# 基于雷达-雨量计降水融合方法提高极端降水监测能力

李梦迪<sup>1</sup> 戚友存<sup>1,2,3</sup> 张哲<sup>2</sup> 管晓丹<sup>1</sup>

3 1. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

4 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101

5 3. 中国科学院大学,北京 100864

6

1

2

高时空分辨率、高精度的降水产品对于极端降水的监测以及防灾减灾具 摘要 7 有重要意义。地面雨量计提供点尺度降水精确观测,但无法精细化捕捉对流性强 8 降水的空间分布。雷达观测可以精细地刻画降水的空间分布特征,但雷达定量估 9 计降水(OPE, quantitative precipitation estimation)产品估测精度易受雷达观测 10 偏差和 Z-R 关系等因素影响。因此,本文开展高时空分辨率的雷达-雨量计降水 11 12 融合算法研究, 集成雨量计观测和雷达定量估计降水产品各自的优点。该算法主 要步骤包括:雨量站观测数据格点化、局地雨量计订正雷达 OPE 和雷达-雨量计 13 降水融合三个部分。首先利用克里金插值方法,对雨量站观测的降水进行插值, 14 得到格点降水信息;再通过局地雨量计订正方法系统性地订正雷达 QPE 产品, 15 以提高雷达 QPE 产品精度,最后,结合降水类型,通过雷达-雨量计降水融合算 16 法,产生高时空、高精度雷达-雨量计降水融合产品。通过郑州21•7暴雨、台 17 风烟花和 2021 年 8 月随州暴雨三个典型地极端降水事件, 对雷达-雨量计降水融 18 合算法产生的雷达-雨量计降水融合产品进行了系统地评估和分析。结果表明, 19 在不同的极端降水事件和不同的降水时段, 雷达-雨量计降水融合产品精度上优 20 于雷达 QPE 产品,且在降水的空间分布上能够较雨量站观测格点插值产品更能 21 精细地刻画降水的结构特征。表明算法得到的雷达-雨量计降水融合产品的准确 22 性较高,对极端降水有较好的捕捉和监测能力。 23 关键词 极端降水, 克里金插值, 雨量计订正, 降水融合 24

25

**收稿日期** 2021-xx-xx; 网络预出版日期 202x-xx-xx 作者简介 李梦迪,女,1996 年出生,硕士研究生,主要从事雷达气象学研究。E-mail: limd18@lzu.edu.cn 通讯作者 戚友存,主要从事雷达水文气象研究,Email: <u>youcun. qi@igsnrr.ac.cn</u>;管晓丹,全球干旱半干 旱地区的陆气相互作用; Email: guanxd@lzu.edu.cn。 资助项目 资助项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1507505),中国科学院百人计划 Funded by: National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1507505) and Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences

## Improving the Detection Performance of Extreme Precipitation

27

# **Observations Through Radar-Gauge Merging Algorithm**

28

Li Mengdi<sup>1</sup>, Qi Youcun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Zhe<sup>2</sup>, Guan Xiaodan<sup>1</sup>

29 1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

30 2. The Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute

- 31 of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of
- 32 Sciences, Beijing 100101, China
- 33 3. The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864
- 34

35 Abstract Precipitation products with high spatial and temporal resolution and high accuracy are 36 37 important for the observation of extreme precipitation as well as disaster prevention and mitigation. 38 Gauge station observations provide accurate point-scale precipitation, but are insufficient for finely 39 capturing spatial information on heavy precipitation induced by severe convection. Radar scanning can 40 provide accurate precipitation information with high spatial and temporal resolution, but the accuracy 41 of radar quantitative precipitation estimation (QPE) is vulnerable to various factors such as observation accuracy and Z-R relationship. Therefore, a Radar-Gauge Merging algorithm is proposed in this paper 42 43 to combine the advantages of gauge station observations and radar QPE. The algorithm includes three steps: Kriging interpolations of precipitation, Local Gauge-Corrected (LGC) Radar QPE and 44 45 Radar-Gauge Merging QPE. First, the precipitation interpolation fields are obtained by the Kriging 46 method based on the regional station observations. Then based on the Local Gauge-Corrected method, 47 the accuracy of the radar QPE is improved by making systematic corrections. Finally, combined with 48 the precipitation type, the Radar-Gauge Merging QPE with high spatial and temporal resolution and 49 high accuracy is produced by the Radar-Gauge Merging algorithm. Three extreme precipitation events: 50 the 21.7 extreme precipitation in Zhengzhou, Typhoon In-Fa and the extreme precipitation in Suizhou 51 in August 2021 are used to evaluate the performance of the Radar-Gauge Merging algorithm. The 52 results show that the new Radar-Gauge Merging QPE outperforms the radar QPE product in terms of 53 accuracy and characterizes the structure of precipitation more finely than the Kriging interpolations of 54 the observation from the gauge stations in terms of spatial distribution of precipitation for the different 55 extreme precipitation events and different time periods of precipitation events. It demonstrates the high 56 accuracy and stability of the new Radar-Gauge Merging algorithm as well as its ability for capturing 57 the distribution of extreme precipitation.

58

59 Keywords Extreme precipitation, Kriging interpolations, Gauge-Corrected Radar QPES, Merging QPE





# 60 1.引言

61 在全球气候变暖的影响下,极端降水发生频率增加,导致了大量气象和地质灾害的发生
62 (闵锦忠等,2020; Feki et al., 2017; 丁一汇,2018)。极端降水是城市内涝、洪水、泥石
63 流、滑坡等水文地质灾害的重要诱因(Maggioni et al., 2016; Cao et al., 2021; Zhang et al.,
64 2021)。我国地形和气候复杂,增大了灾害发生的可能性,并且由于我国经济的迅速发展,
65 人口、资源等集约化程度越来越高,每年极端降水及其引发的水文地质灾害,不仅造成了巨
66 大的经济损失,影响正常的生产生活活动,更严重威胁着人民生命财产安全(姚亚庆,2016;
67 Salman and Li, 2018; Zhang et al., 2020)。

极端降水历时时间短、降水强度大且区域小,获取准确的降水强度和落区,对于气象和 68 水文预报、预警是至关重要的,目前降水观测信息获取的主要途径有地面雨量站观测、雷达 69 探测和卫星遥感探测信息。地面雨量站观测是获取地面降水量最直接的途径,提供精确的点 70 尺度降水观测,并且降水信息是最接近于地面(Daly et al., 1994),但雨量站观测受布站、 71 维护困难的实际影响较大(Yilmaz et al., 2010),在我国的西部和山区,布站密度较低,即 72 73 使在东部,局地强对流天气尺度小变化快,其布设密度也仍然无法满足精细化捕捉强对流引 74 发的强降水的空间信息(Xie et al., 2007; Villarini et al., 2008; 房彬, 2010); 我国布设了 两百多台天气雷达用于气象监测和预警,高时空分辨率的雷达观测可以提供较为准确的降水 75 76 空间信息,较为精准地捕捉极端降水的位置和移动,有助于降水落区的确定,其对云和降水 结构也有较好的探测能力(刘黎平等, 2021; 杨洁帆等, 2021),利用雷达反射率与降水率 77 78 的关系,可以反演出降水的空间分布特征(李巧等, 2021; 孙跃等, 2021; Zhu et al., 2020)。 79 但由于我国地形复杂,雷达站点布设空间分布不均匀,且雷达受地形等遮挡的影响(柳云雷 等,2020),尚无法覆盖全国,且雷达属于遥感方式,杂波干扰(郭春晖等,2014)和电磁 80 81 波衰减(胡志群等, 2008)等都会使其降水反演的准确性低于雨量站观测。而卫星遥感是全 82 球范围,可覆盖全国区域,但其时间和空间分辨率低于雷达降水产品(刘晓阳等,2005), 且由于卫星遥感反演降水存在观测和算法的局限性, 自上而下的观测, 云的信息和雨的信息 83 比较难以区分,存在把云误识别为雨的情况,这使得卫星通过云顶温度及云中粒子信息推算 84 反演降水精度较低,尤其是对降水强度的反演(刘元波等,2011;许时光等,2014;程开宇 85 等,2016)。综上可见,基于单一来源的降水资料各有利弊,因此如何将不同源的降水有效 86 结合,综合发挥其优势,是近年来开发高质量降水产品的主流趋势(Huffman et al., 2007; 87 88 Hong et al., 2004; Kitzmiller et al., 2013) .

89 目前,我国的不同源降水融合研制已取得一些进展,研发了一些高精度的降水融合产品。 90 由于我国地形复杂, 雷达的型号存在差异, 在探测过程中雷达回波的基本质量问题尚未完全 91 解决(师春香等,2019),因此我国早期融合降水研究多是基于卫星降水产品和地面观测数 据。国家卫星气象中心研制了 FY2 静止卫星降水产品,提高了降水场的精度《卢乃锰等, 92 2004)。国家气象信息中心最初在 2010 年引进美国气候预测中心的"概率密度函数+最优 93 插值(PDF+OI)"融合方法(Xie et al., 2011),发展了地面观测和卫星二源融合降水(潘 94 旸等,2012)。随着我国雷达定量估计降水产品的发展,"概率密度函数+贝叶斯模型平均 95 (BMA)+最优插值"方法被提出来,从之前的二源融合产品通过引进雷达定量估计降水产 96 97 品发展成为三源融合产品(CMPAS-NRT),并在 2016 年通过空间降尺度法将产品从 5km 98 分辨率提高至1km的空间分辨率(潘旸等, 2018)。该三源融合产品的精度均高于单一源 99 的降水产品,在中国范围内都能达到较好的融合效果。

100 在国际上,则倾向于采用区域高分辨率雷达定量估计降水(QPE)产品与雨量计进行融 合。澳大利亚气象局研发雷达定量降水估计系统通过对雷达回波进行质量控制、降水类型分 101 类、反演降水及基于卡尔曼滤波方法地面雨量计校准得到降水估计场 102 103 (http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/calculating rainfall accumulations.shtml[2021-12 104 -01])。欧洲综合考虑了地面观测数据、雷达数据和高程因素,开发了 the Integrated 105 Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) 降水分析系统,产品时空分辨率分别 为15 min 和1 km (Haiden and Pistotnik, 2009),成功将地面观测的定量精度与雷达提供的 106 空间精度相结合(Haiden et al., 2011)。在英国,为了解决误差大和空间分辨率低的问题, 107 108 Yu et al. (2020)研发了基于雷达、卫星、雨量站观测三种数据融合的高时空分辨降水分析 109 系统(UKGrsHP),并得到了空间分辨率为0.01°×0.01°的降水产品,但是雨量站分布稀疏, 降水产品精度有待提高。美国国家强风暴实验室(NSSL)的MRMS(Multi-Radar Multi-Sensor) 110 系统是应用广泛的成熟业务化系统,在强降水灾害天气监测和预报发挥重大作用(Zhang et 111 al., 2015; Zhang et al., 2016; Qi et al., 2017)。MRMS 系统实时每 2min 发布空间分辨率 1km 112 的雷达 QPE 数据。该系统对雷达基数据进行质量控制,然后反演降水,再通过地面雨量站 113 观测数据对雷达 QPE 进行局地订正,同时在山区使用了坡面回归模型(PRISM)制作山区 114 降水产品(Zhang et al., 2011; Zhang et al., 2014),在亮带部分进行了 S-PROF VPR 订正 115 (S-band Precipitation Profiler based Vertical Profiles of Reflectivity Correction) 得到了更准确 116 117 的雷达 QPE(Qi et al., 2014)。在美国基于单雷达 QPE 对 MRMS 系统做测试,测试结果表 明 MRMS 可以提供准确的降水相关信息。近两年有研究表明 MRMS 会出现过度校正和低估 118

119 极端降水的情况(Bayabil et al., 2019; Chen et al., 2020)。

120 以上的国内外工作对我们开展降水产品融合工作提供了许多借鉴。这些工作使用的降水 121 产品来源或有不同,但其方法原理是基本相同的:通过比较雨量站观测和雷达(卫星)产品 降水率的差异,去校正雷达(卫星)产品降水的强度,通过距离权重、卡尔曼滤波等方法, 122 把雨量站的观测信息引入到雷达(卫星)产品中,其中雷达(卫星)某网格雨量站越远,雨 123 量站观测对其影响越小。总结以上的工作,也发现一些不足:订正只能通过少数的点对整个 124 区域的网格进行降水订正,订正并不能将雨量站观测的空间信息较好的融合到最终的降水产 125 品中。这些融合方法使用的雨量站观测信息分布较为稀疏,而我国雨量站在中东部地区分布 126 较为密集。在有高密度分布的雨量站观测信息时,以往的方法是否适用?是否可以利用这些 127 高密度的雨量站观测信息,形成插值场与雷达 OPE 进行融合,从而将雨量站观测到的降水 128 的空间信息稳定引入到融合产品中?这些问题将在本文中展开深入研究。 129

130 文章将从雨量站观测数据格点化,局地雨量计订正雷达定量降水和雷达-雨量计降水融
131 合三个方面介绍雷达-雨量计降水融合算法研究工作,并通过三个不同复杂下垫面影响的极
132 端降水事件,系统性地定量评估了雷达-雨量计降水融合算法在极端降水中的捕捉和监测性
133 能。

# 134 2.数据与方法

### 135 2.1 资料介绍



138 研究中使用的雨量计观测数据是全国雨量计观测的小时降水量数据,包含了全国的测量
139 到降水的站点信息,根据雨量计所在站点的级别,可以分为国家站和区域站。在对其进行雨
140 量计质量控制的基础上(Qi et al., 2016),使用通过质控的雨量站观测数据进行算法的计算
141 和评估。其中区域站用于参与算法的计算,国家站用于算法的检验评估。

142 研究中使用的雷达 QPE 数据为郑州、上海及随州雷达 QPE 的小时降水量数据,河南和
143 台风的个例使用单部雷达 QPE,随州个例为多部雷达拼图数据,其空间分辨率分别为 0.01°
144 ×0.01°。由于中国地形复杂,雷达探测易受地物遮挡影响,虽然在进行雷达估测降水时已
145 考虑地形带来的遮挡问题,但是实际在雷达观测区域会出现非地形因素,会对探测电磁波的
146 能量造成影响,这需要对雷达定量估计降水数据进行订正,订正方法作为融合算法的重要组

### 表 1.极端降水事件信息



150 差评估方面,采用均方根误差 RMSE、相对误差 RMAE 和相对偏差 RMB。对于一致性分析,

151 通过相关系数 CC 表达。以上四个评估的指标定义分别见式(1)~(4)。

152 
$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (Rain\_QPE(i) - Rain\_gauge(i))^2\right]^{1/2}$$
(1)

153  

$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |Rain\_QPE(i) - Rain\_gauge(i)|}{\sum_{i=1}^{n} Rain\_gauge(i)}$$
(2)  
154  

$$RMB = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Rain\_QPE(i) - Rain\_gauge(i))}{\sum_{i=1}^{n} Rain\_gauge(i)}$$
(3)  

$$\sum_{i=1}^{n} (Rain\_gauge(i) - \overline{R}_{gauge})(Rain\_QPE(i) - \overline{R}_{QPE})$$

155 
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Rain\_gauge(i) - R_{gauge})(Rain\_QPE(i) - R_{QPE})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Rain\_gauge(i) - \overline{R}_{gauge})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Rain\_QPE(i) - \overline{R}_{QPE})^{2}}}$$
(4)

156 式中: *n*为站点数量, *Rain\_QPE(i)*与*Rain\_gauge(i)*分别指在第*i*个国家站位置处的

157 降水产品与国家站观测数据,  $\bar{R}_{gauge}$  与  $\bar{R}_{QPE}$  分别指第i 个国家站观测数据与第i 个国家站位 158 置处的降水产品的均值。

159 RMSE 可判断降水产品相对国家站观测数据之间的偏离程度,RMSE 越小,降水产品偏
高国家站观测数据程度越小;RMAE 反映降水产品的整体精度,其值越小精度越高;RMB
161 是评判系统性偏差的指标,为正值(负值),说明降水产品高估(低估)了降水,与0越接
162 近,说明降水产品越接近于国家站测量值;CC表示降水产品与国家站观测数据之间的一
163 致性程度,CC 越接近于1,两者线性相关性越好。当RMSE、RMAE 和 RMB 越接近于0
164 且 CC 越接近于1,说明降水产品性能越好。

165 **2.3 雷达-雨量计降水融合算法** 

-雨量计降水融合。

166 雷达-雨量计降水融合算法包括以下三个模块,图1给出了雷达-雨量计降水融合算法流
167 程,主要包括: (1)雨量站观测数据格点化, (2)局地雨量计订正雷达 QPE 和 (3) 雷达

169 170

171

168

图 1. 雷达-雨量计降水融合算法流程图 Fig. 1. Flowchart of Radar-Gauge Merging algorithm

172 2.3.1 雨量站观测数据格点化一克里金方法

173 地面雨量计观测数据对于地面某个点的降水情况描述较为准确,但是在描述局地面降水
174 分布情况时存在缺陷,需要通过合适的插值方法将点尺度的降水数据插值获取基于雨量计观
175 测的时空连续区域降水数据。

 176
 克里金(Kriging)方法是地统计学中最常用的插值方法(王家华,1999; 王政权,1999),

 177
 其中普通克里金插值方法应用为广泛,该方法假定研究区域的空间属性是平均的,即测试区

 178
 域上一系列采样点 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的相应观测值 $Z(x_i)$ 的数学期望值和方差为一常数。普通克

 179
 里金插值既考虑到采样点和预测点的相对位置,同时还考虑到各采样点间的相对位置关系,

 180
 因此研究对象 $Z(x_i)$ 称为区域化变量,其在 $x_0$ 处的估计值 $\hat{Z}(x_0)$ 为已知采样点观测值 $Z(x_i)$  

 181
 的加权和,即:

 182
  $\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$  

 (5)

183 其中, $\lambda$ 为第i个采样点的测量值的权重。 $Z(x_i)$ 之间存在相关关系,这些相关关系与

184 距离和相对方向变化这两个因素有关。基于变异函数理论和结构,对某测试区域选区的采样
185 点在所需预测区域进行无偏最优估计,因此权重λ的选取标准是需要同时满足无偏性(公
186 式(6))和估计方差最小(公式(7)):

(6)

187 
$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} = 1$$

188 
$$\sum_{i}^{n} \lambda_{i} C(x_{i}, x_{j}) + \mu = C(x_{0}, x_{j}) \quad j = 1, 2, \cdots, n$$
 (7)

189 式中,  $C(x_i, x_j)$ 为 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_j)$ 的协方差函数,  $\mu$ 为拉格朗日乘数,此时 $\lambda_i$ 在无偏性 190 和最小方差条件下,依赖于变异函数的计算结果而求解。

191 经验半变异函数提供了采样数据集的空间自相关信息,半变异函数建模是空间描述和插
 192 值之间的关键步骤。经验半变异函数γ(h)的估计值γ<sup>\*</sup>(h)计算公式为:

193 
$$\gamma^{*}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i}^{N(h)} (Z(x_{i}) - Z(x_{i} + h))^{2}$$
(8)

194 式中 h 为滞后距离, N(h) 为相距距离为 h 的采样点组数。由于球面模型可以显示空间
195 自相关性减小到超出某个距离后为零的过程,符合降水采样点与周围点的相关性特点,因此
196 研究雨量计插值采用球面模型,其模型的变异函数公式如下:

Δ

197 
$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3\right) & 0 < h \le a \\ c_0 + c & h > a \end{cases}$$
(9)

ſ

198 其中, co为块金效应常数,简称块金常数,c为拱高,a为变程,h为滞后距离。通过
199 计算采样点之间的相互距离(滞后距离)以及半经验函数估计值,进行曲线拟合求解公式(9)
200 中参数。不同时刻计算得到的变程a是不同的,变化范围在14.5-16之间。

201 由于假设区域化变量满足二阶平稳假设,因此

202 
$$C(h) = C(0) - \gamma(h)$$
 (10)

203 求解出经验半变异函数,计算各个采样点与估计点的滞后距离,通过公式(10)得到不
204 同滞后距离下的协方差,根据公式(6)和公式(7)变换矩阵形式(公式(11)),求解每
205 个采样点权系数λi,再通过公式(5)计算估计点的降水值。

$C_{11}$	$C_{12}$	 $C_{1n}$	1	$\left[ \lambda_{1} \right]$		$\begin{bmatrix} C_{01} \end{bmatrix}$	
$C_{21}$	$C_{22}$	 $C_{2n}$	1	$\lambda_2$		$C_{02}$	
÷	÷	 ÷	:	:	=	÷	(11)
$C_{n1}$	$C_{n2}$	 $C_{nn}$	1	$\lambda_n$		$C_{0n}$	
. 1	1	 1	0	$\lfloor -\mu \rfloor$		_ 1 _	Jal

207 对于不同的降水类型,雨量计分布密度越大插值效果越好。由于不同降水类型的降水梯
208 度不同,因此雨量计的稀疏程度影响是不同的。密度降低,降水梯度较小的层状云无亮带降
209 水受影响较小,随着密度持续降低,影响也会不断增加;对于降水梯度较大的层状云有亮带
210 降水和对流性降水来说,插值雨量站密度降低,插值降水分布接近于点状降水分布,因此需
211 要使用较高密度的雨量站对降水梯度较大的层状云有亮带降水和对流性降水进行插值。

212 研究中使用通过质控的地面区域雨量计进行克里金插值,图2为2021年7月20日09: 00(UTC)河南地区区域站降水分布(图 2a)、克里金插值后插值降水场(图 2b)和插值 213 214 场与地面国家站观测降水散点对比图(图 2c)。从空间分布来看,插值场降水中心与地面 区域站高值测量站点位置保持一致,降水高值区到低值区中间过渡连续;从散点图分布来看, 215 216 插值结果整体趋势基本符合理想曲线,从统计评分也展示了相同的结论,插值场同地面国家 217 站观测降水接近。由此可见,克里金方法插值得到的插值降水场可以反映地面降水的整体和 218 局部的变异特性,对地面降水的空间分布有较好的展示,空间代表性强,可以提供较为准确 的面尺度地面降水信息。但对于对流降水,降水区域小且降水梯度大,这使得雨量计分布相 219 较于降水小区域来说较为稀疏,在对流中心附近梯度较大的地方插值场会出现变化过快带来 220 221 的不连续。

222

223 图 2. 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 河南地区 (a) 地面观测站降水分布, (b) 克里金插值降水场和 (c)
 224 插值场与地面国家站观测降水散点对比图, (a) 和 (b) 中的圆点和星状点分别为国家站 (86 个) 和区域
 225 站 (1179 个) 测量的降水分布

Fig. 2. Precipitation distribution of (a) the gauge station observations, (b) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations and (c) scatterplots of 1 h precipitation from Kriging interpolations of precipitation vs the national gauge station observations in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots and stars in (a) and (b) are the precipitation records from national gauge stations with 86 gauge stations and regional gauge stations with 1179 gauge stations, respectively.

231 在进行克里金插值时,会出现个别点对应关系较差(图 2.c 红框内),图 3 放大展示了
232 图 2 红框内降水分布。图 3 中圆点为国家站测量降水,星状点为区域站测量降水,填图为区
233 域站的克里金插值场分布。图 3 红框中国家站的观测降水比所在网格的插值降水量高,两者
234 在该网格上对应关系较弱。不考虑国家站点,插值降水场与区域站观测降水分布基本一致,

由于红框内浅红色的区域站观测同周围区域站观测在进行克里金插值,插值场从红框内浅红 235 236 色区域站测量降水向四周减小,因此红框内红色的国家站(红色圆点)所处位置降水量较小。 结合雷达 QPE 产品分析 (图 3.b), 国家站和区域站处于雷达 QPE 产品降水中心两侧, 由 237 于国家站没有参与插值,插值场根据区域站降水分布插值。因此,影响插值场评分的主要原 238 239 因是用于插值的观测降水与用于评估的观测降水分布存在差异,这种情况可能是小区域雨量 计分布相对稀疏、分布不均匀且处于降水的不同位置,也有可能是由于雨量计进行质控时有 240 241 些奇异点并未被质控去掉。

242

259

图 3.2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 河南南部 (a) 插值场降水分布与 (b) 原始雷达 QPE 产品降水分布, 243 244 区域为图 2 中红色方框选定, (a)和(b)中的圆点和星状点分别为国家站和区域站测量的降水分布 245 Fig. 3. (a) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations in the red box in 246 Fig.2a and (b) precipitation distribution of radar QPE in the red box in Fig.2b at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots 247 and stars in (a) and (b) are the precipitation records from national and regional gauge stations, respectively.

#### 2.3.2 局地雨量计订正雷达 OPE 248



 $R_e = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$ 其中,  $e_i$ 为第i个雨量计对应与雷达 QPE 产品的差值,  $r_i$ 为第i个雨量计对应的雷达 260 261 QPE 产品降水量,  $g_i$ 为第*i*个雨量计观测降水;  $R_e$ 为雷达覆盖平面上某个网格的降水偏差,  $w_i$ 为第i个雨量计的权重, n表示参与该网格偏差计算的雨量计个数。 262

10

(13)

在计算权重时主要参考反距离权重法(Inverse Distance Weighting, IDW):

263



266  $w_i = \begin{cases} \alpha \times \frac{1}{d_i^b} & d_i \le D \\ 0 & d_i > D \end{cases}$ (16)

267 其中,公式(14)用来判断网格周围是否有足够的雨量计用于订正, $\alpha \ge 1$ 时,说明有 268 足够的雨量计进行订正,此时可以用公式(15)求取雨量计的权重;反之,如果 $\alpha < 1$ ,说 269 明没有足够的雨量计用于订正,此时需要降低雨量计的订正权重(公式(16))。公式(15) 270 和(16)中 $d_i$ 为第i个雨量计与该网格的距离,b为 $d_i$ 的指数参数,D为最大的可接受距 271 离,随着雨量计与网格距离的不断增加,雨量计权重降低,超过D则雨量计的权重为0,公 272 式(13)中的n也是由D决定。

273 指数 b 和最大范围 D 需要通过使用交叉验证方案获得。选择一组 b 和 D 的值,通过除
274 去某一雨量计和雷达 QPE 产品的差值并用其余站点的差值通过公式(13)对该站点求取差
275 值,然后将该雨量计原始误差和插值得到的误差匹配,一组 b 和 D 对整个区域所有雨量计
276 计算匹配得到一个均方误差(MSE)。不断改变 b 和 D 的组合,其中 b 的变化范围为 0.5-3.0,
277 间隔为 0.5, D 的变化范围为 10-500 公里,间隔为 10 公里,共有 300 种组合,最终获取 300
278 种组合的均方误差(MSE),选取最小均方误差对应的 b 和 D 作为订正使用的参数。

订正后雷达 QPE 产品降水量与地面国家站观测更接近。图 4 为 2021 年 7 月 20 日 09: 279 00(UTC)河南地区订正前后雷达 QPE 产品的降水分布以及前后与国家站的对比散点图分 280 布。通过订正,线性关系更加突出。原始雷达 QPE 产品的降水中心明显偏低,经过订正后, 281 282 订正降水场降水中心降水量明显提升。从评分来看,订正降水场的 RMSE 明显降低, RMB 明显减小。但是订正对雷达 QPE 产品数据做系统性订正,针对整个雷达平面的降水强度做 283 改变,并没有考虑不同降水类型的雨量计空间代表性差异,不能对 OPE 产品的每个网格根 284 据其降水特征进行差异化、精细化的调整,这使得订正后的雷达 OPE 产品相比于原始雷达 285 QPE 产品降水量有明显改变但是分布变化不大,并且雷达 QPE 产品原本存在的降水不连续 286 的情况并没有较大改善, 雷达 OPE 产品在郑州的东北部地区的不连续仍然是存在的。因此 287

需要在订正的基础上,引入地面降水插值场针对 OPE 每一个降水网格进行降水融合。 288 289 图 4. 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC)河南地区订正前后雷达 QPE 产品的降水分布以及前后与国家站的对 290 比散点图分布, (a) 订正前雷达 QPE 产品降水分布、(b) 订正后雷达 QPE 产品降水分布、(c) 订正前 291 292 雷达 OPE 产品与国家站对比散点图和(d) 订正后雷达 OPE 产品与国家站对比散点图, (a)和(b)中圆 293 点为国家站降水分布 294 Fig. 4. Precipitation distribution of (a) radar QPE before LGC, (b) after LGC, scatterplots of 1 h precipitation from 295 (c) radar QPE before LGC and (d) after LGC vs the national gauge station observations in Henan 296 at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots in (a) and (b) are precipitation records from the national gauge stations. 2.3.3 雷达-雨量计降水融合 297

298 雷达-雨量计降水融合是将雨量计插值降水场和订正后雷达 QPE 产品融合,各自的权重

299 *W<sub>g,i</sub>* 和*W<sub>r,i</sub>* 计算公式如下:

$$W_{g,i} = \begin{cases} 1 - \frac{d_i}{D_0}, & d_i < D_0 \\ 0, & d_i \ge D_0 \end{cases}$$
$$W_{r,i} = 1 - W_{g,i}$$

(17)

301

300

式中,i为第i个网格, $W_{g,i}$ 为第i个网格雨量计插值场降水值的权重, $D_0$ 为不同类型 302 降水的最大影响范围,  $d_i$ 为第i个网格距离周围最近雨量计的距离,  $W_{r,i}$ 为第i个网格雷达 303 QPE 产品的权重。 304 305 最终融合降水计算公式如下: Rain  $QPE(i) = Rain gauge(i) \times W_{g,i} + Rain radar(i) \times W_{r,i}$ 306 (19)式中, i为第i个网格, Rain QPE(i)为第i个网格最终融合降水估计值, 307 Rain gauge(i) 为第i 个网格雨量计插值降水值,  $W_{g,i}$  为第i 个网格雨量计插值降水值的 308 权重, Rain radar(i) 为第i 个网格雷达 QPE 数据降水值,  $W_{r,i}$  为第i 个网格雷达 QPE 数 309 310 据的权重。 不同的降水类型,降水变化梯度不一致,此时雨量计作为单个站点测量值可代表距离也 311

312 不一致。对流降水影响范围小、变化快,雨量计在对流降水区域中测量值在可接受偏差内代
313 表距离短;层状云降水影响范围大、变化缓慢,雨量计在层状云降水区测量的降水在可接受
314 偏差内代表距离长;有亮带的层状云降水的变化在对流降水和层状云降水之间。使用克里金
315 方法插值降水时虽然考虑到离目标点越近的雨量计比重越大,但是并没有考虑到降水类型带
316 来的影响,因此需要在融合的过程中考虑每个雨量计的影响范围。通过更改雨量计的影响范

317 围,比较融合场与地面国家站测量值的偏差,最终确定雨量计的最大影响范围为10km,在318 进行融合时只考虑网格周围10km以内的雨量计。

319 雷达-雨量计降水融合产品结合了地面观测和雷达探测两者优点,在降水量和降水分布
320 都更接近地面国家站观测。图 5 为 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC)河南地区雷达-雨量计降
321 水融合产品的降水分布以及与国家站的对比散点图分布。融合降水产品(图 5.a)的空间分
322 布更连续,线性关系更明确,相较于订正后的结果(图 4.b),RMSE 降低,RMB 减小。订
323 正后的雷达 QPE 产品与地面雨量计插值场进行融合,可稳定地引入地面降水强度信息和雷
324 达探测的降水落区信息,从降水量和空间分布上均可提高降水的精度。网格离雨量计位置越
325 近,融合降水产品值越接近于地面插值场,相反则更接近于订正后雷达 QPE 产品,融合降
326 水东巴尔阿连续性增强,整度明显地室

326 水产品空间连续性增强,精度明显提高。

327

328 图 5. 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 河南地区 (a) 雷达-雨量计降水融合产品的降水分布以及 (b) 与国
 329 家站的对比散点图, (a) 中圆点为国家站降水分布

Fig. 5. (a) Precipitation distribution of Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and (b) scatterplots of 1 h precipitation from Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station observations in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots in (a) are precipitation records from the national gauge stations.

334 局地对流降水中降水梯度较大,雷达 QPE 产品和地面观测会出现相近的降水量差异较
335 大的情况(图 6.a 白色框内)。这种情况下,克里金插值会在观测梯度较大的地方会出现插
336 值场分布不连续的情况,图 6.b 白色框内的插值场分布也证实了这一点。通过雨量计观测对
337 雷达 QPE 产品订正,降水量变化明显,在降水梯度大的区域降水连续性变化不大(图 6.c
338 白色框内),通过雷达-雨量计降水融合,有效地改善了克里金插值场不连续的情况,对流
339 降水分布连续性增强且分布与地面雨量计的分布更加吻合(如图 6d 白色框内)。

340

341 图 6. 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 郑州地区不同降水产品分布图, (a) 雷达 QPE、(b) 区域站克里
 342 金插值场、(c) 区域站订正后雷达 QPE 产品与(d) 雷达-雨量计降水融合产品分布,其中圆点和星状
 343 点分别为国家站和区域站降水分布

Fig. 6. Precipitation distribution in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021 from (a) radar QPE, (b) Kriging
interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations, (c) radar QPE after LGC and (d)
Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper. The dots and stars are the precipitation records from
national and regional gauge stations, respectively.

348 在订正时,雨量计对雷达起到系统性误差调整的作用,当某个雨量计的观测与周围雨量
349 计观测出现较大偏差时,不会对订正产生大的影响,但是融合时,通过引入克里金插值场和
350 雨量计权重对每个网格进行雨量调整,雨量计观测的奇异值影响会随着雨量计影响增加而增

加。如图6所示,在强降水中心出现了较低的观测值(图6黑色框中橙色点),此区域站观 351 352 测值明显低于周围其他的区域站观测值,这使得克里金插值结果在此区域出现明显的低值区 (图 6.b)。在使用雨量计对雷达 QPE 产品进行系统性订正时,减轻了雷达 QPE 产品的降 353 水量整体低估的问题(图 6.c),区域站中出现了个别的奇异观测点不会影响整体的降水分 354 布,只会对区域站所在的网格有较大的影响。随后在融合过程中,加入了雨量计权重因子, 355 在每个网格上都会细致调整降水量,当雨量计密集时,雨量计的权重偏大,融合的降水分布 356 接近于区域站的克里金插值降水分布(图 6.d),使得少数的奇异观测值对其周围的网格影 357 358 响增强。

359 3.性能评估



361 **3.1 郑州 21 · 7 暴雨** 

362 郑州 21 • 7 暴雨为局地强对流天气,持续时间短且降水量大,这对降水估计是较大的考
363 验。通过这次个例测试雷达-雨量计降水融合算法能否应对局地短时强降水。

图 7 为郑州 21 • 7 暴雨测试时间段(2021.07.20 00:00 - 2021.07.21 00:00 UTC)内雷达 364 OPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品与地面国家站观测降水的散点对比。可以看到, 雷达-365 雨量计降水融合算法有效提高了降水精度,融合结果整体呈理想趋势分布。从统计的定量评 366 估指标来看,融合降水产品同地面国家站观测降水更为接近,尤其是在最强降水时刻 367 (2021.07.20 09:00 UTC),国家站点测量出 201.9mm 降水,在该站点位置雷达 QPE 产品降 368 369 水只有 48.90mm(图 4.c),经过融合后降水提高到 102.4mm(图 5.b),降水估计值明显 增加且更接近于国家站测量值。这说明,通过雷达-雨量计降水融合算法产生的降水产品, 370 其准确性,尤其是对强降水的估测,是优于雷达 OPE 产品的。 371

372

373 图 7. 郑州 21 • 7 暴雨测试时间段(2021.07.20 00:00 - 2021.07.21 00:00 UTC)内(a) 雷达 QPE 产品和(b)
 374 雷达-雨量计降水融合产品与地面国家站观测降水的散点对比

Fig. 7. Scatterplots of 1 h precipitation from (a) radar QPE and (b) Radar-Gauge Merging QPE vs the national
gauge station observations for the period from 00: 00 UTC 20 July to 00: 00 UTC 21 July 2021 for the
precipitation event in Zhengzhou.

378 随后,以地面国家站观测降水为基准,对郑州极端降水个例生成的雷达-雨量计降水融
379 合产品评估,以分析融合产品在不同时间的性能表现,结果表明,雷达-雨量计降水融合产
380 品稳定地优于雷达 QPE 产品。图 8 为郑州 21 • 7 暴雨的四种评分结果的时序图。从 RMSE

来看(图 8a),融合后的 RMSE 明显降低,雷达-雨量计降水融合产品更接近于地面国家站 381 382 观测降水。随着降水量的增大, RMSE 也会有提高, 在最强降水时刻(2021.07.20 09:00 UTC), 由于雷达 QPE 产品本身过于偏低, 雷达 QPE 产品在国家站观测为 201.9mm 的网格显示的 383 是 48.9mm, 经过订正和融合后该网格降水值为 102.4mm, 尽管有明显的提高, 但与观测值 384 差异仍较大,因此该时刻雷达-雨量计降水融合产品相较其他时刻,RMSE 明显偏高,但仍 385 然低于雷达 QPE 产品的 RMSE。从 RMAE 来看(图 8b),雷达-雨量计降水融合产品稳定 386 387 优于原始雷达 QPE 产品。从 RMB 来看(图 8c),雷达 QPE 产品较地面观测降水明显偏低, 388 偏差较大,但是雷达-雨量计降水融合产品较地面观测降水偏差较小,基本维持在0附近。 从 CC 来看(图 8d), 雷达-雨量计降水融合产品与地面观测降水相关性较高, 基本维持在 389 0.8 附近, 原始雷达 OPE 产品 CC 偏低且波动较大。 390

391

392 图 8. 郑州 21 • 7 暴雨评分指标时序变化(2021.07.20 00:00 - 2021.07.21 00:00 UTC)。(a) RMSE(mm),
393 (b) RMAE, (c) RMB 和 (d) CC。蓝色线为雷达 QPE 产品,红色线为融合产品,(a) 中还叠加了该
394 时刻国家站测量降水的均值(灰色柱)

Fig. 8 Statistical indicators of (a) RMSE (mm), (b) RMAE, (c) RMB and (d) CC for the period from 00: 00 UTC
20 July to 00: 00 UTC 21 July 2021 for the precipitation event in Zhengzhou. Blue lines show the radar QPE and
the red lines show the Radar-Gauge Merging QPE. The grey columns in (a) are the hourly average precipitation.

398 在郑州个例性能评估中,发现 2021.07.20 21:00 UTC 经过融合得到的雷达-雨量计降水 399 融合产品较原始雷达 QPE 产品的 RMSE 评分相差无几旦 CC 评分较低,对其原因进行分析。 图 9 为导致该时刻评分较低的区域降水分布图。在黑色框内,国家站测量降水(圆点)较基 400 于区域站观测的克里金插值降水场偏高,其至是出现了克里金插值场显示无降水但是国家站 401 402 测量有降水的情况。这种情况出现的原因是国家站位置相对于插值场来说处于降水中心向外 403 递减的区域,但实际情况是区域站和国家站处于降水中心的不同位置,图 9.b 中相应的区域 雷达 OPE 产品分布场也证实这一点。在使用区域站对雷达 OPE 产品做系统性订正时,整个 404 区域的降水量改变在这种情况下并不受影响(图9.c),但是在进行融合时,区域站周边网 405 格上雨量计比重较大, 雷达-雨量计降水融合产品更偏向于插值场, 国家站观测对应融合降 406 水产品的降水值与该站点实际观测比偏低(图9.d),从而导致评估指标表现较差。 407

408 此外,图9也突出了雷达-雨量计降水融合算法在描述降水连续性上的优点。在雷达观
视存在遮挡的地方(图 9.b 右边黑色框上部),雷达 QPE 产品不连续且偏弱,经过订正后
410 降水量明显提升但是不连续的情况仍存在;在之后与雨量计插值场融合后,不连续的情况明
411 显得到改善且降水量更接近于地面降水观测,降水分布合理。结果表明雷达-雨量计降水融
412 合算法可以有效地改善因雷达遮挡导致的降水估计偏弱且不连续的问题。

414 图 9.2021 年 7 月 20 日 21:00 (UTC) 郑州地区不同降水产品分布图, (a) 区域站克里金插值场、(b) 原
415 始雷达 QPE 产品、(c) 区域站订正后雷达 QPE 产品与(d) 雷达-雨量计降水融合产品分布,其中圆点和

416 星状点分别为国家站和区域站降水分布

417 Fig. 9. Precipitation distribution at 09:00 UTC 20 July 2021 in Zhengzhou from (a) radar QPE, (b) radar QPE after

418 LGC, (c) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations and (d)

419 Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper. The dots and stars are the precipitation records from

420 national and regional gauge stations, respectively.

### 421 3.2 台风烟花

利用台风烟花个例对融合方法进行了测试,评估雷达-雨量计降水融合算法在台风引发 422 423 的局地强降水中的表现。结果表明雷达-雨量计降水融合产品的降水量和降水分布更接近于 地面观测。图 10显示了台风登陆过程中 2021.07.25 21:00 UTC 雷达 QPE 产品和融合降水产 424 品的降水分布图,图中圆点为地面国家站测量降水,雷达 OPE 产品明显偏弱且降水中心不 425 426 明显(图10.a),经过订正融合后降水中心与地面测量位置基本吻合(图10.b)。在江浙地 区东部海域,没有区域站,该区域融合为原始雷达 QPE 产品的降水,但在该区域存在一个 427 国家站观测降水,当雷达 QPE 产品与其差异较大时,会影响该时刻的评分结果。图 11 为 428 2021.07.24 07:00 UTC 江浙地区东部海域国家站与雷达 QPE 产品相差较大时刻的雷达-雨量 429 430 计降水融合产品分布图及其与国家站观测的对比散点图。图 11.a 红框内的雨量计在分布在 江浙地区东部海域,其观测降水与雷达 QPE 产品相差较多,从散点图(图 11.b)来看,红 431 框之外的点显示雷达-雨量计降水融合产品与国家站观测值一致性较好,但由于红框内的点 432 偏离理想曲线(绿色实线)过多,CC偏低。 433

434

435 图 10. 台风登陆过程中(2021.07.25 21:00 UTC) 雷达 QPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品的降水分布图
436 及其与国家站观测降水对比, (a)和(c)为原始雷达 QPE 产品降水分布及密度散点图, (b)和(d)为
437 雷达-雨量计降水融合产品分布及密度散点图, (a)和(b)中圆点为国家站降水分布

Fig. 10 Precipitation distribution of (a) radar QPE and (b) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and scatterplots of 1 h precipitation from (c) radar QPE and (d) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station observations at 21:00 UTC 25 July 2021 during the typhoon In-Fa landfall. The dots in (a) and (b) are precipitation records from the national gauge stations.

442

443 图 11. 2021 年 7 月 24 日 07:00 (UTC) 台风烟花过程中 (a) 雷达-雨量计降水融合产品分布图以及 (b) 与
 444 国家站的对比散点图, (a) 中圆点为国家站降水分布

Fig. 11. Precipitation distribution of (a) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and (b) scatterplots of 1 h precipitation from Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station observations at 07:00 UTC 24 July 2021 during the typhoon In-Fa landfall. The dots in (a) are precipitation records from the national gauge stations.

449 进一步统计台风烟花测试时间段(2021.07.22 01:00 - 2021.07.28 09:00 UTC)内雷达-雨
450 量计降水融合算法的稳定性,结果如图 12 和图 13 所示。雷达 QPE 产品降水量明显偏低,
451 订正后融合降水产品与地面国家站测量降水线性关系突出明显,CC 有明显提高(图 12)。
452 从四种评分结果的时间变化曲线来看(图 13),融合后的降水产品 RMSE 明显降低,融合
453 后降水更接近于地面国家站观测降水; RMAE 明显降低; RMB 较小,基本维持在 0 附近;
454 且 CC 基本维持在 0.6 以上,波动较小。雷达-雨量计降水融合产品对比于雷达 QPE 产品性
455 能的提升,是持续且稳定的。

456

457 图 12. 同图 7,但时间为台风烟花测试时段(2021.07.22 01:00 - 2021.07.28 09:00 UTC)

458 Fig. 12. Same as Figure 7., but for the period from 01: 00 UTC 22 July to 09: 00 UTC 28 July 2021 for the
459 typhoon In-Fa precipitation event.

460

461 图 13. 同图 8, 但为台风烟花测试时段(2021.07.22 01:00 - 2021.07.28 09:00 UTC)

462 Fig. 13. Same as Figure 8., but for the period from 01: 00 UTC 22 July to 09: 00 UTC 28 July 2021 for the
463 typhoon In-Fa precipitation event.

### 464 3.3 随州暴雨

465 随州处于长江和淮河流域交汇地带且地形复杂,北部和西南部均为山地,期间为丘陵和
466 坡地,这影响了雷达观测的精度。选取这次随州暴雨作为测试个例,测试融合算法是否能应
467 对发生在地形复杂下的突发性强且降水量大的极端降水。

468 通过个例测试, 雷达-雨量计融合降水算法在复杂地形下性能稳定。图 14 为随州暴雨 测试时间段(2021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC)内雷达 OPE 产品和雷达-雨量计降水 469 融合产品与地面国家站观测降水的散点对比。可以看到,使用区域站对雷达 QPE 产品进行 470 订正后再与区域站插值降水场进行融合得到的产品与地面国家站观测对比,线性关系突出明 471 472 显,40 mm 以上的降水配对离散性降低。整体 RMSE 降低,RMAE 降低,融合后的降水量 同地面国家站观测降水更为接近,降水精度明显提高。图 15 为随州暴雨测试时间段的四种 473 474 评分时序图结果。整体来看,两种产品波动略大,但雷达-雨量计降水融合产品各个评分基 本优于雷达 QPE 产品。雷达-雨量计降水融合产品与地面观测降水一致性较好,由于原始雷 475 476 达 QPE 产品 CC 偏低且波动较大,因此雷达-雨量计降水融合产品评分也略有影响。前期 2021.08.10 06:00 - 2021.08.10 17:00 UTC 由于降水较弱,匹配点数且较少,导致 RMAE 异常 477 478 偏高。

479

480 图 14. 同图 7,但时间为随州暴雨测试时间段(2021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC)。

Fig. 14. Same as Figure 7., but for the period from 01:00 UTC 10 August to 15:00 UTC 13 August 2021 for the
precipitation event in Suizhou.

483

484 图 15. 同图 8, 但为随州暴雨测试时间段 22021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC

Fig. 15. Same as Figure 8., but for the period from 01:00 UTC 10 August to 15:00 UTC 13 August 2021 for the
precipitation event in Suizhou.

487 复杂地形下,雷达-雨量计降水融合算法对降水量级分布及降水系统生消捕捉较准确。
488 图 16 为随州暴雨测试时间段(2021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC)内降水落区较大或
489 者降水量较大的4个时次的雷达 QPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品分布。随着时间推移,
490 降水系统不断生消变化,以雷达降水落区为准的融合产品能够较准确地捕捉降水的落区,通
491 过使用雨量计订正后的雷达 QPE 产品与克里金插值场融合,降水中心明显突出且降水量整
492 体提升,在西部山地雷达不连续的地方融合降水产品对降水分布和量级有较好地展示。
493

图 16. 随州暴雨测试时间段雷达 QPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品的降水分布及其与国家站观测降水 494 495 对比, (a)、(c)、(e)和(g)为原始雷达 QPE 产品降水分布, (b)、(d)、(f)和(h)为雷达-496 雨量计降水融合产品降水分布;时间为(a)和(b)2021.08.11 07:00 UTC、(c)和(d)2021.08.11 18:00 UTC、 497 (e)和(f)2021.08.11 23:00 UTC、(g)和(h)2021.08.13 00:00 UTC,圆点为国家站测量降水分布 498 Fig. 16 Precipitation distribution of radar QPE and Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper for 499 the period from 01: 00 UTC 10 August to 15: 00 UTC 13 August 2021 for the precipitation process in Suizhou. (a), 500 (c), (e) and (g) are for radar QPE. (b), (d), (f) and (h) are for Radar-Gauge Merging QPE. Time:(a) and (b) are for 501 2021.08.11 07:00 UTC, (c) and (d) are for 2021.08.11 18:00 UTC, (e) and (f) are for 2021.08.11 23:00 UTC, (g) 502 and (h) are for 2021.08.13 00:00 UTC. The dots are precipitation records from the national gauge stations.

503 雷达-雨量计降水融合产品描述局地小区域的对流降水时,对于大片的强降水捕捉能力 504 较强, 评分较好; 而对于小片的降水虽然其捕捉能力相对于区域站分布较为准确, 但由于地 面国家站分布相对稀疏,不能较好地捕捉降水信息,在评估时误差较大,或降水落区刚好在 505 国家站分布区域,该区域没有区域站分布,这会出现类似于在 3.2 中提到的海上的问题,雷 506 达 QPE 产品无法进行订正,且该位置没有克里金插值出的降水,评分的好坏将体现出原始 507 雷达 QPE 产品的质量。这也说明在进行融合时,应该尽可能使用较多的经过合理质量控制 508 509 的正确地面测量雨量信息,以增加参与融合的雨量计密度和地面降水信息,从而使融合产品 精度更高。 510

# 511 4.总结与讨论

512

基于郑州 21•7 暴雨、台风烟花和 2021 年 8 月随州暴雨三次极端降水事件,发展了雷

513 达-雨量计降水融合算法,算法主要步骤包括: (1)雨量计观测降水格点化, (2)局地雨
514 量计订正雷达定量降水, (3)雷达-雨量计降水融合。通过地面国家站测量降水数据对新的
515 雷达-雨量计降水融合算法生成的产品进行了评估和分析,主要得到以下结论:

516 (1)通过克里金方法将地面区域站测量降水数据区域化,插值得到的插值降水场更准
517 确地反应地面极端降水的整体和局部的变异特性,对地面极端降水的空间分布有较好的展示,
518 提供较为准确的面尺度地面降水信息。

519 (2)通过局地雨量计订正法对雷达 QPE 产品进行系统性订正,可以有效调整雷达 QPE
 520 产品的降水量。

521 (3) 雷达-雨量计降水融合算法,以雷达精细观测捕捉的极端降水位置和移动为降水落
522 区,稳定地引入了地面站点观测降水量,在系统性订正后,通过引入地面站点观测降水插值
523 场,可以对雷达覆盖区域内每一个网格进行降水量的调整,有效提高融合产品的精度。

524 (4)利用三次极端降水个例,对新的雷达-雨量计降水融合产品使用不同的局地强降水
525 个例进行了评估,四个评估指标均表明该方法的性能稳定优于雷达 QPE 产品,对不同降水
526 类型导致的极端强降水的强度、落区和空间分布均有较好的把握。

局地雨量计订正通过雨量计进行系统性订正主要减小了雷达 OPE 产品与地面观测的差 527 528 异,对原始雷达 OPE 产品降水分布不连续等问题改善较小,仍能显示雷达存在的一些质量 问题。雷达-雨量计降水融合算法可以改善降水分布不连续的问题但对雨量计的质量要求更 529 高,地面观测数据的质量对融合结果影响较大,观测的奇异值对融合降水的影响随着雨量计 530 权重的增加而增加。在评估中也发现了一些问题。目前新雷达-雨量计降水融合产品与地面 531 532 国家站降水观测之间部分时刻偏差较大,主要有以下几个因素: (1) 原始的雷达 QPE 产品 降水值过低,导致订正和融合只能略微提升降水量; (2)有一些国家站测量降水偏高且与 533 雷达 QPE 产品和地面区域站降水均不一致,或是区域站与国家站观测降水和雷达 OPE 产品 534 降水量存在较大差距导致小区域内融合产品精度降低,三个个例中均有这种情况出现;(3) 535 536 对于海上区域,没有区域站观测进行订正,由原始雷达 QPE 产品代替,雷达 QPE 产品的质 量会影响评分。另外,在我国西部地区,雨量计相对较少且零散,这使得雷达 QPE 进行订 537 正和融合时也会出现偏差。未来可以考虑改进雨量计质量控制方法,得到质量更好的站点降 538 水观测数据,同时结合卫星数据,减弱雨量计稀少和雷达 QPE 产品过低带来的影响,进一 539 步提高融合降水产品的精度。 540

541

# 542 参考文献(References)

- 543 Bayabil Haimanote, Fares Ali, Sharif Hatim et al. 2019. Effects of Spatial and Temporal Data Aggregation on the
  544 Performance of the Multi Radar Multi Sensor System[J]. JAWRA Journal of the American Water
  545 Resources Association, 55(4): 1492–1504. doi:10.1111/1752-1688.12799.
- Cao Xuejian, Qi Youcun, Ni Guangheng. 2021. Significant Impacts of Rainfall Redistribution through the Roof of
   Buildings on Urban Hydrology[J]. Journal of Hydrometeorology, 22(4). doi: 10.1175/JHM-D-20-0220.1.
- 548 Chen Mengye, Nabih Soumaya, Brauer Noah et al. 2020. Can Remote Sensing Technologies Capture the Extreme
- 549 Precipitation Event and Its Cascading Hydrological Response? A Case Study of Hurricane Harvey Using EF5
   550 Modeling Framework[J]. Remote Sensing, 12(3):445. doi:10.3390/rs12030445.
- 551 程开宇,张磊磊,康颖,等. 2016.多源卫星降水数据在瓯江流域的适用性分析 [J].水电能源科学,
  552 34(12):15-19. Cheng Kaiyu, Zhang Leilei, Kang Ying, et al. 2016. Applicability Analysis of Various
  553 Satellite-based Precipitation in Oujiang Basin[J]. Water Resources and Power (in Chinese), 34(12):15-19.
- Daly C, Neilson R P, Phillips D L. 1994. A Statistical Topographic Model for Mapping Climatological
   Precipitation over Mountainous Terrain[J]. Journal of Applied Meteorology, 33(2):140-158. doi:
   10.1175/1520-0450(1994)033<0140:ASTMFM>2.0.CO;2.
- 557 丁一汇. 2018.气候变化与城市化效应对中国超大城市极端暴雨的影响[J].中国防汛抗旱, 28(02):1-2.
- 558 房彬,班显秀,郭学良,等.2010.雷达-雨量计-粒子激光探测仪联合估算降水量[J].大气科学,34
  559 (3):513-519. Fang Bin, Ban Xianxiu, Guo Xueliang, et al.2010.Area rainfall estimation by u sing radar,
  560 raingauge, and particle laser-based optical measurement instrument [J]. Chinese Journal of Atmospheric
  561 Sciences (in Chinese), 34(3): 513-519. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.05.
- Feki Haifa, Mohamed Slimani, Cudennec Christophe. 2017. Geostatistically based optimization of a rainfall
  monitoring network extension: Case of the climatically heterogeneous Tunisia[J]. Hydrology Research. 48.
  514-541. doi: 10.2166/nh.2016.256.
- 565 郭春辉, 王旭, 袁微. 2014.多普勒天气雷达径向干扰回波的识别与消除[J]. 气象水文海洋仪器, 31(2):24-29.
  566 Guo Chunhui, Wang Xu, Yuan Wei. 2014. Identification and removal of radial interference echo of Doppler
  567 weather radar[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument (in Chinese), 31(2): 24-29.
- Haiden Thomas, G Pistotnik. 2009. Intensity-dependent parameterization of elevation effects in precipitation
   analysis[J]. Advances in Geosciences. 20. doi: 10.5194/adgeo-20-33-2009.
- Haiden Thomas, Kann A., Wittmann Christoph, et al. 2011. The Integrated Nowcasting through Comprehensive
  Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region[J]. Weather and Forecasting. 26.
  166-183. doi: 10.1175/2010WAF2222451.1.
- Hong Y., Hsu K.L., Sorooshian, S. et al. 2004. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an
   Artificial Neural Network Cloud Classification System[J]. Journal of Applied Meteorology, 43, 1834–1853.
- 575 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等. 2008.X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J].
- 气象学报, (2): 251-261. Hu Zhiqun, Liu Liping, Chu Rongzhong, et al. 2008. Comparison of different
  attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using x-band dual linear polarimetric
  radar[J], Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (2): 251-261. doi: 10.11676/qxxb2008.024
- 579 Huffman George, Adler R.F., Bolvin D.T. et al. 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis:
  580 Quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale[J]. Journal of
  581 Hydrometeorology, 8: 38-55.
- 582 Kitzmiller David, Miller Dennis, Fulton Richard et al.2013. Radar and Multisensor Precipitation Estimation
   583 Techniques in National Weather Service Hydrologic Operations[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 18(2):
   584 133-142. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000523.

- 李巧, 戚友存, 朱自伟, 等. 2021. 复杂地形下 C 波段雷达定量降水估计算法[J]. 气象学报, 79(4): 689-702.Li
  Qiao, Qi Youcun, Zhu Ziwei, et al. 2021. Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar
  situated in complex topographical regions[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 79(4): 689-702.
  doi:10.11676/qxxb2021.038.
- 589 刘黎平, 张扬, 丁晗. 2021. Ka/Ku 双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用[J]. 大 590 气科学, 45(5): 1099-1113. Liu Liping, Zhang Yang, Ding Han. 2021. Vertical Air Motion and Raindrop 591 Size Distribution Retrieval Using a Ka/Ku Dual-Wavelength Cloud Radar and Its Preliminary Application [J]. 592 1099-1113. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): doi: 593 10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20200.
- 594 刘晓阳, T.D.DIALLO, 毛节泰, 等. 2005. GMS-5 卫星估计中国西部地区月降水[J]. 大气科学, 29(4): 518-525.
  595 Liu Xiao-Yang, T. D. DIALLO, Mao Jie-Tai, et al. 2005. Monthly Precipitation Estimation over Western
  596 China Using GMS Satellite Data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(4): 518-525.
  597 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.04.03.
- 598 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 2011. 卫星遥感反演降水研究综述[J].地球科学进展, 26(11):1162-1172. Liu
  599 Yuanbo, Fu Qiaoni, Song Ping, et al. 2011. Satellite retrieval of precipitation: An overview [J]. Advances in
  600 Earth Science (in Chinese), 26(11): 1162-1172.
- 601 柳云雷,李昌兴,张乐坚,等. 2020. 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响
  602 [J]. 气象学报, 78(4): 705-720. Liu Yunlei, Li Changxing, Zhang Lejian, et al. 2020. Statistical analysis of
  603 terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data[J]. Acta Meteorologica Sinica (in
  604 Chinese), 78(4): 705-720. doi: 10.11676/qxxb2020.037.
- 605 卢乃锰,游然,张文建. 2004. A FUSING TECHNIQUE WITH SATELLITE PRECIPITATION ESTIMATE AND
  606 RAINGAUGE DATA[J]. 气象学报, 18(02): 141-146. Lu Naimeng, You Ran, Zhang Wenjian. 2004. A
  607 FUSING TECHNIQUE WITH SATELLITE PRECIPITATION ESTIMATE AND RAINGAUGE DATA[J].
  608 Acta Meteorologica Sinica, 18(02): 141-146.
- Maggioni V, Meyers P C, MD Robinson. 2016. A Review of Merged High Resolution Satellite Precipitation
   Product Accuracy During the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Era[J]. Journal of
   Hydrometeorology, 17(4), 1101-1117. doi: 10.1175/JHM-D-15-0190.1.
- 612 闵锦忠, 吴乃庚. 2020. 近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展[J]. 大气科学, 44(5): 1039-1056.Min
  613 Jinzhong, Wu Naigeng. 2020. Advances in Atmospheric Predictability of Heavy Rain and Severe Convection
  614 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1039-1056. doi:
  615 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19186.
- 616 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
  617 [J]. 气象学报, 2012, (6): 1381-1389. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. Analysis of the combined
  618 gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique[J]. Acta Meteorologica Sinica (in
  619 Chinese), (6): 1381-1389. doi: 10.11676/qxxb2012.116.
- 620 潘旸, 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):
  621 755-766. Pan Yang, Gu Junxia, Yu Jingjing, et al. 2018. Test of merging methods for multi-source observed
  622 precipitation products at high resolution over China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(5):
  623 755-766. doi: 10.11676/qxxb2018.034.
- 624 Qi Youcun, Zhang Jian, Kaney Brian, et al. 2014. Improving WSR-88D Radar QPE for Orographic Precipitation
  625 Using Profiler Observations[J]. Journal of Hydrometeorology, 15: 1135-1151.
  626 doi:10.1175/JHM-D-13-0131.1.
- Qi Youcun, Martinaitis Steven, Zhang Jian, et al. 2016. A Real-Time Automated Quality Control of Hourly Rain
  Gauge Data Based on Multiple Sensors in MRMS System[J]. Journal of Hydrometeorology, 17(6):

629 1675-1691.

- 630 Qi Youcun, Zhang Jian. 2017. A Physically Based Two-Dimensional Seamless Reflectivity Mosaic for Radar QPE
  631 in the MRMS System[J]. Journal of Hydrometeorology, 18(5): 1327-1340.
- 632 Salman Abdullahi M., Li Yue. 2018. Flood Risk Assessment, Future Trend Modeling, and Risk Communication: A
- 633Review of Ongoing Research[J].Natural Hazards Review, 19(3).doi:63410.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000294.
- 635 师春香,潘旸,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.
  636 Shi Chunxiang, Pan Yang, Gu Junxia, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion
  637 products[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(4): 774-783. doi: 10.11676/qxxb2019.043.
- 638 孙跃,肖辉,杨慧玲,等. 2021. 基于遥感数据光流场的 2021 年郑州 "7·20"特大暴雨动力条件和水凝物输送
  639 特征分析[J]. 大气科学, 45(6): 1–16. Sun Yue, Xiao Hui, Yang Huiling, et al. 2021. Analysis of Dynamic
  640 Conditions and Hydrometeor Transport of Zhengzhou Superheavy Rainfall Event on 20 July 2021 Based on
  641 Optical Flow Field of Remote Sensing Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6):
  642 1–16. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21155.
- Villarini G, Mandapaka P V, Krajewski W F, et al. 2008. Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge
  perspective[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(D11). doi:10.1029/2007JD009214.
- E家华. 1999. 克里金地质绘图技术:计算机的模型和算法[M]. 石油工业出版社. Wang Jia-hua. 1999.
  Kriging geological mapping technology: computer models and algorithms[M]. Beijing, Petroleum Industry
  Press (in Chinese).
- 648 王政权. 1999. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 科学出版社.
- Kie P., Chen M., Yang S., et al. 2007. A Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation over East Asia[J]. Journal of
   Hydrometeorology, 8(3): 607–626. doi: 10.1175/JHM583.1.
- Xie P., Xiong A.-Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation
   analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D21106). doi:10.1029/2011JD016118.
- 653 许时光,牛铮,沈艳,等. 2014. CMORPH 卫星降水数据在中国区域的误差特征研究[J]. 遥感技术与应用,
  654 29(2): 189-194. Xu Shiguang, Niu Zheng, Shen Yan, et al. 2014. A Research into the Characters of
  655 CMORPH Remote Sensing Precipitation Error in China[J]. Remote Sensing Technology and Application(in
  656 Chinese), 29(2): 189-194. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.2.0189.
- 657 杨洁帆,胡向峰,雷恒池,等. 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(1):
  658 88-106. Yang Jiefan, Hu Xiangfeng, Lei Hengchi, et al. 2021. Airborne Observations of Microphysical
  659 Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern Side of Taihang Mountains [J]. Chinese Journal of
  660 Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 88-106. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202.
- 661姚亚庆. 2016. 1950-2015 年我国农业气象灾害时空特征研究[D].西北农林科技大学硕士学位论文.Yao662Yaqing. 2016. The Spatial and Temporal Characteristics of argo-meteorological Disasters during 1950-2015
- 663 in China[D]. M. S. thesis (in Chinese), Northwest A & F University.
- Yilmaz Koray K., Adler Robert F., Tian Yudong, et al. 2010. Evaluation of a satellite-based global flood
  monitoring system[J]. International Journal of Remote Sensing, 31(14): 3763-3782. doi:
  10.1080/01431161.2010.483489.
- Yu Jingjing, Li Xiao-Feng, Lewis Elizabeth, et al. 2020. UKGrsHP: a UK high-resolution gauge-radar-satellite
  merged hourly precipitation analysis dataset[J]. Climate Dynamics. 54(19): 2919–2940. doi:
  10.1007/s00382-020-05144-2.
- 670 Zhang Jian, Howard Kenneth, Langston Carrie, et al. 2011. National Mosaic and Multi-sensor QPE (NMQ)
  671 System Description, Results and Future Plans[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 92:
  672 1321-1338. doi: 10.1175/2011BAMS-D-11-00047.1.

- Zhang Jian, Qi Youcun, Langston Carrie, et al. 2014. A Real-Time Algorithm for Merging Radar QPEs with Rain
  Gauge Observations and Orographic Precipitation Climatology[J]. Journal of Hydrometeorology 15, 5,
  1794-1809. doi: 10.1175/JHM-D-13-0163.1.
- Zhang Jian, Howard Kenneth, Langston Carrie, et al. 2015. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) Quantitative
  Precipitation Estimation: Initial Operating Capabilities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,
  97(4): 621-637. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00174.1.
- Zhang Jian, Howard Kenneth, Langston Carrie, et al. 2016. Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative
   precipitation estimation: Initial operating capabilities. Bulletin of the American Meteorological Society,
   97(4):621-638. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00174.1
- Zhang Wenxia, Zhou Tianjun. 2020. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with
   global warming[J]. Science Bulletin, 65(3): 243-252. doi: 10.1016/j.scib.2019.12.002.
- Zhu Ziwei, Qi Youcun, Cao Qing, et al. 2020. Particle Size Distribution Characteristics Within Different Regions
   of Mature Squall-Line Based on the Analysis of Global Precipitation Measurement Dual-Frequency
   Precipitation Radar Retrieval[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1-5. doi:
   10.1109/LGRS.2020.3019384.
- Kang Zhe, Qi Youcun, Li Donghuan et al. 2021. A real-time algorithm to identify convective precipitation
  adjacent to or within bright band in the radar scan domain[J]. Journal of Hydrometeorology, 22(5): 1139-1151.
- 690 doi: 10.1175/JHM-D-20-0005.1.









- 696 图 2.2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC)河南地区 (a)地面观测站降水分布, (b)克里金插值降水场和 (c)
  697 插值场与地面国家站观测降水散点对比图, (a)和 (b)中的圆点和星状点分别为国家站 (86 个)和区域
  698 站 (1179 个)测量的降水分布
- Fig. 2. Precipitation distribution of (a) the gauge station observations, (b) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations and (c) scatterplots of 1 h precipitation from Kriging interpolations of precipitation vs the national gauge station observations in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots and stars in (a) and (b) are the precipitation records from national gauge stations with 86 gauge stations and regional gauge stations with 1179 gauge stations, respectively.
- 704







706 图 3. 2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 河南南部 (a) 插值场降水分布与 (b) 原始雷达 QPE 产品降水分布,

707 区域为图 2 中红色方框选定, (a)和(b)中的圆点和星状点分别为国家站和区域站测量的降水分布

708 Fig. 3. (a) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations in the red box in

Fig.2a and (b) precipitation distribution of radar QPE in the red box in Fig.2b at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots

710 and stars in (a) and (b) are the precipitation records from national and regional gauge stations, respectively.





712

713 图 4.2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC)河南地区订正前后雷达 QPE 产品的降水分布以及前后与国家站的对
714 比散点图分布, (a)订正前雷达 QPE 产品降水分布、(b)订正后雷达 QPE 产品降水分布、(c)订正前
715 雷达 QPE 产品与国家站对比散点图和 (d)订正后雷达 QPE 产品与国家站对比散点图, (a)和 (b)中圆
716 点为国家站降水分布

Fig. 4. Precipitation distribution of (a) radar QPE before LGC, (b) after LGC, scatterplots of 1 h precipitation from
(c) radar QPE before LGC and (d) after LGC vs the national gauge station observations in Henan
at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots in (a) and (b) are precipitation records from the national gauge stations.



722 图 5.2021 年 7 月 20 日 09:00 (UTC) 河南地区 (a) 雷达-雨量计降水融合产品的降水分布以及 (b) 与国
 723 家站的对比散点图, (a) 中圆点为国家站降水分布

- Fig. 5. (a) Precipitation distribution of Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and (b) scatterplots
- 725 of 1 h precipitation from Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station
- 726 observations in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021. The dots in (a) are precipitation records from the national
- 727 gauge stations.





730 金插值场、(c) 区域站订正后雷达 QPE 产品与(d) 雷达-雨量计降水融合产品分布,其中圆点和星状

731 点分别为国家站和区域站降水分布

736

732 Fig. 6. Precipitation distribution in Henan at 09:00 UTC 20 July 2021 from (a) radar QPE, (b) Kriging

733 interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations, (c) radar QPE after LGC and (d)

Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper. The dots and stars are the precipitation records from
 national and regional gauge stations, respectively.



 737
 图 7. 郑州 21 • 7 暴雨测试时间段(2021.07.20 00:00 - 2021.07.21 00:00 UTC)内(a)雷达 QPE 产品和(b)

 738
 雷达-雨量计降水融合产品与地面国家站观测降水的散点对比

Fig. 7. Scatterplots of 1 h precipitation from (a) radar QPE and (b) Radar-Gauge Merging QPE vs the national
gauge station observations for the period from 00: 00 UTC 20 July to 00: 00 UTC 21 July 2021 for the
precipitation event in Zhengzhou.



742

743 图 8. 郑州 21 • 7 暴雨评分指标时序变化(2021.07.20 00:00 - 2021.07.21 00:00 UTC)。(a) RMSE(mm),
744 (b) RMAE, (c) RMB 和 (d) CC。蓝色线为雷达 QPE 产品,红色线为融合产品,(a) 中还叠加了该
745 时刻国家站测量降水的均值(灰色柱)

Fig. 8 Statistical indicators of (a) RMSE (mm), (b) RMAE, (c) RMB and (d) CC for the period from 00: 00 UTC
20 July to 00: 00 UTC 21 July 2021 for the precipitation event in Zhengzhou. Blue lines show the radar QPE and

the red lines show the Radar-Gauge Merging QPE. The grey columns in (a) are the hourly average precipitation.



750 图 9. 2021 年 7 月 20 日 21:00 (UTC) 郑州地区不同降水产品分布图, (a) 区域站克里金插值场、(b) 原
 751 始雷达 QPE 产品、(c) 区域站订正后雷达 QPE 产品与(d) 雷达-雨量计降水融合产品分布,其中圆点和

- 752 星状点分别为国家站和区域站降水分布
- 753 Fig. 9. Precipitation distribution at 09:00 UTC 20 July 2021 in Zhengzhou from (a) radar QPE, (b) radar QPE after
- 754 LGC, (c) Kriging interpolations of precipitation based on the regional gauge station observations and (d)

In

- 755 Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper. The dots and stars are the precipitation records from
- 756 national and regional gauge stations, respectively.
- 757



758

759 图 10. 台风登陆过程中(2021.07.25 21:00 UTC) 雷达 QPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品的降水分布图
760 及其与国家站观测降水对比, (a)和(c)为原始雷达 QPE 产品降水分布及密度散点图, (b)和(d)为
761 雷达-雨量计降水融合产品分布及密度散点图, (a)和(b)中圆点为国家站降水分布

Fig. 10 Precipitation distribution of (a) radar QPE and (b) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and scatterplots of 1 h precipitation from (c) radar QPE and (d) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station observations at 21:00 UTC 25 July 2021 during the typhoon In-Fa landfall. The dots in (a) and (b) are precipitation records from the national gauge stations.







767 图 11.2021 年 7 月 24 日 07:00 (UTC) 台风烟花过程中(a) 雷达-雨量计降水融合产品分布图以及(b) 与
 768 国家站的对比散点图, (a) 中圆点为国家站降水分布

Fig. 11. Precipitation distribution of (a) Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper and (b) scatterplots of 1 h precipitation from Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper vs the national gauge station observations at 07:00 UTC 24 July 2021 during the typhoon In-Fa landfall. The dots in (a) are precipitation records from the national gauge stations.

773





775 图 12. 同图 7,但时间为台风烟花测试时段(2021.07.22 01:00 - 2021.07.28 09:00 UTC)



777 typhoon In-Fa precipitation event.



780 图 13. 同图 8, 但为台风烟花测试时段(2021.07.22 01:00 - 2021.07.28 09:00 UTC)

- Fig. 13. Same as Figure 8., but for the period from 01: 00 UTC 22 July to 09: 00 UTC 28 July 2021 for the
  typhoon In-Fa precipitation event.
- 783



784

785 图 14. 同图 7,但时间为随州暴雨测试时间段(2021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC)。

Fig. 14. Same as Figure 7., but for the period from 01:00 UTC 10 August to 15:00 UTC 13 August 2021 for the
precipitation event in Suizhou.





790 图 15. 同图 8, 但为随州暴雨测试时间段 22021.08.10 01:00 - 2021.08.13 15:00 UTC

792 precipitation event in Suizhou.

<sup>791</sup> Fig. 15. Same as Figure 8., but for the period from 01:00 UTC 10 August to 15:00 UTC 13 August 2021 for the



795 图 16. 随州暴雨测试时间段雷达 QPE 产品和雷达-雨量计降水融合产品的降水分布及其与国家站观测降水 796 对比, (a)、(c)、(e)和(g)为原始雷达 QPE 产品降水分布, (b)、(d)、(f)和(h)为雷达-797 雨量计降水融合产品降水分布;时间为(a)和(b)2021.08.11 07:00 UTC、(c)和(d)2021.08.11 18:00 UTC、 (e)和(f)2021.08.11 23:00 UTC、(g)和(h)2021.08.13 00:00 UTC,圆点为国家站测量降水分布 798 799 Fig. 16 Precipitation distribution of radar QPE and Radar-Gauge Merging algorithm described in this paper for 800 the period from 01: 00 UTC 10 August to 15: 00 UTC 13 August 2021 for the precipitation process in Suizhou. (a), 801 (c), (e) and (g) are for radar QPE. (b), (d), (f) and (h) are for Radar-Gauge Merging QPE. Time:(a) and (b) are for 802 2021.08.11 07:00 UTC, (c) and (d) are for 2021.08.11 18:00 UTC, (e) and (f) are for 2021.08.11 23:00 UTC, (g) 803 and (h) are for 2021.08.13 00:00 UTC. The dots are precipitation records from the national gauge stations.

