

张蒙蒙, 江志红. 2013. 我国高分辨率降水融合资料的适用性评估 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 461–471, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12044.
Zhang Mengmeng, Jiang Zhihong. 2013. Analyses of high-resolution merged precipitation products over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 461–471.

我国高分辨率降水融合资料的适用性评估

张蒙蒙^{1,2} 江志红^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘要 利用国家气象信息中心研制的全国 30000 多个地面自动站降水与 CMORPH (Climate Prediction Center Morphing technique) 卫星反演降水融合而成的融合降水产品, 分析了融合降水平均偏差和均方根误差的时空分布特征, 探讨了不同降水量级以及站点稀疏区和密集区的融合效果, 结果表明: 融合降水的平均偏差和均方根误差量值均较卫星反演降水有显著减小, 随时间的变化幅度不大且误差的区域性差异减弱; 融合降水不同量级降水日数分布接近于地面观测降水, 虽高估了雨强小于等于 4 mm/d 的降水, 低估了大于 4 mm/d 高值降水, 但同一量级下的误差比卫星反演降水大幅减小, 且随着降水强度的增加改善效果明显; 站点密集区的融合降水值主要是取决于地面观测降水; 站点稀疏区在没有站点分布时, 融合降水值主要取决于卫星反演降水, 但随着站点个数增加, 地面观测降水在融合降水中的所占比重逐渐增大, 且超过了卫星反演降水的作用。可见融合降水充分有效利用了地面观测降水和卫星反演降水各自的优势, 融合效果明显。

关键词 高分辨率 融合降水 资料评估

文章编号 1006-9585 (2013) 04-0461-11

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12044

Analyses of High-Resolution Merged Precipitation Products over China

ZHANG Mengmeng^{1,2} and JIANG Zhihong^{1,2}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract On the basis of the merged precipitation observed by automatic meteorological stations and retrieved by the CMORPH (Climate Prediction Center Morphing technique) satellite, the merged precipitation product at temporal and spatial resolutions of 1 h and 0.1° (lat) × 0.1° (lon), respectively, is developed by the National Meteorological Information Center. The quality of the product is assessed in terms of the mean error and root-mean-square error in the temporal-spatial distribution, the accuracy at different precipitation rates, and the merging effect in areas sparsely and densely covered by stations. The results indicate that (1) the regional mean error and root-mean-square error for the merged product decreased remarkably, and the extent of the change over the temporal-spatial distribution is weakened, although this trend is weaker in winter than in summer; (2) the merged precipitation presents a distribution of daily rainfall rates very close to that obtained by gauge analysis. Although the merged product overestimates light rains and underestimates heavy rains, both the mean error and root-mean-square error of the merged product are smaller than those of CMORPH in the same precipitation order, and the quality is improved further as the precipitation order increases; (3) In sparsely covered areas where there is no station, the merged product is controlled mainly by CMORPH. As the gauge

收稿日期 2012-03-14 收到, 2012-05-29 收到修定稿

基金项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006042

作者简介 张蒙蒙, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候诊断研究。E-mail: zmm870316@163.com

通讯作者 江志红, E-mail: Zhjiang@nuist.edu.cn

number increases, however, the gauged-based precipitation plays a more important role than CMORPH. In contrast, in densely covered areas, the merged product is controlled mainly by the gauged-based precipitation. In summary, the merged product effectively takes advantage of the gauge observations and the product of the CMORPH satellite.

Keywords High-resolution, Merged precipitation, Data evaluation

1 引言

高质量、高时空分辨率的格点降水产品是大气、气候、水文、生态模式所需要的重要输入参数，也是监测和评估模式预报、预测准确性的必要数据，是开展气象研究的基础和必要支撑。地面站点观测降水数据、卫星反演降水量是高分辨率降水资料获取的主要途径。但是每种观测资料都各有优缺点，如地面台站观测数据受雨量计结构、风速大小、采样误差、周围环境变迁等的影响，只能够较准确表示“观测点”上的降水量，而在海洋和观测站稀少的地区不能反映较大面积的降水分布。而气象卫星可以全天候、无缝隙的反演得到高时空分辨率的降水量资料，比较准确的反映降水的空间分布特征，但卫星估算降水会受到诸如传感器设计、天气状况以及反演算法等综合影响导致结果存在误差。因此近年来将地面观测降水量与卫星、雷达产品融合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) 的目的之一就是要发展充分利用各种数据优点且高质量的降水量融合产品。融合技术应用广泛，方法多样，如概率统计法、最优权重法、最小方差估计、贝叶斯估计法、卡尔曼滤波、神经网络等方法。1995年开始，Huffman et al. (1995) 提出SGM (Satellite-Gauge Model) 模型，对卫星反演资料和雨量计数据进行融合。Xie et al. (1996) 采用极大似然估计法，将雨量计数据和卫星资料进行融合，形成一个新的降水资料集 CMAP (Climate Precipitation Center Merged Analysis of Precipitation)，使其数据精度大大提高。Huffman et al. (1997) 在GPCP (V2.0) 的资料中对辐射计降水和散射计降水采用最优权重法进行融合。翟茂常和朱海 (2000) 运用距离平方反比的加权平均值对中国境内ECMWF再分析日降水资料和CMAP降水进行融合。Sun et al. (2003) 利用克里格方法分别估计雨量计和卫星的降水指数。Adler et al. (2003) 对雨量计数据、卫星资料经过融合形成新的GPCP (V2.0) 资料。Xie et al.

(2007) 将YRCC (Chinese Yellow River Conservation Commission)、GTS (Global Telecommunication System)、CMA (China Meteorological Administration) 数据集相融合，建立了分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) 的东亚日降水数据集。

通常对融合方法讨论的较多，对得到的融合数据进行再分析精度的较少。Tian et al. (2010) 运用贝叶斯定律建立卫星 (CMORPH和TRMM 3B42RT) 与台站降水 (CPC美国气候预报中心资料) 之间的统计关系，并将这种关系运用到没有地面台站的地方，表明夏季卫星偏差减少了70%~100%，即使在美国站点稀少的地偏差也分别减少了60%~80%。Shen et al. (2010) 评估了高分辨率降水计划 PEHRPP (Program to Evaluation High Resolution Precipitation Products) 中的各项降水资料，发现站点资料订正卫星产品 (如TRMM/3B42) 是可以大幅度提高产品精度，经过订正后的TRMM/3B42 产品与台站观测资料的空间分布特征最为接近，相关系数高达0.67，均方差仅为4 mm/d。另外用站点订正卫星产品的研究在我国已展开研究 (韩永等，2003；刘洪鹏和刘文，2003；潘旸等，2011)。但这些高分辨率融合资料都只是对小区域进行了降水评估，对我国不同季节、不同降水等级、不同区域降水变化特征的评估还较少。

国家气象信息中心借助全国30000多个自动站观测数据对CMORPH (Climate Prediction Center Morphing technique) 卫星反演降水产品进行误差订正，在此基础上实现地面观测和卫星数据的融合，研制出空间分辨率为 0.1° (纬度) $\times 0.1^{\circ}$ (经度) 的融合降水产品。本文主要从融合降水产品平均偏差和均方根误差的时空分布特征、不同降水量级以及站点稀疏区和密集区的融合效果等方面，对产品的适用性做出评估。

2 数据来源及评估方法

融合降水产品 (简称为融合降水) 是由地面观测降水和卫星反演降水通过概率密度函数匹配法 (宇婧婧等，2012) 和最优插值 (潘旸等，2012) 两个步骤

相结合生成的降水数据。其中,地面观测降水资料来自全国3万多个自动站观测的逐小时降水量;卫星反演降水产品选用美国海洋大气局开发的CMORPH卫星反演降水产品(简称为CMORPH降水)。

2.1 地面观测降水资料

对我国已建成的30000余个自动观测站(包括国家级自动站和区域自动站)的降水资料进行质量控制(气候学界限值、区域界限值、时间一致性、空间一致性检查)(任芝花,2010)。在此基础上,采用“气候背景场”的优化插值方法(沈艳,2010),对质量控制后的自动站小时降水进行空间插值,生成时空分辨率为1 h、0.1°(纬度)×0.1°(经度)格点分析产品,产品时间段为2008~2010年。

2.2 CMORPH降水

CMORPH是由NOAA气候预测中心开发的实时卫星反演降水产品(Joyce et al., 2004)。原始CMORPH降水的空间分辨率为8 km,时间分辨率为30 min,为了与地面资料匹配,将CMORPH降水加工成了1 h、0.1°(纬度)×0.1°(经度)分辨率,数据时间段为2008~2010年。

2.3 融合降水

融合降水是由国家气象信息中心研制而成(宇婧婧,2011;潘旸,2012),由地面观测降水和CMORPH降水通过概率密度函数(PDF)匹配法和最优插值两个步骤相结合生成。空间分辨率是0.1°(纬度)×0.1°(经度),时间段为2008~2010年。

2.4 资料质量评估方法

地面站点观测虽然受雨量计结构、风速大小以及采样误差等影响,但却是最能够准确表示“观测点”上降水量的数据源。本文以地面观测降水资料为准,鉴于本文主要目的是通过与CMORPH降水的比较给出这套融合降水的质量评估效果,探讨融合降水在不同季节、不同区域、不同等级降水强度以及站点疏密区的融合效果,评估其在我国大陆的适用性,故文中用于验证的数据仍是2.1节介绍中的30000多个自动站的数据。

本文主要以平均偏差Bias、均方根误差RMSE、相关系数r等统计指标来评估这套融合降水产品的精度,几个统计指标的表达式简单如下:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}, \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

其中,

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (4)$$

其中, X_i 表示地面观测降水, Y_i 表示 CMORPH 降水或者融合降水, n 是样本容量。

特别说明的是,由于我国自动站尤其是西部区域多在冷季停测,12月份缺测的台站较多,因此本文研究时段是2008~2010年1~11月,数据时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.1°(纬度)×0.1°(经度),但本文主要对逐日数据进行评估。

3 融合降水的质量评估

以地面观测降水量为准,评估CMORPH降水和融合降水平均偏差与均方根误差的变化情况,以此来说明融合降水的误差分布。为了更严格地评估产品精度,统计样本选取时去除了地面观测降水量、CMORPH降水和融合降水同时为0的情况,且只选取0.1°(纬度)×0.1°(经度)网格内至少有一个雨量计观测的格点降水值参与检验评估。

3.1 误差的时间变化

3.1.1 平均误差的时间变化

图1是中国区域降水产品融合前后平均偏差的逐日、月平均变化曲线和样本百分率分布图。图1a的逐日变化可以看出:融合前,平均偏差随时间有较大幅度的摆动,最大平均偏差达到了11.5 mm/d,其余均在±8 mm/d之间摆动,3年平均的偏差为-0.67 mm/d;融合后,日平均偏差的变化幅度明显减小,在0值附近摆动,最大平均偏差仅为2.02 mm/d,3年平均值减小为-0.2 mm/d。平均偏差在±0.5 mm/d之内的样本由融合前的17%提升为融合后的94.5%,其中±0.2 mm/d之间的样本从12%提高至融合后的64%,可见融合降水的系统偏差明显减少(图1b)。图1c的月平均变化表现出季节性

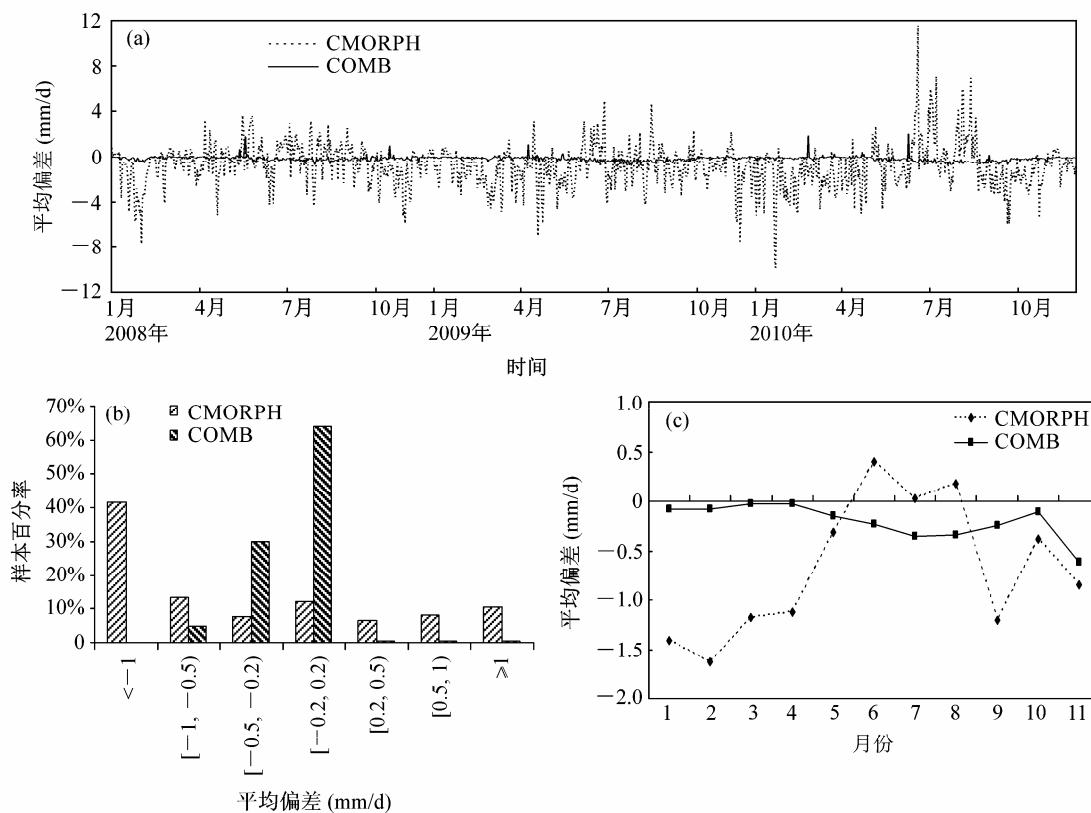


图 1 2008~2010 年 1~11 月中国区域 CMORPH 降水 (CMORPH) 和融合降水 (COMB) 的 (a) 平均偏差的逐日变化、(b) 逐日平均偏差的样本百分率、(c) 平均偏差 3 年平均的逐月变化

Fig. 1 (a) Daily mean bias curves, (b) daily mean bias sample percentage, and (c) monthly mean bias curves of precipitation from satellite-based precipitation products of Climate Prediction Center Morphing technique (CMORPH) and combined precipitation product (COMB) from January to November during 2008–2010

特征，融合前除夏季是正偏差外，其他月份均为负偏差，尤其是降水少的 1、2 月负偏差分别达到 -1.4 、 -1.6 mm/d ；融合后，1、2 月负偏差明显减小，接近 0 值。但夏季变成负偏差：3 年平均的 6、7、8 月偏差分别为 -0.23 、 -0.36 、 -0.24 ，可见在降水较多季节负偏差略大，且 2008~2010 年夏季均为负偏差（分别为 -0.24 、 -0.35 、 -0.36 ）（图略）。

就相对偏差而言（图略），融合前为 -7.9% ，融合后减小为 -3.7% 。其中，降水较少的 1~2 月改善效果显著，由 -31.8% 提升为融合后的 -3.9% ；降水较多的夏季相对偏差由 6% 变为融合后的 -4% 。

3.1.2 均方根误差的时间变化

图 2 是融合前后均方根误差的逐日、月平均变化曲线和样本百分率分布图。图 2a 的逐日变化可以看出：融合前，均方根误差随时间变化较大，在 0.55 ~ 20 mm/d 浮动，2010 年有个别值超出，最高达 32 mm/d 。且均方根误差在降水多的暖季大于降水少的冷季，在降水较多的 7 月达到最大，3 年平

均的均方根误差达 8.4 mm/d ；融合后，均方根误差明显减小，在 0.12 ~ 8 mm/d 之间浮动（2008 年和 2010 年有个别值超出），其中 2009 年的值都在 5 mm/d 以下，效果比较显著。3 年平均的均方根误差减小为 2.5 mm/d 。均方根误差小于 2.0 mm/d 的样本百分率由融合前的 8% 提高为融合后的 51% ，小于 5.0 mm/d 的样本百分率由融合前的 36% 提高为融合后的 97% ，较融合前有大幅提升（图 2b）。图 2c 的月平均变化也表现出季节性特征：融合前后的月变化均表现出暖季大于冷季的特征，且在 7 月最大。但融合后，各月均方根误差明显减小，暖季的均方根误差由 11.6 mm/d 减小为融合后的 3.3 mm/d ，冷季由 6.5 mm/d 减小为融合后的 1.9 mm/d ，最为明显的是 7 月份的均方根误差由 12.8 mm/d 减小为融合后的 3.4 mm/d 。

从平均偏差和均方根误差的时间变化可以得出：融合后，平均偏差和均方根误差量级均明显减小，且呈现出暖季大于冷季的特征。3 年平均的偏差值由 -0.67 mm/d 减小为融合后的 -0.2 mm/d ，均

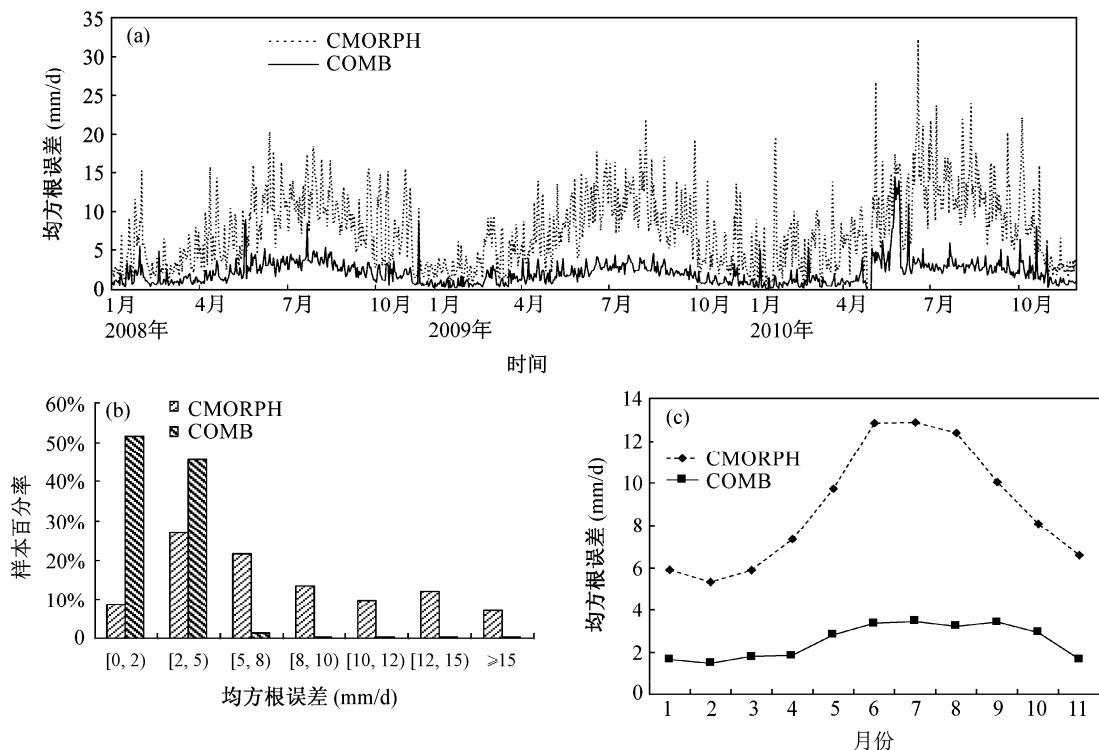


图 2 同图 1, 但为均方根误差的变化

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for root-mean-square error

方根误差由 8.4 mm/d 减小为融合后的 2.5 mm/d, 相对偏差由 -7.9% 减小为 -3.7%。平均偏差在 ± 0.5 mm/d 之内的样本百分率占 94.5%, 均方根误差小于 5.0 mm/d 的样本百分率约 97%。融合后随机误差得到有效剔除。

3.2 误差的空间分布

3.2.1 平均偏差的空间分布

图 3 给出夏季、冬季融合前后降水平均偏差的空间分布。夏季, CMORPH 降水在云贵地区、福建、广东、甘肃南部、山东半岛东南部、辽宁半岛南部等地区有较明显的负偏差, 量值在 -2 mm/d 以下, 最大负偏差在云贵地区, 可达 -8.4 mm/d。北方大部分地区和长江中下游平原有较明显的正偏差, 强度超过 2 mm/d, 其中最大的正偏差在河南地区, 达 9.1 mm/d。统计表明, 约 78% 的样本其平均偏差在 ± 0.5 mm/d 以外, 平均偏差在 ± 0.2 mm/d 之间的样本仅占 9% 左右。融合后, 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。正偏差最大值仍在河南南部地区, 但量级减小为 1.9 mm/d。平均偏差在 ± 0.5 mm/d 之间的样本百分率超过了 65%, 在 ± 0.2 mm/d

之间的样本约占 25%。沈艳等 (2013) 对这套小时降水量融合降水进行了评估, 在 7 月份的小时降水平均偏差分布上与本文结论是相似的, 只是在量级上有所差异。

冬季, CMORPH 降水在长江以南地区、东北东部、京津塘地区有较明显的负偏差, 量值在 -2 mm/d 以下, 最大负偏差在东南沿海地区, 可达 -5.7 mm/d。山东半岛、河套地区有较明显的正偏差, 强度超过 1 mm/d。统计表明, 约 73% 的样本其平均偏差在 ± 0.5 mm/d 以外, 平均偏差在 ± 0.2 mm/d 之间的样本仅占 11% 左右。融合后, 平均偏差均有不同程度的减小, 偏差在 ± 0.5 mm/d 之间, 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 ± 0.5 mm/d 之间的样本百分率超过了 96%, 在 ± 0.2 mm/d 之间的样本约占 77%。

3.2.2 均方根误差的空间分布

图 4 给出夏、冬季融合前后降水平均方根误差的空间分布。夏季, 除了甘肃、新疆等降水较少的西部区域, 其余大部分地区的均方根误差相对较大, 达 7 mm/d 以上, 最大均方差在河南南部, 可达 14.5 mm/d。融合后, 均方根误差在我国不同区

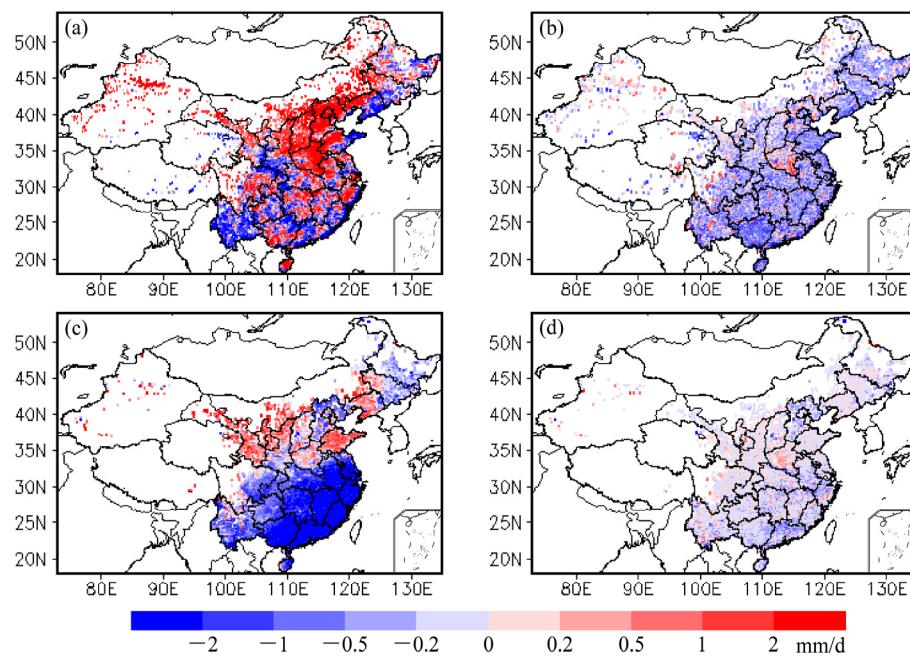


图 3 2008~2010 年 (a、c) CMORPH 降水和 (b、d) 融合降水与地面观测降水平均偏差的空间分布 (白色区域站点数为 0): (a、b) 夏季; (c、d) 冬季

Fig. 3 Spatial distribution of mean bias between (a, c) CMORPH, (b, d) COMB and gauge-based precipitation in (a, b) summer and (c, d) winter during 2008-2010 (the white areas site gauge number is zero)

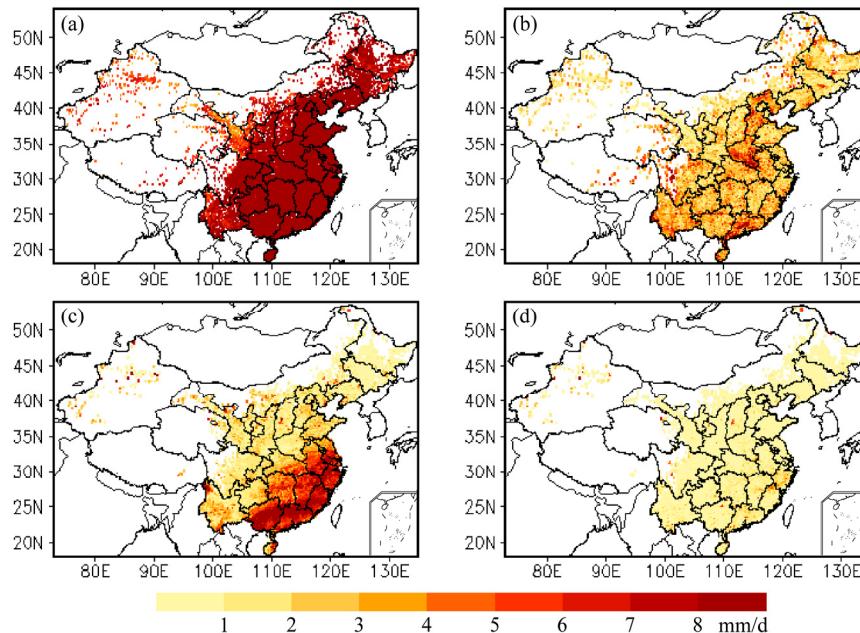


图 4 同图 3, 但为均方根误差

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for root-mean-square error

域均有大幅减小, 绝大部分地区都在 5 mm/d 以下。均方根最大值依然在河南, 但相融合后减小为 6.1 mm/d。统计表明: 融合后约有 91% 的样本均方根误差小于 5.0 mm/d, 而 CMORPH 降水只有约 2.8% 的样本其均方根误差小于 5.0 mm/d, 可见, 融合

降水的随机误差在我国不同区域均得以有效剔除。

冬季, 均方根误差与夏季相比大幅减弱, 但两广、福建、浙江、江苏中南部这些东南沿海地区以及湖南、江西、安徽等地的均方根误差仍相对较

大, 达 6 mm/d 以上, 最大值在广西, 可达 8.3 mm/d 。融合后, 均方根误差在我国不同区域均有大幅减小, 绝大部分地区都在 2 mm/d 以下。统计表明: 融合后约有 96% 的样本均方根误差小于 2 mm/d , 其中 80% 的样本均方根误差小于 1 mm/d , 而 CMORPH 降水只有约 45% 的样本均方根误差小于 2 mm/d 。

3.3 不同强度降水量的融合资料降水评估

3.3.1 不同强度降水日数

根据降水强弱, 将日降水量 (R , 单位: mm/d) 分为 15 个不同的等级: (1) $R=0$; (2) $0 < R \leq 0.5$; (3) $0.5 < R \leq 1$; (4) $1 < R \leq 2$; (5) $2 < R \leq 3$; (6) $3 < R \leq 4$; (7) $4 < R \leq 5$; (8) $5 < R \leq 7$; (9) $7 < R \leq 10$; (10) $10 < R \leq 13$; (11) $13 < R \leq 16$; (12) $16 < R \leq 20$; (13) $20 < R \leq 25$; (14) $25 < R \leq 30$; (15) $R > 30$ 。分析各量级降水日数占总日数的百分比情况, 来考查融合降水在不同等级降水量下的融合效果。结果表明: 融合前后都低估了无降水日的频率, 且融合后低估的更多 (地面观测无雨日数百分比为 64.9%, 融合前百分比为 64.3%, 融合后为 60.9%) (图略)。其它各等级降水中 (图 5), 融合前高估了小于等于 2 mm/d 的降水日数, 低估了大于 2 mm/d 的降水日数; 融合后, 高估了小于等于 7 mm/d 的降水日数, 低估了大于 7 mm/d 的降水日数, 表明融合降水资料进一步高估了 $2 \sim 7 \text{ mm/d}$ 之间的降水日数。随着降水等级的增加, 融合降水在雨强大于 4 mm/d 之后的日数分布与地面格点降水的分布更为接近。

3.3.2 不同强度降水量

对于不同等级降水量而言, 以地面观测降水量为准, 评估 CMORPH 降水和融合降水的平均偏差与均方根误差的变化情况。由图 6 看出: 随着降水量的增加, CMORPH 降水的平均偏差由正值变化为负值: 雨强小于等于 5.0 mm/d 的降水偏差为正值, 雨强大于 5.0 mm/d 的降水偏差为负值, 表明融合前高估了雨强小于等于 5.0 mm/d 的低值降水, 低估了雨强大于 5.0 mm/d 的高值降水。且随着降水量级的增加, $(0, 5]$ 雨强之间的高估值逐渐减小, 雨强大于 5 mm/d 的低估值逐渐增大, 雨强大于 30 mm/d 的降水偏差可达到 -18.1 mm/d ; 融合后, 平均偏差也由正值向负值变化, 但正负值交点由融合前的 5.0 mm/d 变成融合后的 4 mm/d , 表明融合后进一步低估了雨强在 $4 \sim 5.0 \text{ mm/d}$ 的降水。随着等级增加, $(0, 4]$ 雨强之间的高估值逐渐减小,

雨强大于 5 mm/d 的低估值逐渐增大, 但同一量级下的低估值和高估值均远远小于融合之前, 且降水强度越大改善效果越明显, 如雨强大于 30 mm/d 的降水偏差从融合前的 -18.1 mm/d 减小为融合后的 -3.4 mm/d ;

对均方根误差而言, 融合前后的均方根误差均随着雨强的增加而增加, 但是融合后同一量级下的均方根误差比融合前大幅减小, 且降水强度越大改善效果越明显: 雨强小于等于 0.5 mm/d 的均方根误差由融合前的 3.4 mm/d 减小为融合后的 0.8 mm/d , 雨强大于 30 mm/d 的均方根误差由 34.9 mm/d 减小为融合后的 8.8 mm/d 。

不同量级降水的质量评估可以看出, 融合后降水场低估了无降水日数, 高估了小于等于 7 mm/d 的降水日数, 低估了大于 7 mm/d 的降水日数。且在雨强大于 4 mm/d 之后, 融合降水日数的 PDF 分布与地面格点降水的分布更为接近。在降水量上, 虽然融合后对小于等于 4 mm/d 低值降水量仍有所高估, 对大于 4 mm/d 的高值降水量有所低估, 但相对于融合前, 融合后的各等级平均偏差和均方根误差均明显减小, 且随着降水强度的增加改善越明显。

3.4 站点密度不同区的融合效果分析

为了检验融合降水在不同站点密度下的融合效果, 选取我国站点稀疏区和稠密区做比较。站点稀疏区选取了分布最为稀疏的新疆南部、青海大部、青藏高原及四川盆地西部等地区 ($22^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$), 稠密区选取了站点较为密集的长江中下游地区 ($28^{\circ}\text{N} \sim 32^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$), 分别统计了 0.1° (纬度) $\times 0.1^{\circ}$ (经度) 网格内雨量计个数为 0、1 和大于等于 2 时, 融合降水与地面观测降水和 CMORPH 降水均方根误差和相关系数的大小 (图 7 为稀疏区, 图 8 为稠密区)。

3.4.1 稀疏区域

稀疏区 (图 7) 的统计结果表明: 当雨量计个数为 0 时, 融合降水与地面观测降水的差异最为明显, 3 年平均的均方根误差为 5.28 mm/d , 相关系数为 0.53。之后随着雨量计个数的增加, 融合产品与地面观测降水的均方根误差逐渐减小 (雨量计个数为 1 时均方根误差是 3.56 mm/d , 雨量计个数大于等于 2 时减小为 3.22 mm/d); 相关系数逐渐增大 (雨量计个数为 1 时相关系数是 0.89, 雨量计个数大于等于 2 时增大为 0.91), 说明随着雨量计个数的增

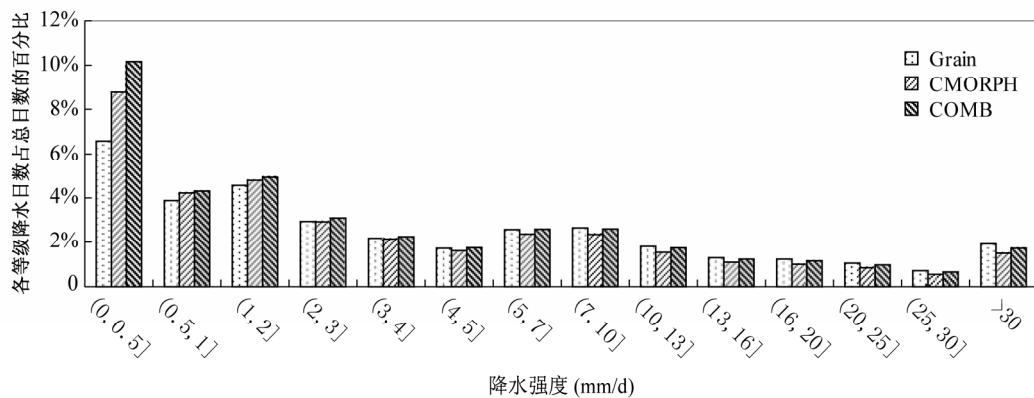


图5 地面格点降水(Grain)、CMORPH降水、融合降水在不同降水等级下的降水日数占总日数的百分比

Fig. 5 The percentage of the number of days under the different daily rainfall rate for gauge-based precipitation (Grain), CMORPH, and COMB

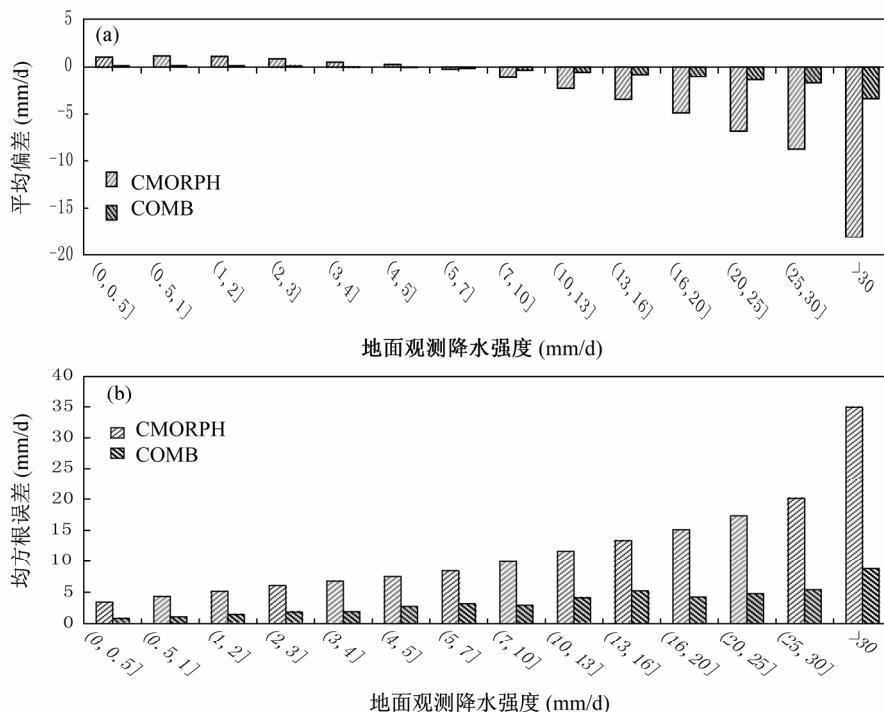


图6 2008~2010年1~11月不同降水量级下CMORPH降水、融合降水与地面格点降水的(a)平均偏差和(b)均方根误差

Fig. 6 (a) Mean bias and (b) root-mean-square error for CMORPH and COMB under the different daily rainfall rate from January to November during 2008–2010 over China

加，融合降水的量值与地面观测降水更为接近，空间分布也与地面观测降水更趋一致。

融合降水与CMORPH降水的均方根误差在雨量计个数为0时为3.36 mm/d，相关系数为0.86，之后随着雨量计个数增加，均方根误差增大明显（雨量计个数为1时均方根误差是5.67 mm/d，雨量计个数大于等于2时增大为6.16 mm/d）；相关系数减小（雨量计个数为1时相关系数是0.68，雨量计个数大于等于2时减小为0.64），表明随着雨量计个数的增加，融合降水与CMORPH降水的量值

差异变大，空间分布趋于不一致。特别是当雨量计个数为0时，融合降水与地面观测降水和CMORPH降水的均方根误差分别是5.28 mm/d和3.36 mm/d，表明此时融合降水的量值与CMORPH降水更为一致；而相关系数的增大（由0.53增加到0.86）说明融合降水的空间分布主要取决于卫星产品。以上分析说明，在站点稀疏区没有站点分布时，融合降水值主要取决于卫星产品。但随着站点个数的增加，地面观测降水在融合中所占比重逐渐增大，且超过了卫星产品的作用。

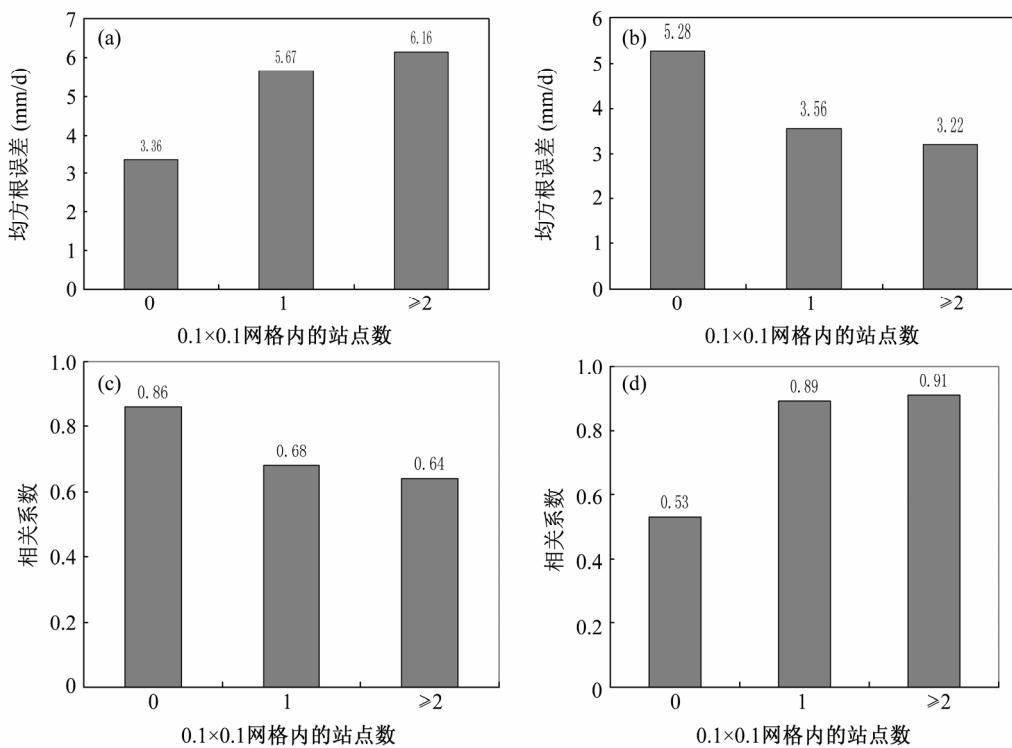


图 7 站点稀疏区不同雨量计个数下 (a、c) CMORPH 降水与融合降水之间、(b、d) 地面观测降水与融合降水之间 (a、b) 均方根误差和 (c、d) 相关系数的变化

Fig. 7 (a, b) Root-mean-square error and (c, d) correlation coefficient under different gauge numbers in the sparsely-stationed area between (a, c) CMORPH and COMB, (b, d) Grain and COMB

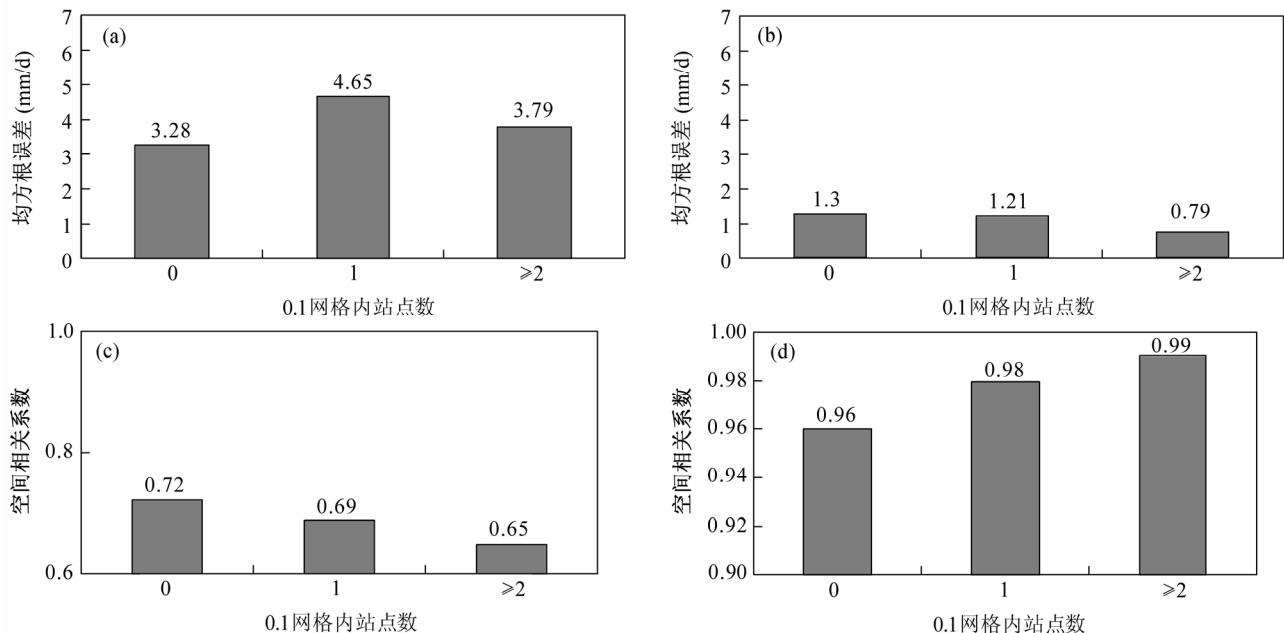


图 8 同图 7, 但为站点密集区

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for densely-stationed area

3.4.2 密集区域

密集区 (图 8) 的统计结果表明：当雨量计个数为 0 时，融合降水与 CMORPH 降水的差异最为

明显，3 年平均的均方根误差为 3.28 mm/d，相关系数为 0.72。之后随着雨量计个数的增加，融合降水与地面观测降水的均方根误差略有增加的趋势（雨

量计个数为 1 时均方根误差是 4.65 mm/d , 雨量计个数大于等于 2 时为 3.79 mm/d ; 相关系数逐渐减小(雨量计个数为 1 时相关系数是 0.69, 雨量计个数大于等于 2 时减小为 0.65), 表明融合降水与卫星降水的量值差异变大, 空间分布趋于不一致。

融合降水与地面观测降水的均方根误差在雨量计个数为 0 时为 1.3 mm/d , 相关系数是 0.96, 之后随着雨量计个数增加, 均方根误差减小(雨量计个数为 1 时是 1.21 mm/d , 雨量计个数大于等于 2 时减小为 0.79 mm/d); 相关系数增加(雨量计个数为 1 时相关系数是 0.98, 雨量计个数大于等于 2 时增加为 0.99), 说明随着雨量计个数的增加, 融合产品的量值与地面观测降水更为接近, 空间分布也与地面观测降水更趋一致。特别是当雨量计个数为 0 时, 融合降水与地面观测降水和 CMORPH 降水的均方根误差分别是 1.3 mm/d 和 3.28 mm/d , 表明此时融合降水的量值与地面观测降水更为一致; 而相关系数的增大说明密集区融合降水的空间分布主要取决于地面观测降水。以上分析说明, 在站点密集区融合降水值主要取决于地面观测降水。

站点疏密度对融合效果的影响可以看出: 稀疏区域和密集区域的融合产品质量都与站网密度有关, 站网越密集融合效果越好, 这与沈艳等(2013)的结论是一致的。但是, 必须注意的是, 稀疏区和密集区域的卫星资料在融合产品中的重要性不一样: 因为东部站点已经足够密集, 因而卫星资料在密集区域的融合作用不大; 而在西部网格内无观测站点时, 融合资料主要取决于卫星资料, 有观测站时, 稀疏区域的融合资料主要取决于地面观测站资料, 且网格内站点数越多, 融合与地面观测的误差越小。这也是跟融合理念是一致的。

4 结论

高分辨率的降水数据是大气、气候、水文、生态模式所需要的重要输入参数, 也是监测和评估模式预报、预测准确性的必要数据。利用国家气象信息中心研制的全国 30000 多个地面自动站降水资料与 CMORPH 卫星反演降水产品融合而成的融合降水产品, 本文分别从融合降水平均偏差和均方根误差的时空分布特征、不同降水量级以及站点稀疏区、密集区的融合效果方面对比评估了该产品的精度, 表明:

(1) 融合降水的平均偏差和均方根误差随时间的变化幅度明显减小, 呈现出暖季大于冷季的特征。3 年平均的偏差值由 -0.67 mm/d 减小为融合后的 -0.2 mm/d , 均方根误差由 8.4 mm/d 减小为融合后的 2.5 mm/d , 相对偏差由 -7.9% 减小为 -3.7% 。平均偏差在 $\pm 0.5 \text{ mm/d}$ 之内的样本百分率占 94.5%, 均方根误差小于 5.0 mm/d 的样本百分率约 97%;

(2) 融合降水的平均偏差和均方根误差的区域性差异特征明显减弱, 并呈现出夏季误差大于冬季的特征。夏季, 平均偏差在 $\pm 0.5 \text{ mm/d}$ 之内的样本百分率占 65%, 均方根误差小于 5.0 mm/d 的样本百分率约 91%; 冬季, 平均偏差在 $\pm 0.5 \text{ mm/d}$ 之内的样本百分率超出 96%, 均方根误差小于 2.0 mm/d 的样本百分率约 96%;

(3) 融合后降水场低估了无降水日数, 高估了小于等于 7 mm/d 的降水日数, 低估了大于 7 mm/d 的降水日数; 且融合降水在雨强大于 4 mm/d 之后的日数分布与地面观测降水的分布更为接近。在降水量上, 虽然融合后对小于等于 4 mm/d 低值降水量仍有所高估, 对大于 4 mm/d 的高值降水量有所低估, 但相对于融合前, 融合后的各等级平均偏差和均方根误差均明显减小, 且随着降水强度的增加改善越明显;

(4) 不同站点数的融合效果表明: 站点密集区的融合降水值主要是取决于地面观测降水; 站点稀疏区在 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度) 网格内没有站点分布时, 融合降水值主要取决于卫星产品, 但随着站点个数增加, 地面观测降水在融合降水中的所占比重逐渐增大, 且超过了 CMORPH 降水的作用。

参 考 文 献 (References)

- 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. Hydrol.*, 24: 1147–1167.
韩永, 赵凤生, 张鉴. 2003. 卫星—地面观测数据融合方法研究 [J]. 量子电子学报, 20 (2): 222–228. Han Yong, Zhao Fengsheng, Zhang Jian. 2003. Method of satellite-ground observational data amalgamation research [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese)*, 20 (2): 222–228.
Huffman G J, Adler R F, Rudolf B, et al. 1995. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information [J]. *J. Climate*, 8: 1284–1295.

- 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.
- 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. Hydrol.*, 305: 487–503.
- 刘洪鹏, 刘文. 2003. 省域卫星估测降水的资料融合技术及精度分析 [J]. *山东气象*, 23 (4): 22–23. Liu Hongpeng, Liu Wen. 2003. Amalgamating technique of satellite estimation with regional rainfall data and precision analysis[J]. *Journal of Shandong Meteorology* (in Chinese), 23 (4): 22–23.
- 潘旸, 宇婧婧, 廖婕, 等. 2011. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析 [J]. *气象*, 37 (5): 564–570. Pan Yang, Yu Jingjing, Liao Jie, et al. 2011. Assessment on the rainfall monitoring of typhoon Morakot by ground-gauged and satellite precipitation products [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37 (5): 564–570.
- 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [J]. *气象学报*, 70 (6): 1381–1389. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China on the OI technique [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (6): 1381–1389.
- 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. Ren Zhihua, Zhao Ping, Zhang Qiang, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 36 (7): 123–132.
- 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): 17.
- 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. Shen Yan, Feng Mingnong, Zhang Hongzheng, et al. 2010. Interpolation methods of China daily precipitation data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 21 (3): 279–286.
- 沈艳, 潘旸, 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 Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation products over China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 36 (1): 37–46.
- Sun X, Manton M J, Ebert E E. 2003. Regional rainfall estimate using double kriging of rain gauge and satellite observations [R]. BMRC research report NO. 94.
- Tian Y D, Peters-Lidard C D, Eylander J B. 2010. Real-time bias reduction for satellite-based precipitation estimates[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 11:1275–1285.
- Xie P P, Arkin P A. 1996. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions [J]. *J. Climate*, 9: 840–858.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrol.*, 368: 607–626.
- 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 2011. 基于地面观测降水订正卫星反演降水系统误差 (PDF) 方法在中国地区的应用 [C]. 2011年中国气象学会气象通信与信息技术委员会暨国家气象中心科技年会论文摘要: 461–471.
- Yu Jingjing, Shen Yan, Pan Yang, et al. 2011. Bias adjustment of high spatial/temporal resolution satellite precipitation estimation relying on gauge-based precipitation over China [C]. Collected Objects of Annual Scientific Meeting of Communications and Information Technology Weather Committee of Chinese Meteorological Society, 461–471.
- 翟茂常, 朱海. 2000. ECMWF再分析日降水量与CMAP候降雨量在中国境内的数据整合 [J]. *地球科学进展*, 15 (1): 440–445. Zhai Maochang, Zhu Hai. 2000. Combination of ECMWF reanalyzed daily rainfall and pentad CAMP in China [J]. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 15 (1): 440–445.