

刘松楠,汪君,王会军,2021. 多源降水在门头沟山洪模拟中的应用及比较[J]. 气象,47(7):817-829. Liu S N, Wang J, Wang H J, 2021. Application and comparison of multi-source rainfall data in the simulation of flash flood in Mentougou of Beijing[J]. Meteor Mon, 47(7):817-829(in Chinese).

多源降水在门头沟山洪模拟中的应用及比较^{*}

刘松楠¹ 汪 君^{2,3} 王会军¹

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心,北京 100029

3 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085

提 要: 2017 年 6 月 18 日 14 时,北京门头沟区石羊沟流域爆发山洪泥石流,造成人员伤亡。使用站点降水、融合降水、雷达降水和卫星降水驱动 WRF-Hydro 水文模型运行,评估不同降水资料在本次山洪模拟中的效能。结果表明,各种降水的空间分布和时间演变较为相似,但除雷达降水外,其他降水均存在较大程度的低估。利用雷达降水模拟出的山洪与实际山洪在出现时间和洪峰流量上最为相近,利用其他降水模拟的山洪出现时间相近但低估了洪峰。目前常规台站观测降水暂不满足对小尺度突发山洪的研究和预警需求,亟需融合更多的自动站和雷达、卫星等实时高分辨率降水产品。

关键词: 雷达降水,卫星降水,山洪,门头沟,石羊沟流域

中图分类号: P49, P641

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.005

Application and Comparison of Multi-Source Rainfall Data in the Simulation of Flash Flood in Mentougou of Beijing

LIU Songnan¹ WANG Jun^{2,3} WANG Huijun¹

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085

Abstract: At 14:00 BT 18 June 2017, a flash flood happened in the Shiyanggou Watershed of Mentougou District, Beijing, causing casualties. The station precipitation, combined precipitation of station and satellite, radar precipitation and satellite precipitation are used to drive the WRF-Hydro hydrological model to evaluate the performance of these different precipitation data in the flash flood simulation. The results show that the spatial distribution and temporal variation of these data are similar. Except radar precipitation, other precipitation data underestimate the precipitation. In these flash flood simulation experiments, the flash flood simulated by radar precipitation is most similar to the actual flash flood in terms of occurrence time and peak flow. The flash floods simulated based on other precipitation data are close to the actual streamflow in terms of occurrence time but the peak flow is underestimated. At present, conventional precipitation products by routine observation stations can not meet the requirements of research and early warning of small-scale abrupt flash floods. So, it is urgent to integrate radar and satellite precipitation

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090102)和国家自然科学基金项目(41991283)共同资助

2020 年 6 月 4 日收稿; 2021 年 6 月 1 日收修定稿

第一作者:刘松楠,主要从事水文气象研究. E-mail:liusn113@126.com

通讯作者:汪君,主要从事气象-地质灾害研究. E-mail:wangjun@mail.iap.ac.cn

products with observation station precipitation to get real-time high-resolution precipitation products.

Key words: radar, satellite precipitation, flash flood, Mentougou District, Shiyanggou Watershed

引 言

2017 年 6 月 18 日 14 时(北京时,下同)左右,北京门头沟斋堂地区突降暴雨,与上游暴雨结合,致使门头沟区石羊沟流域暴发山洪,造成 5 人死亡,1 人失踪。突发大暴雨是诱发此次山洪的主要原因。此流域较小,常规站点观测网络没能捕捉到这次暴雨事件,因此未能发布灾害预警信息,造成了较大的影响。

山洪会对生命安全和国家经济造成较大影响(文明章等,2013),据《中国水旱灾害公报》,2000—2017 年我国平均每年因山洪及其诱发的滑坡、泥石流等造成的死亡人数高达 870 人,占洪涝造成死亡人数的 72.62%(国家防汛抗旱总指挥部和中华人民共和国水利部,2006—2017)。降水作为一种重要的气象要素,其时空分布直接影响山洪等灾害的发生与否。降水是水文模型最重要的气象强迫(Gourley and Vieux, 2005;包红军等,2016;Zhang et al, 2019),降水数据质量的好坏直接影响了水文模型模拟预报的准确性,降水数据质量越高,模型模拟预报的结果越好,对于山洪等灾害的模拟预报也就更加准确。

获得降水数据的方法一般有三种:气象站点观测、雷达反演和卫星遥感测量,这三种方法有各自的优缺点(Li et al, 2013)。气象站点观测(包括国家级气象站和自动站)是对降水的直接测量,准确度较高,但站点分布较为稀疏且不均(宇婧婧等,2015),在中国西部和山区站点较少,不能很好地代表西部和山区降水的实际空间分布。然而,大多数山洪发生在山区且发生范围非常小,因此气象站点观测降水可能无法满足对山洪的预测预警需求(Kidd and Huffman, 2011;Borga et al, 2014)。雷达反演降水的时空分辨率和精度较高,可以较为准确地展现降水的时空分布,可以用于监测和预测降水的移动路径(Doviak et al, 2006;郭佳等,2020);但是雷达会受到复杂地形等因素的影响(Maddox et al, 2002;De Coning, 2013;张昇祺和傅云飞,2018),而且雷达系统的价格较高且难以维护,因此,我国雷达的有效覆盖面积还不够广,尤其是在西部山区。

在气象站点稀疏和无雷达的区域,卫星数据是研究山洪的重要资料来源(滑申冰等,2018)。通过反演卫星的红外、微波等信息可以获得覆盖全球的实时的高时空分辨率降水,可以弥补观测数据的局限性(燕亚菲等,2019)。目前,比较主流的高时空分辨率的卫星降水数据有 CMORPH(CPC MORPHing technique;Joyce et al, 2004)、GPM(Global Precipitation Measurement;Sorooshian et al, 2011)、PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System;Hong et al, 2004)和 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission; Huffman et al, 2007)等。卫星降水在中国不同区域、不同海拔、不同时间尺度和不同季节的表现不同(Zhou et al, 2008;Shen et al, 2010;Sharifi et al, 2016;金晓龙等,2018;张天宇等,2020)。Zeng et al(2018)从日、月、季节和年等时间尺度评估了六种流行的卫星降水在中国的应用效果,发现对于不同时间尺度和区域,卫星降水的精度不同;李麒麟等(2018)从日、月尺度评估了 TRMM 和 GPM 卫星降水在中国的准确性,发现 GPM 的精度优于 TRMM;许时光等(2014)分析了逐小时的 CMORPH 卫星降水在中国的应用效果,发现 CMORPH 对小雨的空报率较高;Shen et al(2010)评估了 CMORPH、TRMM 和 PERSIANN 卫星数据在中国的适用性,结果发现这些卫星资料均可以较好地描述降水的空间分布和时间演变,CMORPH 在展现降水的空间分布和时间演变上的效果最好;Li et al(2012)研究了多时间尺度的 TRMM、CMORPH 和 PERSIANN 在长江流域的应用性,结果发现在日尺度上,CMORPH 效果最好;Wang et al(2016)比较了 CMORPH、TRMM 和 PERSIANN 卫星降水在舟曲泥石流事件的准确性,结果发现 CMORPH 和 TRMM 的效果较好, PERSIANN 的误差较大。目前,对于卫星降水的研究主要集中于较大时间尺度(日尺度到年尺度)和较大空间尺度,其在水文中的应用也集中于较长时间较大流域的径流模拟,使用卫星降水和雷达降水来研究小尺度山洪在国内还比较少。

为了探讨上述各类降水数据在山洪监测中的应用效果,本文首先拟对比分析在 2017 年 6 月 18 日

北京石羊沟流域山洪事件中实际降水与气象观测站降水、雷达降水和全球高分辨率卫星降水等不同降水数据的时空分布差异和特性,然后使用不同的降水资料来驱动 WRF-Hydro 分布式水文模型运行,分析对比不同降水资料对此次山洪事件的模拟效能,以期为不同的降水资料在山洪预警系统的应用提供一定的参考。

1 数据与方法

本研究的研究区域为石羊沟流域,其范围是 $40^{\circ}\sim 40.2^{\circ}\text{N}$ 、 $115.5^{\circ}\sim 115.7^{\circ}\text{E}$ 。使用的数据主要为各种类型的降水数据和数字高程模型。

1.1 研究区域与试验

图 1a 是北京附近的地形和国家级气象观测站点、自动气象站的分布。从站点的分布上可以看出:国家级气象站较少,自动气象站比较多;站点在东部平原地区较密集,在西部海拔较高的地区较稀疏。图 1b 是石羊沟流域,此流域是永定河的子流域,其上游位于河北省境内,下游位于北京市,横穿河北省与北京市。该流域最高海拔高度为 906 m,最低为 632 m,流域内海拔高度差可达 174 m,该流域东西向大约为 15 km,南北向大约为 7.5 km,面积约为

43.7 km²(何爽爽等,2018)。在该流域内没有国家级气象站,也没有自动气象站,距流域最近的国家级气象站位于流域东南方 12 km 处,最近的自动站位于流域西南方 3 km 处。

1.2 降水数据

研究共用了 10 种不同的降水数据,表 1 给出了降水数据的时间空间分辨率和探测手段。北京融合降水(以下简称 BJ_REAL)是基于北京及其附近的雷达和气象观测站(包括自动站)降水数据融合而成的,空间分辨率为 1 km 左右,是一套在北京区域具有高分辨率高精度的数据集,因为在石羊沟流域没有直接观测数据,因此在本研究中以此套数据集为基准当作真实降水数据集。国家级气象站(简称 STN)和气象自动站(简称 AWS)在石羊沟流域没有站点,因此通过对这些站点降水进行距离反比插值得到石羊沟流域的降水。雷达降水(简称 RADAR)是基于雷达的基本反射率数据,根据公式 $Z=200R^{1.6}$ 计算得到的(Reynolds and Smith, 1979)。中国气象局陆面同化系统实时产品数据集(CMA land data assimilation, CLDAS)是一套分辨率比较高的数据集,这套数据融合了 CMORPH 卫星降水和中国区域 4 万多个气象站点的逐小时降水,并拼接了东亚多卫星集成降水产品,该数据同时具有卫

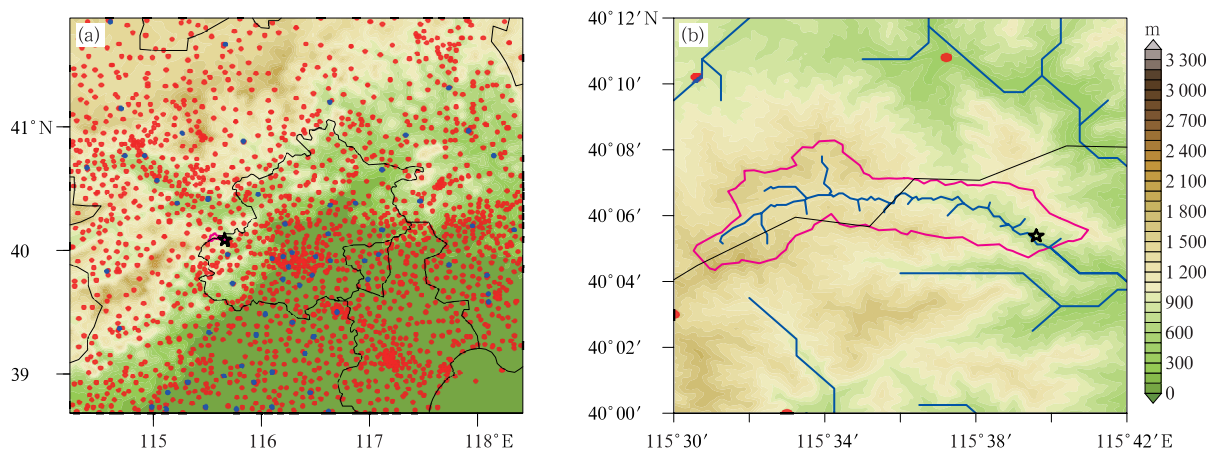


图 1 模拟区域内的地形分布

(a)北京附近区域,(b)石羊沟流域

(红点代表自动站,蓝点代表国家级气象站,黑色星号是山洪地点,蓝线是河流,粉线是流域边界)

Fig. 1 Terrain distribution in the simulated area

(a) area around Beijing, (b) Shiyanggou Watershed

(red dots; the automatic stations, blue dots; weather stations, black star; the location of landslide,

blue lines; rivers, pink line; basin boundary)

星和站点数据的优点,降水的时空分布较为合理(徐宾等,2015;孙帅,2018)。气象观测站点与 CMORPH 卫星融合数据集(CMORPH_CHINA)融合了 CMORPH 卫星降水和气象观测站点数据,该数据有效地利用了卫星降水和观测降水的优势,而且降水的时空分布和降水量值较为合理(沈艳等,2013;张伊然,2018)。

GPM 是 TRMM 卫星退役后的新一代的卫星降水数据,覆盖了全球 $60^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 的区域,其空间和时间分辨率与 TRMM 降水数据相比有了一定的提升。本研究使用基于微波红外的 GPM IMERGE

产品(Sorooshian et al, 2011)。PERSIANN 是由 UCI(University of California, Irvine)的水文气象遥感中心(CHRS)开发的,是根据神经网络程序结合红外亮温图上的云高和范围计算而来的(Hong et al,2004)。CMORPH 卫星数据是美国气候预测中心(CPC)发布的,是根据每半小时的红外图像计算降水运动矢量并外推出微波估算的降水,覆盖范围是 $60^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{S}$,有原始卫星数据(CMORPH_RAW)和经过站点数据校正降水数据(CMORPH_ADJ)两个版本(Joyce et al,2004)。

表 1 降水数据的时空分辨率和探测手段

Table 1 Spatio-temporal resolution of precipitation data and observation means

降水数据	空间分辨率	时间分辨率/h	探测手段
BJ_REAL	$\sim 1\text{ km}(0.01^{\circ})$	1	雷达与自动站融合数据
RADAR	$\sim 1\text{ km}(0.01^{\circ})$	1	雷达
STN	不均匀($\sim 50\text{ km}$)	1	站点观测
AWS	不均匀($\sim 10\text{ km}$)	1	站点观测
CLDAS	$\sim 6\text{ km}(0.0625^{\circ})$	1	融合分析数据
CMORPH_CHINA	$\sim 10\text{ km}(0.1^{\circ})$	1	CMORPH 与观测站点融合数据
GPM	$\sim 10\text{ km}(0.1^{\circ})$	0.5	微波、红外
PERSIANN	$\sim 4\text{ km}(0.04^{\circ})$	1	红外
CMORPH_RAW	$\sim 8\text{ km}(0.0728^{\circ})$	0.5	微波、红外
CMORPH_ADJ	$\sim 8\text{ km}(0.0728^{\circ})$	0.5	微波、红外及订正

1.3 数字高程模型

数字高程模型(DEM)是由 Miller 和 Laflamme 在 1958 年提出的,它是对地表形态高程属性的数字化表达(宋晓猛等,2013)。本研究使用了 HydroSHEDS(hydrological data and maps based on shuttle elevation derivatives at multiple scales,https://hydrosheds.cr.usgs.gov/dataavail.php)的高分辨率 DEM 数据。该数据是世界自然基金会(WWF)赞助,由美国地质调查局(USGS)通过处理高分辨率卫星遥感地形数据(shuttle radar topography mission,SRTM)得到的。这套数据的空间分辨率有三种,分别是 $3''$ (大约 90 m), $15''$ (大约 500 m)和 $30''$ (大约 1 km)。因为此次研究的区域(石羊沟流域)范围较小,因此选择分辨率最高的 $3''$ DEM。

1.4 模式介绍

本研究用了 WRF 和 WRF-Hydro 两个模式。WRF 模式用于提供 WRF-Hydro 模式的初始边界

条件,WRF-Hydro 用来模拟石羊沟流域径流的时空演变过程。

1.4.1 WRF

WRF 模式是由美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构联合开发的一种中尺度气象模式(Skamarock et al, 2008)。模式有 ARW(advanced research WRF)和 NMM(non-hydrostatic mesoscale model)两种动力核,分别用于研究和业务。本文选择 ARW 动力核。用 ERA-Interim 驱动 WRF,得到 WRF-Hydro 的初始边界场数据和除降水外其他的气象强迫数据。WRF 采用了三层嵌套,第三层的分辨率是 1 km 。

1.4.2 WRF-Hydro 水文模式

WRF-Hydro 分布式水文模式由 NCAR 研究应用实验室开发和发展,于 2013 年作为 WRF 子模块发布。其基于 NOAH 陆面过程模型开发,陆面和水文的动力学和热力学过程比较齐备(Gochis et al, 2018);是对传统的 NOAH 陆面模型的扩展,具有地表径流模块、饱和地下径流模块、河网演算模

块和基流模块等多个模块。它可以与 WRF 模式耦合运行,也可以单独离线运行,本文选择了离线运行。目前,WRF-Hydro 已被应用于洪水预报、区域水文气候研究、陆气耦合研究和季节性预测等领域 (Senatore et al, 2015; Yucel et al, 2015; Arnault et al, 2016; Silver et al, 2017),就其应用效果来看,它的适用性较强、准确性较高,比较适用于水文模拟和预测工作。

WRF 可以提供 WRF-Hydro 用的初始场数据,DEM 结合 ArcGIS 可以提供 WRF-Hydro 需要的流域内部地理信息数据。模型预热了一年,其中水文模块的水平分辨率为 100 m。因为石羊沟流域没有水文观测站点,因此选择其附近流域暴雨期的径流率定参数,作为本次研究的率定参数。Liu et al (2021)的研究区域离石羊沟流域较近且是关于较短历时径流的模拟,因此根据其研究结果选择了一套参数组合。

1.5 统计方法

本文选择了相关系数(CC)、相对偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(Nash-Sutcliffe coefficient efficiency, NSCE)四个统计参数对降水数据和模拟径流进行定量评估。CC、Bias、RMSE 和 NSCE 的公式如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \times 100\%$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

$$NSCE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2}$$

式中: \bar{x} 代表实测数据的时间平均值, x_i 代表第 i 个时刻的实测数据值; \bar{y} 代表被评估数据的时间平均值, y_i 代表第 i 个时刻的被评估值; $Q_{i,o}$ 指第 i 个时刻的观测值, $Q_{i,s}$ 指第 i 个时刻的模拟值, \bar{Q}_o 表示观

测平均值。

NSCE 可用来检验水文模型模拟的好坏。它的取值范围是 $-\infty \sim 1$,越接近于 1,模型效果越好,可信程度越高;接近于 0,则表示模拟水平接近观测的平均水平,即总体结果是可以信的,但对过程模拟误差较大;若其值远远小于 0,则模型是没有可信度的。

2 结果与分析

本文首先评估了各种降水在该流域的准确性,然后将其应用在山洪模拟中,看各种降水在山洪模拟中的实用性。

2.1 降水评估

从 24 h 累积降水的空间分布情况和降水的时间演变情况这两个方面来对降水数据进行评估。

2.1.1 24 h 累积降水评估

图 2 是石羊沟流域 24 h 累积降水的空间分布,从图中可以看出在石羊沟流域大多数降水数据呈上游降水较多、下游降水较少的分布特征,但是在降水量级上有较大的差异。图 2a 是 BJ-REAL 降水的空间分布,从图中可以看出,石羊沟流域位于降水大值区,流域平均降水高达 150 mm。由于石羊沟流域内没有观测站点,站点插值降水不能作为该流域的准确降水。BJ-REAL 在分辨率和精度上均较好,因此可以将此套降水数据当作准确的降水数据作为参照依据。

从 BJ-REAL 空间分布中可以看出,石羊沟流域位于暴雨地带,在该流域有 45% 区域的降水在 100 mm 以上,90% 以上区域在 70 mm 以上。RADAR 与实际降水的空间分布较为一致,但在流域上游 RADAR 偏小,在下游偏大。流域降水均在 50 mm 以上,其中 50% 以上区域降水大于 100 mm。STN 在该流域内部没有站点,离该流域最近的站点在 12 km 处,该站点降水仅为 3.8 mm,因此插值后降水量偏小,看不出暴雨中心;AWS 站点相对较多但没有站点在该流域内,最近站点距流域 3 km 降水为 20.9 mm,插值之后可以展现降水大值区的位置,但是降水量较低。因为 AWS 在流域周围的站点较多,因此插值之后在流域内不同区域可以有不同

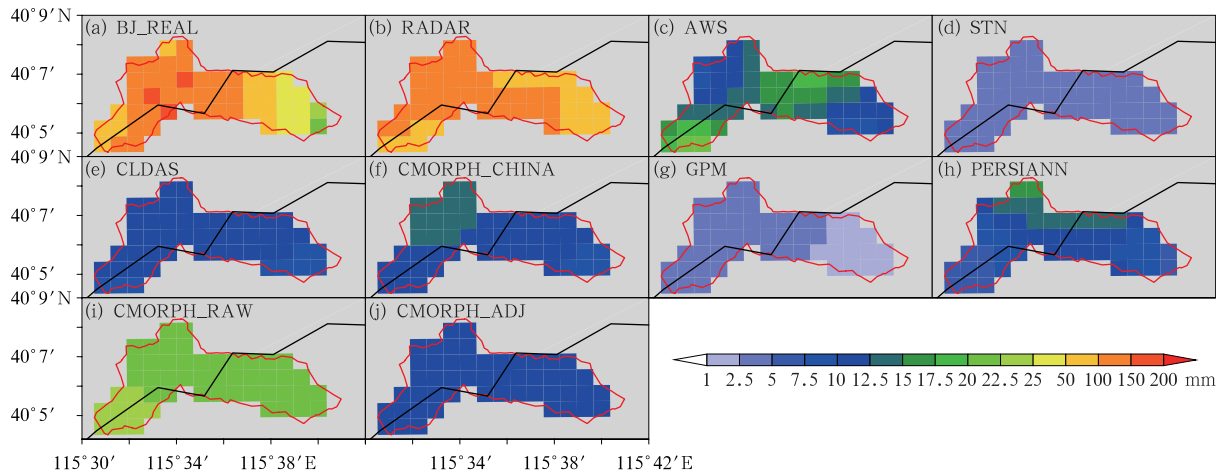


图 2 2017 年 6 月 18 日各种降水数据在石羊沟流域的 24 h 累积降水(插值到 1 km)

(a)BJ_REAL, (b)RADAR, (c)AWS, (d)STN, (e)CLDAS, (f)CMORPH_CHINA, (g)GPM, (h)PERSIANN, (i)CMORPH_RAW, (j)CMORPH_ADJ

Fig. 2 The 24 h accumulated precipitation in Shiyanggou Watershed on 18 June 2017

(a) BJ_REAL, (b) RADAR, (c) AWS, (d) STN, (e) CLDAS, (f) CMORPH_CHINA, (g) GPM, (h) PERSIANN, (i) CMORPH_RAW, (j) CMORPH_ADJ

同的值。总体而言, AWS 比 STN 准确度高、捕捉暴雨能力强。CLDAS 和 CMORPH_CHINA 降水偏少, 大多数区域的降水为 12.5~15 mm。卫星降水降水量均偏小, 其中, GPM 数据降水量低估最为严重, 在该流域其降水均小于 5 mm。

为了消除不同数据量级上的差异, 对数据进行了中心化处理, 之后对各种降水的 24 h 累积降水进行评估, 从泰勒图上看(图 3), 不同降水数据的性能差异较大。总体而言, RADAR 与实际最为接近, 相对偏差在 5% 左右, 空间相关系数为 0.75, 方差之比为 0.75。STN 和 AWS 有较大差异, AWS 的空间相关系数比 STN 的大, 且相对误差也比 STN 小很多, 说明 AWS 准确度比 STN 的要高。CMORPH_CHINA 的空间相关系数比 CLDAS 的高, 但是其相对偏差相差不大。各类卫星数据中, GPM 的空间相关系数最高, 但存在较大的负偏差; 其他三种卫星累积降水的空间相关系数均在 0.4 左右, 其中, CMORPH_RAW 的相对偏差较小, 说明其降水量与真实降水量接近。

总体而言, RADAR 降水空间分布与实际的最为接近, 误差也最小; AWS 降水空间分布比 STN 降水空间分布准; CLDAS 和 CMORPH_CHINA 分布相似, 存在一定程度的低估; 卫星数据中, GPM 的空间相关性最高, CMORPH_RAW 的相对偏差最低。

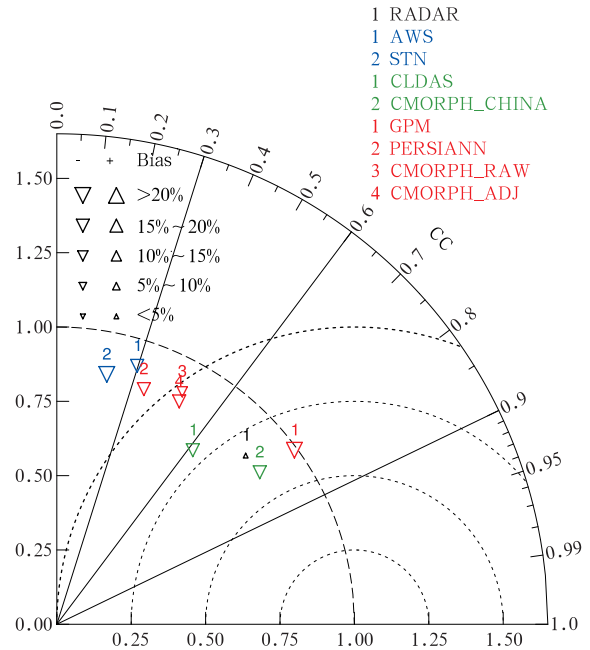


图 3 各种降水数据的 24 h 累积降水的泰勒图

Fig. 3 Taylor's chart of 24 h accumulated precipitation of various precipitation data

2.1.2 降水的时间序列评估

图 4 是流域平均降水的时间演变, 从图中可以看出各种降水数据的降水开始时间和峰值出现的时间是不同的, 而且在降水量上有较大的差异, 但是, 降水时间均集中在 12—17 时。

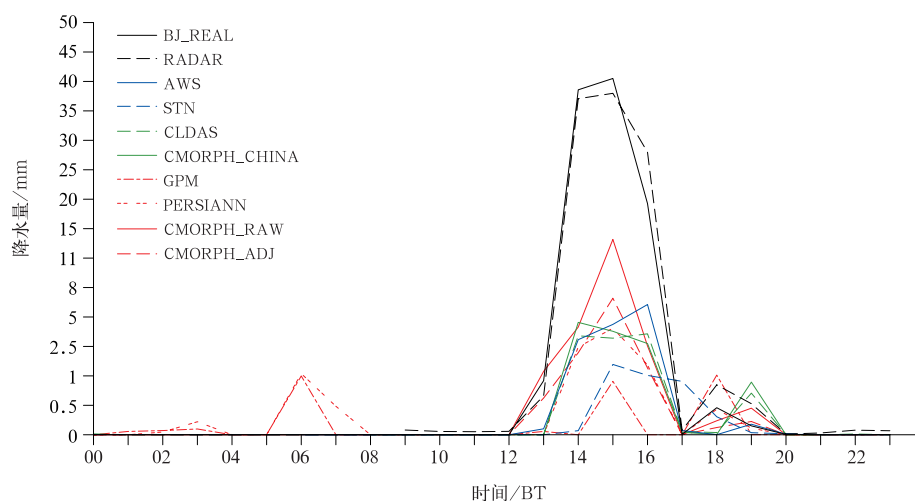


图4 流域平均降水在2017年6月18日的逐小时变化

Fig. 4 Hourly variation of average precipitation in the watershed on 18 June 2017

BJ_REAL降水(实际降水)在12—13时出现,13—14时大幅增加,在14—15时降水达到峰值,17时暴雨事件结束。RADAR暴雨出现和结束时间与实际一致,降水峰值偏低,其他时间会出现对降水的高估。AWS降水出现和峰值出现时间比实际晚1 h,峰值降水与实际降水相差达40 mm。STN在14—15时出现降水且达到峰值,但峰值降水低于2.5 mm。CLDAS和CMORPH_CHINA降水出现时间晚了1 h,CMORPH_CHINA峰值出现时间早了1 h,CLDAS峰值出现时间晚了1 h,两种资料的峰值降水均只有5 mm左右,偏小40.4 mm以上。GPM降水出现的时间较晚,13—14时出现降水,14时左右达到峰值,峰值降水较小,仅为0.84 mm;PERSIANN降水出现时间和峰值达到时间与实际一致,但是降水量值最大仅为4 mm;CMORPH_RAW和CMORPH_ADJ降水出现和达到峰值时间与实际一致,但是峰值降水相差较大。

将各种降水数据插值到相同分辨率的网格后,计算每个格点上的各类降水与实际降水时间相关系数、相对偏差和均方根误差。图5a是相关系数空间分布的箱线图,在黑点之上,说明相关系数通过了0.01的显著性水平检验。从这张图上可以看到,RADAR、AWS、CLDAS和CMORPH_CHINA在这个流域内各个格点的相关系数都很高,全部通过了0.01的显著性水平检验,说明这四种资料可以很好地反映流域内降水的时间变化情况。STN有3/4

以上的格点通过了显著性水平检验,说明在大多数区域降水的时间变化情况与实际一致。对于卫星资料,GPM的相关性较差,流域内通过显著性水平检验的面积很少;PERSIANN几乎所有格点都通过了0.01的显著性水平检验;CMORPH_RAW和CMORPH_ADJ均有3/4区域通过了显著性水平检验,其中流域上游全部通过了显著性水平检验,下游有部分区域没有通过检验(图略)。

从各种降水RMSE的箱线图(图5b)上看,RADAR的RMSE比其他降水的RMSE都要小且空间差异变化不大,有1/2区域的RMSE在4~7 mm,说明RADAR降水的量值与实际最为接近。其他降水的RMSE较大,说明其他降水数据在降水量级上与实际降水有较大差别,其中,AWS的RMSE比STN的小,CMORPH_RAW是卫星数据中RMSE最小的。

从各种降水Bias的箱线图(图5c)上看,除了RADAR降水会产生正偏差,其余降水数据均是负偏差,而且下游的负偏差比上游的负偏差小(图略),说明其在上游的低估更为明显。RADAR降水的相对偏差在空间分布不均,有的区域有较大的正偏差,有的区域有负偏差。STN、AWS、CLDAS、CMORPH_CHINA和卫星降水的Bias都相差不大,平均在-90%,流域内部偏差变化较小。

通过分析各类降水数据的时间和空间分布情况,可以看出,RADAR降水在空间分布、时间演变

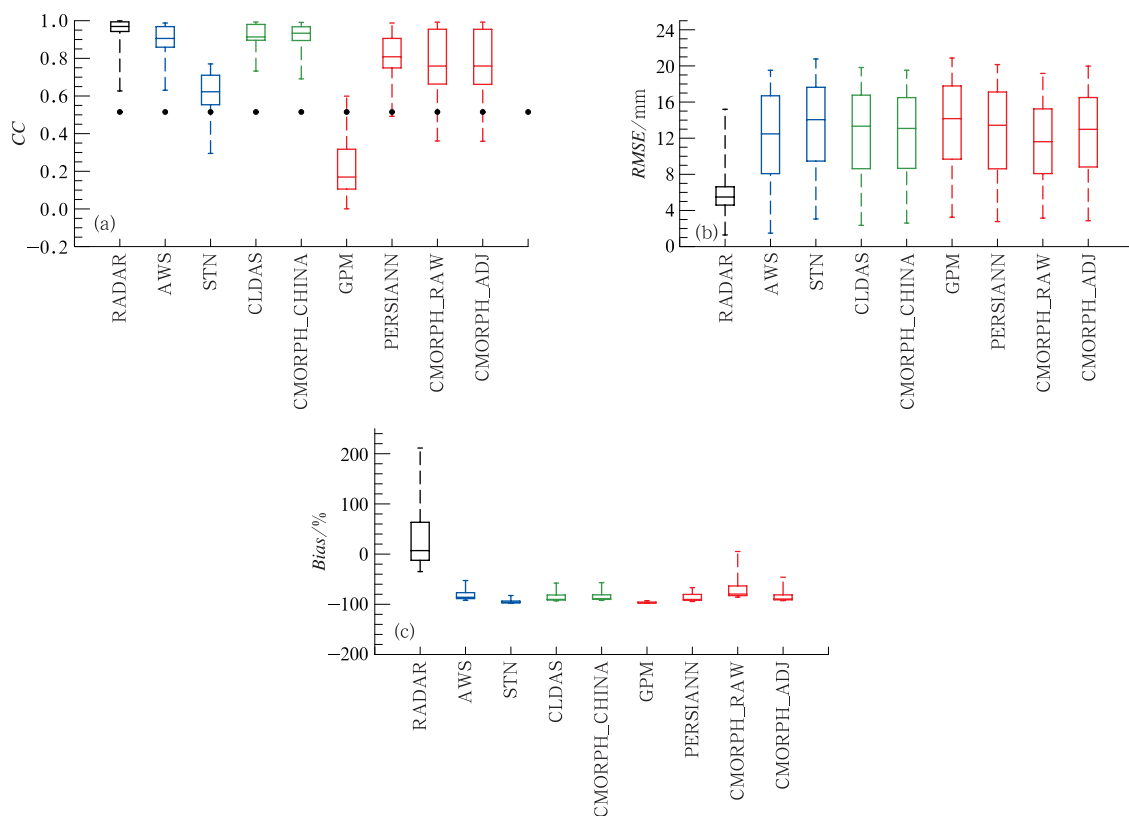


图 5 各种降水数据相对 BJ-REAL 在流域内各格点在 2017 年 6 月 18 日的(a)相关系数、(b)均方根误差和(c)相对偏差分布的箱线图

(图 5a 中的黑点对应 0.01 显著性水平检验的相关系数临界值)

Fig. 5 Box plot of (a) correlation coefficient, (b) root mean square error and (c) relative error among these precipitation data and BJ-REAL in the watershed on 18 June 2017

(Black dots represent the critical of correlation coefficient of significance test at 0.01 level in Fig. 5a)

和暴雨量值上与实际的最为接近;STN 和 AWS 两类站点观测数据,在空间分布、时间演变和降水量值上有较大的差异,主要是因为 AWS 站点较多,插值后的效果比 STN 的效果要好;CLDAS 和 CMORPH_CHINA 两类数据的降水时空分布结果都在可接受范围内;GPM 不能捕捉到这次暴雨事件,PERSIANN、CMORPH_RAW 和 CMORPH_ADJ 的降水量小,但其降水的时间变化与实际相似。

研究了各类降水在该区域的准确度,那这些降水数据在实际山洪中的应用如何?接下来将这些降水数据作为气象强迫来驱动水文模式,看其在本次山洪中的应用效果。

2.2 径流评估

图 6 是模拟径流的空间分布,从图中可以看出径流的时空变化情况。流域上游径流先开始增加,之后流域下游的径流开始增加,下游径流达到最大值比上游达到最大值的时间要晚。山洪消退也是从

上游开始。大多数降水对应的径流变化都有增加和减少的过程,但是 STN 和 GPM 降水对应的径流没有明显的增加下降趋势。STN 和 GPM 的应用效果不好跟降水数据本身偏小有关,这两种数据不适用于本次事件。

图 7 是使用不同降水数据驱动 WRF-Hydro 得到石羊沟流域下游河道的径流变化。不同的降水强迫,得到的径流演变曲线是不同的。这与各类降水数据在流域内降水量值、时间演变和空间分布不同有关。

据新华网报道,石羊沟流域山洪最大为 $190 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。从 BJ-REAL 对应的径流上来看,其与实际山洪发生时间大致一致。模拟径流在 16 时左右达到了峰值,其峰值径流为 $196.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,与实际峰值径流相似。在该流域没有实测的径流站点,且用 BJ-REAL 模拟的径流与实际径流在发生时间和峰值上大致吻合,因此选择以 BJ-REAL 为强迫得到的径流作为这次事件的实际径流。

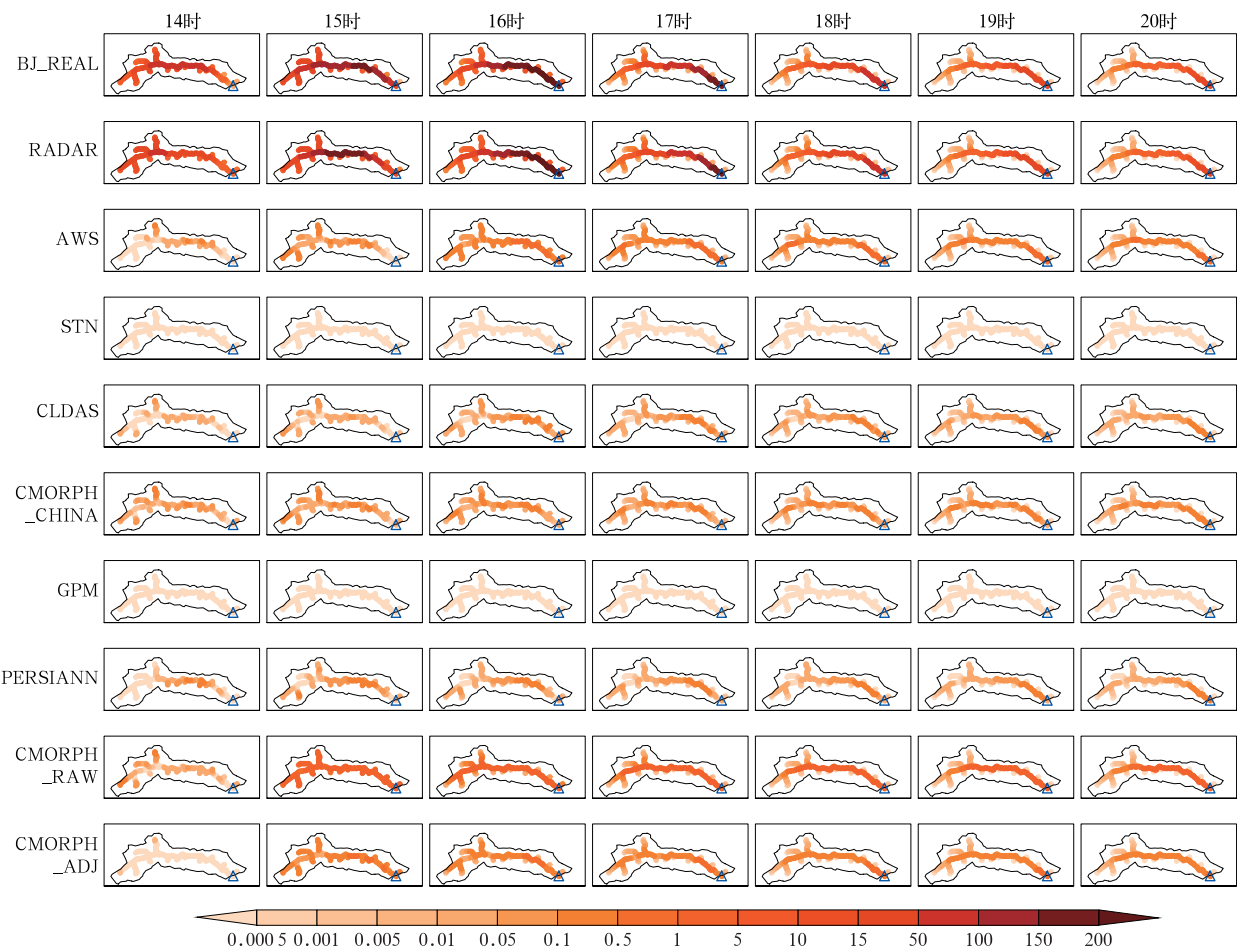


图 6 2017 年 6 月 18 日 14—20 时各种降水数据对应径流在石羊沟流域
河网中的空间分布(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Spatial distribution of streamflow in Shiyanggou Watershed in 14:00—20:00 BT
18 June 2017 (unit: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

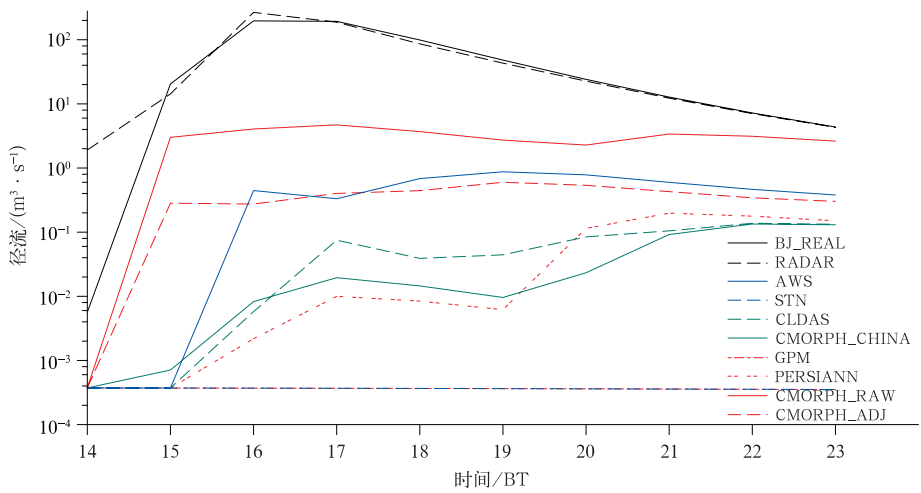


图 7 各种降水数据对应的径流在 2017 年 6 月 18 日 14 时后的逐小时变化
Fig. 7 Hourly variation of streamflow in the watershed corresponding
to various precipitation data after 14:00 BT 18 June 2017

降水对径流有较大的影响,不同降水强迫得到的结果有较大的差别,表 2 是不同降水模拟径流结果的统计参数值。RADAR 降水对应的径流变化,与实际径流变化一致,但是其会高估洪峰,其洪峰高达 $266.89\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,这可能跟 RADAR 在暴雨峰值前降水偏多有关。因为其降水的空间分布和时间演变与实际降水相似,因此模拟径流也与实际的较为接近。相关系数为 0.98,纳什效率系数为 0.93,相对误差为 6.57%,说明模拟径流的效果较好。AWS 模拟径流到达径流峰值的时间与实际一致,相关系数为 0.46,可以较为准确地模拟径流的时间变化,其在径流峰值的模拟上有较大的低估。STN 的降水量偏少,不能捕捉这个流域的暴雨,因此没有模拟出本次山洪。CLDAS 模拟径流的峰值时间比实际出现时间晚 1 h,这主要是由于其降水峰值晚 1 h。CMORPH_CHINA 模拟径流从 14 时开始就呈现增加趋势,径流一直增加但没有出现径流峰值,且低估了径流量值。GPM 降水偏少,没能捕捉到这次暴雨事件,因此模拟径流没有明显变化且径流量偏低。PERSIANN 模拟径流从 14 时起呈增加趋势,没有模拟出这次山洪,相关系数为 -0.08 。CMORPH_RAW 模拟径流与实际径流较为相似,相关系数达到了 0.75,低估了峰值径流。CMORPH_ADJ 模拟径流与 CMORPH_RAW 相似,对径流低估。

总的来说,RADAR 模拟径流与实际径流在时间演变和径流峰值上最为相似;AWS 模拟径流偏小,时间演变较为一致;STN 模拟径流没有明显的

上升下降变化,模拟径流的效果不佳;CLDAS 和 CMORPH_CHINA 模拟径流偏小;GPM 模拟径流不能体现径流的时间演变过程,效果较差;PERSIANN 模拟径流的峰值出现时间较晚,径流较小;CMORPH_RAW 和 CMORPH_ADJ 模拟径流与实际径流的时间演变较一致,但低估了径流量。

通过分析发现,径流模拟与降水有较大的联系,降水量值和时空演变对径流有较大的影响。在已有的高分辨率资料中,RADAR 降水与实际降水在时间演变和量值上最为接近;AWS 和 STN 在山区观测站点较为稀疏,在石羊沟流域没有站点,插值后的降水量较低;CLDAS 和 CMORPH_CHINA 降水偏低;卫星降水会低估暴雨且降雨面积过大。因为降水资料之间的区别,其对应的径流也有较大的区别。RADAR 模拟径流与实际相似,模拟效果最好;AWS 模拟径流的峰值出现时间一致,径流偏低;STN 模拟径流,没有明显的趋势变化,效果不好;CLADS 和 CMORPH_CHINA 低估了径流;GPM 模拟径流效果不好,没有体现径流的变化;PERSIANN 模拟径流的径流量偏低,峰值出现较晚;CMORPH_RAW 和 CMORPH_ADJ 模拟径流可以体现径流变化,径流偏低。虽然 CMORPH_RAW 模拟的径流及其峰值相比实际径流仍然有较大偏差,但相比观测站(包括自动站)仍有较大提升,这显示了卫星数据相比观测数据在空间覆盖上的优势。在本次事件中,CMORPH_RAW 是卫星数据中效果最好的。

表 2 各种降水模拟径流的统计参数值(与 BJ_REAL 模拟径流相比)

Table 2 Statistical parameters of simulated runoff of various precipitation (compared to the BJ_REAL simulated runoff)

降水数据	CC	NSCE	Bias/ %	RMSE/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
RADAR	0.98	0.93	6.57	14.69	266.89
AWS	0.46	-0.20	-99.25	60.90	0.87
STN	0.17	-0.21	-100	61.10	0.0004
CLDAS	0.18	-0.21	-99.90	61.10	0.14
CMORPH_CHINA	-0.01	-0.21	-99.93	61.10	0.13
GPM	0.17	-0.21	-100	61.10	0.0004
PERSIANN	-0.08	-0.21	-99.89	61.10	0.20
CMORPH_RAW	0.75	-0.14	-95.12	59.47	4.71
CMORPH_ADJ	0.52	-0.20	-99.40	60.94	0.60

3 结论与讨论

3.1 结 论

本文以 2017 年 6 月 18 日石羊沟流域山洪为

例,研究了气象观测站点降水、雷达降水、融合降水和卫星降水在短时山洪中的应用性。主要结论如下:

(1)在该次事件中,雷达降水抓住了暴雨的位置,而且在降水的空间分布和时间演变有较好的效果。在流域内没有站点观测数据,通过插值的站点

数据在空间分布上存在较大误差,不能准确地给出暴雨中心的强度。站点的密集程度会对结果产生较大影响,自动站的效果比国家级气象站的效果好一些。基于站点和卫星的融合数据和纯卫星数据降水量均偏低。

(2)小流域山洪对于降水很敏感,降水量和降水的空间分布对于山洪的发生位置和时间有很大的影响。雷达降水较准确,因此用雷达数据可以模拟出此次山洪。站点数据、卫星融合数据和卫星数据降水量严重偏小,因此其只能模拟出径流增加的过程,但不能准确模拟洪峰流量。

3.2 讨论

(1)山洪发生在山区而且具有局地性,目前,即使是在观测站点相对密集是北京及其周边地区,不管是常规气象站还是自动站都还远不能满足对小流域山洪监测、预警和研究的需求,因此需要尽可能建立更多的观测站点,尤其是在山区。在气象观测站点不能满足实际要求的情况下,需要其他的数据作为补充。

(2)雷达可以作为气象观测站不足时的有效补充。雷达的有效覆盖面积较广、精度较高,与站点观测降水相比误差较小。目前,我国西部地区雷达会受到地形等的影响,在地形复杂地段不能进行全面的覆盖。大多数的山洪、泥石流、滑坡等发生在西部山区的小流域,因此在可能的情况下雷达的覆盖需要进一步加大。

(3)卫星数据也可以作为气象观测站点不足时的补充。卫星数据的时空分辨率较高,覆盖面积广,可以比地基雷达覆盖更广的区域。但是,对于小区域短时暴雨的捕捉能力还不是很好。卫星算法还需要改善,降水的精度还需要进一步的提高。此外,根据中国本地降水的特点,改进降水反演算法,同时,不断改进气象卫星的微波传感器,创建更加适用于中国的卫星降水,也需要未来加大投入研发。

(4)山洪发生较快,从暴雨的发生到山洪的触发时间往往非常短,这对从监测到暴雨之后到山洪预警信息的发布流程提出了非常高的要求和挑战。另外,加强临近预报技术和短期预报的研发,可以有效延长灾害预警时间,为防灾减灾提供足够的缓冲时间,从而减小山洪灾害带来的损失。

(5)降水的质量直接影响到对山洪的模拟和预警效果,而上述的降水数据均有各自的缺点,无法满

足对全国的小尺度突发山洪等灾害的实时预报预警需求,也无法满足目前对小尺度山洪灾害的研究需求,因此可以参考美国融合了站点、雷达、卫星等多种降水的覆盖全国的 Stage IV 高质量高时空分辨率降水数据(Nelson et al, 2016)的方法,建立一套适用于我国的高时空分辨率、高精度、准实时降水数据集,以作为覆盖全国的高精度标准降水数据,这对暴雨、洪涝、山洪、滑坡泥石流等小尺度突发性灾害的研究和预报有重要意义。

参考文献

- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象,42(9):1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016. A Review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9):1045-1057 (in Chinese).
- 郭佳,吴艳锋,罗丽,等,2020. CINRAD-SA 偏振雷达定量降水估测算法改进及应用评估[J]. 气候与环境研究,25(3):305-319. Guo J, Wu Y F, Luo L, et al, 2020. Improvement of the quantitative precipitation estimation algorithm based on the CINRAD-SA polarization radar and its application evaluation[J]. Climatic Environ Res, 25(3):305-319(in Chinese).
- 国家防汛抗旱总指挥部,中华人民共和国水利部,2006—2017. 中国水旱灾害公报[M]. 北京:中国水利水电出版社. State Flood Control and Drought Relief Headquarters, The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2006—2017. China Flood and Drought Bulletin[M]. Beijing: China Water Power Press(in Chinese).
- 何爽爽,汪君,王会军,2018. 基于卫星降水和 WRF 预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究[J]. 大气科学,42(3):590-606. He S S, Wang J, Wang H J, 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):590-606(in Chinese).
- 滑申冰,宋宗朋,胡菊,等,2018. 多源降水信息在秦淮河流域洪水模拟中的应用[J]. 人民长江,49(12):10-15. Hua S B, Song Z P, Hu J, et al, 2018. Application of multi-source rainfall information in flood simulation of Qinhuai River Basin[J]. Yangtze River, 49(12):10-15(in Chinese).
- 金晓龙,邵华,邱源,等,2018. TRMM 卫星降水数据在天山山区的校正方法研究[J]. 气象,44(7):882-891. Jin X L, Shao H, Qiu Y, et al, 2018. Correction method of TRMM satellite precipitation data in Tianshan Mountains[J]. Meteor Mon, 44(7):882-891(in Chinese).
- 李麒嵩,张万昌,易路,等,2018. GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展,29(3):303-313. Li Q L, Zhang W C, Yi L, et al, 2018. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over mainland China[J]. Adv Water Sci, 29(3):303-313(in Chinese).

- 沈艳,潘畅,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]. Trans Atmos Sci, 36(1):37-46(in Chinese).
- 宋晓猛,张建业,占车生,等,2013. 基于 DEM 的数字流域特征提取研究进展[J]. 地理科学进展,32(1):31-40. Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al, 2013. Advances in digital watershed features extracting based on DEM[J]. Prog Geogr, 32(1):31-40(in Chinese).
- 孙帅,2018. CLDAS 长序列降水驱动数据的融合及 ASCAT 土壤湿度的陆面同化[D]. 南京:南京信息工程大学. Sun S, 2018. The merging of CLDAS long term precipitation forcing data and land surface data assimilation of ASCAT soil moisture[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 文明章,林昕,游立军,等,2013. 山洪灾害风险雨量评估方法研究[J]. 气象,39(10):1325-1330. Wen M Z, Lin X, You L J, et al, 2013. Risk rainfall assessment methods of flash floods disaster[J]. Meteor Mon, 39(10):1325-1330(in Chinese).
- 徐宾,师春香,姜立鹏,等,2015. 东亚多卫星集成降水业务系统[J]. 气象科技,43(6):1007-1014, 1069. Xu B, Shi C X, Jiang L P, et al, 2015. An android-based mobile meteorological information transmission and monitoring software[J]. Meteor Sci Technol, 43(6):1007-1014, 1069(in Chinese).
- 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,29(2):189-194. Xu S G, Niu Z, Shen Y, et al, 2014. A Research into the characters of CMORPH remote sensing precipitation error in China[J]. Remote Sens Technol Appl, 29(2):189-194(in Chinese).
- 燕亚菲,谈建国,崔林丽,等,2019. 利用葵花 8 号(Himawari-8)高时空分辨率的红外亮温资料估计台风莫兰蒂的短时强降水及其演变[J]. 气象,45(3):318-329. Yan Y F, Tan J G, Cui L L, et al, 2019. Estimating the short-time severe precipitation of Typhoon Meranti and its evolution by using the infrared brightness temperature data from Himawari-8 satellite with high spatiotemporal resolution[J]. Meteor Mon, 45(3):318-329(in Chinese).
- 宇婧婧,沈艳,潘畅,等,2015. 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,73(2):394-410. Yu J J, Shen Y, Pan Y, et al, 2015. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts[J]. Acta Meteor Sin, 73(2):394-410(in Chinese).
- 张昇祺,傅云飞,2018. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. 大气科学,42(1):33-51. Zhang A Q, Fu Y F, 2018. The structural characteristics of precipitation cases detected by dual-frequency radar of GPM satellite[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):33-51(in Chinese).
- 张天宇,桂术,杨若文,等,2020. TRMM 和 CMORPH 卫星资料对三峡库区降水的评估分析[J]. 气象,46(8):1098-1112. Zhang T Y, Gui S, Yang R W, et al, 2020. Assessment of precipitation in the three gorges reservoir area with TRMM and CMORPH satellite data[J]. Meteor Mon, 46(8):1098-1112(in Chinese).
- 张伊然,2018. 卫星降水数据的适用性研究及其径流模拟[D]. 武汉:华中科技大学. Zhang Y R, 2018. Applicability and runoff simulation of satellite precipitation data[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology(in Chinese).
- Arnault J, Wagner S, Rummeler T, et al, 2016. Role of runoff-infiltration partitioning and resolved overland flow on land-atmosphere feedbacks: a case study with the WRF-Hydro coupled modeling system for West Africa[J]. J Hydrometeorol, 17(5):1489-1516.
- Borga M, Stoffel M, Marchi L, et al, 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows[J]. J Hydrol, 518:194-205.
- De Coning E, 2013. Optimizing satellite-based precipitation estimation for nowcasting of rainfall and flash flood events over the south African Domain[J]. Remote Sens, 5(11):5702-5724.
- Doviak R J and Zrnic D S, 2006. Doppler Radar and Weather Observations[M]. Mineola: Dover Publications.
- Gochis D J, Barlage M, Dugger A, et al, 2018. The WRF-Hydro modeling system technical description, (Version 5. 0) [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research (NCAR).
- Gourley J J, Vieux B E, 2005. A method for evaluating the accuracy of quantitative precipitation estimates from a hydrologic modeling perspective[J]. J Hydrometeorol, 6(2):115-133.
- 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]. J Appl Meteor, 43(12):1834-1853.
- Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al, 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. J Hydrometeorol, 8(1):38-55.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al, 2004. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. J Hydrometeorol, 5(3):487-503.
- Kidd C, Huffman G, 2011. Global precipitation measurement[J]. Meteorol Appl, 18(3):334-353.
- Li Z, Yang D, Hong Y, 2012. The opportunities and challenges; statistical and Hydrological Evaluation of high-resolution multisensor blended global precipitation products over the Yangtze River Basin, China [C]. Washington DC: American Geophysical Union.
- Li Z, Yang D W, Hong Y, 2013. Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River[J]. J Hydrol, 500:157-169.
- Liu Y C, Liu J, Li C Z, et al, 2021. Parameter sensitivity analysis of the WRF-Hydro modeling system for streamflow simulation: a case study in semi-humid and semi-arid catchments of northern China[J]. Asia Pac J Atmos Sci, 57(2):451-466.
- Maddox R A, Zhang J, Gourley J J, et al, 2002. Weather radar coverage

- over the contiguous United States[J]. *Wea Forecasting*, 17(4): 927-934.
- Nelson B R, Prat O P, Seo D J, et al, 2016. Assessment and implications of NCEP Stage IV quantitative precipitation estimates for product intercomparisons[J]. *Wea Forecasting*, 31(2): 371-394.
- Reynolds D W, Smith E A, 1979. Detailed analysis of composited digital radar and satellite data[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 60(9): 1024-1037.
- Senatore A, Mendicino G, Gochis D J, et al, 2015. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 7(4): 1693-1715.
- Sharifi E, Steinacker R, Saghaian B, 2016. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: preliminary results[J]. *Remote Sens*, 8(2): 135.
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al, 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. *J Geophys Res Atmos*, 115(D2): D02114.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder: Center for Atmospheric Research (NCAR).
- Silver M, Karnieli A, Ginat H, et al, 2017. An innovative method for determining hydrological calibration parameters for the WRF-Hydro model in arid regions[J]. *Environ Modell Softw*, 91: 47-69.
- Sorooshian S, Agha Kouchak A, Arkin P, et al, 2011. Advanced concepts on remote sensing of precipitation at multiple scales[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 92(10): 1353-1357.
- Wang J, Wang H J, Hong Y, 2016. Comparison of satellite-estimated and model-forecasted rainfall data during a deadly debris-flow event in Zhouqu, Northwest China[J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 9(2): 139-145.
- Yucel I, Onen A, Yilmaz K K, et al, 2015. Calibration and evaluation of a flood forecasting system: utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall[J]. *J Hydrol*, 523: 49-66.
- Zeng Q L, Wang Y Q, Chen L F, et al, 2018. Inter-comparison and evaluation of remote sensing precipitation products over China from 2005 to 2013[J]. *Remote Sens*, 10(2): 168.
- Zhang Z X, Tian J C, Huang Y H, et al, 2019. Hydrologic evaluation of TRMM and GPM IMERG satellite-based precipitation in a humid basin of China[J]. *Remote Sens*, 11(4): 431.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al, 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. *J Climate*, 21(16): 3997-4010.