

黄河源区多源融合降水产品综合评价及其水文效应评估

雍 斌¹,周振杨¹,陶 新²,吕 毅¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 黄河水利委员会水文局,河南 郑州 450004)

摘要:以黄河源区为研究区,对多源融合降水产品(DML-TPP)进行了综合评价,并将其与纯红外遥感降水产品 PERSIANN-CCS、卫星降水产品 GSMaP_G、再分析数据集 ERA5-L 进行了比较。结果表明:ERA5-L 对降水量存在一定程度高估,但较好地反映了整个黄河源区降水的时空格局;GSMaP_G 在降水量估算方面较其他产品表现更优秀,在以气象站插值数据率定栅格新安江模型参数的方案中,GSMaP_G 对黄河源区门玛区间的水文效应评估结果更好;在采用降水产品对栅格新安江模型进行参数率定的方案中,基于 DML-TPP 和 ERA5-L 的径流模拟在平水年表现最佳,基于 GSMaP_G 的模拟结果则更好地复现了丰水年的洪峰。

关键词:多源融合降水产品;水文模拟;栅格新安江模型;误差传播;黄河源区

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)02 - 0047 - 11

Comprehensive evaluation and hydrological effect evaluation of multi-source fusion precipitation product in the Yellow River source area//YONG Bin¹, ZHOU Zhenyang¹, TAO Xin², LYU Yi¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Taking the Yellow River source area as the study area, a comprehensive evaluation was conducted on the multi-source fusion precipitation product (DML-TPP), and it was compared with the pure infrared rainfall product PERSIANN-CCS, satellite precipitation product GSMaP-G, and reanalysis dataset ERA5-L. The results show that ERA5-L overestimates precipitation to a certain extent, but reflects the spatiotemporal pattern of precipitation in the entire Yellow River source area well. GSMaP_G performs better in precipitation estimation compared to other products. In the scheme of calibrating the parameters of the grid Xin'anjiang model with interpolated data from meteorological stations, GSMaP_G has a better evaluation of hydrological effects in the Menma section of the Yellow River source area. In the scheme of using precipitation products to calibrate the parameters of the grid Xin'anjiang model, the runoff simulation based on DML-TPP and ERA5-L performed the best in normal years, while the simulation results based on GSMaP_G better reproduced the flood peak in wet years.

Key words: multi-source fusion precipitation product; hydrological simulation; grid Xin'anjiang model; error propagation; the Yellow River source area

黄河源区是黄河流域重要产流区,素有“黄河水塔”之称^[1]。黄河源区集水面积 12.2 万 km²,仅占黄河流域总面积的 15%,但其多年平均径流量为 205.2 亿 m³,占黄河总径流量的 38%。上游源区来水对整体资源性缺水的黄河流域来说至关重要,因此黄河源区的水文模拟对整个黄河流域都起着举足轻重的作用。然而,由于降水地面观测资料的匮乏以及高海拔山区降水分布的高时空变异性,黄河源区的水文模拟仍存在较大的不确定性^[2]。

在过去数十年中,学者们通过整合国际气象卫星数据、学习算法以及资料同化技术,生产出了不同时空分辨率的降水产品^[3],成为无缺资料地区获取降水信息的重要替代资源。ERA5-L (European Centre for medium-range weather forecast reanalysis 5-land)作为再分析数据集 ERA5 陆地部分的改进版,利用 ERA5 的气象强迫场来驱动考虑水文过程的陆面模式,提高了空间分辨率和精度^[4]。PERSIANN-CCS (precipitation estimation from remotely sensed

基金项目:国家自然科学基金项目(U224320068)
作者简介:雍斌(1975—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yongbin@hhu.edu.cn

information using artificial neural networks-cloud classification system) 主要依靠红外亮温图像观测到的云高和范围对云特征进行分类,并利用人工神经网络对降水量进行估算^[5-6]。最新一代的 GPM 卫星降水产品 GSMaP 在我国展现出了较高的精度,尤其是经过地面观测数据校正的 GSMaP_G (global satellite mapping of precipitation_gauge)^[7-8]。Lyu 等^[9]引入双机器学习方法,将气象要素作为辅助变量输入融合算法中,生成了高精度多源融合降水产品 DML-TPP,统计指标表明该产品在识别降水事件和降水量估计方面展现出更高的精度。然而,卫星降水产品存在许多缺陷,特别是在黄河源区这样地形复杂的地区,比如在识别小雪和中雪方面存在缺陷^[10],还存在精度与海拔高度、降雨强度密切相关等问题^[11]。章跃芬^[12]在淮河流域对 CHIRPS、TRMM 3B42V7 和 PERSIANN-CDR 3 种卫星降水产品的水文效应进行了系统评估,发现由于产品采用的校正算法削弱了降水极值,卫星降水产品驱动的水文模型存在高流量低估、低流量高估的现象。冯克鹏等^[13]在 9 个不同地区小流域的研究发现 TRMM-3B42V7 较低的传感器精度和分辨率限制了其在试验流域的径流模拟效果。可见,良好的模拟结果需要高质量的降水输入并结合适用的水文模型^[14],降水产品在黄河源区的可用性仍有待进一步研究。

目前,针对降水产品在黄河源区的精度和水文模拟方面的应用效果已有一系列研究^[15-16]。例如:刘兆晨等^[17]对 GPM 卫星的 3 种日降水产品和 TRMM 卫星的 2 种日降水产品在黄河源区的适用性进行了评估;张昂等^[18]使用融合降水数据 CMORPH 对黄河源区汛期径流进行了模拟分析。然而,现有的研究大多针对单一降水产品或某一类型产品进行评估,其中多为未校正或分辨率较低的卫星降水产品,对不同类型降水产品适用性的研究较少。此外,由于降水产品在精度方面的限制,现有的研究主要聚焦于月尺度的径流模拟,针对降水产品应用在日尺度流量模拟方面的研究较少。鉴于此,本文针对最新发布的多源融合降水产品 DML-TPP 进行综合评价,将其与 PERSIANN-CCS、GSMaP_G、ERA5-L 进行比较,并将气象站插值数据和降水产品作为输入率定水文模型的参数,探究多源融合降水产品在黄河源区的水文效应。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河源区指唐乃亥水文站以上的黄河上游流域(图 1),位于北纬 32.1°~36.0°、东经 95.8°~

103.5°,平均海拔 4 000 m 左右,地形复杂,流域总面积约为 12.2 万 km²^[19]。虽然流域面积仅占整个黄河流域的 16.2%,但提供了黄河流域 35% 以上的流量,是黄河流域径流贡献最大的子流域之一^[14]。黄河源区地处半干旱气候区,气候条件复杂,具有典型的高原气候特征。然而,源区内没有地基测雨雷达,布设雨量站的数量也较少,实测数据的匮乏给黄河源区的径流模拟带来了挑战。位于门堂与玛曲站之间的黄河源区子流域(以下称为门玛区间)以 22% 的面积占比贡献了 44% 的径流量,是黄河源区最重要的产流区,选取该区域评估降水产品的水文效应。

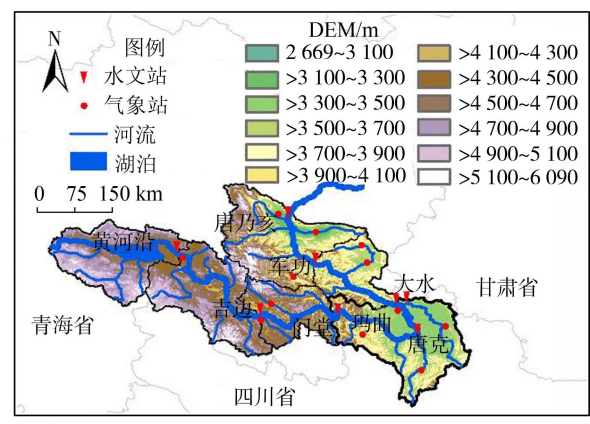


图 1 黄河源区概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River source area

1.2 数据来源

采用气象站插值数据^[20-22]作为降水产品的对照,气象站点分布如图 2 所示。不同降水产品的特征参数见表 1,本文研究期为 2015—2019 年。蒸散发数据来自中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集^[23-26],该数据集提供了由 Hargreaves 公式^[27]得到的潜在蒸散发的空间分布,空间分辨率为 1 km。土壤质地分布数据来自世界土壤数据库 HWSD (<https://www.fao.org/soils-portal/>),该数据提供了各个格网点的土壤类型、土壤相位、土壤理化性状等信息,空间分辨率为 1 km。

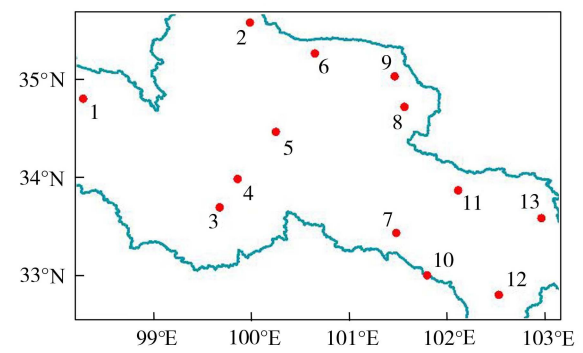


图 2 气象站点分布

Fig. 2 Distribution of meteorological stations

表 1 不同降水产品的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of different precipitation products

降水产品	单位	时间范围	空间范围	分辨率	数据类型
DML-TPP	mm/d	2015—2019 年	青藏高原	0.1°	多源融合降水数据
PERSIANN-CCS	mm/d	2003 至今	全球	0.04°	红外遥感数据
GSMaP_G	mm/d	2000 至今	全球	0.1°	多卫星联合降水反演数据
ERA5-L	mm/d	1959 至今	全球	0.1°	再分析数据

2 研究方法

2.1 评价指标

采用点对网格匹配的方法,选择至少包含一个或以上雨量站的网格进行时空匹配。为了量化 4 种降水产品的精度,使用相关系数(CC)、偏差(BIAS)和均方根误差(RMSE)对结果进行评价。CC 反映线性相关性的度量;BIAS 代表误差大小,BIAS 大于 0 意味着降水产品高估了降水,反之亦然;RMSE 反映平均误差大小。一般来说,CC 越高、BIAS 越低,表明降水产品性能越好。同时,还采用命中率 P_{OD} 、误报率 F_{AR} 和关键成功指数 C_{SI} 来描述降水产品的检测性能。命中率代表降水产品正确检测到的实际降水事件的比例;误报率代表降水产品错误识别的降水事件的比例;关键成功指数是平衡命中率和误报率的综合统计度量,能够体现所选降水产品的整体检测性能。根据 Yong 等^[28]的研究,使用 1 mm/d 作为降雨雨强阈值来衡量是否发生降水事件,大于或等于 1 mm/d 认为发生了降雨,小于 1 mm/d 则认为未发生。命中率、误报率和关键成功指数的计算公式为

$$P_{OD} = H / (H + M) \tag{1}$$

$$F_{AR} = F / (H + F) \tag{2}$$

$$C_{SI} = F / (H + F + M) \tag{3}$$

式中: H 为降水产品命中降水事件数; M 为降水产品漏报降水的事件数; F 为降水产品误报降水的事件数。

2.2 栅格新安江模型

新安江模型是建立在蓄满产流机制上的降雨径流水文概念模型^[29],已广泛应用于我国湿润和半湿润地区^[30-35]。为了增强其适用性,学者们根据需求开发了基于网格的栅格新安江模型^[36]。栅格新安江模型采用 3 层土壤蒸散发和蓄满产流方案,在每个运行网格中模拟实际蒸散发和总产流。首先,每个栅格内的总产流通过自由水库划分为地表径流、壤中流和地下径流 3 种径流类型;其次,分别采用 3 个线性水库进行坡面汇流,通过滞时演算法进行河网汇流;最后,通过分段马斯京根法得到流域出口的模拟流量。使用双线性插值法将气象站观测数据

和降水产品统一插值到 3 km 3 km 精度,作为栅格新安江模型的降水输入。栅格新安江模型包含 15 个参数,其中 8 个参数用于实际蒸散发和径流,7 个参数用于汇流,采用 Duan 等^[37]开发的全局优化算法对模型进行自动率定,纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,NSE)为评价指标。

评估降水产品的水文效应具有重要意义,首先可减少误差,卫星降水产品与地面观测降水数据在尺度匹配上存在差异(点与格网),直接对这两种数据进行比较可能会引入误差,而通过水文模型模拟可以将不同尺度的降水数据转换为统一的径流数据,从而减少由于尺度不同带来的误差;其次将卫星降水产品应用于水文模拟中,不仅是对降水产品的一种验证,也是其在水文领域的一种特殊应用,由于降水产品能够提供较高时间分辨率和详细的空间分布信息,可为水资源管理和洪水预测等提供有力支持。采用两种方案对降水产品的水文效应进行评估。方案 1:使用气象站插值数据作为降水输入,对栅格新安江模型参数进行率定;在确定模型参数的情况下,进行不同降水产品的水文效应评估,这个方案可用于分析降水误差对模拟结果的影响,也可分析栅格新安江模型对降水误差的容忍度。方案 2:以不同降水产品作为降水输入,分别对栅格新安江模型参数进行率定,这个方案可评估没有降水观测的无资料流域中降水产品的水文效应。

3 结果与分析

3.1 降水产品的综合评价

图 3 为 2015—2019 年黄河源区不同降水产品的月平均降水量对比。由图 3 可见,气象站观测的月平均降水量曲线呈 M 形,峰值出现在 6 月和 8 月,7 月降雨相对较少。这与黄河源区降水受青藏高原热力、动力以及高原季风影响,流域降水具有地区分布差异显著、季节分布不均匀等特点有关^[38]。由于地处东亚季风的边缘地带,西太平洋副高的强度和位置变化可导致东南暖湿气流对源区水分的补充有很大的不确定性,致使黄河源区降水在年际和季节尺度上的振荡较为明显,这也是黄河中下游历史上旱涝交替剧烈、干旱和洪水灾害频发的主要原

因^[39]。因此,黄河源区的地理位置和地形地貌特点,决定了其对气候的变化极其敏感。4种降水产品中除了 PERSIANN-CCS 在非汛期存在明显的误报以外,总体上呈现出相同的变化趋势。相较于其他降水产品,PERSIANN-CCS 在汛期的少数月份相对合理,整体表现较差,在6月之后出现了明显低估,冬季部分月份误差达160 mm以上,这可能与其降水反演方式有关。热红外数据反演算法由于过分依靠经验公式,导致其对冬季固态降水及夏季暖云降水探测效果较差^[40]。因此,对于纯红外数据,在冷季检测固态降水的性能较差,暖季内的检测能力尚可。由于高寒山区复杂的地形、气候条件以及地面站点匮乏,导致缺少有效的校正^[41],除了 PERSIANN-CCS 以外的大部分产品存在不同程度的高估问题。其中,GSMaP_G 表现最好,仅在5月和9月存在15%左右的高估;ERA5-L及DML-TPP在汛期高估的问题比GSMaP_G更加严重,特别是在7月和9月,存在20%以上的高估。总体来说,GSMaP_G 提供了误差相对稳定的月降水量,在黄河源区 GSMaP_G 的综合表现更加优秀,这与 Lyu 等^[42-43]的研究结论一致。

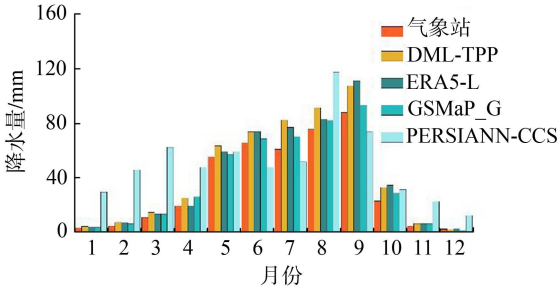


图3 2015—2019年黄河源区不同降水产品的月平均降水量对比

Fig. 3 Comparison of monthly average precipitation of different precipitation products in the Yellow River source area from 2015 to 2019

表2为各站点不同降水产品的日平均降水量。由表2可见,黄河源区的日平均降水量空间异质性较强,由东南向西北逐渐减少,这种空间格局主要由多种气候系统共同作用而导致。具体而言,在夏季,印度和东亚的季风带来了阿拉伯海和孟加拉湾以及南海和西太平洋的丰富水汽^[44],这导致黄河源区东南部出现强降水;在冬季,随着季风强度的减弱,喜马拉雅山脉阻挡了热带暖空气与以西伯利亚为中心的极地冷空气在天气尺度上的交换^[45],黄河源区所在的广袤高原地区只能获得盛行西风带来的少量降水。对于各站点的日平均降水量,GSMaP_G与气象站观测值最接近,为1.15~2.56 mm; ERA5-L次之,

与气象站观测值相比存在0.4 mm左右的差距;DML-TPP能够捕捉到雨量观测的空间变异性,但存在一定程度的高估,尤其是在黄河源区东南部,与气象站观测值相比差距为0.6 mm左右,与图2中DML-TPP呈现出的对汛期月降水量的高估一致;PERSIANN-CCS高估严重,与气象站观测值相比差距超过3.0 mm。GSMaP_G和ERA5-L的空间格局比DML-TPP更符合气象站观测值,而GSMaP_G比ERA5-L更接近气象站观测值。

表2 各站点不同降水产品的日平均降水量 单位:mm

Table 2 Daily average precipitation of each station					
unit: mm					
站点编号	气象站	ERA5-L	GSMaP_G	DML-TPP	PERSIANN-CCS
1	1.07	1.50	1.15	1.27	3.29
2	1.30	1.88	1.33	1.65	2.99
3	1.67	2.03	1.81	2.01	4.54
4	1.58	2.16	1.96	2.04	4.40
5	1.61	2.27	1.95	2.21	3.89
6	1.57	1.80	1.63	2.04	3.40
7	2.27	2.62	2.32	2.82	4.66
8	1.67	1.97	2.15	2.01	3.77
9	1.48	2.14	1.95	2.18	3.53
10	2.18	2.51	2.56	2.85	4.75
11	1.93	2.37	1.83	2.49	4.02
12	2.30	2.62	2.47	2.50	4.85
13	1.89	2.42	2.10	2.65	4.46

3.2 降水产品统计指标的空间分布

表3为各站点不同降水产品的评价指标值。由表3可见,在CC方面,ERA5-L和DML-TPP具有相似的空间分布,但ERA5-L的CC值明显更高,体现出其与气象站点测值的一致性。GSMaP_G表现较差,CC值为0.45左右;PERSIANN-CCS表现最差,CC值在0.3以下。所有降水产品在黄河源区北部的表现与南部相比都较差,ERA5-L和DML-TPP在高原东南部地形平缓区CC值更高,而GSMaP_G表现较好的区域则主要分布在黄河源区西部。ERA5-L作为再分析数据集与气象站观测值具有较好的相关关系,明显优于GSMaP_G和DML-TPP,而PERSIANN-CCS受复杂的地形和气候条件影响精度较差。这表明ERA5-L在地形复杂的地区具有独特的优势,尤其是在地面站点稀疏的地区^[46-48]。在RMSE方面,PERSIANN-CCS以外的产品都表现相对较好,ERA5-L和GSMaP_G的RMSE值均在1.2 mm/d左右。DML-TPP在黄河源区西部误差较小,在东部RMSE值相比西部略高。在BIAS方面,所有产品对降水量都存在高估现象,PERSIANN-CCS表现最差,BIAS值均在60%以上,ERA5-L次之,DML-TPP表现相对较好,GSMaP_G表现最好,BIAS值均在25%

表 3 各站点不同降水产品的评价指标值

Table 3 Evaluation index values of different precipitation products at various stations

站点 编号	ERA5-L			GSMaP_G			DML-TPP			PERSIANN-CCS		
	CC	RMSE/ (mm/d)	BIAS/%	CC	RMSE/ (mm/d)	BIAS/%	CC	RMSE/ (mm/d)	BIAS/%	CC	RMSE/ (mm/d)	BIAS/%
1	0.52	0.81	40.0	0.60	0.74	6.71	0.54	0.79	18.5	0.17	1.96	206
2	0.54	1.00	44.9	0.36	1.23	2.41	0.50	1.03	26.7	0.13	2.37	130
3	0.58	0.98	21.4	0.64	0.93	8.52	0.59	1.02	20.1	0.21	2.81	171
4	0.54	1.03	36.7	0.48	1.11	24.20	0.50	1.07	30.0	0.21	3.22	179
5	0.59	1.04	40.7	0.54	1.08	21.20	0.54	1.15	37.4	0.18	2.84	142
6	0.52	1.14	14.4	0.48	1.18	3.78	0.46	1.33	30.0	0.20	2.39	116
7	0.62	1.18	15.7	0.59	1.18	2.46	0.56	1.39	24.5	0.28	3.06	106
8	0.52	1.15	17.6	0.57	1.23	16.50	0.50	1.28	20.4	0.28	2.45	125
9	0.51	1.14	44.7	0.38	1.49	23.50	0.47	1.29	47.7	0.20	2.69	139
10	0.59	1.21	15.6	0.25	2.93	17.30	0.52	1.45	30.8	0.19	3.78	118
11	0.50	1.32	23.2	0.50	1.33	11.40	0.49	1.44	29.4	0.25	2.58	109
12	0.61	1.22	14.3	0.55	1.33	7.79	0.54	1.49	27.9	0.20	3.67	111
13	0.57	1.04	28.0	0.58	1.21	11.00	0.53	1.45	40.4	0.20	3.18	136

以下。ERA5-L 在非纯红外数据中表现最差, BIAS 值最高, 特别是在地形复杂的黄河源区西北部。同时, ERA5-L 与 DML-TPP 在 BIAS 值较高的地区显示出较低的 CC 值, 其 BIAS 值的空间分布与各自的 CC 值一致。GSMaP_G 在黄河源区内整体表现较好, 除在中部地区的 BIAS 值为 20% 左右, 其余地区均在 10% 以下。

表 4 为各站点不同降水产品的误差指标值。由表 4 可见, 对于命中率、误报率和关键成功指数 3 种误差指标, PERSIANN-CCS 均表现最差, 其误报率最高, 命中率和关键成功指数最低。除红外数据外的降水产品对实际降水事件都具有较高的命中率, 命中率都在 70% 以上。DML-TPP 在降水产品中展现出最高的命中率, 但其误报率与 ERA5-L 和 GSMaP_G 相比略微偏高, 普遍在 55% 以上。这种情况与 DML-TPP 高估降水频率密切相关, 特别是对于小雨。DML-TPP 对降水频率的高估增加了正确探测降水

的概率, 但同时也提高了误报的风险^[8-9], 进而导致 DML-TPP 的关键成功指数与 ERA5-L 和 GSMaP_G 相比相对较低。ERA5-L 亦展现出与 DML-TPP 类似的高命中特征, 但其误报率相对更低, 仅为 45% 左右。GSMaP_G 虽然展示出较低的误报率, 但其均值依然在 35% 左右。由于误报率较高, 几种降水产品的检测性能受到了较大的制约, 高误报率已成为限制这些降水产品广泛应用的关键因素。

Kolluru 等^[49]的研究表明再分析和卫星降水产品都表现出统计指标随雨强和季节变化的特征。为了探讨降水产品在黄河源区的稳定性, 从不同雨强和季节的角度对 4 种降水产品进一步分析。按照雨强大小将黄河源区的降雨分为 3 个等级, 大雨雨强为 20 mm/d 以上, 中雨雨强为 >5~20 mm/d, 小雨雨强为 1~5 mm/d。表 5 为 4 种降水产品在不同雨强下的评价指标值。由表 5 可见, 在 3 种不同雨强下, DML-TPP 在小雨时表现出最高的 CC 值, 达 0.36 左

表 4 各站点不同降水产品的误差指标值

Table 4 Error index values of different precipitation products at various stations

站点 编号	ERA5-L			GSMaP_G			DML-TPP			PERSIANN-CCS		
	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}
1	0.70	0.56	0.37	0.68	0.40	0.47	0.77	0.54	0.40	0.44	0.79	0.17
2	0.85	0.50	0.46	0.74	0.49	0.43	0.87	0.57	0.41	0.56	0.80	0.15
3	0.75	0.41	0.49	0.74	0.32	0.55	0.84	0.44	0.51	0.53	0.69	0.25
4	0.77	0.43	0.49	0.74	0.38	0.51	0.85	0.44	0.50	0.53	0.68	0.25
5	0.85	0.40	0.54	0.80	0.42	0.51	0.88	0.50	0.47	0.47	0.70	0.22
6	0.76	0.45	0.47	0.75	0.47	0.45	0.86	0.55	0.50	0.44	0.76	0.18
7	0.80	0.34	0.57	0.59	0.33	0.56	0.88	0.42	0.54	0.54	0.61	0.30
8	0.79	0.43	0.50	0.75	0.35	0.54	0.83	0.46	0.49	0.48	0.72	0.22
9	0.82	0.51	0.44	0.75	0.43	0.46	0.90	0.55	0.42	0.44	0.75	0.19
10	0.79	0.41	0.51	0.78	0.40	0.52	0.87	0.49	0.48	0.52	0.65	0.27
11	0.83	0.44	0.50	0.75	0.43	0.48	0.88	0.48	0.49	0.47	0.71	0.22
12	0.78	0.40	0.52	0.78	0.36	0.54	0.86	0.45	0.54	0.56	0.61	0.30
13	0.79	0.49	0.45	0.71	0.43	0.46	0.90	0.53	0.44	0.51	0.71	0.23

表 5 4 种降水产品在不同雨强下的评价指标值

Table 5 Evaluation index values of 4 precipitation products under different rainfall intensities

降水产品	CC			RMSE/(mm/d)			BIAS/%		
	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨
ERA5-L	0.31	0.44	0.40	5.26	6.29	21.21	-68.6	-25.8	110.9
GSMaP_G	0.34	0.41	0.36	6.72	9.37	20.88	-65.0	-28.1	93.4
DML-TPP	0.36	0.39	0.38	5.73	7.75	20.50	-59.4	-25.8	86.5
PERSIANN-CCS	0.09	0.15	0.22	14.34	20.49	28.86	-31.8	16.9	261.5

右,而 ERA5-L 在中、大雨时 CC 值最高,这与表 3 中 ERA5-L 与 DML-TPP 表现出的较高 CC 值相一致。在 RMSE 方面,在非红外数据降水产品中,ERA5-L 和 DML-TPP 在中、大雨时的 RMSE 值较高,而在弱降水条件下则相反,GSMaP_G 具有最高的 RMSE 值,超过了 9.72 mm/d。所有降水产品都显著高估了弱降水,3 种非纯红外降水产品的 BIAS 值普遍在 100%左右。然而,在中、大雨时,ERA5-L、DML-TPP、GSMaP_G 显示出普遍的降水低估,尤其是在强降水条件下,这与降水产品普遍存在的均化降水量相关^[50]。

郑子彦等^[38-39]的研究表明,黄河源区典型降雨类型可分为连续阴雨和强降雨两种,其中连续阴雨较多,具有强度小、历时长、空间分布差异大等特征;而强降雨具有强度大、历时短、局地性强等特征。这与表 5 中的小雨和大雨相对应,表明了不同降水产品面对不同降雨类型时的表现差异。GSMaP_G 和 DML-TPP 在小雨时具有更高的 CC 值和更低的 BIAS 值,表现出对连续阴雨的降水量估计的准确性

更高。而 ERA5-L 在中、大雨时具有更高的 CC 值,表现出了再分析算法面对强降水时的独特优势。

图 4 为 4 种降水产品在不同季节评价指标和误差指标的箱型图,其中冬季 PERSIANN-CCS 的 BIAS 值过高,因缺乏可比性未给出。由图 4(a)(b)(c)可见,GSMaP_G 在中位数上展现了其优越性,其中位数在 CC 和 RMSE 指标上与 ERA5-L 和 DML-TPP 相当,同时在 BIAS 指标上展现出较高的精度,基本位于 25%以下,与表 3 中 GSMaP_G 较低的 BIAS 值相吻合。然而,GSMaP_G 在 CC 指标上的箱型图显示出较长的箱体和较高的数据离散度,尤其在秋季,下四分位数接近 0.2,这表明 GSMaP_G 在 CC 指标上的稳定性存在波动。GSMaP_G 的 CC 指标在空间分布上存在地域性差异,这种差异性是导致箱型图离散趋势的关键因素。由图 4(d)(e)(f)可见,DML-TPP 在命中率上的表现较好,特别是在春季,其值普遍超过 0.82。相比之下,ERA5-L 和 GSMaP_G 的命中率在同期均低于 0.78。然而,DML-TPP 的误报率较高,这在一定程度上削弱了其在春秋两季关

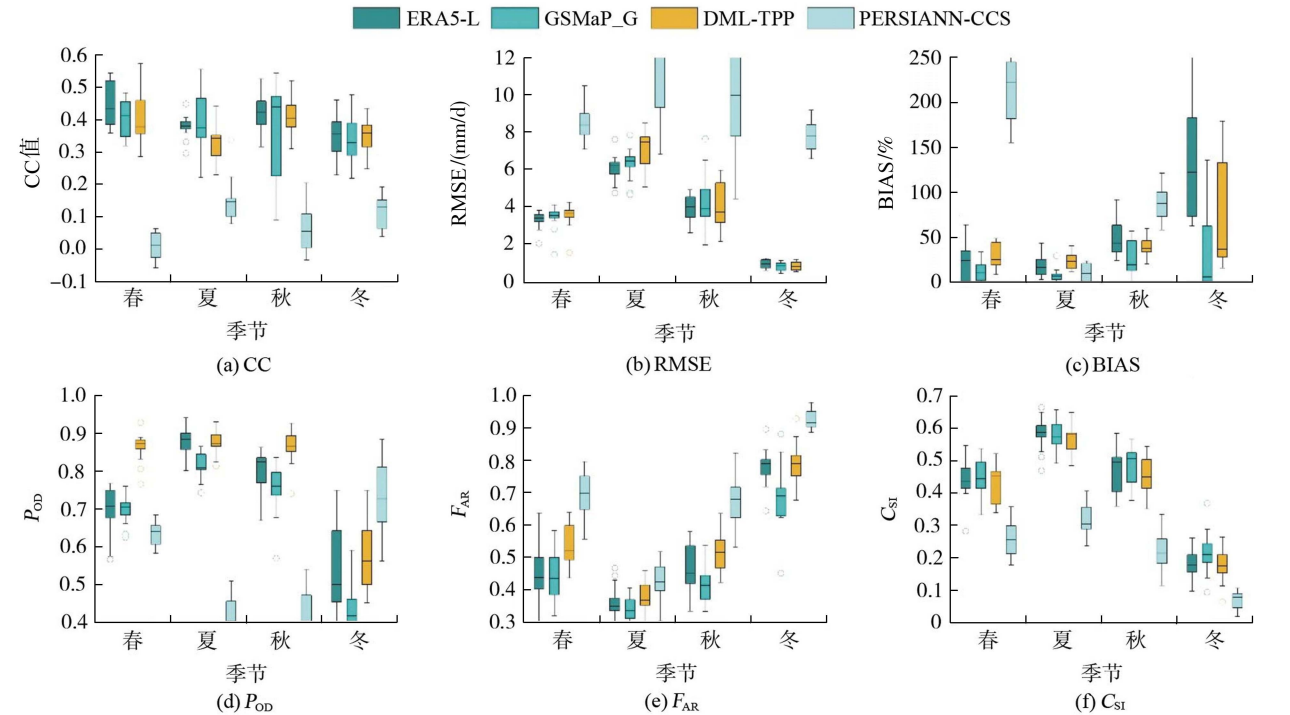


图 4 4 种降水产品在不同季节评价指标和误差指标的箱型图

Fig. 4 Box plots of evaluation indexes and error indexes for 4 precipitation products in different seasons

键成功指数上的表现,导致其落后于 ERA5-L 和 GSMaP_G。ERA5-L、GSMaP_G 与 DML-TPP 的 CC 值中位数相对稳定,但冬季的 BIAS 值显著高于其他 3 个季节。从图 4(d)(e)可见,ERA5-L 冬季的 BIAS 值高主要是由较高的误报率和较低的命中率造成的,此外冬季降水量较少也是一个重要原因。基于对命中率和误报率的分析,所有降水产品在识别冬季降水事件和估算冬季降水量方面精度较低,这主要与黄河源区冬季降水以降雪为主有关^[51]。一般来说,固体降水比液体降水的监测更加复杂,因此卫星传感器的降雪数据通常不可靠^[52],Ma 等^[53]也在青藏高原东北部的研究中发现了类似情况,干雪和湿雪在反射率上存在差异,这可能会影响传感器的降雪率反演算法。一方面,纯红外降水产品只通过云顶温度间接估计降雨,即云顶温度越低降水强度越大,无法区分降水类型;降雪发生时通常云顶温度较低,这导致纯红外降水产品难以准确估计固态降水强度^[54]。另一方面,尽管被动微波传感器高频通道对冰水混合物的辐射散射作用具有更强的灵敏度,但是由于雪花颗粒大小不均、形态各异导致其辐射特征较为复杂,基于高频被动微波遥感数据反演地表降雪率仍然存在诸多挑战^[55]。此外,由于雪的回波强度较弱,雷达反演算法在抑制噪声的同时也经常会出现错误的排除掉降雪信号,这限制了 GPM 双频降水雷达 DPR 对降雪的探测,进而影响了卫星降水产品对降雪的探测精度^[56]。

3.3 降水产品的水文效应评估

在门玛区间采用栅格新安江模型评估所选 4 种降水产品的水文效应。对于方案 1,使用气象站插值数据对栅格新安江模型进行验证,图 5 为玛曲站的日径流量模拟值与实测值的对比。由图 5 可见,纳什效率系数达到 0.91,日径流量模拟值与实测值吻合较好,栅格新安江模型能够较好地复现径流过程的关键洪峰,性能表现较为稳定。

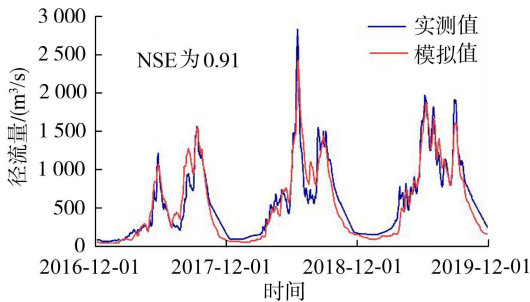


图5 玛曲站日径流量模拟值与实测值的对比
Fig. 5 Comparison between simulated and measured daily runoff values at Maqu Station

使用率定后的栅格新安江模型,将 4 种降水产

品作为输入数据,对比分析其在黄河源区的水文效应。由于 PERSIANN-CCS 在非汛期高估严重,在非汛期时降水量用气象站插值数据代替,仅评估其在汛期 5—9 月径流模拟的表现。图 6 为方案 1 中基于 4 种降水产品的日径流量模拟值与实测值对比。由图 6 可见,与基于气象站插值数据的模拟结果相比,基于 4 种降水产品的模拟效果均表现出明显的下降,尤其是 PERSIANN-CCS。除红外降水产品外,基于其他 3 种降水产品的模拟值与实测值相比都存在一定程度的高估,主要原因可能与其对降水量的高估有关。此外,利用气象插值数据率定的模型参数非最优参数也是一个重要原因。尽管存在高估,但除 PERSIANN-CCS 外的 3 种降水产品均较好地模拟了整个研究期的径流量,其整体变化趋势与实测值几乎保持一致,可见指标表现较好的降水产品可以用于重建径流的季节、年际和年代际变化。其中,基于 GSMaP_G 的径流模拟效果最好,这与其精度评估和探测能力的表现相一致。而基于 ERA5-L 和 DML-TPP 的模拟结果在汛期存在显著高估,这与表 3 和表 5 中表现的对弱降水事件较差的 CC 值、BIAS 值和在夏秋两季相对更高的 RMSD 值、BIAS 值密切相关。连续阴雨天气日降水量相对较小,但是其历时长、覆盖区域广的特点使得其总降水量对径流的贡献依然不容忽视,进而导致基于 ERA5-L 的径流模拟值整体高估。此外,虽然 PERSIANN-CCS 在评价指标上均表现较差,但是基于其的径流模拟结果还是显示出与实测值变化趋势的相似性,并能在一定程度上复现 6 月的洪峰,这表明其在径流模拟中依然有潜在的应用价值。

方案 2 中,利用 4 种降水产品分别对栅格新安江模型进行率定,结果如图 7 所示。将图 7 与图 6 进行对比,可见方案 2 中采用降水产品来率定栅格新安江模型,其模型模拟性能显著优于利用气象站插值数据率定的情况,相较于方案 1,方案 2 中的纳什效率系数均得到了显著提高。这表明利用降水产品率定水文模型参数能够中和降水输入所引起的系统偏差,从而增强水文模型对降水误差的容忍度。

由图 7 可见,基于 ERA5-L 的径流模拟效果最佳,纳什效率系数达 0.92,优于基于气象站插值数据的模拟效果。基于 DML-TPP 与 GSMaP_G 的模拟效果稍逊于 ERA5-L,PERSIANN-CCS 的表现相对较差。与利用气象站插值数据率定的栅格新安江模型相比,利用降水产品率定的模型基于 ERA5-L 和 DML-TPP 的模拟效果得到了显著改善,这与其相对更高的 CC 值相一致。基于 ERA5-L 和 DML-TPP 的模型模拟结果在平水年效果良好,但在丰水年的洪

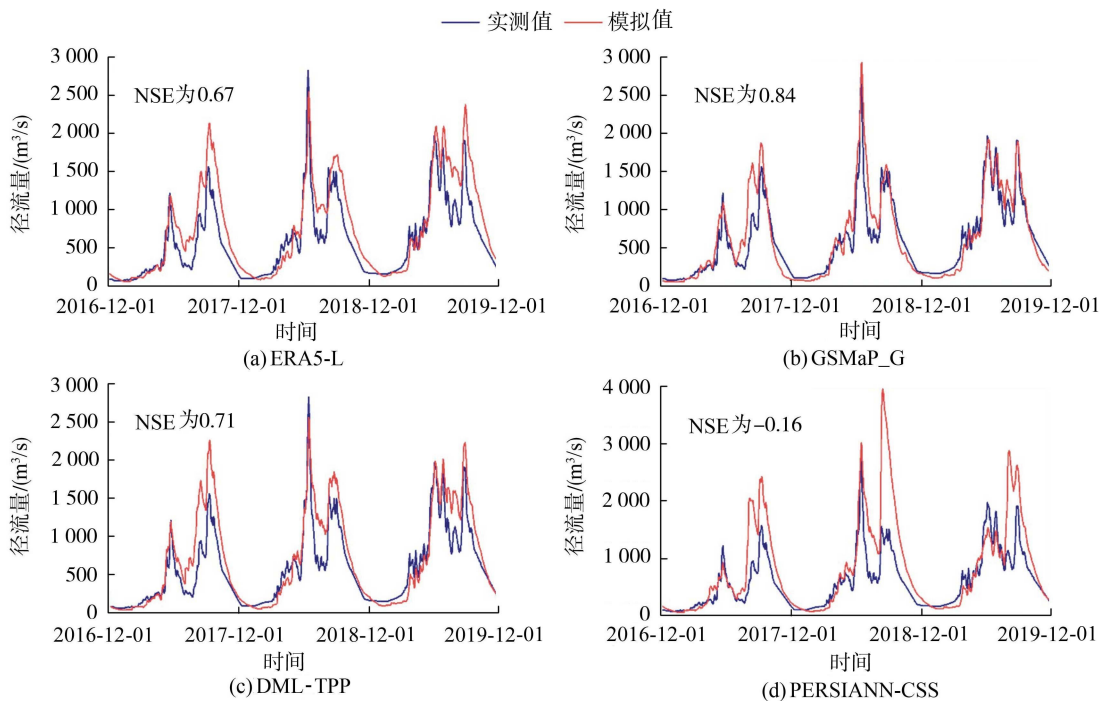


图 6 方案 1 中基于 4 种降水产品的玛曲站日径流量模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured daily runoff values at Maqu Station based on 4 precipitation products in scheme 1

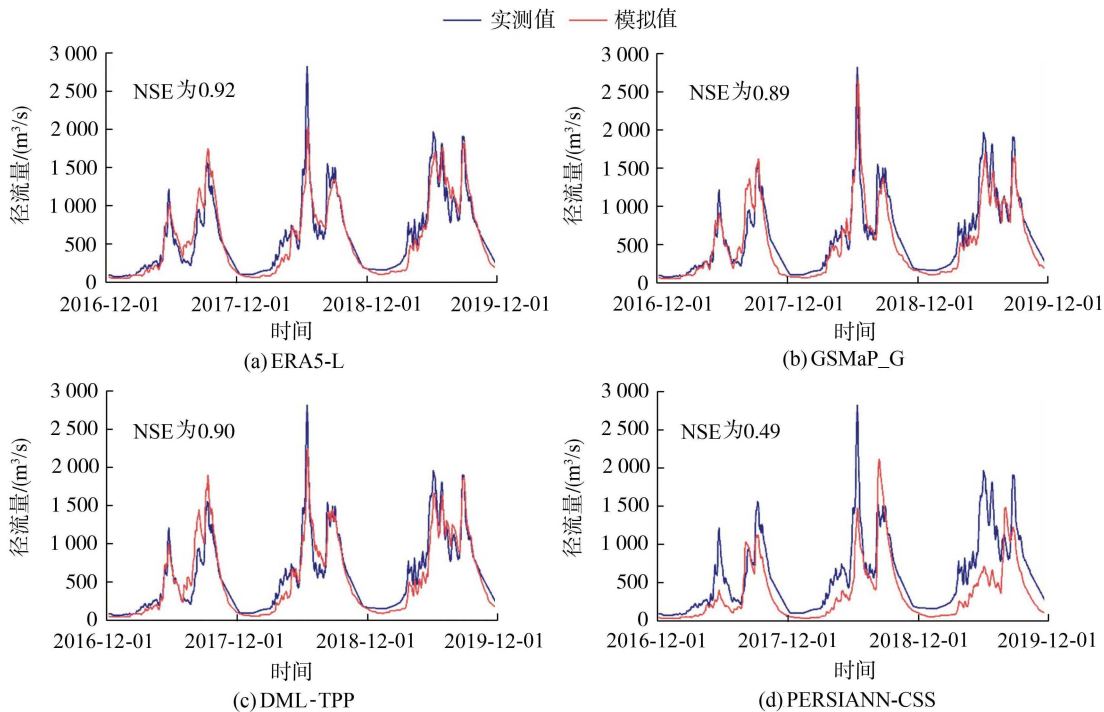


图 7 方案 2 中基于 4 种降水产品的玛曲站日径流量模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between simulated and measured daily runoff values at Maqu Station based on 4 precipitation products in scheme 2

峰流量上存在较大的误差。相比之下,GSMaP_G 能够较为准确地重现丰水年的洪峰径流变化,较好地复现了 2018 年汛期的洪峰流量,同时并未高估两洪峰间鞍部的径流量。因此,在使用降水产品驱动水文模型时,对于洪峰流量较大的丰水年,降水产品的

BIAS 指标对模拟效果起主导作用,精确的降水量估计能够确保水量的平衡,从而较好地再现汛期洪峰变化;对于洪峰流量相对较小的丰水年,水文模型的参数率定能够中和降水产品的系统性高估,使得在 CC 指标上表现更优的降水产品模拟效果更佳。

DML-TPP 作为多源融合降水产品,其融合过程中使用了 ERA5-L 和 GSMaP_G 等不同数据源。通过对比 DML-TPP 在不同方案下的模拟表现,可以发现其模拟效果介于 GSMaP_G 和 ERA5-L 之间,在变化趋势上更倾向于与 ERA5-L 保持一致。由于 ERA5-L 在黄河源区存在显著高估现象,受其影响,DML-TPP 在方案 1 中表现并不理想。当利用 DML-TPP 对栅格新安江模型进行率定后,模拟效果得到了显著提升。良好的融合方法使得 DML-TPP 不仅保留了 ERA5-L 在平水年趋势方面的优越性,也在一定程度上改善了对丰水年洪峰流量的低估。DML-TPP 体现了 ERA5-L 和 GSMaP_G 优势的同时,也继承了两者的误差,导致其在两者的优势区间内并未达到最佳表现。

多源融合降水产品的精度会受到系统误差的限制,这与时间和地形条件密切相关,特别是在青藏高原这样地形复杂、海拔差异显著的地区^[57]。一方面,青藏高原降水观测站点稀疏,站点观测降水易受风速等气象因素的影响,限制了观测数据的精度,进而影响其作为融合产品训练集和验证集的准确性和适用性。另一方面,现有降水产品在高海拔山区存在很大的不确定性,这与地形、观测点位置、风吹雪、低温环境等因素有关。青藏高原的复杂地形对降水的分布和强度有显著影响,现有的降水产品难以准确捕捉这种地形效应^[58],这导致现有降水产品在高原地区普遍存在相同的精度问题。孙云华^[40]的研究表明多种主流降水产品都有高估低降水率和低估高降水率的趋势。这些系统性误差在数据融合过程中同样被 DML-TPP 所继承,从而影响了降水数据集的准确性和可靠性。此外,全球尺度的再分析数据集往往分辨率较低,无法较好地反映复杂地形区域的降水事件^[59]。DML-TPP 在生成过程中使用 ERA5 的气象因素作为辅助变量,由于其空间分辨率仅为 0.25°,难以反映真实的高原气象条件。Lundquist 等^[60]发现动力降尺度法能够以再分析数据集为基础获取更加精细时空分辨率的气象资料,同时兼顾到环流和局地降水效应,特别是复杂地形对降水的影响。Gao 等^[61]通过综合评估不同尺度的降水模拟和基于观测的网格降水产品,发现对流尺度模拟可以显著减少降水量和降水频率的模拟误差,尤其是在小尺度特征上。因此,在后续的研究中可以考虑使用动力降尺度方法代替原本的双线性插值来获取更高分辨率的气象因子,或引入如 CLDAS^[62]等高精度的气象驱动数据产品作为补充。

4 结 论

a. 对于黄河源区的降水产品,ERA5-L 拥有与

气象站观测值更高的一致性,GSMaP_G 对降水量的估计效果最好。DML-TPP 表现出最高的命中率,但其误报率与 ERA5-L、GSMaP_G 相比偏高。

b. 利用气象站插值数据率定黄河源区的栅格新安江模型,模拟值与实测值吻合较好,表明栅格新安江模型在黄河源区具有较好的应用效果。采用率定后的参数,基于 ERA5-L 和 DML-TPP 的栅格新安江模型模拟径流效果存在系统性高估;基于 GSMaP_G 的模拟效果较好,这与其在降水量上表现出与气象站观测值更高的一致性相符合。

c. 利用各降水产品率定栅格新安江模型的参数显著提高了径流模拟效果。基于 ERA5-L 和 DML-TPP 的模拟效果最佳,尤其是对于平水年。GSMaP_G 的模拟效果稍逊于 ERA5-L 和 DML-TPP,但能较好复现丰水年的洪峰流量。

参考文献:

[1] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报,2008,39(1):52-58. (JIA Yangwen,GAO Hui,NIU Cunwen,et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(1):52-58. (in Chinese))

[2] 雍斌,张建云,王国庆. 黄河源区水文预报的关键科学问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):159-171. (YONG Bin,ZHANG Jianyun,WANG Guoqing. Key scientific issues of hydrological forecast in the headwater area of Yellow River[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):159-171. (in Chinese))

[3] KIDD C,HUFFMAN G,MAGGIONI V,et al. The global satellite precipitation constellation: current status and future requirements [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2021,102(10):E1844-E1861.

[4] MUÑOZ-SABATER J,DUTRA E,AGUSTÍ-PANAREDA A,et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data,2021,13(9):4349-4383.

[5] HSU K L,GAO X G,SOROOSHIAN S,et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,1997,36(9):1176-1190.

[6] HONG Y,GOCHIS D,CHENG J T,et al. Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network [J]. Journal of Hydrometeorology,2007,8(3):469-482.

[7] 陈家琳,雍斌. GPM-GSMaP 卫星降水在中国大陆的误差解析[J]. 亚热带资源与环境学报,2020,15(4):76-85. (CHEN Jialin,YONG Bin. Error analysis of global satellite mapping of precipitation for GPM-GSMaP in

- mainland China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2020, 15(4): 76-85. (in Chinese))
- [8] 张茹,雍斌,曾岁康. GPM 卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 50-59. (ZHANG Ru, YONG Bin, ZENG Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over Mainland China[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 50-59. (in Chinese))
- [9] LYU Yi, YONG Bin. A novel double machine learning strategy for producing high-precision multi-source merging precipitation estimates over the Tibetan Plateau[J]. Water Resources Research, 2024, 60(4): e2023WR035643.
- [10] MA Lu, ZHAO Lin, TIAN Liming, et al. Evaluation of the integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(7): 1500-1514.
- [11] XU Ran, TIAN Fuqiang, YANG Long, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(2): 910-924.
- [12] 章跃芬. 多源卫星降水产品的时空精度评估及水文效应研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- [13] 冯克鹏,洪阳,田军仓,等. 多源降水数据的小流域水文模拟效用评估[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1179-1191. (FENG Kepeng, HONG Yang, TIAN Juncang, et al. Evaluating runoff simulation of multi-source precipitation data in small watersheds[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1179-1191. (in Chinese))
- [14] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(1): 45-56.
- [15] 王宝,靳生洪. 基于卫星遥感降水反演产品在黄河源区的水文应用研究[J]. 青海大学学报, 2020, 38(4): 78-85. (WANG Bao, JIN Shenghong. Study on the feasibility of rainfall measuring products base on satellite remote sensing in the source region of Yellow River[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(4): 78-85. (in Chinese))
- [16] 曾华楠,谷黄河,余钟波,等. TRMM 卫星降水数据在黄河源区的适用性研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(2): 17-21. (ZENG Huanan, GU Huanghe, YU Zhongbo, et al. Study on the applicability of TRMM satellite precipitation data based on distributed hydrological models in the headwaters of Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2021, 43(2): 17-21. (in Chinese))
- [17] 刘兆晨,杨梅学,万国宁,等. 新型卫星降水产品在黄河源区的适用性分析:以 SWAT 模型为例[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 403-410. (LIU Zhaochen, YANG Meixue, WAN Guoning, et al. Applicability of new satellites precipitation products in source region of Yellow River: using SWAT model as an example [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 403-410. (in Chinese))
- [18] 张昂,李铁键,傅汪,等. 基于卫星降水融合产品的黄河源区汛期径流模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 1-16. (ZHANG Ang, LI Tiejian, FU Wang, et al. Model simulation of flood season runoff in the headwaters of the Yellow River Basin using satellite-ground merged precipitation data [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(1): 1-16. (in Chinese))
- [19] SU Jianbin, LYU Haishen, WANG Jianqun, et al. Evaluating the applicability of four latest satellite-gauge combined precipitation estimates for extreme precipitation and streamflow predictions over the upper Yellow River basins in China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1176.
- [20] HAN Jingya, MIAO Chiyuan, GOU Jiaojiao, et al. A new daily gridded precipitation dataset for the Chinese mainland based on gauge observations[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(7): 3147-3161.
- [21] MIAO Chiyuan, GOU Jiaojiao, FU Bojie, et al. High-quality reconstruction of China's natural streamflow[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 547-556.
- [22] GOU Jiaojiao, MIAO Chiyuan, SAMANIEGO L, et al. CNRD v1.0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(5): E929-E947.
- [23] PENG Shouzhong, DING Yongxia, WEN Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [24] DING Yongxia, PENG Shouzhong. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100 [J]. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [25] DING Yongxia, PENG Shouzhong. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(1): 79-94.
- [26] PENG Shouzhong, DING Yongxia, LIU Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [27] HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53-63.
- [28] YONG Bin, CHEN Bo, TIAN Yudong, et al. Error-component analysis of TRMM-based multi-satellite precipitation estimates over mainland China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 440.

- [29] ZHAO Renjun. The Xinanjiang model applied in China [J]. Journal of Hydrology, 1992, 135 (1/2/3/4): 371-381.
- [30] YUAN Fei, WANG Bing, SHI Chunxiang, et al. Evaluation of hydrological utility of IMERG Final run V05 and TMPA 3B42V7 satellite precipitation products in the Yellow River source region, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 696-711.
- [31] 吴勇拓, 李致家, 戚振亚, 等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8. (WU Yongtuo, LI Zhijia, QI Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 1-8, 17. (in Chinese))
- [32] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (6): 25-32. (DU Ruoyu, YAO Cheng, LIU Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 25-32. (in Chinese))
- [33] 余宇峰, 胡健伟, 严琳, 等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 34-41. (YU Yufeng, HU Jianwei, YAN Lin, et al. Research and application of service encapsulation method of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 34-41. (in Chinese))
- [34] 张珂, 张企诺, 陈新宇, 等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2021, 37 (5): 94-101. (ZHANG Ke, ZHANG QINUO, CHEN XINYU, et al. Gridded Xin' anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 94-101. (in Chinese))
- [35] 石朋, 陆美霞, 吴洪石, 等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护, 2023, 39 (4): 19-25. (SHI Peng, LU Meixia, WU Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin' anjiang model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 19-25. (in Chinese))
- [36] 袁飞, 任立良. 栅格型水文模型及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32 (5): 483-487. (YUAN Fei, REN Liliang. Methodology of grid-based hydrological model and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32 (5): 483-487. (in Chinese))
- [37] DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158 (3/4): 265-284.
- [38] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35 (1): 61-72. (ZHENG Ziyan, LYU Meixia, MA Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 61-72. (in Chinese))
- [39] 温丽叶, 靳莉君, 刘静, 等. 黄河源区降水特点及气象成因分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(1): 21-25. (WEN Liye, JIN Lijun, LIU Jing, et al. Precipitation characteristics and its meteorological causes in the source region of the Yellow River [J]. Yellow River, 2022, 44 (1): 21-25. (in Chinese))
- [40] 孙云华. 典型卫星影像数据反演降水产品精度分析与融合改进研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- [41] ZHOU Zelan, CHEN Sheng, LI Zhi, et al. An evaluation of CRA40 and ERA5 precipitation products over China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(22): 5300.
- [42] LYU Yi, YONG Bin, HUANG Fan, et al. Investigating twelve mainstream global precipitation datasets: which one performs better on the Tibetan Plateau? [J]. Journal of Hydrology, 2024, 633: 130947.
- [43] SHI Jiayong, YUAN Fei, SHI Chunxiang, et al. Statistical evaluation of the latest GPM-Era IMERG and GSMaP satellite precipitation products in the Yellow River source region [J]. Water, 2020, 12(4): 1006.
- [44] ZHU X H, BOTHE O, FRAEDRICH K. Summer atmospheric bridging between Europe and East Asia: influences on drought and wetness on the Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 2011, 236(1/2): 151-157.
- [45] REES H G, COLLINS D N. Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming [J]. Hydrological Processes, 2006, 20 (10): 2157-2169.
- [46] DING Mingze, SHEN Zhehui, HUANG Ruochen, et al. Cross-validation methods for multisource precipitation datasets over the sparse-gauge region: applicability and uncertainty [J]. Journal of Hydrometeorology, 2024, 25 (8): 1135-1145.
- [47] XU Jintao, MA Ziqiang, YAN Songkun, et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? a comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127353.
- [48] MAUSSION F, SCHERER D, MÖLG T, et al. Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the High Asia Reanalysis [J]. Journal of Climate, 2014, 27(5): 1910-1927.

(下转第 76 页)

- Bocheng, et al. The multi-time scale characteristics and impacts on ecological vegetation of warming and humidification in the upper Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 1018-1030. (in Chinese))
- [44] 董晴晴, 王会肖. 60 年来渭河关中地区气温与降水变化及其原因[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 33-38. (DONG Qingqing, WANG Huixiao. Variation and reason analysis of temperature and precipitation of Weihe River in Guanzhong area in the last 60 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 33-38. (in Chinese))
- [45] 田美荣, 冯朝阳, 王世曦, 等. 近 70 年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1787-1797. (TIAN Meirong, FENG Chaoyang, WANG Shixi, et al. Ecological restoration of the Yellow River basin in the last 70 years and systematic restoration thinking [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1787-1797. (in Chinese))
- [46] 张鸣, 朱奎, 鲁帆, 等. 黄河源区水文要素变化及驱动因素分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(10): 30-37. (ZHANG Ming, ZHU Kui, LU Fan, et al. Analysis of changes of hydrological elements and driving factors in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2023, 45(10): 30-37. (in Chinese))
- [47] 左其亭, 王骄阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 13-19. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 13-19. (in Chinese))
- (收稿日期: 2024-09-10 编辑: 王芳)
-
- (上接第 57 页)
- [49] KOLLURU V, KOLLURU S, KONKATHI P. Evaluation and integration of reanalysis rainfall products under contrasting climatic conditions in India [J]. Atmospheric Research, 2020, 246: 105121.
- [50] LIU Zhenwei, DI Zhenhua, QIN Peihua, et al. Evaluation of six satellite precipitation products over the Chinese mainland [J]. Remote Sensing, 2022, 14(24): 6277.
- [51] HUANG Ruochen, YONG Bin, HUANG Fan, et al. A comprehensive investigation of three long-term precipitation datasets; which performs better in the Yellow River basin? [J]. International Journal of Climatology, 2024, 44(5): 1302-1325.
- [52] SKOFRONICK-JACKSON G, MUNCHAK S J, RINGERUD S, et al. Falling snow estimates from the global precipitation measurement (GPM) mission [C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE, 2017.
- [53] MA Yingzhao, TANG Guoqiang, LONG Di, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 569.
- [54] MICHAELIDES S, LEVIZZANI V, ANAGNOSTOU E, et al. Precipitation; measurement, remote sensing, climatology and modeling [J]. Atmospheric Research, 2009, 94(4): 512-533.
- [55] YAN Songkun, MA Ziqiang, LI Xiaoqing, et al. PCSSR-DNNWA: a physical constraints based surface snowfall rate retrieval algorithm using deep neural networks with attention module [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(13): e2023GL103923.
- [56] VON LERBER A, MOISSEEV D, MARKS D A, et al. Validation of GMI snowfall observations by using a combination of weather radar and surface measurements [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2018, 57(4): 797-820.
- [57] SUN Min, LIU Aili, ZHAO Lin, et al. Evaluation of multi-source precipitation products in the hinterland of the Tibetan Plateau [J]. Atmosphere, 2024, 15(1): 138.
- [58] MA Jiawei, LI Hongyi, WANG Jian, et al. Reducing the statistical distribution error in gridded precipitation data for the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(11): 2641-2654.
- [59] 南天一, 陈杰, 丁智威, 等. 基于深度学习的青藏高原多源降水融合 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(4): 836-855. (NAN Tianyi, CHEN Jie, DING Zhiwei, et al. Deep learning-based multi-source precipitation merging for the Tibetan Plateau [J]. Scientia Sinica Terrae, 2023, 53(4): 836-855. (in Chinese))
- [60] LUNDQUIST J, ABEL M R, GUTMANN E, et al. Our skill in modeling mountain rain and snow is bypassing the skill of our observational networks [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(12): 2473-2490.
- [61] GAO Yanhong, CHEN Fei, JIANG Yingsha. Evaluation of a convection-permitting modeling of precipitation over the Tibetan Plateau and its influences on the simulation of snow-cover fraction [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(7): 1531-1548.
- [62] SUN Shuai, SHI Chunxiang, PAN Yang, et al. Applicability assessment of the 1998-2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China [J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 879-892.
- (收稿日期: 2024-07-18 编辑: 王芳)