

典型遥感降水产品的水文模拟性能评估

李艳忠^{1,2}, 星寅聪^{1,2}, 庄稼成^{1,2}, 杨泽龙^{1,3}, 赵紫春^{1,2}, 李超凡⁴,
王启素^{1,2}, 谢雨初^{1,2}, 王洁^{1,2}, 董剑萍⁵, 林彬⁶, 徐兴祝⁷

1. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院, 南京 210044;

2. 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, 南京 210044;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

4. 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044;

5. 宁夏吴忠市盐池县水务局, 吴忠 751500;

6. 山东省第七地质矿产勘查院, 临沂 276000;

7. 山东省临沂市自然资源和规划局, 临沂 276037

摘要: 遥感降水具备大尺度、近实时、高精度等优点, 现已被广泛应用于流域水资源评估和生态环境保护的研究。但遥感降水产品众多, 性能差异较大, 不同产品在特定流域的适用性需要进行综合评估。本研究以渭河流域的4个子流域为研究区, 以国家气象局(CMA)逐日降水格点数据集为标准, 借助ABCD水文模型, 评估了5种典型的遥感降水产品(CHIRPS v2.0, CMORPH v1.0, PERSIANN-CDR, TRMM, MSWEP v2.0)对降水等级和水文过程模拟的性能。(1)在捕捉降水的时空变化格局方面, TRMM产品表现出较好的性能;(2)在基本统计指标和分类统计指标方面, 多源集成产品MSWEP明显优于其他4种产品;但各遥感产品对中雨和大雨, 尤其是大雨的预测效果欠佳;(3)在径流模拟方面, 以TRMM降水作为输入时, ABCD模型模拟径流的效果明显优于其他遥感产品, 其NSE在渭河上游、泾河上游、马莲河和北洛河分别达到了0.66、0.46、0.56和0.55。TRMM产品在捕捉降水空间格局和径流模拟方面优越, 而MSWEP的统计性能较为优越。本文的研究结果, 可为半干旱半湿润区域水文和气象等应用研究, 在遥感降水数据源的选择方面提供科学参考依据, 还可为黄河流域生态保护和高质量发展提供数据支撑。

关键词: 遥感降水, 渭河流域, ABCD模型, 性能评估, MSWEP

中图分类号: P2

引用格式: 李艳忠, 星寅聪, 庄稼成, 杨泽龙, 赵紫春, 李超凡, 王启素, 谢雨初, 王洁, 董剑萍, 林彬, 徐兴祝. 2024. 典型遥感降水产品的水文模拟性能评估. 遥感学报, 28(2): 398-413

Li Y Z, Xing Y C, Zhuang J C, Yang Z L, Zhao Z C, Li C F, Wang Q S, Xie Y C, Wang J, Dong J P, Lin B and Xu X Z. 2024. Evaluation of typical remote-sensing precipitation products in hydrological simulation. National Remote Sensing Bulletin, 28(2): 398-413[DOI: 10.11834/jrs.20222012]

1 引言

降水是水循环过程的重要组成部分, 精确的降水记录在水资源规划、洪水模拟和干旱预测等方面均发挥重要作用(Donat等, 2016)。同时, 降水也是大气循环过程的核心内容, 降水数据的精确性可直接影响到气候变化趋势和波动研究的可靠性(Li等, 2021; Tian等, 2017)。由于降水

存在显著的时空变异性, 在研究特定区域水文气象特性时, 需要对降水数据的准确性和精确性进行评估。对于降水的监测, 目前主要有3种途径: 地面雨量计观测、地基雷达监测和卫星遥感降水反演(Sun等, 2018)。地面雨量计可获得近似真实的降水, 但由于雨量计空间分布不均匀, 较难以准确反映降水的时空分布特征; 地基雷达可提供较高时间频率(5 min甚至更短)和较大空间覆

收稿日期: 2022-01-10; 预印本: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42177436, 41701019); 江苏省研究生科研与实践创新计划(编号: KYCX22_1210); 江苏省自然科学基金(编号: BK20201393)

第一作者简介: 李艳忠, 研究方向为水文气象与3S技术应用研究。Email: lyz@nuist.edu.cn

通信作者简介: 李超凡, 研究方向为自然地理与3S技术应用研究。E-mail: lcf@nuist.edu.cn

盖范围(200 km以上)的降水监测,但其建设和维护成本较高,并且在复杂地形环境下存在较大误差(Wilson和Brandes,1979)。与前两者相比,卫星遥感降水具有全天候、大范围、时空连续、不受地形和气候限制等优势(唐国强等,2015;丁明泽等,2022),现已成为降水观测的重要手段。

目前,卫星遥感降水产品多达几十种(Beck等,2019a;Sun等,2018),为了评估不同遥感降水产品的性能,国内外学者开展了诸多研究工作。Sun等(2018)评估了多种遥感降水产品在全球尺度的性能,发现不同遥感传感器、不同反演算法得到的遥感降水量存在较大差异,比如基于热红外反演的PERSIANN CCS产品在热带地区明显高估;Beck等(2017)在流域尺度评估了多源遥感降水产品的水文性能,发现基于遥感和再分析的MSWEP产品的性能明显优于其他降水产品。刘洁等(2018)利用国家基准气象站观测的降水数据,评估了TRMM 3B42RT、TRMM 3B42V7、CMORPH RAW、CMORPH CRT4种遥感降水产品的统计性能和水文性能,发现基于微波遥感的TRMM降水产品的统计性能较好,其水文模拟效果也较其他产品优越。卫林勇等(2019)基于地面格网降水产品CGDPA评估了CHIRPS、CMORPH-BLD、PERSIANN-CDR、TRMM 3B42V7遥感降水数据产品在中国不同省份的性能,结果表明TRMM 3B42V7在不同省份捕捉月降水的性能最好,PERSIANN-CDR较适用于新疆维吾尔自治区、吉林省,TRMM 3B42V7较适用于陕西省、江西省以及云南省。综上可知,目前大部分的研究工作较多选择有限的地面观测站点数据作为标准,开展遥感降水产品统计特征分析,而针对不同卫星传感器、不同反演算法的遥感降水的综合性能评估相对薄弱,特别是遥感降水在半湿润半干旱地区的水文性能评估有待加强。此外,MSWEP作为一种新兴的多源遥感降水产品,其性能已被广泛报道(Beck等,2017;Ma等,2018),但在生态环境脆弱的气候过渡区的研究相对薄弱,有待深入研究。

渭河流域地处中国半干旱半湿润的气候过渡区,其生态环境相对脆弱(Liu等,2019)。同时,渭河流域也是黄河流域生态保护和高质量发展规划的重点区域(中共中央国务院,2021),是中国重要的粮食主产区(彭少明等,2017)。该流域的

发展受到水资源短缺的严重束缚,而降水作为该流域水资源的主要来源,其时空变异性对区域生态和经济发展至关重要(Liu等,2019;刘昌明等,2016)。那么,诸多类型的遥感降水产品在渭河流域的性能如何?哪些产品更能捕捉到该流域降水的时空变化格局?对这些问题的解答,可为渭河流域水资源评价和管理提供重要的科学参考,并为黄河流域生态保护和高质量发展规划的实施提供有利支撑。

基于此,本研究以渭河流域的4个子流域为研究对象,采用降尺度的格网观测降水为参考标准,评估5套典型的遥感降水产品(CHIRPS,CMORPH,MSWEP,TRMM,PERSIANN-CDR)的统计性能。在此基础上,利用5套遥感降水产品分别驱动ABCD水文模型,揭示不同遥感降水产品的水文性能。本研究不仅可为渭河流域的洪水预报、骤发干旱预警等科学研究工作,提供遥感降水数据源选择的参考,还可扩展遥感降水估算技术在水文和水资源生产实践中的应用,为遥感降水产品在不同气候区的应用和改进提供理论支持。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究区概况

渭河是黄河的第一大支流,全长818 km,流域面积为13.48万km²,地形呈西高东低(图1)。由于渭河流域地处中国半湿润一半干旱的气候过渡区,其生态环境比较脆弱(Huang等,2017;李艳忠等,2016),对气候变化和人类活动极其敏感。为确保评估不同遥感降水数据产品水文性能的客观性,并考虑流域间水文气象特征的差异性(表1),本研究选择人为干扰较少(无跨流域调水和大规模取用水)的4个上游区域为研究区,分别是渭河上游、泾河上游、马莲河和北洛河(图1)。4个流域的多年平均降水量为472.0—563.2 mm,径流深为26.8—62.7 mm,潜在蒸散发为870.6—950.5 mm,干燥指数为1.55—2.01(表1)。其中,渭河上游流域面积约为3.01万km²,占整个研究区面积的34.7%,年平均降水量和径流深最大,分别达到了563.2 mm和62.7 mm,而潜在蒸散发和干燥指数则最小。其他水文气象特征如表1所示。

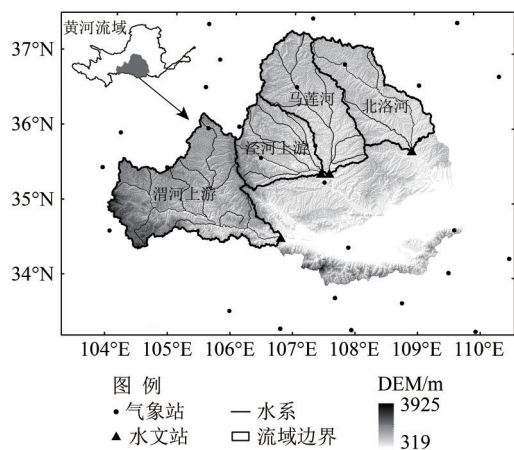


图1 研究区示意图
Fig. 1 Location of the study area

2.2 数据源

2.2.1 遥感降水数据集

本文选取了5套有代表性的准全球遥感降水数据集，空间分辨率均为0.25°，其他基本信息如表2所示。其中，CHIRPS v2.0由美国地质调查局（USGS）以及加利福尼亚大学的气候灾害小组联合研发，时间跨度为1981年—2018年，空间覆盖范围为50°N—50°S；该产品耦合了卫星图像、地面观测和高分辨率气候学数据（Funk等，2015）。CMORPH v1.0是美国气候预测中心（CPC）研发的降水数据集，它融合了卫星和雨量站的基础资料，利用红外数据获得云迹信息，通过雷达观测数据

对云迹信息进行偏差校正，然后对微波反演的降水速率进行空间插值，从而得到1998年—2019年、60°N—60°S的降水产品（Joyce，2004）。PERSIANN-CDR是由加州大学Irvine分校研发的一种实时降水产品，该产品利用人工神经网络与气象要素分类算法，主要以红外数据为输入，并利用“标准”降水资料GPCP进行了偏差校正，从而得到了1983年—2018年、60°N—60°S的准全球的降水数据集（Ashouri等，2015）。TRMM 3B42是由美国航空航天局和日本空间开发局共同研制，是世界上第一颗搭载主动探测降水雷达的卫星，并首次提供了3维的降水分布信息，很大提高了降水反演精度，该数据时间和空间范围分别为1998年—2018年和50°N—50°S（Huffman等，2001）。MSWEP是一款全新的多源数据融合的全球降水产品，它结合了站点、卫星和再分析的数据的优势，融合了包括5个基于卫星、3个基于再分析和2个基于测量的降水产品。此外，MSWEP采用了基于Budyko框架和覆盖全球的径流观测数据，对测量仪器和地形起伏带来的雨量偏差进行了校正，最大程度地减少了降水估算误差（Beck等，2019a）。在对比不同遥感降水产品的性能前，对各产品的值校准到了中国东八区的时间，消除了与UTC之间的时差。为了后续分析表达清晰，后续产品名称用简称表述，不再展示版本号。此外，为了对比分析的一致性，性能评估的时段统一为1998年—2014年。

表1 渭河流域4个典型流域水文气象特征
Table 1 Basic hydro-meteorological characteristics of four typical basins in the Wei River

编号	河流	水文站	面积/km ²	降水/(mm/a)	潜在蒸散发/(mm/a)	年径流深/mm	干燥指数	多年径流系数
1	渭河上游	林家村	30661	563.2	870.6	62.7	1.55	0.11
2	泾河上游	杨家坪	14124	555.4	916.9	46.8	1.65	0.08
3	马莲河	雨落坪	19019	472.0	950.5	22.3	2.01	0.05
4	北洛河	交口河	25154	561.1	938.0	26.8	1.67	0.05

注：多年降水、潜在蒸散发计算的数据年限为1961年—2014年。潜在蒸散发通过Penman-Monteith公式（Allen等，1998）计算获得，径流数据来自国家水文局的1961年—2018年的水文年鉴资料，均为还原后的水量数据。

表2 遥感降水数据产品基本信息
Table 2 Basic information of remote sensing precipitation products

名称	时段/年	空间范围	数据源	数据下载地址
CHIRPS v2.0	1981—2018	[50°N—50°S]	G, S, R, A	https://data.chc.ucsb.edu/products/ [2022-01-10]
CMORPH v1.0	1998—2019	[60°N—60°S]	G, S	https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0 [2022-01-10]
PERSIANN-CDR	1983—2018	[60°N—60°S]	G, S	http://chrsdata.eng.uci.edu/ [2022-01-10]
TRMM 3B42	1998—2018	[50°N—50°S]	G, S	https://gpm.nasa.gov/data [2022-01-10]
MSWEP v2.0	1979—2014	全球	G, S, R, A	https://dap.nci.org.au [2022-01-10]

注：表中数据源的字母缩写G表示地面观测，S为卫星数据，R为再分析数据，A为分析数据。

2.2.2 水文气象数据

本研究使用了36个气象站逐日常规气象数据，包括降水、气温、风速、水汽压等常规气象要素数据，该数据从国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/> [2022-01-10]) 获取。受气象站点降水观测仪器系统误差和气候条件等因素的影响，气象站观测值与实际值存在偏差。所以，对站点观测的降水进行偏差矫正显得尤为重要。本研究对36个站的逐日降水的动力损失和湿润损失进行了矫正，以减少观测降水的不确定性，详细矫正方法请参考彭振华等 (2021)。利用矫正后的36个气象站的降水量直接插值到 0.25° 格网，虽然插值结果具有良好的空间连续性，但每个格点的值可能会存在较大不确定性。因此，本研究引入了全国1961年—2019年逐日降水格网数据集 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)，该数据集是基于中国2474个国家级地面站基础气象资料，经过严格的质量检测、控制和矫正后，通过薄板样条插值获得，该数据每个 0.5° 空间格点值具有很高的可信度 (Xie等, 2007)。基于此，本文首先利用校正后的36个站点的降水插值到 0.25° ，再与 0.5° 格网数据建立空间关系，在既能保留 0.5° 格点值空间精度，又能保留插值得到的 0.25° 数据空间连续性的前提下，实现对原始 0.5° 格网降水数据降尺度到 0.25° ，本文将降尺度后的降水数据集称为CMA。本研究中4个子流域的逐月径流数据 (1961年—2014年)，来自国家水文水资源局出版的水文年鉴。

2.3 研究方法

2.3.1 ABCD水文模型

ABCD模型是由Thomas等提出的非线性水量平衡模型 (Martinez和Gupta, 2010; Thomas, 1981)，该模型只有a、b、c、d共4个参数，输入数据为降水 (P) 和潜在蒸散发 (PET)，可模拟月尺度的径流过程，计算水文年步长内的实际蒸散发量 (ET)、直接径流 (R_s)、地下水径流 (R_g) 以及土壤水储量 (S) 和地下水储量 (G) 的变化。ABCD模型把整个流域概化为两层结构：土壤水层和地下水层，其中模型的结构如图2所示，核心变量的方程见式 (1) — (4)。诸多学者利用ABCD模型模拟了流域月尺度径流过程，取得了较好的效果 (Bai等, 2015, 2020; 韩鹏飞和王旭升, 2016; 吴光东等, 2019)。

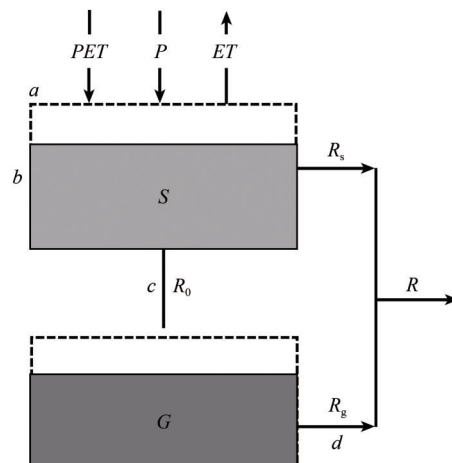


图2 ABCD模型结构示意图

Fig. 2 The model structure, key equations and parameters in the ABCD model

$$PET = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{bW_t}{a}} \quad (2)$$

$$R_s = (1 - c) \times (W_t - Y_t) \quad (3)$$

$$R_0 = c(W_t - Y_t), R_g = dG \quad (4)$$

式中，a为土壤完全饱和前形成径流的概率；b为不饱和含水层最大储水量能力 (mm)；c为土壤表层补给地下水的系数；d为地下水形成出流的速度； Y_t 和 W_t 分别为可能蒸散发量 (mm) 和有效水量 (mm)； R_s 为直接径流 (mm)； R_0 为地下水补给量 (mm)； R_g 为地下径流 (mm)；G为地下水储量 (mm)。PET为日潜在蒸散发 (mm d^{-1})； Δ 为水汽压曲线斜率 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)； R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)，G为土壤热通量变化 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，日尺度可忽略)； γ 为干湿球常数 ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)； T_a 为2 m高度平均日气温 ($^\circ\text{C}$)； u_2 为2 m高度风速 (m s^{-1})； e_s 为饱和水汽压 (kPa)； e_a 为实际水汽压 (kPa)。

2.3.2 基本统计和水文模型性能指标

为了定量评估5套多源遥感降水产品的性能，本研究采用了多种评价指标，各类指标的计算公式如表3所示。其中，基本统计指标的相关系数 (CORR) 反映了各遥感降水产品与站点观测降水之间的线性相关程度，最优值为1；均方根误差 (RMSE) 和相对偏差 (BIAS) 反映两者的误差和偏差，最优值均为0；Kling-Gupta系数 (KGE) 反映两者的整体拟合优度，最优值为1。衡量降水等级预报特性的指标有探测率POD、误报率FAR、

关键成功指数CSI，其中POD描述降水产品能够正确预测降水发生的比例，FAR指当前降水等级被错误检测数量占检测总降水事件总数的比例，CSI是探测降水性能的综合指标。对降水量划分了3个等级：小雨为0.1—10 mm/d，中雨为10—25 mm/d，大雨为>25 mm/d。水文模型性能采用纳什效率系数

(NSE)来表征，当NSE<0.36时，性能不可接受；当0.36≤NSE<0.75时，性能较好；当NSE≥0.75时，性能优秀（Motovilov等，1999）。为了更直观表征不同降水产品在渭河4个子流域的水文性能，对NSE进行了排序和打分，计算每个产品的综合得分。

表3 评价指标的计算公式
Table 3 Equations of evaluation metrics

统计指标	公式
相关系数(CORR)	$\text{CORR} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$
均方根误差(RMSE)	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$
相对偏差(BIAS)	$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$
Kling-Gupta系数(KGE)	$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(1 - \text{CORR})^2 + (1 - \frac{\bar{S}}{\bar{G}})^2 + (1 - \frac{\bar{S}_s}{\bar{S}_g})^2}$
预报率(POD)	$\text{POD} = \frac{H}{H + M}$
误报率(FAR)	$\text{FAR} = \frac{F}{H + F}$
关键成功指数(CSI)	$\text{CSI} = \frac{H}{H + M + F}$
纳什效率系数(NSE)	$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$

注：n为样本容量； G_i, S_i 分别为观测降水与遥感产品估算降水； $\bar{G}, \bar{S}_g$ 分别为观测降水的均值和标准差； $\bar{S}, \bar{S}_s$ 分别为遥感产品估算降水的均值和标准差；H表示被遥感降水产品探测到且被地面实测降水CMA观测到的降水事件数量；M为被地面实测降水CMA观测到，但未被遥感降水产品探测到的降水事件数量；F表示被遥感降水产品探测到，但未被地面实测降水CMA观测到的降水事件数目； Q_{oi}, Q_{si} 分别为观测流量与模拟流量； $\bar{Q}_o$ 为观测流量的均值。

3 结果与分析

3.1 降水时空变化格局

图3和图4分别展示了渭河4个子流域多年观测降水和5种遥感降水产品的时空格局。由观测值可知，渭河流域多年观测降水量均值空间分布总体呈由南向北递减，东部多西部少的特点（图3（a））。整体而言，5种遥感降水产品均能捕获流域多年降水均值的空间分布格局（图3（b）—3(f)）。但就不同区域而言，不同产品间存在较大差异性。例如，CHIRPS产品和MSWEP产品均表现出在流域北部偏小、中部偏大的格局；PERSIANN产品则整体更显平滑，在流域南部偏大；CMORPH产品和TRMM产品与观测降水分布一致性相对较好。就均值而言，在渭河上游TRMM产品表现优于其

他，MSWEP产品表现最差；在泾河上游CMORPH产品表现较好，最差的是PERIANN产品；在马莲河流域，除PERSIANN产品明显低估外，其余4种产品差别不大；在北洛河流域，MSWEP产品性能优越，其次是CHIRPS产品，最差的是PERSIANN产品。图3中以及各子图统计值前的编号1，2，3，4，分别对应的渭河上游，泾河上游，马莲河和北洛河4个子流域。CMA为观测降水数据集。

就年际尺度而言（图4），TRMM产品在4个子流域与CMA的年际变化一致性最好。PERSIANN产品在泾河上游、马莲河与北洛河的年际变化均低于CMA，且是5种产品中与CMA年际波动差别最大的一个；在渭河上游，该产品在2008年之前与站点观测降水波动保持着较好的一致性，而在2008年后其均值明显高于CMA均值。

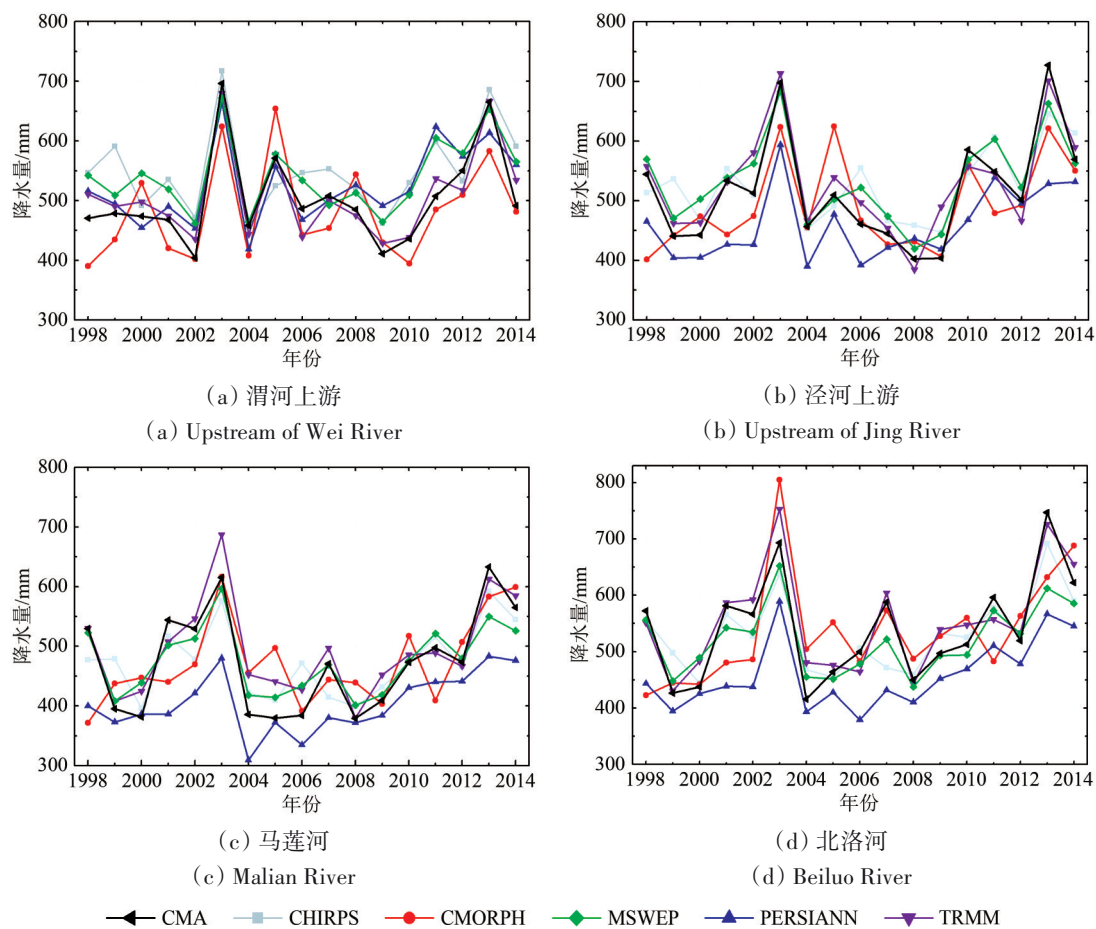


图4 渭河流域4个子流域观测与遥感降水的年际变化
Fig. 4 Annual variation of observational and remotely sensed precipitation in the four sub-basins of the Weihe River Basin

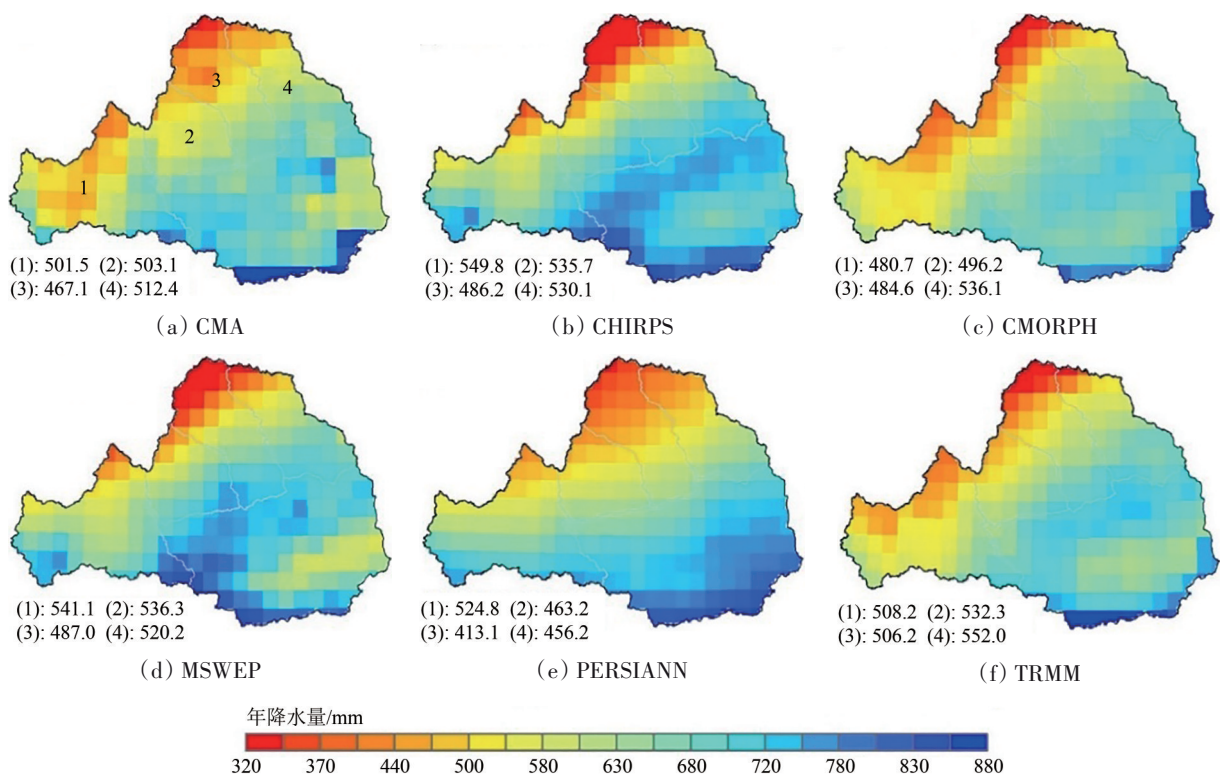


图3 渭河及其4个子流域观测与遥感产品多年均值空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of multi-year mean of observational and remotely sensed precipitation in the four sub-basins of the Weihe River Basin

为了更好地展示不同遥感产品的性能, 绘制了不同降水产品在4个子流域统计信息的泰勒图。在渭河上游(图5)。TRMM产品的相关系数($CORR=0.95$)、标准差($S=72.39$)等均优于其他4种产品, 与CMA最为接近($CORR=1$, $S=78.53$), 表现出良好的性能; 其次为MSWEP($CORR=0.9$, $S=59.81$)。在泾河上游(图5(b)), TRMM和MSWEP产品的相关系数较为接近($CORR=0.95$), 但是MSWEP的标准差要低于TRMM, 其次为CHIRPS产品

($CORR=0.87$, $S=69.1$), 最差的为CMORPH($CORR=0.76$, $S=73.07$)。与泾河上游类似, TRMM和MSWEP产品在马莲河与北洛河的整体性能较为优越, 相关系数均在0.9以上(图5(c)和5(d)), 而CMORPH产品(马莲河: $CORR=0.60$, $S=70$; 北洛河: $CORR=0.64$, $S=94.6$)的性能均较差。就MSWEP在不同流域的性能而言, 在海拔较低的泾河上游、马莲河和北洛河, 整体优于地处海拔较高的渭河上游区域。

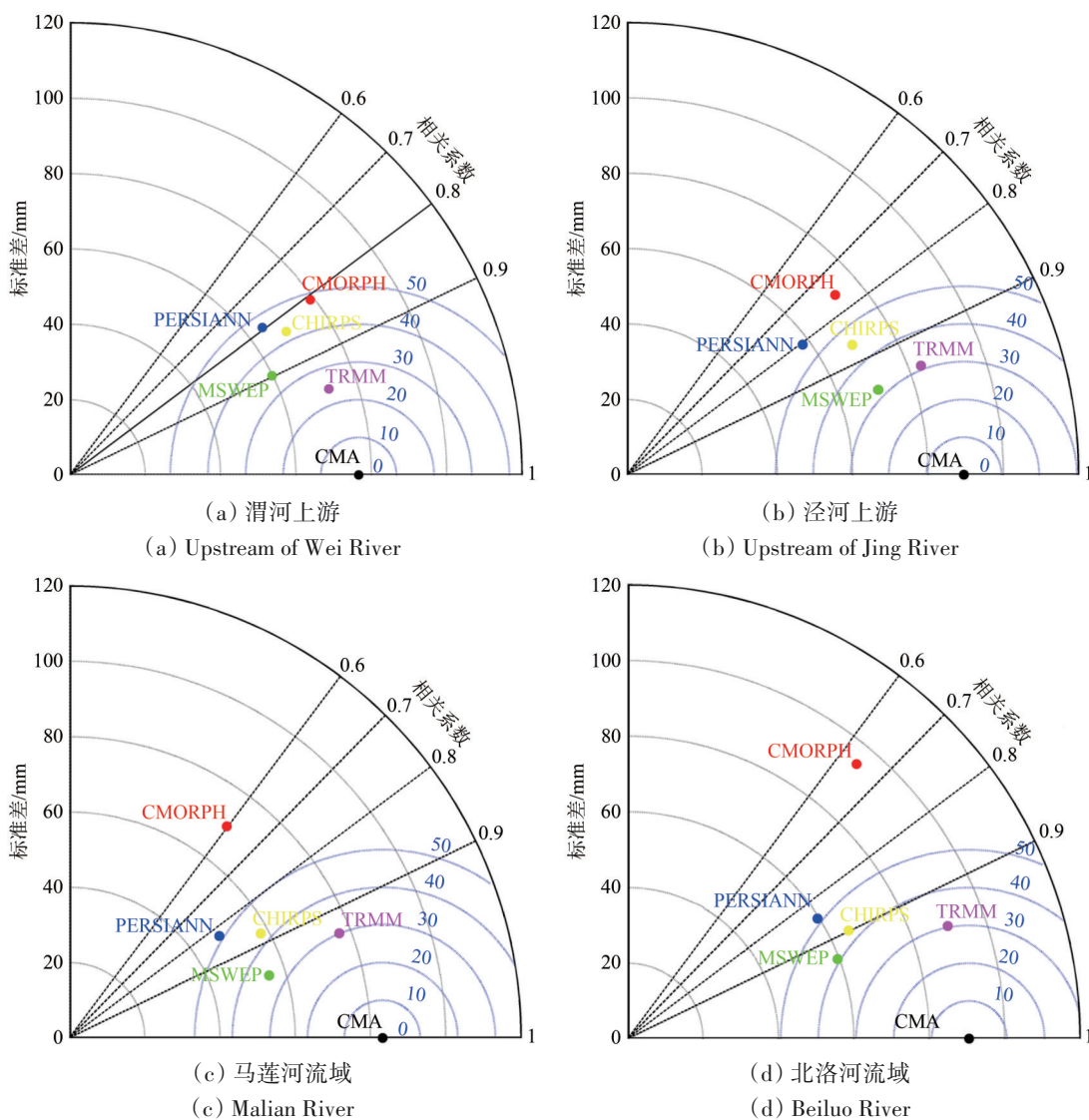


图5 5种遥感降水产品在4个子流域性能的泰勒图

Fig. 5 Taylor diagram of performance of different remote sensing precipitation over four sub-basins of the Weihe River

3.2 遥感降水的统计性能

图6展示了不同降水产品在4个流域日尺度的基本统计性能。大部分产品在4个子流域均呈现低估($BIAS<0$), PERSIANN低估尤为明显。MSWEP

和TRMM产品的BIAS均低于其他3种产品(图6(a))。MSWEP产品的均方根误差(RMSE)相对其他遥感产品较小, 在4个流域值的范围是3.46—4.04 mm, 而CHIRPS产品的RMSE在4个流域较大(图6(b))。

MSWEP产品的相关系数在4个流域明显优于其他产品，均达到0.63以上，而CHIRPS和PERSIANN则偏低，大部分在0.4以下（图6（c））。对于KGE而言，MSWEP产品明显优于其他4种遥感产品，4个流域均在0.6以上，PERSIANN的KGE整体偏低，大部分在0.3以下（图6（d））。综上可知，不同遥

感产品在同一流域存在较大差异，同一遥感产品在不同流域的性能也表现出显著的区域差异性，其中基于多源数据融合的MSWEP产品性能优于其他产品，新一代数据融合降水产品表现出了优越的性能；而基于红外信息的CHIRPS和PERSIANN的降水产品性能表现稍逊。

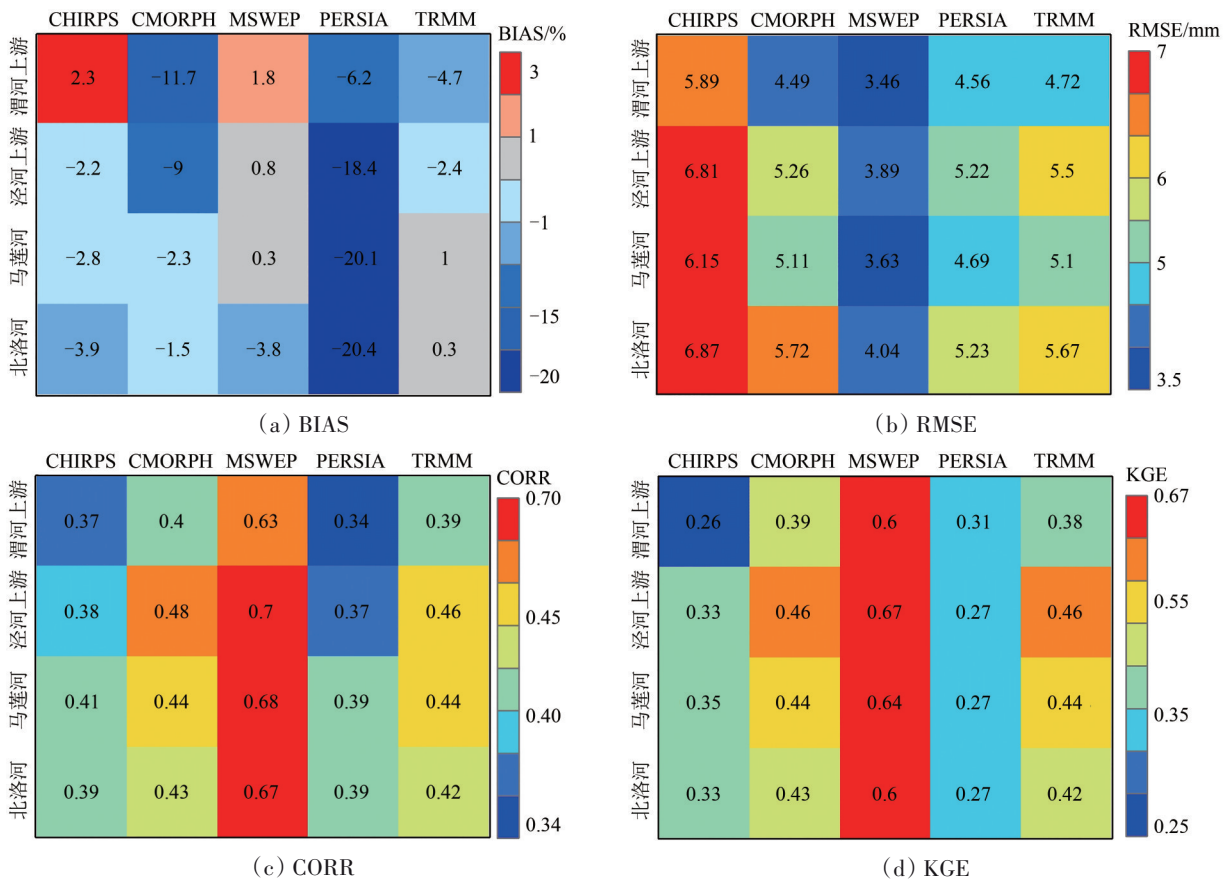


图6 遥感降水产品在不同流域的基本统计性能

Fig. 6 Basic statistical performance of remote sensing precipitation products in different river basins

图7展示了遥感降水产品在4个子流域捕获降水等级的性能。对于小雨，PERSIANN产品的探测率最高（ $POD > 0.71$ ，图7（a）），其次为MSWEP，其余3种产品的等级性能差别不大。与之对应，两种产品具有较低的误报率（ $FAR < 0.24$ ，图7（b））和较高的关键成功指标（ $CSI > 0.58$ ，图7（c））。5种降水产品在渭河上游的性能要优于其他3个流域。对于中雨而言，MSWEP产品的探测性能最好（ $POD > 0.38$ ），与之对应，MSWEP具有较低的FAR和较高的CSI（图7（d）—7（f））；表现较差的产品是PERSIANN（ $POD < 0.22$ ），其余3种产品的性能差别不显著。对于大雨而言，CHIRPS的POD较高，其次为MSWEP，最差的是PERSIANN；但是

MSWEP的FAR较低，CSI较高，表现出独特的优越性能（图7（g）—7（i））。综上可知，MSWEP产品的降水等级性能整体明显优于其他4种产品，各遥感产品对于小雨强度降水的性能明显优于中雨和大雨，流域之间的性能差异不大。

3.3 遥感降水产品的水文模拟性能

为了验证不同遥感降水产品的水文性能，利用观测降水数据集和潜在蒸散发PET驱动ABCD模型，比较不同降水产品为输入时对径流的模拟结果。首先，对水文模型进行率定和验证，把1961年—1980年作为模型的率定期，1981年—1997年作为模型的验证期（图8）。结果发现，4个流域率定期

的纳什效率系数较好 ($NSE>0.64$), 其中泾河上游优于其他流域 ($NSE=0.75$); 在验证期, 除了马莲河的 NSE 提高外, 其余流域的 NSE 均稍微下降, 但整体的性能较为理想, 这表明 ABCD 水文模型在

渭河流域具有较好的适应性, 可以用于不同遥感降水产品性能的验证。基于此, 借助率定好的模型参数, 利用不同遥感降水产品驱动 ABCD 模型, 其模拟的性能如图 9 所示。

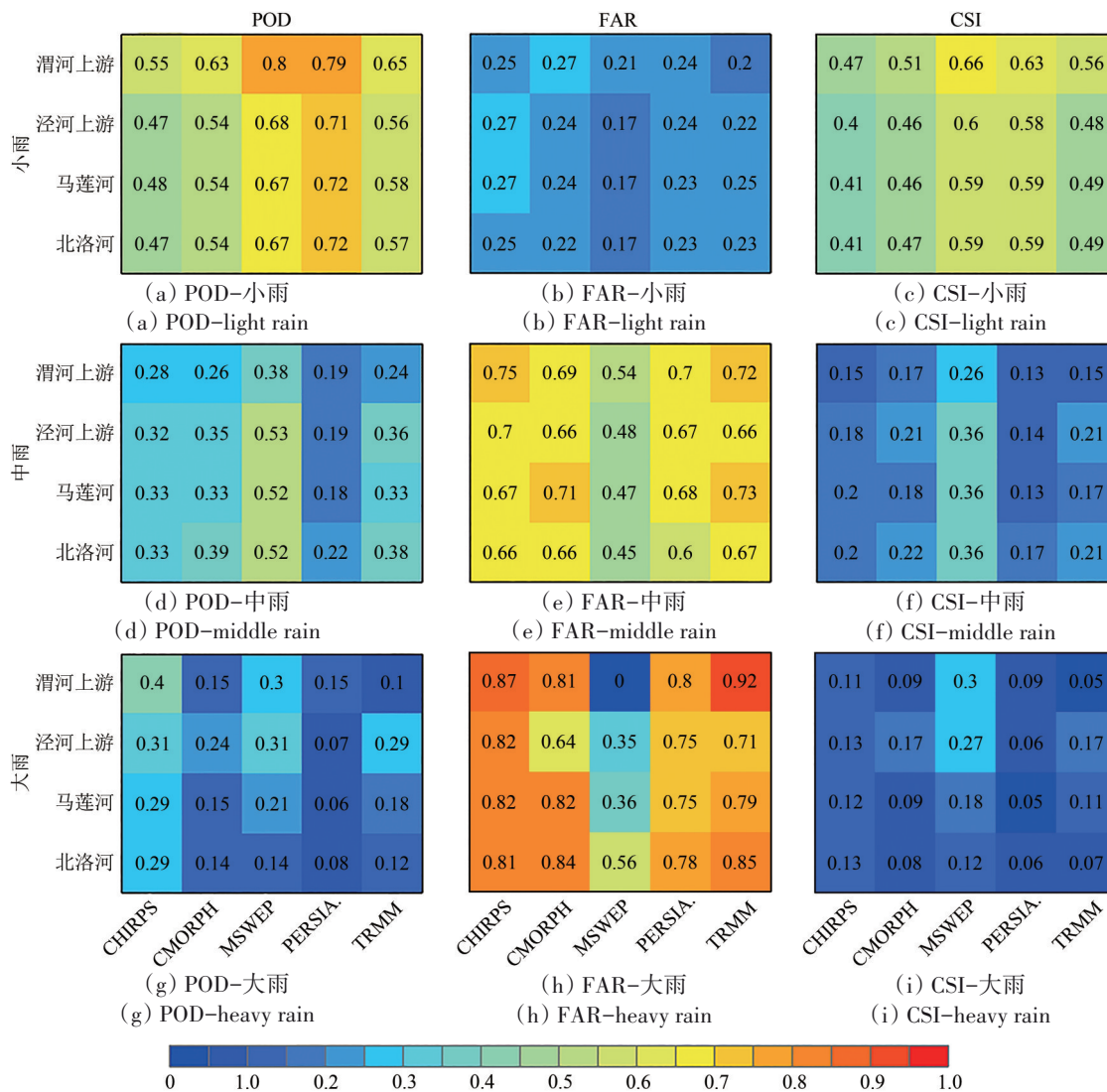


图 7 遥感降水产品在不同流域的分类统计性能

Fig. 7 Categorical performance of remote sensing precipitation products in Wei River basins

整体而言, 5 种遥感降水产品驱动的水文模型, 均能较好地捕获观测径流的变化过程, 且在渭河上游的模拟性能要优于其他流域, 性能最差的在泾河上游。这可能是由于渭河上游海拔较高, 降雨—径流过程受到干扰的因素少; 而在其他 3 个流域, 由于海拔较低以及人口较密集, 降雨—径流关系受到干扰。从不同流域来看, 在渭河上游, TRMM 产品的径流模拟效果最优 ($NSE=0.66$), 其次为 MSWEP ($NSE=0.59$), 表现较差的是 CHIRPS 和 PERSIANN 产品。在泾河上游, TRMM 和 MSWEP 产品的 NSE 为 0.46, 最差的为 PERSIANN 产品

($NSE=0.34$)。在马莲河和北洛河流域, 模拟性能最好的产品分别是 CMORPH 和 TRMM。根据不同产品在 4 个流域的综合评分可知, TRMM 产品在 4 个流域的径流模拟效果明显优于其他遥感产品 (评分 19), 其次为 MSWEP 产品 (15 分), 模拟性能较差的是 PERSIANN 和 CHIRPS 产品 (分别 5 分和 10 分), 表明基于多源信息融合的最新产品 MSWEP 和主动微波产品 TRMM 在渭河流域具有较强的适应性, 推荐为首选降水产品, 而基于红外/近红外的 PERSIANN 和 CHIRPS 产品, 其降水反演算法在半干旱半湿润地区有待进一步探讨。

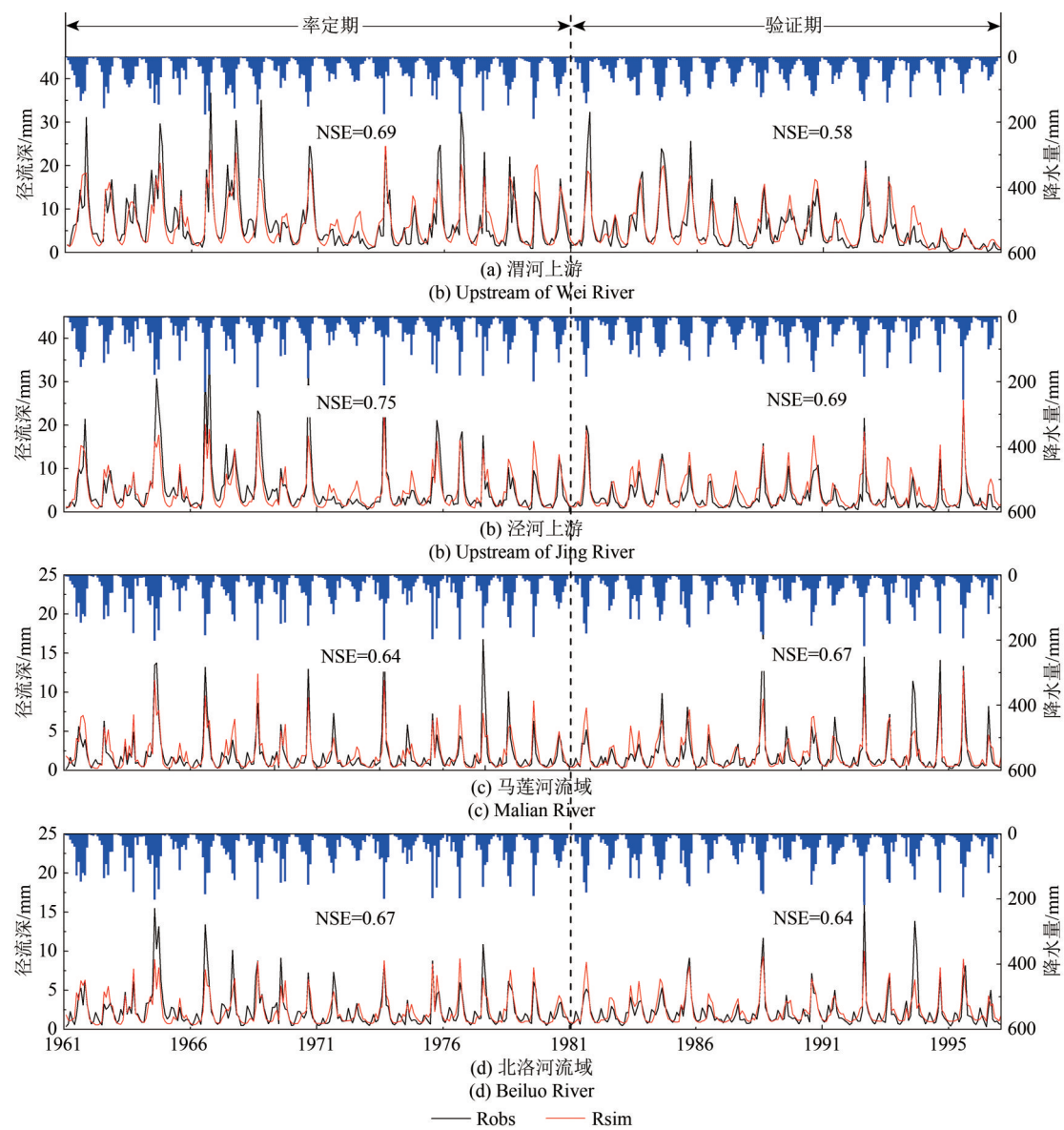
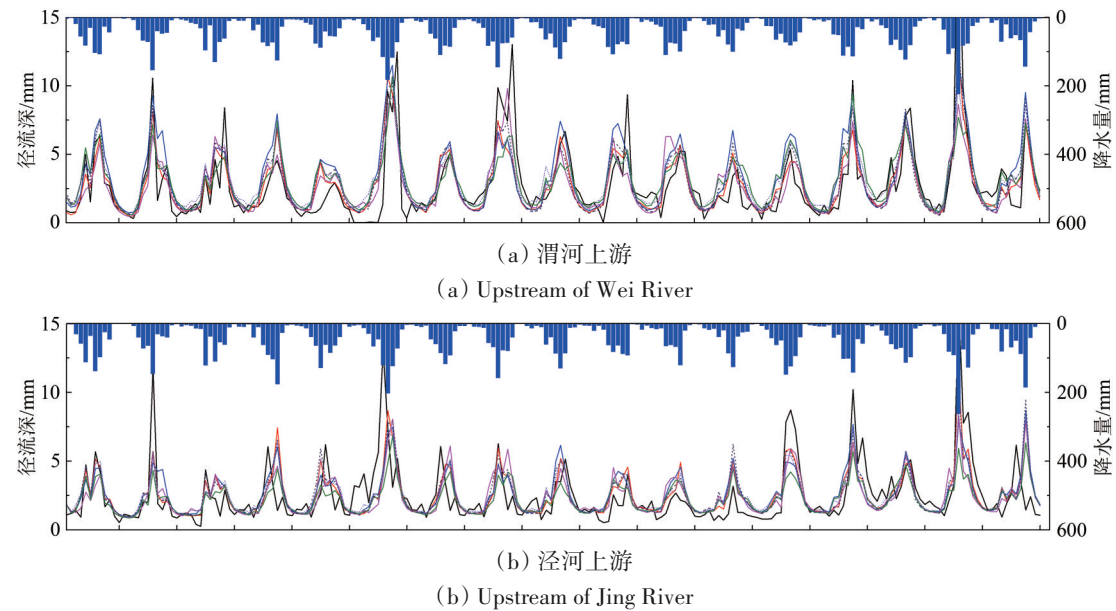


图8 ABCD水文模型率定期与验证期的模拟性能

Fig. 8 Performance of ABCD model in calibration and validation period



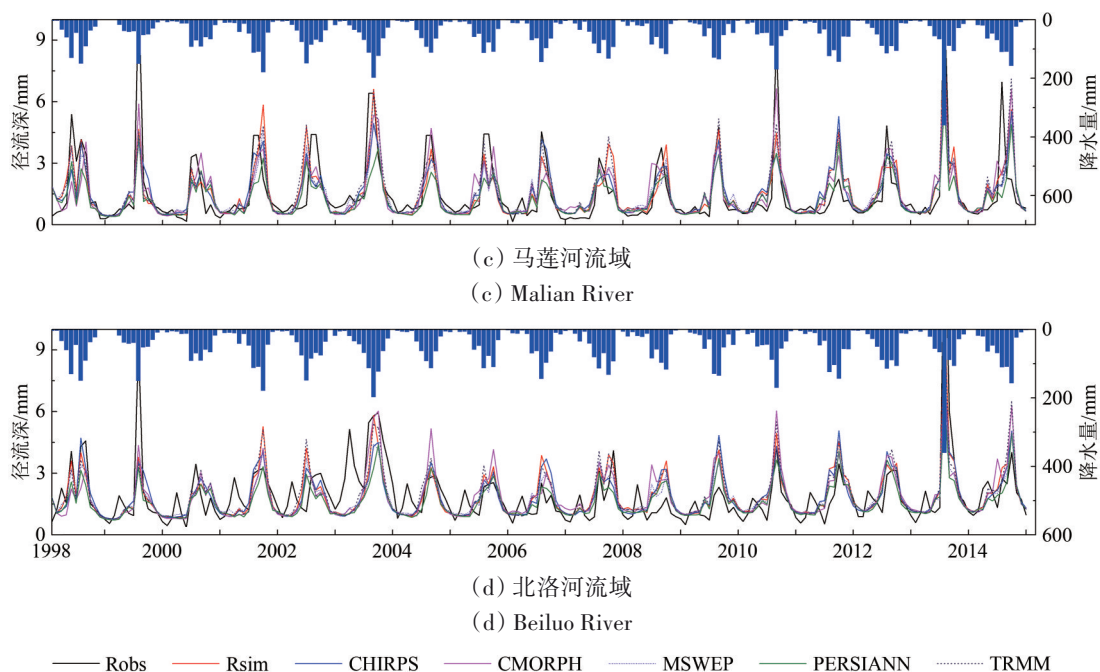


图9 遥感降水产品在渭河4个子流域的水文性能
Fig. 9 Hydrological performance the five remote sensing precipitation in four sub-basins of Wei River Basin

4 讨论

4.1 多源降水产品性能研究以及影响性能的因素

诸多学者在黄河流域开展了遥感降水的评估以及改进工作。例如，星寅聪等（2021）分析了4种遥感降水产品在黄河中游的性能，并提出了采用EMOS、QM的数据融合技术改进多源遥感降水的综合性能，从而为遥感降水的发展提供了新思路。Liu等（2019）评估了6种遥感降水产品在渭河流域探测极端降水的性能，发现TRMM 3B42V7具有较高的精度和较低的空间不确定性，整体明显优于其他降水产品。对于不同遥感降水产品的径流模拟性能，刘洁等（2018）发现TRMM 3B42V7的性能较为优越，这一结果与本文较为一致，本文发现TRMM 3B42V7的水文模拟性能明显优于其他4种产品，其在渭河上游的NSE达到了0.66（表4）。TRMM卫星于2015年8月份正式退役，取而代之的是GPM卫星，GPM卫星的降水反演算法为IMERG（简称GPM IMERG），已有研究表明其在黄淮海平原（Xu等，2019）、青藏高原（Xu等，2017），以及中国大陆（丁明泽等，2021）均取得了良好的效果，其性能优于TRMM 3B42V7。所以，TRMM 3B42V7和GPM IMERG降水产品序列，可用于无资料/稀缺资料地区水资源规划、洪水预报和干旱预测等领域。多源数据在水文、水文环境等方面

的优势已被广泛报道（王茹等，2022），最新发布的多源数据融合产品MSWEP（Beck等，2017，2019b），由于其优越的性能，已经被广泛应用于日尺度降水分析（Chen和Dirmeyer，2017）、湖泊动态监测（Satgé等，2017）以及驱动水文模型的洪水预报（Siqueira等，2020）等研究领域。彭振华等（2021）对比分析了5种降水产品在中国不同气候区的差异，发现MSWEP在各气候区的基本统计性能和降水等级性能优越，可作为全国气候研究的重要数据源，而PERSIANN-CDR和CHIRPS v2.0性能欠佳。Bai和Liu（2018）评估了多种遥感降水产品在三江源地区的水文性能，发现MSWEP降水产品可更好地模拟径流，该产品可作该区域最佳遥感降水产品。

表4 不同遥感降水产品在渭河4个子流域的NSE统计
Table 4 Hydrological performance of different remote sensing precipitation products in the Wei River

流域	遥感降水产品				
	CHIRPS	CMORPH	MSWEP	PERSIANN	TRMM
渭河上游	0.54 ₍₁₎	0.57 ₍₃₎	0.59 ₍₄₎	0.55 ₍₂₎	0.66₍₅₎
泾河上游	0.39 ₍₃₎	0.38 ₍₂₎	0.46₍₅₎	0.34 ₍₁₎	0.46₍₅₎
马莲河流域	0.56 ₍₄₎	0.62₍₅₎	0.54 ₍₂₎	0.49 ₍₁₎	0.56 ₍₄₎
北洛河流域	0.49 ₍₂₎	0.50 ₍₃₎	0.53 ₍₄₎	0.45 ₍₁₎	0.55₍₅₎
评分	10	13	15	5	19

注：表中数字为纳什效率系数(NSE)，加粗数字表明在当前流域模拟效果最好的遥感产品。括号内的数字是得分，在当前流域该遥感产品模拟性能最优得5分，依次递减，最差得1分。

影响遥感降水产品性能的因素主要有3个方面:一是遥感传感器的性能,二是反演算法,三是研究区差异性。TRMM卫星搭载的是主动微波传感器,属于第一颗专门用于观测热带、亚热带降水的气象卫星,能够提供暴雨的三维结构,对降水的精确估计具有重要的提升作用(Huffman等,2001)。TRMM的后续替代产品GPM除延续TRMM的优点外,还在时空分辨率、观测精度和准确性等方面得到了大幅度提升,是真正意义上覆盖全球降水(含雨雪)的产品数据集。此外,TRMM产品由于以单一传感器为主,未使用多源数据进行融合,从而保证了降水数据序列的相对独立性,这一点对“降水—截留—下渗—径流”等水文过程的模拟尤为重要(表4)。MSWEP产品通过融合2套地面观测降水数据集、5套卫星降水产品和2套再分析数据集,并通过给予权重系数重新估算每个格网的降水,最大程度地减少了降水的整体估算偏差(Beck等,2017),所以MSWEP相对于其他产品具有较好的整体统计性能(图5—6)。但是,MSWEP的降水序列由10套降水数据的加权方式获得(Beck等,2019a),所以有可能破坏了降水序列的自然连续性,增加了降水估算值的随机性,进而影响到水文过程的迭代模拟过程,这可能是导致MSWEP径流模拟性能不甚理想的原因(图9,表4)。CHIRPS和PERSIANN产品主要是通过云顶温度计算一定空间范围内的冷云覆盖率,然后将冷云的日覆盖率与降水指数进行数理统计分析,得到线性回归公式的转换系数,进而推算降水(Ashouri等,2015)。所以,这种间接降水测量方式获得的产品,在时间变化和空间格局均存在较大误差(图6和图7,表4)。

不同流域遥感降水产品性能主要受地理位置、海拔高度,以及算法验证时所用气象站的空间分布密度等因素影响。比如,渭河上游地处地形复杂的山区(图1),降水以对流雨和地形雨为主,降水产品难以捕获降水的快速波动。此外,遥感传感器的敏感性随着地形复杂度的增加而降低(Sun等,2018;张国庆等,2022)。所以,遥感降水产品在渭河上游的整体统计性能,低于海拔较低且地形较为平坦的其他3个流域(图6)。但是,对于径流模拟性能而言,各产品在渭河上游的水文性能并不逊色,尤以MSWEP、PERSIANN和TRMM产品表现优良(表4)。这可能是由于渭

河上游地形复杂、受人类活动影响小,“降水—径流”的自然过程受干扰较少,而其他三个流域相对受人为因素干扰较大,比如耕种、退耕还林工程等,改变了自然水文过程(刘昌明等,2016)。

4.2 不确定性分析

本研究对数据源和研究方法均采取了严格的质量控制,以期获得客观、合理的评价结论,但依然不可避免地存在一些不确定性。首先,观测降水降尺度带来的不确定性。遥感降水(0.25°)与观测降水(0.5°)的格网空间分辨率不一致,为了两者进行匹配,对观测降水进行了降尺度到 0.25° (图3(a))。降尺度过程会带来一定的不确定性,但是本文分析大部分都基于流域尺度分析,所以降尺度过程的误差对研究结论影响有限。其次,水文模型自身的一些不确定性。水文模型的模拟结果在一定程度上受到输入数据的影响,本文未考虑人为因素(植被恢复、农业耕种等)对径流、潜在蒸散发的影响,ABCD模型的4个参数的物理意义有待进一步研究,参数与流域气候特征本身的相关性等,均可能对径流模拟性能产生影响。最后,单一水文模型评估带来的不确定性。本文仅使用了ABCD概念性水文模型评价遥感降水产品的水文性能,未设置用于对比的模型,模型本身结构的不确定性可能对模拟结果产生影响。基于此,后续的研究中,作者将采用多目标参数化方案对模型参数进行率定,增加更多的水文模型进行对比分析,以期更加客观地对遥感降水产品进行评估,从而为渭河流域的洪水预报、骤发干旱预警等应用研究时降水数据源的选择提供参考,并为遥感降水反演算法的进一步优化提供支撑。

5 结 论

尽管遥感降水产品的时间序列相对较短,但是由于其大尺度、近实时等优点,在水资源规划、干旱监测和洪水预报等领域发挥着重要作用。本文选择了全球5种具有代表性的遥感降水产品(CHIRPS v2.0, CMORPH v1.0, PERSIANN—CDR, TRMM, MSWEP v2.0),在我国黄河流域生态保护和可持续发展的重点区域—渭河流域,开展了降水产品基本统计、降水等级和水文模拟的综合性评估研究。研究发现:

(1) 5种遥感降水产品均能捕获降水的空间分

布, 其中基于多源数据融合的 MSWEP, 能更好捕获降水的空间不均匀性, 表现出优越的性能; PERSIANN 产品空间分布平滑, 且绝大部分区域被其低估, 性能相对较差。从年际尺度看, 各遥感产品在渭河上游整体偏好, 其中 TRMM 性能最佳, 其次为 MSWEP, 最差的是 PERSIANN。

(2) MSWEP 产品具有较低的 RMSE, 较高的 CORR 和 KGE 指标, 基本统计性能较好。CHIRPS 和 PERSIANN 产品的基本统计性能较差。此外, 对不同降雨等级性能的分析显示, 对小雨的探测, PERSIANN 产品表现较好, 其次为 MSWEP 产品, 并且所有产品在渭河上游的性能优于其他 3 个流域; 对中雨和大雨的探测, PERSIANN 产品性能明显下降, MSWEP 产品对这两种类型降雨具有较好的探测率, 但是其误报率也较高。

(3) 由水文模拟性能分析可知, TRMM 产品的水文模拟性能最优, 表明基于主动微波的遥感降水反演具有较高的水文应用前景, 其次为 MSWEP 和 COMRPH 产品。表现较差的是基于红外/近红外的 CHIRPS 和 PERSIANN 两种产品, 其反演算法在气候敏感的过渡区有待进一步改进。

本研究结果将为渭河流域水资源规划、干旱预警和极端暴雨监测等提供重要的数据支撑, 从而为我国黄河流域生态保护和高质量发展规划的顺利实施提供保障。此外, 本研究还可为不同遥感降水的反演算法在气候过渡区的改进提供参考。

参考文献 (References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma: Food and Agriculture Organization
- Ashouri H, Hsu K L, Sorooshian S, Braithwaite D K, Knapp K R, Cecil L D, Nelson B R and Prat O P. 2015. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1): 69-83 [DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00068.1]
- Bai P and Liu X M. 2018. Evaluation of five satellite-based precipitation products in two gauge-scarce basins on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(8): 1316 [DOI: 10.3390/rs10081316]
- Bai P, Liu X M, Liang K and Liu C M. 2015. Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of Hydrology*, 529: 1030-1040 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.015]
- Bai P, Liu X M, Zhang Y Q and Liu C M. 2020. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. *Water Resources Research*, 56(10): e2019WR027019 [DOI: 10.1029/2019WR027019]
- Beck H E, Pan M, Roy T, Weedon G P, Pappenberger F, van Dijk A I J M, Huffman G J, Adler R F and Wood E F. 2019a. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1): 207-224 [DOI: 10.5194/hess-23-207-2019]
- Beck H E, Vergopolan N, Pan M, Levizzani V, van Dijk A I J M, Weedon G P, Brocca L, Pappenberger F, Huffman G J and Wood E F. 2017. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12): 6201-6217 [DOI: 10.5194/hess-21-6201-2017]
- Beck H E, Wood E F, Pan M, Fisher C K, Miralles D G, Van Dijk A I J M, McVicar T R and Adler R F. 2019b. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3): 473-500 [DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0138.1]
- Chen L and Dirmeyer P A. 2017. Impacts of land-use/land-cover change on afternoon precipitation over north America. *Journal of Climate*, 30(6): 2121-2140 [DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0589.1]
- CPC Central Committee, State Council. 2021. Outline of the Yellow River basin ecological protection and high-quality development plan. Beijing (中共中央国务院. 2021. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要. 北京)
- Ding M Z, Yong B and Yang Z K. 2021. Extreme precipitation monitoring capability of IMERG and GSMaP pure satellite precipitation products of Global Precipitation Mission in Chinese mainland. *National Remote Sensing Bulletin* (丁明泽, 雍斌, 杨泽康. 2021. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 纯卫星降水产品在中国大陆的极端降水监测能力研究. 遥感学报) [DOI: 10.11834/jrs.20210240]
- Ding M Z, Yong B and Yang Z K. 2022. Extreme precipitation monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of Global Precipitation Measurement (GPM) mission. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(4): 657-671 (丁明泽, 雍斌, 杨泽康. 2022. 全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的极端降水监测潜力研究. 遥感学报, 26(4): 657-671) [DOI: 10.11834/jrs.20220240]
- Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, O'Gorman P A and Maher N. 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5): 508-513 [DOI: 10.1038/NCLIMATE2941]
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A and Michaelsen J. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2: 150066 [DOI: 10.1038/sdata.2015.66]

- Han P F and Wang X S. 2016. Forecasting the response of a catchment on extreme climate change with ABCD model. *Yellow River*, 38(11): 16-22 (韩鹏飞, 王旭升. 2016. 利用ABCD模型预测流域水文对极端气候的响应. *人民黄河*, 38(11): 16-22) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.11.005]
- Huang S Z, Huang Q, Leng G Y, Zhao M L and Meng E H. 2017. Variations in annual water-energy balance and their correlations with vegetation and soil moisture dynamics: a case study in the Wei River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 546: 515-525 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.060]
- Huffman G J, Adler R F, Morrissey M M, Bolvin D T, Curtis S, Joyce R, McGavock B and Susskind J. 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1): 36-50 [DOI: 10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2]
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A and Xie P P. 2004. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3): 487-503 [DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2]
- Li Y Z, Liu C M, Liu X M, Liang K, Bai P and Feng Y X. 2016. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the middle Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 31(12): 2005-2020 (李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 梁康, 白鹏, 冯昇星. 2016. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. *自然资源学报*, 31(12): 2005-2020) [DOI: 10.11849/zrzyxb.20160073]
- Li Y Z, Tian D and Medina H. 2021. Multimodel subseasonal precipitation forecasts over the contiguous united states: skill assessment and statistical postprocessing. *Journal of Hydrometeorology*, 22(10): 2581-2600 [DOI: 10.1175/JHM-D-21-0029.1]
- Liu C M, Li Y Z, Liu X M, Bai P and Liang K. 2016. Impact of vegetation change on water transformation in the middle Yellow River. *Yellow River*, 38(10): 7-12 (刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 白鹏, 梁康. 2016. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析. *人民黄河*, 38(10): 7-12) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002]
- Liu J, Xia J, She D X, Li L C, Wang Q and Zou L. 2019. Evaluation of six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over a climate transition area in China. *Remote Sensing*, 11(12): 1477 [DOI: 10.3390/rs11121477]
- Liu J, Xia J, Zou L, Wang Q and Yu J Y. 2018. Applicability analysis of multi-satellite remote sensing precipitation data in Tarim River basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 16(5): 1-8 (刘洁, 夏军, 邹磊, 王强, 余江游. 2018. 多卫星遥感降水数据在塔里木河流域的适用性分析. *南水北调与水利科技*, 16(5): 1-8) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0117]
- Ma Y Z, Yang Y, Han Z Y, Tang G Q, Maguire L, Chu Z G and Hong Y. 2018. Comprehensive evaluation of ensemble multi-satellite precipitation dataset using the dynamic bayesian model averaging scheme over the Tibetan plateau. *Journal of Hydrology*, 556: 634-644 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.050]
- Martinez G F and Gupta H V. 2010. Toward improved identification of hydrological models: a diagnostic evaluation of the “abcd” monthly water balance model for the conterminous United States. *Water Resources Research*, 46(8): W08507 [DOI: 10.1029/2009WR008294]
- Motovilov Y G, Gottschalk L, Engeland K and Rodhe A. 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99: 257-277 [DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00102-1]
- Peng S M, Wang Y and Jiang J Q. 2017. Study on the relationship between irrigation water requirement and drought in the main irrigation area of the Yellow River basin. *Yellow River*, 39(11): 5-10 (彭少明, 王煜, 蒋桂芹. 2017. 黄河流域主要灌区灌溉需水与干旱的关系研究. *人民黄河*, 39(11): 5-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.11.002]
- Peng Z H, Li Y Z, Yu W J, Xing Y C, Feng A Q and Du S W. 2021. Research on the applicability of remote sensing precipitation products in different climatic regions of China. *Journal of Geo-information Science*, 23(7): 1296-1311 (彭振华, 李艳忠, 余文君, 星寅聪, 冯爱青, 杜深文. 2021. 遥感降水产品在中国不同气候区的适用性研究. *地球信息科学学报*, 23(7): 1296-1311) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200348]
- Satgé F, Espinoza R, Zolá R P, Roig H, Timouk F, Molina J, Garnier J, Calmant S, Seyler F and Bonnet M P. 2017. Role of climate variability and human activity on poopo lake droughts between 1990 and 2015 assessed using remote sensing data. *Remote Sensing*, 9(3): 218 [DOI: 10.3390/rs9030218]
- Siqueira V A, Fan F M, de Paiva R C D, Ramos M H and Collischonn W. 2020. Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. *Journal of Hydrology*, 590: 125430 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125430]
- Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, Ashouri H, Sorooshian S and Hsu K L. 2018. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1): 79-107 [DOI: 10.1002/2017RG000574]
- Tang G Q, Wang W, Zeng Z Y, Guo X L, Li N, Long D and Hong Y. 2015. An overview of the global precipitation measurement (GPM) mission and it's latest development. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(4): 607-615 (唐国强, 万玮, 曾子悦, 郭晓林, 李娜, 龙笛, 洪阳. 2015. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述. *遥感技术与应用*, 30(4): 607-615) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0607]
- Thomas H A. 1981. Improved Methods for National Water Assessment, Water Resources Contract: WR15249270. Harvard Water Resources Group
- Tian D, Wood E F and Yuan X. 2017. CFSv2-based sub-seasonal precipitation and temperature forecast skill over the contiguous United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3): 1477-1490 [DOI: 10.5194/hess-21-1477-2017]
- Wang R, Shen Q, Peng H C, Yao Y, Li J S, Wang M X, Shi J R and Xu W T. 2022. Study on the applicability of multi-source high-resolution satellite images for monitoring black and odorous water

- body. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 179-192 (王茹, 申茜, 彭红春, 姚月, 李俊生, 汪明秀, 史佳睿, 徐雯婷. 2022. 多源高分辨率卫星影像监测黑臭水体的适用性研究. *遥感学报*, 26(1): 179-192) [DOI: 10.11834/jrs.20220479]
- Wei L Y, Jiang S H, Ren L L, Zhang L Q and Zhou M Y. 2019. Evaluation and comparison of multi-source satellite precipitation products in different climate regions over China's mainland. *China Rural Water and Hydropower*, (11): 38-44 (卫林勇, 江善虎, 任立良, 张林齐, 周梦瑶. 2019. 多源卫星降水产品在不同省份的精度评估与比较分析. *中国农村水利水电*, (11): 38-44)
- Wilson J W and Brandes E A. 1979. Radar measurement of rainfall-A summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9): 1048-1060 [DOI: 10.1175/1520-0477(1979)060<1048: RMORS>2.0.CO;2]
- Wu G D, Xu J J, Gupta H and Zhang X. 2019. The “abcd” water balance model: application to Xin'an River Basin and sensitivity analysis. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 36(7): 23-27, 40 (吴光东, 许继军, Gupta H, 张潇. 2019. 新安江流域abcd水量平衡模型及参数敏感性分析. *长江科学院院报*, 36(7): 23-27, 40) [DOI: 10.11988/ckyyb.20171318]
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, Yatagai A, Hayasaka T, Fukushima Y and Liu C M. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3): 607-626 [DOI: 10.1175/JHM583.1]
- Xing Y C, Lin Y X, Li Y Z, Liang K, Liu C M, Du S W, Li X Q, Zhang M and Yun Y E. 2021. Performance of merged multi-satellite precipitation data products based on the ensemble model output statistic (EMOS): a case study in the middle Yellow River. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 19(2): 226-236 (星寅聪, 林依雪, 李艳忠, 梁康, 刘昌明, 杜深文, 李先青, 张蜜, 云月娥. 2021. 基于EMOS方法的多源遥感降水数据融合与性能评估——以黄河中游为例. *南水北调与水利科技(中英文)*, 19(2): 226-236) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0024]
- Xu F L, Guo B, Ye B, Ye Q, Chen H N, Ju X H, Guo J Y and Wang Z L. 2019. Systematical evaluation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 precipitation products in the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Remote Sensing*, 11(6): 697 [DOI: 10.3390/rs11060697]
- Xu R, Tian F Q, Yang L, Hu H C, Lu H and Hou A Z. 2017. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2): 910-924 [DOI: 10.1002/2016JD025418]
- Zhang G Q, Wang M M, Zhou T and Chen W F. 2022. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 115-125 (张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 陈文锋. 2022. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展. *遥感学报*, 26(1): 115-125) [DOI: 10.11834/jrs.20221171]

Evaluation of typical remote-sensing precipitation products in hydrological simulation

LI Yanzhong^{1,2}, XING Yincong^{1,2}, ZHUANG Jiacheng^{1,2}, YANG Zelong^{1,3}, ZHAO Zichun^{1,2}, LI Chaofan⁴, WANG Qisu^{1,2}, XIE Yuchu^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, DONG Jianping⁵, Lin Bin⁶, XU Xingzhu⁷

1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. School of Geography Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

5. Water Supplies Bureau, Yanchi County, Wuzhong City, the Ningxia Hui Autonomous Region, Wuzhong 751500, China;

6. The Seventh Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi 276000, China;

7. Natural Resources and Planning Bureau of Linyi City, Shandong Province, Linyi 276037, China

Abstract: We comprehensively evaluated various Remote Sensing Precipitation Estimates (RSPEs) to identify the ones that can better capture the precipitation pattern in the Weihe River Basin. Our findings can serve as an important scientific reference for the evaluation and management of water resources in the basin and provide favorable support for the implementation of environmental protection and high-quality development planning in the Yellow River basin.

Based on the gridded precipitation data of CMA and the five popular RSPEs (including CHIRPS v2.0, CMORPH v1.0, PERSIANN-CDR, TRMM 3B42, and MSWEP v2.0), we comprehensively evaluated the basic skill of precipitation products by using the four statistical metrics, namely, Pearson correlation coefficient (CORR), bias, Root-Mean-Square Error (RMSE), and Kling-Gupta Efficient (KGE). We further used three categorical metrics, namely, Probability Of Detection (POD), False Alarm Ratio (FAR), and Critical Success Index (CSI). Then, the hydrological simulation skill of RSPEs was also assessed by the traditional lumped hydrological model of ABCD and nash efficiency coefficient (NSE).

All five RMPEs can capture the spatial distribution of precipitation. Among them, MSWEP, based on multi-source weighted-ensemble precipitation, can better capture the spatial heterogeneous of precipitation with superior performance. The spatial distribution of PERSIANN smoothly performed and was underestimated in most areas, resulting in lower performance. At the interannual level, all RMPEs generally performed well in the upper Weihe River, and TRMM was excellent, followed by MSWEP, whereas PERSIANN performed poorly. MSWEP products performed well for basic statistical skills, with lower RMSE, higher CORR, and KGE. However, the CHIRPS and PERSIANN had poor basic statistical skills. For the categorical skill of precipitation, the PERSIANN exhibited good skill for light rain, followed by MSWEP. Additionally, all RMPEs performed better than the other three basins in the upstream of Weihe River. To detect moderate rain and heavy rain, the performance of the PERSIANN was degraded. The MSWEP product had a better POD for these two types of rainfall, but its FAR was also higher. In terms of hydrological simulation performance, the hydrological simulation performance of the TRMM was the best, indicating that the retrieval algorithm of RMPEs based on active microwave had a high hydrological application prospect, followed by the MSWEP and COMRPH. The poor performance was the infrared/near-infrared-based CHIRPS and PERSIANN products, whose retrieval algorithms required further improvement in the climate-sensitive transition region.

TRMM products performed better in capturing the temporal and spatial patterns of precipitation. The multi-source integrated product of MSWEP was significantly better than the other four products. The predictability of each precipitation estimate to moderate and heavy rain was unsatisfactory and was especially poor for the latter one. Using TRMM precipitation as the input of ABCD model, the performance of simulating runoff was significantly better than other remote-sensing products in the four sub-basins of the Weihe River, followed by MSWEP and COMRPH.

Key words: remotely sensed precipitation, Wei river basin, ABCD model, performance evaluation, MSWEP

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42177436, 41701019); Jiangsu Province Postgraduate Research and Practice Innovation Program (No. KYCX22_1210); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20201393)