

文章编号:2096 - 5389(2022)03 - 0009 - 07

融合格点降水产品在四川盆地西部 一次极端暴雨过程中的评估分析

宋雯雯^{1,2}, 龙柯吉^{1,3}, 黄晓龙^{1,4}, 王彬雁^{1,3}

(1. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 2. 四川省气象服务中心, 四川 成都 610072;
3. 四川省气象台, 四川 成都 610072; 4. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610072)

摘 要:利用地面降水观测资料、国家气象信息中心研发的 4 种降水融合产品 (FAST_5 km、FRT_5 km、RT_1 km、NRT_1 km), 采用误差分析、偏差分析、正确率、TS 评分等方法, 对其在四川盆地西部的适用性进行分析, 并选取 2020 年 8 月 10—11 日一次极端暴雨过程进行详细评估。结果表明:融合格点降水资料与实况较为一致, 且 1 km 产品更接近实况。极端暴雨过程中, 对于过程累积雨量, 4 种融合格点降水资料均能很好地反映此次降水过程, 降水落区、走向和雨带形态均与实况较为一致。1 km 产品的强度和落区都更接近实况, 其中以 NRT_1 km 与实况的匹配度最高, 偏差更小。融合格点降水资料存在 24 h 雨量极大值比实况偏小的情况, 1 km 产品的极值较 5 km 产品有很大提升。融合格点降水资料的小时最大降水量低于实况, 存在一定的偏差量。强降水时段, 融合降水资料与实况偏差不大, 能够反映降水的大值区。总体上看, 三源融合实况格点产品效果优于二源融合实况格点产品, 其中融合了 CMORPH 和 FY 2 种卫星资料的近实时三源融合实况格点产品最优。

关键词:四川盆地; 极端暴雨; 降水融合产品; 评估

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Evaluation and Analysis of an Extreme Rainstorm Process in Western Sichuan Basin Based on Merged Grid Precipitation Products

SONG Wenwen^{1,2}, LONG Keji^{1,3}, HUANG Xiaolong^{1,4}, WANG Binyan^{1,3}

(1. Key Laboratory of Heavy Rain and Drought/Flood Disaster in Plateau and Basin of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Meteorological Service Center, Chengdu 610072, China;
3. Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China;
4. Sichuan Provincial Meteorological Observation and Data Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the surface precipitation observation data and the four merged precipitation products (FAST_5 km, FRT_5 km, RT_1 km, NRT_1 km) developed by National Meteorological Information Center, analysis was performed for the applicability of the merged precipitation products in western Sichuan Basin by using error analysis method, variance analysis method, accuracy method and TS score method. Detailed evaluation was performed for an extreme rainstorm process occurred during 10th Aug to 11th Aug in 2020. The results show merged precipitation products was nearly consistent with the observation data, and the 1 km product was closer to

收稿日期:2021 - 05 - 17

第一作者简介:宋雯雯(1986—),女,高工,主要从事专业气象服务研究工作,E-mail:songww8682@sina.com。

通讯作者简介:龙柯吉(1987—),女,高工,主要从事天气学与数值预报研究工作,E-mail:longkeji945@163.com。

资助项目:中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(2021KLAS02M);基于卫星遥感的川渝城市化进程同极端降水的相关性研究;高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室重点专项(SCQXKJZD2020002);基于网格实况的模式降水偏差定量检验及订正试验;高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室面上项目(SCQXKJYJXMS202117、SCQXKJYJXMS202118);基于智能网格降水的流域面雨量集成预报技术研究、西南山区铁路敏感路段短时强降水预警指标研究;中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z07);中国 1 km 网格实况分析产品研发与业务应用。

the observation data. For the accumulative precipitation of the extreme rainstorm process, the four merged products could reflect the precipitation process well, and the precipitation area, trend and rain band pattern were consistent with the observed data. The precipitation intensity and area from 1 km product was closer to the observed data, and the NRT_1 km had the highest matching degree and smallest deviation compared to the observation data. The 24 h rainfall maximum value of merged precipitation products was smaller than observation data, and the maximum value from 1 km product had a big improvement compared to 5 km product. The hourly maximum precipitation of merged precipitation products was smaller than observation data, and there was a certain amount of deviation. During the strong precipitation period, merged precipitation products were nearly consistent with the observation data, and could reflect the greater value area of the precipitation process. On the whole, the effect of three - source merged grid products were better than that of two - source merged grid products, and the near real - time three - source merged grid product integrating CMORPH and FY satellite data was the best.

Key words: Sichuan Basin; rare severe rainstorm; merged precipitation products; evaluation

0 引言

暴雨是四川盆地最严重的气象灾害之一。每年夏季,四川盆地均会不同程度地受暴雨影响,尤其是极端暴雨造成的强降水灾害和衍生地质灾害,常常给当地造成重大经济损失。四川盆地位于青藏高原东南边缘,地形复杂,站点观测资料相对稀疏,雷达卫星资料反演难度也较高,资料缺乏对四川盆地暴雨研究及预报有一定影响。国家气象信息中心利用数据融合与数据同化技术,综合多种来源观测资料及多模式模拟数据,获得了高精度、高质量、时空连续的多源数据融合气象格点产品,将常规观测、天气雷达、卫星等多种资料进行融合,研发了多种二源(地面、卫星)和三源(地面、雷达、卫星)实况降水融合产品^[1-5]。目前,不少学者已对该产品的运用效果进行了分析^[6-8]。俞剑蔚等^[9]评估了国家级格点实况产品在江苏地区的适用性,指出:格点降水产品一定程度地弱化了大雨以上量级降水强度。苏传程等^[10]将多种降水融合产品在“苏迪罗”台风中的监测效果进行对比,得到在降水关键区内,多源融合降水产品较多卫星集成降水产品更为准确。许冠宇等^[11]对 2018 年发生在长江流域的 8 次大范围降水过程进行评估,指出降水融合产品对嘉陵江、岷沱江、长江中游干流区域的估测降水误差相对较小。那么融合降水产品在地形复杂区域的适用性怎么样呢?

本文采用误差分析、偏差分析、正确率、TS 评分等方法,对 4 种降水融合产品(FAST_5 km、FRT_5 km、RT_1 km、NRT_1 km)在四川盆地西部的适用性进行检验评估,为进一步在四川盆地合理科学应用该产品奠定基础。

1 资料与方法

1.1 资料

融合格点降水资料包括 5 km × 5 km 分辨率的地面—卫星二源实况格点(FAST_5 km)和地面—卫星—雷达三源实况格点(FRT_5 km)资料、1 km × 1 km 分辨率的三源实时实况格点(RT_1 km)和三源近实时实况格点(NRT_1 km)资料,其空间范围在 70 ~ 140°E, 0 ~ 60°N。二源融合实况格点资料是国家气象信息中心基于美国气候预测中心的“概率密度函数 + 最优插值”法,首先采用概率匹配法来订正卫星降水的系统偏差,再采用最优插值法实现背景场与观测场的有效结合,研制的地面和风云卫星二源融合格点降水产品。三源融合格点降水资料是在二源融合方法上进一步拓展,提出了“概率密度函数 + 贝叶斯模型平均 + 最优插值”的三源降水融合方法。首先,采用概率密度函数匹配法订正雷达估测、卫星反演降水产品的系统性偏差;其次,采用贝叶斯模型平均方法将雷达估测和卫星反演降水产品结合,形成一个完整覆盖中国的背景场;最后,采用最优插值方法融入地面观测,研制出地面—雷达—卫星三源融合格点降水产品。对 1 km 降水融合产品,先采用 1 km 分辨率雷达降水信息,对 5 km 分辨率“概率密度函数 + 贝叶斯模型平均”优化后的卫星—雷达联合降水场进行降尺度,再与地面观测信息最优插值融合。其中,实时实况格点(RT_1 km)数据源主要来自地面、雷达、FY2,近实时实况格点(NRT_1 km)数据源主要来自地面、雷达、FY、美国气候预测中心研发的实时卫星反演降水系统 CMORPH 的降水产品^[12]。

站点实况降水资料包括四川盆地西部绵阳、德阳、成都、阿坝 4 个市州国家站及加密自动站资料中

降水水质控码为 0 的数据。

以站点的经纬度为准,选取融合格点降水资料中离站点最近的格点,并将格点值赋给站点,从而将融合格点降水资料转化为站点降水资料。下文基于融合站点资料与实况站点资料之间的对比分析,在计算 24 h 累计雨量时,当某站点有小时资料缺测,不进行统计。

1.2 方法

采用误差、准确率和 TS 评分等指标进行评估,具体如下:

相关系数(COR):

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$
 (1)

平均值误差(ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)$$
 (2)

平均绝对误差(MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i - O_i|$$
 (3)

均方根误差(RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2}$$
 (4)

式(1)~(4)中, O_i 为站点观测值, G_i 为融合格点降水产品插值到检验站点得到的数值, N 为参与检验的总样本数(站次)。

晴雨准确率(PC):

$$PC = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND}$$
 (5)

TS 评分:
$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC}$$
 (6)

式(5)~(6)中, NA 为融合产品与实况站点均发生降雨的站点数; NB 为融合产品发生而实况站点不发生的站点数; NC 为融合产品不发生而实况站点发生的站点数; ND 为融合产品和实况站点均不发生的站点数。

2 融合格点降水产品总体评估

2020 年 8 月,四川盆地西部发生了 3 次区域性暴雨,雨量突破历史极值,本文选取 2020 年 8 月 4 种融合格点降水产品进行总体评估(表 1)。相关系数显示:4 种融合格点降水产品与实况高度相关,且都通过了显著性检验,RT_1 km 和 NRT_1 km 与实况的相关系数高达 0.983。平均绝对误差上,RT_1 km 和 NRT_1 km 都在 2.5 mm 以内,FAST_5 km 最

大,超过 5 mm。RT_1 km 和 FAST_5 km 的平均误差为负,NRT_1 km 和 FAST_5 km 的平均误差为正,且 RT_1 km 值最小。NRT_1 km 的均方根误差最小,FAST_5 km 均方根误差最大。

表 1 2020 年 8 月融合格点降水产品评估结果

Tab. 1 Evaluation results of merged precipitation products in August, 2020

	COR	MAE/mm	ME/mm	RMSE/mm
RT_1 km	0.983	2.491	-0.006	7.631
NRT_1 km	0.983	2.481	0.02	7.604
FAST_5 km	0.927	6.293	0.787	15.679
FRT_5 km	0.953	4.858	-0.46	12.746

从准确率来看(图 1),RT_1 km 和 NRT_1 km 晴雨准确率接近 95%,FAST_5 km 和 FRT_5 km 接近 88%。小雨和中雨准确率中,RT_1 km 和 NRT_1 km 都超过了 92%,FAST_5 km 和 FRT_5 km 准确率在 82%~85%之间。随着降雨量级的增大,4 种融合格点降水产品的准确率略有下降,大雨和暴雨中,RT_1 km 和 NRT_1 km 接近 90%,FAST_5 km 和 FRT_5 km 下降到 75%~82%。总体上看,在四川盆地西部,融合格点降水产品和实况基本一致,且 1 km 融合格点降水产品表现最优,说明融合了地面、雷达、卫星的三源实况格点产品比只融合了地面、卫星的二源实况格点效果更好,其中融合了 CMORPH 和 FY 2 种卫星资料的近实时三源融合实况格点产品最优。

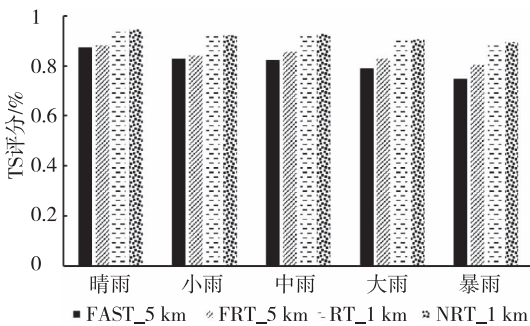


图 1 不同融合格点降水产品 TS 评分

Fig. 1 TS score of merged precipitation products

3 极端暴雨过程评估

3.1 降雨实况

2020 年 8 月 10—11 日,四川盆地西部出现了一次极端暴雨天气过程,大部降了暴雨、大暴雨,部分地方降了特大暴雨。从 2020 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时 24 h 累积降水量可知(图 2a),四川盆地西部绵阳、德阳、成都 3 市普降大暴雨,局地特大暴雨。降雨量 50~100 mm 有 142 站,大于 100 mm 有

332 站,大于 250 mm 有 38 站。最大降水出现在成都市彭州濛阳三界场,为 373.8 mm。其中,绵竹、什邡、蒲江 3 县均创有气象记录以来日降水量极值,郫县、崇州 2 县达有气象记录以来第 2 高值,温江、大邑、彭州、都江堰 4 县达有气象记录以来第 3 高值。

3.2 偏差分析

从 2020 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时融合格点降水资料的分布可知(图 2),4 种融合格点降水

资料的降水落区和走向均与实况较为一致,都在四川盆地西部一带出现了暴雨与大暴雨。不同的是在阿坝州的九寨沟、红原中雨以上量级的降水中,4 种资料略有差异,以 1 km 产品较优。从偏差分布来看(图 3),偏差大值区主要集中在降水量级大的区域,即阿坝州东部的松潘与茂县一带,5 km 产品对于阿坝州东部一带负偏差更为明显,表明融合降水产品对于小量级降水把握较好,大量级存在一定偏差。

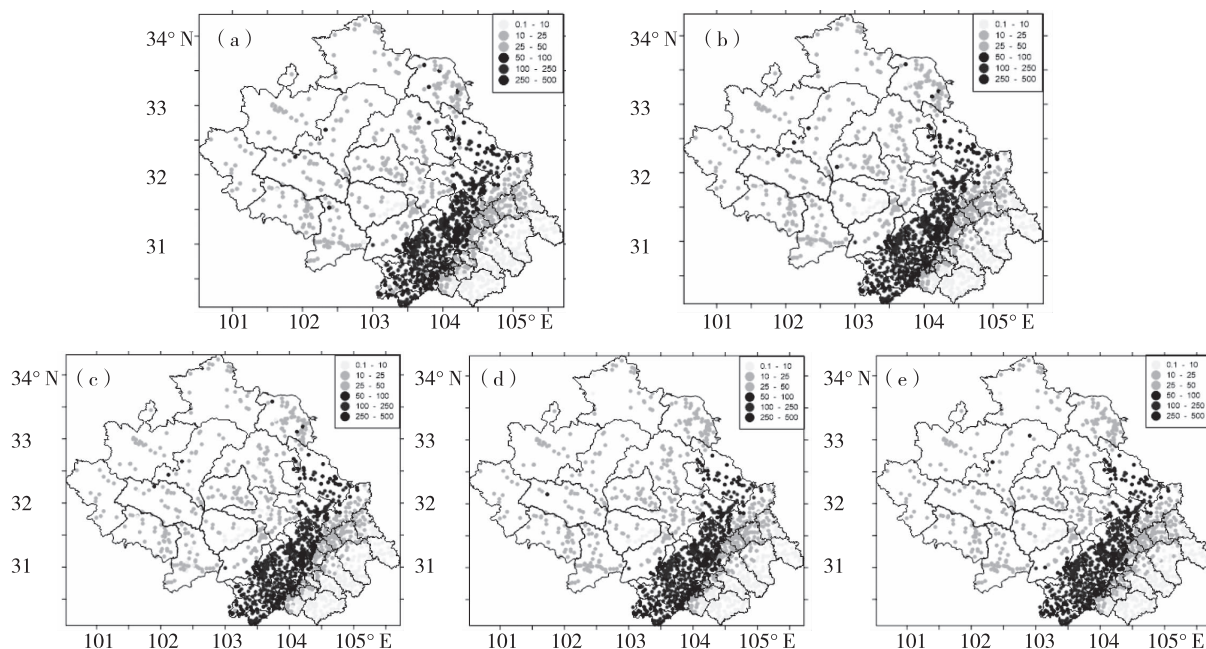


图 2 2020 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时 24 h 累积雨量空间分布图(单位:mm)

(a、实况;b、RT_1 km;c、NRT_1 km;d、FAST_5 km;e、FRT_5 km)

Fig. 2 Spatial distribution of 24 h accumulative rainfall from 20:00 10th to 20:00 11th August, 2020 (unit:mm)

(a. observed data; b. RT_1 km; c. NRT_1 km; d. FAST_5 km; e. FRT_5 km)

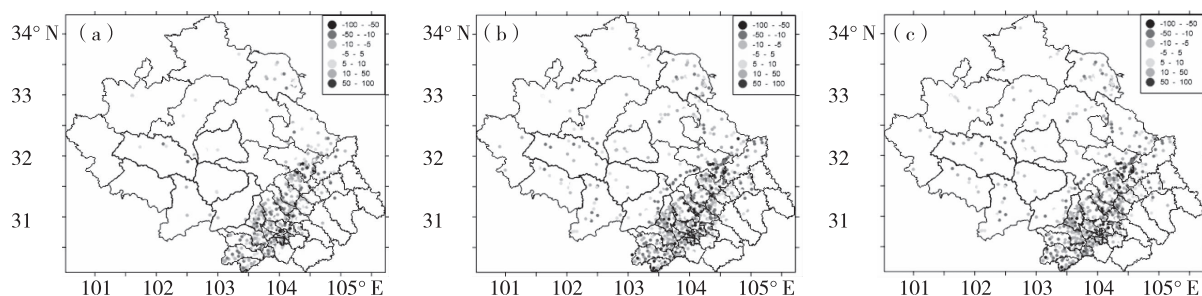


图 3 2020 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时 24 h 累积雨量偏差空间分布图(单位:mm)

(a、实况 - NRT_1 km;b、实况 - FAST_5 km;c、实况 - FRT_5 km)

Fig. 3 Spatial distribution of 24 h accumulative rainfall deviation from 20:00 10th to 20:00 11th August, 2020 (unit:mm)

(a. observed data - NRT_1 km; b. observed data - FAST_5 km; c. observed data - FRT_5 km)

3.3 正确率与 TS 评分分析

在晴雨预报中,4 种融合格点降水资料的正确率相当(图 4),都达到 97% 以上,相对而言,1 km 产品略优,达到 98%。从分级 TS 评分上可以看出(图 4),4 种融合格点降水资料的 TS 评分都随着量级的

增大而减小,相对而言 1 km 产品的评分减小幅度更小,在各个量级均优于 5 km 产品,并随着量级的增加优势更为明显,评分更高,1 km 产品特大暴雨的 TS 评分能达到 75% 以上,而 5 km 产品仅 50% 左右。总体来看,NRT_1 km 最优,FAST_5 km 最差。

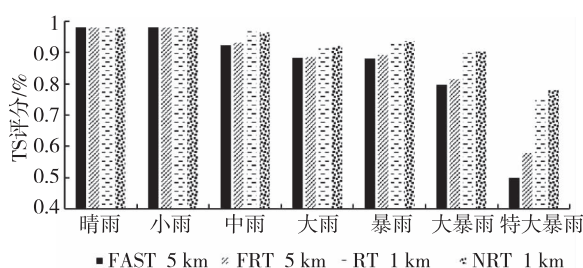


图4 2020年8月10日20时—11日20时24 h

累积雨量晴雨预报准确率及分级降水 TS 评分

Fig. 4 Forecast accuracy of 24 h accumulative rainfall and TS score of graded precipitation from 20:00 10th to 20:00 11th August, 2020

3.4 最大降雨量分析

在24 h累积降水量中,最大降水出现在成都市彭州濛阳三界场,为373.8 mm。1 km融合格点降水资料的最大降水也出现在彭州濛阳三界场,落区没有偏差,雨量分别为353.56 mm和355.03 mm,雨量略偏小。5 km融合格点降水资料的最大降水则出现在德阳什邡马井金牛,与实况相比位置偏北,且雨量为312.72 mm和320.69 mm,与实况相比明显偏小。以上分析可知,4种融合格点降水资料与实况相比都偏小,相对而言1 km产品更接近实况。

3.5 逐小时雨量分析

那融合格点降水资料的小时雨量极大值存在与24 h累积雨量相似的情况吗?为了解答这个问题,选取24 h累积降水最大站成都市彭州濛阳三界场为代表站进行分析。通过图5的逐小时雨量变化图可以看出,4种融合格点产品均能表现出降水的趋势,其中实况的小时雨量峰值出现在11日11时,达80.0 mm,融合格点降水资料同样能反应出此特征,1 km产品出现降雨峰值时间与实况一致,雨量偏差为10 mm,而5 km的峰值则偏晚1 h,且降雨峰值明显低于实况。

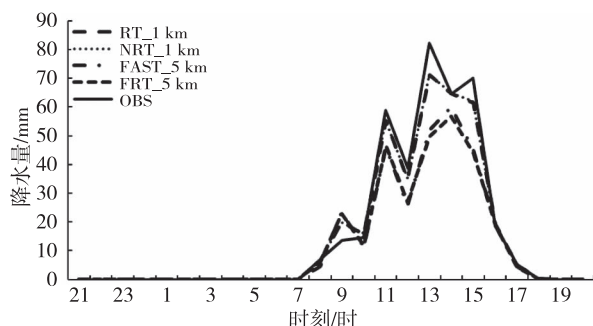


图5 成都市彭州濛阳三界场逐小时雨量变化图

Fig. 5 Chart of hourly rainfall variation in Sanjiechang, Mengyang, Pengzhou, Chengdu

3.6 强降水时段小时雨量对比

进一步分析融合格点降水资料在强降水时段的适用性。从逐小时降水落区的演变情况来看(图略),4种产品的落区和移动均与实况较为一致,阿坝州最大降水出现在凌晨,成都、绵阳、德阳的最大降水则出现在白天,因此选取05时(图6)、13时(图略)作为代表时次,分析融合格点降水资料的小时雨量空间分布情况与实况的差异。从各时次的降水分布图可以看出,阿坝州在夜间降了中—大雨,雨带自西向东移动,4种产品均能表现出这些特征,且从降水量级来看,1 km产品更接近实况。成都、绵阳、德阳降水首先从成都市周围开始发生,逐渐向北延伸至德阳和绵阳,小时强降水主要集中在沿山一带。从融合格点降水资料演变来看,4种产品的降水中心、雨强均与实况有较好的对应性,并且都预报出了小时雨强的演变趋势,但小时雨强50 mm及以下量级降水较实况偏多,50 mm以上较实况偏少,相对而言,1 km产品更优。

图7为实况与4类融合格点降水产品的最大小时雨量分布。由图可见绵阳、德阳、成都西部的最大小时雨强基本在25 mm以上,最大超过125 mm。融合格点降水资料的最大小时雨强空间分布基本与实况一致,但5 km产品的强度明显较实况偏弱,成都市西部5 km产品的降水强度较实况小了一个量级。相对而言,1 km产品更接近实况,且能表征出125 mm的小时雨强。图8为4类融合格点降水资料的最大小时雨量偏差分布。由图可知:差异较为明显的区域主要在成都、绵阳、德阳,这也与强降水区域对应,表明降水强度越大,降水误差更大。1 km产品在绵阳、德阳的偏差在5 mm以内,与5 km产品相比较小。而成都市5 km产品较1 km产品正偏差明显,即比实况偏小,偏差最大区域位于成都市。阿坝州的1 km产品偏差较小,更接近实况。

对比分析逐小时的最大降水量(图9),可以看到4种融合格点降水资料的变化趋势也与实况一致,但融合格点降水资料的小时最大降水量都要低于实况。相对而言 $NRT_1\text{ km} > RT_1\text{ km} > FRT_5\text{ km} > FAST_5\text{ km}$,可见1 km产品对极值的把握较好,相对5 km产品有明显的提升,个别时次降水强度和实况一致。

4 结论与讨论

本文通过将距离站点最近的格点值赋予站点的方法,将融合格点降水资料转化到了站点,对其在四川盆地西部的适用性进行分析,并以2020年8

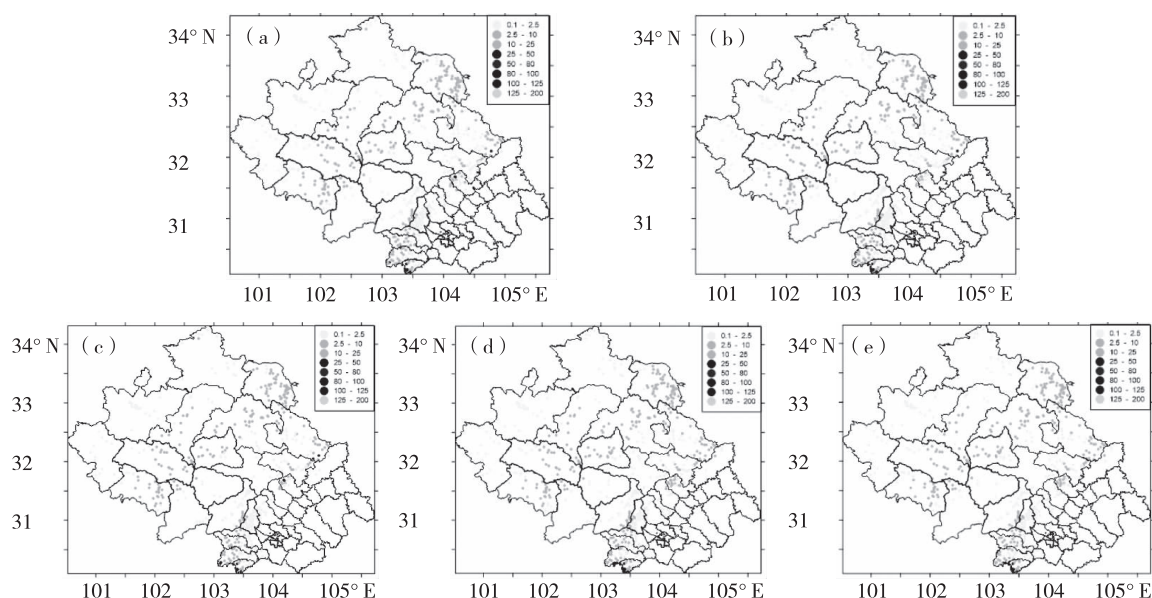


图 6 2020 年 8 月 11 日 05 时降水空间分布图(a. 实况, b~e. 融合格点降水资料)(单位:mm)

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation at 05:00 on 11th

August, 2020 (a. observed data; b~e. merged precipitation products) (unit:mm)

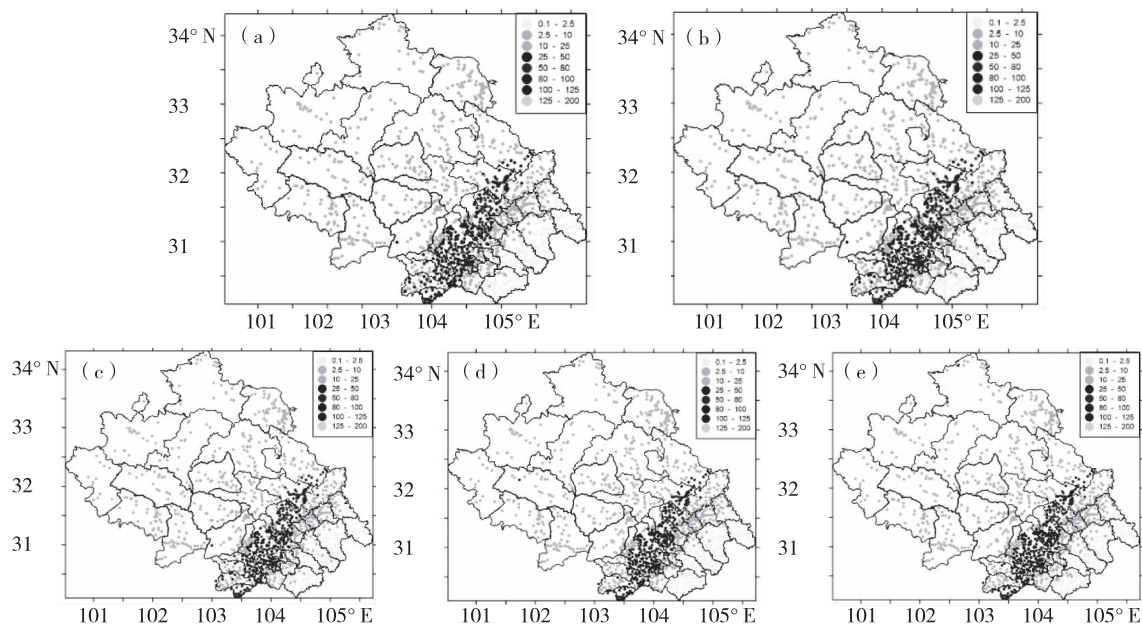


图 7 2020 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时最大小时雨强空间分布图(单位:mm)

(a. 实况; b. RT_1 km; c. NRT_1 km; d. FAST_5 km; e. FRT_5 km)

Fig. 7 Spatial distribution of maximum hourly rainfall intensity during 20:00 10th to 20:00 11th August, 2020 (unit:mm)

(a. observed data; b. RT_1 km; c. NRT_1 km; d. FAST_5 km; e. FRT_5 km)

月 10—11 日的极端暴雨过程为例,与实况站点降水资料进行详细的对比,主要得出以下结论:

① 极端暴雨过程中,对于过程累积雨量,4 种融合格点降水资料均能很好地反映此次降水过程,降水落区、走向和雨带形态均与实况较为一致,1 km 产品的强度和落区都更接近实况;对于暴雨、大暴雨和特大暴雨,均是 1 km 产品的评分优于 5 km 产品,

其中以 NRT_1 km 与实况的匹配度最高,偏差更小。

② 融合格点降水资料存在 24 h 雨量极大值比实况偏小的情况,1 km 产品的极值较 5 km 产品有很大的提升,与实况更为一致。1 km 产品的极值中心与站点实况一致,降水量也与实况相当,5 km 产品则位置存在偏差,强度明显偏小。

③ 融合格点降水资料的小时最大降水量低于

实况,存在一定的偏差量,1 km 产品对极值的把握较好,相对 5 km 产品有明显的提升,个别时次降水强度和实况一致。

④ 强降水时段的小时降水量分布上,融合格点降水资料与实况偏差不大,能够反映降水的大值区,且 1 km 产品优于 5 km 产品。

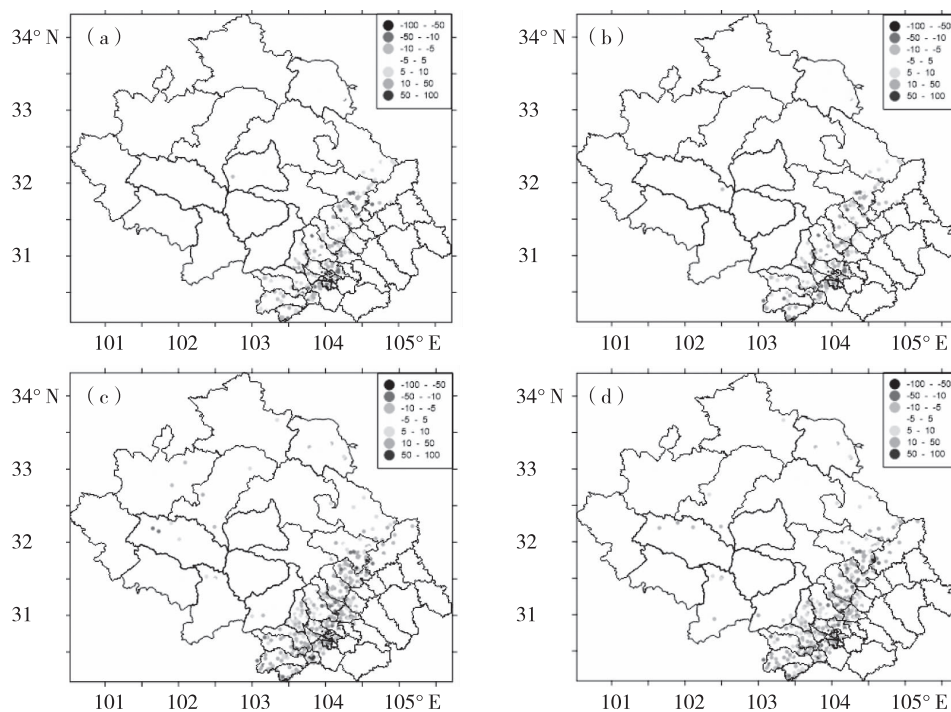


图8 2020年8月10日20时—11日20时最大小时雨强偏差空间分布图

(a. 实况 - RT_1 km; b. 实况 - NRT_1 km; c. 实况 - FAST_5 km; d. 实况 - FRT_5 km)

Fig.8 Spatial distribution of maximum hourly rainfall intensity deviation during 20:00 10th to 20:00 11th August, 2020

(a. observed data - RT_1 km; b. observed data - NRT_1 km; c. observed data - FAST_5 km; d. observed data - FRT_5 km)

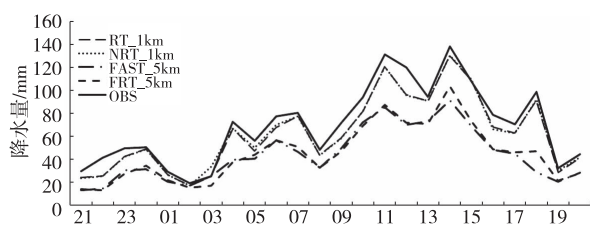


图9 逐小时最大降水量变化

Fig.9 Variations of hourly maximum precipitation

⑤ 融合格点降水资料与实况基本一致,在四川盆地西部的适用性较好,且融合了地面、雷达、卫星的三源实况格点产品比只融合了地面、卫星的二源实况格点效果更好,其中融合了CMORPH和FY2种卫星资料的近实时三源融合实况格点产品最优。

参考文献

[1] 师春香,潘畅,谷军霞,等.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,2019,77(4):774-783.
[2] 李超,唐千红,陈宇,等.多源数据融合系统LAPS的研究进展及其在实况数据服务中的应用[J].气象科技进展,2017,7(2):32-38.
[3] 潘畅,谷军霞,徐宾,等.多源降水数据融合研究及应用进展[J].

气象科技进展,2018,8(1):143-152.

[4] 潘畅,沈艳,宇婧婧,等.基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合试验[J].气象学报,2015,73(1):177-186.
[5] 潘畅,沈艳,宇婧婧,等.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,2012,70(6):1381-1389.
[6] 龙柯吉,谷军霞,师春香,等.多种降水实况融合产品在四川一次强降水过程中的评估[J].高原山地气象研究,2020,40(2):31-37.
[7] 沈艳,潘畅,宇婧婧,等.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,2013,36(1):37-46.
[8] 吴薇,杜冰,黄晓龙,等.四川区域融合降水产品的质量评估[J].高原山地气象研究,2019,39(2):76-81.
[9] 俞剑蔚,李聪,蔡凝昊,等.国家级格点实况分析产品在江苏地区的适用性评估分析[J].气象,2019,45(9):1288-1298.
[10] 苏传程,毛文书,师春香,等.多种降水融合产品对“苏迪罗”台风的监测效果对比[J].成都信息工程大学学报,2016,31(6):614-621.
[11] 许冠宇,李琳琳,田刚,等.国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估[J].暴雨灾害,2020,39(4):400-408.
[12] 潘畅,谷军霞,宇婧婧,等.中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J].气象学报,2018,76(5):755-766.