

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0112

张金男,周惠成,吴剑,等. 卫星遥感降雨数据在嫩江石灰窑以上流域洪水预报中的可利用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1093-1103. ZHANG J N,ZHOU H C,WU J,et al. Availability of satellite remote sensing dataset for Shihuiyao basin of Nenjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1093-1103. (in Chinese)

卫星遥感降雨数据在嫩江石灰窑以上流域 洪水预报中的可利用性

张金男,周惠成,吴剑,王浅宁,魏国振,彭勇

(大连理工大学水利工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:依据洪水预报对降雨数据时效性要求较高的特点,选取 GSMaP_NRT 和 GSMaP_Gauge_NRT 准实时卫星遥感全球降雨产品对嫩江上游石灰窑以上流域进行补充,旨在解决该流域内降雨资料不足的问题。基于流域内及边缘降雨数据评估 2 种产品在雨量站所在网格上的精度,并输入新安江模型进行洪水预报,验证其可利用性。在汛期的月和日尺度上,GSMaP_NRT 和 GSMaP_Gauge_NRT 产品表现出较高的精度,GSMaP_Gauge_NRT 产品的精度总体优于 GSMaP_NRT 产品,但均存在高估现象。同时设计 3 种洪水预报输入方案进行应用检验,分别为方案 I(流域内及边缘雨量站泰森多边形权重降雨)、方案 II(流域内 GSMaP_NRT 栅格降雨均值)、方案 III(流域内 GSMaP_Gauge_NRT 栅格降雨均值)。洪水预报结果表明,方案 III 的预报效果最好,产汇流合格率较高,表明 GSMaP_Gauge_NRT 准实时降雨产品在洪水预报中具有较高的可利用性。

关键词:GSMaP 卫星降雨产品;精度评价;石灰窑以上流域;新安江模型;洪水预报

中图分类号:TV121;P332 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



降水是地球系统中最重要参数之一,降水分布及其变化是进行水循环建模、维持生态环境、农业生产、提高天气预报精度以及洪水预警等的重要数据^[1]。目前,降雨数据的获取方式分为 3 种,包括地面测站观测、雷达观测和卫星遥感监测^[2-4]。其中:地面观测降雨数据精度较高,但测站的设立受地理条件影响较大,在站网密度较稀的区域,观测数据代表性较差,且为点数据,无法准确反映降雨空间分布;雷达估测降水产品,时效高,时空分辨率高,但雷达探测时易受雷达波衰减、复杂地形遮挡的影响,造成其覆盖范围有限^[2];卫星遥感监测具有探测范围广、可以反映降雨空间分布、不受复杂地面空间条件的制约等优点,为研究各区域尺度降水提供高时空分辨率的数据支撑^[3-4]。

目前,常见的卫星遥感全球降雨数据集包括 CMORPH、PERSIANN、GSMaP、IMERG 等^[5-9],基本信息统计见表 1。遥感降雨数据的应用按需求主要分为两方面,一类是水资源模拟,一类是洪水预报。水资源模拟研究对产品的实时性要求不高,可利用产品较多;洪水预报研究对产品实时性要求较高,可利用产品较少^[10],多数为各数据集的实时或准实时版本产品,如 GSMaP 数据集的 GSMaP_NRT 和 GSMaP_Gauge_NRT 产品、IMERG 数据集的 IMERG_Early 和 IMERG_Late 产品等。

全球降水量测量计划 GPM(2014 年 3 月)是继热带降水测量计划 TRMM(1997 年 11 月—2015 年 4 月)之后的新一代全球降雨测量计划^[11]。GPM

收稿日期:2021-02-11 修回日期:2021-08-14 网络出版时间:2021-08-17

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210817.1342.003.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400903)

作者简介:张金男(1996—),男,辽宁锦州人,主要从事水文预报研究。E-mail:zhangjinnan001@163.com

通信作者:周惠成(1958—),男,吉林农安人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:hczhou@dlut.edu.cn

扩展了 TRMM 传感载荷,提升了对微量降雨和固态降水观测能力及观测覆盖范围。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)发布的 GSMaP 全球遥感降雨数据集是 GPM 时代最主流的数据集之一^[12]。截至目前,国内外针对 GSMaP 数据在各区域的精度开展了众

多研究,包括长江流域^[13]、青藏高原^[14]、湖南省^[12]、四川省^[15]以及日本九州岛^[16]和熊本县^[17]等,但关于 GSMaP 数据在洪水预报中的可利用性研究较少,而洪水预报是降雨数据最为重要的应用方向之一,研究其在洪水预报中的可利用性有重要意义。

表 1 常见卫星遥感全球降雨产品汇总

Tab. 1 Summary of common global satellite precipitation products

数据集	产品名称	空间分辨率	时间分辨率	时滞	起止时间	纬度覆盖范围	发布机构
CMORPH	CMORPH-CRT	0.25°/(8 km)	3 h/1 d/(30 min)	—	1998 年 1 月—	60°N~60°S	NOAA-CPC/USA
	CMORPH-BLD	0.25°	1 d	—	1998 年 1 月—	90°N~90°S	
PERSIANN	PERSIANN	0.25°	1,3,6 h/1 d	2 d	2000 年 3 月—	60°N~60°S	UCI,CHRS/USA
	PERSIANN-CCS	0.04°	1,3,6 h/1 d	2 d	2003 年 1 月—	60°N~60°S	
	PERSIANN-CDR	0.25°	1 d/1 月/1 a	—	1983 年 1 月—	60°N~60°S	
GSMaP	GSMaP_NOW/ GSMaP_Gauge_NOW	0.1°	1 h	0	2019 年 6 月 27 日—	60°N~60°S	JAXA/Japan
	GSMaP_NRT/ GSMaP_Gauge_NRT	0.1°/0.25°	1 h/1 d/1 月	4 h	2000 年 3 月—	60°N~60°S	
	GSMaP_MVK	0.1°	1 h/1 d/1 月	3 d	2014 年 3 月—	60°N~60°S	
	GSMaP_RNL/ GSMaP_Gauge_RNL	0.1°	1 h/1 d/1 月	3 d	2000 年 3 月— 2014 年 2 月	60°N~60°S	
	GSMaP_Gauge	0.1°	1 h/1 d/1 月	—	2014 年 3 月 1 日—	60°N~60°S	
IMERG	IMERG_Early	0.1°	30 min/1 d	4 h	2000 年 6 月—	90°N~90°S	NASA/USA
	IMERG_Late	0.1°	30 min/1 d	12 h	2000 年 6 月—	90°N~90°S	
	IMERG_Final	0.1°	30 min/1 d	3.5 月	2000 年 6 月—	90°N~90°S	

注:表中 GSMaP 为 v6 版本;IMERG 为 Level 3 版本;“—”表示后处理产品;时滞指产品发布时间与实际观测时间的间隔;60°N~60°S 表示纬度覆盖范围从北纬 60 度到南纬 60 度。

石灰窑以上流域控制面积为 17 205 km²,流域内及边缘雨量站较少,降雨数据不足,属于降雨资料短缺流域。使用现有降雨资料难以准确预报流域出口断面的洪水过程,给下游河道防洪及尼尔基水库防洪预报调度带来一定困难。针对上述情况,选取 GSMaP 全球遥感降雨数据集的准实时产品 GSMaP_NRT 和 GSMaP_Gauge_NRT(简称 GSMaP_G_NRT)对降雨数据进行补充,使用流域内及边缘雨量站降雨数据评估 2 种产品的精度,并结合新安江模型验证其在洪水预报中的可利用性,以期提高该流域的洪水预报精度、下游河道防洪及尼尔基水库防洪预报调度水平。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区概况

石灰窑以上流域位于嫩江流域上游,见图 1,介于东经 124.3°~126.5°、北纬 50°~51.7°。流域存在 3 条主要河流,分别为嫩江干流、古里河、那都

里河,是尼尔基水库以上流域的主要雨区之一,汇流时间为 2~3 d。石灰窑以上流域洪水预报准确性关系到尼尔基水库下游主要防护目标齐齐哈尔市的防洪安全,但流域的水文测站密度较稀,流域内及边缘附近只有 6 个测站,属于降雨资料缺乏地区。选择该区域作为评估卫星遥感降雨产品可利用性的研究对象,研究结果可较好反映遥感降雨产品在我国北部流域的可利用性,并且对提高北部降雨资料短缺流域的洪水预报精度具有较大的现实意义。按 0.25°×0.25°栅格(约 20 km×20 km)进行划分,石灰窑以上流域占 49 个栅格。

1.2 数据源

根据洪水预报实时性强的特点,选取 GSMaP 系列产品中的准实时产品 GSMaP_NRT 及其经过地面校正产品 GSMaP_G_NRT 在石灰窑以上流域进行可利用性分析,2 种产品的空间分辨率为 0.25°栅格,时间分辨率为 1 d,在观测 4 h 后发布,数据时段为 2000 年 3 月至今,可以通过 JAXA 全球降雨监

测网站(<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>)访问获取。准实时系列产品 GSMaP_NRT 和 GSMaP_G_NRT 的数据源包括 TRMM 卫星 TMI、Aqua 卫星 AMSR-E、DMSP 系列卫星 SSM/I 等传感器探测的无源微波遥感数据,日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)的 MTSAT-1R、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric, NOAA)的 GOES-E 和 GOES-W、欧洲气象卫星应用组织(European Organisation for the Exploitation of

Meteorological Satellites, EOMETSAT)的 Meteosat-8 和 Meteosat-5 等地球同步卫星探测的红外遥感数据、日本宇宙航空研究开发机构 JAXA 的 TRMM 和 GPM Core Observatory 星载测雨雷达探测的降雨数据等,核心算法包括 PMW(passive microwave)降水反演算法、PMW-IR(infrared radiometers)组合算法、地面校正(gauge-adjustment)算法^[18]。值得注意的是,准实时性产品因其时效性问题只能考虑云移动矢量的前向传播特征。



图1 石灰窑以上流域位置

Fig. 1 The map for Shihuiyao basin

收集到流域内及边缘 6 个雨量站的地面观测降雨数据和石灰窑水文站的日流量数据,各站点类型、所属河流及数据年限见表 2。研究还收集到 2000 年至 2014 年石灰窑以上流域 8 场洪水对遥感降水数据进行洪水模拟验证,各场次洪水的净雨深等特征值见表 3,各场次洪水的洪峰流量占尼尔基入库洪峰流量的比例为 0.19~0.39,说明该流域所产生洪水是尼尔基水库入库洪水的重要组成部分。

表 2 石灰窑以上流域及边界附近水文站及雨量站基本信息
Tab. 2 Basic information for hydrological stations and rainfall stations within or near the Shihuiyao basin

测站	类型	所处河流	数据年限
石灰窑	水文站	嫩江干流	1954—2014 年
松岭	雨量站	多布库尔河	1973—2014 年
卧都河	雨量站	嫩江干流	1979—1982 年、1982—1992 年、2007—2013 年
新天	雨量站	查拉巴奇河	1983—2009 年
壮志	雨量站	多布库尔河	1974—2014 年
罕达气	雨量站	泥鳅河	1980—2002 年、2004—2014 年

表 3 石灰窑以上流域场次洪水

Tab. 3 Collected flood events in the Shihuiyao basin

洪号	净雨深 R/mm	峰现时间	洪峰流量 $M_{石}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	尼尔基入库洪峰 $M_{尼}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$M_{石}/M_{尼}$
20030907	9.4	2003-09-16	160		
20060719	33.5	2006-07-26	840	2 170	0.39
20070619	11.4	2007-06-24	250		
20080710	9.6	2008-07-20	170		
20090817	16.2	2009-08-22	390		
20100803	37.9	2010-08-13	670	1 990	0.33
20130805	68.5	2013-08-12	1 460	7 740	0.19
20140720	7.0	2014-07-26	150		

1.3 研究方法

以地面雨量站实测数据为真实降雨,对 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 产品降雨数据进行

对比分析,评估其精度及适用性,并通过新安江模型验证其在洪水预报中的可利用性。采用平均值 MEAN 等特征值作为降雨值精度评估指标。评价降

雨本身的预报精度,对评价降雨数据是否可利用并不起决定作用,最根本的判别标准是其是否能改进洪水预报精度,故采用产流相对误差 ΔR 等特征值作为洪

水模拟的评价指标,对调节能力强的水库,如石灰窑以上流域下游的尼尔基水库,入库洪水最重要评价指标是洪量,故应重点关注指标 ΔR 。各指标见表 4。

表 4 各精度指标计算公式
Tab. 4 Formulas of accuracy indexes

项目	精度指标	计算公式	最优值
降雨精度评价指标	M_{EAN}	$M_{EAN} = \sum_{i=1}^n X_i / n$	—
	E_{MR}	$E_{MR} = \sum_{i=1}^n [(Y_i - X_i) / X_i] / n \times 100\%$	0
	E_{MA}	$E_{MA} = \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i) / n \times 100\%$	0
	E_{RMS}	$E_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2 / n}$	0
	C_C	$C_C = \text{Cov}(X, Y) / (\sigma_X \sigma_Y)$	1
	B_{ME}	$B_{ME} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k (Y_{ij} - X_{ij})$	0
	D_{PO}	$D_{PO} = H / (H + M)$	1
	R_{FA}	$R_{FA} = F / (H + F)$	0
	B_F	$B_F = (H + F) / (H + M)$	1
	P_{DFc}	$P_{DFc} = N_1 / N_0$	—
	P_{DFv}	$P_{DFv} = M_1 / M_0$	—
	洪水模拟评价指标	产流相对误差 ΔR_i	$\Delta R_i = \left \frac{R_i - R_{0,i}}{R_{0,i}} \right $
峰现时间绝对误差 ΔT_i		$\Delta T_i = T_i - T_{0,i} $	0
洪峰相对误差 ΔQ_{m_i}		$\Delta Q_{m_i} = \left \frac{M_i - M_{0,i}}{M_{0,i}} \right $	0
纳什系数 N_{S_i}		$N_{S_i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m (Q_{ij} - Q_{0,ij})^2}{\sum_{j=1}^m (Q_{0,ij} - \bar{Q}_{ij})^2}$	1

注:平均值(mean, M_{EAN});相对误差(mean of relative error, E_{MR});绝对误差(mean of absolute error, E_{MA});均方根误差(root mean square error, E_{RMS});相关系数(correlation coefficient, C_C);平均估计偏差(mean estimate bias, B_{ME});命中率(probability of detection, D_{PO});报错率(false alarm detection, R_{FA});探测频率偏差(frequency bias, B_F);降雨发生频数比(probability density function by occurrence, P_{DFc});降雨量贡献比(probability density function by rain volume, P_{DFv}) X_i, Y_i 分别为水文站实测时段降雨量、卫星时段降雨量, mm; n 为各站点实测数据时段数(月或日); $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X, Y 数据协方差; σ_X, σ_Y 分别为 X 和 Y 2 组数据的均方差; N 为年份, K 为站点数; H 表示地面站点观测有雨的情况下卫星探测有雨的情况; M 表示地面观测有雨, 卫星观测无雨的情况; F 表示地面观测无雨而卫星观测有雨的情况; N_1 为某降雨区间内发生频次; N_0 为总降雨发生频次; M_1 为某区间降雨总量, M_0 为总降雨量, mm; R_i 为预报径流深, $R_{0,i}$ 为实测径流深, mm; T_i 为预报洪峰出现时间, $T_{0,i}$ 为实测洪峰出现时间, d; M_i 为预报洪峰流量, $M_{0,i}$ 为实测洪峰流量, m^3/s ; m 为场次洪水时段数, Q_i 为预报径流量, $Q_{0,i}$ 为实测径流量, \bar{Q}_i 为实际流量过程均值, m^3/s ; s_i 为场次洪水数。

1.4 新安江模型

本文采用三水源新安江模型检验遥感降雨数据在洪水预报中的可利用性,选用遗传算法进行参数优选,模型参数(括号内为取值范围)及其物理意义如下: $E_1 \sim E_4$ (4.0~5.5) 为 6—9 月流域蒸发量等级、 E_5 (2.5~4.0) 和 E_6 (1.0~2.5) 为蒸发能力分级点、 W_m (80~180) 为流域平均张力水容量、 U_m (10~20) 为壤中流蓄水容量、 L_m (60~90) 为地下径流蓄水容量、 C (0.09~0.12) 为深层蒸散发扩散系数、 B (0.2~0.5) 为蓄水容量分配曲线方次、 I_m (0.01~0.05) 为不透水面积比、 S_M (10~60) 为平均自由水蓄水容量、 E_X (1~2) 为自由水容量分配曲线方次、

K_i (0~0.7) 为壤中流出流系数、 K_g (0~0.7) 为地下径流出流系数、 C_i (0.5~0.9) 为壤中流消退速度、 C_g (0.950~0.998) 为地下水消退速度、 C_s (0.10~0.99) 为地面径流消退速度、 C_r (0~1) 为河道坦化程度、 L (0~10) 为平移作用。适应度函数选取产流合格场次与汇流合格场次之和,产流相对误差小于 20% 视为产流合格,峰现时间小于等于 1 d、洪峰相对误差小于 20%、纳什系数大于 0.8 视为汇流合格。

2 结果及讨论

2.1 汛期月降雨量探测能力评估

以地面雨量站实测数据为真实降雨,对卫星遥

感降雨产品 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 在雨量站点所在网格上汛期(6—9月)降雨量进行统计评估,见表5。在汛期月尺度上,2种产品数据的相关系数(C_C)均在0.90左右,且 GSMaP_G_NRT 的相关系数(C_C)均值较高,可达到0.93。2种产品

的汛期月降雨均值(M_{EAN})均高于实测值,相对误差(E_{MR})大于0,说明2种数据在汛期月尺度上均存在一定的过高现象。GSMaP_G_NRT 的偏差(E_{MR} 、 E_{RMS})均明显小于 GSMaP_NRT,表明地面校正技术能够降低遥感观测降雨的估计误差。

表5 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期月降雨在石灰窑以上流域的评价指标

Tab. 5 Summary of error evaluation indexes for GSMaP_NRT and GSMaP_G_NRT monthly precipitation of flood season in Shihuiyao basin

站点	实测		GSMaP_NRT			GSMaP_G_NRT			
	M_{EAN}/mm	M_{EAN}/mm	$E_{MR}/\%$	E_{RMS}/mm	C_C	M_{EAN}/mm	$E_{MR}/\%$	E_{RMS}/mm	C_C
石灰窑	81.4	115.8	103.3	57.63	0.91	97.6	55.0	41.54	0.93
卧都河	76.5	113.3	87.2	52.51	0.92	96.9	50.6	35.79	0.95
松岭(二)	102.4	125.8	67.3	71.55	0.88	96.9	20.1	42.88	0.94
新天	89.2	117.5	85.9	69.87	0.87	89.2	40.8	49.77	0.88
壮志	99.7	124.2	62.9	59.87	0.91	97.3	25.1	43.11	0.93
罕达气	84.8	108.0	55.6	44.83	0.93	93.2	27.3	34.50	0.94
均值	89.0	117.4	77.0	59.38	0.90	95.2	36.5	41.27	0.93

2.2 汛期日降雨量探测能力评估

日降雨是驱动水文模型进行洪水预报的关键输入数据,准确的日降雨数据可以提升流域洪水预报的水平。GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期日降雨量精度指标统计结果见表6,2种产品与实测值的相关性较高,相关系数(C_C)均值在0.60以上;两种产品的汛期日降雨均值(M_{EAN})均大于实测值,绝对误差(E_{MA})均值均大于0,说明在汛期日尺度上,2种产品均存在一定的过高现象。其

中,GSMaP_G_NRT 的均值($M_{EAN}=3.10\text{ mm}$)更接近实测值(2.90 mm),绝对误差均值($E_{MA}=0.20\text{ mm}$)、均方根误差均值($E_{RMS}=6.43\text{ mm}$)更小,说明经地面校正的 GSMaP_G_NRT 产品汛期日降雨数据更接近实测值。曾岁康等^[15]、高玥等^[12]在四川地区、湖南地区的研究均发现 GSMaP 地面校正产品均普遍存在过高现象,与本文研究结果相符,说明 GSMaP 地面校正产品的高估现象是普遍存在的。

表6 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期日降雨在石灰窑以上流域的评价指标

Tab. 6 Summary of error evaluation indexes for GSMaP_NRT and GSMaP_G_NRT daily precipitation of flood season in Shihuiyao basin

站点	实测		GSMaP_NRT			GSMaP_G_NRT			
	M_{EAN}/mm	M_{EAN}/mm	E_{MA}/mm	E_{RMS}/mm	C_C	M_{EAN}/mm	E_{MA}/mm	E_{RMS}/mm	C_C
石灰窑	2.7	3.8	1.13	8.06	0.64	3.2	0.53	6.64	0.68
卧都河	2.5	3.7	1.21	6.55	0.68	3.2	0.67	5.49	0.71
松岭(二)	3.4	4.1	0.77	11.20	0.51	3.2	-0.18	6.95	0.65
新天	2.9	3.9	0.93	11.02	0.49	2.9	0	6.99	0.59
壮志	3.3	4.1	0.80	9.25	0.60	3.2	-0.08	6.43	0.68
罕达气	2.8	3.5	0.76	6.72	0.67	3.1	0.28	6.08	0.69
均值	2.9	3.9	0.93	8.80	0.60	3.1	0.20	6.43	0.67

GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 的汛期日降雨量平均估计偏差 B_{ME} 随时间的变化规律及频率分布特点见图2。从图2(a)可以看出,GSMaP_NRT 在汛期总体上有高估日降雨的趋势,且在6月6日的平均 B_{ME} 值明显高于其他日期,达到20.4 mm; GSMaP_G_NRT 的 B_{ME} 值在6月初至7月末有低估的趋势,在8月初至9月末有高估的趋势,无明显异常数值。从图2(b)可以看出,GSMaP_G_NRT 的 B_{ME} 值在小误差区间 $[-0.5, 0.5]$ 的频率明显高于 GSMaP_NRT,在其他区间 $(-\infty, -0.5) \cup (0.5, +\infty)$ 的频率小于 GSMaP_NRT。综合上述,

经地面校正的 GSMaP_G_NRT 产品偏差更小、精度更高。

GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 卫星探测率 D_{PO} 、报错率 R_{FA} 和探测频率偏差 B_F 随日降雨量阈值变化的规律见图3。可以看出,GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 的探测率随日降雨量的增加均大体呈现出下降的趋势,在各降雨区间内,前者的探测率均大于后者。2种产品的报错率随阈值的增加呈现出上升趋势,在降雨区间 $[0, 28]$ 内,GSMaP_NRT 的报错率大于 GSMaP_G_NRT,在降雨区间 $[28, 90]$ 内,GSMaP_NRT 的报错率小于 GSMaP_G_NRT。

NRT,与曾岁康等^[15]在四川地区的研究结论“GS-MaP_Gauge 在 3 个地区均表现出较好的命中率,但在一定程度上增加了误报降水”相一致。GSMaP_NRT 的 B_F 值在 1.3 附近波动,在降雨强度大于 44 mm/d 的区间,FB 值有明显的增加,表明 GSMaP_

NRT 产品对各强度的降雨事件总数均有高估现象,尤其对高强度降雨事件总数(>44 mm/d)存在严重高估;GSMaP_G_NRT 的 B_F 值在 1.0 附近波动,表明在各降雨区间内 GSMaP_G_NRT 的降雨总数与实测较为一致。

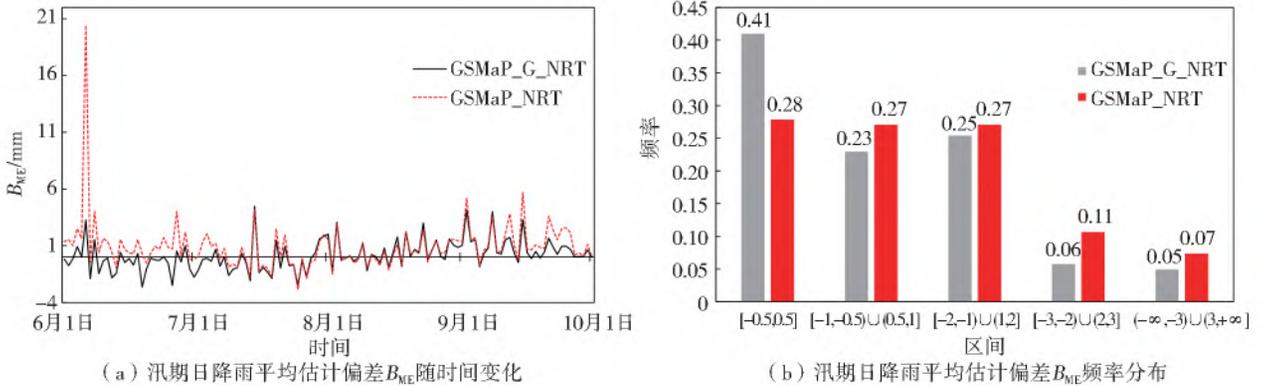


图 2 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期日降雨量 B_{ME} 随时间变化及频率分布

Fig. 2 Time variation and frequency distribution of GSMaP_NRT and GSMaP_G_NRT daily precipitation B_{ME} during flood season

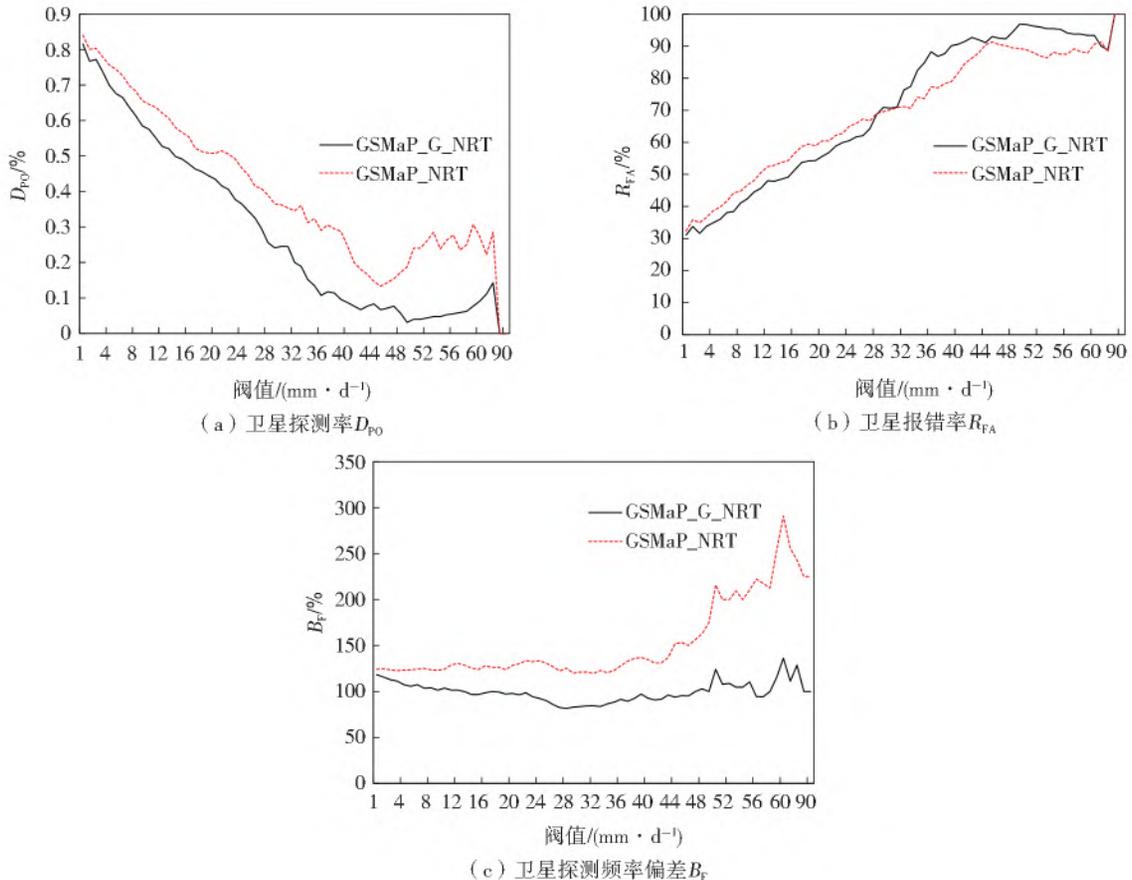


图 3 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期日降雨量 D_{PO} 、 R_{FA} 、 B_F 分布

Fig. 3 D_{PO} 、 R_{FA} 、 B_F of GSMaP_NRT and GSMaP_G_NRT daily precipitation during flood season

日降雨量的统计概率分布信息 P_{DFc} 和 P_{DFv} 能够反映不同降雨强度日降雨量的频次分布规律及不同降雨强度日降雨量对总降雨量贡献比例的大小,是影响流域水文响应规律的重要降雨统计特征^[20]。将石灰窑以上流域及边缘附近 6 个雨量站和站点所在网格的 2 种卫星的汛期日降雨数据划分为 15 个

(0.5~196.0 mm/d) 不同降雨强度区间,计算不同降雨强度发生的频率及对总降雨量的贡献度,图中横坐标对应数值代表该横坐标与前一横坐标的降雨强度区间所对应的统计值。

由图 4 可以看出,GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 2 种产品的降雨频次曲线走向基本一致,除高

估 0~0.5 mm/d 区间降雨发生频次及低估 0.5~1.0 mm/d 区间降雨发生频次外,其他区间降雨发生频次与实测较为相符;从降雨量贡献比例上看,2 种产品与实测大体分布一致,呈现出“中间高,两端低”的分布趋势,其中 GSMaP_G_NRT 略高估 0~12 mm/d 强度降雨的贡献度及略低估 24~348 mm/d 强度降雨的贡献度,而 GSMaP_NRT 略

低估 0~24 mm/d 强度降雨的贡献度及高估 24~348 mm/d 强度降雨的贡献度。杨震宇等^[14]在长江流域的研究中发现地面校正产品 GSMaP-gauged 高估了不足 8 mm/d 的降水,低估了超过 16 mm/d 的降水,与本文对地面校正产品 GSMaP_G_NRT 的研究结果较为相符。

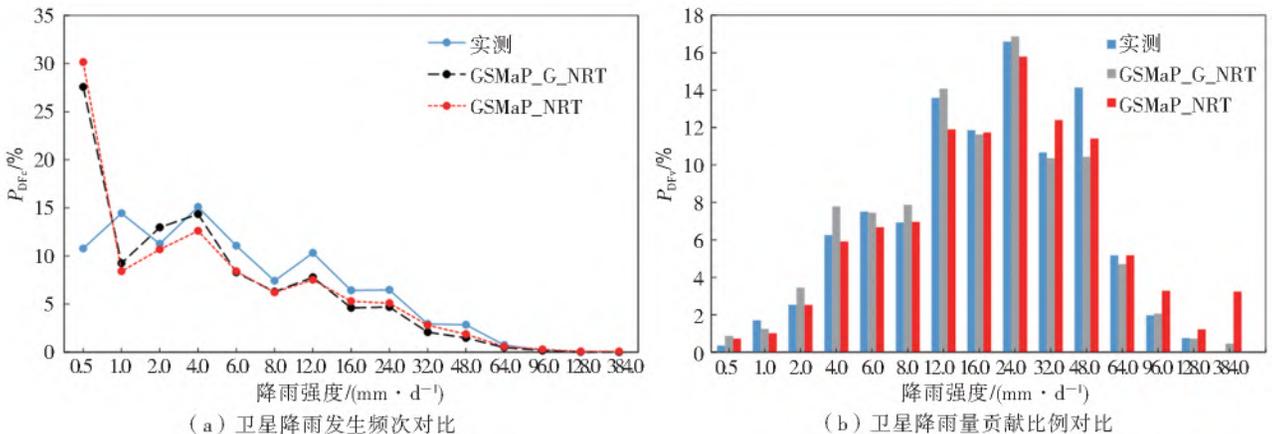


图 4 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 汛期日降雨量 P_{DFc} 和 P_{DFv} 分布

Fig. 4 P_{DFc} and P_{DFv} of GSMaP_NRT and GSMaP_G_NRT daily precipitation during flood season

2.3 洪水预报结果分析

洪水模拟验证在 3 种输入方案下进行:方案 I 选取流域内及边缘雨量站降雨数据,采用泰森多边形法求得面雨量作为新安江模型的输入进行参数的率定与验证;方案 II 以流域内 GSMaP_NRT 栅格降雨数据的平均值作为模型输入进行参数的率定与验证;方案 III 以流域内 GSMaP_G_NRT 栅格降雨数据的平均值作为模型输入进行参数的率定与验证。3 种

方案均选择 8 场洪水中的前 6 场洪水事件作为率定期,后 2 场作为验证期进行独立验证。3 种方案的遗传算法寻优过程见图 5,参数优选结果见表 7,3 种方案参数都在合理范围之内,且壤中流出流系数分别为 0.69、0.68、0.68,说明壤中流在径流中占比较大,符合流域森林覆盖面积大、表层土壤渗透性好的特点。洪水预报结果见表 8,流域降雨洪水过程线见图 6。

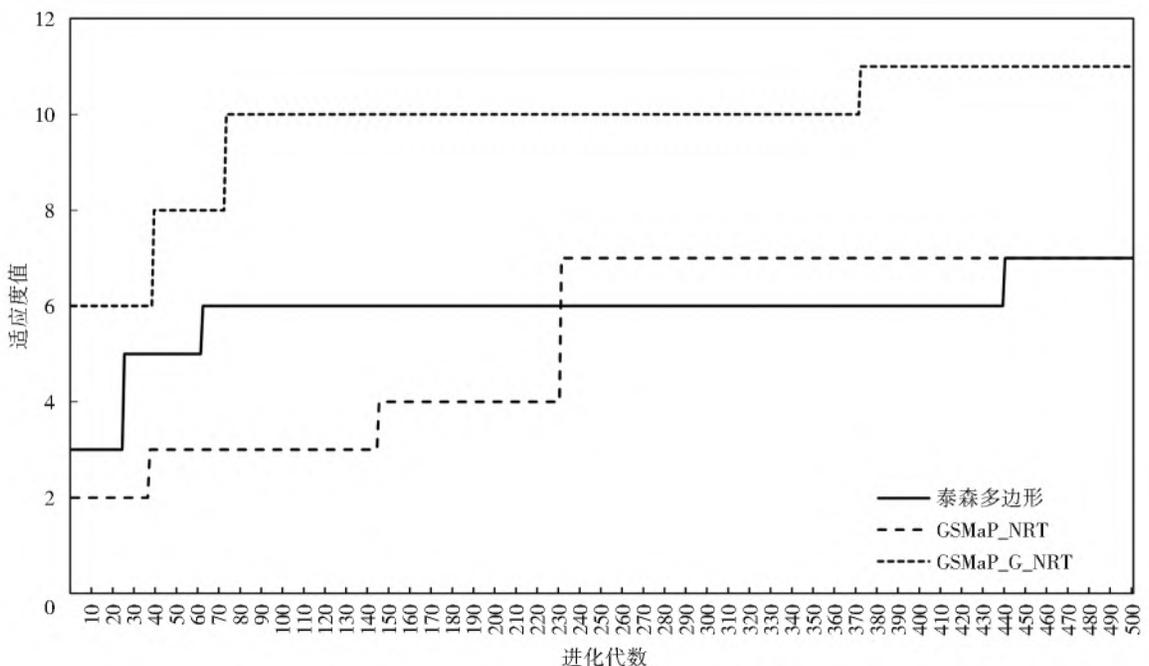


图 5 遗传算法寻优过程

Fig. 5 Optimization process of GA

表 7 方案 I、方案 II、方案 III 参数优选结果

Tab. 7 Optimal parameters of scheme I, scheme II and scheme III

参数	方案 I	方案 II	方案 III	参数	方案 I	方案 II	方案 III	参数	方案 I	方案 II	方案 III
E_1	4.20	5.49	5.50	U_m	10.13	10.00	10.00	K_i	0.69	0.68	0.68
E_2	4.06	5.18	4.30	L_m	70.24	65.76	60.60	K_g	0.01	0.02	0.02
E_3	4.00	4.02	4.07	C	0.09	0.09	0.11	C_i	0.81	0.83	0.86
E_4	4.73	5.47	5.14	B	0.27	0.50	0.50	C_g	0.95	0.95	0.98
E_5	2.50	2.50	2.50	I_m	0.05	0.04	0.03	C_s	0.93	0.71	0.86
E_6	1.19	2.35	1.01	S_M	57.64	52.43	49.06	C_r	0.42	0.29	0.38
W_m	80.41	82.08	102.22	E_X	1.81	1.51	1.75	L	3.00	4.00	3.00

表 8 方案 I、方案 II、方案 III 预报结果

Tab. 8 Predicted results of scheme I, scheme II and scheme III

洪号	实测		方案 I						方案 II						方案 III					
	R	Q_m	R	ΔR	Q_m	ΔQ_m	ΔT	N_s	R	ΔR	Q_m	ΔQ_m	ΔT	N_s	R	ΔR	Q_m	ΔQ_m	ΔT	N_s
20030907	9.4	160	9.9	5.1	80	-47.09	0	0.65	40.3	327.8	810	419.0	-1	-24.02	10.1	6.9	230	47.7	-5	0.64
20060719	33.5	840	62.5	86.9	810	-3.11	0	0.89	73.6	120.0	1880	123.5	-2	-2.00	36.0	7.5	800	-5.1	-1	0.91
20070619	11.4	250	20.7	82.5	250	-2.40	1	0.83	17.7	55.8	410	62.4	1	0.34	12.5	10.3	250	-0.6	1	0.86
20080710	9.6	170	6.2	-35.2	60	-67.50	1	0.24	9.6	0	150	-15.5	3	0.74	6.0	-37.7	140	-19.8	-5	0.42
20090817	16.2	390	31.9	96.7	390	0.23	1	0.93	13.9	-14.6	320	-19.3	1	0.83	15.6	-3.8	320	-19.7	1	0.83
20100803	37.9	670	44.3	16.8	540	-18.27	-1	0.85	30.4	-20.0	750	12.1	-1	0.82	37.4	-1.5	790	18.0	-1	0.87
20130805	68.5	1460	64.2	-6.2	730	-49.87	-1	0.71	58.1	-15.1	1390	-4.8	-1	0.92	66.5	-2.8	1260	-14.2	-1	0.82
20140720	7.0	150	0.5	-93.4	10	-96.10	-2	-0.97	12.6	78.9	330	121.0	-2	-0.93	12.1	71.4	270	81.6	-2	-0.06

注: R 为径流深, mm; Q_m 为洪峰流量, m^3/s ; ΔR 为径流深相对误差, %; ΔQ_m 为洪峰相对误差, %; ΔT 为峰现时间绝对误差, d; N_s 为确定性系数, 无量纲。

从表 8 可以看出, 在对率定期和验证期的 8 场洪水模拟中, 方案 I (泰森多边形) 的产流、汇流合格场次分别为 3 场和 4 场, 方案 II (GSMaP_NRT) 的产流、汇流合格场次分别为 4 场和 3 场, 方案 III (GSMaP_G_NRT) 的产流、汇流合格场次分别为 6 场和 5 场。从合格场次总体来看, 方案 III (GSMaP_G_NRT) 的模拟效果最好。从图 6 可以看出: 方案 I (泰森多边形) 对 20030907、20080710、20130803、20140720 场次洪水的模拟不合格, 主要体现在降雨值较小导致模拟洪峰达不到应有量级; 方案 II (GSMaP_NRT) 对 20030907、20060719、20070619、20080710、20140720 场次洪水模拟不合格, 主要体现在高强度降雨值偏大导致模拟洪峰远高于实测值、低强度降雨偏小导致模拟洪峰低于实测值, 这与第 2.2 节统计该产品的 BIAS 值普遍偏大、高估高强度降雨和低估小降雨强度发生频次及降雨量贡献度的特征相符; 方案 III (GSMaP_G_NRT) 的模拟洪水过程线与实测过程较为相符, 对大洪水 20060719、20090817、20100803、20130805 场次模拟全部合格, 对其余小洪水的模拟洪峰量级基本一致, 不存在类似 GSMaP_NRT 明显

高估或低估降雨量的情况, 但主要误差出现在峰现时间上, 说明 GSMaP_G_NRT 产品对小中强度降雨 (降雨强度 $< 25 \text{ mm/d}$) 发生的时间估计不准确。总体来说, 经过地面校正的 GSMaP_G_NRT 产品可以较准确估计洪水过程期间的降雨量变化过程, 在石灰窑以上流域的洪水预报中具有较高的可利用性。

对比方案 I (泰森多边形) 和方案 III (GSMaP_G_NRT) 的模拟效果可知, 方案 III 的整体合格率明显高于方案 I。方案 I 合格率低主要体现在模拟洪峰达不到应有量级, 而方案 III 在 20100803、20130805 场次洪水的模拟洪峰明显高于方案 I, 观察 2010 年 8 月 3 日、2010 年 8 月 9 日和 2013 年 8 月 8 日方案 III 和方案 I 的日面雨量, 前者明显高于后者, 使得方案 III 模拟洪水过程线更接近实测。原因是方案 I (泰森多边形) 应用的 5 个实测雨量站位置均位于流域北部, 对南部降雨缺乏代表性, 故当南部降雨为流域主要降雨区时, 计算所得面雨量偏小, 模拟洪峰达不到应有量级, 可以考虑加入南部遥感降雨数据以增强面雨量的整体代表性, 达到提高应用真实降雨进行洪水预测准确性的目的。

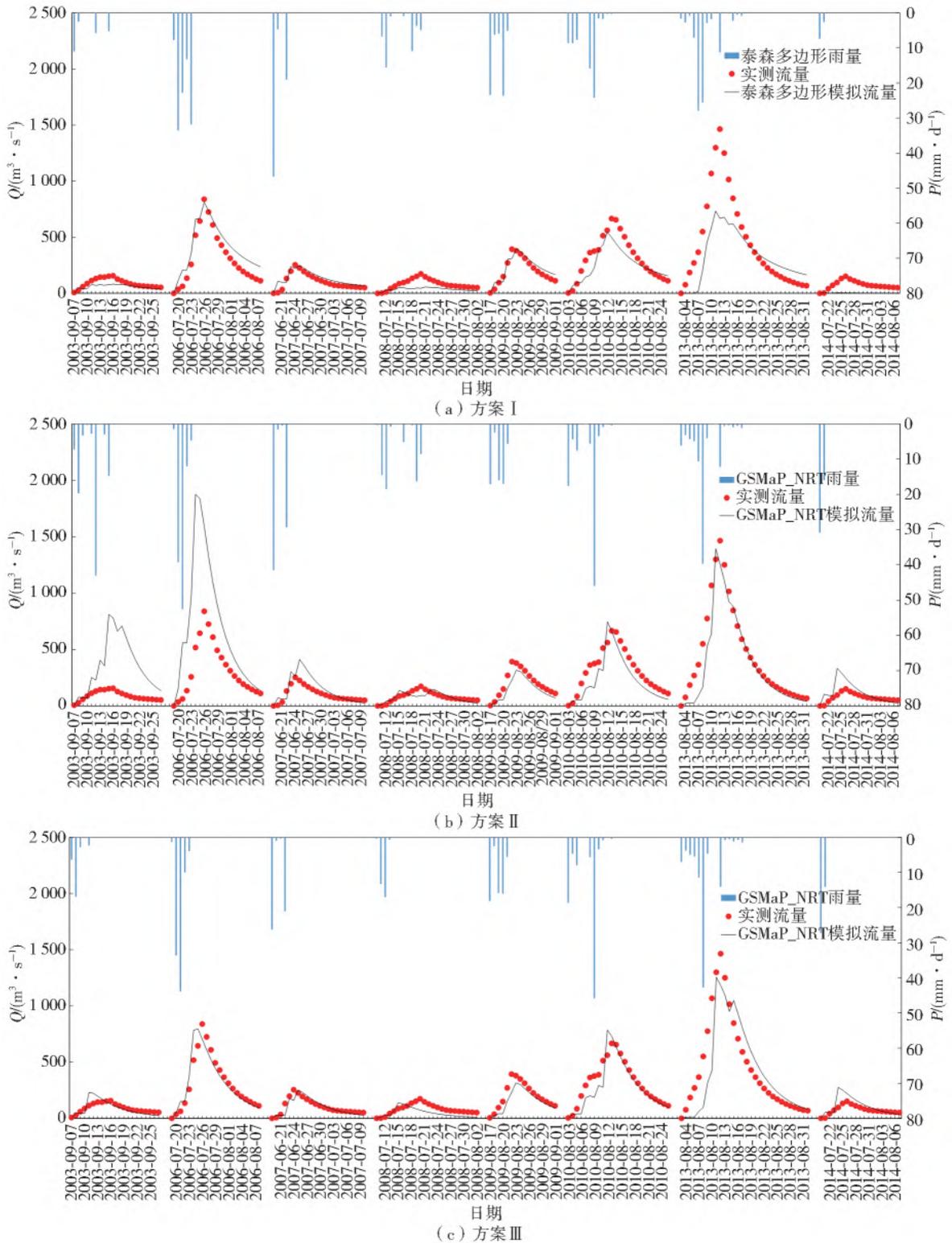


图6 方案I、方案II、方案III场次洪水预报结果

Fig.6 Forecasts of scheme I ,scheme II and scheme III

3 结论

以石灰窑以上流域为例,评估 GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 卫星遥感降雨数据(2000—2014年)在站点所在栅格的精度,从汛期月、日的尺度对降雨估测误差进行评价,并结合新安江模型进行洪水预报以验证其可利用性。研究结论如下。

(1)在研究区域内,以地面测站实测汛期月降雨量、日降雨量作为参考,GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 产品数据的均值均大于实测值,相对误差及绝对误差多数大于0.2,2种产品对降雨量整体上存在高估的现象。地面校正的 GSMaP_G_NRT 产品的相关系数(C_c)等指标均优于 GSMaP_NRT 产品,更接近实测降雨量。

(2) 基于对北方流域的研究结果, 并与南方流域(长江流域、湖南、四川) 已有研究成果对比可知, GSMaP_NRT 与 GSMaP_G_NRT 均放大了中低强度降雨的发生频次及缩小了高强度降雨的发生频次, GSMaP_NRT 严重高估高强度降雨贡献度, 而 GSMaP_G_NRT 产品与实测降雨各项特征指标更接近, 对于中小降雨的预测及其引起的径流变化进行模拟, 2 种产品的应用差别不大, 但对于高强度降雨的预测及其引起的径流变化进行模拟, 建议应用 GSMaP_G_NRT 产品。

(3) 基于新安江模型率定期与验证期的 8 场洪水预报结果表明, 方案Ⅲ(流域内 GSMaP_G_NRT 栅格降雨均值) 的模拟效果最好, 产汇流合格率较高, 能够较好地反映 8 场实际洪水过程, 说明 GSMaP_G_NRT 在洪水预报中具有较高的可利用性, 在一定程度上可以作为降雨资料不足地区的降雨数据来源。

本文洪水预报精度仍存在较大的提升空间, 并且还有其他准实时遥感降雨数据可以利用, 后期可研究多源降雨数据融合利用方法以进一步提高洪水预报精度。另外, 本文收集的洪水场次较少, 还需增加洪水场次, 尤其是近期发生的洪水事件, 以进一步验证遥感降雨数据的可利用性。

参考文献(References):

- [1] TOMOO U, KAZUMASA A, TAKUJI K, et al. Global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project [A]. International Water Technology Association, Proceedings of ICT for Water: GIS and Remote Sensing Applications (GS)[C]. Istanbul(Turkey), 2013.
- [2] 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. (TANG G Q, LI Z, XUE X W, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 340-346. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 03. 005.
- [3] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 基于改进降水输入模块的融雪径流预报: 以拉萨河为例[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1396-1408. (LIU J T, XU Z X, ZHAO H, et al. Simulation of snowmelt runoff processes based on enhanced precipitation input module: Case studies in the Lhasa River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1396-1408. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180552.
- [4] THOM, VU T, KHOI, et al. Using gridded rainfall products in simulating streamflow in a tropical catch-

ment: A case study of the Srepok River catchment, Vietnam[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 65(1): 18-25. DOI: 10. 1515/johh-2016-0047.

- [5] ANDERMANN C, BONNET S, GLOAGUEN R. Evaluation of precipitation datasets along the Himalayan front[J]. Geochem. Geophys. Geosys, 2011, 12(7), 1-16. DOI: 10. 1029/2011GC003513.
- [6] SOROOSHAIN S, HSUV K L, GAO X, et al. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(9): 2035-2046. DOI: 10. 1175/1520-0477(2000)0812. 3. CO; 2.
- [7] 刘昌明, 白鹏, 王中根, 等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 272-282. (LIU C M, BAI P, WANG Z G, et al. Study on prediction of ungauged basins: A case study on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 272-282. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150925.
- [8] 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): 487-503. DOI: 10. 1175/1525-7541(2004)0052. 0. CO; 2.
- [9] 李媛媛, 宁少尉, 丁伟, 等. 最新 GPM 降水数据在黄河流域的精度评估[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 164-170. (LI Y Y, NING S W, DING W, et al. The evaluation of latest GPM-era precipitation data in Yellow River basin [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 164-170. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 01. 22.
- [10] JUN M, KAZUHIKO F, HIRONORI I, et al. Flood risk forecasting for poorly gauged basins in the Mekong River basin using a distributed hydrological model and a satellite derived precipitation dataset [A]. 6th Annual Mekong Flood Forum[C], Phnom Penh(Cambodia), 2008.
- [11] 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. (TANG G Q, WAN W, ZENG Z Y, et al. An overview of precipitation measurement (GPM) mission and its latest development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 607-615. (in Chinese)) DOI: 10. 11873/j. issn. 1004-0323. 2015. 4. 0607.
- [12] 高玥, 徐慧, 刘国. GSMaP 遥感降水产品对典型极端降水事件监测能力评估[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 1121-1132. (GAO Y, XU H, LIU G. Evalua-

- tion of the GSMaP estimates on monitoring extreme precipitation events[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5): 1121-1132. (in Chinese)) DOI: 10. 11873/j. issn. 1004-0323. 2019. 5. 1121.
- [13] 杨震宇, 宁少尉, 金菊良. 最新 GSMaP-gauged 与 GPM-IMERG 卫星降水产品性能评估及其在长江流域中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 5-8, 13. (YANG Z Y, NING S W, JIN J L. Performance evaluation of the latest GPM-era precipitation products and their application over the Yangtse River[J]. Water Resources and Power, ., 2018, 36 (11): 5-8, 13 (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2018-11-002.
- [14] 郝振纯, 余超, 董小涛, 等. 基于 GsMAP 的尼洋河流域降水时空分布特征研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 1-4, 30. (HAO Z C, YU C, DONG X T, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in the Niyanghe River basin based on GsMAP[J]. Water Resources and Power, 2020, 38 (2): 1-4, 30. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2020-02-001.
- [15] 曾岁康, 雍斌. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1305-1318. (ZENG S K, YONG B. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1305-1318. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201907003.
- [16] SETIAWATI M, MIURA F. Evaluation of GSMaP daily rainfall satellite data for flood monitoring: Case study-Kyushu Japan[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2016, 4, 101-107. DOI: 10. 4236/gep. 2016. 412008.
- [17] SETIAWATI M, MIURA F, ARYASTANA P. Verification of hourly GSMaP rainfall estimates during the flood events in Kumamoto Prefecture, Japan[A]. The 34th Asian Conference on Remote Sensing[C]. Bali, 2013.
- [18] LEVIZZANI V, KIDD C, KIRSCHBAUM D, et al. Satellite precipitation measurement[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [19] 张金男, 吴剑, 魏国振, 等. 优选雨量站权重改进降雨输入的洪水预报方法[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(5): 537-546. (ZHANG J N, WU J, WEI G Z, et al. A method of flood forecasting based on rainfall input improvement by optimizing rainfall stations' weights[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, 60 (5): 537-546. (in Chinese)) DOI: 10. 7511/dllgxb202005010.
- [20] CHEN S, HONG Y, CAO Q, et al. Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118 (13): 60-74. DOI: 10. 1002/2013JD019964.

Availability of satellite remote sensing dataset for Shihuiyao basin of Nenjing River

ZHANG Jinnan, ZHOU Huicheng, WU Jian, WANG Qianning, WEI Guozhen, PENG Yong

(Dalian University of Technology, School of Hydraulic Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: The Shihuiyao basin is located in the upper of the Nenjiang River, with basin area of 17,205 km². Fewer rainfall stations within or near the basin lead to insufficient rainfall data. It is difficult to accurately predict the flooding process at the outlet section of the basin using existing rainfall data, which brings certain difficulties to the downstream river flood control and the Nierji Reservoir's forecast flood control operations. Based on the characteristic of flood forecasting, the near real-time satellite remote sensing global precipitation products GSMaP_NRT and GSMaP_Gauge_NRT are selected to supplement the Shihuiyao basin, aiming to solve the problem of scarcely gauged precipitation.

The two products accuracy on the rainfall stations grid is evaluated based on the precipitation within or near the basin. Three flood forecasting input schemes are designed; scheme I precipitation of rainfall stations within or near the basin by Tyson polygon weighted method), scheme II (average precipitation of GSMaP_NRT in the basin), scheme III (average precipitation of GSMaP_Gauge_NRT in the basin), and combined with the Xin'anjiang model for flood forecasting to verify their availability.

On monthly and daily scales for flood season, GSMaP_NRT and GSMaP_Gauge_NRT show high accuracy, but both overestimate the rain gauge observation precipitation, and the accuracy of GSMaP_Gauge_NRT is generally better than that of GSMaP_NRT. The results of 8 flood forecasts during the training and validation stages show that the forecast effect of scheme III is the best, and the runoff and confluence results both have higher accuracies.

Results indicated that the GSMaP_Gauge_NRT has high availability in flood forecasting in the Shihuiyao basin, and the GSMaP_Gauge_NRT can be used as a source of rainfall data in ungauged basins. In future, more near real-time satellite remote sensing global precipitation products can be applied for flood forecasting to further improve flood forecasting accuracy.

Key words: GSMaP; accuracy evaluation; Shihuiyao basin; Xin'anjiang model; flood forecast