

文章编号: 2096-1618(2023)01-0057-07

# 夏季中国区域逐 10 分钟降水融合产品检验评估

龙柯吉<sup>1,2</sup>, 王皓<sup>1,3</sup>, 郭旭<sup>4</sup>, 黄晓龙<sup>4</sup>

(1. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 2. 四川省气象台, 四川 成都 610072; 3. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 4. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610072)

**摘要:**为检验逐 10 分钟降水融合产品质量,以中国地面观测分钟降水数据作为“真值”,采用多种评估指标,对 2018 年 7 月国家气象信息中心中国区域 5 km 逐 10 分钟降水融合产品进行检验评估。结果表明:邻近插值法和双线性插值法对月评估和日评估结果的总体影响不大,邻近插值法的评分略优。0.1 mm 量级降水的 TS 评分在 0.6 左右,偏差都偏大,其余量级则偏小,且随着量级的增加,误差逐渐增大,融合产品的极值普遍较实况偏小。强降水过程中,融合产品的落区和变化趋势与实况一致,总体以偏强为主,但 5 mm 以上的强降水区域存在偏弱的情况。总体而言,逐 10 分钟降水融合产品能结合雷达估测降水产品和实况的优势,覆盖范围广,强度与实况相当。

**关键词:**气象学;检验评估;分钟降水;融合产品;插值

**中图分类号:**P426.6

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.01.009

## 0 引言

降水是最为重要的气象要素之一,其时空分布几乎影响着人类活动的方方面面,在全球气候变暖的大背景下,世界各地洪涝灾害有日渐增多的趋势,带来的损失也越来越严重<sup>[1]</sup>。因此,降水相关研究一直以来都是气象业务和科研工作的重中之重。以往研究使用的降水资料以小时、日、月、年数据居多,但在科技快速发展的今天,这些量级的数据已无法满足降水精细化预报和研究的需求。近些年,随着中国自动气象观测站的不断建设和历史资料数字化的持续推进,分钟级降水数据开始得到广泛应用,这使降水研究的时间分辨率显著提高。盛杰等<sup>[2]</sup>利用自动气象站分钟降水量对 3 种不同天气系统影响下的强降水过程进行了统计分析;战云健等<sup>[3]</sup>利用历史降水数字化资料分析了中国夏季分钟降水的空间分布与长期趋势,这些研究都表明,分钟降水量可以很好地弥补小时雨量时间分辨率低的缺陷。

但是,自动站的建设和数字化的推进暂时都无法改变中国气象站网“东密西疏”的具体实际,高时间分辨率的分钟降水数据在空间分布上也受到这一局限性的影响,因此,如何解决这一难题,获得高时空分辨率的降水

数据成为了气象科研工作者的攻关重点。1994 年,全球降水气候计划(global precipitation climatology project, GPCP)提出要充分利用各种数据优点,开发高质量的降水量融合产品<sup>[4]</sup>。自此以后,各国相继开始降水融合产品的研发工作<sup>[5-7]</sup>。格点化的降水融合产品不仅可以弥补气象观测站网空间分布不均匀的缺陷,还能提供高时空分辨率的降水数据。中国的多源气象数据融合研究虽然起步较晚,但是近年来,国家气象信息中心师春香及其团队<sup>[8-20]</sup>始终致力于发展和完善多源数据融合技术,评估分析产品质量,优化升级融合方法,创新研发了降水、气温、土壤湿度等多种融合产品,实现了多种空间分辨率、多种时间尺度的降水实况融合产品的业务发布,逐 10 分钟降水融合产品就是其中之一。

国家气象信息中心 10 分钟降水融合产品包括:逐 10 分钟降水产品和 10 分钟降水累加产品 2 种,高时效的 10 分钟降水产品更加适用于为省级建立高频次短临降水滚动更新业务提供支持。但由于 10 分钟降水融合产品数据量较大,本文将重点对逐 10 分钟降水产品的适用性、产品一致性等进行综合检验和评估,为业务科研人员使用这类产品及对该产品的持续改进提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文检验评估对象为国家气象信息中心研发的

收稿日期:2022-01-07

**基金项目:**中国气象局大气探测重点开放实验室资助项目(2021KLAS02M,2022KLAS01Z);四川省科技厅重点研发计划资助项目(22ZDYF1935);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(SCQXKJYJXZD202201;SCQXKJZD202101;SCQXKJYJXM S202117);中国气象局创新发展专项资助项目(CXFZ2021Z07);四川省自然科学基金重点资助项目(2022NSFC0021)

5 km逐 10 分钟降水格点融合产品,其空间分辨率为  $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$  (5 km $\times$ 5 km),评估范围为中国区域,因资料数据量较大,评估时间为 2018 年 7 月。该降水融合产品是中国气象局全国网格实况分析产品的重要组成部分,先由雷达基数据的反射率因子估测出瞬时降水率,再积分为 10 分钟降水量,之后利用雷达 PUP 产品-1 小时累计降水量进行降水数据的质量控制,最后将质控后的雷达降水量和地面 10 分钟降水量融合,生成逐 10 分钟降水融合产品。

通过 CIMISS 接口获取全国地面分钟降水观测资料作为检验“真值”。研究中由于“真值”为分钟降水量,所以首先将其累加获得 10 分钟降水量,当 10 分钟内的分钟数据质控码为 0(正确)的个数<5 时,则剔除该站点;当质控码为 0 的数据个数 $\geq 5$  时,则将该时段内质控码为 0 的分钟降水量进行累加,取平均值再乘以 10,得到 10 分钟降水量。

1.2 方法

分别利用邻近插值法和双线性插值法将 5 km逐 10 分钟降水融合产品插值到检验评估站点,参与评估的站点为 2380 个国家级地面气象观测站。图 1 为中国国家级地面气象观测站点的空间分布情况,可以看出,站点的分布以东北-西南一线为界,右侧较密集,左侧较稀疏,特别是在西部青藏高原地区,观测站点较稀少。

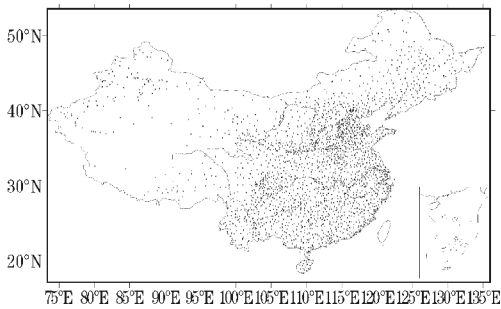


图 1 检验评估站点分布

检验评估指标及计算方法参考中国气象局《实况分析产品质量评估规范(2019 版)》,具体指标包括:相关系数 COR、偏差 BIAS、平均误差 ME、平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE、TS 评分、准确率 PC、空报率 FAR 和漏报率 PO,具体公式如下:

$$\begin{aligned} \text{COR} &= \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \\ \text{ME} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MAE} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i - O_i| \\ \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2} \\ \text{BIAS} &= \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \\ \text{PC} &= \frac{\text{NA} + \text{ND}}{\text{NA} + \text{NB} + \text{NC} + \text{ND}} \\ \text{TS} &= \frac{\text{NA}}{\text{NA} + \text{NB} + \text{NC}} \\ \text{FAR} &= \frac{\text{NB}}{\text{NA} + \text{NB}} \\ \text{PO} &= \frac{\text{NC}}{\text{NA} + \text{NC}} \end{aligned}$$

其中, $G_i$  为降水融合产品插值到评估站点后得到的数值; $O_i$  为站点观测值; $N$  为参与评估的总站次数; $\text{NA}$  为融合产品与实况站点均发生的站点数; $\text{NB}$  为融合产品发生而实况站点不发生的站点数; $\text{NC}$  为融合产品不发生而实况站点发生的站点数; $\text{ND}$  为融合产品和实况站点均不发生的站点数。

准确率 PC 虽然简单、直观,但由于“反击中”的权重与“击中”一样,反应不出极端天气的预报准确性。在降水预报中,用对晴雨预报的检验,击中(NA)表示有降水预报正确,反击中(ND)表示无降水预报正确。TS 评分则反映了预报和实况都发生的情况比例,它对击中(NA)事件敏感,也惩罚空报和漏报事件,如果不考虑反击中(ND)事件,则可以认为评分是精确的。由于 TS 评分不能区分预报错误来源,所以常和空报率(FAR)与漏报率(PO)一起考虑。TS 评分依赖事件的气候频率,对小概率事件,由于击中是偶然产生的,所以评分较低。

2 评估结果

2.1 月评估结果

从 7 月的月检验评估结果(图 2)可以看出,插值方法对评估结果的影响较小,两种插值方法的偏差(BIAS)分别为 1.39 和 1.4,平均误差(ME)都为 0.01 mm/10 min,即 10 分钟降水融合产品较观测实况均略偏大,相关系数(CORR)分别为 0.65 和 0.68,平均绝对(MAE)误差都为 0.04 mm/10 min,均方根误差(RMSE)分别为 0.31 和 0.3 mm/10 min。

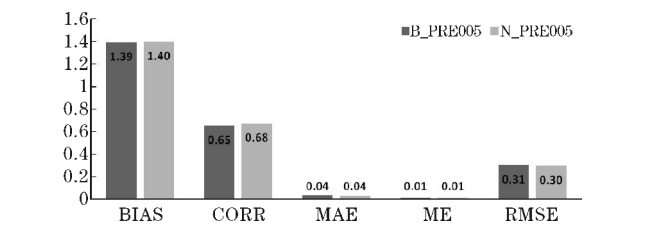


图2 月评估结果(B\_PRE005;双线性插值;N\_PRE005;邻近插值,下同)

2.2 日评估结果

对于7月逐日评估结果(图3),两种插值方法的评估结果差别不大,平均误差在-0.006~0.08 mm/10 min,偏差范围在0.85~3。总体而言,10分钟融合产品较实况偏大,仅2~4日、21~24日较实况略偏小,其中26日偏差达到3,相关系数、平均绝对误差和均方根误差范围分别在0.5~0.9 mm/10 min、0.01~0.1 mm/10 min、0.15~0.7 mm/10 min,从各评估参数看,26日评估结果最差,明显较实况偏大,误差最大。

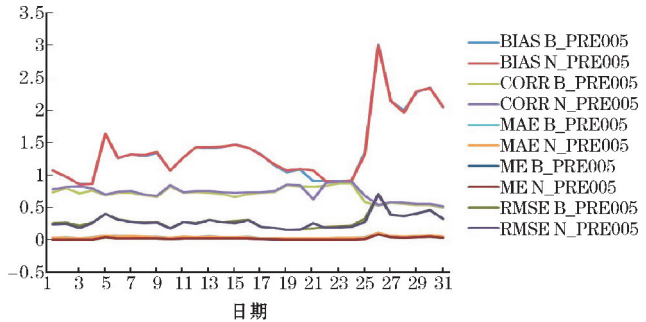


图3 逐日评估结果

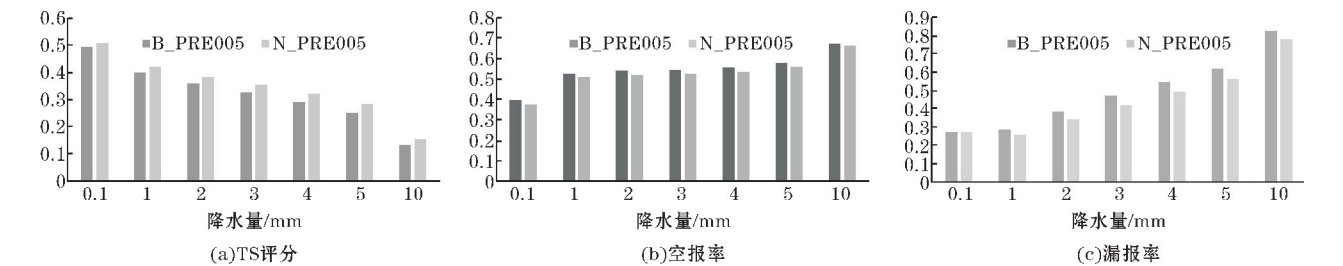


图5 2018年7月逐10分钟降水融合产品分量级评分

从降水分级的均方根误差、平均绝对误差和偏差检验统计来看,即表1~3,两种插值方法的均方根误差和平均绝对误差都随着量级的增大而增大,邻近插值的误差基本上都小于双线性插值,从偏差来看,对于

2.3 分级评估结果

以0.1 mm作为晴雨的判别标准,从晴雨准确率(图4)可以看出,两种插值方法的准确率都很高,双线性插值的准确率为96.2%,邻近插值的准确率为96.4%,后者略高。

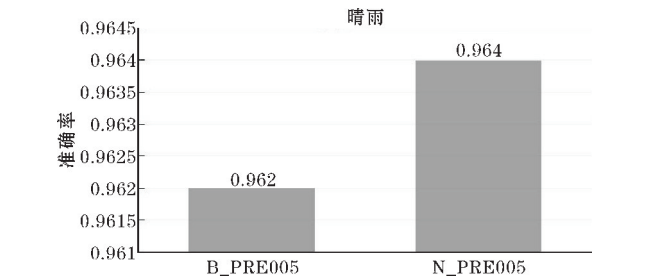


图4 逐10分钟降水融合产品晴雨准确率

将10分钟降水分为7个等级进行评估,分别为 $\geq 0.1$  mm、 $\geq 1$  mm、 $\geq 2$  mm、 $\geq 3$  mm、 $\geq 4$  mm、 $\geq 5$  mm、 $\geq 10$  mm,具体如图5所示,随着降水量级的增加,TS评分逐渐减小,相对而言,邻近插值的评分结果优于双线性插值, $\geq 0.1$  mm的TS评分在0.5左右, $\geq 10$  mm的TS评分则只有0.13左右,配合空报率和漏报率,邻近插值在各量级的空报率和漏报率均小于双线性插值。因此,利用邻近插值的评分结果更优,对应的空报率和漏报率也最低。

表1 降水分级均方根误差(RMSE)检验统计表

降水强度	0.1~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10	≥10
双线性插值	0.618	1.054	1.473	1.854	2.215	3.426	7.064
邻近插值	0.627	1.062	1.434	1.785	2.112	3.182	6.532

单位:mm/10min

表2 降水分级平均绝对误差(MAE)检验统计表

降水强度	0.1~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10	≥10
双线性插值	0.227	0.615	1.043	1.458	1.836	2.947	6.271
邻近插值	0.221	0.584	0.976	1.358	1.693	2.688	5.711

单位:mm/10min



表 3 降水分级偏差 (BIAS) 检验统计表

降水强度	0.1~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10	≥10
双线性插值	1.367	0.944	0.803	0.739	0.694	0.613	0.534
邻近插值	1.369	0.968	0.837	0.774	0.736	0.655	0.577

2.4 评估指标空间分布

从各指标的空间分布(图 6)来看,江汉、江淮、江南

地区的相关系数更低、平均误差为负、平均绝对误差和均方根误差更大,这是因为这一带 7 月降水多于其他地方,同上面结论一样,降水量越大,产品的误差也越大。

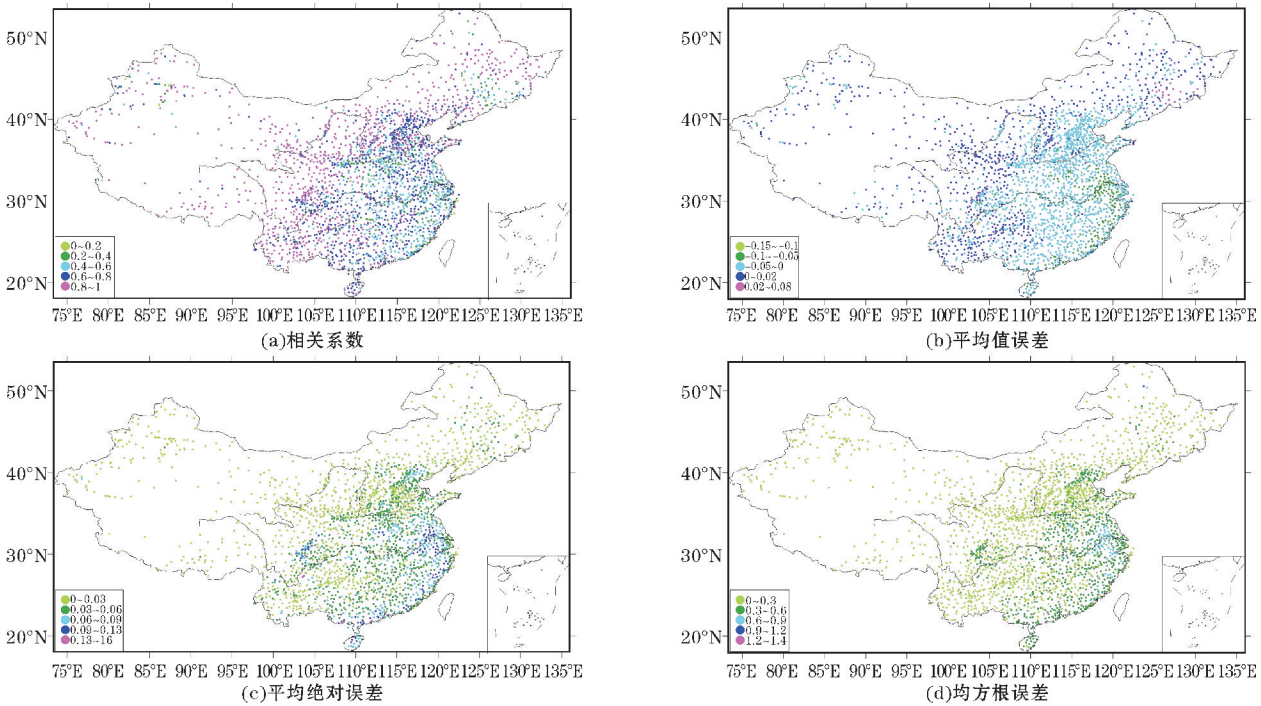


图 6 评估指标空间分布图

2.5 10 分钟降水极值检验

为进一步了解逐 10 分钟降水融合产品对降水极值的把握情况,挑选每个时次中国区域内最大的实况降水量和融合产品降水量(邻近插值)进行检验,结果如图 7 所示,融合产品的极值普遍较实况偏小,其中有 81% 的样本极值小于实况降水量。

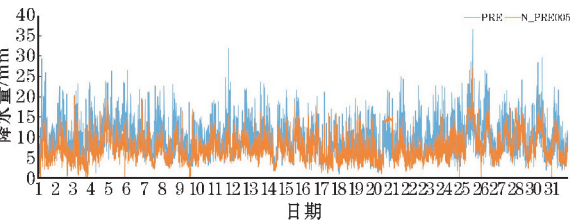


图 7 逐 10 分钟降水极大值检验(PRE:实况,下同)

3 降水过程评估

2018 年 7 月 1 日 12 时-2 日 12 时(世界时,下同),受高空低槽及冷空气共同影响,甘肃、陕西南部及四川盆地西部的部分地方普降中到大雨,局部地区

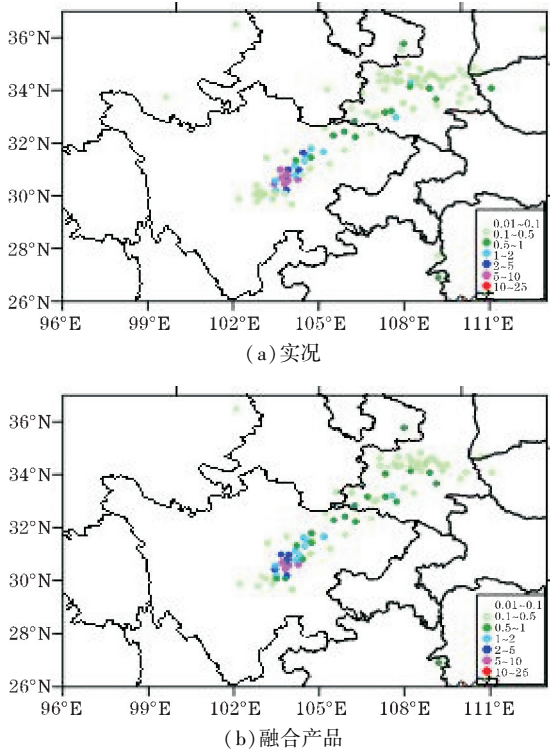


图 8 2018 年 7 月 2 日 4:00 的 10 分钟雨量空间分布图

暴雨,个别大暴雨,国家站最大降水量出现在四川省绵阳市梓潼县,为218.4 mm。根据 10 分钟降水融合雨量空间分布图(图 8),融合产品的雨带分布与实况基本一致,且能反映出强降水落区的变化,总体而言,融合产品较实况偏强,但在降水中心较实况偏弱。

从误差空间分布(图 9)来看,大多站点的偏差在  $-0.1 \sim 0.1$  mm,在强降水区域,融合产品以偏强为主,以 2018 年 7 月 2 日 4:00 的 10 分钟降水为例,42 站较实况偏强 ( $>0.1$  mm),仅 29 站较实况偏弱 (偏差  $<-0.1$ ),其中偏弱较多的站点在强降水中心一带。

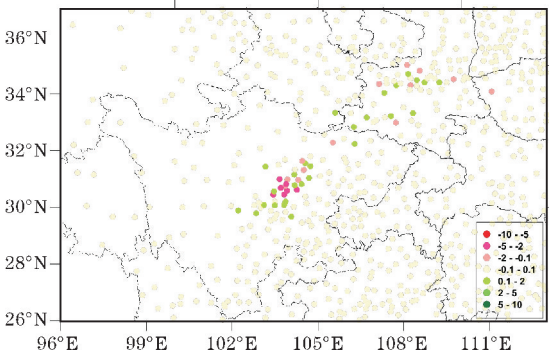


图9 2018年7月2日4:00的10分钟雨量偏差分布图

3.1 降水中心检验

国家站 24 小时累计雨量最大值出现在四川省绵阳市梓潼县,为218.4 mm,其主要降水时段在 1 日 19 时-2 日 10 时,该站融合产品的 24 小时累计雨量为 181.2 mm,可见融合格点产品较实况略偏弱,偏差约 37 mm。通过该站逐 10 分钟融合产品雨量变化图(图 10)可以看到出,强降水出现在两个时段:1 日 19 时、2 日 0-10 时,最大 10 分钟降水量出现在 7 月 2 日 01 时 30 分,为 7.7 mm,10 分钟融合降水产品的变化趋势与实况基本一致,但总体而言降水强度偏弱,特别在强降水时段,该产品的最大降水为 6.2 mm。

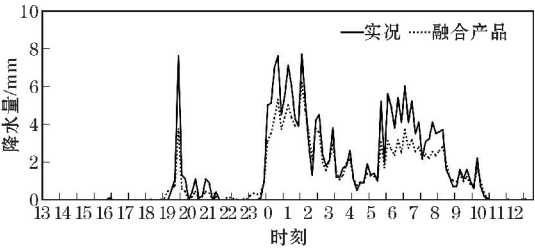


图10 绵阳市梓潼县逐10分钟雨量变化图

3.2 过程评估结果

对于此次降水过程,融合产品总体偏差为0.974,即较实况偏小,相关系数为0.812,平均绝对误差为

0.026 mm/10 min,平均误差为 $-0.001$  mm/10 min,均方根误差为0.233 mm/10 min。

关注产品对晴雨及不同量级降水的把握情况,这里以0.1 mm作为晴雨的判别标准,根据晴雨准确率,融合产品的准确率为93.7%。从分级检验结果可以看到(图 11),对于0.1 mm以上量级降水,TS 评分为 0.895,随着降水量级的增加,TS 评分总体呈减少趋势,空报率先减小后增大,漏报率呈增大趋势,到5 mm 以上时,漏报率显著升高,为0.8,TS 评分降为0.2。

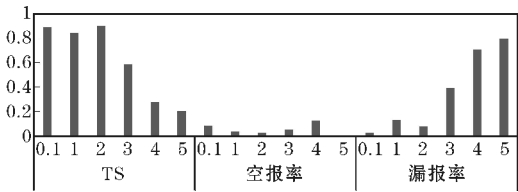


图11 逐10分钟降水融合产品TS评分、空报率和漏报率

细致分析各评估指标随时间的变化(图 12),相关系数的值普遍在0.49~0.97,平均值为0.81,在强降水时段相关系数有所下降。均方根误差在0.06~0.53 mm,平均值为0.226 mm,在强降水时段误差增大,平均误差范围在 $-0.02 \sim 0.04$  mm,平均值为 $-0.001$  mm,表明总体以偏弱为主,平均绝对误差则在0.008~0.075 mm,综合而言,该融合产品总体误差较小,且数据较稳定,相较而言,该产品误差在强降水时段有所增加。

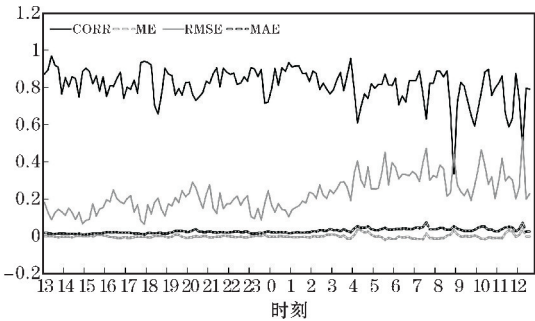


图12 评估指标时间变化图

4 结论

本文利用多种评估指标对国家气象信息中心研发的5 km逐 10 分钟降水融合产品进行检验评估,结果表明:

- (1)邻近插值法和双线性插值法对月评估和日评估结果的总体影响不大,邻近插值的评分略优。
- (2)分级评估结果表明,邻近插值法的 TS 评分更高,空报率和漏报率更低,要优于双线性插值,两者

0.1~1 mm的TS评分均为0.6左右;随着降水量级的增大,10分钟降水的误差也增大,对于0.1~1 mm量级,两种插值方法的偏差都偏大,其余量级都偏小,且随着量级的升高,偏小越多。逐10分钟降水融合产品的极值普遍较实况偏小,其中有81%的样本极值小于观测实况。

(3)在强降水过程中,10分钟融合降水产品的落区和走向均与实况较一致,总体以偏强为主,但5 mm以上的强降水区域较实况偏弱,融合产品存在24 h极大值比实况偏小的情况。

总体而言,逐10分钟降水融合产品能结合雷达估测降水产品和实况的优势,覆盖范围广,强度与实况相当,可在科研及业务中使用该产品弥补站点资料覆盖不均匀等不足,但该产品随着量级增大,具有较站点实况偏小的特点,因此,若关注降水大值区或极值,需与站点实况相结合。另外,进一步提高雷达估测降水产品的质量,有利于该产品质量的进一步提高。

致谢:感谢成都信息工程大学科技能力创新计划(KYQZ202217)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [O]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 盛杰, 张小雯, 孙军, 等. 三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J]. 气象, 2012, 38(10): 1161-1169.
- [3] 战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 等. 1965-2019年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 598-611.
- [4] Arkin P A, Xie P P. The global precipitation climatology project: First algorithm intercomparison project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75(3): 401-419.
- [5] Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(1): 5-20.
- [6] Huffman G J, Adler R F, Morrissey M, et al. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations [J]. J Hydrometeor, 2001, 2(1): 36-50.
- [7] Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-Present) [J]. J Hydrometeor, 2003, 4(6): 1147-1167.
- [8] 师春香, 潘旸, 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.
- [9] 师春香, 张帅, 孙帅, 等. 改进的CLDAS降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估[J]. 气象, 2018, 44(8): 985-997.
- [10] 师春香, 姜立鹏, 朱智, 等. 基于CLDAS2.0驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 231-236.
- [11] 韩帅, 师春香, 姜志伟, 等. CMA高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 102-116.
- [12] 朱智, 师春香. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32): 138-144.
- [13] 潘旸, 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.
- [14] 潘旸, 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.
- [15] 潘旸, 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.
- [16] 潘旸, 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.
- [17] 沈艳, 潘旸, 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.
- [18] 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 394-410.
- [19] 龙柯吉, 师春香, 韩帅, 等. 中国区域高分辨率温度实况融合格点分析产品质量评估[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 67-74.



- [20] 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.
- [21] 郭旭,龙柯吉,范江琳,等. 四种降水融合产品在四川持续性强降水过程中的对比评估[J]. 高原山地气象研究,2021,41(2):42-52.
- [22] 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.

## Validation and Assessment of 10 mins Merged Precipitation Product in China

LONG Keji<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1,3</sup>, GUO Xu<sup>4</sup>, HUANG Xiaolong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Atmosphere Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China; 2. Sichuan Province Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China; 3. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Sichuan Provincial Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** In order to validate the quality of 10 mins merged precipitation product, taking the national ground observation minute precipitation data as "True Value", a variety of assessment indicators were used to assess and validate the National Meteorological Information Center 5 km 10mins merged precipitation product in China in July 2018. The results show that the neighbor interpolation method and bilinear interpolation method have little effect on the monthly and daily assessment results, and the score of neighbor interpolation method is slightly better. The TS score of 0.1 mm magnitude precipitation is about 0.6, the deviation is too big, the others are too small, and the error increases gradually with the increase of magnitude, the extreme value of merged products is generally small. In the heavy rainfall process, the falling area and change trend of merged product are consistent with the actual situation, generally, it is mainly strong, but the heavy rainfall area above 5 mm is weak. In general, the 10 mins merged precipitation product can combine the advantages of radar estimation precipitation products and actual situation, and has a wide coverage and equivalent intensity to the actual situation.

**Keywords:** atmospheric physics; validation and assessment; minute precipitation; merged product; interpolation