

多源降水产品在天山典型流域的评估及径流模拟

王文雨^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 王晓燕^{1,2}, 庞李玲^{1,2}, 冯同飞³, 谷黄河^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 3. 河北省保定水文勘测研究中心, 河北 保定 071025)

摘要: [目的] 为探究不同降水产品在天山高寒流域的特征差异及水文模拟应用潜力。[方法] 结合不同统计指标及 HBV 水文模型, 对比分析 5 套降水产品 (基于站点插值的格点化数据 CN05.1, 卫星降水数据 GPM、亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集 AIMERG、再分析数据 CMFD 和 ERA5) 在玛纳斯河源区的降水时空分布特征, 评估不同产品精度, 研究不同降水产品在径流模拟中的适用性。[结果] 5 套降水产品的年降水均呈现从北到南先增加后减小的空间特征, 仅有 AIMERG 和 CMFD 可捕捉到冰川区降水高的特征; 不同产品的降水年内变化特征一致, 但夏季降水量差异显著, ERA5 的夏季平均降水量达 CN05.1 的 2 倍, GPM 降水量最低; GPM 降水产品低估观测月降水, 且在春季和冬季低估最为严重 (64%~76%), 而 CMFD、ERA5 和 AIMERG 3 套降水产品整体高估观测月降水, 其中 ERA5 高估最为严重, 尤其在夏秋季 (134%~206%), CMFD 对月降水略有高估。AIMERG 与站点月降水的相关性较高, 在雨季和非雨季也呈较高的日降水成功指数; 基于 AIMERG、CMFD 及 CN05.1 的日径流模拟效果相近且精度高于其他数据集, 纳什效率系数为 0.81~0.82, 相对误差低于 6%, 前 2 套降水产品对径流极值的模拟能力总体高于 CN05.1。[结论] AIMERG 和 CMFD 在玛纳斯河源区径流模拟中有较大的优势, 研究可为气象资料匮乏的天山地区的径流模拟及水土流失预防研究提供数据参考。

关键词: 径流模拟; 玛纳斯河源区; HBV 水文模型; 天山山区; 卫星降水; 再分析数据

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0284-10

The Applicability Evaluation of Multisource Precipitation Data for Runoff Simulation in a Typical Basin on the Tianshan Mountains

WANG Wenyu^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, WANG Xiaoyan^{1,2}, PANG Liling^{1,2}, FENG Tongfei³, GU Huanghe^{1,2}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Hydrological Survey and Research Center, Baoding, Hebei 071025, China)

Abstract: [Objective] To explore the differences in precipitation characteristics for multisource precipitation products and their applicability for runoff simulation in an alpine basin on the Tianshan Mountains. [Methods] A comparative analysis of the spatiotemporal characteristics of precipitation was conducted in the upper reaches of the Manas River Basin, based on the datasets CN05.1, GPM, AIMERG, CMFD and ERA5. Subsequently, the accuracy of different products was evaluated based on observed precipitation, and their applicabilities for runoff simulation were assessed by means of HBV hydrological model. [Results] The spatial pattern for all the precipitation products was characterized by a first increase and then a decrease from the north to south, whereas only AIMERG and CMFD were able to display higher precipitation in the glacier area. Consistent seasonal variation were detected, but large differences in summer precipitation were shown. In summer, ERA5 was twice as much as CN05.1, and GPM was lower than the other precipitation products.

GPM underestimated the monthly precipitation, especially in winter and spring (64%—76%). While the monthly precipitation was overestimated by CMFD, ERA5 and AIMERG. The overestimation of ERA5 was the most serious, especially in summer and autumn (134%—206%), and CMFD slightly overestimated the monthly precipitation. AIMERG had a higher correlation with the observed monthly precipitation and greater critical success index in both rainy season and the non-rainy season. AIMERG, CMFD and CN05.1 had the greatest ability to reproduce daily runoff, with a higher NSE (0.81—0.82) and lower relative error (<6%). Moreover, the former two products showed a better performance in reproducing extreme runoff when compared with CN05.1. [Conclusion] AIMERG and CMFD show great potential in runoff simulation of the upper Manas River. The results can serve as data references for runoff simulation and soil erosion prevention research in the Tianshan region, where meteorological data are limited.

Keywords: runoff simulation; the headwater catchment of the Manas River Basin; HBV hydrological model; the Tianshan Mountains; satellite precipitation; the re-analysis data

Received: 2024-07-08

Revised: 2024-08-13

Accepted: 2024-10-09

Online(www.cnki.net): 2024-12-04

天山是中亚诸多河流的发源地,被称为中亚水塔^[1-2]。该区域地形复杂,平均海拔 4 000 m,是气候变化较敏感的区域之一^[3]。随着全球变暖,天山地区呈现冰川退缩、降雪天数和积雪减少、冻土退化等现象,对流域水循环产生显著影响^[2,4]。

水文模型是水循环机制及径流预测研究的重要工具,而水文模拟的效果依赖于降水等输入数据的准确性。在地形复杂的高寒山区,降水测站稀少,无法满足流域水文建模的需要^[5-6],亟须寻求可替代的高精度降水产品。目前,已经有学者对于卫星遥感技术与再分析降水产品在我国西北部高寒山区的实际应用进行详尽的评估。阚宝云等^[7]对 4 套降水数据集(CMORPH、TMPA 3 B42 v6、ITPCAS 和 APHRODITE)在叶尔羌河上游适用性研究显示,CMORPH 数据集在作为水文模型输入数据方面表现出较大的潜力;金晓龙等^[8]研究发现,新一代卫星降水产品 GPM 在天山地区的准确性高于 CMORPH;ZHANG 等^[9]也得到相似的结论。除降水产品的精度评估,部分学者^[10-13]还聚焦于降水产品在西北高寒山区的水文模拟适应性研究。SUN 等^[10]研究表明,基于再分析数据 ERA5 模拟的径流量显著高估包括叶尔羌河、和田河等在内 10 个亚洲典型河流源区的径流量,主要是由 ERA5 降水输入的高估引起。而更高分辨率的 ERA5-Land 降水产品在玛纳斯河流域展现较好的适用性^[11];罗映雪等^[12]研究发现,与传统气象站数据相比,CN05.1 数据集在开都河流域径流模拟中呈现较大的优势;但 WANG 等^[13]研究表明,GsMap、TRMM 和 CHIRPS 等卫星降水产品在和田河流域径流模拟中适用性较差,模拟月径流的纳什效率系数均低于 0.5。由此可见,已有许多研究^[8-11]采用统计方

法分析不同降水产品在西北高寒山区的表现,但针对各降水产品在水文模拟中的应用潜力比较的研究相对较少。此外,AIMERG 是 2020 年发布的亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集,其在天山山区流域的适用性尚缺乏系统的探讨。

鉴于此,选择天山北坡典型流域玛纳斯河源区为研究区,从年时间序列、季节特征和空间分布等方面对不同降水产品(ERA5、GPM、AIMERG、CMFD、CN05.1)进行综合评估,然后基于 HBV 水文模型,评估不同降水产品在玛纳斯河源区的水文效应。研究成果可为气象资料匮乏的寒区流域的径流模拟及水土流失预防研究提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛纳斯河发源于天山北坡,不仅是中国最大的人工绿洲区,也是第四大灌溉农业区^[14],被视为天山北坡经济带的核心区域之一。研究区为玛纳斯河源区(图 1),其地理位置为 43°04′~43°57′N,84°50′~86°19′E,流域面积 5 156 km²,无气象监测站。流域内地势东南高西北低,年平均降水量约 450 mm,年平均气温约为 -3.1 °C^[15]。流域内垂直地带性显著,可分为高山、中山、低山区。将海拔 3 600 m 以上区域定义为高山区,冰川主要分布在该区域,是流域的固态水库。根据中国冰川编目^[16]统计,玛纳斯河源区冰川面积约为 672 km²。海拔 1 500~3 600 m 为中山区,该区域降水丰沛,河流补给以降雨为主,与积雪融水并存。海拔 1 500 m 以下为低山丘陵区,地表产流较少,植被覆盖度约 50%。受气候、下垫面等多种因素时空分布特征的影响,流域径流年内分布极不均匀,主要集中在 6—8 月,约占年径流的 70%。

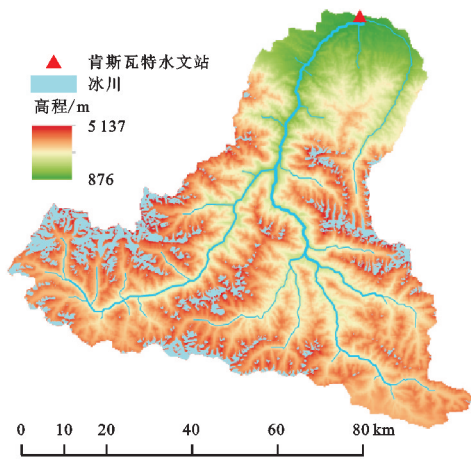


图 1 玛纳斯河源区概况

Fig.1 The map of the headwater catchment of the Manas River Basin

1.2 数据和方法

1.2.1 数据来源 对玛纳斯河源区的基于站点插值的 CN05.1 数据,再分析气象数据集 ERA5,CMFD,卫星遥感产品 GPM、AIMERG 5 套降水产品进行对比分析,评估它们在水文模拟中的应用潜力。

1) 再分析降水产品。ERA5 数据集^[17](ECMWF Reanalysis v5)来源于哥白尼气候变化服务数据平台,是欧洲中期天气预报中心发布的第五代全球气候再分析数据,综合运用先进模式和资料同化系统,整合丰富的历史观测数据。ERA5 数据的时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

CMFD(中国区域地面气象要素数据集)^[18]来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),是通过整合 TRMM 卫星数据、地面观测数据和多个网格数据集而形成的。该数据使用的网格数据包括 GLDAS 数据、全球能源与水交换地表辐射数据(GEWEX-SRB)和 Princeton 再分析数据。CMFD 数据集的时间分辨率为 3 h,水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,数据精度高,在水文和气候模拟研究中得到广泛应用^[19]。

2) 基于站点插值的 CN05.1 数据。CN05.1 格点化观测数据^[12]源自中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>),是基于 2 400 余个中国地面气象台站的观测数据,利用角距权重方法和薄盘样条函数法进行插值得到的逐日长序列的多气象要素产品。数据集包含平均气温、降水量、最高气温、最低气温、平均风速、相对湿度和蒸散发等多个气象要素,本文采用的降水产品的时间序列为 2001—2015 年,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

3) 遥感卫星降水数据。GPM(Global Precipitation Measurement)是 2014 年推出的最新一代高分辨率卫星降水产品,它整合微波、热红外及站点校准等多种算法,因此,被誉为第二代 TRMM 产品。新一代 GPM 是由 GPM 计划推出的,由于星载微波、红外、降雨雷达等传感器的融合,使得 GPM 实现多种数据源的优势互补^[20]。

本文所使用的是 2001—2015 年的 GPM IMERG 逐日降水产品,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

亚洲地区高质量高时空分辨率降水数据集 AIMERG 是基于 GPM IMERG 数据和高质量地面观测产品 APH-RODITE 融合而成^[21],来源于国家青藏高原科学数据中心,本文采用的时间步长为 0.5 h,空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的降水产品(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/1090dead-dbba-44c8~980c-ca4c631d3d5c/>)。

4) 其他数据。由于玛纳斯河流域的肯斯瓦特水利枢纽于 2013 年初次蓄水,2014 年正式运行,导致受水库调蓄影响的肯斯瓦特水文站实测流量并非天然径流量。因此,采用肯斯瓦特水文站 2001—2012 年的日径流数据,用于 HBV 水文模型的精度验证。采用肯斯瓦特站实测的逐日降水数据(2005—2011 年)评估不同降水产品的准确性。日平均气温、最高和最低气温来源于时空三极环境大数据平台的中国近地表气温数据集,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (<http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/daa58689-a6d2~46cf-90fc-b73014ecef9d/>)。采用的冰川分布数据来源于伦道夫冰川数据集(Randolph Glacier Inventory 6.0,<http://www.glims.org/RGI/randolph60.html>),DEM 数据分辨率为 90 m(<https://www.gscloud.cn/sources/index?pid=302>,用于流域高程带的划分)。

1.2.2 分析方法

1) 数据评价指标。首先从年时间序列、季节特征和空间分布等方面对比分析不同降水产品在玛纳斯河源区的特征差异。随后,以肯斯瓦特站观测降水为参考数据,将降水产品中包含肯斯瓦特站经纬度网格的降水资料看作相对于点位的降水数据,采用 6 个统计指标[公式(1)~(6)],评估不同降水产品的准确性。由于 CN05.1 是基于 2 400 余个中国地面气象台站的观测数据插值得到的格点化观测数据,等效于站点观测数据,所以,采用站点观测降水评估不同降水产品准确性时未包含 CN05.1 数据集。

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (4)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (5)$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \quad (6)$$

式中:CC 为相关系数;BIAS 为相对误差,%;RMSE 为均方根误差,mm; G_i 为站点的降水量,mm; \bar{G} 为站点观测降水量的平均值,mm; S_i 为卫星的降水量,mm; \bar{S} 为卫星降水量平均值,mm;FAR 为误报率;POD 为命中率;CSI 为关键成功指数; n 为观测站的数量; H 为卫星产品和地面站均探测到的降水事件数; M 为地面站点探测到但卫星产品未探测到的降水事件数; F 为卫星产品探测到但地面站点未探测到的降水事件数。

2) HBV 模型及降水产品水文效应评估方案。HBV (hydrologiska byrans vattenbalansavdelning) 模型是半分布式概念性水文模型^[22],具有参数输入少、适用范围广、模拟准确性高等优点,在资料匮乏的高寒流域水文模拟中被广泛使用^[23-25]。HBV 模型包括积雪计算、融雪融冰计算、土壤水计算、产流和汇流 5 个主要组成部分。积雪模块用于确定降水是以雨水还是雪的形式输入模型,融雪融冰均采用度日因子法计算^[26]。土壤模块不仅控制流域的蒸发计算,还评估土壤水是否参与地下水交换。产流模块使用简单的响应函数来概况整个径流生成过程,其中包括地表径流、上层非线性水库中的壤中流及下层线性水库中的基流,且 2 层水库是连通的。汇流过程的计算使用三角形加权函数法。

模型输入包括逐日降水、平均气温、潜在蒸散发、高程带分布及冰川分布数据,采用 Hargreaves 公式^[27]计算潜在蒸散发。利用 2001—2012 年肯斯瓦特站水文站逐日径流数据对 HBV 模型进行率定和验证。在 HBV 模型中,设定 2001—2002 年作为预热期,2003—2008 年作为率定期,2009—2012 年作为验证期。设置 2 种方案评估不同降水产品的水文效应,将 CN05.1 降水数据、气温、蒸散发数据等驱动水文模型,率定最优参数,在该套最优参数不变情况下,分别将另外 4 套降水数据输入到水文模型中,计算相应降水产品的径流模拟值,该方案目的是为了通过径流精度的差异反向评估 CN05.1 与其他降水产品的差异;另外,分别率定不同降水产品驱动下的 HBV 模型,评估其径流模拟效果,该方案的目的是识别不同降水产品在资料匮乏区域的适用性。

研究采用纳什效率系数 NSE[公式(7)]、BIAS 指标来评估水文模型对日径流的模拟效果,采用 RMSE 评估模型对洪水极值(Q5)和枯水极值(Q95)的模拟能力。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

式中:NSE 为纳什效率系数; Q_i 为实测值, m^3/s ; \bar{Q}

为实测值的平均值, m^3/s ; Q'_i 为模拟值, m^3/s ; n 为时间总步长。

2 结果与分析

2.1 降水产品时空特征分析

2.1.1 流域平均降水 根据 5 套降水产品 2002—2015 年年降水量序列(图 2a)发现,在玛纳斯河源区 5 套降水产品呈现明显的年平均降水量差异。ERA5 多年平均降水量最高(711.9 mm),其次是 AIMERG (508.5 mm),再次为 CN05.1(398.7 mm)和 CMFD (391.4 mm),遥感卫星降水数据 GPM 多年平均降水量最低(242.4 mm)。多数降水产品的年际变化不大,整体上比较平稳,但 AIMERG 降水呈增加趋势。根据各套降水产品在玛纳斯河源区的季节变化(图 2b)和年内变化(图 2c)可以得出,5 套降水产品均表现出夏季降水量最高,冬季降水量最低的特点,CMFD、AIMERG 与 CN05.1 在多数季节的平均降水量较为接近,但在夏季,不同产品的季节降水量差异最为显著,尤其是 ERA5 的夏季平均降水量几乎是 CN05.1 的 2 倍。5 套降水产品均能显示出流域内 70%~90% 的降水主要集中在 5—10 月。降水年内变化呈单峰形式,多数降水产品均在 7 月达到月降水的最高值,但 AIMERG 产品月降水最高值出现在 6 月。总体上,在不同时间尺度下,ERA5 平均降水量高于其他降水产品,GPM 平均降水量最低,CMFD 和基于站点插值的 CN05.1 的平均降水量较为一致,是由于 CMFD 在生成时融合了国内 2 400 个气象站点数据。

2.1.2 降水空间分布 考虑到玛纳斯河源区全年的降水分布情况,大部分(约 70%~90%)降水集中在 5—10 月,对玛纳斯河源区的年降水进行分类,区分为雨季降水(5—10 月)和非雨季降水(11 月至翌年 4 月)。

由 5 套降水产品在研究区的空间分布(图 3)可以看出,所有产品的年降水均呈现从北到南先增加后减小的空间特征,雨季的降水分布特征与年降水一致,但非雨季降水却呈现从北向南逐渐递减的空间分布特征。尽管如此,不同降水产品对流域内部降水特征的细节描述存在明显的差异。CN05.1 和 ERA5 降水产品的空间分辨率较低,对流域内部降水空间分布的描述不够详尽,未能准确反映冰川区降水量较高的情况。具有较高空间分辨率的 GPM 虽能整体捕捉到玛纳斯河源区从北到南先增加后减小的空间分布特征,但在东西方向上的降水空间异质性较低,对流域内部降水差异的描述不够显著。与其他产品相比,AIMERG 和 CMFD 的降水空间异质性较高,且 AIMERG 可捕捉到东部冰川区降水高的分布特征,CMFD 可捕捉到西部和东部冰川区降水高的特征。

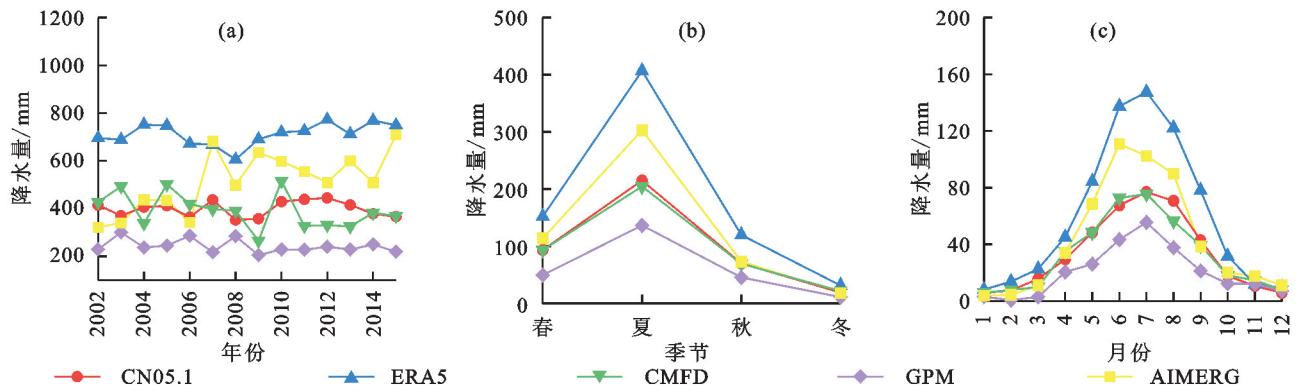


图 2 不同时间尺度下 5 套降水产品的平均降水量

Fig.2 The average precipitation for five different precipitation products at different time scales

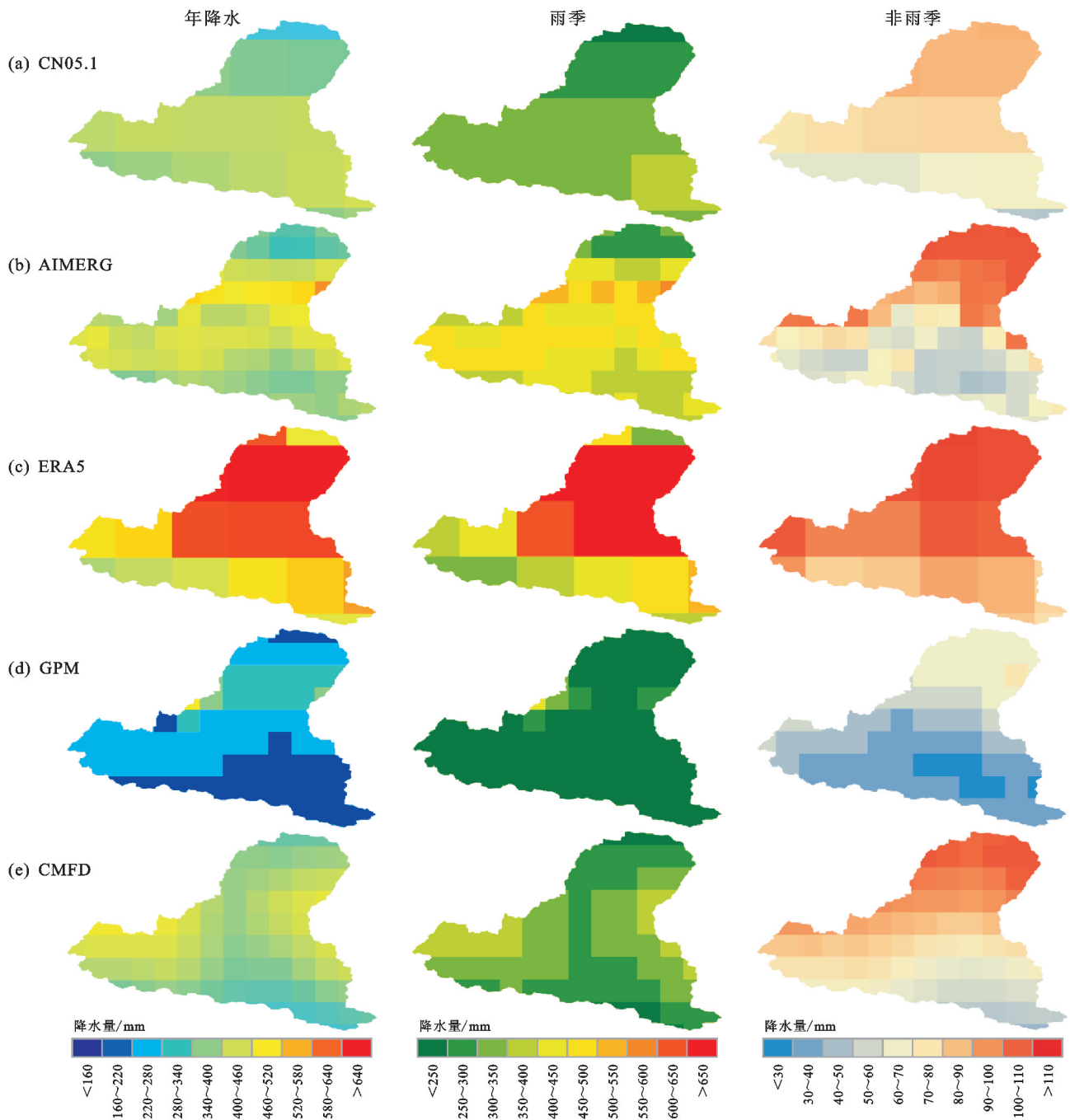


图 3 不同降水产品在玛纳斯河流域年平均及季节空间分布

Fig.3 The spatial distribution of mean annual and seasonal precipitation for five different precipitation products for the study area

2.2 多源降水的评估

2.2.1 点尺度评估 以肯斯瓦特站实测降水量作为参考,评估不同降水产品在季节和月尺度上的精度(图 4、表 1),CMFD、AIMERG 月降水与站点数据的相关性最高(>0.9),GPM 与月降水的相关性最低。GPM 降水产品低估站点降水,且在春季和冬季低估最为严重(64%~76%);CMFD、ERA5 和 AIMERG 3 套降水产品整体高

估站点降水,其中,CMFD 与站点月降水的相对误差最小,而 ERA5 高估最为严重,尤其在夏秋季(134%~206%)。从均方根误差来看,CMFD 产品在月尺度上表现最佳,但不同产品的性能随着季节变化而变化,如 AIMERG 在春季和秋季的均方根误差最小,但在夏季的均方根误差高于 GPM 和 CMFD;ERA5 在冬季的均方根误差最小,但在夏季和秋季最大。

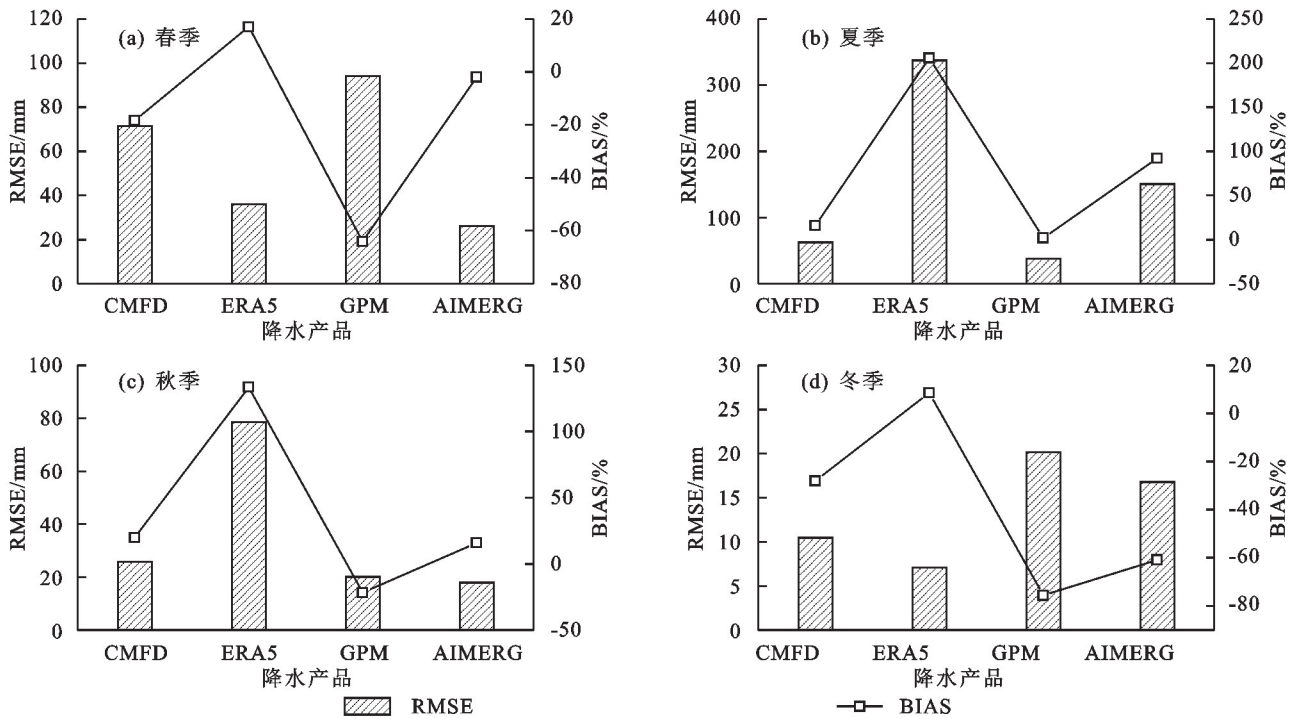


图 4 降水产品与观测季节降水的误差指标分析

Fig.4 The simulated error indexes between precipitation products and observed seasonal precipitation

表 1 多源降水产品与观测月降水的误差指标

Table 1 The simulated error indexes between precipitation products and observed monthly precipitation

降水产品	CC	BIAS/%	RMSE/mm
CMFD	0.94	1.04	8.74
ERA5	0.80	112.85	58.88
GPM	0.74	-30.92	19.03
AIMERG	0.91	36.14	25.98

除季节和月尺度外,还评估不同降水产品对日降水的捕捉能力(图 5)。在全年尺度下,CMFD 和 ERA5 产品呈现最高的命中率(>0.8),而 GPM 的命中率均最低。CMFD、GPM 和 ERA5 的误报率达到 0.6 以上,对关键成功指数的影响较大,AIMERG 产品的误报率最低(<0.5)。与雨季统计值相比,不同降水产品在非雨季的命中率均有降低,其中 GPM 产品的降幅最大(0.53),同时不同降水产品在非雨季的误报率也有所减小。总之,不同降水产品均呈现出雨季日降水的命中率和误报率均高于非雨季的特征。在雨季和非雨季,AIMERG 的日降水成功指数均较高,说明 AIMERG 对站点日降水事件有较强的探测

能力。而 GPM 在不同时期均显示较低的成功率,尤其在非雨季的成功率仅为 0.22,可能与 GPM 对冬季降雪事件探测能力较弱有关。

2.2.2 不同降水产品的水文效应评估 利用 CN05.1 逐日降水数据、平均气温等数据驱动 HBV 模型,率定模型参数(方案 1)。然后分别将其余的 4 套降水产品输入 HBV 模型,得到不同产品相应的径流模拟结果,精度评估见表 2 和表 3,模拟和计算的月径流过程比较见图 6。通过对比 2003—2012 年不同降水产品驱动的 HBV 模型模拟值和实测值可知,选取其他降水产品替代 CN05.1 驱动水文模型时,得到的径流模拟精度均不同程度地降低,其中 ERA5 和 GPM 的模拟能力最差,日径流的效率系数为 0.34~0.54;ERA5 显著高估径流模拟值,相对误差达到 33.39%,而 GPM 显著低估径流模拟值,相对误差达到 -53.93%,与研究区降雨空间分布(图 3)中 ERA5 降雨显著高于 CN05.1,GPM 显著低于 CN05.1 相一致。当采用 AIMERG 和 CMFD 产品替代 CN05.1 驱动水文模型时,AIMERG 比 CMFD 有更优的模拟效果,其效率系数为 0.76,相对误差为

-16.11%，一定程度上说明与 CMFD 相比，AIMERG 表征的研究区降雨特征与 CN05.1 数据更接近。

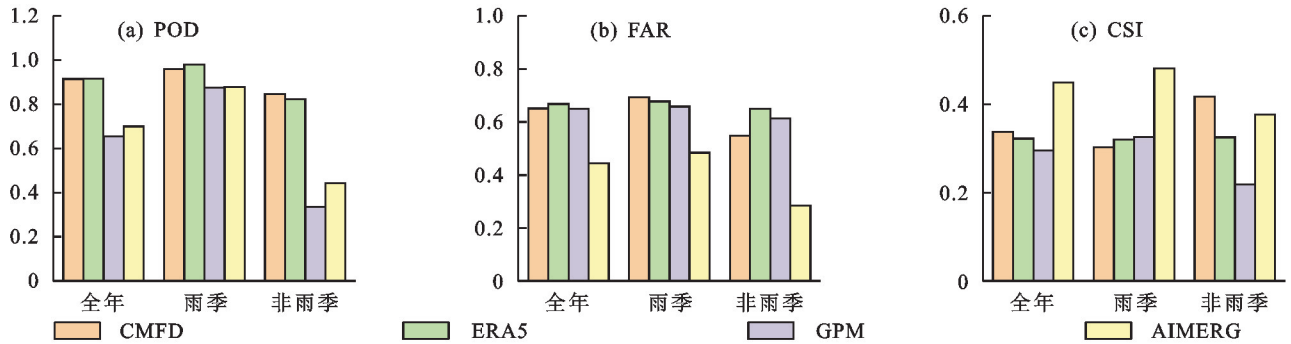


图 5 不同时间尺度下 4 套降水产品的命中率、误报率和关键成功指数

Fig.5 The simulated probability of detection, false alarm ratio and critical success index for four precipitation products at different time scales

利用 5 套降水产品驱动 HBV 模型,分别率定模型参数,得到不同产品相应的径流模拟结果(方案 2),精度评估见表 2 和表 3,模拟和计算的月径流过程比较见图 6。通过对比 5 套降水数据驱动 HBV 模型的模拟径流和实测数据发现,不同降水数据集均能较好地反映实测径流的季节分配特征。基于站点插值的网格数据 CN05.1 模拟径流与实测日径流的拟合较好,纳什效率系数在 0.81,相对误差为 -3.75%。AIMERG 和 CMFD 产品对日径流的模拟能力与 CN05.1 相近,但对极值径流的模拟效果总体优于 CN05.1,如在所有降水产品中基于 AIMERG 计算的 Q5 的均方根误差最小,基于 CMFD 计算的 Q95 的均方根误差最小,揭示与站点插值产品相比,基于卫星降水和气象站点的融合产品具有更高的水文模拟潜力。ERA5 和 GPM 对日径流和极值的模拟能力均不及 CN05.1,尤其是 GPM 的模拟结果显著低估实测过程,相对误差达到 -19.34%,表明 GPM 显著低估玛纳斯河源区的降水。

表 2 2003—2012 年基于不同降水产品模拟的日径流的精度评估

Table 2 Performance assessment for daily runoff simulated based on different precipitation products during the period of 2003—2012

方案	径流精度	CN05.1	AIMERG	CMFD	ERA5	GPM
1	NSE	0.81	0.76	0.70	0.34	0.54
	BIAS/%	-3.75	-16.11	-36.34	33.39	-53.93
2	NSE	0.81	0.82	0.81	0.75	0.80
	BIAS/%	-3.75	0.82	-5.16	-1.42	-19.34

3 讨论

从不同时间尺度分析多套降水产品的准确度表明,CMFD 与观测降水的一致性高于 ERA5 数据和 GPM 数据,班春广等^[28]研究发现,在雅鲁藏布江流域 CMFD 数据精度高于其他降水产品,与本研究结

论一致,主要原因为 CMFD 数据融合了较多的地面观测数据。相似地,SUN 等^[10]研究表明,ERA5 数据在青藏高原及天山地区的锡尔河、阿克苏河上游地区也总体存在降水高估现象,但其对降雪的捕捉能力高于卫星数据 GPM^[29],本文中 GPM 数据在冬季的均方根误差高于 ERA5 数据与该结论相符。作为新一代全球卫星降水产品,其在天山地区的降水精度高于卫星降水数据 TRMM 和 CMORPH,但其融合的观测站点有限,尤其是对地形复杂区域的降水捕捉能力仍有待提高^[8]。本研究中,AIMERG 数据是 GPM 与 APHRODITE 数据的融合产品,其不仅在日降水的命中率和成功指数均比 GPM 有显著提高,且对多数季节降水的捕捉能力也进一步增强。

表 3 2003—2012 年基于不同降水产品模拟的径流极值与观测值的均方根误差

Table 3 Root mean square deviation between simulated extreme runoff and the observation during the period of 2003—2012

方案	径流极值指标	CN05.1	AIMERG	CMFD	ERA5	GPM
1	Q5	0.58	0.54	1.05	1.23	1.40
	Q95	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14
2	Q5	0.58	0.52	0.64	0.67	0.64
	Q95	0.10	0.08	0.06	0.14	0.14

降水产品在高海拔寒区水文模拟的适用性已经受到诸多学者的关注,如 SUN 等^[10]发现,在高亚洲 10 个寒区流域基于 ERA5 数据计算的径流均显著高估观测径流,与本研究的结论一致。已有学者^[30]研究表明,位于我国西部地区的高寒流域如拉萨河、开都河等年径流系数在 0.6 以上。本研究中,不同降水产品对应的多年平均径流系数分别为 0.65(CN05.1)、0.55(AIMERG)、0.71(CMFD)、0.38(ERA5)、0.92(GPM),可见 ERA5 对应的径流系数与参考数值 0.6 有显著差异,一定程度上说

明 ERA5 数据不适用于玛纳斯河源区水文模拟。班春广等^[28]研究发现,在拉萨河流域 CMFD 的径流模拟精度优于其他降水产品 (CMORPH-BLD、MSWEP、GSMaP_Gauge 和 PERSIANN-CDR);罗映雪等^[12]研究发现,CN05.1 在开都河上游水文模拟中具有较强的适用性。本研究探讨多种降水数据集在玛纳斯河源区水文模拟中的潜力发现,基于 AIMERG 的日径流模拟效果与 CN05.1、CMFD 相近,高于 ERA5 和 GPM 数据。可见 CN05.1、CMFD 及 AIMERG 数据在高寒区日径流模拟中有较大的潜力。但以往研究较少关注不同

降水产品对寒区流域径流极值的模拟潜力,为弥补此不足,本研究进一步评估不同降水产品对径流极值 Q95 和 Q5 的模拟能力,基于 AIMERG 的洪水极值 Q5 的模拟效果最优,其次为 CN05.1;基于 CMFD 的枯水极值 Q95 的模拟效果最优,其次为 AIMERG。可见 CMFD 和 AIMERG 数据在玛纳斯河源区日径流及极值径流的模拟中均有较大优势,今后应进一步评估 AIMERG 在其他高海拔流域水文模拟中的适用性,以期对 AIMERG 在高寒流域水文模拟潜力有更全面的认识。

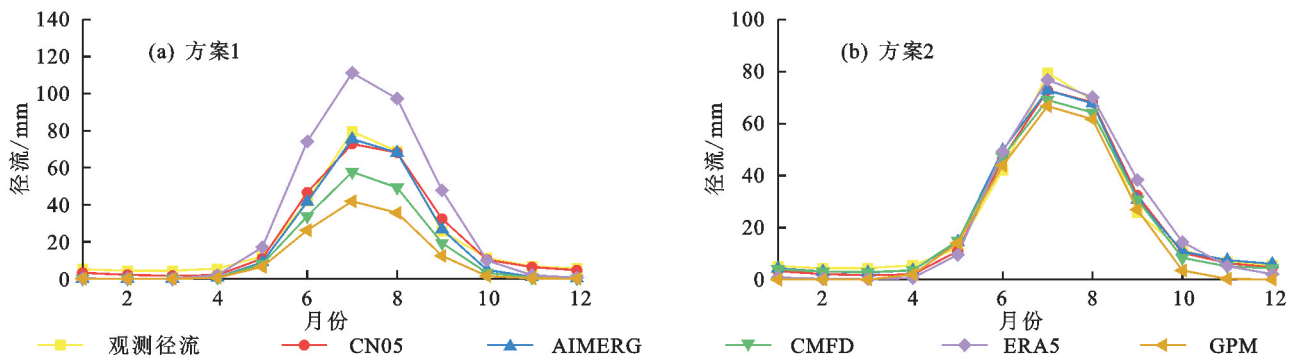


图 6 不同降水产品驱动下玛纳斯河源区月平均径流对比

Fig.6 The comparisons of observed and simulated monthly average runoff driven by different precipitation products in the headwater catchment of the Manas River Basin

4 结论

1) 5 套降水产品在季节、年、月和日尺度上都存在不同程度的差异。多数降水产品的年际变化不大,整体上比较平稳,但 AIMERG 降水呈增加趋势。在季节尺度和月尺度上,5 套降水产品均能显示出流域内 70%~90% 的降水主要集中在 5—9 月。总体上,在不同时间尺度下,ERA5 平均降水量高于其他降水产品,尤其在夏季,ERA5 的夏季平均降水量达 CN05.1 的 2 倍,GPM 平均降水量最低,CMFD 和基于站点插值的 CN05.1 的平均降水较为一致。

2) 5 套降水产品年降水均呈现从北到南先增加后减小的空间特征,雨季的降水分布特征与年降水一致,但非雨季降水却呈现从北向南逐渐递减的空间分布特征。CN05.1 和 ERA5 降水产品未能表现出冰川区降水量高的特征,GPM 对流域内部降水差异的描述不够显著。AIMERG 捕捉到东部冰川区降水高的分布特征,CMFD 捕捉到西部和东部冰川区降水高的特征。

3) 在季节和月尺度上,CMFD、AIMERG 月降水与站点数据的相关性最高,GPM 月降水的相关性最低。GPM 降水产品低估站点降水,CMFD、ERA5 和 AIMERG 3 套降水产品整体高估站点降水。从均方根误差来看,CMFD 产品在月尺度上表现最佳,但不同产品的

性能随着季节变化而变化。不同降水产品均呈现雨季日降水的命中率和误报率均高于非雨季的特征。AIMERG 在雨季和非雨季均呈现较高的日降水成功指数,而 GPM 在不同时期均显示较低的日降水成功指数,尤其在非雨季的成功指数仅为 0.22。

4) 通过对比不同降水产品驱动 HBV 模型的径流模拟结果发现,模拟径流均能较好地反映实测径流的季节分配特征,基于 AIMERG、CMFD 及 CN05.1 的日径流模拟效果相近且精度高于其他数据集,基于 AIMERG 计算的 Q5 的均方根误差最小,基于 CMFD 计算的 Q95 的均方根误差最小,ERA5 和 GPM 对日径流和极值的模拟能力均不及 CN05.1。可见 CMFD 和 AIMERG 数据在玛纳斯河源区日径流及极值径流的模拟中均有较大优势。

参考文献:

- [1] GAO H K, HAN T D, LIU Y C, et al. Use of auxiliary data of topography, snow and ice to improve model performance in a glacier-dominated catchment in Central Asia [J]. Hydrology Research, 2017, 48(5): 1418-1437.
- [2] SORG A, BOLCH T, STOFFEL M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.

- [3] LIU X Y, LI X M, ZHANG Z R, et al. A CMIP6-based assessment of regional climate change in the Chinese Tianshan Mountains[J]. *Journal of Arid Land*, 2024, 16(2): 195-219.
- [4] TANG Z G, WANG X R, WANG J, et al. Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains, central Asia, based on cloud-free MODIS fractional snow cover product, 2001-2015 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): e1045.
- [5] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 1-19.
REN G Y, YUAN Y J, LIU Y J, et al. Changes in precipitation over Northwest China [J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(1): 1-19.
- [6] 韦林, 段凯, 刘效东, 等. 基于多源数据与多模型集成的流域人为蒸散发变异评估[J]. *水利学报*, 2022, 53(4): 433-444.
WEI L, DUAN K, LIU X D, et al. Assessing human-induced evapotranspiration change based on multi-source data and bayesian model averaging at the basin scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(4): 433-444.
- [7] 阚宝云, 苏凤阁, 童凯, 等. 四套降水资料在喀喇昆仑山叶尔羌河流域的适用性分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 710-722.
KAN B Y, SU F G, TONG K, et al. Analysis of the applicability of four precipitation datasets in the upper reaches of the Yarkant River, the Karakorum[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 710-722.
- [8] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2074-2085.
JIN X L, SHAO H, ZHANG C, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2074-2085.
- [9] ZHANG C, CHEN X, SHAO H, et al. Evaluation and intercomparison of high-resolution satellite precipitation estimates: GPM, TRMM, and CMORPH in the Tianshan Mountain area[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): e1543.
- [10] SUN H, SU F G, YAO T D, et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for High Mountain Asia Basins[J]. *Environmental Research Communications*, 2021, 3(12): e121003.
- [11] 唐豪, 王晓云, 陈伏龙, 等. 基于 ERA5-Land 数据集的玛纳斯河径流模拟研究[J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 271-283.
TANG H, WANG X Y, CHEN F L, et al. Simulation of Manas River runoff based on ERA5-Land dataset[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 271-283.
- [12] 罗映雪, 徐长春, 楚智, 等. CN05.1 气象数据在流域水文模拟中的应用: 以新疆开都河流域为例[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(3): 287-295.
- LUO Y X, XU C C, CHU Z, et al. Application of CN05.1 meteorological data in watershed hydrological simulation: A case study in the upper reaches of Kaidu River Basin[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(3): 287-295.
- [13] WANG X Z, LI B F, CHEN Y N, et al. Applicability evaluation of multisource satellite precipitation data for hydrological research in arid mountainous areas[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): e2886.
- [14] 张正勇, 李忠勤, 何新林, 等. 玛纳斯河流域冰川变化及水资源研究进展[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 332-337.
ZHANG Z Y, LI Z Q, HE X L, et al. Progress in the research on glacial change and water resources in Manas River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(5): 332-337.
- [15] 王晓燕, 杨涛, 师鹏飞. 天山北坡典型流域产汇流过程及模拟研究[M]. 北京, 科学出版社, 2018: 30-35.
WANG X Y, YANG T, SHI P F, et al. The simulation study of the hydrological processes in Tianshan mountain basin, Northwest China [M]. Beijing, Science Press, 2018: 30-35.
- [16] GUO W Q, LIU S Y, XU J L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [17] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [18] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: e25.
- [19] 李福兴, 陈伏龙, 蔡文静, 等. 基于 EMD 组合模型的径流多尺度预测[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 428-437.
LI F X, CHEN F L, CAI W J, et al. Multiscale runoff prediction based on the EMD combined model[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 428-437.
- [20] 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 R, YONG B, ZENG S K. Evaluation of GPM satellite precipitation products over Mainland China[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(5): 50-59.
- [21] MA Z Q, XU J T, ZHU S Y, et al. Aimerq: A new Asian precipitation dataset (0.1°/half-hourly, 2000—2015) by calibrating GPM IMERG at daily scale using APHRODITE[J]. *Earth System Science Data*, 2020: 1525-1544.
- [22] HAGG W, BRAUN L N, KUHN M, et al. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized

- Central Asian Catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(1/2): 40-53.
- [23] WANG X Y, YANG T, XU C Y, et al. Understanding the discharge regime of a glacierized alpine catchment in the Tianshan Mountains using an improved HBV-D hydrological model[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 211-222.
- [24] 俞炜博, 梁忠民. 基于积雪数据的 HBV 模型改进及应用[J]. *水文*, 2024, 44(1): 26-32.
- YU W B, LIANG Z M. Improvement and application of HBV model based on snow data[J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(1): 26-32.
- [25] 孙铭悦, 吕海深, 朱永华, 等. 2 套气象数据在资料缺乏地区的适用性评估: 以呼图壁河流域为例[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 94-103.
- SUN M Y, LÜ H S, ZHU Y H, et al. Applicability assessment of two meteorological datasets in areas lacking data with the Hutubi River Basin as an example[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(1): 94-103.
- [26] GYAWALI D R, BÁRDOSSY A. Development and parameter estimation of snowmelt models using spatial snow-cover observations from MODIS[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(12): 3055-3077.
- [27] HABEEB R, ZHANG X, HUSSAIN I, et al. Statistical analysis of modified Hargreaves equation for precise estimation of reference evapotranspiration[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, 73(1): e1966869.
- [28] 班春广, 左德鹏, 徐宗学, 等. 高寒区多源降水产品精度与水文模拟效果评估: 以雅鲁藏布江流域和拉萨河流域为例[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 159-168.
- BAN C G, ZUO D P, XU Z X, et al. Assessment on the accuracy and hydrological simulation effect of multi-source precipitation products in the high cold alpine region assessment on the accuracy and hydrological simulation effect of multi-source precipitation products in the high cold alpine region: Case study in the Yarlung Zangbo River Basin and the Lhasa River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 159-168.
- [29] TANG G Q, 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: e111697.
- [30] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 307-314.
- WANG G Q, ZHANG J Y, LIU J F, et al. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 307-314.
- (上接第 283 页)
- [24] 陈宗海, 石梦玄, 刘一戈, 等. 不同用量生物质炭降低华南集约化菜地土壤 N₂O 排放和提高氮肥利用率的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1053-1063.
- CHEN Z H, SHI M X, LIU Y G, et al. Effects of different amounts of biochar on reducing soil N₂O emission and increasing nitrogen use efficiency under intensive vegetable production in South China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1053-1063.
- [25] NAEEM M A, KHALID M, AON M, et al. Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(1): 112-122.
- [26] ZHU X M, CHEN B L, ZHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98-115.
- [27] EL-NAGGAR A, LEE S S, RINKLEBE J, et al. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 536-554.
- [28] HUANG D L, LIU L S, ZENG G M, et al. The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 545-553.
- [29] WANG J Y, XIONG Z Q, KUZYAKOV Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512-523.
- [30] LIU Z L, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 461-472.