

文章编号:1001-4179(2023)08-0109-09

引用本文:渠畅,魏玲娜,董建志,等. 淮河小流域多源降水数据产品径流模拟对比分析[J]. 人民长江,2023,54(8):109-117,130.

淮河小流域多源降水数据产品径流模拟对比分析

渠 畅^{1,2}, 魏玲娜^{1,2}, 董建志^{3,4}, 徐士惠⁵, 宁 玮^{6,7}

(1. 南京信息工程大学 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072; 4. 天津大学 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 5. 中国气象科学研究院浙江分院, 浙江 杭州 311300; 6. 抚河水文水资源监测中心, 江西 抚州 344000; 7. 鄱阳湖水文生态监测研究重点实验室, 江西 南昌 330002)

摘要:为研究多源降水数据产品的地区适用性,对比不同产品的水文模拟效果,选取淮河上游紫罗山、中游黄泥庄两个流域,对比分析 CHIRPS、CMORPH、ERA5、IMERG 4 种产品模拟流域平均降水的误差特征,利用集总式 FLEX 模型对产品模拟结果进行比较,探讨了产品在淮河流域不同位置对径流模拟效果的影响。结果表明:①两个流域 CHIRPS 降水误差最大,CMORPH 次之,ERA5 和 IMERG 的精度较高,上游紫罗山流域多源数据集整体高估;②不同降水数据产品径流模拟性能不一,模拟效果与产品精度评估结果基本一致,总体 ERA5 和 IMERG 模拟径流与实测吻合较好;③总体而言,4 种数据集有效反映了流域的空间水文特性,上游紫罗山流域径流模拟效果优于中游黄泥庄流域。

关 键 词:径流模拟; FLEX 模型; 卫星降水产品; 淮河流域

中图法分类号: P339

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.015

0 引言

降水是一种时空变异特性显著的水文气象要素,陆地径流的产生、土壤水分的变化和蒸散发的形成等流域水文循环过程无一不与降水分配密切相关^[1]。作为水文模型的关键输入变量^[2-3],降水数据的准确性对水文模拟的不确定性影响极大^[4]。因此,高精度大范围的连续降水数据对流域水文过程模拟及预报具有重要意义。

目前获取降水数据的途径主要有地面雨量计观测、雷达探测、数值天气模式模拟以及卫星遥感产品^[5-6]等。传统的降水信息利用地面站点雨量计实测获得,例如自动雨量站等,尽管时间分辨率较高,但仍不能满足空间覆盖率的需求,尤其对于时空变化剧烈

的热带地区^[7],地面站点观测更是无能为力。卫星遥感技术能够提供具有一定时空精度的连续降水数据,其空间覆盖范围广、获取便捷,可在一定程度上弥补其他来源降水数据的缺陷^[8],为水文气象研究与实际应用提供有力支持,尤其给缺资料地区提供了新的数据来源^[9-10]。卫星遥感技术快速发展促进了卫星降水数据产品的日趋成熟和完善,同时大大推动了卫星产品在水文、气象、农业、环境等诸多领域的应用。现有的卫星降水数据产品已显示了全球化的监测与预测潜力,例如 IMERG 的时空分辨率已能达到 0.1°和 30 min。同时,随着观测手段的多样化和数据同化技术的成熟,对地面、卫星、雷达、探空、飞机、船舶等多种观测资料进行质量控制,利用全球气候系统模式对实际的大气状况进行模拟,可获得高分辨率、长时间序列的全

收稿日期:2022-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51909121, 52179021)

作者简介:渠 畅,男,硕士研究生,研究方向为水文气象。E-mail:qestruggle@163.com

通信作者:魏玲娜,女,副教授,博士,主要从事流域水循环模拟与水文气象研究。E-mail:weilingna@nuist.edu.cn

球降水数据,例如欧洲中期天气预报中心的 ERA-Interim 和 ERA5,以及美国国家环境预报中心的 CFSR 等等^[11]。

国内外大量研究是针对降水数据产品的精度和地区特征进行的^[12-14]。例如,Xin 等^[15]在粤港澳大湾区地区比较了 ERA5-Land 和 ERA5-HRES 两种产品,发现后者在探测降水强度和降水事件方面更优,同时发现 ERA5 在城市化水平较高的地区降水探测表现不佳。Huang 等^[16]以 400 多个台湾当地雨量计观测值为基准,对比发现 IMERG 产品在数量和质量上都优于 TRMM,可以更准确地描述台湾夏季降水在多个时间尺度的变化。Tang 等^[17]对 IMERG 在中国日尺度和小时尺度的产品质量综合分析后发现 IMERG 产品优于除 GSMaP 以外的其他数据集 (TRMM 3B42、CMORPH、PERSIAN-CDR、GSMaP、CHIRPS、SM2RAIN、ERA5、ERA-Interim 和 MERRA2),且产品质量随时间推移不断提高。

在此基础上,学者们也在不断尝试将各种数据产品应用到水文模拟中,对其适用性能加以探讨。例如,邹磊等^[18]曾利用分布式时变增益模型对元江流域多套降水产品的可替代性进行研究;许心怡等^[19]利用滦河流域 IMERG 和 CMFD(中国区域地面气象要素驱动数据集)开展定量多尺度时空精度评估,借助 SWAT 模型对比分析了两种产品的水文效用。尽管降水数据产品驱动水文模拟领域的研究已积累了一定的成果,但对于具体流域不同降水产品的误差如何,其误差又是如何影响水文模拟结果的仍有待进一步研究。

淮河流域位于中国南北气候过渡带,气候条件复杂,旱涝灾害严重,区域内降水集中,导致在地势起伏较大的山丘区,小流域山洪源近流急、峰高量大,破坏力强,但雨量站网信息不足,降水量分布估计存在较大误差影响洪水预报的精度。因此,有必要针对淮河小流域的多源降水产品的可替代性和水文模拟的适应性加以研究。本文选取淮河上游紫罗山和中游黄泥庄两个典型流域,对比分析 CHIRPS、CMORPH、ERA5、IMERG 这 4 种常用降水数据产品面雨量的误差特征,分析其对径流模拟效果的影响,以此评估这 4 种数据集在紫罗山与黄泥庄两流域水文过程模拟中的精度。

1 研究流域与数据

1.1 流域概况

选择淮河上游的紫罗山和中游的黄泥庄作为典型流域进行研究,研究区域如图 1 所示。其中紫罗山流域为紫罗山站(112°31'E,34°10'N)以上集水区,面积 1 800 km²,位于淮河西部沙颍河水系北汝河上游,属

半干旱大陆性气候,多年平降水量 758 mm,降水主要集中在汛期,水面蒸发量 954.3 mm,流域地形起伏较大,海拔 290~2 120 m。黄泥庄流域为黄泥庄站(115°37'E,31°28'N)以上集水区,面积 805 km²,位于大别山北麓,淮河流域史河源,受东亚季风活动控制,属于湿润地区,年均气温 12~21℃,多年平均降水量约 1 380 mm,年内分配不均,主要集中在 6~9 月。流域呈不规则扇形,地形以丘陵和山地为主,海拔 130~1 500 m,河谷狭长,水系发育良好。两流域植被覆盖良好,受人类活动影响较小,适合开展天然状态下的水文过程模拟研究。

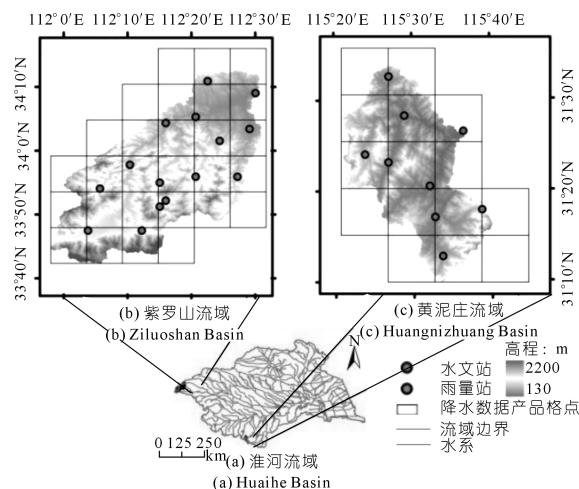


图 1 研究流域位置、DEM 与站点分布

Fig. 1 Location of the study watersheds, their DEM and gauges

1.2 数据收集与处理

2010~2018 年的逐日流量数据和地面雨量数据来源于中华人民共和国水文年鉴中的淮河流域水文资料。黄泥庄流域内有禅堂站、关庙站、吴店站、斑竹园站、西河站、银沙站、徐坳站、马鬃岭站 8 个雨量站以及黄泥庄水文站共 9 个站点;紫罗山流域内有孙店站、龙王庙站、两河口站、禅螳站、木植街站、黄庄站、排路站、沙坪站、付店站、娄子沟站、十八盘站、秦亭站、王坪站、三屯站 14 个雨量站以及紫罗山水文站共 15 个站点。收集整理紫罗山流域内汝阳站与黄泥庄流域临近气象站点金寨站 2010~2018 年逐日的日平均气温、日最高气温、日最低气温,分别用于模型蒸发量计算。

选用 CHIRPS、CMORPH、IMERG 卫星降水产品和 ERA5 再分析降水数据,时间为 2010 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日,采用最邻近法^[19]将空间分辨率统一至 0.1°×0.1°以便对比不同数据产品的流域平均面雨量精度,同时计算流域内所有数据集格点的算术平均值作为流域平均降水量。各降水数据产品的信息如表 1 所列。

表 1 四种降水数据产品信息

产品名称	研发背景	特点	来源
CHIRPS	由美国地质调查局 (USGS) 和加利福尼亚大学气候危害小组开发	数据时间序列长 (1981 年至今),是多时间尺度、多空间分辨率降水数据集,全球覆盖范围为 50°S~50°N,空间分辨率较高,广泛应用于中低纬度区域内的降水、干旱研究	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
CMORPH	基于美国 NOAA 气候预测中心 (CPC) 创立发展的一种利用时间空间联合内插的全球高时空分辨率降水产品的技术	集合了多平台卫星制作而成,目前在国内多应用于数据反演、区域尺度气候预报分析,降水产品评估等领域 ^[19]	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html
IMERG	基于 GPM 卫星群获取的大量遥感信息、微波、红外和雷达数据反演所产生的降水数据集,来自美国 NASA 主导的 TRMM 的后续全球卫星降水观测计划	较高的空间分辨率以及覆盖率、多时间分辨率,可精确探测微量降水,产品可靠性高 ^[20]	https://disc.gsfc.nasa.gov/
ERA5	欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的第五代再分析数据集	采用改进的数据同化系统 (IFS Cycle41r2)、四维变分同化分析 (4D-Var) 以及辐射变分偏差校正技术 ^[21] ,相较于前代再分析数据集降水,数据集的质量得到系统性提升	https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-forecasts/era5

2 研究方法

2.1 FLEX 模型与构建

基于 FLEX (Flux Exchange hydrological model) 模型构建刻画不同水文过程响应单元、适应不同流域所需具体应用目标的水文模型^[20-22]。该模型在搭建过程中可以根据研究区域的实际气候、地形等下垫面特征对水箱进行增删或对参数加以修改,其结构灵活度高,区域适应性强。考虑到研究流域的面积较小,水文要素的空间差异较小,集总式概念模型比分布式模型有更好的参数化灵活性和更强的误差过滤能力^[23],本文利用 FLEX 模型框架构建了包含:植被冠层截留水箱 (S_i)、非饱和土壤层水箱 (S_u)、快速退水水箱 (S_f) 以及慢速退水水箱 (S_s) 的四水箱 FLEX 水文模型,分别用以模拟植被截留、非饱和土壤水产汇流等环节,反映降水经过植被的截留、土壤与植被的蒸散发 (见图 2)。模型包含了 11 个主要参数,参数的含义及取值范围如表 2 所列^[24]。

针对气象站点高程 ($elev_CM$) 和流域平均高程 ($elev_P4$) 的差别对流域进行温度修正,用式 (1) 计算

修正因子 (T_{calt})。潜在蒸散发 (E_p) 计算采用 Hargreaves 公式^[25]。

$$T_{calt} = \frac{elev_P4 - elev_CM}{100 \times 0.6}$$

(1)

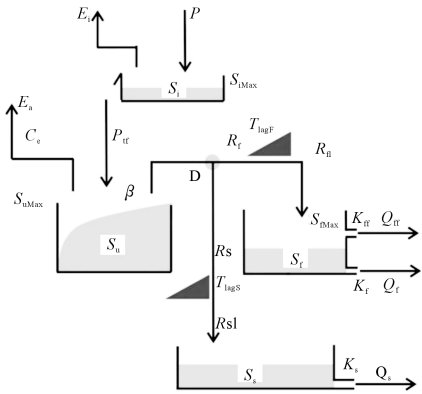


图 2 FLEX 模型结构
Fig. 2 Structure of FLEX model

表 2 FLEX 模型使用的参数
Tab. 2 Parameters of FLEX model

参数	参数含义	取值范围
S_{iMax}	植被截留能力,用于表明最大截留量	[0.1,5]
S_{uMax}	最大储水量,用于表明包气带的土壤层根区存储水能力	[20,800]
C_e	包气带水分中消耗于实际蒸腾的比例系数	[0.2,0.8]
β	包气带蓄水容量曲线抛物线型指数,用于表征景观空间异质性,进行径流系数的计算	[0.1,3]
D	分径流成分比例参数,将径流分成直接径流和深层地下径流分别流入 S_f 和 S_s 两个水箱	[0.1,0.9]
K_f	浅层地下径流 (壤中流) 退水参数,为水箱 S_f 中的壤中流入河网的时间	[1,20]
K_s	深层地下径流 (壤中流) 退水参数,为水箱 S_s 中的基流汇入河网的时间	[10,400]
T_{lagF}	水流在 S_f 水箱中的滞时	[0.8,3]
T_{lagS}	水流在 S_s 水箱中的滞时	[2,50]
S_{iMax}	直接径流 (包括坡面流和壤中流) 阈值参数,可理解为 S_f 水箱的最大储水量	[10,200]
K_{ff}	地表径流退水参数,为超过 S_f 储水能力的地表径流入河网的时间	[1,10]

降水经过 S_i 水箱首先进行植被冠层截留,当截留量超过该水箱的最大储水量 S_{iMax} 时,多余的水到达非饱和土壤层 S_u 水箱,此处采用新安江模型的不饱和蓄水层的水量计算方法,流域平均蓄水容量 W_m 为

$$W_m = \frac{S_{uMax}}{1 + \beta}$$

(2)

非饱和土壤层 S_u 中的水量部分消耗于实际蒸散发,这里的实际蒸发蒸腾量 E_a 与潜在蒸散发 E_p 与土壤相对湿度 S_u/S_{uMax} 成正比,计算公式为

$$E_a = \min\left(E_p, E_p \times \frac{S_u}{S_{uMax} \times C_e}\right)$$

(3)

当流入 S_u 水箱的水量大于最大储水量 S_{uMax} 时,多

余的水量由比例系数 D 分为两部分,一部分在流向河网过程中发生入渗,经滞时 T_{lagS} 后流向慢速退水水箱 S_s ,最终成为深层地下径流汇入河网;另一部分经滞时 T_{lagF} 后流向快速退水水箱 S_f ,当快速退水水箱的储水量超过其储水能力 S_{fMax} 时,多余的水量经过 K_{ff} 时间后转化为地表径流或壤中流流入河网。最终流域出口断面出流就是地表径流、壤中流和地下径流之合。

模型的输入数据为流域平均逐日的降水数据、气象站逐日温度(日平均气温、日最高气温、日最低气温)数据和流域出口断面逐日流量数据。选取 2010 ~ 2014 年为模型率定期,2015 ~ 2018 年为验证期,模拟两个流域的日流量变化过程。由 MOSCEM - UA (Multi - objective Shuffled Complex Evolution Metropolis) 算法^[26],选取 KGE (Kling - Gupta efficiency) 作为目标函数(KGE 最优值为 1),同时以开方形式与绝对值形式的 KGE 作为辅助判据,优化确定模型参数。

2.2 降水误差评估

采用相对偏差 BIAS、均方根误差 RMSE 和相关系数 r 三项指标来定量评价 ERA5, CHIRPS, IMERG, CMORPH 4 种产品与地面雨量站观测算得的流域平均降水量在日尺度上的一致性。以地面雨量站观测为基准对比不同数据集的降水量误差, BIAS 值反映了数据产品的系统偏差程度; RMSE 值用来衡量产品偏离地面观测的程度,它对误差极值敏感,可反映产品的精密程度; r 值表征数据集与地面观测之间的线性相关程度。 BIAS 值和 RMSE 值反映了偏差误差的大小。

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - C_i)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - C_i)^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{Cov(S, C)}{\sqrt{Var[S] Var[C]}} \quad (6)$$

式中: C_i 表示地面雨量站观测日降水量; S_i 表示产品的日降水量数据, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 表示时间序列; $Cov(S, C)$ 为 S 与 C 的协方差, $Var[S]$ 为 S 的方差, $Var[C]$ 为 C 的方差。

采用探测率 P_d 、空报率 R_{FA} 和 Heidke 技巧评分指数 S_H 三项分类评价指标来反映产品对日降水事件的探测能力。 P_d 越高,表明数据集对日降水事件的漏报程度越小^[27]; R_{FA} 越小,空报程度越小; S_H 综合反映了卫星对降水事件是否发生的估计能力,表示实际预报的准确率比随机预报的准确率好多少,其值范围在 $[-1, 1]$ 之间,预报完全正确时, $S_H = 1$ 。

$$P_d = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{01}} \quad (7)$$

$$R_{\text{FA}} = \frac{n_{10}}{n_{11} + n_{10}} \quad (8)$$

$$S_H = \frac{2(n_{11}n_{00} - n_{10}n_{01})}{(n_{11} + n_{01})(n_{01} + n_{00}) + (n_{11} + n_{10})(n_{10} + n_{00})} \quad (9)$$

式中: n_{11} 表示降水数据产品和地面观测基准数据同时有雨的频数; n_{10} 表示降水数据产品有雨地面观测无雨的频数; n_{01} 表示降水数据产品无雨地面观测有雨的频数; n_{00} 表示降水数据产品和地面观测同时无雨的频数。

本次研究重点在于理解模型利用多源降水数据导致的输入误差对径流模拟结果影响,而非关注流域内部降水产品的空间精度,本文并未考虑多源降水产品在空间分布上的精度,而将主要篇幅集中于评估多源降水产品对流域面平均降水量的刻画能力。

2.3 径流模拟效果评价

由于水文模型参数的优化常会出现“异参同效”问题,这种参数的不确定性会对评判参数优化标准、提高水文模型模拟精度造成阻碍。 Beven 认为如果采用单一的目标函数进行模型模拟结果的评判,容易弱化部分模拟结果的特性,具有局限性^[28]。为了尽可能避免模拟结果受某组模型参数影响,同时兼顾径流模拟效果评价指标的合理性,本文采用比较流域出口断面的径流变化过程线图以及纳什效率系数 NSE 和 Kling - Gupta 效率系数 KGE 两种方式评价模拟效果。

NSE 是常用于评价验证水文模型模拟结果的目标函数。 KGE 充分考虑模拟值和实测值的均值和误差,是对 NSE 的一种补充描述,研究表明,使用 KGE 更能充分反映流域水文过程^[29]。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \mu_{\text{obs}})^2} \quad (10)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\mu_{\text{sim}}}{\mu_{\text{obs}}} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{\text{sim}}}{\sigma_{\text{obs}}} \quad (13)$$

式中: $Q_{\text{sim},i}$ 和 $Q_{\text{obs},i}$ 分别是模拟和实测径流量, mm/d ; r 为模拟和实测径流间的线性相关系数; μ_{sim} 和 μ_{obs} 分别是模拟和实测径流量的平均值; σ_{sim} 和 σ_{obs} 分别是模拟和实测径流量的均方差。

3 结果和讨论

3.1 不同降水产品的面雨量精度评价

图3给出了紫罗山流域4种产品与地面站点流域平均日降水量散点图,同时列出了各评价指标计算结果。由图3可知,ERA5和IMERG的与地面雨量站观测的日降水量一致性更高, r 分别为0.80与0.79,更接近1。整体而言,4种产品的系统偏差BIAS均大于0,说明降水数据产品的降水量偏大,而 S_H 值均大于0,代表卫星对有无降水发生的探测准确性高于事件随机概率。其中ERA5和IMERG的BIAS分别为3.3%和3.4%,RMSE在4 mm左右,误差较小,说明ERA5和IMERG与地面雨量站观测的一致性高,前者比后者误差略小。进一步对比这两种产品的分类误差指标,ERA5的 P_d 和 S_H 比IMERG略高, R_{FA} 更小,说明前者对日降水事件的捕捉能力比后者稍好。4种产品中,CHIRPS产品的RMSE为6.22 mm,误差最大, r 为0.56,与地面雨量站观测的线性相关关系最弱, P_d 和 S_H 值都最小,降水事件的探测能力相对最弱,说明CHIRPS整体的精度最差。

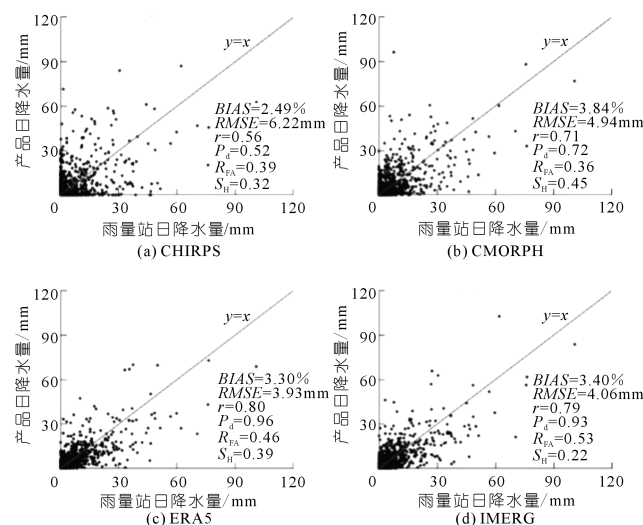


图3 紫罗山流域产品降水与站点降水散点

Fig. 3 Scatter plots of four products data vs. gauge observations at Ziluoshan watershed

图4为黄泥庄流域4种降水数据集与地面站点观测的平均日降水量散点图。由图4可知,ERA5和IMERG产品与地面雨量站观测的日降水量一致性比CHIRPS和CMORPH好, r 分别为0.81与0.78,更接近1。4种产品的系统偏差有正有负,CHIRPS的BIAS和RMSE均最大,与地面观测降水的偏离程度最大。而ERA5和IMERG产品的BIAS分别为0.22%和-3.17%,相对较小,RMSE也较小, r 值为0.78和

0.81,说明ERA5和IMERG与地面雨量站观测的一致性高,前者比后者误差略大。进一步对比4种产品的分类误差评价指标,ERA5的 P_d 和 S_H 比IMERG稍高说明ERA5对日降水是否发生的辨识能力比IMERG稍强。而CHIRPS产品的RMSE为10.84 mm,误差最大, r 为0.58,与地面雨量站的相关性最弱, P_d 和 S_H 值都最小,降水事件探测能力较弱,说明CHIRPS产品的精度最差。

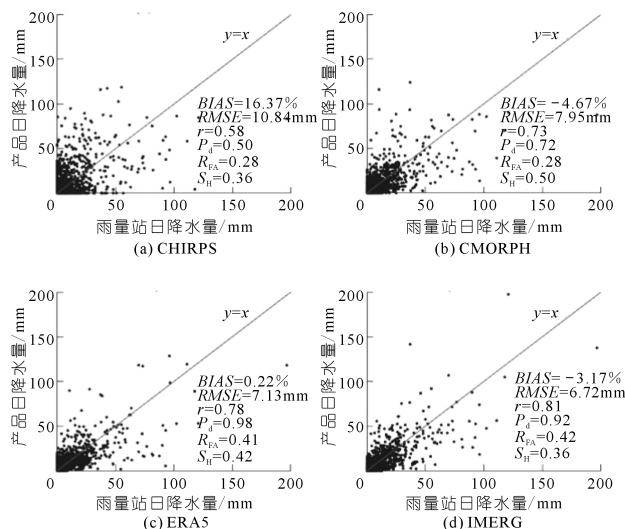


图4 黄泥庄流域产品降水与站点降水散点

Fig. 4 Scatter plots of the four products data vs. gauge observations at Huangnizhuang watershed

4种数据集对两个流域降水事件是否发生的探测能力均是显著的, $S_H > 0.2$,ERA5和IMERG两种产品的误差更小,与地面站点观测的日降水量一致性更高,CHIRPS的精度最差。对比上游和中游两个流域,各数据集对上游紫罗山流域的日降水量大体都是高估的状态,而中游黄泥庄流域4种产品的日降水量误差都比上游紫罗山大,RMSE比紫罗山高61%~81%,黄泥庄流域的气候条件更湿润,多年平均降水量比紫罗山流域高82%,说明实际4种数据集的降水量估计相对精度水平黄泥庄流域高于紫罗山流域。这是因为上游海拔更高,地形变化比中游更加复杂,对卫星遥感探测和气候模式模拟的降水影响更大。4种不同的产品在淮河上游和中游对降水事件发生辨识能力基本一致,例如 P_d 值反映的漏报程度从低到高依次为ERA5、IMERG、CMORPH和CHIRPS, S_H 值反映的综合估计能力从高到低依次为CMORPH、ERA5、CHIRPS和IMERG。

3.2 地面雨量站点模拟效果分析

采用地面雨量站的流域平均日降水数据,利用FLEX模型对两流域进行径流模拟,其中2010~2014年作为模型率定期,2015~2018年作为模型验证期。

在表 2 给定的参数范围内随机生成 20 000 组参数,利用 2.1 节中的参数优选方法进行率定,结果如表 3 所列。

表 3 模型参数率定结果

Tab. 3 Results of the model parameters after calibrating

流域	S_{iMax}	S_{uMax}	C_e	β	D	K_f	K_s	T_{lagF}	T_{lagS}	S_{fMax}	K_{ff}
紫罗山	4.94	118.02	0.32	0.71	0.90	3.21	197.45	1.56	28.54	34.72	1.11
黄泥庄	3.03	138.64	0.33	0.53	0.89	4.48	181.09	1.08	37.23	41.21	1.04

由于地面雨量站的降水观测精度较高,通过分析地面雨量站模拟的径流与实测径流过程的拟合程度可推断所建 FLEX 模型的合理性。对两个流域的拟合结果进行统计(见表 4),紫罗山流域的径流模拟结果率定期 NSE 介于 0.42 ~ 0.92 之间, KGE 介于 0.42 ~ 0.80 之间,模拟与实测径流的相关系数 $r \geq 0.89$,相比之下验证期拟合效果差些;黄泥庄流域的径流模拟结果率定期 NSE 介于 0.75 ~ 0.90 之间, KGE 介于 0.57 ~ 0.79 之间, $r \geq 0.9$,拟合效果验证期同样优于验证期。另外,上游紫罗山流域呈现较为明显的径流模拟效果丰水年份优于枯水年份的情形,验证期甚至出现 2016 年 $NSE < 0$ 的情况,经考证可能是流域出口断面上游不远处 2015 年开始修建前坪水库(控制面积 1 325 km²)导致的;而中游黄泥庄流域丰枯年份拟合效果相当,验证期的拟合效果比紫罗山流域好。

图 5(a)、(b)、(c) 分别展示了其中模拟效果好、中等和不好的年份的径流拟合结果。由图 5(a) 和 (b) 可见,黄泥庄流域 2010 年和紫罗山流域 2012 年模型计算的流域出口断面径流与实测径流过程吻合均

较好,洪峰流量接近,峰现时间基本一致。而模拟效果较差的黄泥庄流域尽管 2015 年洪峰流量普遍偏低,但峰现时间和退水过程特征与实测基本吻合,见图 5(c)。紫罗山和黄泥庄流域整个率定期的 NSE 分别为 0.88 和 0.86, r 为 0.95 和 0.94,验证期的模拟效果评价指标比率定期稍差, NSE 为 0.64 和 0.70, r 为 0.81 和 0.87,总体模拟与实测径流的一致性高。说明已建模型对研究流域的水文循环过程概化合理,可用于下一步多源降水数据产品的径流模拟效果评估。

表 4 基于地面雨量站观测数据的径流模拟效果统计

Tab. 4 Statistics of the performance of runoff simulation based on the observation of the ground rain gauges

年份	紫罗山流域				黄泥庄流域			
	总降水量/ (mm · a ⁻¹)	NSE	KGE	r	总降水量/ (mm · a ⁻¹)	NSE	KGE	r
2010	1040.66	0.87	0.61	0.96	1533.92	0.89	0.79	0.94
2011	919.72	0.92	0.80	0.96	1061.32	0.80	0.79	0.90
2012	585.78	0.77	0.64	0.89	1172.73	0.88	0.69	0.95
2013	514.63	0.42	0.42	0.91	1337.96	0.90	0.76	0.96
2014	702.06	0.91	0.73	0.96	1432.54	0.75	0.57	0.91
2015	680.42	0.43	0.47	0.70	1273.53	0.51	0.30	0.85
2016	629.96	-0.19	0.38	0.70	1917.68	0.73	0.57	0.88
2017	830.11	0.70	0.58	0.86	1519.01	0.56	0.47	0.78
2018	709.76	0.53	0.55	0.75	1481.20	0.51	0.27	0.82

3.3 不同产品径流模拟结果比较分析

3.3.1 率定期与验证期模拟结果对比

以两流域以地面站点、4 种产品降水数据作为输入,得到率定期与验证期的径流模拟效果统计如表 5 所示。由表可见,除了黄泥庄流域 IMERG 产品模拟结

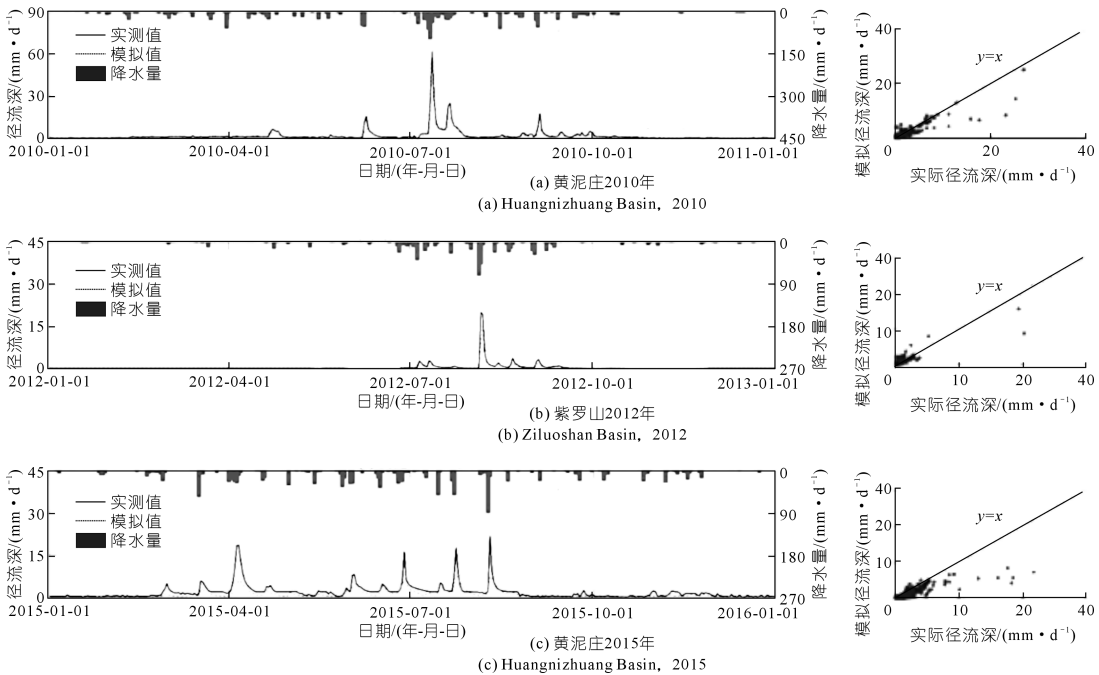


图 5 基于地面雨量站点观测数据的径流模拟结果

Fig. 5 Results of runoff simulation based on the observation of the ground rain gauges

果验证期 KGE 值 0.54 高于地面站点的 0.49 外,其余时间两流域地面雨量站点观测降水模拟的径流效果均优于多源产品的模拟径流效果。两个流域率定期的模拟效果均好于验证期。其中,紫罗山流域验证期的 4 种产品模拟效果都不理想,推测与 2015 年流域内修建水库有关,水利工程建设过程中河道内的天然径流过程受到影响。

3.3.2 不同产品径流模拟结果对比

利用图 6 对两个流域 4 种数据集模拟的径流过程进行比较,其中参数由 MOSCEM - UA 算法重新优化率定,发现降水数据产品的径流模拟性能不一。总体上,4 种数据集模拟结果与实测径流吻合度较好,除紫罗山流域验证期因修建水库影响外,两流域模拟结果大致能捕捉到与实测径流类似的动态变化过程和径流

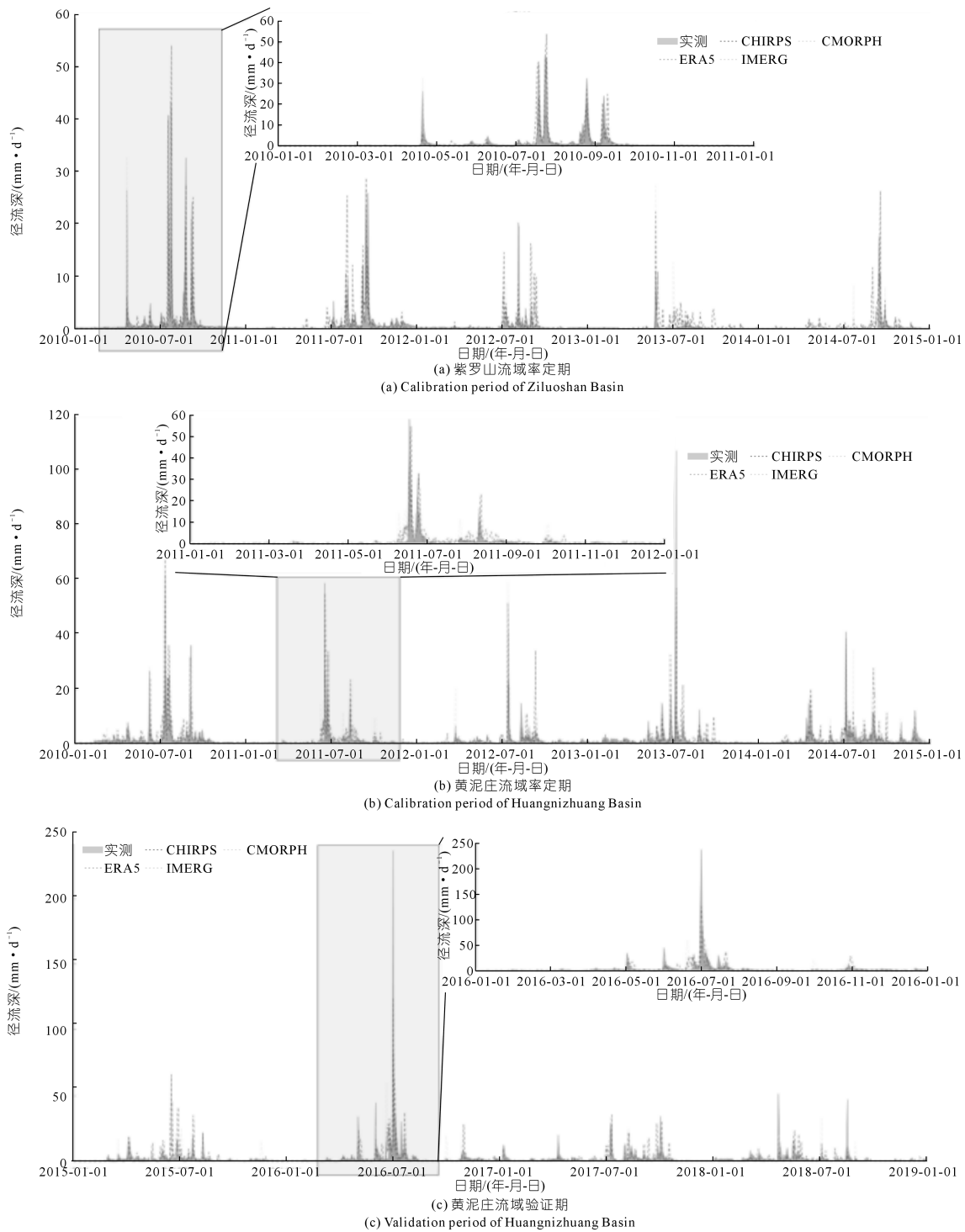


图 6 不同降水产品模拟的径流过程对比

Fig. 6 Comparison of simulated daily runoff based on the four precipitation products

峰现时间,但局部也出现一些因降雨误报形成的虚假洪水过程,例如紫罗山流域的 2013 年 6~9 月。率定期紫罗山流域的 *NSE* 值集中在 0.48~0.66, *KGE* 值介于 0.59~0.70 之间, *r* 值在 0.71~0.81 间变化,4 种卫星的模拟的径流效果差异较小,见图 6(a)。黄泥庄流域率定期 *NSE* 值集中在 0.21~0.67, *KGE* 介于 0.46~0.68 间, *r* 值在 0.52~0.82 间变化。由图 6(b) 可见,CHIRPS 和 CMORPH 模拟的径流过程拟合程度不及 ERA5 和 IMERG 两种产品,CHIRPS 在 2011 年 8 月和 10 月均出现了与实测结果不符的洪水场次,而 CMORPH 则出现了径流量高值模拟偏低,低值模拟偏高的情况;此外,相比率定期,验证期的评估指标值有所衰减, *NSE* 值介于 0.11~0.58 之间, *KGE* 介于 0.26~0.54 之间, *r* 值介于 0.42~0.77 之间。由图 6(c) 可见,IMERG 的模拟结果比其他 3 种降水数据集好,与实测径流过程有着相似的时间变化,ERA5 的结果不佳原因在于其验证期降水数据的误差 (*BIAS* 和 *RMSE*) 较 IMERG 明显偏大。

对比两个流域率定期的模拟效果,4 种数据中 CHIRPS、CMORPH 和 IMERG 三者在上游紫罗山流域的模拟效果均优于中游黄泥庄流域,推测原因为上游降水产品的偏差 (*BIAS* 和 *RMSE*) 较小,中游更大,导致模拟效果上游比中游好。此外,该结果与率定期地面站点模拟效果上游流域优于中游基本一致,也说明了多源降水数据集基本反映了流域的空间水文特征。

表 5 多源降水产品偏差与径流模拟评估指标值
Tab.5 Evaluation statistical indicators of product deviation and runoff simulation by using precipitation products

数据源	阶段	紫罗山流域					黄泥庄流域				
		降水偏差		径流模拟指标			降水偏差		径流模拟指标		
		<i>BIAS</i> /%	<i>RMSE</i> / mm	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>r</i>	<i>BIAS</i> /%	<i>RMSE</i> / mm	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>r</i>
地面站点	率定期	-	-	0.88	0.73	0.95	-	-	0.86	0.73	0.94
	验证期	-	-	0.64	0.60	0.81	-	-	0.70	0.49	0.87
CHIRPS	率定期	-3.61	6.37	0.48	0.64	0.71	13.60	10.14	0.21	0.46	0.52
	验证期	10.56	6.03	-2.34	-0.19	0.22	19.29	11.65	0.11	0.32	0.42
CMORPH	率定期	-0.45	4.67	0.53	0.59	0.73	-6.82	6.77	0.39	0.54	0.65
	验证期	9.50	5.26	-3.44	-0.47	0.42	-2.41	9.21	0.32	0.39	0.57
ERA5	率定期	0.39	4.13	0.52	0.62	0.73	4.66	6.25	0.67	0.68	0.82
	验证期	7.13	3.66	-0.46	0.39	0.46	-4.46	8.08	0.39	0.26	0.66
IMERG	率定期	-1.62	4.13	0.66	0.70	0.81	-4.98	5.94	0.56	0.65	0.75
	验证期	10.03	3.97	-0.56	0.35	0.50	-1.26	7.58	0.58	0.54	0.77

4 结 论

降水数据产品因其优越性已逐步成为可以替代地面观测资料用于水文分析、模拟及预报的基础数据。本文选取淮河上游紫罗山和中游黄泥庄两个流域,对比分析 CHIRPS、CMORPH、ERA5、IMERG 4 种常用降水数据集产品的误差特征,利用 FLEX 模型对 4 种产

品的模拟结果进行比较,探讨了产品误差对径流模拟效果的影响,得到结论如下:

(1) 两流域 CHIRPS 产品的误差最大,CMORPH 次之,而 ERA5 和 IMERG 的精度都比较高,数据偏差较小、探测能力较强。在海拔更高、地势起伏更大的上游紫罗山地区,多源降水数据集呈整体高估的状态。

(2) 不同的降水数据集产品径流模拟性能不一,模拟效果与数据集精度评估结果一致,总体 ERA5 和 IMERG 的径流模拟结果与实测吻合较好,但 4 种数据集都有局部降雨误报导致虚假洪峰的现象。

(3) 整体上,4 种数据集基本反映了流域空间上的水文特征,在淮河上游紫罗山流域和中游黄泥庄流域对降水事件发生辨识能力基本一致,上游紫罗山流域的径流模拟效果均优于中游黄泥庄流域。

本文采用的 FLEX 模型在淮河两个小流域模拟过程中,对降水空间不均匀性、下垫面土壤、植被、产汇流特征的空间异质性等考虑不足,导致局部退水过程与洪峰流量拟合不好,后续研究将结合分布式模型改善模拟效果,同时发挥遥感降水产品较好地反映降水空间分布的优势,对比分析产品在空间上的误差分布特征,进一步探讨降水数据产品的时空精度对流域径流模拟的影响。

参考文献:

[1] 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. 地球科学进展,2007,26(11):1162-1172.

[2] ZHU Q,XUAN W,LIU L,et al. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR,TRMM 3B42V7,and NCEP-CFSR over humid regions in China[J]. Hydrological Processes,2016,30(17):3061-3083.

[3] 张婷,李怡,李建柱,等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2022,31(1):15-28.

[4] 王一冰,谢先红,施建成,等. 多源降水数据驱动下青藏高原径流集合模拟[J]. 科学通报,2021,66:4169-4186.

[5] 董甲平,冶涛涛,顾晶晶,等. 淮河流域遥感降水降尺度多时间特性分析[J]. 水力发电学报,2022,41(8):77-91.

[6] 武海喆,刘登峰,黄强,等. 降水产品在黄土高原的精度评价及替代性研究[J]. 水力发电学报,2021,40(6):31-40.

[7] FALCK A S,MAGGIONI V,TOMASELLA J,et al. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model:A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil[J]. Journal of Hydrology,2015,527:943-957.

[8] SUN Q,MIAO C,DUAN Q,et al. A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons[J]. Reviews of Geophysics,2018,56(1):79-107.

[9] JIANG S H,REN L L,YONG B,et al. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China[J]. Water Science and Engineering,2010,3(4):405-417.

[10] 熊景华,郭靖,郭生练,等. 基于多源降水数据估算澜湄流域可能

- 最大降水[J]. 水力发电学报,2022,41(9):77-86.
- [11] 尹家波,郭生练,王俊,等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报,2020,51(11):1335-1346.
- [12] 金秋,张增信,黄钰瀚,等. 基于 TRMM 卫星产品的长江流域降水精度评估[J]. 人民长江,2017,48(19):48-52.
- [13] 石晓丹,王加虎,满霞玉,等. 乌苏里江流域 TRMM 降水数据精度评价与修正[J]. 人民长江,2017,48(6):38-41.
- [14] 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.
- [15] XIN Y, LU N, JIANG H, et al. Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong - Hong Kong - Macao Greater Bay Area, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 602:126791.
- [16] HUANG W R, LIU P Y, CHANG Y H, et al. Evaluation and application of satellite precipitation products in studying the summer precipitation variations over Taiwan[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3):347.
- [17] TANG G, CLARK M P, PAPALEXIOU S M, et al. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240:111697.
- [18] 邹磊,夏军,陈心池,等. 多套降水产品精度评估与可替代性研究[J]. 水力发电学报,2017,36(5):36-46.
- [19] 许心怡,李建柱,冯平. 不同降水产品在滦河流域径流模拟中的适用性[J]. 水力发电学报,2021,40(12):25-39.
- [20] BECK H E, WOOD E F, PAN Ming, et al. MSWEP V2 global 3 - hourly 0. 1° precipitation: methodology and quantitative assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3):473-500.
- [21] FENICIA F, SAVENIJE H H G, MATGEN P, et al. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement[J]. Water Resources Research, 2008, 44:W01402.
- [22] FENICIA F, KAVETSKI D, SAVENIJE H H G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development[J]. Water Resources Research, 2011, 47:W11510.
- [23] STEPHENS C M, PHAM H T, MARSHALL L A, et al. Which rainfall errors can hydrologic models handle? Implications for using satellite - derived products in sparsely gauged catchments[J]. Water Resources Research, 2022, 58, e2020WR029331.
- [24] GAO H, HRACHOWITZ M, FENICIA F, et al. Testing the realism of a topography - driven model (FLEX - Topo) in the nested catchments of the upper Heihe, China[J]. Hydrol Earth System Science, 2014, 18:1895-1915.
- [25] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2):96-99.
- [26] 杜彦臻,刘红利,赵天宇,等. 基于 MOSCEM - UA 的水文模型多目标参数优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(1):41-45, 50.
- [27] 罗阳,赵伟,翟景球. 两类天气预报评分问题研究及一种新评分方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2):129-136.
- [28] BEVEN K, FREER J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology[J]. Journal of Hydrology, 2001, 249(1):11-29.
- [29] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1):80-91.

(编辑:黄文晋)

(下转第 130 页)