

# 雅鲁藏布江流域多源降水产品评估 及其在水文模拟中的应用

孙 赫<sup>1,2</sup>, 苏凤阁<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

**摘要:** 论文对比分析了1980—2016年基于站点插值降水数据CMA(China Meteorological Administration)和APH-RODITE(Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation)、卫星遥感降水数据PERSIANN-CDR(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network-Climate Data Record)和GPM(Global Precipitation Measurement)、大气再分析数据GLDAS(Global Land Data Assimilation System)以及区域气候模式输出数据HAR(High Asia Refined analysis)在雅鲁藏布江7个子流域的降水时空描述, 利用国家气象站点数据对各套降水数据进行单点验证, 并以这6套降水数据驱动VIC(Variable Infiltration Capacity)大尺度陆面水文模型反向评估了各套降水产品在雅鲁藏布江各子流域径流模拟中的应用潜力。结果表明: ① PERSIANN-CDR和GLDAS年均降水量最高(770~790 mm), 其次是HAR和GPM(650~660 mm), CMA和APH-RODITE年均降水量最低(460~500 mm)。除GPM外, 其他降水产品在各子流域都能表现季风流域的降水特征, 约70%~90%的年降水量集中在6—9月份。② 除PERSIANN-CDR和GLDAS外, 其他降水产品皆捕捉到流域降水自东南向西北递减的空间分布特征。其中, HAR数据空间分辨率最高, 表现出更详细的流域内部降水空间分布特征。③ 与对应网格内的国家气象站降水数据对比显示, APHRODITE、GPM和HAR降水整体低估(低估10%~30%), 且严重低估的站点主要集中在下游(低估40%~120%)。PERSIANN-CDR和GLDAS整体表现为高估上游流域站点降水(高估28%~60%), 但低估下游流域站点降水(低估11%~21%)。④ 在流域径流模拟上, 当前的6套降水产品在精度或时段上仍无法满足水文模型模拟的需求。⑤ 通过水文模型反向评估, 6套降水产品中区域气候模式输出的HAR在流域平均降水量和季节分配上更合理。

**关键词:** 降水评估; 水文模拟; 雅鲁藏布江; 青藏高原

青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔, 是地球第三极, 是众多大江大河的发源地<sup>[1-3]</sup>。自2017年第二次青藏高原综合科学考察研究以来, 亚洲水塔变化研究被进一步聚焦。雅鲁藏布江发源于青藏高原喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川, 平均海拔4000 m以上, 是世界上海拔最高的大河<sup>[4]</sup>。河流全长约3350 km, 是中国最长的高原河流, 也是西藏自治区的主要淡水来源和水汽通道<sup>[5]</sup>。自1960年代以来, 雅鲁藏布江流域表现出显著升温<sup>[6]</sup>、冰川退缩<sup>[3,7]</sup>、积雪

减少<sup>[8-9]</sup>及冻土退化<sup>[10-11]</sup>的现象, 对该流域水循环产生重要影响。

陆面水文模型是理解水文机制和开展水资源预测必不可少的工具, 然而模型的可靠性很大程度上依赖于降水等气象输入的准确性。雅鲁藏布江流域由于面积较大、海拔较高、地形复杂, 长时间序列的降水观测站点仅有16个, 且多集中在中下游的山谷地区(图1), 在上游流域真实降水存在未知。利用这些站点数据将降水插值到高海拔地区时存在

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2019-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(91747201, 41871057)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 91747201 and 41871057.]

第一作者简介: 孙赫(1992—), 男, 山东淄博人, 博士生, 主要从事寒区水文过程模拟。E-mail: sunhe@itpcas.ac.cn

引用格式: 孙赫, 苏凤阁. 雅鲁藏布江流域多源降水产品评估及其在水文模拟中的应用[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1126-1139. [Sun He, Su Fengge. Evaluation of multiple precipitation datasets and their potential utilities in hydrologic modeling over the Yarlung Zangbo River Basin. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1126-1139.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.07.006

较大误差,势必会影响径流模拟的准确性。Zhang等<sup>[12]</sup>利用站点数据驱动VIC(Variable Infiltration Capacity)水文模型模拟了雅鲁藏布江流域的径流变化,发现降水数据的低估导致模拟径流极大低估了实测径流。目前,已有学者评估了卫星遥感和再分析降水产品在雅鲁藏布江流域的适用性<sup>[13-18]</sup>。如Qi等<sup>[18]</sup>评估了基于站点降水产品、卫星遥感和再分析等多套降水产品在雅鲁藏布江的表现,认为已有的基于站点、卫星和大气再分析等产品在降水量和时空分布上都表现出较大差异,给流域水文模拟和预测研究带来极大挑战。黄滢等<sup>[13]</sup>对比了站点数据和再分析数据在雅鲁藏布江流域的适用性,认为再分析降水产品高估流域降水,无法反映降水的空间特征。区域气候模式输出降水产品 HAR(High Asia Refined analysis)的数据精度高、能捕捉高原降水空间分布<sup>[19-20]</sup>。然而,HAR在雅鲁藏布江流域的适用性未被评估。

目前已有研究多采用统计方法分析了不同降水产品在雅鲁藏布江流域的表现,而较少研究各降水产品在水文模拟中的应用潜力。此外,已有研究多集中在整个雅鲁藏布江流域尺度,没有关注各降水产品在雅鲁藏布江不同子流域间的差异特征及水文模拟应用潜力。因此,本研究将雅鲁藏布江流域分成7个子流域,选择目前广泛使用的6套降水数据在雅鲁藏布江流域和子流域进行评估。6套降水数据包括:① 基于地面观测站点插值的数据CMA(China Meteorological Administration, 国家气象局降水数据)和APHRODITE(Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation); ② 卫星降水数据 PERSIANN-

CDR(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network-Climate Data Record)和GPM(Global Precipitation Measurement); ③ 大气再分析数据GLDAS(Global Land Data Assimilation System); ④ 区域气候模式输出数据HAR。本文首先从年时间序列、季节特征、空间分布等方面对比各降水产品在雅鲁藏布江流域的适用性,并利用国家气象站点降水数据对各套降水数据进行单点验证。然后,利用这6套降水数据驱动VIC大尺度分布式陆面水文模型,通过水文模拟来反向评估降水产品的合理性及其在水文模拟中的应用潜力,旨在探讨多源降水产品在雅鲁藏布江流域的适用性以及在水文模拟中的应用潜力,为研究高山降水缺测流域气候变化和水文模拟提供数据参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

雅鲁藏布江发源于西藏西南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川,流域面积约为25.3万km<sup>2</sup>。上游称为马泉河,由西向东横贯西藏南部,绕过喜马拉雅山脉最东端的南迦巴瓦峰转向南流,经巴昔卡出中国境。受印度洋季风和西风环流带以及高原地理环境的影响,雅鲁藏布江流域降水主要集中在夏季且呈现出自东向西逐渐递减的空间分布特征。

依据流域内水文站点,本文将雅鲁藏布江流域划分成7个子流域(图1),依次为:从源头至拉孜水文站为拉孜子流域,干流上拉孜到奴各沙水文站之间的流域为拉孜—奴各沙子流域,雅鲁藏布江2大

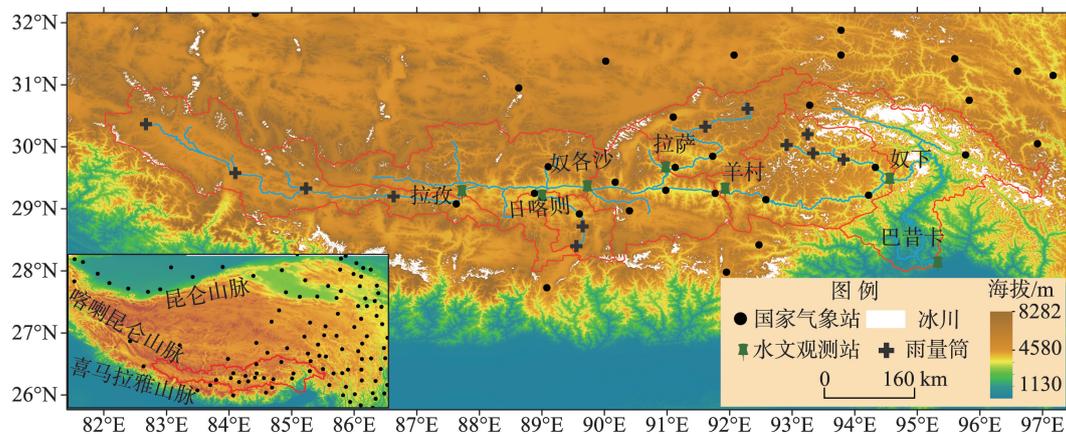


图1 雅鲁藏布江流域位置、地形及水文气象站点分布

Fig.1 Location and topography of the Yarlung Zangbo River Basin and distribution of meteorological and hydrological stations

支流日喀则子流域和拉萨子流域,干流上奴各沙到羊村水文站之间的流域为奴各沙—羊村子流域,干流上羊村到奴下水文站为羊村—奴下子流域,奴下水文站到出境部分为奴下—巴昔卡子流域。由表1可知,雅鲁藏布江流域约3%~10%的冰川和25%~30%的积雪集中在下游子流域(羊村—奴下,奴下—巴昔卡),并且羊村—奴下子流域径流贡献了雅鲁藏布江流域(奴下站以上)总径流量的50%,是雅鲁藏布江流域(奴下站以上)的主要产流区。

## 1.2 数据来源

### 1.2.1 降水数据

本文对比分析了基于站点插值的CMA、APHRODITE,卫星遥感产品PERSIANN-CDR、GPM,再分析降水GLDAS以及区域气候模式输出的HAR六套降水产品(表2)在雅鲁藏布江流域的适用性以及在水文模拟中的潜力。

#### (1) 基于站点降水数据

中国国家常规气象站数据。取自中国气象科学数据共享服务网的日降水观测数据(<http://data.cma.cn/>)。本文将流域内16个国家气象站点降水数

据插值到整个流域,生成1980—2016年逐日的格点CMA降水数据。

APHRODITE是由日本生成的唯一一套针对亚洲及周边地区的长时间序列逐日、高分辨率的网格化降水产品<sup>[21]</sup>。本文中所使用的是其东亚季风区子数据集(<http://www.chikyu.ac.jp/precip/>),采用的时间序列是1979—2007年,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

#### (2) 遥感卫星降水数据

PERSIANN-CDR是由加州大学欧文分校水文气象与遥感中心发展的基于热红外的逐日遥感卫星数据,数据从1983年至今持续更新,空间范围是南北纬 $60^{\circ}$ ,时间步长是6 h<sup>[22]</sup>。本文采用的是1983—2016年的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 降水产品,数据下载自<https://www.ncei.noaa.gov/data/precipitation-persiann/access/>。

GPM是2014年发布的最新一代高分辨率卫星降水产品,融合了微波、热红外和站点校正等多源算法,被称作第二代TRMM产品<sup>[23]</sup>。本研究采用的是GPM Level 3(IMERG)2015—2016年逐日降水产

表1 雅鲁藏布江7个子流域基本信息

Tab.1 Information of the seven sub-basins in the Yarlung Zangbo River

|                          | 拉孜         | 拉孜—奴各沙     | 日喀则        | 拉萨         | 奴各沙—羊村     | 羊村—奴下      | 奴下—巴昔卡  |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| 水文观测站                    | 拉孜站        | 奴各沙站       | 日喀则站       | 拉萨站        | 羊村站        | 奴下站        | —       |
| 经度位置/(°E)                | 29.05      | 29.32      | 29.25      | 29.63      | 29.28      | 29.47      | 28.10   |
| 纬度位置/(°N)                | 87.38      | 89.71      | 88.88      | 91.15      | 91.88      | 94.57      | 95.53   |
| 流域面积/km <sup>2</sup>     | 50553      | 45327      | 11064      | 26235      | 26599      | 41770      | 51507   |
| 流域平均海拔/m                 | 5370       | 4983       | 5353       | 5272       | 4767       | 4937       | 3711    |
| 研究时段                     | 1980—2000年 | 1980—2000年 | 1980—2000年 | 1980—2000年 | 1980—2000年 | 1980—2000年 | —       |
| 实测径流/(m <sup>3</sup> /s) | 172.18     | 202.15     | 55.16      | 300.02     | 163.87     | 920.31     | —       |
| 对总径流贡献/%                 | 9.17       | 11.09      | 3.76       | 15.98      | 8.99       | 51.01      | —       |
| 冰川面积/km <sup>2</sup>     | 835.40     | 145.90     | 129.50     | 266.50     | 458.14     | 1104.36    | 5351.76 |
| 冰川占比/%                   | 1.60       | 0.41       | 1.21       | 0.98       | 1.71       | 2.81       | 10.21   |
| 积雪覆盖比例/%                 | 15.58      | 7.12       | 6.98       | 23.08      | 10.21      | 24.25      | 31.97   |

表2 6套降水产品的基本信息

Tab.2 Summary of the precipitation products evaluated in this study

| 降水数据         | 研究时段       | 时空分辨率     | 数据类别     | 来源                        |
|--------------|------------|-----------|----------|---------------------------|
| CMA          | 1980—2016年 | 1/12°,逐日  | 站点插值数据   | 国家气象局                     |
| APHRODITE    | 1979—2007年 | 0.25°,逐日  | 基于站点数据   | Yatagai等 <sup>[21]</sup>  |
| PERSIANN-CDR | 1983—2016年 | 0.25°,6 h | 遥感卫星数据   | Ashouri等 <sup>[22]</sup>  |
| GPM          | 2015—2016年 | 0.10°,逐日  | 遥感卫星数据   | Huffman等 <sup>[23]</sup>  |
| GLDAS        | 1980—2016年 | 0.25°,3 h | 再分析数据    | Rodell等 <sup>[24]</sup>   |
| HAR          | 2001—2013年 | 10 km,逐日  | 区域气候模式输出 | Maussion等 <sup>[19]</sup> |

品,空间分辨率是 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ,数据下载自 <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>。

### (3) 再分析降水产品

GLDAS 气象数据是由美国哥达德空间飞行中心和美国国家环境预报中心联合发展的一个全球高分辨率的陆面模拟系统基于多源观测数据和再分析资料同化形成的<sup>[24]</sup>。本文采用的是1980—2016年3 h步长、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分辨率的GLDAS\_NOAH025\_3H\_2.0([https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS\\_NOAH025\\_3H.2.0](https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS_NOAH025_3H.2.0))。

### (4) 区域气候模式输出

HAR是由区域气候模式WRF输出的高精度逐日降水产品<sup>[19]</sup>。本文采用的是其针对高原地区生成的2001—2013年 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 逐日降水数据,数据下载自<http://www.klima-ds.tu-berlin.de/har/>。

为与水文模型降水输入分辨率一致,本文将最邻近法把各套网格降水产品重采样到 $(1/12)^{\circ} \times (1/12)^{\circ}$ ,即小网格 $(1/12)^{\circ}$ 降水数据源自最近的大网格(如GLDAS  $0.25^{\circ}$ )降水数据。采用该方法得到的网格降水数据能很好地反映原数据所具备的空间特征<sup>[17]</sup>,因此,被广泛应用于气象数据插值分析<sup>[25-28]</sup>。

### 1.2.2 径流数据

本文采用了拉孜、奴各沙、日喀则、拉萨和羊村1980—2000年的月径流数据以及奴下1980—2015年的月径流数据。径流数据源自西藏和青海水文局。由于最下游的巴昔卡没有径流资料,本文以奴下站为总出水口对雅鲁藏布江全流域进行水文模拟,并将奴下站以上流域称作奴下流域。

### 1.3 分析方法

本文首先从年时间序列、季节特征、空间分布等方面对比6套降水产品在雅鲁藏布江及其子流域的适用性,并基于流域内16个国家气象站点降水数据,利用相关系数和相对误差2个统计指标对各套降水数据进行单点验证。

为反向评估各降水产品在水文模拟中的应用潜力,本文将6套降水产品驱动VIC大尺度分布式陆面水文模型来模拟雅鲁藏布江及其子流域的径流变化。该模型采用可变下渗能力土壤的空间分布特性表示,主要考虑大气、植被和土壤间的物理交换过程,反映了土壤、植被、大气间的水热状态变化和水热传输<sup>[29-30]</sup>。VIC模型考虑了积雪、融雪及土壤冻融等过程,在一个计算网格内考虑了裸地及不同的植被覆盖类型<sup>[29-30]</sup>。此外,VIC模型可同时

考虑陆气之间水量平衡和能量平衡的模拟,弥补了传统水文模型对能量过程描述的不足<sup>[31]</sup>。该模型输入主要有降水、日最高气温、日最低气温和风速,目前已经在青藏高原流域模拟方面有了成功的应用<sup>[12,32-36]</sup>。Zhang等<sup>[12]</sup>生成了整个青藏高原的VIC水文模型框架;Meng等<sup>[33]</sup>在此基础上以1975—2002年作为率定期率定了雅鲁藏布江流域土壤等参数,并选取2003—2013年作为验证期对比了流域实测径流和模拟径流,结果表明,模拟径流与实测径流拟合较好。因此,本文利用Meng等<sup>[33]</sup>的模型参数化方案来驱动VIC水文模型反向评估各套降水数据在雅鲁藏布江流域的应用潜力。

由于本文研究的目的在于评估降水资料的准确性,因此在水文模拟中并未考虑冰川径流。此外,本文研究只改变降水数据,其他参数保持不变,通过该控制实验来研究降水在径流模拟中的不确定性。模型验证主要依据实测径流资料,通过纳什系数和相对误差来评判其模拟效果。纳什系数是用于评估水文模型模拟流量与实测流量之间的拟合程度的统计方法,当值越接近于1则表明模拟精度越高。相对误差则是另一个评价模型表现的统计指标,表示模拟与实测之间的差别,其值越小表示两者之间越接近,模拟结果越好。纳什系数(NSE)和相对误差(Bias)计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $i$ 为月份; $n$ 为月径流序列的个数; $Q_{oi}$ 和 $Q_{si}$ 分别为第 $i$ 个月的观测和模拟的月径流量; $\bar{Q}_o$ 和 $\bar{Q}_s$ 分别是观测和模拟的多年平均径流量。

## 2 结果分析

### 2.1 降水产品时空特征对比

#### 2.1.1 流域平均降水

1980—2016年6套降水产品在雅鲁藏布江流域及其7个子流域平均降水的年变化序列表明(图2、表3):各套降水产品在雅鲁藏布江流域存在明显的年均降水量差异。PERSIANN-CDR和GLDAS在雅鲁藏布江流域年均降水量最高(770~790 mm),

其次是 HAR 和 GPM(650~660 mm),基于站点的 CMA 和 APHRODITE 年均降水量最低(460~500 mm)。

各套降水产品在雅鲁藏布江7个子流域也表现出明显的年均降水量差异(图2、表3)。除奴下—巴昔卡子流域外,PERSIANN-CDR 和 GLDAS 在各子流域年均降水量高于其他降水产品。其中, GLDAS 在拉萨、羊村—奴下和奴下—巴昔卡子流域与基于站点插值产品的降水量较为一致且呈现出一致的变化特征。这主要因为 GLDAS 降水数据在生成时利用站点数据进行了校正。基于站点插值的 CMA 和 APHRODITE 降水在各子流域明显低于其他降水产品。经过站点校正的 APHRODITE 在多数子流域与 CMA 降水量几乎吻合,年变化上有很好的 consistency。HAR 和 GPM 降水量在多数子流域介于基于站点的 CMA、APHRODITE 和 PERSIANN-CDR、GLDAS 之间。GPM 虽然年均降水量与基于站点插值数据较为一致,年变化上也有较好的一致性,但由于所用数据仅有 2015—2016 两年数据,其适用性有待进一步对比评估。HAR 在多数子流域表现出明显的上升趋势,而其他降水产品变化较为平稳。

从各套降水产品在雅鲁藏布江流域平均降水的季节序列来看(图3、表3),6套降水产品均捕捉到流域内 70%~90%的年降水量集中在 6—9 月份,其他则产生在 10 月—次年 5 月份的季节分配特征。在各子流域上,除 GPM 外,其他降水产品都表现出降水集中在夏季的季节特征,且峰值多出现在 7—8 月份。GPM 在日喀则、拉萨和奴各沙—羊村 3 个子流域降水峰值出现在 6 月,而在羊村—奴下和奴下—巴昔卡 2 个子流域则出现多个降水峰值,无法捕捉到子流域季节分配特征。

2.1.2 空间分布

由于雅鲁藏布江流域全年降水的 70%~90%集中在 6—9 月份,10%~30%的降水产生于 10 月—次年 5 月,因此本文将雅鲁藏布江流域年降水分为季风期降水(6—9 月份)和非季风期降水(10 月—次年 5 月)。由 6 套降水产品在雅鲁藏布江流域的空间分布可以看出(图 4),除 PERSIANN-CDR 和 GLDAS 外,其他降水产品都捕捉到了雅鲁藏布江流域降水从东南向西北递减的空间特征。季风期降水和年均降水的空间分布特征一致,而非季风期降水主要集中在奴下—巴昔卡子流域。

在对雅鲁藏布江流域内部细节特征刻画上,各

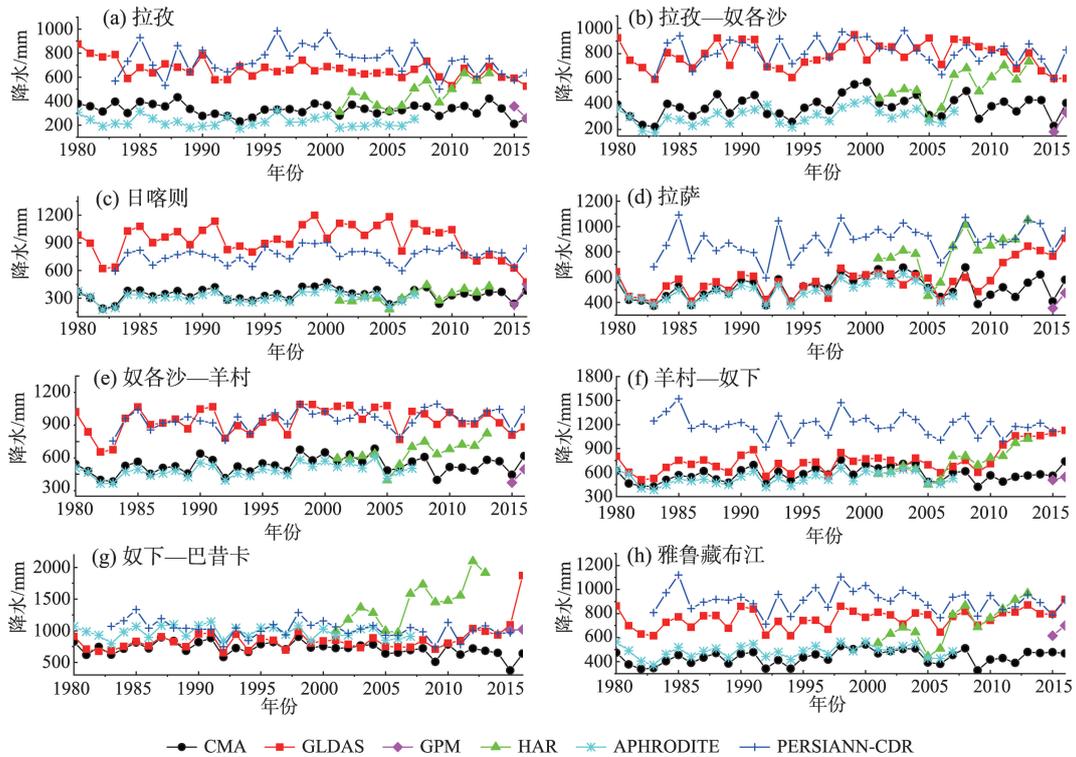


图2 不同降水产品在雅鲁藏布江流域及其各子流域年降水序列

Fig.2 Time series of annual precipitation estimates from different datasets in the Yarlung Zangbo River and its sub-basins

表3 6套降水产品在雅鲁藏布江及其子流域的年均和季节降水量  
 Tab.3 Annual and seasonal basin-mean precipitation estimates in the six datasets  
 over the Yarlung Zangbo River and its sub-basins (mm)

| 降水产品         | 年均  | 春季  | 夏季  | 秋季  | 冬季 | 降水产品         | 年均   | 春季  | 夏季  | 秋季  | 冬季  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|----|--------------|------|-----|-----|-----|-----|
| 拉孜           |     |     |     |     |    | 奴各沙—羊村       |      |     |     |     |     |
| CMA          | 325 | 50  | 177 | 60  | 37 | CMA          | 385  | 35  | 282 | 66  | 2   |
| APHRODITE    | 254 | 33  | 152 | 44  | 25 | APHRODITE    | 360  | 35  | 256 | 65  | 4   |
| PERSIANN-CDR | 739 | 81  | 503 | 105 | 49 | PERSIANN-CDR | 803  | 118 | 527 | 140 | 17  |
| GPM          | 308 | 59  | 140 | 40  | 68 | GPM          | 284  | 35  | 187 | 53  | 9   |
| HAR          | 466 | 50  | 287 | 68  | 61 | HAR          | 495  | 70  | 318 | 96  | 12  |
| GLDAS        | 721 | 127 | 422 | 115 | 57 | GLDAS        | 792  | 82  | 578 | 130 | 2   |
| 拉孜—奴各沙       |     |     |     |     |    | 羊村—奴下        |      |     |     |     |     |
| CMA          | 379 | 26  | 288 | 58  | 7  | CMA          | 559  | 97  | 343 | 110 | 9   |
| APHRODITE    | 314 | 22  | 237 | 51  | 4  | APHRODITE    | 537  | 94  | 329 | 103 | 11  |
| PERSIANN-CDR | 814 | 104 | 541 | 143 | 27 | PERSIANN-CDR | 1025 | 193 | 609 | 190 | 33  |
| GPM          | 258 | 26  | 181 | 45  | 6  | GPM          | 528  | 110 | 291 | 111 | 15  |
| HAR          | 545 | 59  | 369 | 101 | 15 | HAR          | 719  | 135 | 396 | 161 | 28  |
| GLDAS        | 789 | 89  | 551 | 129 | 19 | GLDAS        | 729  | 106 | 490 | 127 | 6   |
| 日喀则          |     |     |     |     |    | 奴下—巴昔卡       |      |     |     |     |     |
| CMA          | 343 | 27  | 261 | 53  | 2  | CMA          | 705  | 177 | 350 | 158 | 20  |
| APHRODITE    | 328 | 28  | 242 | 55  | 3  | APHRODITE    | 981  | 225 | 520 | 204 | 32  |
| PERSIANN-CDR | 657 | 96  | 433 | 111 | 16 | PERSIANN-CDR | 883  | 204 | 465 | 177 | 36  |
| GPM          | 331 | 54  | 214 | 56  | 8  | GPM          | 1011 | 263 | 498 | 218 | 32  |
| HAR          | 328 | 40  | 207 | 71  | 10 | HAR          | 1430 | 328 | 657 | 337 | 108 |
| GLDAS        | 937 | 104 | 666 | 160 | 7  | GLDAS        | 828  | 156 | 496 | 157 | 18  |
| 拉萨           |     |     |     |     |    | 雅鲁藏布江        |      |     |     |     |     |
| CMA          | 506 | 62  | 342 | 95  | 8  | CMA          | 465  | 73  | 288 | 89  | 15  |
| APHRODITE    | 504 | 66  | 330 | 99  | 10 | APHRODITE    | 500  | 84  | 305 | 96  | 16  |
| PERSIANN-CDR | 765 | 122 | 484 | 140 | 19 | PERSIANN-CDR | 773  | 118 | 449 | 183 | 24  |
| GPM          | 414 | 70  | 246 | 85  | 13 | GPM          | 660  | 135 | 400 | 105 | 19  |
| HAR          | 566 | 50  | 287 | 68  | 61 | HAR          | 650  | 106 | 368 | 133 | 39  |
| GLDAS        | 566 | 55  | 411 | 97  | 3  | GLDAS        | 786  | 123 | 509 | 131 | 24  |

套降水产品表现出明显的空间差异。基于站点降水数据插值的CMA和卫星数据的PERSIANN-CDR由于空间分辨率较低,虽能整体捕捉雅鲁藏布江流域降水自东向西递减的特征,但是对流域内部降水空间特征的描述并不明确,并未捕捉到流域高值降水区。GLDAS整体表现出流域内东南降水多、西部降水少的特征,但未反映出明显的东西向分布特征,对流域内部降水差异的刻画不明显,且降水自南向北减少的特征与其他降水数据空间特征相反(图4)。APHRODITE和GPM表现出较为一致的空间分布和数量特征:雅鲁藏布江奴下—巴昔卡子流域降水最多(1000~2000 mm),而上游子流域降水最少(200~300 mm)。HAR由于分辨率高,空间异质性在6套降水数据中最高,表现出更详细的流

域内部降水空间分布特征。此外,HAR不仅表现出明显的雅鲁藏布江流域降水自东南向西北递减的变化特征,而且捕捉到冰川区降水高的分布特征,而这一分布特征在其他降水数据中未被反映出来。

## 2.2 降水产品评估

### 2.2.1 单点评估

以雅鲁藏布江流域内16个国家气象站的实测年降水量(1980—2016年)为基准,分别与6套降水产品相对应的网格进行对比(表4)。结果表明,在6套降水产品中,APHRODITE、GPM、PERSIANN-CDR整体上与站点数据相关性最好(0.6~0.9),能捕捉到站点降水数据的年变化特征,而其他降水产品在不同子流域表现出较大差异。GLDAS与落在拉萨和奴各沙—羊村子流域的站点数据相关性最高

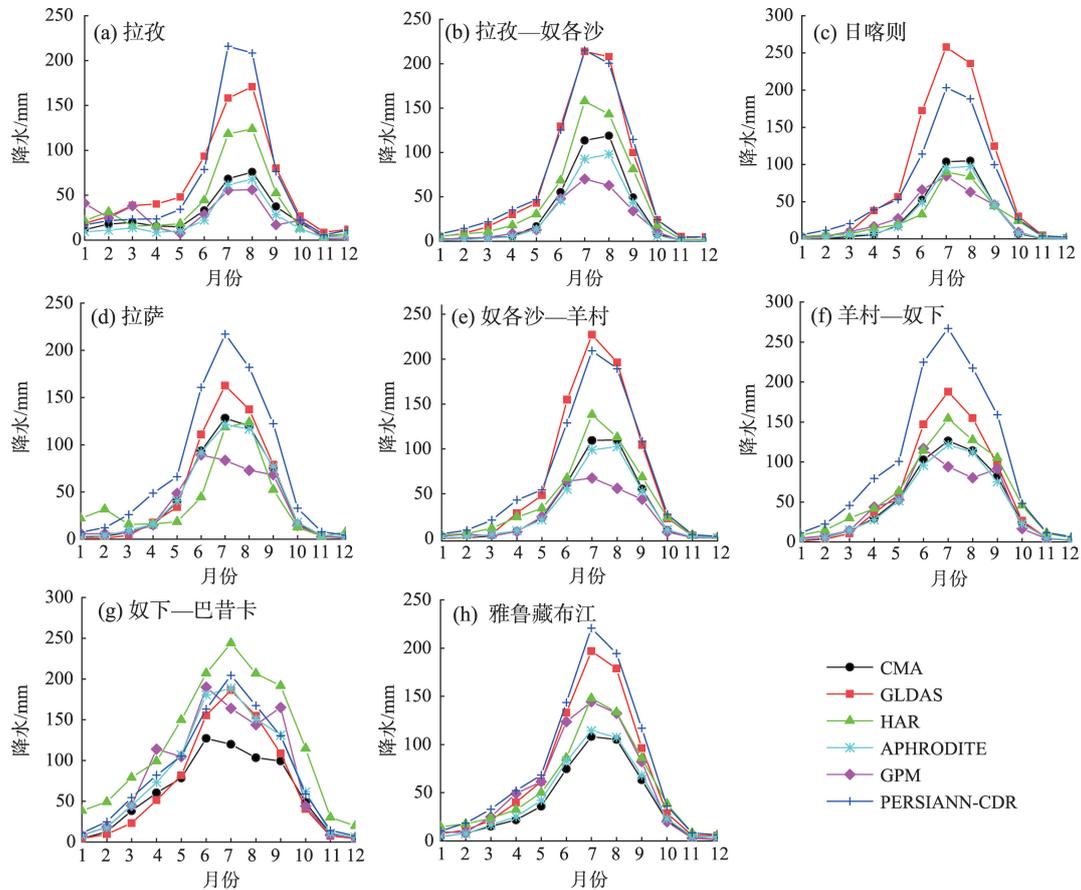


图3 不同降水产品在雅鲁藏布江流域及其各子流域季节分配

Fig.3 Seasonal distribution of precipitation estimates from different datasets in the Yarlung Zangbo River and its sub-basins

(0.5~0.7), 而与其他子流域站点的相关系数约为0.3~0.4。HAR与落在拉孜和拉孜—奴各沙2个子流域的站点实测数据的相关性最高,分别为0.60和0.65;而与其他子流域站点的相关系数普遍低于0.3。

与国家气象站的年均降水相比,APHRDITE、GPM和HAR降水整体低估(10%~30%)且在羊村—奴下和奴下—巴昔卡两个下游子流域的站点降水低估最严重(40%~120%)。PERSIANN-CDR和GLDAS高估了落在拉孜和拉孜—奴各沙2个上游子流域的站点降水(28%~60%),并呈现出相对误差自上游向下游逐渐递减的变化特征。PERSIANN-CDR和GLDAS低估了在奴下—巴昔卡子流域的站点实测降水(11%~21%),这表明PERSIANN-CDR和GLDAS高估上游子流域站点降水,低估下游子流域站点降水。

### 2.2.2 水文模型反向评估

鉴于6套降水产品在雅鲁藏布江流域存在较大的降水量和空间差异,哪套降水产品能代表流域“真实”降水情况仍旧未知。降水作为水文模型的

重要输入数据,其精确度直接影响水文模拟的可靠性。因此,降水产品可以通过水文模型在水文模拟中的表现,反向评估该降水产品对流域实际降水的代表性<sup>[37-38]</sup>。本文利用VIC大尺度陆面水文模型评估了6套降水产品在整个雅鲁藏布江流域(奴下站以上)径流模拟中的应用潜力,反向评估各降水产品在流域的适用性。图5是CMA、APHRDITE、GLDAS和PERSIANN-CDR四套降水驱动的VIC模型在各子流域1980—2000年间模拟与实测月平均径流对比。由于GPM和HAR在1980—2000年没有数据(表2),因此在各子流域上的径流模拟评估时没有包含GPM和HAR数据。

通过对比4套降水产品驱动的VIC模型模拟和实测的1980—2000年雅鲁藏布江子流域月平均径流可知(图5、表5),各套降水产品都基本再现了实测径流的季节分配特征,55%~85%的年径流出现在6—9月,但径流量与实测径流存在较大差异。PERSIANN-CDR在各子流域模拟明显高估实测径流(30%~380%),纳什系数为-51.60~0.80,且高估主要

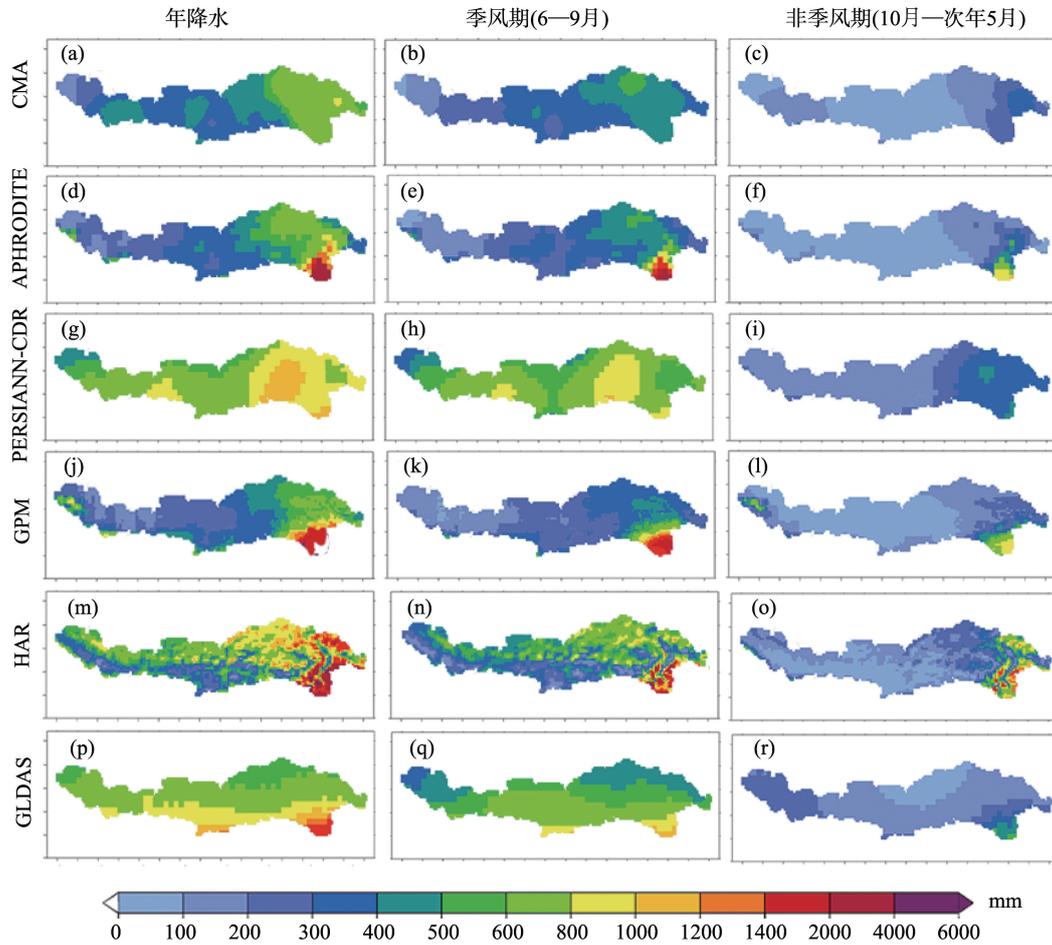


图4 不同降水产品在雅鲁藏布江流域年均及季节空间分布

Fig.4 Spatial patterns of mean annual and seasonal precipitation from different datasets in the Yarlung Zangbo River

集中在上游拉孜和拉孜—奴各沙子流域(130%~380%),呈现出相对误差自上游向下游逐渐递减的特征。在羊村—奴下子流域,PERSIANN-CDR模拟径流与实测径流拟合较好,纳什系数达0.80,相对误差为5.8%。水文模型反向评估表明,PERSIANN-CDR对雅鲁藏布江流域实际降水存在总体高估,高估主要集中在雅鲁藏布江上游流域。

GLDAS驱动的VIC大尺度陆面水文模型模拟的径流在拉孜、拉孜—奴各沙、日喀则和奴各沙—羊村子流域高估实测径流(90%~300%),而在拉萨和羊村—奴下2个子流域低估实测径流(35%~54%)。GLDAS在拉萨子流域模拟径流低估实测径流35.8%,虽然纳什系数达0.70,但在考虑冰川径流对流域总径流贡献12%的情况下<sup>[12]</sup>,仍然低估24%。模型反向评估结果表明,GLDAS降水在拉孜、拉孜—奴各沙、日喀则和奴各沙—羊村子流域高估,在拉萨和羊村—奴下2个子流域低估。

基于站点插值的CMA和APHRODITE驱动VIC模型模拟的径流与实测径流相比明显低估(20%~70%),且低估主要集中在下游奴各沙—羊村和羊村—奴下子流域(54%~77%)。这表明基于站点插值的CMA和APHRODITE网格降水总体低估了雅鲁藏布江流域实际降水。

由于奴下水文站具有较长的径流资料(1980—2015年),覆盖了HAR数据的所有年份(2001—2013年)和GPM 2015年的径流模拟结果,因此本文还对比了奴下站6套降水产品驱动下的模拟和实测径流(图6)。与实测径流相比,基于站点插值的CMA和APHRODITE网格降水驱动的VIC水文模型模拟径流在奴下站低估48%~63%(图6a~6b),和子流域模拟结果一致。在考虑冰川径流对流域总径流贡献12%情况下<sup>[12]</sup>,基于站点插值的CMA和APHRODITE网格降水驱动的VIC水文模型模拟径流在奴下站仍低估36%~51%,再次表明基于站点的网格

表4 6套降水产品与相应网格内国家气象站点降水数据对比  
 Tab.4 Comparisons between precipitation estimates from six precipitation products and the corresponding stations within the grids

| 子流域    | 站点   | APHRODITE |        | GPM   |        | PERSIANN-CDR |        | GLDAS |        | HAR   |         |
|--------|------|-----------|--------|-------|--------|--------------|--------|-------|--------|-------|---------|
|        |      | 相关系数      | 相对误差/% | 相关系数  | 相对误差/% | 相关系数         | 相对误差/% | 相关系数  | 相对误差/% | 相关系数  | 相对误差/%  |
| 拉孜     | 拉孜   | 0.57      | 9.00   | 0.88  | -2.03  | 0.57         | 59.51  | 0.38  | 59.01  | 0.60  | -42.27  |
| 拉孜—奴各沙 | 南木林  | 0.99      | -6.60  | 0.93  | -89.04 | 0.46         | 28.61  | 0.32  | 39.96  | 0.65  | -8.74   |
| 日喀则    | 日喀则  | 0.99      | -0.11  | 0.87  | -24.50 | 0.57         | 34.47  | 0.54  | 48.66  | 0.26  | -54.61  |
| 拉萨     | 江孜   | 0.98      | 4.65   | 0.98  | 9.99   | 0.68         | 58.07  | 0.46  | 69.62  | 0.63  | -4.40   |
|        | 拉萨   | 0.99      | -7.71  | -0.14 | -34.29 | 0.17         | 37.23  | 0.47  | 34.43  | 0.21  | -139.09 |
|        | 当雄   | 0.93      | -0.77  | 0.89  | -20.13 | 0.42         | 23.28  | 0.62  | 15.83  | 0.25  | 35.88   |
| 奴各沙—羊村 | 墨竹工卡 | 0.99      | -26.08 | 0.85  | -70.72 | 0.45         | 23.54  | 0.36  | 20.12  | 0.12  | -52.48  |
|        | 泽当   | 0.99      | 3.44   | 0.88  | -10.57 | 0.39         | 57.02  | 0.54  | 46.46  | 0.19  | -13.82  |
|        | 尼木   | 0.94      | -0.39  | 0.89  | -51.80 | 0.87         | 45.24  | 0.65  | 55.20  | 0.20  | -32.65  |
| 羊村—奴下  | 浪卡子  | 0.99      | 1.08   | 0.93  | 6.61   | 0.67         | 47.97  | 0.45  | 59.91  | 0.20  | 39.57   |
|        | 贡嘎   | 0.88      | -13.44 | 0.89  | -33.30 | 0.45         | 42.21  | 0.47  | 50.70  | 0.15  | 18.15   |
|        | 加查   | 0.99      | 7.74   | 0.91  | -42.40 | 0.49         | 52.73  | 0.15  | 31.54  | -0.20 | -55.70  |
| 奴下—巴昔卡 | 米林   | 0.99      | -6.60  | 0.70  | 11.38  | 0.79         | 28.07  | 0.38  | 27.32  | 0.35  | -120.23 |
|        | 林芝   | 0.98      | -3.58  | 0.98  | -9.63  | 0.64         | 29.81  | 0.41  | 8.91   | 0.09  | -49.92  |
|        | 嘉黎   | 0.99      | 6.26   | 0.08  | -34.49 | 0.38         | 29.59  | 0.26  | -19.39 | 0.03  | 18.09   |
|        | 波密   | 0.99      | -8.63  | 0.94  | -50.42 | 0.67         | -11.15 | 0.43  | -20.95 | 0.09  | -11.07  |

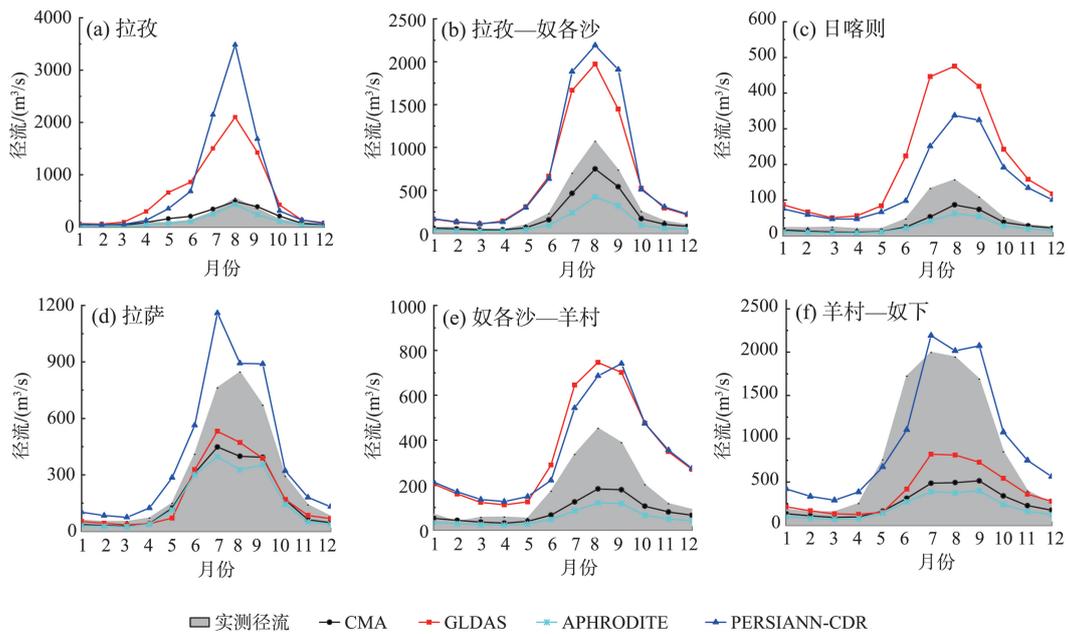


图5 1980—2000年不同降水产品驱动下雅鲁藏布江子流域模拟和实测的月平均径流对比  
 Fig.5 Comparisons between the simulated and observed mean monthly streamflow in the sub-basins of the Yarlung Zangbo River, 1980–2010

降水数据整体低估雅鲁藏布江流域的实际降水。

基于微波遥感卫星反演的GPM降水驱动的2015年奴下站的模拟径流没有捕捉到实测径流峰值主要出现在6—8月份的季节分配特征,并且低估

实测径流15.7%,纳什系数为0.36,表明模拟与实测径流拟合较差(图6c)。受实测径流时段限制,仅对比了2015年GPM驱动VIC模型模拟径流与实测径流,因此GPM降水在雅鲁藏布江流域水文模拟中

表5 CMA、APHRODITE、GLDAS 和 PERSIANN-CDR 驱动的 VIC 模型 1980—2000 年雅鲁藏布江各子流域模拟径流的纳什系数和相对误差

Tab.5 NSE and bias of VIC simulated streamflow driven by CMA, APHRODITE, GLDAS and PERSIANN-CDR datasets relative to the observations in the sub-basins of the Yarlung Zangbo River, 1980—2000

| 子流域    | CMA   |        | APHRODITE |        | GLDAS  |        | PERSIANN-CDR |        |
|--------|-------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------------|--------|
|        | 纳什系数  | 相对误差/% | 纳什系数      | 相对误差/% | 纳什系数   | 相对误差/% | 纳什系数         | 相对误差/% |
| 拉孜     | 0.40  | -29.9  | 0.60      | -28.6  | -19.90 | 301.9  | -51.60       | 383.6  |
| 拉孜—奴各沙 | 0.80  | -29.5  | 0.35      | -49.2  | -0.70  | 170.7  | -1.40        | 130.8  |
| 日喀则    | 0.50  | -41.7  | 0.20      | -56.3  | -12.70 | 264.8  | -3.30        | 159.2  |
| 拉萨     | 0.60  | -41.6  | 0.50      | -48.2  | 0.70   | -35.8  | 0.50         | 34.7   |
| 奴各沙—羊村 | 0.20  | -54.9  | -0.10     | -70.3  | -0.20  | 89.1   | 0.60         | 81.4   |
| 羊村—奴下  | -0.20 | -69.6  | -0.40     | -76.4  | 0.10   | -53.9  | 0.80         | 5.8    |

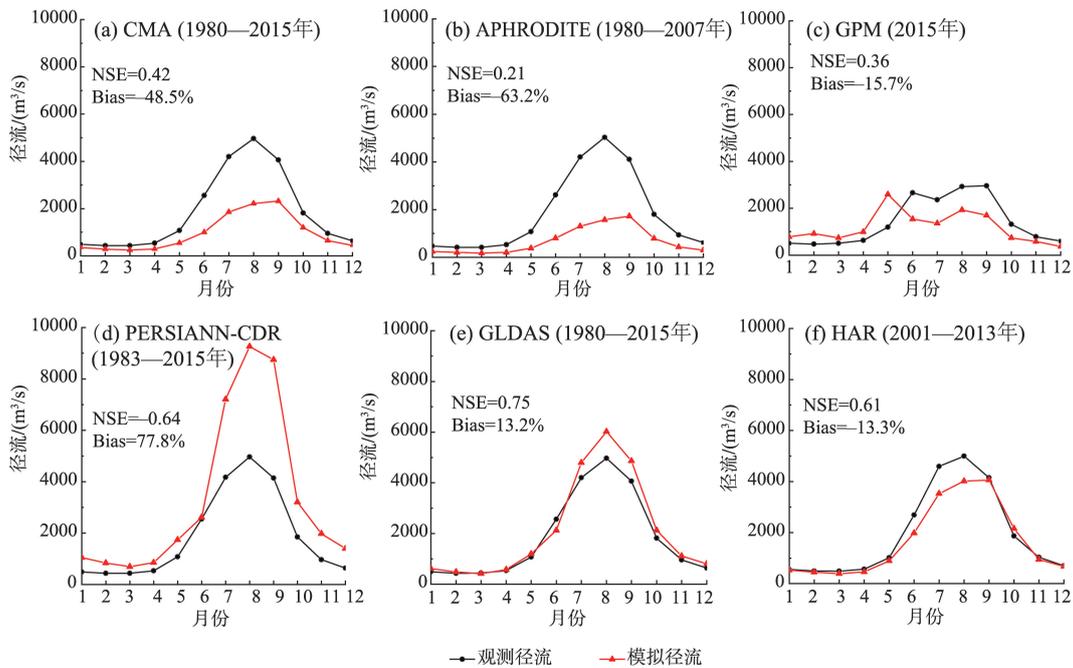


图6 不同降水产品驱动下雅鲁藏布江奴下站模拟和实测的月平均径流对比  
Fig.6 Comparisons between the simulated and observed mean monthly streamflows in the Nuxia Station of the Yarlung Zangbo River

的应用潜力有待继续评估。PERSIANN-CDR 驱动的模拟径流总体呈现和实测径流较一致的季节分配特征(图6d),但在没有考虑冰川情况下仍高估实测径流约78%,导致纳什系数为负数,这也和子流域模拟结果一致,再次表明基于红外遥感卫星反演的PERSIANN-CDR整体高估雅鲁藏布江流域的实际降水。

再分析降水产品GLDAS驱动的模拟径流与实测径流拟合较好,纳什系数达0.75,捕捉到了流域径流的季节特征(图6e)。但在没有考虑冰川对总径流影响下,GLDAS驱动的VIC水文模型模拟的径

流仍高估实测径流约13%。尽管相对于其他数据,GLDAS在奴下站有较好表现,但这也是雅鲁藏布江流域各子流域误差相互抵消的结果(图5)。GLDAS驱动的模拟径流在羊村以上流域整体呈现高估(89%~300%;图5a~5c,5e),但在拉萨和羊村—奴下子流域表现低估(35%~54%;图5d,5f),从而在各子流域径流汇到奴下站时误差减小到13%。这表明虽然GLDAS降水驱动的模拟径流与实测值拟合较好,但在各子流域模拟误差较大,且主要高估了雅鲁藏布江上游流域实际降水。

区域气候模式输出的HAR降水驱动的模拟径

流与奴下站实测径流拟合较好,纳什系数达0.61,相对误差约为-13%,并且与实测径流呈现较为一致的季节分配。考虑冰川对总径流贡献12%的情况下,HAR驱动的模拟径流与实测径流量接近,相对误差约为1%,表明在6套降水产品中,HAR表现出较强的水文模拟应用潜力,这说明HAR降水产品更接近雅鲁藏布江流域的实际降水情况。然而,HAR降水数据时段仅为2001—2013年,无法满足流域长时间序列的径流模拟需要。同时,在实测径流可获取的情况下,HAR在子流域上表现也有待于进一步评估。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文对比分析了1980—2016年基于站点降水数据CMA和APHRODITE、卫星降水数据PERSIANN-CDR和GPM、大气再分析数据GLDAS以及区域气候模式输出数据HAR在雅鲁藏布江7个子流域的降水时空描述,利用国家气象站点降水数据对各套降水数据进行单点验证,并以这6套降水数据驱动VIC大尺度陆面水文模型反向评估了各套降水产品在雅鲁藏布江各子流域径流模拟中的应用潜力。主要结论如下:

(1) 各套降水产品在雅鲁藏布江流域的年均降水量存在很大差异:在1980—2016年间,PER-SIANN-CDR和GLDAS在雅鲁藏布江流域年均降水量最高(770~790 mm);其次是HAR和GPM(650~660 mm);基于站点的CMA和APHRODITE年均降水量最低(460~500 mm)。在季节分布上,除GPM外,其他降水产品在各子流域都能表现出约70%~90%的年降水量集中在6—9月份的季风流域的降水特征。

(2) 除PERSIANN-CDR和GLDAS外,其他降水产品皆捕捉到流域降水自东南向西北递减的空间分布特征。其中,HAR数据表现出更详细的流域内部降水空间分布的细节特征。

(3) 与对应网格内的国家气象站点降水数据对比显示,APHRODITE、GPM和HAR降水整体低估(10%~30%),且严重低估的站点主要集中在下游(40%~120%)。PERSIANN-CDR和GLDAS整体表现为高估上游流域站点降水(28%~60%),但低估下游流域站点降水(11%~21%)。

(4) 在流域径流模拟上,当前的6套降水产品在精度或时段上仍无法满足水文模型模拟的需求。HAR驱动的模拟径流在奴下站与实测值拟合较好(NSE=0.61, BIAS=-13%),表现出较大的水文模拟应用潜力,但目前HAR时段较短(2001—2013年),并且HAR在子流域上的表现有待于进一步评估。基于遥感反演的PERSIANN-CDR驱动VIC模型模拟的径流整体高估了实测径流30%~390%;GPM驱动模型模拟的径流低估实测径流15.7%。GLDAS驱动模型模拟的径流整体高估了流域实测径流13%,高估主要集中在上游子流域(170%~300%);低估了拉萨和羊村—奴下子流域实测径流(35%~54%)。基于站点插值的CMA和APHRODITE驱动的VIC模型模拟径流整体低估(48%~64%),低估主要集中在下游(55%~77%)。

(5) VIC水文模型反向评估表明,区域气候模式输出的HAR在年均降水量和季节分配上更合理,但在子流域上的表现有待于进一步评估。基于站点插值的CMA和APHRODITE网格降水对雅鲁藏布江流域实际降水存在总体低估,并且低估主要集中在下游;基于微波遥感反演的GPM整体低估流域实际降水;基于红外遥感反演的PERSIANN-CDR对雅鲁藏布江流域实际降水存在严重高估。再分析数据GLDAS在上游流域总体表现较好,但在子流域上存在较大误差。

#### 3.2 讨论

青藏高原地处高海拔地区,广泛发育着冰川、积雪、冻土。冰川的消融、积雪的累积和消融以及冻土的冻融等过程和水分、能量的交换都密切相关,也给青藏高原水文模拟带来挑战。因此,模型的物理机制描述和参数的校验率定都直接影响了其模拟精度。本文利用VIC大尺度陆面水文模型反向评估了多套降水产品在雅鲁藏布江各子流域径流模拟中的应用潜力,但受冰川物质平衡等数据限制,无法较为准确地率定度日因子,因此并未系统分析冰川消融对雅鲁藏布江流域径流模拟的影响。加强流域冰川—水文观测,基于更具物理机制的冰川水文模拟来评估和校正多源降水产品也是需要继续开展的工作。

雅鲁藏布江流域气象观测站点稀少,高山区降水信息存在很大未知,因此基于站点插值的网格降水产品存在很大不确定性;而基于遥感的降水产品和基于模式的再分析数据仍不能满足水文模型在

该流域的模拟精度,严重限制了流域水文模拟的准确性。因此,加强地面气象观测并结合地形校正仍旧是改善高山区降水问题的有效途径。Kan等<sup>[32]</sup>在叶尔羌流域沿不同海拔断面布设18个雨量筒和7个自动气象站,通过地形校正很好地刻画了流域降水的时空分布并显著改善了水文模拟效果。基于该成功经验,课题组于2017年借助第二次青藏科考项目在雅鲁藏布江流域按海拔高程和站点分布密度,自上游至下游布设了12个雨量筒(图1黑色十字),形成3000~5500 m的东西和南北2个海拔断面。基于已有的16个国家气象站和新布设的12个雨量筒构建了雅鲁藏布江流域降水观测网络,试图通过海拔梯度来校正流域站点降水数据。由于高原地形复杂、仪器成本较高,高山缺测流域降水问题不能全部通过布设雨量筒来解决。而区域气候模式输出产品分辨率高,能捕捉到流域降水时空特征,可以为气象缺测流域提供数据参考。因此,融合站点数据和区域气候模式输出产品是改善高山缺测流域降水问题的方向之一。

### 参考文献(References)

- [1] Duan A M, Wu G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 24(7-8): 793-807.
- [2] Immerzeel W W, van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328: 1382-1385.
- [3] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [4] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征 [J]. *地理学报*, 1999, 54(S1): 157-164. [Liu Tianchou. Hydrological characteristics of Yarlung Zangbo River. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(S1): 157-164.]
- [5] 杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961—2010年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 166-172. [Yang Zhigang, Zhuo Ma, Lu Hongya, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961-2010. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 166-172.]
- [6] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去, 现在与未来 [J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3025-3035. [Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3025-3035.]
- [7] Yang W, Guo X F, Yao T D, et al. Summertime surface energy budget and ablation modeling in the ablation zone of a maritime Tibetan glacier [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D14). doi:10.1029/2010jd015183.
- [8] Chen X N, Long D, Liang S L, et al. Developing a composite daily snow cover extent record over the Tibetan Plateau from 1981 to 2016 using multisource data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 284-299.
- [9] Li C H, Su F G, Yang D Q, et al. Spatiotemporal variation of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS snow product, 2001-2014 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(2): 708-728.
- [10] Wu Q B, Zhang T J. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D9). doi: 10.1029/2009JD012974.
- [11] Guo D L, Wang H J. Simulation of permafrost and seasonally frozen ground conditions on the Tibetan Plateau, 1981-2010 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5216-5230.
- [12] Zhang L L, Su F G, Yang D Q, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(15): 8500-8518.
- [13] 黄滢, 王中根, 桑燕芳, 等. 雅鲁藏布江流域不同源降水数据质量对比研究 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 339-348. [Huang Xi, Wang Zhonggen, Sang Yanfang, et al. Precision of data in three precipitation datasets of the Yarlung Zangbo River Basin. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 339-348.]
- [14] 吕洋, 杨胜天, 蔡明勇, 等. TRMM卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1414-1425. [Lv Yang, Yang Shengtian, Cai Mingyong, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1414-1425.]
- [15] 郭禹含, 王中根, 伍玉良. 多源再分析降水数据在拉萨河流域应用对比研究 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1033-1039. [Guo Yuhan, Wang Zhonggen, Wu Yuliang. Comparison of applications of different reanalyzed precipitation data in the Lhasa River Basin based on HIMS model. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1033-1039.]
- [16] Liu J T, Xu Z X, Bai J R, et al. Assessment and correction of the PERSIANN-CDR product in the Yarlung Zangbo River Basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2031. doi: 10.3390/rs10122031.
- [17] Tong K, Su F G, Yang D Q, et al. Tibetan Plateau precipi-

- tation as depicted by gauge observations, reanalyses and satellite retrievals [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(2): 265-285.
- [18] Qi W, Liu J G, Chen D L. Evaluations and improvements of GLDAS2.0 and GLDAS2.1 forcing data's applicability for basin scale hydrological simulations in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(23): 13128-13148.
- [19] 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.
- [20] Curio J, Maussion F, Scherer D. A 12-year high-resolution climatology of atmospheric water transport over the Tibetan Plateau [J]. *Earth System Dynamics*, 2015, 6(1): 109-124.
- [21] Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(9): 1401-1415.
- [22] Ashouri H, Hsu K, Sorooshian S, et al. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(1): 69-83.
- [23] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) [R]. Algorithm theoretical basis document, Version 4.5. Greenbelt, USA: NASA, 2015.
- [24] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394.
- [25] Caraway N M, McCreight J L, Rajagopalan B. Multisite stochastic weather generation using cluster analysis and k-nearest neighbor time series resampling [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 197-213.
- [26] Nasseri M, Tavakol-Davani H, Zahraie B. Performance assessment of different data mining methods in statistical downscaling of daily precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 1-14.
- [27] Ver Hoef J M, Temesgen H. A comparison of the spatial linear model to Nearest Neighbor (k-NN) methods for forestry applications [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e59129. doi: 10.1371/journal.pone.0059129.
- [28] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A complete daily precipitation database for northeast Spain: Reconstruction, quality control, and homogeneity [J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 30(8): 1146-1163.
- [29] Liang X, Lettenmaie D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99: 14415-14428.
- [30] Liang X, Lettenmaie D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [31] Cherkauer K A, Lettenmaier D P. Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104 (D16): 19599-19610.
- [32] Kan B Y, Su F G, Xu B Q, et al. Generation of high mountain precipitation and temperature data for a quantitative assessment of flow regime in the upper Yarkant Basin in the Karakoram [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(16): 8462-8486.
- [33] Meng F C, Su F G, Li Y, et al. Changes in terrestrial water storage during 2003-2014 and possible causes in Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(6): 2909-2931.
- [34] Su F G, Zhang L L, Ou T H, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 136: 82-95.
- [35] Tong K, Su F G, Yang D Q, et al. Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 423-437.
- [36] Zhao Q D, Ding Y J, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [37] Immerzeel W W, Wanders N, Lutz A F, et al. Reconciling high-altitude precipitation in the upper Indus basin with glacier mass balances and runoff [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(11): 4673-4687.
- [38] Wortmann M, Bolch T, Menz C, et al. Comparison and correction of high-mountain precipitation data based on Glacio-hydrological modeling in the Tarim River headwaters (high Asia) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(5): 777-801.

## Evaluation of multiple precipitation datasets and their potential utilities in hydrologic modeling over the Yarlung Zangbo River Basin

SUN He<sup>1,2</sup>, SU Fengge<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The gauge-based precipitation data from the National Climate Center, China Meteorological Administration (CMA), Asian Precipitation- Highly- Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE), Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network-Climate Data Record (PERSIANN- CDR), Global Precipitation Measurement (GPM), Global Land Data Assimilation System (GLDAS), High Asia Refined analysis (HAR) are compared with each other and evaluated by the precipitation data from 16 national meteorological stations during 1980–2016 in the Yarlung Zangbo River and its sub-basins. The potential utilities of these multiple precipitation datasets are then systematically evaluated as inputs for the variable infiltration capacity (VIC) macroscale land surface hydrologic model. The results show that: 1) PERSIANN-CDR and GLDAS contain the largest precipitation estimates among the six datasets with mean annual precipitation of 770–790 mm, followed by the HAR and GPM (650–660 mm), while CMA and APHRODITE contain the lowest precipitation estimates with mean annual precipitation of 460–500 mm. All the products can detect the large-scale monsoon-dominated precipitation regime in the Yarlung Zangbo River and its sub-basins with 70%–90% of annual total precipitation occurring in June–September except the GPM. 2) The general spatial pattern of the annual mean precipitation fields is roughly in agreement among the six datasets, with a decreasing trend from the southeast to the northwest in the Yarlung Zangbo River Basin except the PERSIANN-CDR and GLDAS. 3) Relative to the data from the national meteorological stations, APHRODITE, GPM, and HAR generally underestimate precipitation by 10%–30%, while PERSIANN-CDR and GLDAS overestimate precipitation from stations in upstream sub-basins by 28%–60% and underestimate precipitation from stations in downstream sub-basins by 11%–21%. 4) The six precipitation datasets cannot satisfy the needs of hydrological simulation in term of accuracy or period in the basin. 5) HAR precipitation data—output of regional climate model—show more reasonable amount and seasonal pattern among the six datasets in the upper Brahmaputra according to the inverse evaluation by VIC hydrological model.

**Keywords:** precipitation estimate; hydrological simulation; the Yarlung Zangbo River; Tibetan Plateau