, AGRI and MODIS in descending order. According to the random error, the fusion weight coefficient of the three products is calculated. The larger the random error, the smaller the fusion weight coefficient, and vice versa. Based on the fusion coefficient for data fusion, the spatial integrity of the obtained fusion product has been greatly improved compared with the satellite data, and the precipitable water vapor product of MODIS has been greatly improved in the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: satellite remote sensing; precipitable water vapor product; TC; error analysis; product fusion