

沈艳,潘阳,宇婧婧,等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 36(1): 37-46.

Shen Yan, Pan Yang, Yu Jing-jing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China[J]. Trans Atmos Sci, 36(1): 37-46. (in Chinese)

## 中国区域小时降水量融合产品的质量评估

沈艳,潘阳,宇婧婧,赵平,周自江

(中国气象局 国家气象信息中心,北京 100081)

**摘要:**基于全国自动站观测降水量和 CMORPH(CPC MORPHing technique) 卫星反演降水资料,采用 PDF(probability density function) 和 OI(optimal interpolation) 两步融合方法生成了中国区域 1 h、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  分辨率的降水量融合产品。本文分别从产品误差的时空分布特征、不同降水量级和不同累积时间下的产品质量、三种站网密度下的融合效果以及对强降水过程监测能力等方面对比评估了融合降水产品质量。结果表明,融合降水产品有效利用了地面观测和卫星反演降水各自的优势,在降水量值和空间分布上均更为合理;融合产品平均偏差和均方根误差均减小,随时间的变化幅度不大且区域性分布特征减弱;融合产品与融合前的卫星反演降水产品相比在中雨(1.0~2.5 mm/h)、中到大雨(1.0~8.0 mm/h)、暴雨及以上( $\geq 8.0$  mm/h)的相对误差分别为 -1.675%、小于 15.0%、30.0% 左右,且随着累积时间的增加,产品质量进一步提高;该产品能准确抓住强降水过程,在定量监测强降水中具有优势。

**关键词:**降水量;融合降水产品;自动气象站;卫星反演降水产品

中图分类号:P426 文献标志码:A 文章编号:1674-7097(2013)01-0037-10

## Quality assessment of hourly merged precipitation product over China

SHEN Yan, PAN Yang, YU Jing-jing, ZHAO Ping, ZHOU Zi-jiang

(National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the hourly precipitation observed by automatic weather stations (AWS) in China and retrieved from CMORPH(CPC MORPHing technique) satellite data, the merged precipitation product at hourly/ $0.1^\circ \text{lat}/0.1^\circ \text{lon}$  temporal-spatial resolution in China is developed through the two-step merging algorithm of PDF(probability density function) and OI(optimal interpolation). In this paper, the quality of merged precipitation product is assessed from the points of temporal-spatial characteristics of error, accuracy at different precipitation rates and cumulative times, merging effect at three station network densities and monitoring capability of the heavy rainfall. Results indicate that: 1) The merged precipitation product effectively uses the advantages of AWS observations and satellite product of CMORPH, so it is more reasonable both at the precipitation amount and spatial distribution; 2) The regional mean bias and root-mean-square error of the merged precipitation product are decreased remarkably, and they have a little change with time; 3) The relative bias of merged precipitation product is -1.675%, less than 15% and about 30% for the medium (1.0—2.5 mm/h), medium to large (1.0—8.0 mm/h) and heavy rainfall ( $\geq 8.0$  mm/h), respectively, and the product quality is improved further

收稿日期:2011-09-13; 改回日期:2011-11-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951602);公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201006042);国家科技支撑计划项目(2012BAC22B04)

作者简介:沈艳(1977—),女,山西忻州人,博士,高级工程师,研究方向为气象数据产品研发,sheny@cma.gov.cn.

with the cumulative time increases. The merged precipitation product can capture the precipitation process very well and have a definite advantage in the quantitatively rainfall monitoring.

**Key words:** precipitation; merged precipitation product; automatic meteorological stations; satellite-based precipitation

## 0 引言

降水量是气象要素中最为重要的因子之一,其时空分布是气象、气候、水文、生态以及经济、农业和其他相关学科研究的基础和必要支撑。地面站点观测是降水数据最直接的数据源,能够最准确表示“观测点”上降水量,但受自然环境和人为因素等影响,地面站点观测无法覆盖到大面积海洋、无人区以及地形相对复杂的区域,从而限制了站点观测数据的使用。与之相比,卫星反演降水产品具有全天候、全球覆盖以及准确反映降水“空间分布”的独特优势(Barrett and Martin, 1981),但其本质是间接观测手段,必须用地面资料订正来提高产品质量(Ebert et al., 2007)。因此近年来将地面观测降水量与卫星反演降水产品融合逐渐成为了国际社会在高质量降水产品研制中的主流趋势。全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)的目的之一就是要充分利用各种数据优点,开发高质量的降水量融合产品(Arkin and Xie, 1994)。自1997年起相继开展了一系列卫星资料与雨量观测数据的融合研究:GPCP数据集在对卫星红外和微波资料误差订正的基础上,以各类数据误差方差反比作为权重进行最大似然合成得到融合产品,产品时间分辨率为日和月,空间分辨率是 $2.5^\circ$ 或 $1^\circ$ (Huffman et al., 1997, 2001; Adler et al., 2003)。CMAP(Center Merged Analysis of Precipitation)数据集(Xie and Arkin, 1997; Xie et al., 2003)采用Reynolds融合算法:用卫星资料描述融合场分布型,雨量资料描述融合场降水量(Reynolds, 1988),得到了更可靠的全球月和候、 $2.5^\circ$ 分辨率的降水产品。TRMM-3B42产品(Kummerow et al., 1998; Huffman, et al., 2004, 2007)利用GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)月降水量(Schneider et al., 1993)订正3 h卫星产品,质量评估表明:尽管利用地面资料订正后的TRMM-3B42产品质量在中国区域得到提高(Shen et al., 2010),但由于GPCC资料(月值)与卫星产品(3 h值)的时间尺度不一致,因此在刻画3 h降水分布时存在偏差。另外,这些融合数据集的时间分辨率较粗,无法监测极端、短

时强降水过程。在中国区域的共同问题是:只利用了我国参加国际交换的台站观测资料,因此产品质量改进幅度大。另一方面,GPCP、CMAP等数据集在融合过程中均没有剔除卫星数据的系统误差(Gebremichael et al., 2003),也没有考虑资料误差的水平相关。

我国已建成自动气象观测站30 000多个,但“东密西疏”的站网布局并未发生实质改变。而统计表明:即使在站点密度最为稠密的我国东部地区( $110 \sim 118^\circ\text{E}$ ,  $24 \sim 30^\circ\text{N}$ ),在 $0.1^\circ$ 分辨率下,仍有约50%的格点内没有自动气象观测站。因此,如何借助高密度站点观测数据对卫星反演降水产品进行误差订正,在此基础上实现地面和卫星数据的融合,研制质量和时空分辨率均更高的降水产品对于强天气过程监测和防灾减灾有重要意义和价值。利用质量控制后的全国自动站小时降水观测数据,在用概率密度匹配法对CMORPH卫星反演降水产品误差订正的基础上,利用最优插值方法生成了地面和卫星资料融合的 $1\text{ h}$ 、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的降水量融合产品。本文是对这一高时空分辨率融合降水产品质量的综合检验评估。

## 1 数据

采用地面和卫星两个来源的降水数据。其中,地面观测降水资料来自全国30 000余个自动站观测的 $1\text{ h}$ 降水量。卫星反演降水产品是在系统评估6种卫星反演降水产品在中国区域质量(Shen et al., 2010)的基础上,选用美国海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)开发的实时卫星反演降水产品CMORPH(CPC MORPHing technique)。下面分别对这两种数据进行简要介绍。

### 1.1 全国自动站小时观测降水量

目前,全国已建成自动观测站(包括国家级自动站和区域自动站)30 000余个并实现了观测资料的实时上传和质量控制。降水量数据经过了气候学界限值、区域界限值、时间一致性、空间一致性等质量控制和检查后,国家级自动站资料可用率达98.9%,区域自动站的可用率也达到81.6%(任芝花等, 2010)。用30 a(1971—2000年)降水量气候

标准值作为“背景场”,利用优化插值法对质量控制后的自动站降水数据进行空间插值,生成1 h、0.1°分辨率的格点分析产品(李春晖和梁建茵,2010;沈艳等,2010),产品时间段为2008—2010年每年的5—9月。

## 1.2 CMORPH 卫星反演降水产品

NOAA 气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)开发的实时卫星反演降水产品 CMORPH 降水产品(Joyce et al., 2004),产品采用“运动矢量”法,摆脱了单纯利用统计关系推算降水量的思路。首先计算连续2幅红外云图的空间相关性,以此来确定云的运动“矢量”。进一步采用时间权重插值法外推微波反演降水量,得到没有微波观测期内的降水量,从而生成更高时空分辨率(8 km、30 min)的降水资料。为了与地面资料匹配,将CMORPH产品加工成了1 h、0.1°分辨率,数据时间段为2008—2010年每年的5—9月。

采用概率密度匹配法(probability density function, PDF)(宇婧婧等,2013)和最优插值(optimal interpolation, OI)(潘旻等,2012)相结合的两步融合方案生成了1 h、0.1°分辨率的全国自动站和CMORPH产品的降水量融合产品,产品时间段为

2008—2010年每年的5—9月。图1为典型时刻(2009年7月2日23时;世界时,下同)地面观测降水、CMORPH反演降水和融合降水产品的空间分布。该时次有一条横跨广西省北部、湖南江西省南部和福建省中部的狭长雨带,中心最大雨强超过35.0 mm/h。虽然CMORPH产品较准确的抓到了这次过程的空间分布型,但明显低估了实际降水量。另外,从CMORPH反演降水来看,在新疆和青海局部有零星的降水,由于该地区没有观测站,因此地面观测无法反映该区域的降水。从融合降水产品来看,不仅准确抓住了降水空间分布,且降水强度与地面观测接近。而在站点稀疏区,融合降水产品则较好的保留了卫星反演降水的空间分布信息。可见,融合降水产品有效利用了地面观测和卫星反演降水各自的优势,在降水量值和空间分布上均更为合理。

## 2 产品质量检验

### 2.1 误差的时间变化

以地面观测降水量为准,评估CMORPH反演降水和融合降水产品平均偏差与均方根误差的空间分布,以此来检测融合产品误差。因小时降水的0值降水事件比率高,约占总样本数的80%,为了更

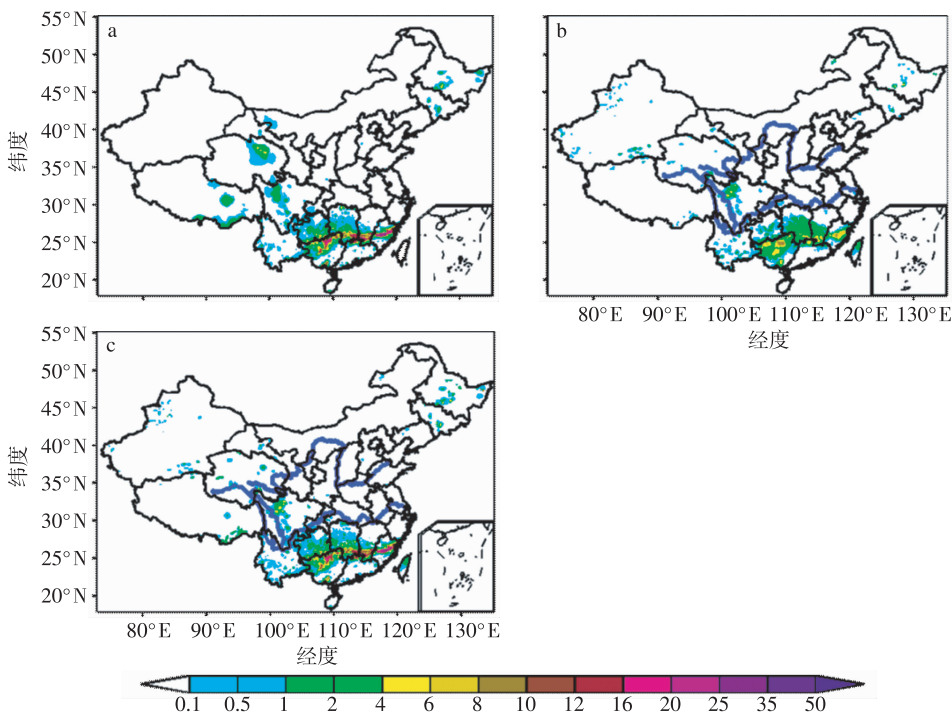


图1 2009年7月2日23时地面观测降水(a)、CMORPH反演降水(b)和融合降水产品(c)的空间分布(单位:mm/h)

Fig. 1 Distributions of (a) the gauge-based precipitation, (b) the satellite-based precipitation of CMORPH, and (c) the merged precipitation product at 2300 UTC 2 July 2009 (units: mm/h)

严格地评估产品质量,统计样本选取时去除了地面观测降水量、CMORPH 反演降水和融合降水同时为 0 的情况,且只选取网格内至少有一个雨量计观测的格点降水值(以下称为有效格点)参与检验评估。

由中国区域产品融合前后平均偏差和均方根误差的逐月(2008—2010 年每年的 5—9 月)变化曲线(图 2)可以看出:CMORPH 反演降水的平均偏差随时间有较大幅度的摆动,最大平均偏差超过了  $-0.3$  mm/h,而且有年际变化,其中 2008 和 2009 年的资料总体表现为负偏差,2010 年资料是正偏差。融合后,全国平均偏差的变化幅度明显减小,且基本消除了平均偏差的时间变化特点,在 0 值附近摆动。融合后,均方根误差明显减小,由融合前平均为  $2.8$  mm/h(在  $1.9 \sim 3.5$  mm/h 浮动),减小到融合后平均为  $0.6$  mm/h,在  $0.4 \sim 1.0$  mm/h 浮动。

进一步将平均偏差和均方根误差分成不同量级、逐时次、逐个有效格点统计了不同量级下的样本百分率(图 3)。结果表明:CMORPH 反演降水平均偏差在  $\pm 0.2$  mm/h 以外的样本约占 70%,在  $\pm 0.2$

mm/h 之间的样本仅占 30% 左右;而融合产品约 65% 的样本其平均偏差在  $\pm 0.1$  mm/h 之间,平均偏差在  $\pm 0.2$  mm/h 之间的样本百分率超过了 90%,仅 10% 的样本其平均偏差在  $\pm 0.2$  mm/h 以外。由此可见,融合产品系统偏差显著减少。对于均方根误差而言,CMORPH 反演降水,只有 2% 样本的均方根误差小于  $1.0$  mm/h;融合产品均方根误差小于  $1.0$  mm/h 的样本百分率约 90%,较融合前有大幅提升。可见,融合产品的随机误差也得到剔除。

## 2.2 误差的空间分布

### 2.2.1 平均偏差

以夏季降水较为集中的 7 月小时平均降水分布为例,检验了 CMORPH 反演降水、融合降水产品与地面观测降水平均偏差的空间分布(图 4)。CMORPH 的平均偏差呈现明显的区域变化特征,例如云贵地区 CMORPH 有较明显的负偏差,量值在  $-0.4$  mm/h 以下,华南及华北局部地区有较明显

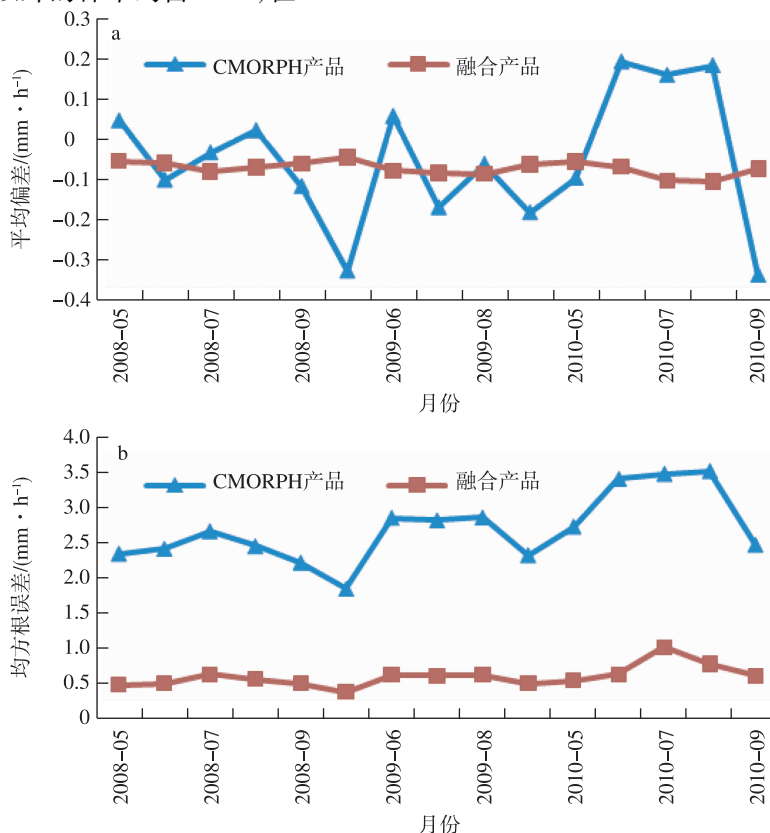


图 2 中国区域 CMORPH 反演降水和融合降水产品平均偏差(a)和均方根误差(b)的逐月变化

Fig. 2 Monthly variations of (a) mean bias and (b) root-mean-square error of the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product in China

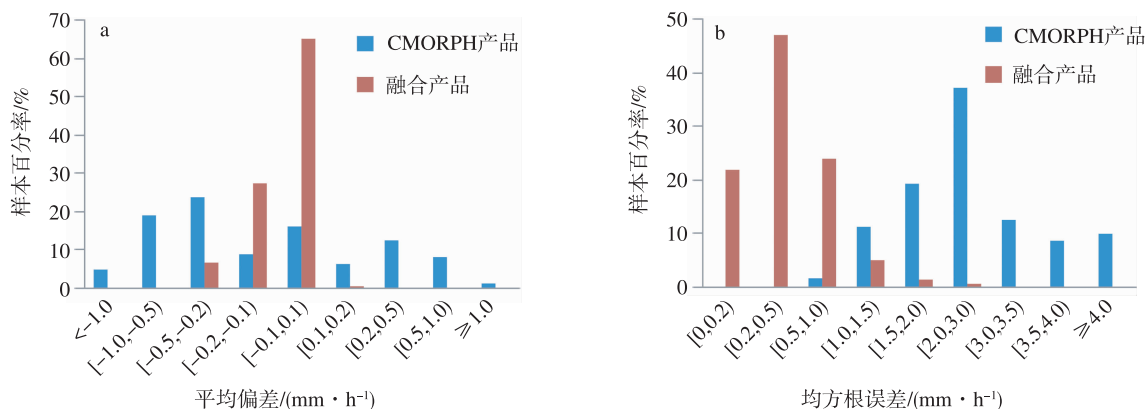


图3 CMORPH 反演降水、融合降水产品与地面观测降水平均偏差 (a) 和均方根误差 (b) 的样本百分率 (总样本数为 29 041 220)

Fig. 3 Sample percentages of (a) mean bias and (b) root-mean-square error of the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product with the gauge-based precipitation (total sample number is 29 041 220)

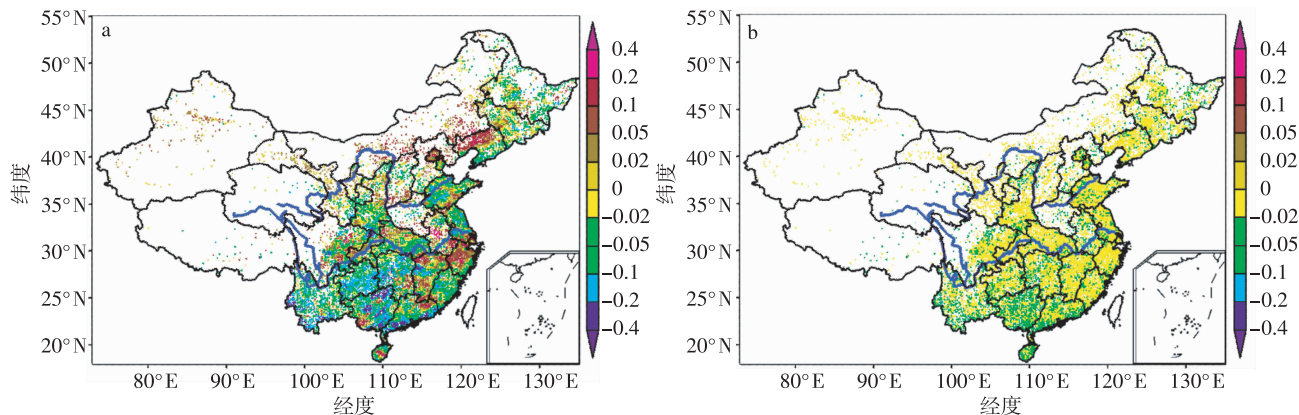


图4 2009年7月CMORPH反演降水(a)、融合产品(b)与地面观测降水平均偏差的空间分布

Fig. 4 Distributions of mean bias between (a) the satellite-based precipitation of CMORPH, and (b) the merged precipitation product and the gauge-based precipitation in July 2009

的正偏差,强度超过  $0.2 \text{ mm/h}$ 。统计表明,约 72% 的样本其平均偏差在  $\pm 0.2 \text{ mm/h}$  以外,平均偏差在  $\pm 0.2 \text{ mm/h}$  之间的样本仅占 28% 左右。融合产品平均偏差均有不同程度的减小,且区域性特征大幅削弱,呈现零散的正负相间分布。平均偏差在  $\pm 0.2 \text{ mm/h}$  之间的样本百分率超过了 86%,在  $\pm 0.1 \text{ mm/h}$  之间的样本占 63%。

### 2.2.2 均方根误差

仍以 7 月小时平均降水分布为例,检验 CMORPH 反演降水、融合降水产品与地面观测降水均方根误差的空间分布(图 5)。CMORPH 的均方根误差也有明显的区域变化特征,我国东部降水量较大的区域,例如江淮流域、华南局部、四川盆地中东部等地区的均方根误差也相对较大,达  $2.0 \text{ mm/h}$  以

上。融合后均方根误差在我国不同区域均大幅减小,约 90% 的样本均方根误差小于  $1.0 \text{ mm/h}$ ,而 CMORPH 反演降水均方根误差小于  $1.0 \text{ mm/h}$  的样本只占 2%,可见,融合产品的随机误差在我国不同区域均有效减小。

### 2.3 降水量分级检验

根据降水强弱,将小时降水量分为 5 个等级,即  $0.1 \sim 1.0$ 、 $1.0 \sim 2.5$ 、 $2.5 \sim 8.0$ 、 $8.0 \sim 16.0$  和  $16.0 \text{ mm}$  以上,基本对应小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨级别。通过分析各量级下产品融合前后统计指标的变化,来考查不同降水量级下的融合效果。由表 1 可见,随着降水量的增加,CMORPH 产品平均偏差和相对偏差均由正值变为负值,说明 CMORPH 高估了雨强小于  $1.0 \text{ mm/h}$  的低值降水,低估了雨强

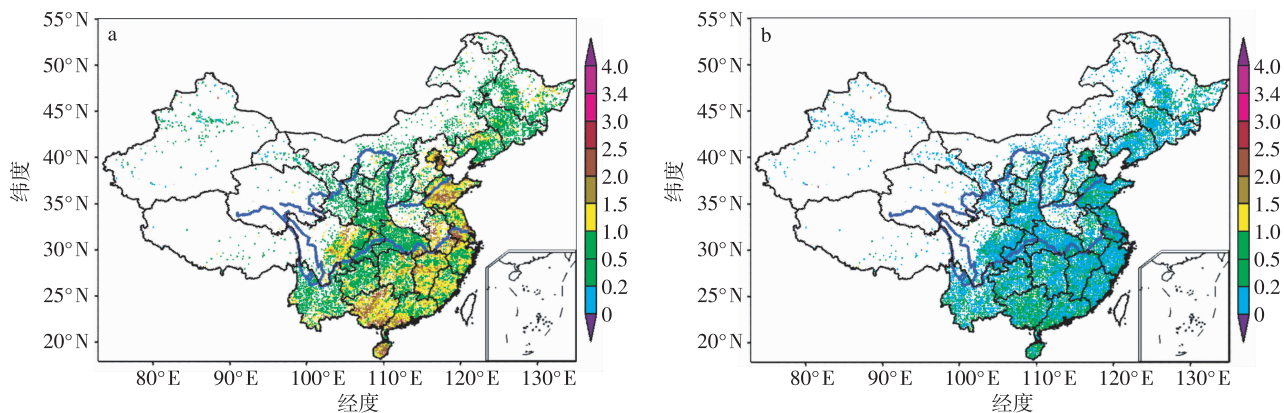


图 5 2009 年 7 月 CMORPH 反演降水 (a)、融合产品 (b) 与地面观测降水均方根误差的空间分布

Fig. 5 Distributions of root-mean-square error between (a) the satellite-based precipitation of CMORPH, and (b) the merged precipitation product and the gauge-based precipitation in July 2009

表 1 2008—2010 年 5—9 月不同降水量级下产品融合前后的统计结果

Table 1 Statistics of the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product under the different hourly rainfall rates over China from May to September during 2008—2010

雨强/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	CMORPH 卫星反演降水			融合降水产品		
	平均偏差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	相对偏差/%	均方根误差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均偏差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	相对偏差/%	均方根误差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )
<1.0	0.160	70.920	1.486	0.110	42.128	0.778
1.0~2.5	-0.330	-18.390	2.412	-0.044	-1.675	1.300
2.5~8.0	-1.920	-42.290	4.119	-0.637	-13.747	2.398
8.0~16.0	-6.540	-59.870	8.510	-2.640	-23.906	4.898
$\geq 16.0$	-14.750	-65.960	17.220	-6.980	-30.967	9.960

大于等于  $1.0 \text{ mm/h}$  的降水。而融合后降水场的平均偏差虽然对低值降水仍有所高估,对高值降水有所低估,但同一降水量级下的平均偏差、相对偏差和均方根误差的绝对值均比 CMORPH 产品大幅减小。其中,中雨 ( $1.0 \sim 2.5 \text{ mm/h}$ ) 量级的改进效果最为明显,相对偏差由原来的  $-18.390\%$  减小到  $-1.675\%$ ,中到大雨量级 ( $1.0 \sim 8.0 \text{ mm/h}$ ) 的相对偏差控制在  $15\%$  以内,对于暴雨及以上的强降水,相对误差控制在  $30\%$  左右。对  $1 \text{ h}$ 、 $0.1^\circ$  分辨率的降水产品,  $20\%$  以内的相对偏差就比较理想,而强降水的相对偏差在  $50\%$  以内均可以接受 (Hong et al., 2004; Joyce et al., 2004), 目前融合降水产品质量明显优于这一标准。

#### 2.4 不同累积时间的产品质量

为了使用户更清楚地了解不同累积时间下融合降水产品质量,分别分析了  $1$ 、 $3$ 、 $6$ 、 $12$  和  $24 \text{ h}$  累积降水的各统计量。从全国平均 (表 2) 来看,不同累积时间的融合降水效果均有改善,各累积时间下的

平均偏差均减小到  $-0.04 \text{ mm}$  以下,较 CMORPH 产品的系统性偏差明显降低,如  $24 \text{ h}$  累积降水的平均误差减小最为显著,从 CMORPH 产品的  $-0.409 \text{ mm}$  降到  $-0.035 \text{ mm}$ ;各累积时间下融合降水的均方根误差均大幅减小,  $3 \text{ h}$  累积降水的均方根误差只有  $2.066 \text{ mm}$ ;各累积时间的融合降水相关系数均在  $0.75$  以上,随着累积时间的增加,相关系数略有增大,如  $3 \text{ h}$  累积融合降水的相关系数是  $0.832$ ,说明融合降水分布与地面观测降水在空间分布上高度一致。总体而言,不同累积时间下地面和卫星降水的融合效果均比较明显,且随着累积时间增加,改进幅度增大,这符合降水产品误差分布随累积时间增加而减小的变化规律。

#### 2.5 不同站网密度下的融合效果

受复杂地理环境影响,中国地区的站网分布极不均匀,总体上呈现东部密集西部稀疏的分布特征,因而有必要评估不同站网密度下融合产品质量。首先,根据中国地区不同台站级别 (基本基准站、一般

表 2 2008—2010 年 5—9 月中国不同累积时间下产品融合前后的误差统计结果

Table 2 Statistics of the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product under the different cumulative times over China from May to September during 2008—2010

累积时间/h	CMORPH 反演降水			融合降水产品		
	平均偏差/mm	均方根误差/mm	相关系数	平均偏差/mm	均方根误差/mm	相关系数
1	-0.067	2.200	0.363	-0.006	1.267	0.759
3	-0.140	4.169	0.467	-0.013	2.066	0.832
6	-0.207	5.904	0.526	-0.017	2.695	0.865
12	-0.272	7.962	0.562	-0.024	3.440	0.887
24	-0.409	10.683	0.595	-0.035	4.404	0.908

站以及全国自动站)组成不同的站网密度。其中国家级基本基准站约 700 个,加上一般站后约有 2 400 个,如果再加上全国自动站则共有 30 000 个左右。其次,将上述 3 个台站数下的观测数据分别与 CMORPH 产品进行融合,其结果分别记作“c700”、“c2400”和“c30000”。采用“独立样本”来检验 3 种站网密度下的融合效果。一般地,网格内雨量观测站个数越多,则网格降水值越准确。“独立样本”的选取是在综合考虑现有站点资料误差分布与站点个数的情况下,认为网格内观测台站大于等于 3 时能既保证较小的观测误差,又保证一定的样本量(700 个左右),保留这部分数据不参与融合,将其作为“真值”来评估三种站网密度下融合产品质量。

表 3 给出了 2009 年 7 月中国地区三种站网密度下融合产品的平均偏差、均方根误差和相关系数。随着台站个数的增加,融合降水与地面降水的强度差异(平均偏差、均方根误差)减小、空间相关性增大。当只用 700 个基本基准站时,平均偏差为  $-0.132 \text{ mm/h}$ ,均方根误差为  $2.046 \text{ mm/h}$ ,且相关系数较低,只有 0.298;当增加到 2 400 站时,平均偏差和空间相关系数分别为  $-0.013 \text{ mm/h}$  和 0.643,均有显著改善,均方根误差也降至  $1.558 \text{ mm/h}$ ;当站网密度提高到 30 000 站时,均方根误差和相关系数较 2 400 时又有进一步改进,分别为  $1.131 \text{ mm/h}$  和 0.792。上述结果表明,融合产品质量与站网密度有关,站网越密集融合效果越好。目前 30 000 自动站在我国西部和东北北部地区的站点密度大致接近 700 站在东部站点密集区的密度,因此可以估计

表 3 2009 年 7 月中国区域 3 种站网密度下融合产品的平均偏差、均方根误差和相关系数

Table 3 Mean bias, root-mean-square error and correlation coefficient of the merged precipitation product under the three station network densities over China in July 2009

	平均偏差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	均方根误差/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	相关系数
c700	-0.132	2.046	0.298
c2400	-0.013	1.558	0.643
c30000	-0.025	1.131	0.792

融合产品在我国西部和东北北部地区的均方根误差约为  $2.0 \text{ mm/h}$ ,相关系数约为 0.3。

## 2.6 强降水过程监测

通过评估典型区域强降水过程监测和再现能力,一定程度能反映融合产品质量。长江流域从 2009 年 7 月 21 日 00 时到 25 日 23 时发生了持续时间相对较长的降水过程,图 6a 反映了该流域地面观测降水量、CMORPH 产品以及融合产品对这一降水过程的再现能力。由图 6 可见,CMORPH 产品存在或高估、或低估实际降水量的情况,如对 21 日 09—12 时的降水量高估明显,对 24 日 18 时—25 日 06 时的降水量低估明显。而融合降水产品较准确的抓到了每一次降水过程,与地面观测降水量的平均偏差稳定在 0 附近(图 7a)。

另外,选取华南区域(2009 年 7 月 1—6 日)评估了地面观测降水量、CMORPH 产品以及融合产品对该区域降水过程的再现能力(图 6b)。由图可见,CMORPH 产品整体低估了该区域的实际降水量,最大低估量接近  $0.8 \text{ mm/h}$ ,且降水峰值略有滞后。而融合降水产品与实际降水量的偏差稳定在 0 附近(图 7b),对实际降水量的再现能力强。

进一步统计了 2008—2010 年 5—9 月长江流域和华南区域大暴雨(雨强超过  $16.0 \text{ mm/h}$ )的全部样本(表 4)。由表 4 可知,CMORPH 产品对这两个区域大暴雨的低估非常明显,相对偏差分别是  $-67.868\%$  和  $-69.815\%$ ,相关系数只有 0.178 和 0.227。而融合降水产品对大暴雨虽然仍有低估,但相对偏差大幅减小约  $-10\%$ ,且相关系数达到 0.8 以上。表明无论是降水量级还是降水结构,融合降水产品对大暴雨的监测和再现能力均得到了大幅提高。

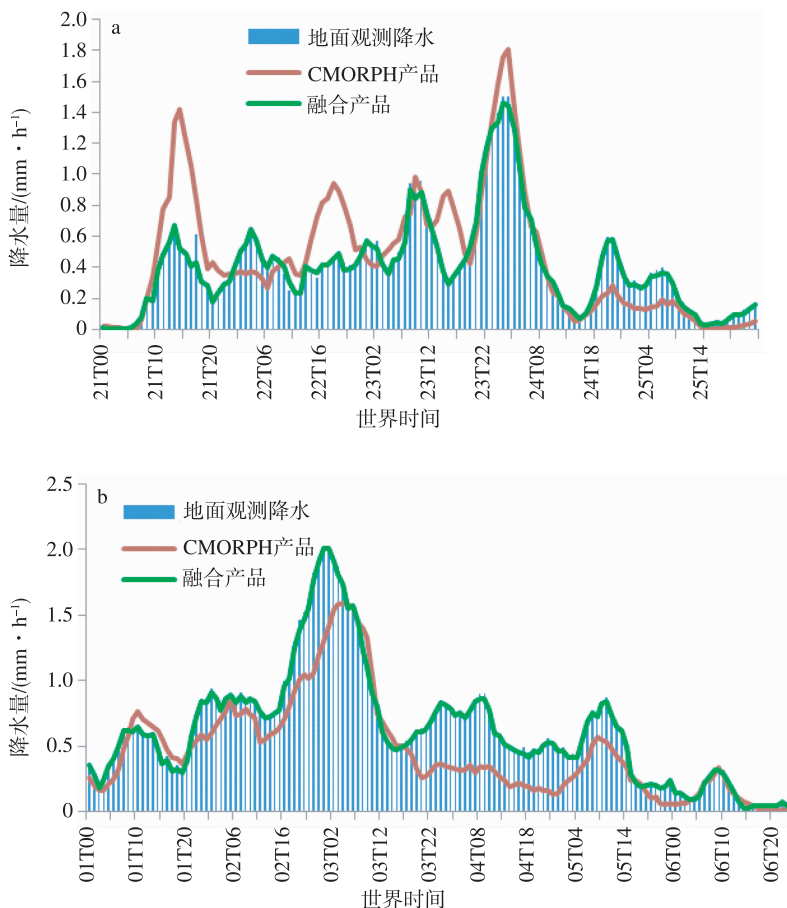


图 6 地面观测小时降水量、CMORPH 产品和融合产品的时间序列(单位:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

a. 2009 年 7 月 21—25 日长江流域; b. 2009 年 7 月 1—6 日华南区域

Fig. 6 Time series of the gauge-based hourly precipitation, the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product (units:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a. the Yangtze River basins during 21—25 July 2009; b. South China during 1—6 July 2009

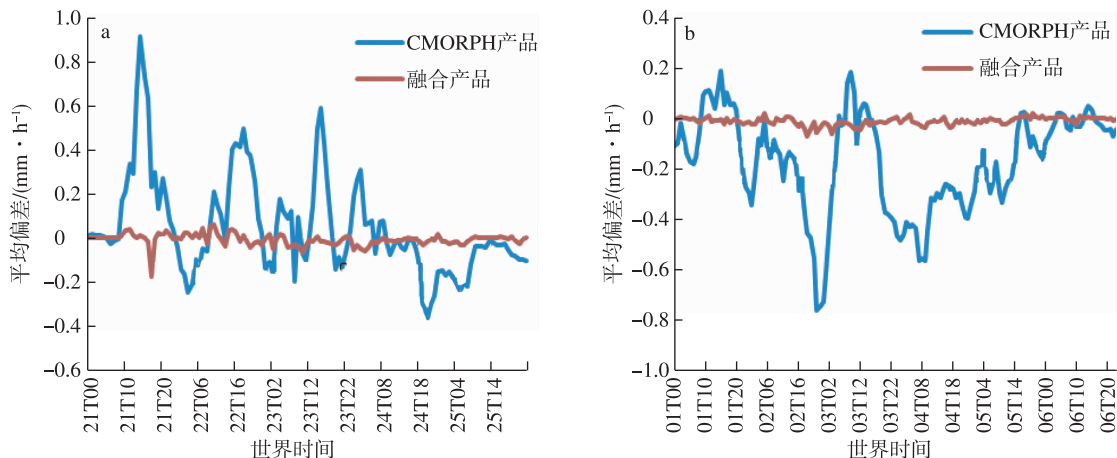


图 7 CMORPH 产品和融合产品与观测小时降水量平均偏差(单位:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )的时间序列 a. 2009 年 7 月 21—25 日长江流域; b. 2009 年 7 月 1—6 日华南区域

Fig. 7 Time series of mean bias for the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product with the gauge-based hourly precipitation (units:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a. the Yangtze River basins during 21—25 July 2009; b. South China during 1—6 July 2009



表 4 2008—2010 年 5—9 月融合前后产品对典型区域大暴雨的统计结果

Table 4 Statistics of the satellite-based precipitation of CMORPH and the merged precipitation product with the gauge-based hourly precipitation during the heavy rain events in the Yangtze River basins and South China from May to September during 2008—2010

区域	产品	平均偏差/(mm·h <sup>-1</sup> )	相对偏差/%	均方根误差/(mm·h <sup>-1</sup> )	相关系数	样本数
长江流域	CMORPH 产品	-15.198	-67.868	17.804	0.178	9 181
	融合产品	-2.676	-11.950	4.900	0.817	
华南区域	CMORPH 产品	-15.689	-69.815	17.939	0.227	5 775
	融合产品	-2.389	-10.631	4.211	0.856	

### 3 结论与讨论

高时空分辨率降水产品对局地、短时暴雨洪涝等强天气过程监测、预报和成因分析均有重要作用,对防灾减灾亦有重要意义。基于全国自动站观测降水量和 CMORPH 卫星反演降水资料,采用 PDF 加 OI 两步融合方法生成了 1 h、0.1°×0.1°分辨率的融合降水量产品,本文分别从产品误差的时空特征、不同降水量级和不同累积时间下的产品质量、不同站网密度的融合效果以及对降水过程监测再现能力等方面对比评估了该产品的质量,结果表明:

1) 融合产品平均偏差和均方根误差随时间的变化幅度明显减小且区域性分布特征明显减弱,平均偏差在 ±0.2 mm/h 之内的样本百分率占 90%,融合产品的系统偏差明显减少;均方根误差得以有效剔除,约 90% 的样本均方根误差小于 1.0 mm/h。

2) 不同降水量级下的融合产品质量有别,中雨(1.0~2.5 mm/h)、中到大雨(1.0~8.0 mm/h)、暴雨及以上(≥8.0 mm/h)的相对误差分别为-1.675%、小于 15.0%、30.0% 左右,均优于国际上可以接受的误差标准。产品累积时间增加进一步提高了融合降水产品质量。

3) 不同站网密度下融合产品质量评估表明:融合产品质量与站网密度有关,站点越多融合效果越好。目前 30 000 自动站在我国西部和东北北部地区的站点密度大致接近 700 站在东部站点密集区的密度,因此估计融合产品在我国西部和东北北部地区的均方根误差约为 2.0 mm/h,相关系数在 0.3 左右。

4) 通过典型区域降水时序和对大暴雨的统计分析结果表明,融合产品能准确抓住强降水过程,对于定量监测降水过程具有优势,可以满足强天气过程监测和服务需求。

5) 该产品可作为大气、水文、生态模式的重要

输入参数,以及检测和评估模式预报、预测准确性的基础数据,同时对极端天气事件的研究等具有重要意义。此外,还可以提供给农业、水利、能源、交通、地质、水文等行业和学科的科研业务使用。相关数据产品已通过“中国气象科学数据共享服务网”实时对外服务,网址是 <http://cdc.cma.gov.cn/sksj.do?method=ssrjscrph>。欢迎广大业务和科研用户使用该产品并及时反馈产品使用情况。

**致谢:**美国海洋大气局气候预测中心 Xie Pingping 博士、国家气象信息中心熊安元研究员、师春香研究员对本文工作给予了认真指导。中国气象局张洪政高级工程师、国家气象信息中心徐宾、张冬斌博士制作了本文部分图表并润色文字。在此一并深表谢意!

### 参考文献:

- 李春晖,梁建茵. 2010. 基于 Shepard 和 OI 方法对雨量计逐时资料的分析[J]. 应用气象学报, 21(4): 416-422.
- 潘旸,沈艳,宇婧婧,等. 2012. 基于 OI 方法分析的中国区域地面观测与卫星反演小时降水融合试验[J]. 气象学报, 70(6).
- 任芝花,赵平,张强,等. 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J]. 气象, 36(7): 123-132.
- 沈艳,冯明农,张洪政,等. 2010. 我国逐日降水量格点化方法[J]. 应用气象学报, 21(3): 279-286.
- 宇婧婧,沈艳,潘旸,等. 2013. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 24.
- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979—Present) [J]. J Hydrometeorol, 4(6): 1147-1167.
- Arkin P A, Xie P P. 1994. The global precipitation climatology project: First algorithm intercomparison project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 75(3): 401-419.
- Barrett E C, Martin D W. 1981. The use of satellite data in rainfall monitoring [M]. New York: Academic Press.
- Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical

- models [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(1):47-64.
- Gebremichael M, Krajewski W F, Morrissey M, et al. 2003. Error uncertainty analysis of GPCP monthly rainfall products: A data-based simulation study [J]. *J Appl Meteor*, 42(12):1837-1848.
- Hong Y, Hsh K L, Sorooshian S, et al. 2004. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system [J]. *J Appl Meteor*, 43(12):1834-1852.
- Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(1):5-20.
- Huffman G J, Adler R F, Morrissey M, et al. 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations [J]. *J Hydrometeor*, 2(1):36-50.
- Huffman G J, Adler R F, Stoker E F, et al. 2004. Analyses of TRMM 3-hourly multi-satellite precipitation estimates computed in both real and post-real time [C]//AMS 12th Conf. on Satellite Meteorology & Oceanography. Seattle:11-15.
- Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. *J Hydrometeor*, 8(1):38-55.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. *J Hydrometeor*, 5(3):487-503.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 15(3):809-817.
- Reynolds R W. 1988. A real-time global sea surface temperature analysis [J]. *J Climate*, 1(1):75-87.
- Schneider U, Rudolf B, Ruth W. 1993. The spatial sampling error of areal mean monthly precipitation totals analyzed from gauge measurements [C]//4th International Conference on Precipitation. New York:80-82.
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China [J]. *J Geophys Res*, 115, D02114. doi:10.1029/2009JD012097.
- Xie P P, Arkin P. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11):2539-2558.
- Xie P P, Janowiak J E, Arkin P, et al. 2003. GPCP pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates [J]. *J Climate*, 16(13):2197-2214.

(责任编辑:刘菲)