doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.035

遥感降水量产品寒区精度评估与径流模拟适用性研究

徐淑琴[1]　丁星臣[1]　王　斌[1,2]　王　蕾[3]

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030; 2.农业部农业水资源高效利用重点实验室,哈尔滨 150030;
3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用地面雨量站观测的降水量为基准数据,以寒区呼兰河流域作为典型研究区,评估了 TRMM(Tropical rainfall measuring mission)最新一代卫星降水量产品 3B42V7、3B42RT 以及 CHIRPS (Climate hazards group infrared precipitation with station data)、基于地面降水量插值获得的 IDWP 降水量数据在日、月、季度和空间尺度上的精度。利用站点和卫星 2 种降水量数据驱动 SWAT 模型,采用 SUFI-2 算法计算模型并考虑模型参数的敏感性,进行日流量过程模拟,评估了多卫星降水量产品在流域水文模拟和预报中的应用能力。研究结果表明: 流域日平均尺度上, 3B42V7、3B42RT、CHIRPS 分别高估地面降水量 5.43% 、41.24% 、3.37% 。3B42V7 在流域日、月、季度时间尺度上很接近地面观测降水量。3B42RT 的日降水强度累计概率分布与雨量站较为接近。3B42V7 和 CHIRPS 在率定期和验证期的日流量模拟效果均较好,NSCE 率定期为 0.77、0.84;验证期为 0.67、0.56。3B42RT 对流量峰值的模拟较差。可考虑采用 TRMM 3B42V7 和 CHIRPS 作为基础降水量资料应用于寒区水资源管理、干旱监测和洪水预报等相关研究。

关键词: 寒区; 遥感降水量产品; SWAT 模型; 时间尺度; 空间尺度

中图分类号: P333.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)11-0289-11

Accuracy Evaluation of Multisatellite Remote Sensing Precipitation Products in Alpine Region and Its Applicability to Runoff Simulation

XU Shuqin[1]　DING Xingchen[1]　WANG Bin[1,2]　WANG Lei[3]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Ministry of Agriculture*, *Harbin* 150030, *China*
3. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The observed data of surficial precipitation stations were used as benchmark data, the Hulan River Basin of the alpine region was used as typical study area, the precision of the new generation satellite rainfall products TRMM(the tropical rainfall measuring mission) 3B42V7, 3B42RT and CHIRPS (Climate hazards group infrared precipitation with station data), IDWP precipitation data based on IDW (inverse distance weighted) were evaluated in day, month, quarter and spatial scales. The precipitation stations and satellite data were used to drive SWAT model, the SUFI-2 algorithm was used to calculate the model and sensitivity of parameters, simulate the daily flow process, and evaluate the application ability of multi satellite precipitation in watershed hydrological simulation and prediction. The research results showed that in the average watershed scale, the amount of 3B42V7, 3B42RT and CHIP over ground rainfall were 5.43% , 41.24% and 3.37% , 3B42V7 was very close to the ground precipitation in monthly, quarterly time scales. The cumulative probability distribution of daily precipitation intensity of 3B42RT was close to the surficial precipitation. The simulated results of 3B42V7 and CHIP were both very well in the rate of calibrated and validated period of the daily flow simulation results, NSCE was 0.77 and 0.84 in calibrated period, in the verification period it was 0.67 and 0.56, respectively.

收稿日期: 2017-03-29　修回日期: 2017-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、国家自然科学基金项目(51009026)和农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015002)

作者简介: 徐淑琴(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事流域数字水文模型与水库优化调度研究,E-mail: 1210569246@qq.com

通信作者: 王斌(1976—),男,副教授,博士,主要从事水文过程模拟研究,E-mail: wangbin@neau.edu.cn

3B42RT for the peak simulation of the flow was poor. The change of water quantity of CHIP was close to that of rainfall station, and the groundwater quantity of 3B42RT into the river was smaller than that of others, but the runoff depth and soil water content were larger. TRMM 3B42V7 and CHIRPS can be used as a basic application of precipitation data in cold regions for water resources management, drought monitoring and flood forecast research in ungauged and data-deficiency region. The next step would be to study the correction method of satellite precipitation data for cold region which would provide more reliable data for the future application of satellite precipitation data to carry out related research in the cold region.

Key words: cold region; remote sensing precipitation products; SWAT model; temporal scale; spatial scale

引言

世界各地受降水影响发生的洪水、干旱和环境污染常造成大量的财产损失和人员伤亡[1]。作为最重要的气象要素,降水是从事气候分析、干旱评估、洪水预报等相关研究的必要数据[2],目前,主要采用地面雨量站、天气雷达、遥感等方式观测降水量[3]。地面雨量站观测是最常用的测雨方法,但受站网布设密度及其空间分布不均的影响,站点降水量往往代表性不足。天气雷达观测范围有限、覆盖率较低,缺乏普遍的适用性,不能满足大流域降雨观测的需求,在地形复杂地区相对具有较大的不确定性[4-5]。近年来,一系列高时空分辨率的遥感降水量产品的出现,为解决常规及雷达测雨问题的不足提供了新的途径和方法,其中具有代表性的产品主要有热带降雨观测计划(Tropical rainfall measuring mission,TRMM)[3]、美国气候预测降水中心融合技术降水量产品(Climate prediction center morphing technique,CMORPH)[6]、气候灾害组红外降水量数据(Climate hazards group infrared precipitation with station data,CHIRPS)[7]、全球卫星测绘降水量计划(Global satellite mapping of precipitation,GSMaP)等[8]。在应用这些降水量产品前,了解其数据误差的时空分布及在水文模拟中的应用能力是十分必要的。

国内外学者针对区域和全球尺度的卫星降水量评估与应用开展了一系列研究[9-12]。在以往学者研究中,多将雨量站点观测的点降水量作为真值来评估遥感降水量产品对不同降水事件的预报精度及其在径流模拟中的适用性,但在我国高寒地区缺少相关研究。以黑龙江省为例,该省为中国纬度最高、最冷的寒区省份[13],其雨量站的站网平均密度为 902 km^2/站,约为中国站网平均密度(500 km^2/站[14-16])的 1/2;冬季长达半年之久且降水量偏少,降雨主要集中在 6—9 月份;冬季以降雪为主,初雪(冰)约在 10 月,终雪(冰)可持续至次年 4 月,降水可表现为雨、雪、雨雪混合物等多种形态。这种不利条件导致在黑龙江省开展的水文研究中,存在降水量数据缺乏,日流量模拟效果较差,而遥感降水量产品可以在一定程度上弥补其不足。然而,有研究表明寒区特殊的气候特点会影响遥感降水量的探测精度[17],遥感降水量产品在寒区的精度和适用性有待深入研究。

本文以黑龙江省内呼兰河流域为研究区,评估 TRMM 3B42V7、TRMM 3B42RT、CHIRPS 3 种卫星遥感降水量产品,以及基于地面雨量站采用反距离加权插值方法 IDW(Inverse distance weighted)插值的栅格降水量数据,在不同时间尺度及 0.05°×0.05°像元空间尺度上的精度及误差分布,并利用这些降水量产品驱动 SWAT(Soil and water assessment tool)模型,研究其在寒区径流模拟中的适用性,以期为遥感降水量产品在寒区的应用提供更为可靠的降水量数据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

呼兰河为松花江支流,位于黑龙江省中部,处于东经 125.90°~128.80°、北纬 46.18°~48.13°之间,全长 523 km,流域面积 35 683 km^2,地势东北高、西南低,高程范围为 7~1 427 m。降水分布不均,上游山地森林区降水量较大,而下游平原区降水量较少。依据流域内 4 个气象站 1980—2010 年的逐日气象数据,统计出流域多年日平均降水量为 1.5 mm,多年日平均最高气温为 8.5℃,多年日平均最低气温为 -2.4℃。本文选择呼兰河兰西水文站(东经 126.33°、北纬 46.25°)控制断面以上的 27 430 km^2 集水区作为研究区(图 1)。在图 1 中,黑色方格代表用于时间尺度评估而选取的 0.25°×0.25°的 13 个栅格,以编码“0602”为例,代表时间尺度分析中第 6 个栅格内包含 2 个地面雨量站,其他黑色方格定义与此相同。

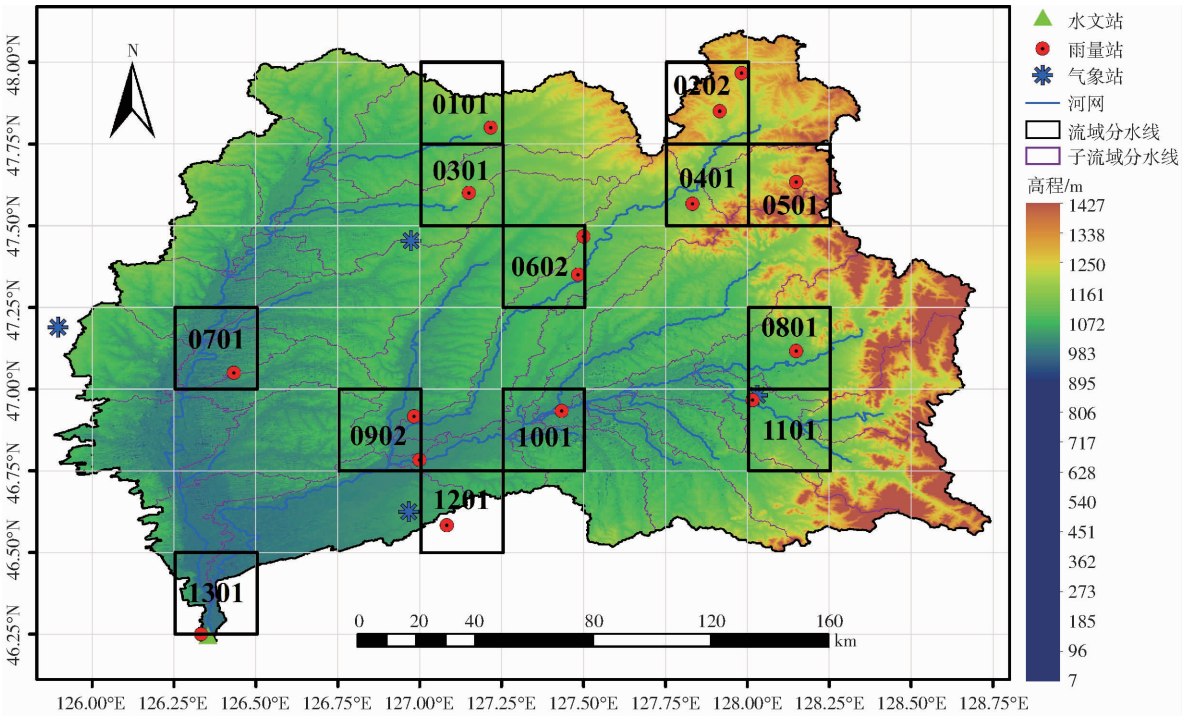


图 1　研究区域示意图

Fig. 1　Sketch map of study area

1.2　数据来源及处理

本研究 DEM 数据采用中科院地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn/）提供的 NASA 和 METI 共同推出的最新地球电子地形 ASTER GDEM 90 m 分辨率的数字高程数据，将下载的呼兰河流域不同 DEM 条带利用 ArcGIS 栅格镶嵌工具拼接 DEM 条带，并将拼接后的 DEM 图加载进 ArcSWAT2012，从而获取流域河网，划分子流域及计算地形参数。根据流域水系和地形实际情况，设定最小汇水面积阈值为 500 km^2，研究流域被划分为 37 个子流域和 248 个水文响应单元（Hydrological response units，HRU）。土地覆被数据采用美国马里兰大学（UMD）1 km 分辨率土地覆被数据（http://glcf.umd.edu/），研究区域共有水域、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、稀树草原、多树草原、草原、耕地、城市和建成区 10 种土地覆被类型。由于土地覆被参数较难获取，本文采用 SWAT 数据库中的参数，通过索引表建立 UMD 土地覆被数据与 SWAT 土地利用/作物分类数据库中同种土地利用类型之间的联系。土壤数据采用联合国粮农组织（FAO）和维也纳国际应用系统研究所（IIASA）构建的 1 km 分辨率世界和谐土壤数据库（Harmonized world soil database，HWSD），呼兰河流域共提取出 17 种土壤类型。以上栅格数据统一投影至 WGS_1984_UTM_Zone_52N坐标系。实测气象和降水量数据采用呼兰河流域及周边地区 4 个气象站与 16 个雨量站的逐日数据。水文数据采用兰西水文站的逐日流量数据。卫星降水量产品采用 0.25° 的 TRMM 3B42V7 日降水量产品（http://mirador.gsfc.nasa.gov/）、TRMM 3B42RT 3h（ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/TRMM/Gridded/）、CHIRPS 日降水量产品（ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p25/），TRMM 3B42RT 日降水量数据通过每隔 3 h（00:00、03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00UTC）降水量数据累加获得，关于以上遥感降水量产品的详细介绍见文献[18]。反距离加权插值方法 IDW 不依赖特定的统计假设，在水文学的降水量数据几何插值方法中被广泛应用[19]，本文采用 IDW 方法对地面点雨量站数据插值获得 0.05° × 0.05° 的空间栅格降水量数据用于遥感降水量产品的空间精度评估。以上数据研究的起止时间均为 2001 年 1 月 1 日—2006 年 12 月 31 日，其中 TRMM 3B42V7、3B42RT、CHIRPS、IDW 插值的栅格降水量数据在后文中分别简称为 3B42V7、3B42RT、CHIP、IDWP。

2　研究方法

为定量评估时间及空间尺度上遥感降水量产品的精度，阐明遥感降水量的误差空间分布特征，本文采用相关系数（CC）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、相对偏差（BIAS）、探测率（POD）、空报率（FAR）、成功系数（CSI）和纳什效率系数（NSCE）作为统计评估指标，其计算公式分别为

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \overline{G})(R_i - \overline{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \overline{G})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2}} \quad (1)$$

$$M_{AE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|R_i - G_i| \quad (2)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_i - G_i)^2} \quad (3)$$

$$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - G_i)}{\sum_{i=1}^{n}G_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$P_{OD} = \frac{U}{U+V} \quad (5)$$

$$F_{AR} = \frac{W}{U+W} \quad (6)$$

$$C_{SI} = \frac{U}{U+V+W} \quad (7)$$

$$N_{SCE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - \overline{Q}_{obs})^2} \quad (8)$$

式中 n——数据个数

G_i——地面雨量站降水量，mm

R_i——遥感降水量，mm

$\overline{G}$——地面雨量站降水量均值，mm

$\overline{R}$——遥感降水量均值，mm

U——遥感降水量数据和地面雨量站同时有雨的频数

V——遥感降水量数据无雨而地面雨量站有雨的频数

W——遥感降水量数据有雨而地面雨量站无雨的频数

Q_{obs}——水文实测流量值，m^3/s

Q_{sim}——模拟流量值，m^3/s

$\overline{Q}_{obs}$——水文实测流量平均值，m^3/s

其中 CC 反映了遥感降水量同地面雨量站降水量的线性相关程度；MAE 和 RMSE 反映了遥感降水量同地面雨量站降水量的平均误差；BIAS 反映了遥感降水量数据的系统偏差程度；POD 反映了遥感降水量产品对降水事件的漏报程度，其值越高，表明遥感降水量产品对降水事件的漏报程度越低；FAR 反映了遥感降水量产品对降水事件的错报程度，其值越低，错报程度越低；CSI 反映了遥感降水量产品成功观测到降水事件的比例，其值越大越好。同时采用 BIAS 和 NSCE 定量比较遥感降水量产品和地面雨量站降水量对径流的模拟效果[18-19]。

TIAN 等[21]对 TRMM 3B42V6 和 CMORPH 两种遥感降水量产品日到年时间尺度的精度评估及短时间到长时间尺度误差分布的研究表明：不同空间位置降水强度的变化对地表径流和洪水模拟会产生显著的影响。因此，本文采用概率密度函数 PDF（Probability density function）及累积分布函数 CDF（Cumulative distribution function）比较遥感降水量产品在不同日降水强度范围发生的频率，日降水强度的范围采用世界气象组织 WMO（The World Meteorological Organization）的分类标准[18,20,22]：降水量 $P<1$ mm（微量降水）、1 mm$\leqslant P<2$ mm（小雨）、2 mm$\leqslant P<5$ mm（低强度中雨）、5 mm$\leqslant P<10$ mm（高强度中雨）、10 mm$\leqslant P<20$ mm（低强度大雨）、20 mm$\leqslant P<50$ mm（高强度大雨）、$P\geqslant 50$ mm（暴雨）。

3 时间尺度精度评估及误差分析

呼兰河流域提取出 54 个 0.25°×0.25°的遥感降水量产品栅格数据。流域尺度上，雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP 的 2001—2006 年流域日平均降水量见图 2，3B42RT 降水量整体偏大，CHIP 降水量整体偏小，雨量站与 3B42V7 介于两者之间。与雨量站流域日平均总降水量相比，3B42V7、3B42RT、CHIP 分别高估地面降水量 5.43%、41.24%、3.37%。3B42V7、3B42RT、CHIP 与雨量站日时间尺度的 CC 分别为 0.79、-0.009、0.56，3B42RT 在流域日平均时间尺度的相关性较差。其 MAE 分别为 1.03、3.08、1.53，3B42RT 数据与雨量站观测数据的误差为 3B42V7 和 CHIP 的 2 倍。对降水事件的探测能力方面，其 POD 分别为 0.74、0.79、0.58，3B42RT 对降水事件的漏报程度最低，原因可能是 3B42RT 对降水量整体高估造成的，但其对降水量的错报程度较高，FAR 为 0.4，而 3B42V7 和 CHIP 为 0.29、0.21。3 种数据成功观测到有降水发生的比例较为接近，均在 0.55 左右。

为了与流域尺度日时间序列平均降水量的散点图分布进行对比，研究另外选取了至少包含 2 个雨量站的 0202 和 0902 遥感降水量网格，其日降水量分布见图 3，与图 2 相比，3 种数据的变化趋势基本一致，CHIP 降水量整体变大。

月时间尺度 4 种降水量产品 13 个编码栅格的月平均降水量见图 4，3B42V7 和 CHIP 与雨量站降水量的一致性较好，CC 为 0.98、0.97。3B42V7 产品具有较好的月降水量预报能力，可能是由于其应用 TRMM 卫星的 TCI（TRMM combined instrument）估值以及 GPCP（Global precipitation climatology

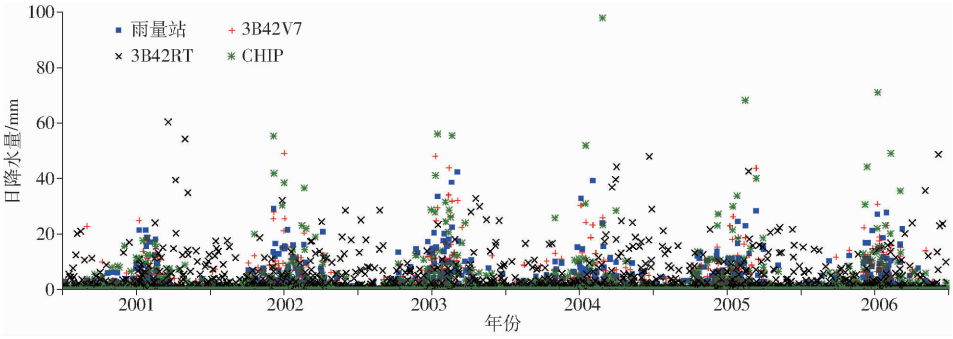


图 2　雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP 流域日平均降水量

Fig. 2　Average daily rainfall of rainfall station, 3B42V7, 3B42RT and CHIP in the basin

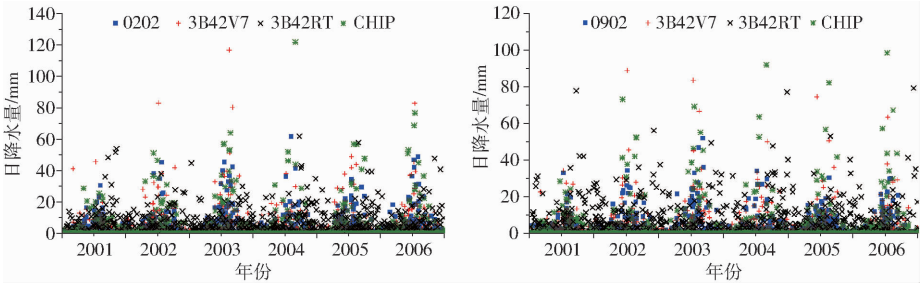


图 3　流域 0202 与 0902 栅格日降水量

Fig. 3　Daily rainfall of 0202 and 0902 rasters in the basin

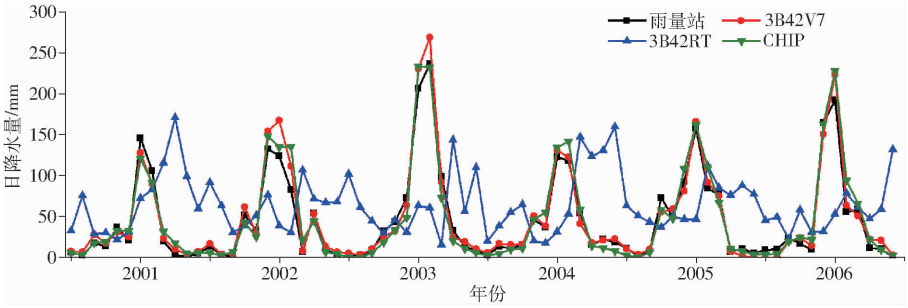


图 4　雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP 流域月平均降水量

Fig. 4　Monthly average rainfall of rainfall station, 3B42V7, 3B42RT and CHIP in the basin

project)和 CAMS(Climate assessment and monitoring system)提供的逐月雨量站数据进行校正的结果。3B42RT 整体高估了月平均降水量,CC 仅为 -0.16,RMSE 为 72.32 mm,而 3B42V7 和 CHIP 的 RMSE 仅为 11.26 mm 和 13.67 mm,3B42RT 在每年 1—3 月份、9—12 月份,寒区温度较低及温度为负值的月份月平均降水量均大于其他 3 种降水量产品。

流域 13 个编码栅格的日时间尺度统计指标见表 1,3B42V7 的 CC 值均大于 3B42RT 和 CHIP,其 CC 的均值为 0.56,说明 3B42V7 在流域日时间尺度上很接近地面观测降水量,CC 值较高的 0202、0501、0602 栅格位于流域的东北方向,高程较大。3B42RT 对地面降水量的观测能力均较差,CC 的均值为 -0.01,CHIP 相对较好,CC 的均值为 0.41。其他 3 种统计指标 3B42V7 的表现均优于 3B42RT 和 CHIP。

为了从时间角度评估遥感降水量产品对地面降水量的探测能力,流域 13 个编码栅格的 POD、FAR、CSI 值见图 5,3B42V7 对降水量的漏报与错报程度较低,成功观测到降水发生的比例较高,而 3B42RT 计算得到 3 种指标均较差,CHIP 的 POD 和 CSI 介于两者之间,其 FAR 与 3B42V7 的变化一致,对降水量的错报程度较低。

流域 13 个编码栅格的日、月、季度降水量散点图见图 6。由于在同一月份,南北方可能处于不同的季节,同一地域的各季节以及不同地域的同一季节在时间上不一定等长,且黑龙江省内不同地域季度时间变化较为一致,因此本文参照文献[23],按农事活动划分,研究区的春季约为 4—5 月份、夏季约为 6—8 月份、秋季约为 9—10 月份、冬季约为 11 月—次年 3 月份。日时间尺度上,3B42V7 与雨量站观测的 CC 为 0.56,CHIP 为 0.4,3B42RT 较差为 -0.01。随着时间尺度的增加,遥感降水量的观测能力增强,在月和季度时间尺度上,3B42V7 和 CHIP

表 1 日尺度统计指标

Tab. 1 Statistical indicators in daily scale

栅格编号	3B42V7				3B42RT				CHIP			
	CC	MAE/mm	RMSE/mm	BIAS/%	CC	MAE/mm	RMSE/mm	BIAS/%	CC	MAE/mm	RMSE/mm	BIAS/%
0101	0.54	1.58	5.46	-1.92	-0.03	3.05	8.13	7.07	0.41	1.96	6.82	-3.27
0202	0.63	1.63	5.28	9.15	-0.03	3.28	7.76	15.18	0.42	2.05	6.71	-3.39
0301	0.58	1.57	5.18	-3.53	-0.05	3.01	7.87	3.31	0.41	1.94	6.69	-2.65
0401	0.57	1.81	5.88	-3.56	-0.02	3.46	8.38	3.90	0.41	2.17	7.06	-11.26
0501	0.65	1.76	5.49	11.02	0	3.48	8.41	32.27	0.35	2.23	7.57	-1.40
0602	0.61	1.52	4.93	-2.22	-0.01	3.02	7.44	5.48	0.42	1.96	6.51	-2.17
0701	0.54	1.50	5.12	23.74	0	2.96	7.83	79.49	0.33	1.88	6.98	31.95
0801	0.55	1.70	5.67	0.69	0.06	3.69	8.36	45.36	0.44	2.00	6.26	-4.74
0902	0.56	1.46	4.88	14.08	-0.02	3.13	7.86	64.19	0.41	1.90	6.45	18.14
1001	0.48	1.68	5.38	9.81	0	2.99	7.66	34.53	0.39	1.89	6.30	8.98
1101	0.54	1.69	4.89	13.92	0.01	3.79	8.52	90.91	0.45	1.95	5.85	11.90
1201	0.51	1.57	5.51	15.64	0.01	2.92	7.41	39.56	0.41	1.85	6.52	11.32
1301	0.53	1.42	5.09	31.82	0.01	3.41	8.11	137.75	0.46	1.56	5.76	24.30

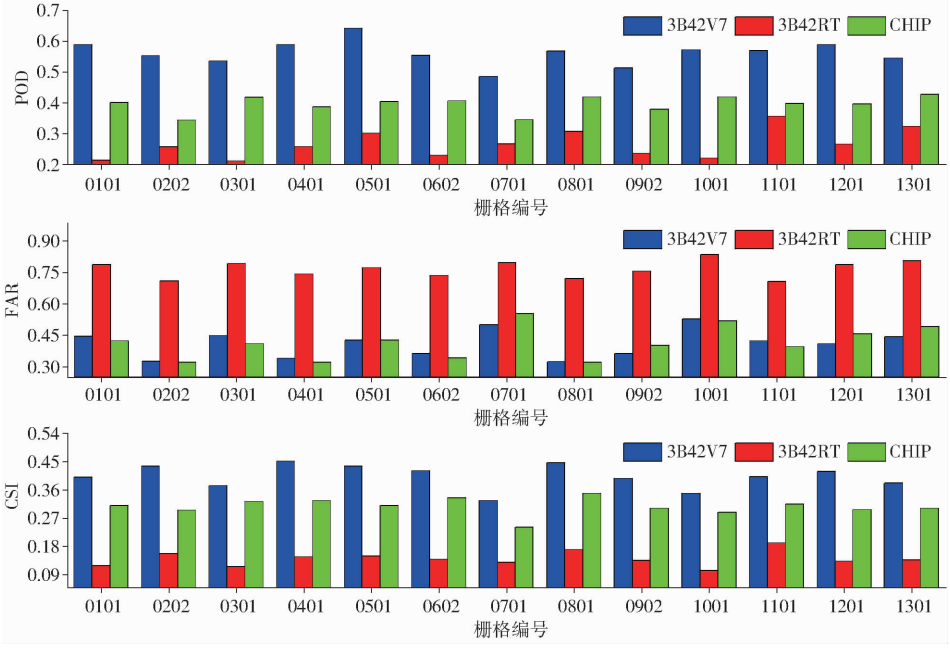


图 5 日尺度 13 个编码栅格的 POD、FAR、CSI 值

Fig. 5 POD, FAR, CSI values of 13 coding grids in daily scale

的 CC 均大于 0.9,说明遥感降水量产品对月和季度降水量观测的准确性要优于日降水量,经过全球地面资料校正的 3B42V7 在寒区对不同时间尺度降水量的探测精度均高于其他 2 种降水量产品。

图 7 和图 8 进一步比较了时间尺度上不同遥感降水量产品的日降水强度差异,图 8b、8c 为图 8a 在不同日降水量范围的局部放大。与地面雨量站观测相比,3B42V7 的变化接近雨量站,CHIP 过低的估计了微量降水,低估了 27%。3B42RT 过低估计了小雨,低估了 42%,过高估计了(5 mm,20 mm]降雨强度区间即高强度中雨和低强度大雨。雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP 探测到有暴雨发生的概率分别为 0.52%、1.08%、0.72%、2.86%,CHIP 过高地估计了暴雨事件的发生,为其他两种遥感降水量产品的 2 倍多。从日降水强度累计概率分布图可以看出,表现很差的 3B42RT 数据与雨量站观测的一致性相对较好,CHIP 整体低估了不同降水强度区间降水事件的发生,但在(20 mm,70 mm]降水强度区间,与雨量站观测相比过高估计了 103.58%。

4 空间尺度精度评估与误差分析

为了更直观地了解流域不同空间位置遥感降水量的探测精度,基于地面雨量站观测数据采用 IDW 插值方法计算得到了流域的日尺度面降水量数据,通过对遥感降水量产品重采样最终生成 0.05° ×

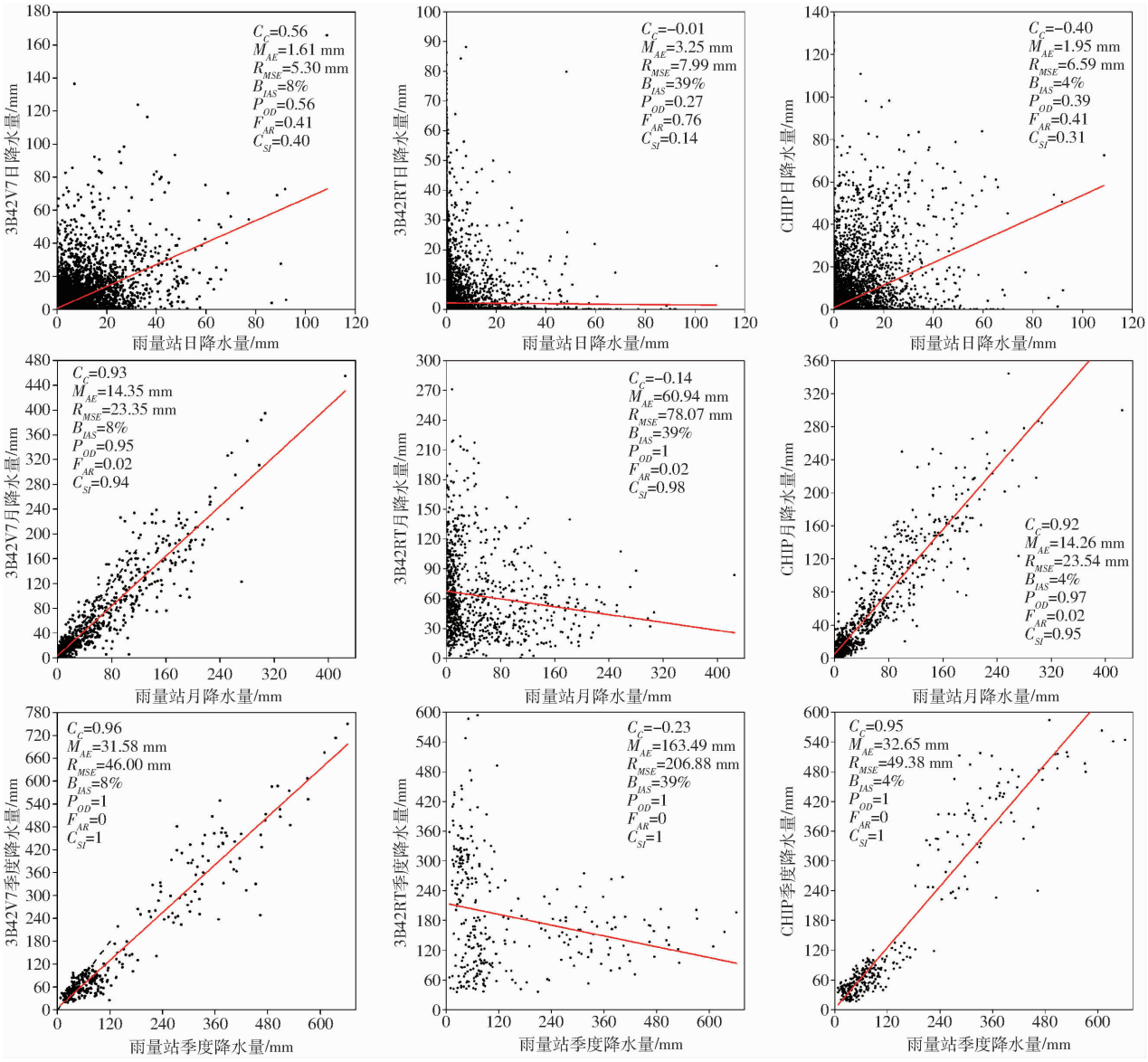


图 6　流域尺度 13 个编码栅格日、月、季度降水量散点图

Fig. 6　Precipitation scatter plots of 13 coding rasters in day, month and quarter for basin scale

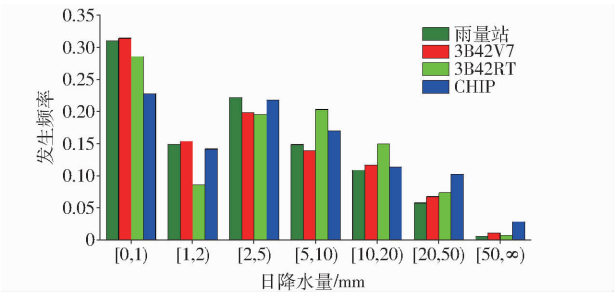


图 7　流域尺度 13 个编码栅格日降水强度概率分布

Fig. 7　Daily precipitation intensity probability distribution of 13 coding rasters for basin scale

0.05°空间分辨率下的 4 种高分辨率降水量产品。以 IDWP 作为真值，评估了 3B42V7、3B42RT、CHIP 的降水量空间探测精度。由于研究区满足缺测数据较少及时间上连续的雨量站数量较少，因此在同一个 0.25°的栅格上插值获得的 0.05°栅格降水量数据较为接近，导致空间分析结果图像中出现 0.25°的分界线，但这并不影响空间分析的准确性。

从图 9 中可以看出，3B42V7 和 CHIP 的 CC、RMSE 整体较好，而 3B42RT 的空间相关性较差，在流域的东南方向表现较好。在降水探测方面，3B42RT 较差，3B42V7、CHIP 在流域的东侧对降水量漏报程度较低，而 3 种遥感降水量数据的 CC、RMSE、POD 值在流域的西侧表现均较差，分析其原因可能是由于流域不同位置高程的分布对降水量的探测精度产生了影响，流域的东侧为低山地区，高程较大，统计指标均较高，而西侧为平原地区，高程较小，卫星对降水量的探测精度较差。

5　日径流过程模拟

降水是水文模型最重要的输入数据，准确的降水量数据不仅可以反映降水类型空间和时间上的分布，还可以提高水文模型的模拟效果[24]。尽管不同

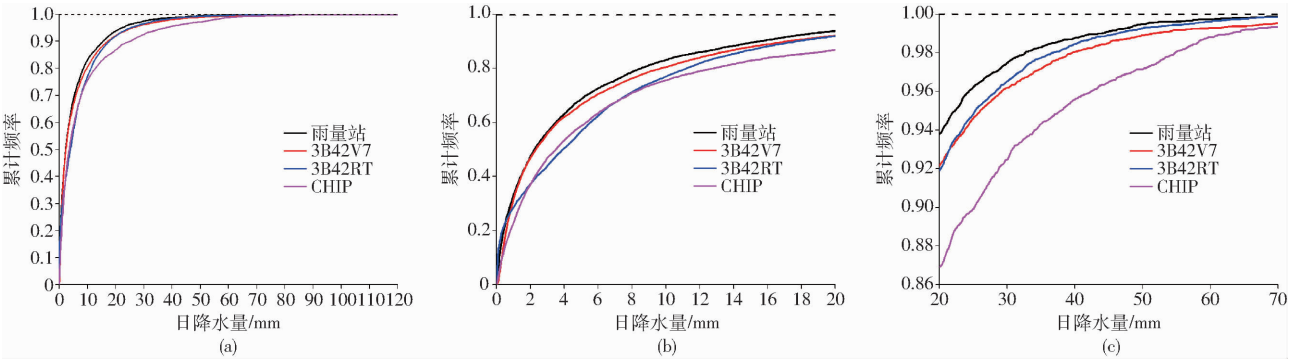


图 8 流域尺度 13 个编码栅格日降水强度累计概率分布图

Fig. 8 Precipitation intensity cumulative probability distributions of 13 coding rasters for basin scale

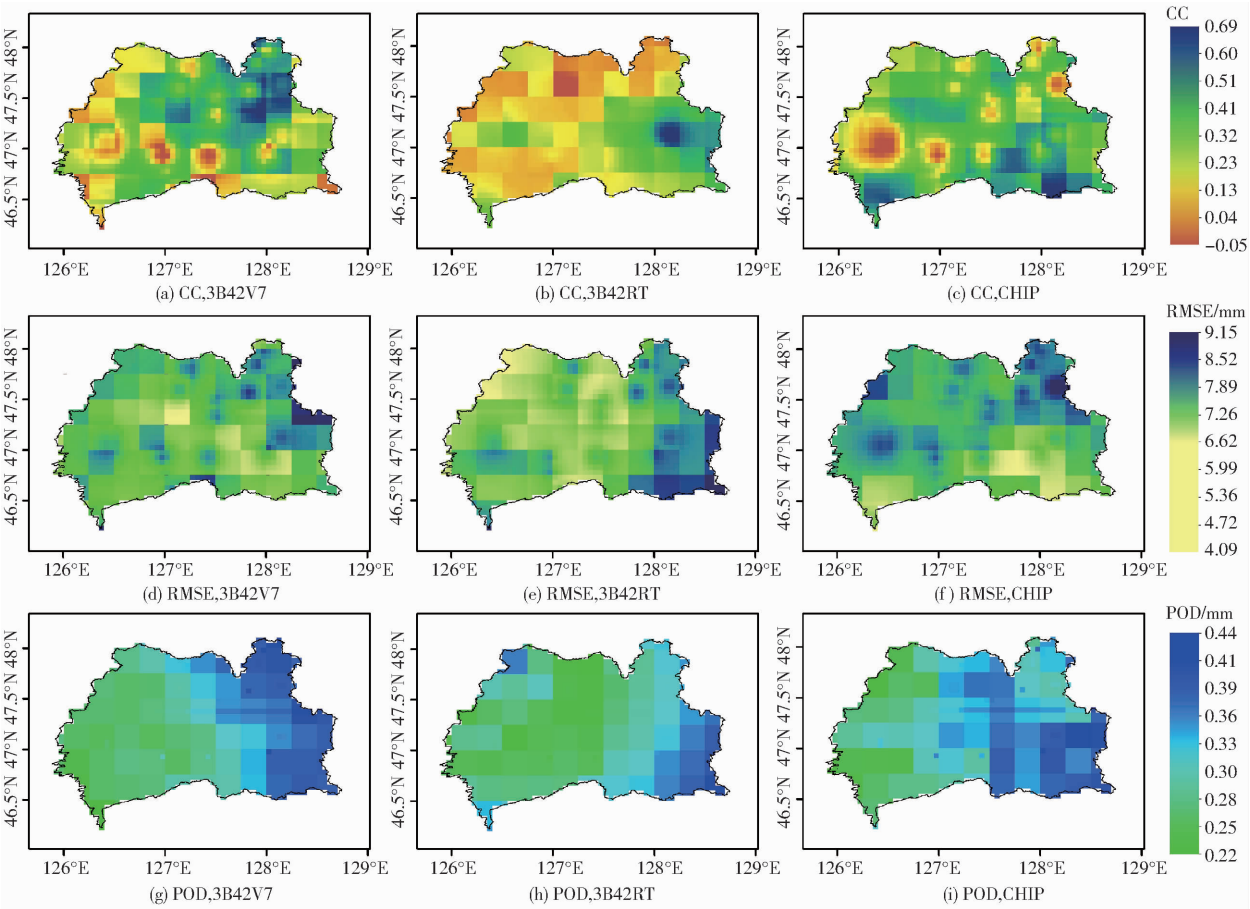


图 9 0.05°×0.05°空间分辨率下 3B42V7、3B42RT、CHIP 统计指标分布图

Fig. 9 Statistical indicators distributions of 3B42V7, 3B42RT and CHIP under spatial resolution of 0.05°×0.05°

的降水量产品在空间分辨率和探测精度上存在差异,但受水文模型参数不确定性的影响,在使用各降水量产品重新率定模型后,可能会得到相似的水文模拟结果[25]。为评估不同遥感降水量产品在水文过程模拟中应用的适用性,本文采用美国农业部(United States Department of Agriculture,USDA)农业研究中心(Agricultural Research Service, ARS)ARNOLD 等[26]开发的具有较强物理机制的 SWAT(Soil and water assessment tool)模型,其可以模拟流域内复杂的地形变化、土地利用方式、气候变化及不同管理措施对流域产流、产沙及农业非点源污染的产输出产生的影响[27]。分别建立不同降水量输入的 SWAT 模型(以下简称为雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP、IDWP 模型),选取兰西水文站 2001—2003 年的实测径流数据率定模型,2004—2006 年数据用于验证模型。采用纳什效率系数(NSCE)及相对偏差(BIAS)评价径流的模拟效果。根据以往的经验,当 $|B_{IAS}|<10\%$ 时,模拟结果为很好;当 $N_{SCE}>0.75$ 或 $10\%<|B_{IAS}|<15\%$ 时,模拟结果为较好;当 $0.36<N_{SCE}<0.75$ 或 $15\%<|B_{IAS}|<25\%$ 时,模拟结果令人满意;当 $N_{SCE}<0.36$ 或 $|B_{IAS}|\geqslant 25\%$ 时,模拟结果为较差[28]。

5.1　参数敏感性分析及率定结果

模型率定前对径流模拟结果影响较大的参数进行敏感性分析可以提高模型计算的准确性，减少实测值与模拟值的累积误差，本文选取与 SWAT 模型地表径流产流过程、土壤水与地下水运动过程、蒸散发及融雪过程等相关的 25 个参数，利用 SWAT－CUP 的全局敏感性分析模块，采用拉丁超立方体抽样法，模型计算 1 500 次，以 t 值和 p 值作为敏感性评价指标，t 值给出了敏感性程度，绝对值越大越敏感；p 值决定了敏感性的显著性，值越接近于 0，越显著。模型计算采用 SUFI－2（Sequential uncertainties fitting ver－2）算法[29]。最终确定的雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP、IDWP 模型的参数及敏感性值见图 10。对径流模拟影响较大的参数为河岸调蓄的基流 α 因子 ALPHA_BNK、SCS 径流曲线数 CN2、最大冠层截留量 CANMX、土壤蒸发补偿系数 ESCO 等。雨量站和 IDWP 的敏感性曲线具有一致的变化规律。模型初次率定的过程中需不断的调整参数以增大目标函数 NSCE，导致地表径流、土壤水和地下水量含量不断变化，与其相关的参数较为敏感，而 SMTMP 融雪积温、6 月 21 日和 12 月 21 日的融雪因子 SMFMX、积雪温度滞后因子 TIMP 敏感性较低。CN2 影响着来自降水补给的地表径流产流量，CHIP 与 3B42V7 的 CN2 敏感性较低。雨量站模型对应的参数率定结果见表 2。

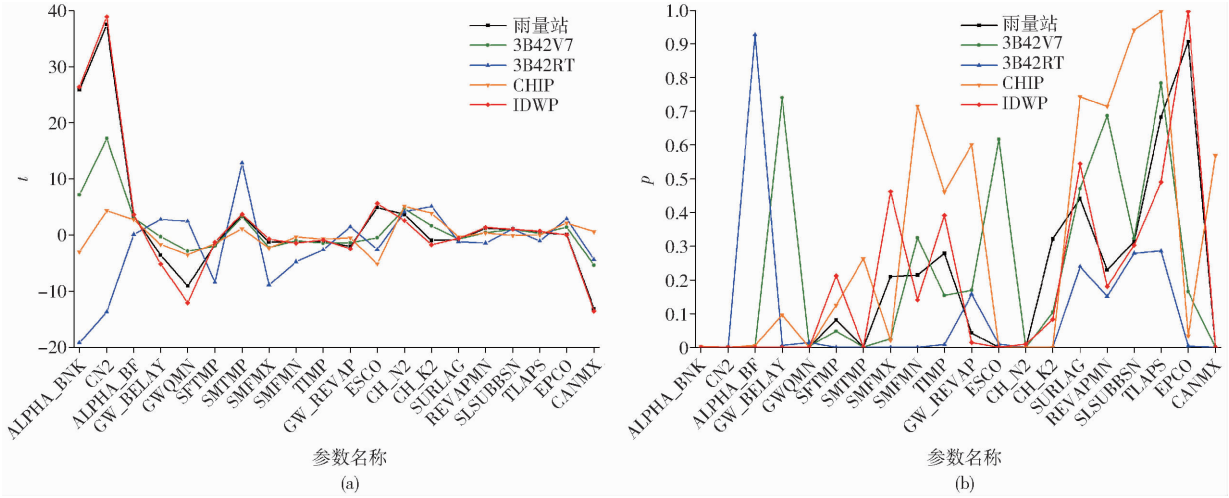


图 10　雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP、IDWP 模型的参数敏感性分析结果

Fig. 10　Parameter sensitivity analysis results of rainfall station, 3B42V7, 3B42RT, CHIP and IDWP models

5.2　日径流过程模拟对比

率定期与验证期的日径流量模拟结果见图 11a、11b，率定期雨量站、3B42V7、3B42RT、CHIP、IDWP 模型的 NSCE 值为 0.89、0.77、0.20、0.84、0.87，BIAS 值为 1.10%、5.51%、－12.65%、－20.70%、2.85%，率定期模拟效果均较好，而 CHIP 的 BIAS 值相对较大。由于 2003 年呼兰河流域发生了继 1985 年之后 20 年间的全流域性大洪水[30]，洪水峰值很大，模型率定过程中为减小误差，过于拟合峰值，导致验证期流量模拟效果与率定期相比相对较差。验证期的 NSCE 值为 0.79、0.67、0.26、0.56、0.77，BIAS 值为 4.69%、22.26%、15.35%、－8.39%、－1.87%，雨量站和 IDWP 模拟效果较好，3B42V7 和 CHIP 模拟结果令人满意，3B42RT 模拟效果较差。验证期日流量的累计概率分布见图 11c，雨量站、3B42V7 和 IDWP 与实测值的一致性较好，3B42RT 对流量峰值的模拟较差。

6　结论

（1）与雨量站流域日平均总降水量相比，3B42V7、3B42RT、CHIP 高估地面降水量 5.43%、41.24%、3.37%。3B42RT 在流域日平均时间尺度的相关性较差，其对降水事件的漏报程度最小，但对降水量的错报程度较高，3 种数据成功观测到有降水发生的比例较为接近，均在 0.55 左右。月时间尺度上，3B42V7 和 CHIP 与雨量站降水量的一致性较好，CC 为 0.98、0.97。3B42RT 整体高估了月平均降水量，其在寒区温度较低及温度为负值的月份月平均降水量均大于其他 3 种降水量产品。

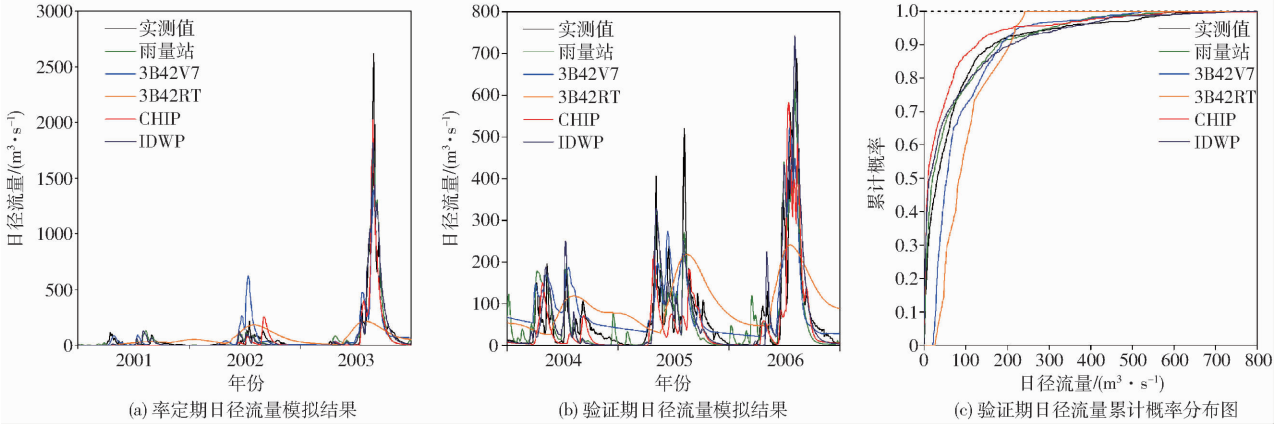
（2）对编码栅格的比较，3B42V7 在流域日时间尺度上很接近地面观测降水量。3B42V7 和 CHIP 的错报程度较低，遥感降水量产品对月和季度降水量观测的准确性要优于日降水量，经过全球地面资料校正的 3B42V7 在寒区对不同时间尺度降水量的探测精度均高于其他 2 种降水量产品。

表 2 利用雨量站降水量数据率定的 SWAT 模型参数取值

Tab. 2 Parameter values of SWAT model calibrated by rainfall station precipitation

参数	率定方式	初始范围		最终范围		最优值
		最小值	最大值	最小值	最大值	
河岸调蓄的基流 α 因子 ALPHA_BNK	V	0	1.0	0.62	0.79	0.64
SCS 径流曲线数 CN2	R	-0.20	0.2	0.14	0.20	0.18
基流 alpha 因子 ALPHA_BF	V	0	1.0	0.52	0.68	0.57
地下水延迟时间 GW_DELAY	V	0	500.0	0	49.28	12.47
发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值 GWQMN	V	0	5000.0	0	500.00	298.50
降雪气温 SFTMP/℃	V	-20.00	20.0	-20.00	-15.51	-19.53
融雪基温 SMTMP/℃	V	-20.00	20.0	6.92	14.15	10.51
6 月 21 日的融雪因子 SMFMX/(mm·(℃·d)$^{-1}$)	V	0	20.0	4.53	7.95	5.36
12 月 21 日的融雪因子 SMFMN/(mm·(℃·d)$^{-1}$)	V	0	20.0	5.51	10.78	8.30
积雪温度滞后因子 TIMP	V	0	1.0	0.47	0.71	0.50
地下水的 revap 系数 GW_REVAP	V	0.02	0.2	0.12	0.14	0.13
土壤蒸发补偿系数 ESCO	V	0	1.0	0.35	0.52	0.48
主河道河床曼宁系数 CH_N2	V	-0.01	0.3	0.17	0.24	0.17
主河道冲击物的有效渗透系数 CH_K2/(mm·h^{-1})	V	-0.01	500.0	82.08	139.32	135.49
地表径流滞后系数 SURLAG	V	0.05	24.0	14.73	19.46	16.43
浅层地下水再蒸发系数 REVAPMN	V	0	500.0	135.09	263.50	148.83
平均坡长 SLSUBBSN/m	R	0	0.2	0.02	0.08	0.07
气温直减率 TLAPS/(℃·km^{-1})	V	-10.00	10.0	4.57	6.84	6.52
植物吸收补偿因子 EPCO	V	0	1.0	0.14	0.28	0.24
最大冠层截留量 CANMX/mm	V	0	100.0	37.88	68.27	63.80

注:V 为现有的参数值被抽样值取代,R 为现有的参数值乘以(1 + 抽样值)。



(a) 率定期日径流量模拟结果 (b) 验证期日径流量模拟结果 (c) 验证期日径流量累计概率分布图

图 11 日径流量模拟结果与累计概率分布图

Fig. 11 Results of daily flow simulation and cumulative probability distribution

(3)对降水强度的探测方面,CHIP 过低地估计了微量降水,低估了 27%,过高地估计了暴雨事件的发生,在(20 mm,70 mm]降水强度区间,与雨量站观测相比过高估计了 103.58%。3B42RT 过低估计了小雨,低估了 42%,过高估计了(5 mm,20 mm]降雨强度区间即高强度中雨和低强度大雨。

(4)空间尺度评估方面,3B42V7 和 CHIP 的 CC、RMSE 整体较好。流域高程较大的低山地区,遥感降水量的探测精度很好,在高程较低的平原探测精度较差。

(5)本文选择各年日流量峰值变化极不稳定的时间段研究遥感降水量对日径流的模拟效果,率定期模拟效果均较好,验证期雨量站、3B42V7、CHIP、IDWP 模拟效果相对较好,3B42RT 对流量峰值的模拟较差。

参 考 文 献

1 LEHNER B, DÖLL P, ALCAMO J, et al. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in europe: a continental, integrated analysis[J]. Climatic Change, 2006, 75(3):273 - 299.

2 PRAKASH S, MITRA A K, AGHAKOUCHAK A, et al. Error characterization of trmm multisatellite precipitation analysis (TMPA - 3B42) products over India for different seasons[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(3):1302 - 1312.

3 江善虎,任立良,雍斌,等. TRMM 卫星降水数据在洙水流域径流模拟中的应用[J]. 水科学进展,2014,25(5):641 - 649.

JIANG Shanhu, REN Liliang, YONG Bin, et al. Hydrological evaluation of the trmm multi-satellite precipitation estimates over the Mishui basin[J]. Advances in Water Science,2014,25(5):641 – 649. (in Chinese)
4 谷黄河,余钟波,杨传国,等.卫星雷达测雨在长江流域的精度分析[J].水电能源科学, 2010, 28(8):9 – 12.
GU Huanghe, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Application of satellite radar observed precipitation to accuracy analysis in Yangtze River basin [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8):9 – 12. (in Chinese)
5 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 Guoqiang, LI Zhe, XUE Xianwu, 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)
6 成璐, 沈润平, 师春香,等. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象, 2014,40(11):1372 – 1379.
CHENG Lu, SHEN Runping, SHI Chunxiang, et al. Evaluation and verification of cmorph and trmm 3B42 precipitation estimation products[J]. Meteorological Monthly, 2014,40(11):1372 – 1379. (in Chinese)
7 TUO Y, DUAN Z, DISSE M, et al. Evaluation of precipitation input for swat modeling in alpine catchment: a case study in the Adige river basin (Italy)[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573:66 – 82.
8 嵇涛, 刘睿, 杨华,等. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究——以川渝地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 108 – 117.
JI Tao, LIU Rui, YANG Hua, et al. Spatial downscaling of precipitation using multi-source remote sensing data: a case study of Sichuan—Chongqing Region[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(1):108 – 117. (in Chinese)
9 杨云川,程根伟,范继辉,等.卫星降雨数据在高山峡谷地区的代表性与可靠性[J].水科学进展, 2013, 24(1):24 – 33.
YANG Yunchuan, CHENG Genwei, FAN Jihui, et al. Representativeness and reliability of satellite rainfall dataset in alpine and gorge region[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1):24 – 33. (in Chinese)
10 POMBO S, OLIVEIRA R P D. Evaluation of extreme precipitation estimates from trmm in Angola[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523:663 – 679.
11 LIU Z. Comparison of versions 6 and 7 3-hourly TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products[J]. Atmospheric Research, 2015, 163:91 – 101.
12 LI L, HONG Y, WANG J, et al. Evaluation of the real-time trmm-based multi-satellite precipitation analysis for an operational flood prediction system in Nzoia Basin, Lake Victoria, Africa[J]. Natural Hazards, 2009, 50(1):109 – 123.
13 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗, 等. 中国寒区分布探讨 [J]. 冰川冻土, 2005(4): 469 – 475.
CHEN Rensheng, KANG Ersi, WU Lizong, et al. Cold regions in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005(4): 469 – 475. (in Chinese)
14 何惠. 中国水文站网 [J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 460 – 465.
HE Hui. China gauging station network [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 460 – 465. (in Chinese)
15 阴法章, 关晓梅, 何亚龙. 黑龙江省水文站网密度分析及站网调整方向 [J]. 东北水利水电, 2007, 25(7): 36 – 38.
16 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36 – 42.
WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 36 – 42. (in Chinese)
17 EBERT E E, JANOWIAK J E, KIDD C. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(1):47 – 64.
18 DUAN Z, LIU J, TUO Y, et al. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales[J]. Science of the Total Environment, 2016,573:1536 – 1553.
19 YONG B, REN 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.
20 LI H, HONG Y, XIE P, et al. Variational merged of hourly gauge-satellite precipitation in China: preliminary results[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015,120(19):9897 – 9915.
21 TIAN Y, PETERSLIDARD C D, CHOUDHURY B J, et al. Multitemporal analysis of trmm-based satellite precipitation products for land data assimilation applications[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(8):1165 – 1183.
22 TAN M, IBRAHIM A, DUAN Z, et al. Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2):1504 – 1528.
23 郑红,王艳秋,苍蕴琦. 哈尔滨的四季与季节划分指标的探讨[J]. 黑龙江气象,2001(3):32 – 33.
24 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 Changming, BAI Peng, WANG Zhonggen, et al. Study on prediction of ungaged basins:a case study on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):272 – 282. (in Chinese)
25 XUE X, HONG Y, LIMAYE A S, et al. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based multi-satellite precipitation analysis over the Wangchu basin of Bhutan: are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? [J]. Journal of Hydrology, 2013, 499:91 – 99.
26 ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73 – 89.
27 AOUISSI J, BENABDALLAH S, CHABAÂNE Z L, et al. Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with swat—application in data-scarce rural Tunisia[J]. Agricultural Water Management, 2016, 174:39 – 51.
28 PEREIRA D D R, MARTINEZ M A, PRUSKI F F, et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: calibration and validation tests[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 7:14 – 37.
29 KHALID K, ALI M F, RAHMAN N F A, et al. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm[J]. Procedia Engineering, 2016, 162:441 – 447.
30 刘春友, 周永辉, 荆楚坤. 呼兰河 2003 年洪水与 1985 年洪水对比分析[J]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(4):16.