

文章编号:0559-9350(2017)10-1147-10

新一代GPM IMERG卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估

陈晓宏¹, 钟睿达^{1, 2}, 王兆礼^{2, 3}, 赖成光^{2, 3}, 陈家超^{2, 3}

(1. 中山大学 水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;

3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 新一代GPM(Global Precipitation Measurement)IMERG(Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)卫星遥感反演降水数据产品提供了覆盖范围更大、精度和时空分辨率更高的新的降水数据来源。本文以北江流域为例, 基于高精度融合降水数据产品定量评估了新一代准实时“early-run”和“late-run”IMERG产品(IMERG-E和IMERG-L)以及非实时后处理的“final-run”IMERG产品(IMERG-F)的精度, 并结合VIC(Variable Infiltration Capacity)分布式水文模型评估了该系列产品的水文效用。结果表明: (1)研究区域内非实时IMERG-F产品有着较高的精度, 网格尺度上日尺度相关系数为0.65, 相对偏差为5.87%, 优于上一代3B42-V7产品, 而准实时的IMERG-E及IMERG-L产品的日相关系数则为0.6左右, 精度同样令人满意; 流域平均尺度上各产品精度均进一步提高; (2)情景I(基于站点观测降雨数据率定模型)的水文模拟结果表明, 非实时IMERG-F产品表现出较好的水文效用, 纳西效率系数为0.622; 准实时的IMERG-E及IMERG-L产品虽总体上表现较差, 但在汛期表现较好, 说明该产品有应用于短期洪水预报的潜力; (3)情景II(基于3B42-V7数据率定模型)的结果表明, 各IMERG产品的水文模拟表现均有显著改善, 说明3B42历史数据适合在使用IMERG产品进行水文模拟时用于水文模型率定。

关键词: 卫星遥感降水数据; GPM IMERG; 水文效用; VIC水文模型; 北江流域**中图分类号:** TP79; P333**文献标识码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20170202

1 研究背景

高质量的降水数据在气象、水文和农业生产等领域起着至关重要的作用。雨量站点观测是传统的降水数据来源, 但由于雨量站点通常密度较小且分布不均, 难以准确反映降水的空间结构^[1-2], 难以满足高精度水文模拟等应用的需求。

近年来, 随着卫星遥感技术和数据反演算法的发展, 基于卫星遥感反演的降水定量观测(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)数据产品成为了新的降水数据来源。卫星QPE产品通常具有宽广的覆盖范围, 较高的时间和空间分辨率, 有效地弥补了传统雨量站点观测在空间分布上的缺陷, 并为降水资料缺乏地区提供了新的数据参考。目前已有一系列高精度QPE产品相继发布并对外开放, 如PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks)^[3]、CMORPH(Climatology Prediction Center Morphing Technique)^[4]、GSMaP(Global Satellite Map-

收稿日期: 2017-03-10; 网络出版日期: 2017-10-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171031.1644.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579105, 91547202); 广州市科技计划项目(201707010072); 广东省科技计划项目(2017A040405020)

作者简介: 陈晓宏(1963-), 男, 湖北公安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文与水资源研究。

E-mail: eesexh@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 王兆礼(1979-), 男, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: wangzhl@scut.edu.cn

ping of Precipitation)^[5]、TMPA(Tropical Rainfall Measurement Mission(TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis)^[6]以及GPM(Global Precipitation Measurement)^[7]等,并已被广泛用于水资源、旱涝灾害以及气候变化等领域的研究和应用中^[8-10]。

全球降水测量计划(即GPM, Global Precipitation Measurement Mission),是由美国国家宇航局(NASA)开展的,建立在热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM)基础上的卫星遥感降水测量计划,其目的是提供精度和分辨率更高的新一代准全球卫星遥感数据产品。相比上一代TRMM产品,GPM产品有着更大的覆盖范围(拓展至南北纬60°之间)和更高的时空分辨率,并增强了对微量和固态降水的探测能力,从而有效地提高了探测精度^[7]。GPM产品根据其所采用的数据反演算法分为4级。作为GPM的典型代表产品,3级IMERG(Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)^[11]产品被选为本文的研究对象,其可提供时间分辨率最高为逐半小时,空间分辨率为经纬度0.1°×0.1°的准全球尺度降水数据。而根据降水数据校准次数的由少到多,IMERG产品又细分为“early-run”、“late-run”以及“final-run”3个产品(此后分别用IMERG-E、IMERG-L和IMERG-F表示)。其中IMERG-E和IMERG-L产品为准实时产品,分别于观测后4 h和12 h后发布,分别提供2015年4月1日和3月14日以来的降水数据;而IMERG-F则为非实时后处理产品,其经过了地面雨量站点的逐月观测数据的偏差校准,因而具有较高的精度,通常于观测所在月份的两个半月后发布,可提供2014年3月12日以来的降水数据。当前已有研究表明^[12-15],在全国范围内IMERG产品相比上一代TMPA 3B42-V7产品在精度上有着较为显著的提高,反映了该产品在国内有广阔的应用前景。

到目前为止,对于上一代TMPA卫星降水产品,国内已在全国和区域/流域等尺度上开展了充分的评估和应用研究工作^[16-30],而对于新一代GPM IMERG产品,尤其是对于准实时的IMERG-E及IMERG-L产品及其水文效用的评估工作在国内外仍鲜有开展。另外,随着时空分辨率和时效性的进一步提高,经过改进的新一代准实时的IMERG产品或将拥有更大的水文预报潜力,因而对于其在中国南方湿润区的精度及水文效用的评估也具有重要的现实意义。因此,本文以位于珠江流域下游、地处中国南方亚热带湿润区的北江流域为研究区域,以上一代TMPA 3B42-V7(此后以3B42-V7表示)非实时卫星降水产品作为对照,评估新一代GPM IMERG系列产品的精度,并结合VIC(Variable Infiltration Capacity)分布式水文模型对其水文模拟效用进行评估,探讨其对地面站点观测数据的可替代性,从而为该产品在中国南方湿润区在水资源管理、灾害监测和水文预报等领域的应用提供参考依据。

2 研究区域、资料与方法

2.1 研究区域 北江是珠江的二级支流,多年平均年径流量427亿m³。北江流域位于珠江流域下游,广东省北部,介于东经112°6′至114°42′,北纬23°30′至25°42′之间,石角水文站以上集水面积为38 672 km²(见图1)。北江流域地表高程介于-2 m至1 876 m之间,地形以山地丘陵为主,其中北部喀斯特地貌占据了约30%的流域面积。该流域为典型的中国南方亚热带季风湿润区,年平均降水量达1 844 mm,其中约有80%的降水集中于汛期,历史上发生的洪涝灾害较为严重,直接威胁到了流域下游的珠江三角洲地区,因此选取该流域作为典型中国南方湿润地区代表,对新一代IMERG产品精度和水文效用的评估具有重要意义。

2.2 研究数据 本文收集了2014—2016年的IMERG系列产品数据及3B42-V7产品的逐日降水数据,其中准实时的IMERG-E及IMERG-L产品数据的开始时间分别为2015年4月1日和2015年3月14日,而非实时的IMERG-F产品数据的开始时间则为2014年3月12日。IMERG系列产品由美国国家宇航局NASA官网(pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm)下载,空间分辨率为0.1°×0.1°;3B42-V7数据同样源于NASA官网(pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm),空间分辨率为0.25°×0.25°,为方便评估,通过双线性插值得到与IMERG产品相同的空间分辨率。

作为评估的对比参考数据,收集了2014—2016年由 中国气象局研发和发布的CMPA(China

Merge Precipitation Analysis)

逐小时高分辨率栅格降水数据产品^[31]，并按IMERG和3B42-V7产品的测量时段相应累积到逐日尺度。该产品由全国范围内约20 000个自动气象站的实测降水数据与CMORPH卫星降水产品融合而成^[31]，空间分辨率与IMERG产品相同(0.1°×0.1°)。该融合产品所使用的站点网络在中国南方地区有着较高的密度，且实测数据都经过了严格的质量控制，

在本研究区域内具有较高的精度和可靠性，适合作为IMERG系列产品的评估对比参考。为评估水文效用，收集了北江流域石角水文站1999—2006年及2014—2016年的逐日流量观测数据，分别用于VIC水文模型的率定和IMERG系列产品的水文效用评估。另外，由于CMPA产品仅提供2008年以来的降水数据，故还收集了来自研究区域及其周边的44个雨量站点的1998—2006年的逐日降水数据用于水文模型的率定。水文模拟所需的气温、风速等其他气象驱动数据则来自流域周边的气象站点，由中国气象局官网(data.cma.cn)提供。

2.3 精度评估指标 为对IMERG产品精度及水文效用进行定量评估，本文采用的统计评估指标如下：皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient, CC)用于衡量卫星QPE产品的精度及其与对比参考数据的一致性；平均误差(Mean Error, ME)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和相对偏差(Relative Bias, BIAS)则用于衡量卫星QPE产品的绝对和相对误差；探测率(Probability of Detection, POD)和假报率(False Alarm Ratio, FAR)用于衡量QPE产品对降水事件的探测能力；纳西效率系数(Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency, NSCE)^[32]则用于评估QPE产品的水文模拟的精度。各精度评估指标计算公式如下：

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$POD = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{10}} \quad (5)$$

$$FAR = \frac{n_{01}}{n_{11} + n_{01}} \quad (6)$$

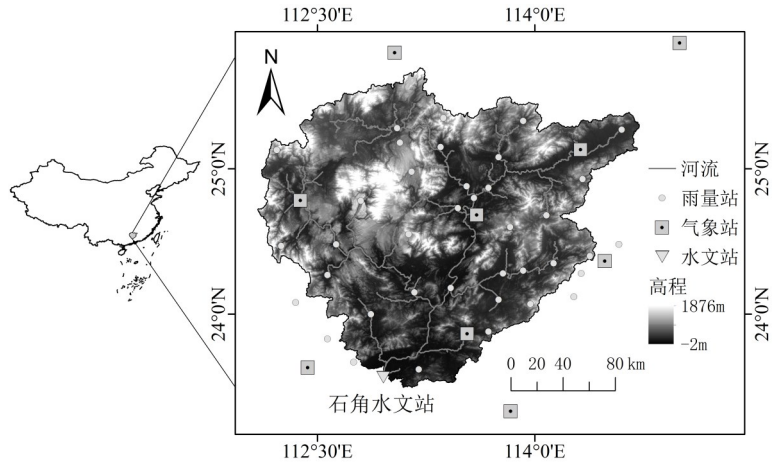


图1 北江流域概况图

$$NSCE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

式中： S_i 、 O_i 分别为待评估序列及参考序列； $\bar{S}$ 、 $\bar{O}$ 分别为待评估及参数序列均值； n_{11} 为QPE产品数据及参考数据均探测到有雨的天数； n_{10} 为参考数据探测到有雨而QPE产品探测到无雨的天数； n_{01} 为参考数据探测到无雨而QPE产品探测到有雨的天数。

2.4 VIC水文模型 VIC(Variable Infiltration Capacity)水文模型^[33]是一个基于网格的大尺度分布式水文模型，能够基于水量和能量平衡模拟陆面过程，并能考虑网格内不同土地覆盖类型的影响，具有较好的模拟效果。由于该模型仅进行产流的模拟，故还需耦合Lohmann^[34]等研发的汇流模型进行汇流计算。目前VIC模型已被多次用于卫星降水产品的水文效用评估^[1,20-21]，并且已有研究表明该模型对北江流域有着较好的适应性^[35]，因此适合在本研究区域用于IMERG系列产品的水文模拟效用评估。目前该模型已更新到VIC5.0版本(vic.readthedocs.io/en/master/)。

本文在北江流域建立了网格尺寸为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的VIC模型，格网与IMERG产品一致。模型的土壤参数来自联合国粮农组织(FAO)发布的HWSD(Harmonized World Soil Database)土壤数据库^[36]，并经由Saxton等^[37]提出的土壤转换公式换算为VIC模型所需的土壤水力参数；土地覆盖参数来自美国马里兰大学发布的全球1km分辨率的土地覆盖类型数据^[38]。模型所需的除降水外的气象驱动数据来自于流域周边的气象站点，并由反距离权重法(IDW)插值到每个VIC模型的格网中。

3 结果与讨论

3.1 IMERG产品的统计精度评估 在网格尺度、网格累积尺度和流域平均尺度上对2014—2016年间的3种IMERG产品以及3B42-V7产品分别基于CMPA数据计算了日尺度的各评估指标。网格尺度评估为对各网格的产品数据各自进行评估，网格累积尺度评估为将所有网格的数据视为同一序列进行评估，而流域平均尺度评估则为将各产品在空间上按网格面积加权平均成为流域平均值序列后进行评估。由于流域平均尺度与网格累积尺度存在相同的ME和BIAS值，故在流域平均尺度上仅计算了CC和RMSE指标。4种QPE产品各网格的精度评估指标箱线图见图2。图2中，箱形的上、下边界分别为上、下四分位数对应位置，箱中水平实线为中位数对应位置，水平虚线为平均值对应位置；箱外竖直实线末端的两条水平实线分别对应最大和最小值位置，水平实线外的散点则为离群值位置。各产品网格累积尺度及流域平均尺度的各精度评估指标值则见表1。

结果表明，在网格尺度上，非实时的IMERG-F产品表现出了较高的精度，且略优于上一代3B42-V7产品，其CC值达到0.65，BIAS则为5.87%，低于3B42-V7。对于准实时产品，IMERG-E和IMERG-L的精度虽略低于IMERG-F，但其CC均为0.6左右，RMSE为15.6 mm左右，BIAS均在5%以下，表明其精度同样较为令人满意。而在流域平均尺度上，4种QPE产品的精度相比网格尺度均有了显著提高，RMSE均显著降低。另外由4种产品各精度指标分布的箱线图(图2)可知，准实时的IMERG-E及IMERG-L产品的ME及RMSE均有较非实时产品更大的分布范围，其中ME的分布范围大致为 $-2 \sim 2.5$ mm/d，RMSE为13~20 mm/d，表明准实时IMERG产品的不确定性相对较高，可靠性或相对较低。

对于各QPE产品的降水事件探测能力，根据表1，IMERG系列产品的POD显著高于上一代3B42-V7产品，其中准实时的IMERG-E及IMERG-L产品的POD达0.74，而3B42-V7产品的POD仅为0.54。然而，IMERG系列产品的FAR也明显高于上一代3B42-V7产品，达0.2左右，表明GPM虽较上一代TRMM有效地提高了降水探测能力，但其探测降水事件的敏感性还需进一步调整。

3.2 IMERG产品的水文效用评估 IMERG系列产品的精度评估表明，新一代非实时IMERG-F产品有着与上一代3B42-V7相当的精度，水文模拟潜力较大；而准实时的IMERG-E及IMERG-L产品虽

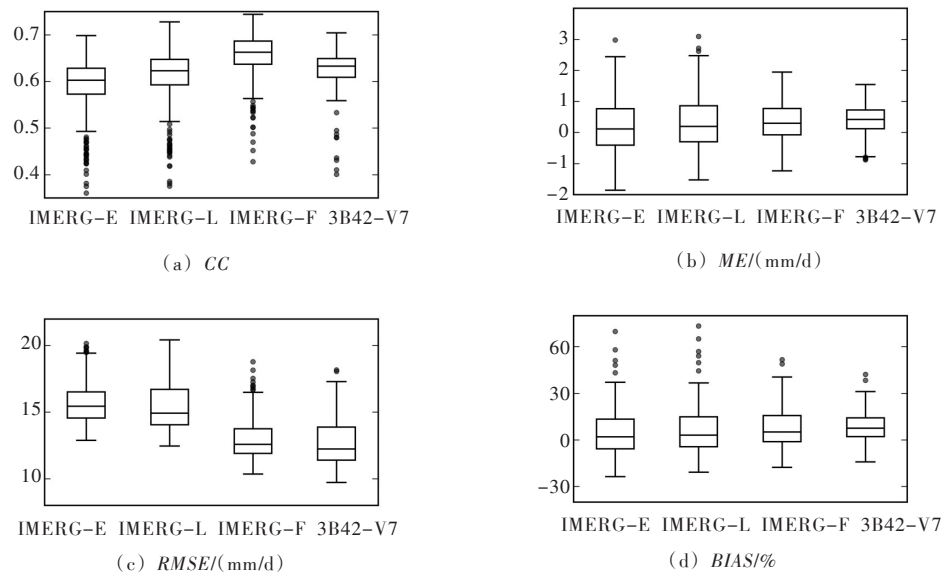


图2 4种卫星QPE产品各精度评估指标箱线图

表1 4种QPE产品在网格累积尺度及流域平均尺度下各精度评估指标值

卫星QPE产品	网格累积尺度						流域平均尺度	
	<i>CC</i>	<i>ME/mm</i>	<i>RMSE/mm</i>	<i>BIAS/%</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>CC</i>	<i>RMSE/mm</i>
IMERG-E	0.58	0.16	15.69	2.58	0.74	0.21	0.73	10.49
IMERG-L	0.60	0.26	15.59	4.14	0.74	0.20	0.75	10.29
IMERG-F	0.65	0.33	13.00	5.87	0.70	0.18	0.78	8.39
3B42-V7	0.62	0.40	12.72	7.53	0.54	0.11	0.75	8.76

精度相比较低,但其总体上精度同样令人满意,故这两种产品也应有一定的水文模拟潜力。本节的水文模拟效用评估在两种假设情景下进行:情景I,以1999—2006年作为率定期,2014—2016年为验证期,使用1999—2006年的地面雨量站点观测数据率定VIC模型的参数,并由CMPA及4种卫星QPE产品分别使用率定后的模型参数进行水文模拟并比较模拟结果,该情景代表使用雨量站点数据率定模型并使用卫星QPE产品进行水文模拟的情况;情景II,在与情景I相同的率定期内使用3B42-V7数据重新率定模型参数,并由各卫星QPE产品使用率定后参数在相同的验证期进行水文模拟,该情景代表在缺乏降水资料的流域利用已有多年观测历史的TMPA产品率定模型并使用IMERG产品进行水文模拟的情况。本文所使用的雨量站点数据与文献[30, 35]中相同,基于该套雨量站点数据对VIC模型在北江流域的适用性的验证也已在该研究中进行并得到证实,因而本文中不再重复。

鉴于VIC模型通常需要提前进行预运行以初始化模型土壤参数^[33],本文以1998年作为VIC模型率定期的“启动期”,而验证期则在各QPE产品的有效期前插补一年的CMPA数据用于模型的预运行。

3.2.1 情景I结果分析 首先,由44个雨量站点的雨量观测数据在率定期(1999—2006年)内率定VIC模型,并由CMPA数据在验证期(2014—2016年)进行水文模拟验证,模型的率定结果如表2所示,而CMPA及4种QPE在验证期的水文模拟结果如表2及图3所示。由表2和图3(a)可知,基于地面雨量站点率定的VIC模型在率定期和验证期均呈现较理想的效果,其中率定期的日尺度 $NSCE$ 达0.864,偏差接近于0,而验证期的 $NSCE$ 则达0.869, $BIAS$ 仅为-1.41%。即便两个时期存在7年的时间间隔,VIC模型依然保持了较高的模拟精度,进一步表明该模型适合用于评估IMERG系列产品的水文效用。

4种卫星QPE产品的水文模拟结果(图3(b—e))表明,总体上非实时IMERG-F产品的水文模拟结果最优, $NSCE$ 为0.622, $BIAS$ 较大,达14.24%,与CMPA的模拟结果相比存在较大差距,但由图3(d)可知该产品的模拟径流与实测径流基本吻合,对枯水期的模拟效果较好,能够较为准确地重现洪峰的发生时间,其较低的 $NSCE$ 值或由其其对2016年2月和3月的局部洪峰流量的高估导致。而同为非

表2 两种情景下各QPE产品率定期及验证期水文模拟结果比较

时期	降水产品	情景 I		情景 II	
		<i>NSCE</i>	<i>BIAS</i> /%	<i>NSCE</i>	<i>BIAS</i> /%
率定期(1999—2006年)		0.864	0.00	0.785	0.46
验证期 (2014—2016年)	CPMA	0.854	3.44		
	IMERG-E	0.401	13.12	0.466	8.98
	IMERG-E(2015年5—9月)	0.750	1.10	0.764	-6.69
	IMERG-L	0.356	15.68	0.442	11.34
	IMERG-L(2015年5—9月)	0.733	4.73	0.773	-2.67
	IMERG-F	0.622	14.24	0.651	14.99
	3B42-V7	0.547	17.52	0.608	13.24

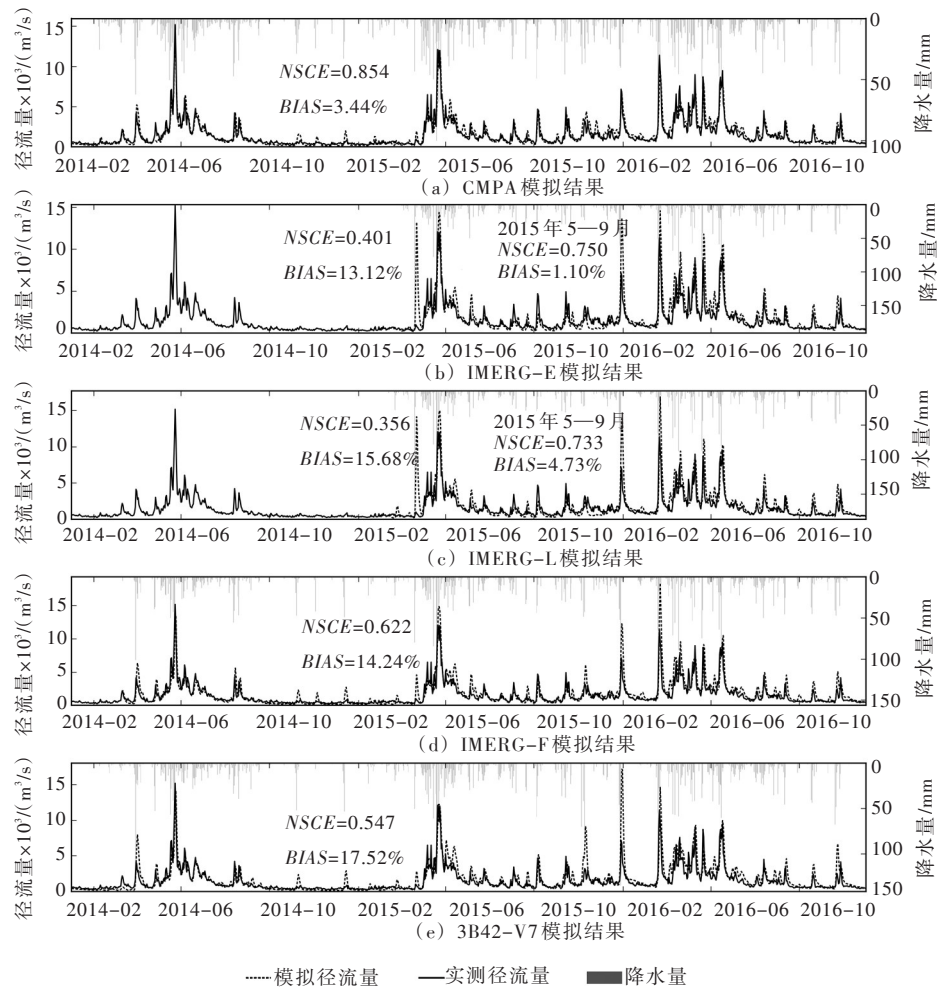


图3 CMPA及4个卫星QPE产品验证期水文模拟结果

实时产品的3B42-V7产品的模拟结果则相对略差， $NSCE$ 为0.547。综上，非实时的IMERG-F产品在中国南方湿润地区的水文效用较好，且偏差处于可接受范围内，可用于流域水资源管理、干旱监测等应用，并在一定程度上可替代地面雨量站观测数据。

相比之下，准实时的IMERG-E和IMERG-L产品总体上模拟结果较差， $NSCE$ 值为0.4左右，但由图3(b)—(c)可发现这两个产品在2015年的汛期(5—9月)及2016年4月以后的模拟径流与实测径流吻合较好，且较准确地捕捉到了2015年5—6月的洪峰，故其较低的 $NSCE$ 或是由于其对2015年4月流量及2016年2月和3月洪峰流量的严重高估以及对2015年10—12月流量的低估所致，而这些估

计偏差又或是由该两个产品自身对降水量的估计偏差导致。为进一步探究这两种准实时产品在汛期水文效用,以2015年汛期(5—9月)为例,进一步计算了其于该时期内的 $NSCE$ 和 $BIAS$,结果表明,在2015年的汛期内,IMERG-E及IMERG-L的 $NSCE$ 要显著高于其完整模拟时段(2015年4月—2016年12月),分别达0.750和0.733, $BIAS$ 也明显更低,分别为1.1%和4.73%。该结果表明准实时的IMERG产品在汛期或将有着良好的水文效用,因而对短期洪水预报等实时应用存在较大的应用潜力。另外,鉴于本文准实时产品的研究时段较短,不确定性较大,故暂且可认为两种准实时IMERG产品的精度和水文效用相当,IMERG-L相对IMERG-E并无显著改进,因而在实际应用中时效性更高的IMERG-E产品(观测4 h后发布)应当优先考虑。

3.2.2 情景II结果分析 情景II下VIC模型率定结果以及各卫星QPE产品水文模拟结果各精度指标见表2。结果表明,虽在率定期内VIC模型的模拟结果明显差于情景I,但在验证期内,4种QPE产品的模拟结果均较情景I有了较明显的改善。非实时IMERG-F产品的 $NSCE$ 提高到0.65,上一代3B42-V7产品的 $NSCE$ 和 $BIAS$ 也有相应的提高和降低。对于2015年的汛期(5—9月),准实时的IMERG-E与IMERG-L产品的 $NSCE$ 也分别提高到0.764和0.773。考虑到GPM计划建立在TRMM的基础上,两代产品有着相似的降水时空模式,因而情景II下各产品模拟精度的提高或是因为一方面情景I中用于模型率定的雨量站点分布较为稀疏,空间代表性较差,而另一方面经由3B42-V7数据率定后VIC模型能更加适应IMERG产品的时空结构,从而一定程度上提高了模拟效果。以上结果表明,在使用IMERG产品进行水文模拟时,TMPA的历史数据适合替代雨量站点数据用于水文模型的率定。

3.3 讨论 目前为止,对于新一代IMERG产品在国内应用的评估研究虽仍较少,但一定程度上仍可与本研究作对比参考。Tang等^[14]在全国及流域尺度对IMERG-F产品及上一代TMPA 3B42V7两种非实时卫星QPE产品进行了评估和对比,发现新一代的IMERG-F产品总体上精度略高于上一代3B42V7产品;Guo等^[39]在全国和区域尺度对比分析了非实时和准实时的IMERG产品及非实时的3B42V7产品的性能,同样发现在南方地区非实时的IMERG产品性能与3B42V7产品相当,而准实时的IMERG产品则精度相对较差。对于水文效用方面,Tang等^[15]在与本流域相邻的赣江流域对比评估了非实时的IMERG-F产品和3B42V7产品以及准实时的3B42RTV7产品的水文模拟表现,发现IMERG-F产品的水文效用较上一代3B42V7产品有较明显的改善。结合本文的研究结果可知,新一代非实时的IMERG产品有着较上一代3B42V7产品相当或更高的性能,凭借其更高的时空分辨率,在中国范围内尤其是中国南方地区有着广阔的应用前景。

对于新一代准实时的IMERG产品的水文效用评估研究,目前尚未有报道,但对于上一代TMPA产品及其他准实时卫星QPE产品的研究则已有较多开展,可作为本文参考。唐国强等^[29]及Jiang等^[17]分别在同属中国南方湿润区的赣江流域及洮河流域评估了准实时的3B42RTV7产品和3B42RTV6-CMORPH融合产品的水文模拟效用,发现准实时的卫星QPE产品均有一定的水文实时模拟和预报前景,与本文结果相似,表明准实时的IMERG产品在该地区或同样拥有较大的洪水预报潜力;而Yong等^[1]和Tong等^[21]分别对位于高纬度地区的老哈河流域和高海拔的青藏高原地区的研究发现准实时的3B42RTV6和V7产品在当地均有着相当差的水文模拟表现,说明准实时的卫星QPE产品受气候和地形因素影响较大,本文的结果可能不适用于这两类地区。综上,新一代准实时的IMERG产品在中国南方地区有着较好的洪水预报前景,而鉴于本文水文模拟时期较短,具有一定的不确定性,对于IMERG产品的洪水预报性能评估还有待进一步研究。

4 结论

以北江流域为例,定量评估了准实时IMERG-E、IMERG-L及非实时IMERG-F产品的精度,并结合VIC分布式水文模型进一步评估了该系列产品的水文效用,主要研究结论如下:(1)在网格尺度上,非实时的IMERG-F产品精度与上一代3B42-V7产品相当,具有较高的相关系数(0.65)和较低的偏差(5.87%),而准实时的IMERG-E和IMERG-L产品虽精度略差于实时产品(相关系数约为0.6),

但其精度同样较为令人满意,其中IMERG-L精度略优于IMERG-E。在流域平均尺度上,4种产品的精度均相比网格尺度有了显著提高,误差明显降低。(2)在对降水事件的探测能力方面,IMERG系列产品的探测率(POD)均显著高于上一代3B42-V7产品,说明GPM相对上一代TRMM显著改善了其产品对降水事件的探测能力;IMERG系列产品的假报率(FAR)则明显高于上一代3B42-V7产品,说明GPM产品探测降水事件的敏感性有待进一步调整。(3)情景I的水文模拟结果表明,新一代非实时IMERG-F产品的水文模拟表现优于上一代3B42-V7产品,总体上对流量过程的模拟较好,表明其在流域水资源规划、灾害监测等领域中有着较大的应用潜力,并且可在一定程度上替代地面雨量站点观测数据;准实时IMERG-E及IMERG-L产品虽在整个模拟时段内总体表现较差,但在汛期(2015年5—9月)内表现较好,并能较为准确地捕捉5—6月的洪峰,表明这两种产品有较大应用于短期实时洪水预报的潜力。IMERG-L的水文效用与IMERG-E无显著差异,故实际应用中推荐优先选用时效性更强的IMERG-E产品。(4)情景II的水文模拟结果表明,VIC模型经3B42-V7数据率定后,4种产品的水文模拟表现均有所提高,说明在缺资料地区使用IMERG系列产品进行水文模拟时,TMPA 3B42历史数据适合取代地面雨量站点观测数据用于水文模型率定。

参 考 文 献:

- [1] YONG B, REN L L, HONG Y, et al . Hydrologic evaluation of Multisatellite Precipitation Analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China[J] . Water Resources Research, 2010, 46(7): 759-768 .
- [2] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等 . 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J] . 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615 .
- [3] HSU K . Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks[J] . Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(9): 1176-1190 .
- [4] JOYCE R J, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al . CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J] . Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 287-296 .
- [5] USHIO T, SASASHIGE K, KUBOTA T, et al . A kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data[J] . Journal of the Meteorological Society of Japan, 2009, 87(3): 137-151 .
- [6] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, NELKIN E J, et al . The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) : Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J] . Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55 .
- [7] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al . The global precipitation measurement mission[J] . Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(5): 701-722 .
- [8] SAHOO A K, SHEFFIELD J, PAN M, et al . Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought[J] . Remote Sensing of Environment, 2015, 159: 181-193 .
- [9] LIEW S C, CHIA A S, KWONG L K . Spatio-temporal analysis of climate change parameters using satellite data for the southeast Asian region [C]//34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring, 2011 .
- [10] PRAT O P, NELSON B R . Mapping the world's tropical cyclone rainfall contribution over land using the TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis[J] . Water Resources Research, 2013, 49(11): 7236-7254 .
- [11] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, BRAITHWAITE D, et al . Developing the integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)[J] . Acta Paulista De Enfermagem, 2012, 25(1): 146-150 .
- [12] GUO H, CHEN S, BAO A, et al . Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China[J] . Atmospheric Research, 2016, 176/177: 121-133 .
- [13] LI N, TANG G, ZHAO P, et al . Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipi-

- p>
tation analysis IMERG in Ganjiang River Basin[J]. Atmospheric Research, 2016, 183: 212–223 .
- [14] TANG G, MA Y, LONG D, et al . Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J] . Journal of Hydrology, 2015, 533: 152–167 .
 - [15] TANG G, ZENG Z, LONG D, et al . Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a midlatitude basin: Is Day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7?[J] . Journal of Hydro-meteorology, 2015, 17(1): 121–137 .
 - [16] HU Q F, YANG D W, WANG Y T, et al . Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin[J] . Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 853–865 .
 - [17] JIANG S, REN L, HONG Y, et al . Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method[J] . Journal of Hydrology, 2012, 452/453(10): 213–225 .
 - [18] LI X H, ZHANG Q, XU C Y . Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin [J] . Journal of Hydrology, 2012, 426–427(7): 28–38 .
 - [19] MENG J, LI L, HAO Z, et al . Suitability of TRMM satellite rainfall in driving a distributed hydrological model in the source region of Yellow River[J] . Journal of Hydrology, 2014, 509(2): 320–332 .
 - [20] SUN R, YUAN H, LIU X, et al . Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River Basin[J] . Journal of Hydrology, 2016, 536: 302–319 .
 - [21] TONG K, SU F, YANG D, et al . Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau[J] . Journal of Hydrology, 2014, 519: 423–437 .
 - [22] YONG B, CHEN B, GOURLEY J J, et al . Intercomparison of the Version-6 and Version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: Is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes?[J] . Journal of Hydrology, 2014, 508(2): 77–87 .
 - [23] ZHAO H, YANG S, WANG Z, et al . Evaluating the suitability of TRMM satellite rainfall data for hydrological simulation using a distributed hydrological model in the Weihe River catchment in China[J] . Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(2): 177–195 .
 - [24] ZENG H, LIJUAN L I, JIUYI L I . The evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin[J] . Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2): 273–282 .
 - [25] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等 . 赣江流域 TRMM 降水数据的误差特征与成因[J] . 水科学进展, 2013, 24(6): 794–800 .
 - [26] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等 . TRMM 卫星降水数据在洮水流域径流模拟中的应用[J] . 水科学进展, 2014, 25(5): 641–649 .
 - [27] 刘少华, 严登华, 王浩, 等 . 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J] . 水科学进展, 2016, 27(5): 639–651 .
 - [28] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等 . TMPA 卫星降水数据的评估与校正[J] . 水利学报, 2014, 45(10): 1135–1146 .
 - [29] 唐国强, 李哲, 薛显武, 等 . 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J] . 水科学进展, 2015, 26(3): 340–346 .
 - [30] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等 . TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例[J] . 水科学进展, 2017, 28(2): 1–11 .
 - [31] SHEN Y, ZHAO P, PAN Y, et al . A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J] . Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(6): 3063–3075 .
 - [32] NASH J E, SUTCLIFFE J V . River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles [J] . Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282–290 .
 - [33] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al . A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J] . Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(7): 14415–14428 .

- [34] LOHMANN D, Nolte-Holube R, RASCHKE E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes [J]. *Tellus Series A-dynamic Meteorology & Oceanography*, 2002, 48 (5): 708–721.
- [35] WU C, HUANG G, YU H, et al. Impact of climate change on reservoir flood control in the upstream area of the Beijiang River Basin, South China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(6): 2203–2218.
- [36] FAO. Harmonized World Soil Database[M]. FAO Land & Water Digital Media, 2009.
- [37] SEXTON K E, RAWLS W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569–1578.
- [38] HANSEN M C, DEFRIES R S, TOWNSHEND J R G, et al. Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier. *Int J Rem Sens*[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21 (6/7): 1331–1364.
- [39] GUO H, CHEN S, BAO A, et al. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 176/177: 121–133.

Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China

CHEN Xiaohong¹, ZHONG Ruida^{1, 2}, WANG Zhaoli^{2, 3}, LAI Chengguang^{2, 3}, CHEN Jiachao^{2, 3}

(1. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Latest-generation GPM (Global Precipitation Measurement) IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) satellite-based precipitation quantitative estimation products provide a new source of precipitation data. This study evaluates the accuracy and performance of the near-real-time “early run” and “late run” IMERG products (here after IMERG-E and IMERG-L) and the post-real-time “final run” IMERG product (here after IMERG-F) and evaluates the hydrological performance of the three IMERG products with the VIC (Variable Infiltration Capacity) distributed hydrological model during 2014–2016 over the Beijiang River Basin, a mid-size basin in South China. The results show that: (1) The post-real-time IMERG-F product presents acceptable accuracy over the study area, with relatively high daily CC (correlation coefficient) of 0.65 at the gridcell scale, relatively low BIAS (relative bias) of 5.87%, while the accuracy of the near-real-time IMERG-E and IMERG-L products is relatively poorer but is still satisfactory, with CCs of approximately 0.6; performances of the 3 products are apparently improved at the basin scale. (2) Under the scenario I (VIC model calibrated by gauge data) in the hydrological simulation evaluation, post-real-time IMERG-F product presents satisfactory hydrological performance, with high NSCE (Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency) of 0.622; by comparison, near-real-time IMERG-E and IMERG-L present poorer hydrological performance, but perform well specially during the flood season (May to September) of 2015, indicating that the potential for the flood forecasting of the near-real-time IMERG products; (3) Under the scenario II (model recalibrated by the TMPA 3B42-V7 data), hydrological performances of the three IMERG products are all significantly improved, indicating that the 3B42 data is suitable for the model calibration when simulating with the IMERG products.

Keywords: satellite-based precipitation product; GPM IMERG; hydrological utility; VIC hydrological model; Beijiang River Basin

(责任编辑: 王成丽)