

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0055

孟庆博,刘艳丽,鞠琴,等.基于多源数据同化融合的尼洋河降水时空分布特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):110-118. MENG Q B, LIU Y L, JU Q, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of precipitation based on multi-source data assimilation and fusion in Niyang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 110-118. (in Chinese)

基于多源数据同化融合的尼洋河降水时空分布特征

孟庆博^{1,2,3},刘艳丽^{1,2},鞠琴³,刘冀⁴,关铁生^{1,2},王国庆^{1,2},

金君良^{1,2},贺瑞敏^{1,2},刘翠善^{1,2},鲍振鑫^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098; 2. 水利部应对气候变化研究中心,南京 210029; 3. 河海大学 水文水资源学院,南京 210098; 4. 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443000)

摘要:地理位置处在我国高寒山区的尼洋河流域地面气象观测站点极少,是典型的缺资料地区,卫星降水数据产品是降水数据的重要补充。由于卫星降水数据在获取上的间接性及本身的不确定性,数据精度问题一直是阻碍其有效应用的主要因素。基于集合卡尔曼滤波(EnKF)同化算法,选取 TRMM、CHIRPS、Cmorph_V1.0、PERSIANN-CDR 及 Gldas_Noah 5 种卫星降水产品,在对其与林芝站网格区域实测降水进行精度分析的基础上,进一步进行多源降水数据同化与融合。结果表明:同化后 5 种卫星降水产品与实测降水量的相关系数 CC 均在 0.98 以上,BIAS 均在 10% 以下,ME 在同化后均小于 0.2 mm/d, RMSE 均小于 0.6 mm/d, EnKF 的同化效果显著。将同化后的 5 种降水与原卫星降水之间的误差序列推广至全流域,从而获得全流域的 5 种同化降水用于融合,融合后的降水数据综合了 5 种降水数据产品在精度指标的各自优势,其精度和可靠性更高。利用克里金插值法对融合后的降水进行尼洋河降水时空分布特征分析,结果显示年降水量空间上由中部向四周逐渐递减,时间上呈现逐年增加的趋势。通过对卫星降水数据进行同化及融合,在提升降水数据产品精度的同时提供了满足水文模拟及水资源管理需求的时间序列数据,具有重要的应用价值。

关键词:尼洋河流域;多源降水;数据同化;EnKF;数据融合;降水时空分析

中图分类号:P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of precipitation based on multi-source data assimilation and fusion in Niyang River basin

MENG Qingbo^{1,2,3}, LIU Yanli^{1,2}, JU Qin³, LIU Ji⁴, GUAN Tiesheng^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}, JIN Junliang^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}, LIU Cuishan^{1,2}, BAO Zhenxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: There are few meteorological stations located in the plateau and cold mountain area of the Niyang River basin, China.

收稿日期:2019-07-18 修回日期:2019-11-15 网络出版时间:2020-03-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200312.1641.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(91747103;51679145;51779146);国家重点研发计划(2016YFA0601602)

作者简介:孟庆博(1996—),男,河北石家庄人,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:292951995@qq.com

通信作者:刘艳丽(1981—),女,河南泌阳人,教授级高级工程师,博士,主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail:ylliu@nhri.cn

It is a typical area that has a data shortage. Therefore, satellite precipitation data is an important supplement. Due to the indirectness of the acquisition of satellite precipitation data and its uncertainty, data accuracy has always been a major barrier to its effective application. Based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF) assimilation algorithm, five satellite precipitation products including TRMM, CHIRPS, Cmorph_V1.0, PERSIANN-CDR and Gldas_Noah were selected. The multi-source precipitation data assimilation and fusion were carried out because of the accuracy analysis of the measured precipitation in the grid area of Linzhi Station. The results showed that the correlation coefficients of the five satellite precipitation data products with original satellite precipitation increased up to 0.98 after assimilation, the BIAS was below 10%, ME was less than 0.2 mm/day, and the RMSE was less than 0.6 mm/day, respectively. The effect of EnKF's assimilation was significant. The error sequence between the assimilated five kinds of precipitation and the original satellite precipitation was extended to the whole basin so that the five assimilated precipitations in the whole basin were used for fusion. The combined precipitation data integrated the advantages of the five precipitation data products in the accuracy index, while its accuracy and reliability were much higher. Kriging interpolation method was used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of precipitation after integration in Niyang River basin. The results showed that the spatial distribution of annual precipitation decreased gradually from the midland to the surrounding, and showed an increasing trend year by year. Through assimilation and integration of satellite precipitation data, it may provide a time series of precipitation for the requirements of hydrological simulation and water resources management, which has important application value.

Key words: Niyang River basin; multi-source precipitation; data assimilation; EnKF; data fusion; precipitation spatial and temporal analysis

降水是水文变化过程的核心驱动源,是大气中水分循环和能量交换的主要组成部分^[1-2]。准确获取降水相关信息对研究不同时、空尺度下的水文循环有着至关重要的理论与实际意义。地面雨量计的测量精度高,但在降水观测站点密度不足与降水非均匀性条件的制约下,其降水数据在缺资料地区往往代表性不足,无法真实反映降水的时空分布规律^[3-4];而随着近年来卫星和遥感技术的不断发展,卫星降水产品更加多源化,具有覆盖范围广、时间连续性及空间分辨率高等优点,逐步成为缺资料或无资料地区降水数据的重要补充^[5-7]。由于其降水信息获取的间接性及降水估算方法的适用性,卫星降水的结果仍然存在着相当大的误差,为了提高卫星降水的精度,数据同化及融合技术提供了至关重要的思路,利用数据同化及融合能够得到较为准确的降水^[8]。

国内外学者的有关研究表明数据同化及融合技术对于提高相关数据精度的作用显著。王璐等^[9]将集合卡尔曼滤波同化方法应用于一维的水文模型 HYDRUS-1D 进行了表层土壤水分的模拟,结果显示与单独使用 HYDRUS-1D 模型相比,同化后的表层土壤水分含量精度显著提高,其中均方根误差与平均误差均有一定程度的缩小,表明多源遥感数据在表层土壤水分的同化研究中起到显著作用。王泽人等^[10]基于集合卡尔曼滤波对太湖叶绿素 a 浓度进行同化实验,结果显示数据同化技术在很大程度上提高了太湖水体叶绿素 a 浓度预测的结果,分析

值与观测值偏差明显小于预报值与观测值的偏差。陈浩等^[11]将 LOGISTIC 模型作为集合卡尔曼滤波算法的动态模型,对南雄烟草 LAI 反演数据进行数据同化,结果显示同化后的 LAI 结果精度有所提升,与真实值吻合度高且 LAI 曲线更符合烟草的实际生长状况。Larsen 等^[12]对一年内某一区域内的海表面温度 EnKF 同化结果和 OI 同化结果进行验证,发现前者同化效果优于后者。刘硕等^[13]通过 3 种数据融合方法将赣江流域 TRMM 卫星降水与地面雨量站网降水数据进行融合,结果显示线性回归模型融合方法在赣江流域日降水融合方面应用价值不大,而平均偏差校正和贝叶斯融合方法均可提高 3B42 V7 卫星降水数据精度。

国内多位学者基于卫星降水产品对所研究流域进行径流模拟^[14-17],模拟情况较好,但卫星降水产品本身的精度并不高,这足以成为影响卫星降水在相关领域应用的一大因素。因此,为应对尼洋河流域降水资料短缺和卫星降水数据产品精度不高的问题,本研究基于集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)算法,选取 5 种卫星降水产品在尼洋河流域的林芝站进行同化分析,将同化后的降水与原卫星降水之间的同化规律推广至整个流域并获得全流域的同化降水序列,然后对其进行数据融合后对尼洋河流域的降水时空分布特征进行分析。

1 研究区概况

本研究选取在雅鲁藏布江流域中水量居第二的支

流尼洋河为研究区域。尼洋河位于 29°28'N~30°38'N、92°10'E~94°35'E,流域面积约为 17 900 km²。流域内气候较温润,年平均气温在 8℃左右,多年平均降水量范围在 500~900 mm。尼洋河流域的主汛期为 6—9 月,且径流量年内分配不均匀,其汛期径流量可达年径流量的 90%左右,多年期间的丰水期和枯水期为 3—5 月。尼洋河流域是一个典型的缺资料地区,站点降水观测资料极为匮乏,流域内的雨量观测站仅有林芝站一个,这对开展尼洋河流域气候及水文的相关研究产生了巨大的影响。

2 数据与方法

2.1 多源降水数据

由于多种卫星降水来源各不相同,考虑到数据的可获取性、获取的难易程度、广泛性及在高寒区的适用性,本文选取了全球 5 种应用广泛且精度较高的卫星降水数据,各自数据集的特征见表 1。鉴于 5 种数据集各自的时间尺度、序列及获取途径的不同,最终统一选取 2001—2016 年的降水数据作为数据同化及融合的基础数据。

表 1 5 种降水数据集特征

Tab. 1 Features of five precipitation data sets

数据名称	空间分辨率	覆盖范围	时间序列	数据来源
TRMM	0.25°×0.25°	50°N—50°S,180°W—180°E	1998—2018	https://pmm.nasa.gov/
CHIRPS	0.25°×0.25°	50°N—50°S,180°W—180°E	1981—2016	http://chg.geog.ucsb.edu/
Cmorph_V1.0	0.25°×0.25°	60°N—60°S,180°W—180°E	1998—2017	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/
PERSIANN-CDR	0.25°×0.25°	60°N—60°S,180°W—180°E	1983—2017	http://chrsdata.eng.uci.edu/
Gldas_Noah	0.25°×0.25°	90°N—60°S,180°W—180°E	2000—2018	https://disc.gsfc.nasa.gov/

TRMM 3B42 降水是基于 TRMM(Tropical Rain-fall Measuring Mission)计划的一款多卫星降水分析产品,其日数据是根据 3B42 算法,对微波和红外资料进行联合估值得到的全球降水量估计数据^[18]; CHIRPS(Climat Hazards Group Infrared Precipitation with Station data)降水产品始于 1981 年,其降水来源于地球同步卫星的红外监测数据、TMPA 3B42 产品等,它对降水量的估计值由站点观测数据和许多包括地球同步卫星技术(GTS)纠偏过的档案数据的融合而成^[19];CMORPH 降水产品主要通过云层运动矢量构建云端系统的运动变化,最终对微波反演数据进行插值得到空间的降水分布信息^[20];PERSIANN-CDR(PERSIANN-Climate Data Record)是由美国加州大学欧文分校(University of California, Irvine;UCI)开发的基于 PERSIANN 模型对网格卫星红外数据进行模拟得到的降水产品^[21];Gldas_Noah 降水数据是全球陆地数据同化系统(GLDAS)基于陆地信息系统(LIS)的 Noah 模型进行模拟生成的从 2000 年至今的降水数据集,本文通过 Matlab 软件进行编程将其降水数据由 3 h 尺度转换为 Daily 尺度。

2.2 数据精度检验方法

本文对尼洋河流域单一站点(林芝站)的日尺度降水数据进行精度评定。方法是通过雨量观测站的经纬度坐标提取对应的卫星降水数据,在单站尺度上检验卫星降水数据的精度,具体采用 4 种精度评价指标对以上 5 种卫星降水产品的精度进行评价,所有降

水数据的时间范围均为 2001—2016 年。4 种评价指标的介绍如下。

(1)相关系数(Correlation Coefficient, CC)。CC 值可表示卫星降水数据与站点实测降水数据的线性相关程度,取值范围为[-1, 1],越接近 1 表示数据一致性越好。计算公式为

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

式中: S_i 表示第 i 天的卫星降水,mm; G_i 表示第 i 天的站点实测降水,mm; N 表示时间序列总长,即 2001—2016 年的所有天数, d 。

(2)相对偏差(Bias, BIAS)。BIAS 值能够反映卫星降水数据相对站点实测降水数据的相对偏差程度,取值范围为[-1, 1],正值表示卫星降水高估实际降水的程度,负值则表示低估实际降水的程度。计算公式为

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

式中各符号含义同式(1)。

(3)平均误差(Mean Error, ME)。ME 值可直观反映卫星降水数据相对站点实测降水数据的平均偏差量,取值范围为 $[-\infty, +\infty]$,正值为正偏差,表明卫星降水数据高于站点实测降水数据,反之则为负偏差。计算公式为

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)}{N} \quad (3)$$

式中各符号含义同式(1)。

(4)均方根方差(Root Mean Square Error, RMSE)。RMSE 值用来衡量卫星降水数据与站点实测数据之间的偏差,表示卫星降水数据的标准误差,取值范围为 $[0, +\infty]$,最优值为 0。计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - G_i)^2} \quad (4)$$

式中各符号含义同式(1)。

2.3 同化融合分析方法

2.3.1 EnKF 同化算法

本研究采用 EnKF 方法对多种卫星降水进行数据同化。EnKF 来源于标准卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF),是标准卡尔曼滤波在蒙特卡洛采样方向的一种近似估计^[22],计算步骤分为以下几步。

(1)初始化背景场。

假设向量 X 的维度为 m ,表示进行 EnKF 的状态向量有 m 个(本研究的状态向量仅有降水),首先在初始时刻给定符合高斯分布的状态变量 X ,并对其添加 N 个扰动(符合均值为 0,方差为 1 的标准正态分布的随机数),得到符合高斯分布且数目为 N 的状态变量的集合:

$$X^a = (x_1^a, \dots, x_N^a) \quad (5)$$

式中:上标 a 代表变量源于背景场或分析; N 为集合成员数。

计算状态集合的平均,公式为

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^a \quad (6)$$

背景场集合中第 i 个集合成员的扰动项 $x_i'^a$ 为:

$$x_i'^a = x_i^a - \bar{x} \quad (7)$$

得到扰动项集合 X^b ,因此背景误差协方差 P^b 可表示为:

$$X'^a = (x_1'^a, \dots, x_N'^a) \quad (8)$$

$$P^a = \frac{1}{N-1} X'^a (X'^a)^T \quad (9)$$

(2)模型向前预报,计算下一时刻状态变量的预报值 $x_{i,k+1}^b$ 。

$$x_{i,k+1}^b = M_k(x_{i,k}^a) + w_{i,k}, w_{i,k} \sim N(0, W_k) \quad (10)$$

式中: $x_{i,k}^a$ 是第 i 个集合成员在 k 时刻的背景值或分析值,mm; x_i^a 为背景场集合中第 i 个集合成员的扰动项,mm; $x_{i,k+1}^b$ 是第 i 个集合成员在 $k+1$ 时刻的预报值,mm; M_k 是模型算子; W_k 是模型误差,mm; $w_{i,k}$ 是均值为 0、方差为 W_k 的正态随机数。

(3)计算 $k+1$ 时刻状态变量预报值集合的均

值 \bar{x}_{k+1}^b 及协方差矩阵。

$$\bar{x}_{k+1}^b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,k+1}^b \quad (11)$$

$$P_{k+1}^b = \frac{1}{N-1} X'^b (X'^b)^T \quad (12)$$

(4)求出卡尔曼增益 K 。

$$K_{k+1} = P_{k+1}^b H^T (H P_{k+1}^b H^T + R)^{-1} \quad (13)$$

$$P_{k+1}^b H^T =$$

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [x_{i,k+1}^b - \bar{x}_{k+1}^b] [H(x_{i,k+1}^b) - H(\bar{x}_{k+1}^b)]^T \quad (14)$$

$$H P_{k+1}^b H^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [H(x_{i,k+1}^b) - H(\bar{x}_{k+1}^b)]$$

$$[H(x_{i,k+1}^b) - H(\bar{x}_{k+1}^b)]^T \quad (15)$$

式中: \bar{x}_{k+1}^b 是 $k+1$ 时刻状态变量预报值的平均值,mm; R 是观测误差协方差,其计算方法与背景误差协方差 P^b 的计算方法相似,通过随机生成均值为 0、方差为 R 的 n 个正态随机数,并直接计算得到观测误差协方差; H 是观测算子,表示观测变量与状态变量的之间的关系,本研究中 H 统一取 1。

(5)对每个状态变量集成员进行更新得到分析值。

$$x_{i,k+1}^a = x_{i,k+1}^b + K_{k+1} [y_k - H(x_{i,k+1}^b)] \quad (16)$$

$$\bar{x}_{k+1}^a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,k+1}^a \quad (17)$$

$$P_{k+1}^a = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{i,k+1}^a - \bar{x}_{k+1}^a) (x_{i,k+1}^a - \bar{x}_{k+1}^a)^T \quad (18)$$

式中: $x_{i,k+1}^a$ 是第 i 个集成员在 $k+1$ 时刻的分析值,mm; y_k 是添加了前面提到的观测扰动的 k 时刻的观测值,mm,原观测值为林芝站的日降水数据; $\bar{x}_{i,k+1}^a$ 是 $k+1$ 时刻状态变量分析值的平均值,mm。

(6)返回步骤(2)并重复步骤(2)至(5)的直到迭代结束。

本研究通过 EnKF 算法对 5 种卫星降水产品在林芝站所在网格的日降水序列进行同化得到 5 种同化降水序列,假设在该网格中每种卫星降水序列与其同化得到的降水序列的误差向量适用于尼洋河其他的网格中,因此本文利用 5 种产品的误差向量对 5 种原卫星降水数据进行推导得到尼洋河内所有网格的 5 种同化降水序列。

2.3.2 赋权融合

本研究采用的数据融合方法基于上面对 5 种卫星降水产品的精度检验结果进行归一化处理,对 5 种同化降水分别赋予权重,最终通过权重结果将 5 种同化降水序列进行融合得到基于多源数据同化及融合分析的降水数据,原理如下:

由于除了相关系数外的指标数值的绝对值越

大,精度越差,故在进行归一化处理前需要对它们取倒数,公式为

$$X_{i,j} = |1/X_{i,j}|, j=1,2,\dots,n-1 \quad (19)$$

进行归一化处理,公式为

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_{i,j} / \sum_{i=1}^m X_{i,j}) \quad (20)$$

式中: m 是卫星降水产品的个数; n 是精度评价指标的个数; $X_{i,j}$ 是第 i 个卫星降水产品对应第 j 个指标的值; X_i 是第 i 个卫星降水在所有指标进行归一化后的值,mm。在归一化处理后,令 5 种同化后的卫星降水分别与各自的权重相乘即得到最终的融合降水。

3 结果与分析

3.1 不同降水产品的精度检验结果分析

影响降水的因素较为复杂,例如地形、海拔和经纬度等要素,而不同来源的卫星降水与站点实测降水的偏差也不尽相同。本文通过 5 种卫星降水产品分别对研究区内雨量观测站(林芝站)的数据进行了一元线性回归分析及 4 种精度评价指标的分析。

由图 1 可以看出,5 种卫星降水数据与站点实

测降水量之间均较为分散。其中,TRMM、CHIRPS、PERSIANN-CDR 及 Gldas_Noah 与基准降水量之间的相关系数 CC 分别为 0.456、0.458、0.425 和 0.483(表 2),均高于 Cmorph_V1.0(0.370),但 5 种降水产品的 CC 值都较低,与基准数据之间的一致性不高,没有明显的线性相关关系。对比 5 种卫星降水产品的 BIAS, Cmorph_V1.0 产品的 BIAS 最小, TRMM 产品的 BIAS 最大,除了 CHIRPS 和 Cmorph_V1.0 产品为负值,其它均为正值,且 5 种降水的 BIAS 均较大,大都大于 20%,说明在日尺度下 CHIRPS 和 Cmorph_V1.0 产品在尼洋河流域的降水存在低估情况,而其他三种降水产品存在高估情况。对于 ME 值,5 种降水的指标与 BIAS 指标趋势表现及正负值情况相同,偏差在 0.4~0.9 mm/d,且 5 种降水产品中既存在高估情况也存在低估情况(与 BIAS 得到的结果相同)。对比 5 种降水产品的 RMSE, CHIRPS(4.708 mm/d) 产品低于其它降水产品, TRMM(7.078 mm/d) 的最大且与其他降水产品的差距也最大,5 种降水产品的 RMSE 大部分在 5 mm/d 以上,说明偏差较大,精度较差。

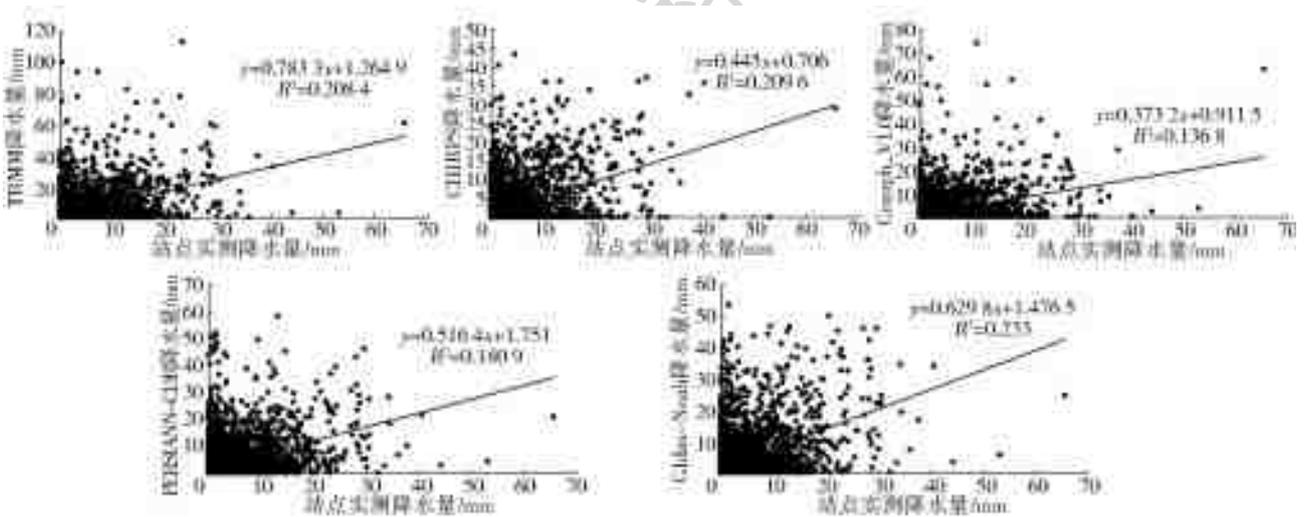


图 1 5 种卫星降水数据与基准降水量的散点

Fig. 1 Scatter plot of five satellite precipitation data and baseline precipitation data

表 2 5 种日尺度卫星降水产品的精度指标

Tab. 2 Accuracy indices of five satellite precipitation data at the daily scale

	CC	BIAS/%	ME/(mm·d ⁻¹)	RMSE/(mm·d ⁻¹)
TRMM	0.456	37.9	0.805	7.078
CHIRPS	0.458	-22.3	-0.473	4.708
Cmorph_V1.0	0.370	-19.8	-0.420	5.160
PERSIANN-CDR	0.425	34.1	0.724	5.523
Gldas_Noah	0.483	32.5	0.690	5.521

综上所述,5 种降水产品的一致性均较差(小于 0.5),各种指标情况较为一般,精度较差,其中 CHIRPS 产品的精度最好, Cmorph_V1.0 虽然产品的相关系数最小(0.370),一致性最差,但是其他 3 种指标的偏差均非常小,尤其是相对偏差 BIAS 和平均误差 ME, PERSIANN-CDR 和 Gldas_Noah 产品之间的差距最小且各项指标在 5 种降水产品中均处于中等水平,而 TRMM 产品的精度最差,与站点实测降水的偏差最大。对比其它的相关研究,发现

多种卫星降水产品在青藏高原地区的精度大都不如地势较为平缓且海拔较低的平原地区的精度,经过分析得知,出现此种现象的原因可能是:(1)青藏高原地区无论是地势条件还是气候条件都较为复杂与严峻,观测的不确定性尤为凸显,实际观测数据的不确定性问题随之而来。(2)卫星降水大都通过监测云系活动来获取被动微波降水进而进行多种方法的修正,青藏高原地区云层活动复杂且多变,故卫星降水产品的误差较大。由于以上各种卫星降水与实测降水一致性与偏差较大且有正有负,故需要对卫星降水产品做集成处理,数据同化及融合技术对此就显得尤为重要。

3.2 多源数据的同化结果分析

本文基于集合卡尔曼滤波(EnKF)算法对5种卫星降水产品在林芝站所在网格的降水进行数据同化,结果见表3。

表3 同化后5种卫星降水产品的精度指标

Tab. 3 Accuracy indices of five satellite precipitation data after assimilation

卫星降水产品	CC	BIAS/ %	ME/ (mm·d ⁻¹)	RMSE/ (mm·d ⁻¹)
TRMM	0.995	9.0	0.192	0.504
CHIRPS	0.998	5.0	0.107	0.421
Cmorph_V1.0	0.997	5.2	0.111	0.440
PERSIANN-CDR	0.997	9.1	0.194	0.427
Gldas_Noah	0.997	8.9	0.188	0.418

由表3可以看出,经过EnKF同化后,5种卫星降水产品与实测降水量的相关系数CC均在0.98以上,提升了约0.56,且相互差距很小,说明同化后的降水数据与林芝站的实测降水数据一致性相当高;对于BIAS,5种降水的BIAS很小,均在10%以下,相比同化前减小了22%,CHIRPS和Cmorph_V1.0的BIAS明显小于其他3种降水,精度最高;对于ME,5种降水均小于0.2 mm/d,相比同化前减小了约0.46 mm/d,相互间存在差异且CHIRPS和Cmorph_V1.0产品的指标情况明显好于其他3种降水;对比5种降水的RMSE,Gldas_Noah(0.418 mm/d)的指标最小,只有TRMM的RMSE大于0.5 mm/d(0.504 mm/d),精度最差且与其他降水的差距也较大,但5种降水的RMSE均小于0.6 mm/d,相比同化前减小了5.16 mm/d左右。

综上所述,经过EnKF同化过后,5种卫星降水产品的精度均有所提高,且5种降水产品的偏差较同化前均明显减小,同化效果显著,由此表明

集合卡尔曼滤波(EnKF)同化算法对卫星降水进行实时校正的效果极为明显,对获取精确的降水意义重大。

3.3 多源数据的融合结果分析

根据同化后得到的结果,应用式(20)将5种同化降水进行融合得到一套降水数据,本文对林芝站所在网格的融合降水进行精度评价,结果见表4。

表4 融合后降水产品的精度指标

Tab. 4 Accuracy indices of precipitation data after fusion

	CC	BIAS/ %	ME/ (mm·d ⁻¹)	RMSE/ (mm·d ⁻¹)
融合后	0.998	7.200	0.153	0.380

由表4和图2可知,将5种同化后得到的降水进行融合后,其与实测降水数据的一致性相当高,相关系数达0.98,BIAS,ME及RMSE值较融合前均有一定程度的减小且融合后的降水在精度指标上较同化后单一卫星降水数据的指标更具有优势。

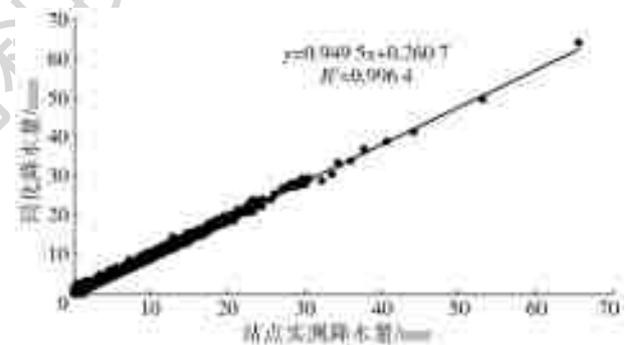


图2 融合后降水与基准降水量的散点

Fig. 2 Scatter plot of precipitation data after fusion and baseline data

3.4 尼洋河降水时空分布特征分析

3.4.1 尼洋河流域降水的空间分布特征

本文对经过同化及融合后的2001—2016年的日降水数据进行处理,得到尼洋河流域的多年平均降水量,并利用克里金(Kriging)空间插值方法将空间网格降水插值到整个尼洋河流域面上,见图3。尼洋河流域的年降水量在图中整体呈现由中部向四周逐渐递减的趋势,且不同区域降水量的差异不是很大,流域内年降水量的高值位于中部及偏东部地区,最高达到960 mm,低值位于西部及东部地区,最低约790 mm。

3.4.2 尼洋河流域降水的时间分布特征

基于获取更加直观降水时间分布特征的目的,

本文根据 EnKF 同化及融合后的降水对尼洋河 2001—2016 年的年降水量变化过程及多年平均月降水量年内分配进行了统计,见图 4 和图 5。

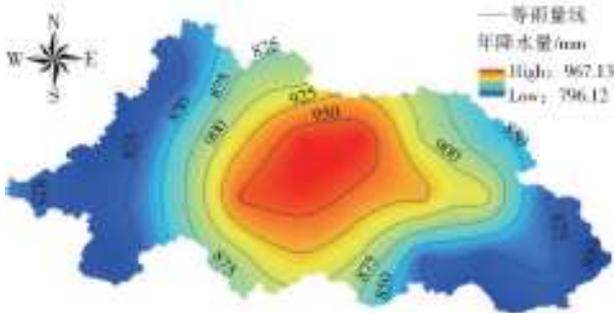


图 3 尼洋河流域多年平均降水量分布
Fig. 3 Multi-year average precipitation distribution in the Niyang River basin

由图 4、图 5 可知,年降水量为逐年增加的趋势,且趋势相对明显,年降水量大致在 800~1 000 mm,2016 年的降水量最高,接近 1 100 mm。在降水量的年内分配上,12 月的降水量最少,不到 5 mm,6—8 月的降水量最大,最高可达 170 mm。年内降水分配符合对汛期及非汛期的认知,但降水在各月的分布较不均,尼洋河流域内一年当中的降水主要集中在 5—9 月,而 11 月至次年 2 月的降水量很少,可认为几乎没有。

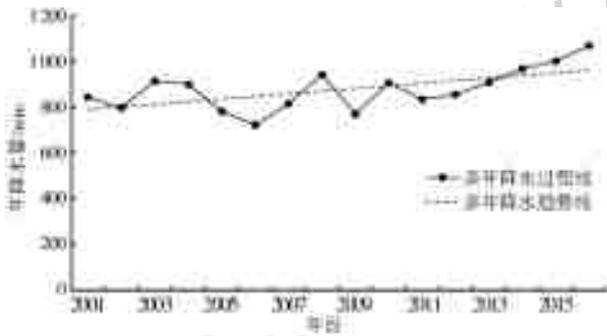


图 4 尼洋河年降水量变化过程
Fig. 4 Variation of annual precipitation in the Niyang River basin

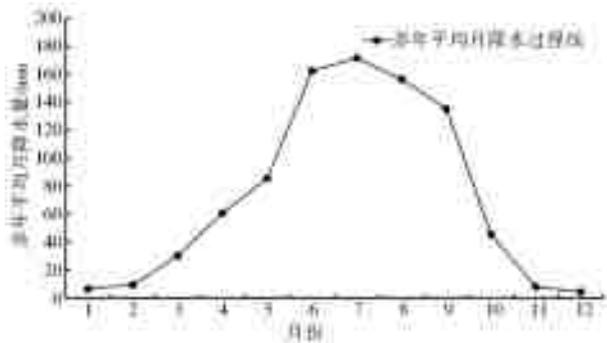


图 5 尼洋河多年平均月降水量年内分配
Fig. 5 Annual average monthly precipitation distribution in the Niyang River basin

4 结 论

本文基于 2001—2016 年的 5 种卫星降水产品及林芝站的日降水数据,通过 EnKF 同化算法对林芝站的降水进行数据同化,并利用同化得到的误差分布序列将林芝站的同化降水数据延伸至全流域,最终将 5 种卫星降水的同化数据进行融合得到尼洋河流域的融合降水序列,并利用该降水数据对尼洋河流域降水的时空分布特征进行分析。

(1) 5 种卫星降水数据在林芝站进行 EnKF 同化后,相关系数 CC 均在 0.98 以上,提升了约 0.56;对比 5 种降水产品的 BIAS,均在 10% 以下,相比同化前减小了约 22%,CHIRPS 和 Cmorph_V1.0 产品的 BIAS 最小,精度最高;对于 ME 指标,5 种降水产品在同化后均小于 0.2 mm/d,整体相比同化前减小了约 74.6%;对比 5 种降水产品的 RMSE,均小于 0.6 mm/d,相比同化前减小了 5.16 mm/d 左右。整体上看,在 EnKF 同化过后,均提升了 5 种产品精度,同化效果显著。而通过融合后降水的精度较融合前有小幅度提升,并且精度优于融合前单一降水产品。

(2) 根据同化及融合后的降水对尼洋河降水的时空分布进行分析,发现年降水量由中部向四周逐渐递减,流域内年降水量高值位于中部及偏东部地区,可达 960 mm,而低值位于西部及东部地区,约为 790 mm。年降水量大致在 800~1 000 mm,呈现逐年增加的趋势,在降水量的年内分配上,12 月的降水量最少,最大出现在 6—8 月,可达 170 mm。年内降水分配较不均,流域内一年当中的降水主要集中在 5—9 月,而 11 月至次年 2 月的降水量很少。

(3) 经同化融合后的多种卫星降水数据产品,提高了降水数据的精度,有效弥补了地面观测站点降水数据缺乏的不足,并能提供满足流域水文模拟以及水资源可持续管理要求的降水序列数据,具有重要的应用价值。

参考文献(References):

- [1] WANDERS N , PAN M , WOOD E F. Correction of real-time satellite precipitation with multi-sensor satellite observations of land surface variables[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 160: 206-221. DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.016.
- [2] 周秋文,李芳. TRMM 降雨数据在喀斯特地区的适用

- 性分析——以贵州省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 79-86. (ZHOU Q W, LI F. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in Karst region: a case study in Guizhou Province, China[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(2): 79-86. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2018. 02. 13.
- [3] JAVANMARD S, YATAGAI A, NODZU M I, et al. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran[J]. Advances in Geosciences, 2010, 25(25): 119-125. DOI: 10. 5194/adgeo-25-119-2010.
- [4] NEW M, TODD M, HULME M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(15): 1889-1922. DOI: 10. 1002/joc. 680.
- [5] 郝振纯, 童凯, 张磊磊, 等. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. 水文, 2011, 31(5): 18-23. (HAO Z C, TONG K, ZHANG L L, et al. Applicability analysis of TRMM precipitation estimates in Tibetan Plateau[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 18-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2011. 05. 004.
- [6] 胡庆芳. 基于多源信息的降水空间估计及其水文应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. (HU Q F. Rainfall spatial estimation using multi-source information and its hydrological application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese))
- [7] 郭妍. 陕西省 TRMM 降水数据反演精度的时空分布特征研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2017. (GUO Y. Spatial & time distribution characteristics of retrieval accuracy on trmm precipitation data in Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese))
- [8] 张利平, 张晓琳, 王任超, 等. 雷达估算降雨的同化方法对比[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(2): 146-150. (ZHANG L P, ZHANG X L, WANG R C, et al. The compare research of the rainfall data assimilation methods based on the radar[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2): 146-150. (in Chinese)) DOI: 1671-8844(2011)02-0146-05.
- [9] 王璐. 基于 En-KF 的土壤水分多源遥感数据同化[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015. (WANG L. Data assimilation on soil moisture content based on multi-source remote sensing and Ensemble Kalman Filter[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015. (in Chinese))
- [10] 王泽人, 马荣华, 段洪涛, 等. 基于集合卡尔曼滤波的太湖叶绿素 a 浓度同化试验系统设计与实现[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(5): 628-636. (WANG Z R, MA R H, DUAN H T, et al. Design and implementation of an experimental data assimilation system for chlorophyll-a in Lake Taihu based on the ensemble Kalman filter[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(5): 628-636. (in Chinese)) DOI: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2013. 05. 009.
- [11] 陈浩, 樊风雷. 基于集合卡尔曼滤波的南雄烟草 LAI 数据同化研究[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3046-3054. (CHEN H, FAN F L. Data assimilation for leaf area index of tobacco on the basis of the ensemble Kalman filter in Nanxiong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3046-3054. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201601200135.
- [12] LARSEN J, HØYER J L, SHE J. Validation of a hybrid optimal interpolation and Kalman filter scheme for sea surface temperature assimilation[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 65(1-4): 122-133. DOI: 10. 1016/j. jmarsys. 2005. 09. 013.
- [13] 刘硕. TRMM 卫星与地面雨量站网的降水数据融合及其水文模拟应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. (LIU S. Precipitation data fusion and its application in hydrological simulation of TRMM satellite and ground rainfall network[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese))
- [14] 徐淑琴, 丁星臣, 王斌, 等. 遥感降水量产品寒区精度评估与径流模拟适用性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 294-304. (XU S Q, DING X C, WANG B, et al. Accuracy evaluation of multisatellite remote sensing precipitation products in alpine region and its applicability to runoff simulation[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 294-304. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 11. 035.
- [15] 高瑞, 穆振侠, 彭亮, 等. CFSR、ERA-Interim 再分析降水数据在高寒山区径流模拟中的适用性[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 8-12. (GAO R, MU Z X, PENG L, et al. Application of CFSR and ERA-Interim reanalysis data in runoff simulation in high cold alpine areas[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(9): 8-12. (in Chinese)) DOI: 1000-7709(2017)09-0008-05.
- [16] 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. (LYU Y, YANG S T, CAI M

- Y, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1414-1425. (in Chinese) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2013. 08. 014.
- [17] 朱仟. 气候变化下降水输入和水文模型参数对水文模拟的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (ZHU Q. Effects of precipitation products and parameters in hydrological model on hydrological simulation under climate change[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [18] 成璐. 融合降水及多种卫星降水产品评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. (CHENG L. Assessment study of merged precipitation and multiple satellite precipitation products[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. (in Chinese))
- [19] 徐高洪, 汪青静. 多卫星遥感降水产品在柬埔寨的应用比较分析[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 74-82. (XU G H, WANG Q J. Application analysis on remote sensing precipitation datasets in Cambodia[J]. Yangtze River, 2018, 49(22): 74-82. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 22. 014.
- [20] 程开宇, 张磊磊, 康颖, 等. 多源卫星降水数据在瓯江流域的适用性分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 15-19. (CHENG K Y, ZHANG L L, KANG Y, et al. Applicability analysis of various satellite-based precipitation in Oujiang basin[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 15-19. (in Chinese)) DOI: 1000-7709(2016)12-0015-05.
- [21] MIAO C. Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[C]// AgU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015. DOI: 10. 1175/JHM-D-14-0174. 1.
- [22] 朱鹤. 面向农业用水管理的土壤含水量多源数据同化方法与应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016. (ZHU H. Study and application of methods of soil moisture content data assimilation using multi-resource data serving for agricultural water use management over irrigation area[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016. (in Chinese))
- [23] 李瑞泽, 张安定, 张华, 等. 多卫星降水产品在环渤海地区的精度评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2916-2924. (LI R Z, ZHANG A D, ZHANG H, et al. Accuracy evaluation of multi-satellite precipitation products over Circum-Bohai-Sea region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2916-2924. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 201609. 035.
- [24] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 174-182. (WANG Z L, ZHONG R D, LAI C G, et al. Evaluation of TRMM 3B42-V7 satellite-based precipitation data product in the Pearl River basin, China: Dongjiang River and Beijiang River basin as examples[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 174-182. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 02. 002.
- [25] 杨雨蒙, 杜鹃, 程琳琳. TRMM 卫星降雨数据在湖南省的精度和可靠性评定[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 26-32. (YANG Y M, DU J, CHENG L L. Evaluation of accuracy and reliability of TRMM satellite precipitation data in Hunan Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(1): 26-32. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2016. 01. 05.