

张春燕,郑艳萍,王沛东,等.2023.多源融合实况分析1 km网格降水产品在广东省暴雨过程中的准确性评估[J].暴雨灾害,42(6):679–691. ZHANG Chunyan, ZHENG Yanping, WANG Peidong, et al. 2023. Assessment of multi-source observation merged 1 km-grid precipitation product during the disastrous rainstorms in Guangdong [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):679–691 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–242

多源融合实况分析1 km网格降水产品在广东省暴雨过程中的准确性评估

张春燕¹,郑艳萍¹,王沛东¹,陈逸智¹,杨思晓²,谢尚佑³,向钢⁴

(1. 广东省气象数据中心,广州 510080;2. 广东省惠州市气象局,惠州 516000;
3. 广东省汕头市气象局,汕头 515000;4. 湖南省邵阳市气象局,邵阳 422000)

摘要:中国国家气象信息中心研制的多源融合实况分析1 km网格降水(简称为ART_1 km降水)产品可为灾害性天气监测预警、智能网格预报、智慧气象服务等提供更精细的数据支撑。选取广东省2019—2022年5—8月的20例致灾暴雨过程,利用未融合制作ART_1 km降水产品的区域站和水文站等两类独立站的降水资料,评估ART_1 km降水产品在暴雨过程中的准确性。结果表明:ART_1 km降水产品成功反映了广东省暴雨过程的降水落区、强度和变化趋势,且在珠三角、粤东东部和粤北北部表现最佳。降水越强,两类独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关性越高,但均方根误差和平均值误差也越大。降水不分级时,全省约60%的独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关系数 ≥ 0.8 ,超90%的独立站的均方根误差在[1.0, 5.0] mm范围内,超60%的独立站的平均值误差在 ± 0.1 mm内。降水分级后,当小时降水较弱(< 5 mm),全省大部分独立站的相关系数 < 0.5 、均方根误差在[1.0, 5.0] mm范围内、平均值误差在[0.0, 0.5] mm范围内;当小时降水较强(≥ 20 mm),全省42%~56%的独立站的相关系数 ≥ 0.5 ,大部分独立站的均方根误差 ≥ 10 mm、平均值误差 < 0 mm(且当小时降水 ≥ 50 mm,平均值误差 < -10 mm)。两类独立站的ART_1 km降水总体表现为低估,更多的站点观测融入制作ART_1 km降水产品,将有助于提升该产品的质量。

关键词: ART_1 km降水;暴雨;独立站;降水分级检验;相关性;误差

中图分类号: P413.2¹

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–242

Assessment of multi-source observation merged 1 km-grid precipitation product during the disastrous rainstorms in Guangdong

ZHANG Chunyan¹, ZHENG Yanping¹, WANG Peidong¹, CHEN Yizhi¹,
YANG Sixiao², XIE Shangyou³, XIANG Gang⁴

(1. *Guangdong Meteorological Data Center, Guangzhou, 510080*; 2. *Huizhou Meteorological Bureau, Huizhou, 516000*;
3. *Shantou Meteorological Bureau, Shantou, 515000*; 4. *Shaoyang Meteorological Bureau, Shaoyang, 422000*)

Abstract: This paper aims to assess the latest 1 km-grid Analysis Real Time (ART_1 km) precipitation product developed by the National Meteorological Information Center of China Meteorological Administration (CMA), which can provide great support for disaster weather monitoring and warning, intelligent grid forecasting and weather services. Observed precipitation data from the independent stations (including non-uploaded regional meteorological stations and hydrometric stations) that were not integrated into the ART_1 km precipitation product as well as precipitation classification inspection are used to assess the quality of this product during twenty disastrous rainstorm cases from May to August during 2019–2022 in Guangdong. The results show that the ART_1 km precipitation product successfully reproduces the precipitation location, strength, and trends in these cases, with the best performance in the Pearl River Delta, the east of eastern Guangdong, and the north of northern Guangdong. The stronger the precipitation, the greater the correlation as well as the root mean square error (RMSE) and mean error (ME) between the ART_1 km precipitation and the observed precipitation. When the hourly precipitation is not classified, about

收稿日期: 2022–11–21;定稿日期:2023–07–26

资助项目: 广东省气象局协同观测和多源实况数据融合分析技术创新团队(GRMCTD202103);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2018M17, GRMC2020Q03);广东省气象数据中心科学技术研究项目(2021A07)

第一作者: 张春燕,主要从事气象资料融合分析与降水研究。E-mail: 2722684264@qq.com

通信作者: 郑艳萍,主要从事气象资料分析、评估与可视化研究。E-mail: 550620704@qq.com

60% of these independent stations present a correlation efficient ≥ 0.8 , more than 90% of the stations present an RMSE within the range of [1.0, 5.0) mm, and more than 60% of the stations present a ME within ± 0.1 mm. When the hourly precipitation is < 5 mm, most of the stations have a correlation efficient < 0.5 , an RMSE within the range of [1.0, 5.0) mm, and a ME within [0.0, 0.5] mm. When the hourly precipitation is ≥ 20 mm, 42% ~ 56% of the stations have a correlation efficient ≥ 0.5 , and most of the stations have an RMSE ≥ 10 mm and a ME < 0 mm, even when the hourly precipitation is ≥ 50 mm, most of the stations have a ME < -10 mm. Overall, ART_1 km precipitation is usually underestimated at the independent stations, and integrating observations from more sites into producing ART_1 km precipitation is helpful to improve the quality of the products.

Key words: ART_1 km precipitation; rainstorm; independent stations; precipitation classification inspection; correlation; error

引言

2021年中国气象局自主研发的中国区域多源融合实况分析1 km网格产品(ART_1 km)投入业务应用,这标志着我国进一步满足了精细化天气预报服务对更高分辨率实况产品的需求。ART_1 km产品由国家气象信息中心牵头研制,综合利用了地面自动站、天气雷达、风云卫星、数值模式等多源资料,采用概率密度匹配、贝叶斯模型平均、多重网格变分、最优插值等融合分析技术(潘昶等,2018;师春香等,2019),产品种类包括中国区域逐小时降水、2 m气温、2 m湿度、10 m风等4个要素14种产品,空间分辨率为1 km,对于捕捉以强对流天气为代表的小尺度灾害性天气、为精细化预报提供更优质的数据基础具有重大意义。

其中,ART_1 km产品中的降水(简称为ART_1 km降水)产品已被气象部门应用在灾害性天气监测预警、智能网格预报、智慧气象服务等方面,为气象现代化建设和气象高质量发展提供了更精细的数据支撑。它是由中国区域融合降水分析系统生成(师春香等,2019),在“概率密度函数+最优插值”两步融合法(Xie et al., 2011)的基础上,优化为“概率密度函数+贝叶斯模型平均+最优插值”三步融合法,并引入地面、气象卫星和雷达定量估测降水,形成的三源融合降水产品(潘昶等,2012,2018)。在制作过程中,ART_1 km降水产品的空间分辨率由10 km提升至5 km,最后至1 km,产品业务生成时效最快达5 min(师春香等,2019)。

潘昶等(2018)曾利用全国的国家级气象站的观测资料进行独立检验,表明该产品在强降水监测上具有优势,但由于地形地势、海陆位置、降水和站点多寡的差异,ART_1 km降水产品在不同地区的质量表现并不一致。广东省是华南沿海典型的暴雨区域,暴雨频繁出现在每年的5—8月,具有强度大、范围广、灾害重的特点(刘雨佳等,2017;张柳红等,2021a),因此广东省在暴雨监测和预警上对降水资料及其准确性的要求更高。本文选取广东省2019—2022年5—8月致灾严重的暴雨过程,利用全省未融合制作ART_1 km降水产品的区域站和水文站的观测资料,评估ART_1 km降

水产品在广东暴雨过程中的准确性。

1 资料与方法

1.1 ART_1 km降水产品及其评估资料

ART_1 km降水产品为地面-卫星-雷达三源融合产品(潘昶等,2018),其中融入制作的地面观测资料为经过质量控制的全国近4万个气象站的降水数据(任芝花等,2010),并采用最优插值法插值到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 网格点上(沈艳等,2010,2012,2013)。卫星资料为美国气候预测中心研发的实时卫星反演降水系统的降水数据(Joyce et al., 2004),在处理成逐时降水后再通过重采样(邻近插值)方法插值到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 网格点上(潘昶等,2018)。雷达资料为中国气象局气象探测中心研发的雷达定量降水估测产品,该产品经气象站降水数据校正后(刘晓阳等,2010),时空分辨率分别为1 h和 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。潘昶等(2018)采用概率密度函数匹配法、贝叶斯模型平均方法、最优插值法和空间降尺度方法,最终将这三类资料融合成 0.01° (约1 km)高分辨率降水产品,空间范围覆盖整个中国区域。

本文选取广东省2019—2022年5—8月发生的雨量较大、灾情较明显的20例暴雨过程(表1),开展ART_1 km降水产品评估。在这些过程中,评估ART_1 km降水产品所使用的资料为未上传融合制作该产品的区域自动气象站(以下简称“区域站”)和水文站的逐时降水观测数据。每例暴雨过程中,区域站和水文站的数量并不完全一致,但总体而言,前者为2 200个左右,后者为2 000个左右。由于这两类站点的观测降水资料独立于ART_1 km降水产品之外,因此统一称为“独立站”。

1.2 评估方法

本文将独立站的降水观测资料经质控后作为评估ART_1 km降水产品的“真值”,检验该产品的准确性。采用自然邻近插值方法,选择ART_1 km降水产品中距离独立站最近的格点值插值到站点上,统计比较20例暴雨过程中ART_1 km降水和观测降水的落区、强度、相关性及误差情况。使用的检验指标有四个,分别是技巧评分(TS,记为 T_s)、相关系数(COR,记为

表1 广东省2019—2020年5—8月的20例致灾暴雨过程

Table 1 Twenty cases of disaster-causing rainstorm processes from May to August during 2019–2022 in Guangdong Province

序号	时间/北京时	全省平均雨量/mm	最大过程雨量/mm	主要灾情
1	2019年5月4—9日	89.4	湛江市, 274.6	3市受灾, 直接经济损失0.05亿元
2	2019年5月19—21日	13.7	茂名市, 172.0	3市9县受灾, 直接经济损失0.91亿元
3	2019年5月23—31日	138.5	阳江市, 922.5	9市26县受灾, 直接经济损失3.2亿元
4	2019年6月9—14日	112.5	河源市, 419.0	9市32县受灾, 直接经济损失44.68亿元
5	2019年6月22—25日	65.0	广州市, 281.0	5市16县受灾, 直接经济损失0.83亿元
6	2019年7月31日—8月2日	78.3	湛江市, 396.0	8市21县受灾, 直接经济损失1.33亿元
7	2019年8月24—26日	72.9	惠州市, 295.0	6市23县受灾, 直接经济损失1.60亿元
8	2020年5月20—22日	76.3	东莞市, 473.9	1市5县受灾, 直接经济损失9.31亿元
9	2020年6月2日	15.3	阳江市, 228.2	2市受灾, 直接经济损失0.26亿元
10	2020年6月5—9日	129.4	惠州市, 978.4	10市41县受灾, 直接经济损失39.72亿元
11	2020年6月13—14日	15.6	汕尾市, 120.8	2市受灾, 直接经济损失为0
12	2020年7月31日—8月6日	102.2	阳江市, 401.5	2市受灾, 直接经济损失为0
13	2020年8月18—20日	37.0	江门市, 276.0	4市11县受灾, 直接经济损失4.24亿元
14	2021年5月19—20日	8.3	韶关市, 289.9	2市10县受灾, 直接经济损失7.64亿元
15	2021年5月30日—6月4日	103.7	惠州市, 646.9	5市6县受灾, 直接经济损失0.32亿元
16	2021年6月21—24日	21.3	珠海市, 348.3	2市4县受灾, 直接经济损失0.0026亿元
17	2021年7月18—22日	54.2	阳江市, 460.8	2市6县受灾, 直接经济损失1.62亿元
18	2022年5月10—14日	151.5	中山市, 799.9	7市受灾, 直接经济损失4.2亿元
19	2022年6月5—10日	127.6	汕尾市, 596.7	5市5县受灾, 直接经济损失9.6亿元
20	2022年6月13—21日	20.7	清远市, 990.5	3市7县受灾, 直接经济损失22.93亿元

注:灾情数据来自《广东灾害年鉴》

R_{CO} 、均方根误差(RMSE, 记为 E_{RMS})和平均值误差(ME, 记为 E_M)。四个指标的计算公式如下:

$$T_S = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (1)$$

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

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$E_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i) \quad (4)$$

式(1)中, N_A 为命中数, N_B 为误报数, N_C 为漏报数; 式(2)–(4)中 G 为 ART_1 km 降水产品的站点插值, O 为站点观测结果, N 为样本总数。TS 和 COR 的值越接近 1, RMSE 和 ME 越接近 0, 则表示 ART_1 km 降水产品和观测越接近, 准确性越高。

此外, 本文还针对不同的小时雨量进行分级检验。我国国家标准 GB/T 28592–2012 将 24 h 降雨量 < 0.1 mm 定义为微量降雨, 将 12 h 或 24 h 降雨量 \geq 0.1 mm 的降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨等 6 个等级。本文则对小时降水也相应地划分出 6 个等级, 在设定小时降水分级阈值时, 考虑到

中国气象局将 12 h 或 24 h 雨量达到 0.1 mm 定义为小雨, 12 h 雨量达到 5 mm 或 24 h 雨量达到 10 mm 定义为中雨, 24 h 雨量达到 50 mm 定义为暴雨, 此外不少文献将小时雨量达到 \geq 20 mm 定义为小时强降水(张小雯和谌芸, 2011; 孙喜艳等, 2017; 伍红雨等, 2017), 当小时雨量达到 \geq 50 mm, 则普遍认为是极端降水(俞小鼎, 2013), 因此基于上述 0.1、5、10、20、50 mm 这几个阈值, 并增加了 2 mm 作为阈值之一, 本文将小时降水划分为 [0.1, 2)、[2, 5)、[5, 10)、[10, 20)、[20, 50) 和 \geq 50 mm 这 6 个等级, 将小时降水 < 0.1 mm 视为无降水。

2 全省降水准确性总体评估

为了评估 ART_1 km 降水产品在广东省 20 例暴雨过程中的表现, 本节分别检验该产品在暴雨过程中的空间分布及在各降水等级中的频率分布, 同时也分析 ART_1 km 降水与观测降水的相关性和误差。其中, 通过对比 ART_1 km 降水和观测降水的空间分布, 评估该产品反映的降水落区及强度是否与观测吻合; 通过对比 ART_1 km 降水和观测降水在各降水等级中的频率分布, 评估该产品是否准确呈现不同强度降水的发生; 通过分析 ART_1 km 降水和观测降水的相关性和误差, 评估该产品与观测降水的偏差程度。

2.1 降水的空间分布

本文评估的20例暴雨过程的降水不仅有冷暖空气交汇或低空急流引起的,也有台风登陆导致的;既有局部性暴雨,也有几乎覆盖全省的暴雨(伍红雨等,2019;张柳红等,2021b;赵娴婷等,2021;钟雨珊等,2023)。本节则分析了与观测降水的TS评分最高和最低、相关系数最大和最小及均方根误差最小和最大的6例暴雨过程中ART_1 km降水的空间分布。图1a、b分别是广东省2019年8月24日20时—26日23时(北京时,下同)的累计观测降水和ART_1 km降水,为ART_1 km降水的TS评分最高(约0.88)的暴雨过程。该过程由台风“白鹿”造成,粤东、粤北和珠三角市县出现了大范围

暴雨到大暴雨、局地特大暴雨。在该过程中,ART_1 km降水产品大致再现了全省降水的落区和强度,但未能很好地反映粤北韶关的分散性强降水。此外,ART_1 km降水产品呈现的雷州半岛降水范围也比实际大。图1c、d分别是广东省2019年5月19日16时—21日00时的累计观测降水和ART_1 km降水,为ART_1 km降水的TS评分最低(约0.75)的暴雨过程。该过程主要受北方弱冷空气影响,粤北韶关南部至清远南部出现了中到大雨,局部暴雨或大暴雨,粤东也有较明显降水,粤西降水最弱,且部分地区无降水。在该过程中,ART_1 km降水产品再现了粤北和粤东的降水,但在粤西呈现的降水范围比实际观测更大。

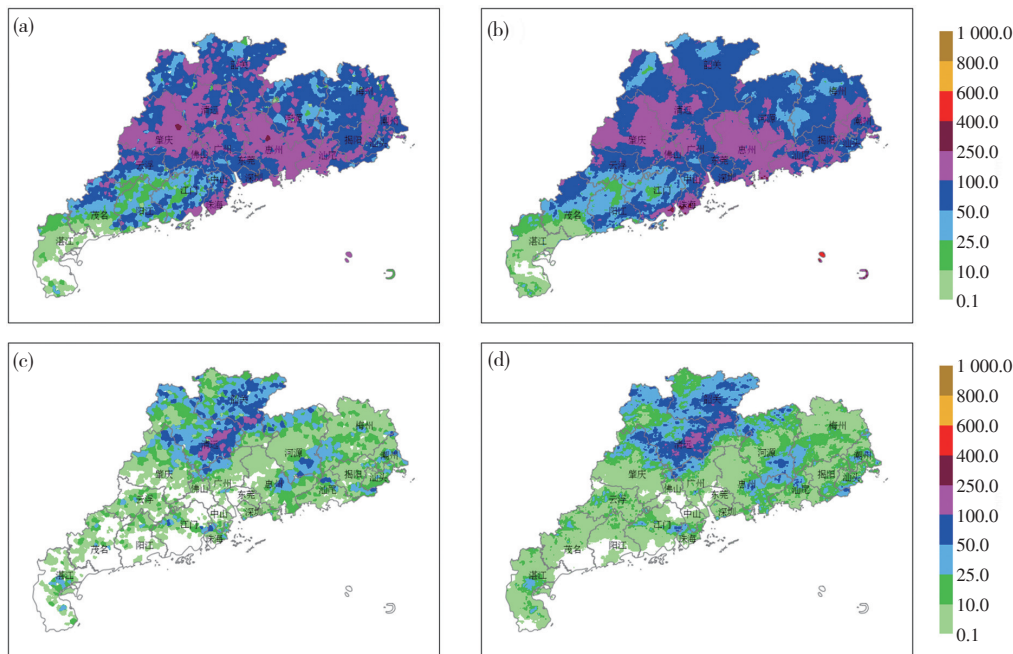


图1 2019年8月24日20时—26日23时广东省累计观测降水(a)和ART_1 km降水(b)与2019年5月19日16时—21日00时累计观测降水(c)和ART_1 km降水(d)的空间分布(单位: mm)

Fig.1 Spatial distribution of accumulated rainfall from (a) observations and (b) ART_1 km products from 20:00 on August 24 to 23:00 on August 26, 2019 (Beijing time, the same below), and from (c) observations and (d) ART_1 km products from 16:00 on May 19 to 00:00 on May 21, 2019, in Guangdong Province, respectively (unit: mm)

图2a、b分别是广东省2021年5月19日13时—20日19时的累计观测降水和ART_1 km降水,为ART_1 km降水和观测降水相关系数最大(约0.93)的暴雨过程。该过程受低空急流、切变线和冷空气共同影响,粤北北部出现了暴雨到大暴雨,其余地区降水较弱或无降水,因此强降水的局地性很强。ART_1 km降水产品很好地反映了此次粤北北部的强降水,也基本刻画出了粤东和粤西局部地区弱/无降水发生的情况。图2c、d分别是广东省2020年6月2日02时—3日08时的累计观测降水和ART_1 km降水,为ART_1 km降水和观测降水相关系数最小(约0.84)的暴雨过程,该过程中阳江—江门—珠海的沿海一带出现大到暴雨、局

部大暴雨,同时清远北部和韶关北部也出现了较强降水。该过程的ART_1 km降水除了在茂名西部比实际观测弱外,在广东省其他地区的结果和观测十分接近。

图3则是广东省ART_1 km降水和观测降水均方根误差最小和最大的两次暴雨过程。均方根误差最小(0.6 mm)的过程发生在2019年5月4日08时—9日08时(图3a、b),受低层较强偏南风、切变线和冷空气共同影响,全省降水明显,粤北和粤东出现了大雨到暴雨、局部大暴雨,降水范围广。ART_1 km降水产品很好地反映了本次过程降水的范围和强度。均方根误差最大(1.8 mm)的过程发生在2020年5月20日11时—22日13时(图3c、d),珠三角、粤北和粤东沿海出现

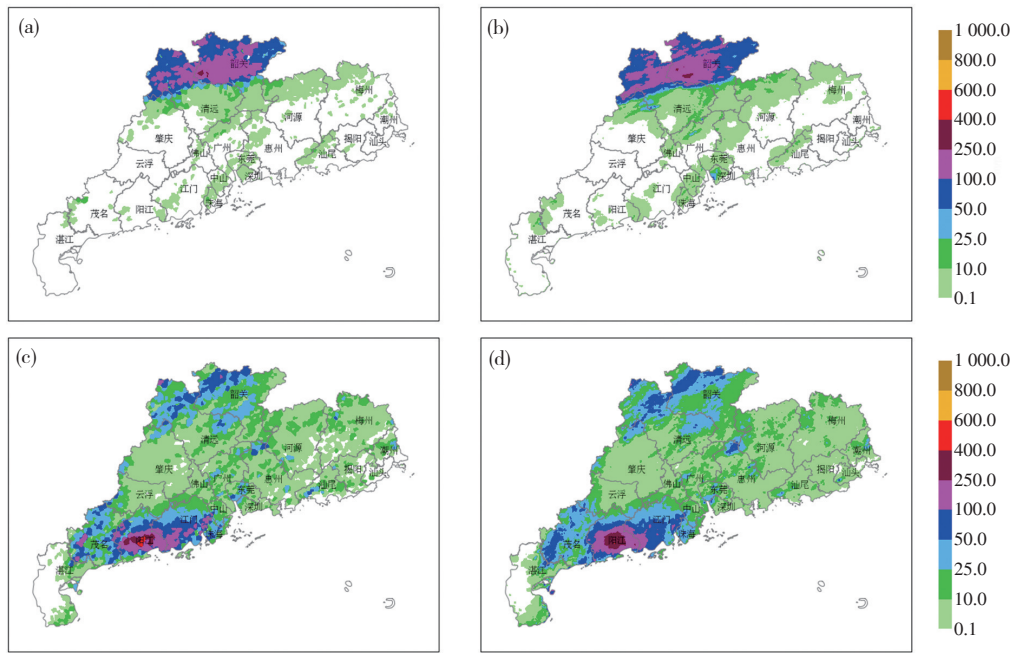


图2 2021年5月19日13时—20日19时广东省累计观测降水(a)和ART_1 km降水(b)与2020年6月2日02时—3日08时的累计观测降水(c)和ART_1 km降水(d)的空间分布(单位:mm)

Fig.2 Spatial distribution of accumulated rainfall from (a) observations and (b) ART_1 km products from 13:00 on May 19 to 19:00 on May 20, 2021, and from (c) observations and (d) ART_1 km products from 02:00 on June 2 to 08:00 on June 3, 2020 in Guangdong Province, respectively (unit: mm)

了暴雨到大暴雨,其中广州为此次过程的降水中心,粤东的梅州也出现了明显降水,粤西降水最弱,雷州半岛基本无降水发生。该过程中,ART_1 km 降水产品也基本呈现了全省强降水的落区,同时反映了粤西

弱降水和无降水的情形,但对于粤北和珠三角周边地区的分散性局地强降水并未刻画出来。

综上,无论指标最高还是最低,ART_1 km 降水产品都能够较好地反映广东省致灾性暴雨过程中降水的

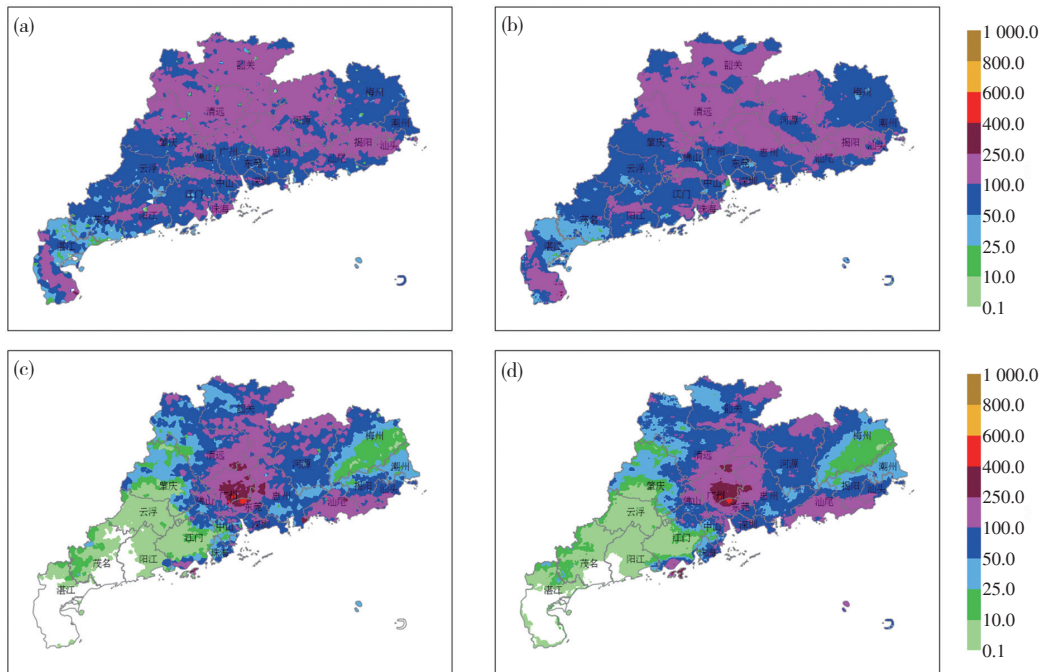


图3 2019年5月4日08时—9日08时广东省累计观测降水(a)和ART_1 km降水(b)与2020年5月20日11时—22日13时的累计观测降水(c)和ART_1 km降水(d)的空间分布(单位:mm)

Fig.3 Spatial distribution of accumulated rainfall from (a) observations and (b) ART_1 km products from 08:00 on May 4 to 08:00 on May 9, 2019, and from (c) observations and (d) ART_1 km products from 11:00 on May 20 to 13:00 on May 22, 2020 in Guangdong Province, respectively (unit: mm)

落区和强度,并能够成功再现累计降水量超过 100 mm 的强降水落区。对于粤西、尤其是雷州半岛,ART_1 km 降水产品呈现的降水范围和强度相比观测略大,这可能是由于雷州半岛的观测站点稀疏,无法反映出部分地区是否发生降水,而 ART_1 km 降水产品还融合了卫星、雷达的结果,同时也因为邻近站点插值的影响,所以使得雷州半岛的 ART_1 km 降水比观测大。因此本文还使用了雷达组合反射率评估 ART_1 km 降水产品在无站点观测区的表现(图略),发现雷达回波反映出的无站点观测区存在强降水时,ART_1 km 降水产品也能够有效反映出强降水的发生,并且 ART_1 km 降水产品对站点观测的异常数据也有替代修正作用。另外,注意到图 1—3 呈现的站点观测降水局地性更强,空间分布相对离散,而 ART_1 km 降水产品在站点插值后呈现的降水分布更为连续,块状分布明显,表明该产品在反映大范围的降水分布上具有很大优势,

但在刻画小范围局地分散性降水上仍存在一定不足。

2.2 各等级降水的频率分布

广东省两类独立站的观测降水和 ART_1 km 降水在不同小时降水等级中的出现频率如图 4 所示。从图中来看,ART_1 km 降水产品出现无降水(<0.1 mm)的频率略低于观测,其中区域站和水文站的频率分别约低了 3% 和 10%。但 ART_1 km 降水产品的小时降水量在 $[0.1, 2)$ mm 范围内出现的频率则略高于观测,其中区域站和水文站的频率分别约高了 1.5% 和 10%。因此,独立站观测无降水时,ART_1 km 降水产品仍可能表现出弱降水,但这种情况出现的概率很低。小时降水量在 $2 \sim 10$ mm 时,区域站的 ART_1 km 降水出现频率比实际观测略高了 1%,水文站的二者频率几乎相等。小时降水量 >10 mm 时,两类独立站的出现频率显著下降,都低于 0.02,此时 ART_1 km 降水频率和实际观测的几乎相等。

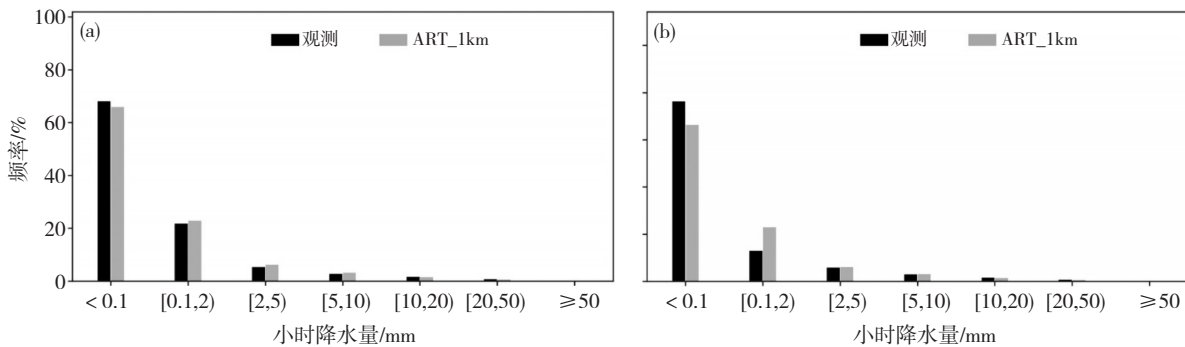


图4 2019—2022年5—8月广东20例暴雨过程中区域站(a)和水文站(b)的观测降水与ART_1 km降水在不同小时降水等级中的出现频率

Fig.4 Occurrence frequency of different hourly precipitation classifications for observations and ART_1 km products at (a) non-uploaded regional stations and (b) hydrometric stations during twenty disastrous rainstorm cases from May to August during 2019–2022 in Guangdong Province.

2.3 相关性和误差分析

图5统计了20例暴雨过程中独立站的ART_1 km降水在不分级和分级情形下的TS评分及其与观测降水的相关性、均方根误差和平均值误差。图5a表明,ART_1 km降水的TS评分在降水不分级时为0.6~0.7,在降水分级时为0.5以下,当小时降水 ≥ 50 mm时,TS评分最低,约为0.2。但并非降水越强、ART_1 km降水的TS评分越低,例如小时降水量为 $[20, 50)$ mm时,ART_1 km降水的TS评分均比前后降水等级高。图5b表明,ART_1 km降水和观测降水的相关系数在降水不分级时约为0.82,在降水分级后相关性显著降低,基本为0.2~0.4。这说明在降水不分级时,ART_1 km降水和观测降水的高相关很大程度上是由暴雨过程中无降水的站点或时次贡献的。因此统计无降水情形下独立站的ART_1 km降水的准确率,发现区域站为89%,水文站为85%,说明ART_1 km降水产品能够较

好地反映无降水的情形。

区域站和水文站的ART_1 km降水和观测降水的均方根误差(RMSE)随着降水增强而增大(图5c),在降水不分级时,RMSE约为2.0 mm;小时降水 ≥ 50 mm时,RMSE最大,接近31.0 mm。平均值误差(ME)可反映ART_1 km降水的高估或低估,图5d表明在降水不分级时,两类独立站的ME几乎为0;但在降水较弱时(小时降水 < 5 mm),ME略大于0,说明ART_1 km降水略有高估;在小时降水 ≥ 5 mm时,ME小于0;当小时降水量 ≥ 50 mm时,ME在 $-26 \sim -24$ mm之间,表明随着降水越强,独立站的ART_1 km降水的低估越明显。

图6对20例暴雨过程中区域站和水文站的ART_1 km降水与观测降水的相关系数、均方根误差和平均值误差进行空间分布特征分析。全省大部分独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关系数为0.5~0.9(图6a、b),其中珠三角、粤东东部和粤北北部的大部分

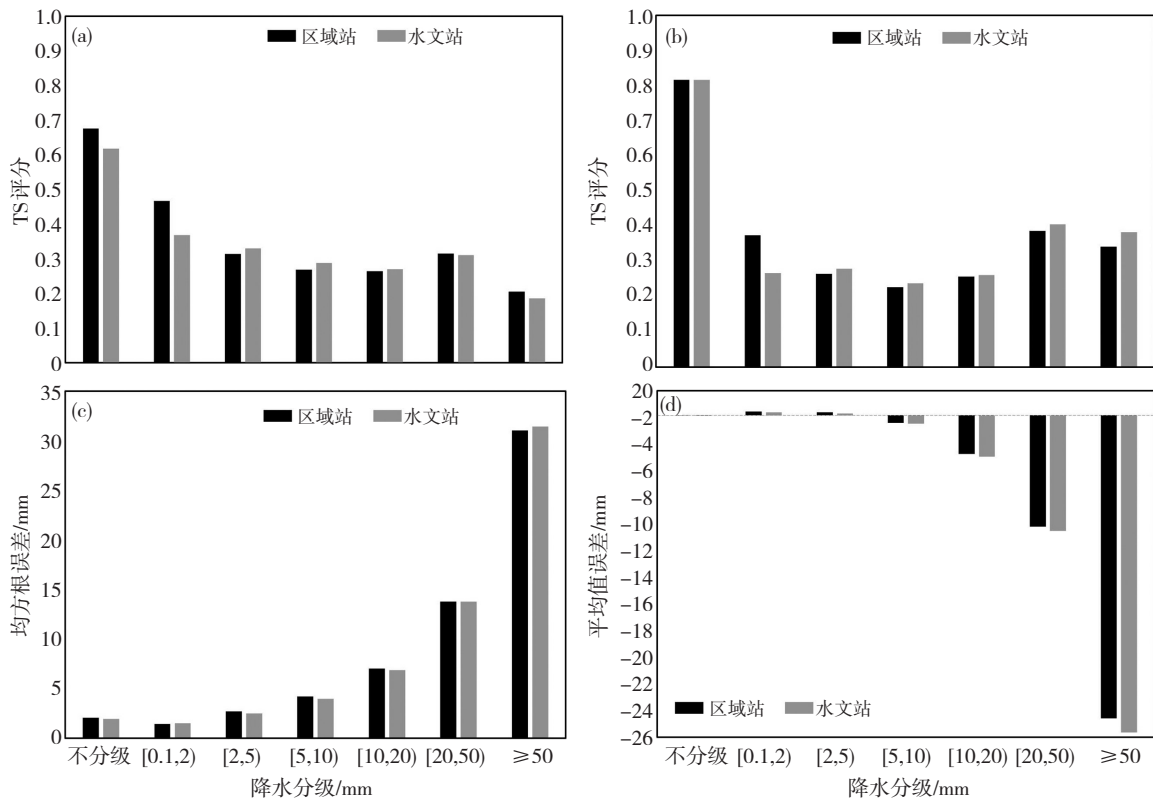


图5 2019—2022年5—8月广东省20例暴雨过程中区域站和水文站的ART_1 km降水的TS评分(a)

及在不同降水等级中与观测降水的相关系数(b)、均方根误差(c)和平均值误差(d)

Fig.5 (a) TS, (b) correlation coefficient, (c) root mean square error, and (d) mean error between ART_1 km products and observations in different precipitation classifications at non-uploaded regional stations and hydrometric stations from the 20 cases in this study

站点的降水相关系数达到0.8、甚至0.9以上;而粤东西部、粤北南部和粤西大部分站点的降水相关性降低,为0.5~0.8,个别站点的相关系数小于0.5。大部分独立站的均方根误差为0.1~1.0 mm(图6c,d),其中珠三角、粤东东部、粤北北部和粤西的茂名、湛江这些地区,大部分站点的均方根误差最小(为0.1~0.5 mm);但在珠三角以西的江门—阳江沿海和以东的惠州及粤北南部,部分站点的均方根误差增大至1.0~5.0 mm。此外,全省大部分独立站的平均值误差在 ± 0.1 mm内(图6e,f),但雷州半岛较多站点的平均值误差为0.1~0.5 mm,表明ART_1 km降水在该站点稀疏区域存在高估。

将广东省划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格,统计每个网格内上传制作ART_1 km降水产品的非独立站点数,网格内站点数从1~29个不等,网格内有20个及以上站作为高密度网格,10~20个站作为中密度网格,10个以下作为低密度网格。其中,高密度区往往也是强降水易发区,以珠三角为代表;中密度区主要在珠三角部分区域及粤东东部。从不同站点密度区的降水评估结果来看(图略),各项检验指标表现为:高密度区>中密度区>低密度区,其中高密度区的ART_1 km降水的TS评分大于0.64,和观测降水的相关系数大于

0.8。这表明,区域的站点越密集,则上传制作ART_1 km降水产品的站点观测越多,该区域的ART_1 km降水产品的质量也越高。

表2—4列出了20例暴雨过程中区域站和水文站等两类独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关系数、均方根误差和平均值误差的不同范围在各等级降水中的站点占比。表2表明,在降水不分级时,60%~63%的独立站的降水相关系数 ≥ 0.8 ,约98%的独立站相关系数 ≥ 0.5 。降水分级后,在相关系数 ≥ 0.5 、 ≥ 0.8 、 ≥ 0.9 和 ≥ 0.99 这些范围内,可以看到随着降水增大,站点占比总体增大,说明ART_1 km降水和观测降水的相关性随着降水增大而增大。当小时降水 < 20 mm,大部分独立站的相关系数 < 0.5 ;当小时降水 ≥ 20 mm,42%~56%的站点的降水相关系数 ≥ 0.5 ,且30%~32%的站点相关性 ≥ 0.99 ,表明在强降水情形下ART_1 km降水和观测降水的相关性增大。

表3表明,降水不分级时,超出90%的独立站的ART_1 km降水和观测降水的均方根误差为[1.0, 5.0) mm。降水分级后,当小时降水 < 10 mm,66%~96%的站点的均方根误差为[1.0, 5.0) mm;当小时降水为[10, 20) mm,77%~82%的站点的均方根误差为[5.0, 10.0) mm;当小时降水 ≥ 20 mm,75%~86%的站点的均方根误差 \geq

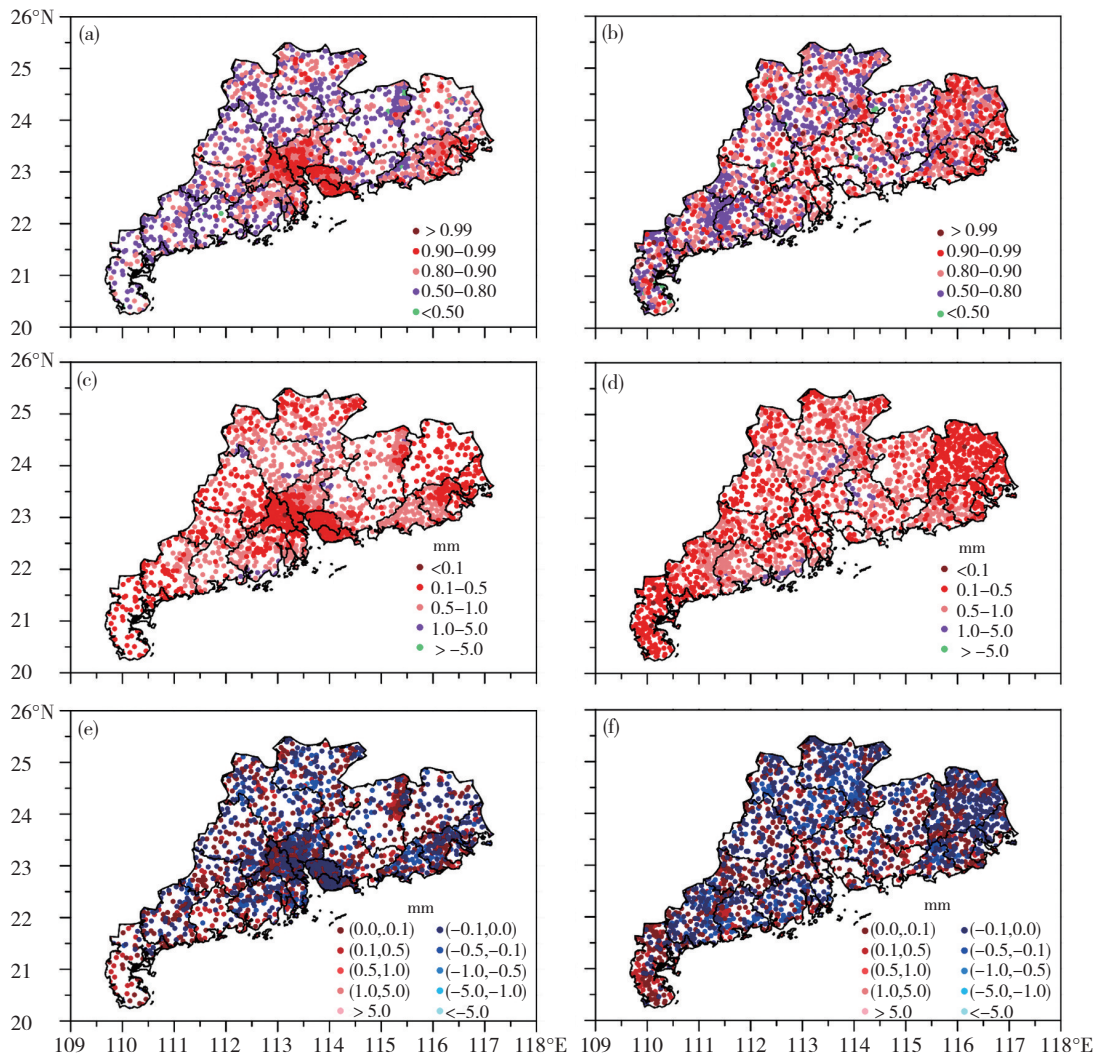


图6 2019—2022年5—8月广东省20例暴雨过程中区域站(a, c, e)和水文站(b, d, f)的ART_1 km降水
和观测降水的相关系数(a, b)、均方根误差(c, d)和平均值误差(e, f)的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of (a, b) correlation coefficient, (c, d) root mean square error, and (e, f) mean error between ART_1 km precipitation products and observational precipitation at non-uploaded regional stations (a, c, e) and hydrometric stations (b, d, f) from the 20 cases in this study

表2 广东 ART_1 km降水与观测降水的不同小时降水等级的相关系数(COR)在 ≥ 0.99 、 ≥ 0.9 、 ≥ 0.8 、 ≥ 0.5 和 < 0.5 范围下的站点占比(P_{COR})

Table 2 Station ratios of different precipitation classifications in different correlation efficient ranges of ≥ 0.99 , ≥ 0.9 , ≥ 0.8 , ≥ 0.5 , and < 0.5 between ART_1 km products and observations

独立站	降水等级/mm	站点数	$P_{COR}/\%$				
			$COR \geq 0.99$	$COR \geq 0.9$	$COR \geq 0.8$	$COR \geq 0.5$	$COR < 0.5$
区域站	不分级	2 217	0.14	20.14	63.08	98.55	1.45
	[0.1,2)	2 212	0.00	0.18	1.27	31.15	68.85
	[2,5)	2 208	0.00	0.23	0.54	10.42	89.58
	[5,10)	2 208	0.05	0.23	0.63	10.92	89.08
	[10,20)	2 204	0.45	1.04	2.18	16.72	83.28
	[20,50)	2 173	2.79	5.91	12.06	42.03	57.97
	≥ 50	991	30.66	37.53	42.56	52.63	47.37
水文站	不分级	1 967	1.73	22.34	60.73	98.78	1.22
	[0.1,2)	1 961	0.00	0.00	1.94	13.47	86.53
	[2,5)	1 961	0.00	0.66	2.14	14.85	85.15
	[5,10)	1 960	0.05	0.92	2.19	13.72	86.28
	[10,20)	1 960	0.10	1.53	2.81	17.45	82.55
	[20,50)	1 957	1.91	8.08	16.37	47.94	52.06
	≥ 50	765	31.97	41.38	46.39	55.17	44.83

表3 广东 ART_1 km 降水与观测降水的不同小时降水等级的均方根误差(RMSE)在 ≤ 1.0 、 $[1.0, 5.0)$ 、 $[5.0, 10.0)$ 和 ≥ 10.0 mm 范围下的站点占比(P_{RMSE})

Table 3 Station ratios of different precipitation classifications in different root mean square error ranges of ≤ 1.0 , $[1.0, 5.0)$, $[5.0, 10.0)$ and ≥ 10.0 mm between ART_1 km products and observations

独立站	降水等级/mm	站点数	$P_{RMSE}/\%$			
			RMSE ≤ 1.0	RMSE $\in [1.0, 5.0)$	RMSE $\in [5.0, 10.0)$	RMSE ≥ 10.0
区域站	不分级	2 217	3.29	96.53	0.18	0.00
	[0.1,2)	2 212	33.77	66.09	0.14	0.00
	[2,5)	2 208	1.40	95.79	2.72	0.09
	[5,10)	2 208	0.09	82.65	16.85	0.41
	[10,20)	2 204	0.00	14.02	81.90	4.08
	[20,50)	2 173	0.18	1.84	19.74	78.23
	≥ 50	991	0.50	5.35	8.27	85.87
水文站	不分级	1 967	8.69	91.15	0.15	0.00
	[0.1,2)	1 961	31.87	68.03	0.10	0.00
	[2,5)	1 961	5.46	92.61	1.89	0.05
	[5,10)	1 960	1.53	84.29	13.98	0.20
	[10,20)	1 960	0.36	18.78	77.50	3.37
	[20,50)	1 957	0.20	4.85	19.47	75.47
	≥ 50	765	1.18	6.41	9.54	82.88

表4 广东 ART_1 km 降水与观测降水的不同小时降水等级的平均值误差(ME)在 $[-0.1, 0.1]$ 、 $[-0.5, 0.5]$ 、 > 10.0 、 ≥ 0.0 和 < 0.0 mm 范围下的站点占比(P_{ME})

Table 4 Station ratios of different precipitation classifications in different mean error ranges of $[-0.1, 0.1]$, $[-0.5, 0.5]$, > 10.0 , ≥ 0.0 and < 0.0 mm between ART_1 km products and observations

独立站	降水等级/mm	站点数	$P_{ME}/\%$					
			ME $\in [-0.1, 0.1]$	ME $\in [-0.5, 0.5]$	ME > 10.0	ME < -10.0	ME ≥ 0.0	ME < 0.0
区域站	不分级	2 217	64.77	99.19	0.00	0.00	51.87	48.13
	[0.1,2)	2 212	7.59	81.96	0.00	0.00	98.51	1.49
	[2,5)	2 208	18.75	68.43	0.05	0.00	70.06	29.94
	[5,10)	2 208	7.43	33.56	0.00	0.00	26.13	73.87
	[10,20)	2 204	1.13	5.17	0.00	0.54	6.40	93.60
	[20,50)	2 173	0.37	0.92	0.14	42.71	3.41	96.59
	≥ 50	991	0.40	0.71	0.91	80.83	5.25	94.75
水文站	不分级	1 967	70.31	99.34	0.00	0.00	43.67	56.33
	[0.1,2)	1 961	24.12	82.10	0.00	0.00	88.22	11.78
	[2,5)	1 961	20.40	77.41	0.00	0.00	63.74	36.26
	[5,10)	1 960	5.97	33.83	0.00	0.00	18.62	81.38
	[10,20)	1 960	0.77	4.69	0.00	0.56	5.51	94.49
	[20,50)	1 957	0.36	1.33	0.05	46.86	3.53	96.47
	≥ 50	765	0.13	0.92	0.78	80.39	5.23	94.77

10.0 mm。此外,从均方根误差 ≥ 10.0 mm 的站点占比来看,区域站和水文站的站点占比随降水增强而增大,尤其当小时降水 ≥ 20 mm,两类独立站的站点占比都超出 75%,说明随着降水增强,独立站的 ART_1 km 降水和观测降水的均方根误差增大。

表4表明,降水不分级时,约 65%的区域站和约 70%的水文站的 ART_1 km 降水和观测降水的平均值误差在 ± 0.1 mm 内。降水分级后,当小时降水 < 5 mm, 68% ~ 83% 的站点的平均值误差在 ± 0.5 mm 内,且 70% ~ 99% 的站点的平均值误差 ≥ 0 mm,即大部分站

点的平均值误差在 $[0.0, 0.5]$ mm 范围内;当小时降水 ≥ 20 mm, 94% 以上的站点的平均值误差 < 0 mm; 当小时降水 ≥ 50 mm, 接近 81% 的站点的平均值误差在 -10 mm 以下,即此时 ART_1 km 降水总体弱于实际观测 10 mm 以上。实际上,从平均值误差 ≥ 0 、 < 0 的站点占比来看,当小时降水 ≥ 5 mm 时, 73% 以上的站点的平均值误差小于 0,说明 ART_1 km 降水低估较明显。

3 极值站点降水准确性评估

表5和表6分别统计了每例暴雨过程中 ART_1

km降水与观测降水偏差最大的区域站和水文站。两类独立站在每例暴雨过程中降水偏差最大的站点并不相同,每个站的偏差值大小也不同,这可能是由于每例过程的降水强度和落区不同导致的,也说明

表5 广东省20例暴雨过程中ART_1 km降水与观测降水偏差最大的区域站及其降水信息

Table 5 Non-uploaded regional meteorological stations with the maximum deviation between ART_1 km products and observations in each rainstorm case

序号	站号	观测时间(年-月-日-时)	观测降水(O)/mm	ART_1 km降水(G)/mm	偏差(G-O)/mm
1	G2448	2019-05-08-09	1.0	43.3	42.3
2	G3727	2019-05-20-21	89.2	29.7	-59.5
3	G2187	2019-05-27-05	141.6	39.7	-101.9
4	G6528	2019-06-11-06	1.5	75.0	73.5
5	G2140	2019-06-24-14	74.5	9.9	-64.6
6	G1830	2019-07-31-14	65.7	19.5	-46.2
7	G5310	2019-08-25-16	86.1	24.2	-61.9
8	G1970	2020-05-22-03	0.0	106.7	106.7
9	G2322	2020-06-02-08	0.2	54.5	54.3
10	G1119	2020-06-08-03	136.7	39.6	-97.1
11	G2513	2020-06-14-11	43.2	14.6	-28.6
12	G6514	2020-08-03-17	70.6	19.7	-50.9
13	G4517	2020-08-18-15	57.4	2.8	-54.6
14	G4619	2021-05-20-00	6.1	91.7	85.6
15	G1273	2021-06-01-08	122.0	34.8	-87.2
16	G3247	2021-06-22-05	86.7	5.2	-81.5
17	G1214	2021-07-22-10	65.5	7.1	-58.4
18	G7317	2022-05-11-06	89.1	10.1	-79
19	G2961	2022-06-06-16	147.7	56.6	-91.1
20	G6625	2022-06-18-06	109.3	16.3	-93.0

表6 广东省20例暴雨过程中ART_1 km降水与观测降水偏差最大的水文站及其降水信息

Table 6 Hydrometric stations with the maximum deviation between ART_1 km products and observations in each rainstorm case

序号	站号	观测时间(年-月-日-时)	观测降水(O)/mm	ART_1 km降水(G)/mm	偏差(G-O)/mm
1	81723780	2019-05-04-17	107.0	44.9	-62.1
2	81004200	2019-05-20-05	99.5	28.3	-71.2
3	81720260	2019-05-25-05	84.0	4.4	-79.6
4	81201390	2019-06-13-18	0.0	70.1	70.1
5	81001608	2019-06-23-05	0.0	63.3	63.3
6	81720603	2019-08-01-07	85.0	24.0	-61.0
7	81113710	2019-08-25-16	116.0	34.5	-81.5
8	81720400	2020-05-21-03	88.5	13.2	-75.3
9	81721280	2020-06-02-05	15.5	66.0	50.5
10	81022380	2020-06-06-19	92.5	27.6	-64.9
11	81722965	2020-06-14-11	41.0	14.6	-26.4
12	80650620	2020-08-04-14	65.0	11.1	-53.9
13	80900995	2020-08-19-13	1.0	56.6	55.6
14	81021890	2021-05-20-04	25.0	81.4	56.4
15	81311590	2021-06-01-06	71.5	3.1	-68.4
16	81022105	2021-06-21-10	11.0	77.3	66.3
17	81721540	2021-07-21-01	95.5	31.1	-64.4
18	81701270	2022-05-11-03	128.5	19.6	-108.9
19	81321920	2022-06-08-12	92.0	12.3	-79.7
20	81022790	2022-06-21-11	126.5	38.6	-87.9

ART_1 km降水的表现存在站点差异。

区域站(表5)的最大降水偏差达到106.7 mm,发生在2020年5月22日03时的G1970站点,此时该站观测降水为0 mm,ART_1 km降水在该站该时次的表现存在严重高估。但从20例暴雨过程的统计来看,15例的区域站存在低估,其中最大低估值为101.9 mm,发生在2019年5月27日05时的G2187站点,此时该站观测降水为141.6 mm,ART_1 km降水为39.7 mm。水文站(表6)的最大降水偏差达到108.9 mm,发生在2022年5月11日03时的站点81701270,此时该站观测降水为128.5 mm,ART_1 km降水为19.6 mm,后者明显低估。此外,表6呈现出14例的水文站存在低估。

然而,表5和表6的统计是针对每例暴雨过程中降水偏差最大的时刻,对于整个暴雨过程中是否存在较多的低估时次不确定。为了进一步检验ART_1 km降水产品在整个暴雨过程中的表现,图7a给出了表5中低估最明显的区域站G2187在2019年5月23日08时—30日22时暴雨过程的观测降水和ART_1 km降

水及二者偏差的时间演变,发现该站ART_1 km降水在该过程的显著降水时期(如5月26日05时—27日05时和29日04时—16时)表现为明显低估。但总体来看,G2187的ART_1 km降水仍然成功再现了降水的发生发展过程和强弱演变趋势。图7b则给出了表6中低估最明显的水文站81701270在2022年5月10日06时—14日08时暴雨过程的降水演变,发现该站的ART_1 km降水峰值的发生时间比观测降水峰值的发生时间滞后了1 h,从而导致了ART_1 km降水的严重低估,但在后续过程中,ART_1 km降水产品仍较好地再现了降水的强弱变化。图7c、d则分别是20例暴雨过程中小时观测降水最大的区域站和水文站的降水演变,其中区域站的最大小时降水为167.8 mm,发生在2020年5月22日03时的G9502站,水文站的最大小时降水为149.0 mm,发生在2022年5月11日06时的81720610站。从图7c、d可见,在小时降水最大的过程中,ART_1 km降水低估仍然明显,但也再现了观测降水的发展趋势。

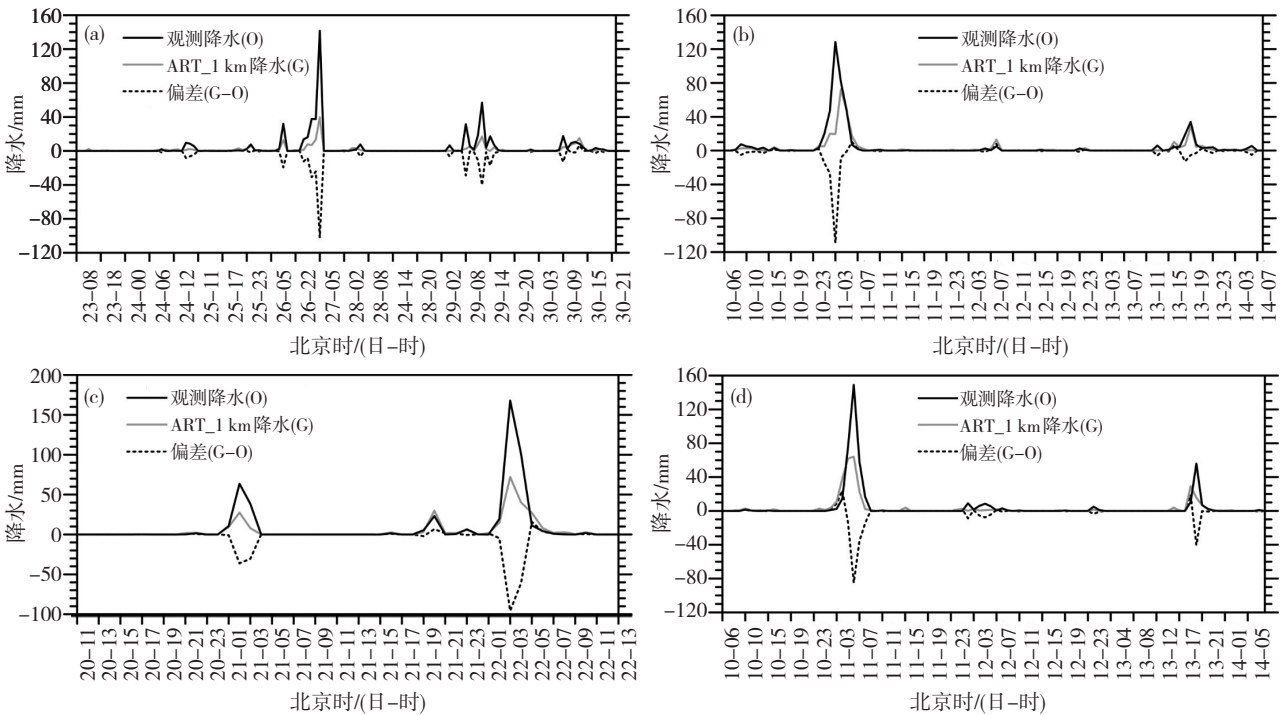


图7 区域站G2187在2019年5月23日08时—30日22时(a)、水文站81701270在2022年5月10日06时—14日08时(b)、区域站G9502在2020年5月20日11时—22日13时(c)、和水文站81720610在2022年5月10日06时—14日08时(d)的观测降水、ART_1 km降水及二者偏差的时间演变

Fig.7 Temporal variations of observed precipitation (O, black solid lines), ART_1 km precipitation (G, gray solid lines), and their deviation (G-O, dashed lines) (a) at the non-uploaded regional station G2187 from 08:00 BT May 23 to 22:00 BT May 30, 2019, (b) at the hydrometric station 81701270 from 06:00 BT May 10 to 08:00 BT May 14, 2022, (c) at the non-uploaded regional station G9502 from 11:00 BT May 20 to 13:00 BT May 22, 2020, and (d) at the hydrometric station 81720610 from 06:00 BT 10 May to 08:00 BT May 14, 2022, respectively

总体对比了每例暴雨过程中降水低估显著的独立站的观测降水和ART_1 km降水的演变,发现不少独立站的ART_1 km降水峰值的发生相比观测降水峰

值的发生提前或滞后1~2 h,但也存在不少独立站的ART_1 km降水峰值并未发生提前或滞后的情形,其ART_1 km降水仍弱于观测降水。

4 结论与讨论

本文选取广东省2019—2022年5—8月的20例致灾暴雨过程,以未上传融合制作ART_1 km降水产品的区域站和水文站等两类独立站的观测降水资料作为“真值”,对ART_1 km降水产品在暴雨过程中的准确性进行量化评估。主要结论如下:

(1) ART_1 km降水产品较好地再现了广东省暴雨过程的降水落区、强度和变化趋势,在反映大范围的降水分布上具有很大优势,但对于站点较稀疏的地区如雷州半岛,ART_1 km降水产品呈现的降水范围和强度相比实测略大,在反映小范围局地分散性降水上仍存在不足。此外,ART_1 km降水产品也能够较好地反映无降水的情形。

(2) ART_1 km降水和观测降水在珠三角、粤东东部和粤北北部的相关系数最大(≥ 0.8)、均方根误差最小(0.1~0.5 mm);而粤东西部、粤北南部和粤西的降水相关性降低,均方根误差增大。全省大部分独立站的ART_1 km降水和观测降水的平均值误差在 ± 0.1 mm内,但雷州半岛总体表现为降水略有高估。

(3) 降水越强,独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关性越高,但均方根误差和平均值误差也越大。降水不分级时,全省约60%的独立站的ART_1 km降水和观测降水的相关系数 ≥ 0.8 ,超90%的独立站的均方根误差在[1.0, 5.0) mm范围内,超60%的独立站的平均值误差在 ± 0.1 mm内。降水分级后,当小时降水较弱时(< 5 mm),全省大部分独立站的相关系数 < 0.5 、均方根误差在[1.0, 5.0) mm范围内、平均值误差在[0.0, 0.5] mm范围内;当小时降水很强时(≥ 20 mm),全省42%~56%的独立站的相关系数 ≥ 0.5 ,大部分独立站的均方根误差 ≥ 10 mm、平均值误差 < 0 mm,且当小时降水 ≥ 50 mm,平均值误差 < -10 mm。

(4) 随着降水增强,ART_1 km降水产品总体表现为低估。20例暴雨过程中,区域站的ART_1 km降水最大低估值达101.9 mm,水文站达108.9 mm。分析低估最明显及降水最强的站点在相应暴雨过程中的降水演变发现,ART_1 km降水在强降水发生时存在明显低估,甚至其峰值降水的时间相比观测提前或滞后1~2 h,但仍较好地反映了整个过程降水的发生消亡和强弱演变趋势。

独立站ART_1 km降水与观测降水的偏差与这些站点的观测资料未融合制作降水产品密切相关。由于ART_1 km降水产品是由每个格点附近的站点观测资料融合分析得到,因此ART_1 km降水低估情况的出现可能与独立站周围的降水分布不均匀性有关。

站点分布也存在不均匀性,站点越密集的区域,融合制作ART_1 km降水产品的观测资料就越多,产品的准确性越高。但如果独立站周围参与融合制作的实况站点太少,则可能导致ART_1 km降水的低估。因此,若有更多的独立站观测融入制作ART_1 km降水产品,有助于进一步提升该产品的准确性。

参考文献:

- 刘晓阳,杨洪平,李建通,等.2010.新一代天气雷达定量降水估测集成系统[J].气象,36(4):90-95. Liu X Y, Yang H P, Li J T, et al. 2010. CIN-RAD radar quantitative precipitation estimation group system [J]. Meteorological Monthly,36(4):90-95 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.4.016
- 刘雨佳,张强,余予.2017.华南地区1961—2014年暴雨及典型暴雨事件统计分析[J].暴雨灾害,36(1):26-32. Liu Y J, Zhang Q, Yu Y. 2017. Analysis of heavy rain and typical torrential rain event in Southern China during 1961-2014 [J]. Torrential Rain and Disaster,36(1):26-32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.01.004
- 潘昶,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 Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(6):1381-1389 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2012.116
- 潘昶,谷军霞,宇婧婧,等.2018.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,76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, YU J J, et al. 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(5):755-766 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2018.034
- 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 Z H, Zhao P, Zhang Q, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. Meteorological Monthly,36(7):123-132 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.7.019
- 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 Y, Feng M N, Zhang H Z, et al. 2010. Interpolation methods of China daily precipitation data [J]. Journal of Applied Meteorological Science,21(3):279-286 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.03.003
- 沈艳,潘昶,徐宾,等.2012.最优插值法在对中国自动站降水量空间分析中的参数优化[J].成都信息工程学院学报,27(2):219-224. Shen Y, Pan Y, Xu B, et al. 2012. Parameter improvements of hourly automatic weather stations precipitation analysis by optimal interpolation over China [J]. Journal of Chengdu University of information Technology,27(2):219-224 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2012.02.016
- 沈艳,潘昶,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 Y, Pan Y, Yu J J, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,36(1):37-46 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.005
- 师春香,潘昶,谷军霞,等.2019.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. 2019. A

- review of multi-source meteorological data fusion products [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,77(4):774–783 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.043
- 孙喜艳,伍志方,梁巧倩,等.2017.广东省不同等级小时强降水时空特征分析[J].*自然灾害学报*,26(5):102–109. Sun X Y, Wu Z F, Liang Q Q, et al. 2017. Analysis of spatio temporal characteristics of hourly heavy precipitation in different grades in Guangdong [J]. *Journal of Natural Disasters*,26(5):102–109 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2017.0512
- 伍红雨,李春梅,刘蔚琴.2017.1961–2014广东小时强降水的变化特征[J].*气象*,43(3):305–314. Wu H Y, Li C M, Liu W Q. 2017. Variation characteristics of hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961–2014 [J]. *Meteorological Monthly*,43(3):305–314 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2017.03.006
- 伍红雨,李文媛,杜尧东.2019.2019年7—8月广东省天气气候特点及其影响评述[J].*广东气象*,41(5):2–3. Wu H Y, Li W Y, Du R D. 2019. Review on the weather and climate characteristics and their effects in Guangdong Province from July to August 2019 [J]. *Guangdong Meteorology*,41(5):cover 2, cover 3 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007–6190.2019.05.022
- 俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].*暴雨灾害*,32(3):202–209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. *Torrential Rain and Disaster*,32(3):202–209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2013.03.002
- 张柳红,郑璟,伍红雨,等.2021a.广东暴雨洪涝灾害损失定量评估[J].*暴雨灾害*,40(1):87–93. Zhang L H, Zheng J, Wu H Y, et al. 2021a. Quantitative assessment of disaster loss caused by rainstorms and floods in Guangdong [J]. *Torrential Rain and Disaster*,40(1):87–93 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.01.011
- 张柳红,陈玉玮,伍红雨,等.2021b.2020年广东省气候概况[J].*广东气象*,43(4):1–5. Zhang L H, Chen Y W, Wu H Y, et al. 2021b. A summary of the climate in Guangdong Province in 2020 [J]. *Guangdong Meteorology*,43(4):1–5 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007–6190.2021.04.001
- 张小雯,湛芸.2011.广东省短历时强降水的气候学特征分析[J].第28届中国气象学会年会,362–374. Zhang X W, Chen Y. 2011. Analysis of climatological characteristics of short-time heavy rainfall in Guangdong Province. The 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, 362–374 (in Chinese).
- 赵娴婷,闵爱荣,廖移山,等.2021.2020年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J].*暴雨灾害*,40(6):675–686. Zhao X T, Min A R, Liao Y S, et al. 2021. Major heavy rain events in China from April to October in 2020 [J]. *Torrential Rain and Disaster*,40(6):675–686 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.06.012
- 钟雨珊,刘三梅,伍国裕,等.2023.广东近年“龙舟水”期间地闪特征及其与降水关系[J].*气象研究与应用*,44(1):106–111. Zhong Y S, Liu S M, Wu G Y, et al. 2023. Characteristics of ground flash and its relationship with dragon-boat precipitation in Guangdong in recent years [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*,44(1):106–111 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45–1356/P.2023.1.18
- 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]. *Journal of Hydro-meteorology*,5(3):487–503. doi:10.1175/1525–7541(2004)0052.0.CO;2
- Xie P P, Xiong A Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses [J]. *Journal of Geophysical Research*,116(D21):D21106. doi:10.1029/2011JD016118

(责任编辑 唐国瑛)