

CMPAS 5 km融合降水产品在老挝南欧江流域的适用性评估

黎成超¹, 刘晓舟¹, 黎文懋¹, 荣 昕¹, 郑春怡¹, 张 冀², 张 超¹

¹云南省气象服务中心, 云南 昆明

²老挝南欧江流域发电有限公司, 老挝 万象

收稿日期: 2024年10月8日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年11月15日

摘要

利用2021~2023年老挝南欧江流域50个观测站实况降水数据, 通过偏差、平均值误差、均方根误差和相关分析等评估指标对5 km三源融合降水进行适用性评估, 得到以下结论: 融合降水能反应全流域站点实况平均降水量的年际变化趋势, 一级~三级西部流域、五级~七级流域融合降水与站点实况降水的空间分布特征一致性较好。一级至四级西南流域以及七级流域融合降水与站点实况降水误差相对较小且相关系数较大, 有一定的参考性, 此外, 融合降水与实况降水相比, 大致呈现东部低估、西部高估的特征。就整个流域而言, 针对不同降水量等级, 融合降水对雨季降水有所高估, 对干季降水有所低估。分流域、分降水量等级来看, 从一级至七级流域融合降水均对小雨有所高估, 其余量级降水有所低估, 此外, 随降水量等级的增大, 融合降水误差越大, 低估越明显。

关键词

老挝, 南欧江流域, 融合降水, 适用性, 评估

Applicability Evaluation of CMPAS 5 km Precipitation Merged Products in Nam Ou River Basin of Laos

Chengchao Li¹, Xiaozhou Liu¹, Wenmao Li¹, Xin Rong¹, Chunyi Zheng¹, Ji Zhang², Chao Zhang¹

¹Meteorological Service Center of Yunnan Province, Kunming Yunnan

²Laos Nam Ngam Hydropower Company Limited, Vientiane, Laos

Received: Oct. 8th, 2024; accepted: Nov. 8th, 2024; published: Nov. 15th, 2024

Abstract

Based on the observed precipitation data of 50 observation stations in the Nam Ou River Basin of Laos from 2021 to 2023, the applicability of the 5km three-source fusion precipitation was evaluated through the evaluation indexes such as deviation, mean value error, root mean square error and correlation analysis, and the following conclusions were drawn: Fusion precipitation can reflect the interannual trend of mean observed precipitation in the whole basin. the spatial distribution characteristics of fusion precipitation and observed precipitation in the western basin of first to third grade, and fifth to seventh grade were in good agreement. The error between the fusion precipitation and the observed precipitation at the station is relatively small and the correlation coefficient is large in the first to fourth grade of southwest basin and the seventh basin, which had a certain reference. In addition, compared with the actual precipitation, the fusion precipitation is generally underestimated in the east and overestimated in the west. For the whole basin, according to different precipitation levels, the fusion precipitation overestimates the precipitation in the rainy season and underestimates the precipitation in the dry season. From the point of view of watershed and precipitation level, light rain is overestimated for the fusion precipitation of the first to the seventh basin, and the other basins of precipitation are underestimated. In addition, with the increase of precipitation level, the greater the fusion precipitation error, the more obvious the underestimation.

Keywords

Laos, Nam Ou River Basin, CMPAS, Applicability, Evaluation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

老挝南欧江是湄公河在老挝北部的最大支流，发源于中国云南江城与老挝北部丰沙里接壤地区，是老挝政府极力推进开发的水能资源基地之一。南欧江梯级水电项目，是中国电建在海外首个全流域整体规划、BOT 投资开发的项目，也是践行一带一路倡议、实施澜湄合作的重点工程。截至 2022 年 7 月，南欧江梯级水电站累计发电已突破 100 亿千瓦时，保障了老挝全国 12% 的电力供应，成为了老挝大型清洁能源项目[1]-[3]。

客观简便且准确地掌握降水量的变化，为流域水文模型参数率定及水文预报工作提供较好的数据输入基础，对于提高梯级电站水文预报精度具有重要意义[3]。南欧江为典型山区河流，全流域面积 2.6 万平方公里，全年降雨极不均匀，针对流域面积大而观测站点相对较少，无法获取整个流域精准的降水情况的现状，气象网格实况的应用可以较好的解决这一难题。高时空分辨率和高精度的多源融合实况产品利用多源数据融合技术，将观测场(多源地面站点观测资料)与背景场(卫星、雷达)数据相融合，可准确合理地反映降水的时空分布，实现山区网格数据连续性覆盖，在天气气候监测、气候变化研究、模式检验及水文预报领域得到了广泛应用[4]-[8]。

近年来，许多学者开展了多源实况融合分析产品在一些流域实际应用中的适用性评估。许冠宇等[9]挑选长江流域的 8 次大范围降水过程，对国家信息中心二源降水融合产品和多源降水融合产品进行适用性评估，结果表明：降水融合产品对长江流域降水的估算结果较实况数值偏小，降水量级越大估算误差

也越大。李显风[10]利用江西省水文站观测降水数据,对中国国家气象信息中心研制的融合降水产品与卫星降水产品进行对比评估表明:融合降水和卫星降水均能较好地反映年内小时降水的变化趋势,与水文站观测降水相比,四套降水资料均存在一定程度低估,其中卫星降水产品低估较大。

综上所述,融合降水产品在强降水过程的定量检测中有明显优势,但以往研究多着眼于国内,而融合降水产品在国外地区的相关研究较为欠缺。多源融合降水分析产品在国外老挝南欧江流域的适用性如何?本文拟将对融合降水产品在老挝南欧江流域的时空误差分布特征进行分析研究,评估其对流域降水的监测能力,为准确掌握该产品在老挝南欧江流域的适用情况和进一步改进境外地区降水融合技术提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本文使用的降水数据包括 CMPAS (China Meteorological Administration Multisource Precipitation Analysis)融合实况产品和老挝南欧江流域(19.8~22.8°N, 101.0~103.6°E) 50 个雨量站观测数据。其中,检验的 CMPAS 融合实况产品为三源融合降水实况分析产品(以下简称融合降水),时间段为 2021 年 1 月 29 日至 2023 年 12 月 31 日(数据源自云南省气象大数据云平台“天擎”,从 2021 年 1 月 29 日开始存储数据),空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。CMPAS 是国家气象信息中心研发的一套多源融合降水实况分析产品,三源融合降水融合实况分析产品在二源融合技术的基础上,利用地面降水观测资料、雷达定量估测降水数据和卫星反演降水数据,采用偏差订正、融合分析等关键技术研制而成。该产品覆盖区域(0~60°N, 70~140°E),经过 2380 个国家级自动站的独立样本检验表明,三源融合降水的精度优于任何单一来源的降水产品,同时也要优于二源融合降水产品。[11]-[13]。

2.2. 方法

将 50 个老挝南欧江流域雨量观测站资料以及融合降水数据进行缺测数据的剔除以及质量控制,将处理后的融合实况产品双线性插值到对应的观测站点上,参考中国气象局《实况分析产品质量评估规范(2019 版)》,统计并比较两者的偏差(BIAS)、平均值误差(ME)、均方根误差(RMSE)、相关关系(COR)等评估指标。计算公式如下:

偏差(BIAS):

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

平均值误差(ME):

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

均方根误差(RMSE):

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

相关系数(COR):

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

其中, O_i 为站点观测值, G_i 为实况格点分析产品插值到检验站点得到的数值, N 为参与检验的总样本数(站次数)。

3. 流域融合降水评估

3.1. 融合降水误差空间分布

南欧江流域地势由北向南逐渐降低, 但降幅不大, 平均高程西部高于东部, 东部高于北部, 南部最低, 流域由南向北分别为一级至七级水电站, 其中七级水电站为龙头水库, 具有多年调节能力; 五级、六级水电站调节性能达到季调节, 其余梯级调节性能较差, 均只有日调节能力[2], 因此, 本文主要分析融合降水与实测降水日数据的误差评估。

通过分析 2021~2023 年南欧江流域站点实况降水与融合降水的空间分布得知(图 1), 2021~2023 年站点实况平均降水量最大出现在 2022 年, 最少出现在 2023 年, 对应时段的融合降水也反映了此趋势特征, 但 2022~2023 年, 站点实况降水与融合降水量相差较 2021 年大, 相差 230 mm 左右。从空间分布上看, 2021 年, 融合降水大致能反映出一级~三级流域东多西少, 北部七级流域较多等特征; 2022 年, 融合降水能大致反应从五级~七级较多的特征, 但二级~四级较多的特征未能体现, 且相差较大; 2023 年, 融合降水能反映东多西少、北多南少的特征。总体来说, 融合降水在一级~三级西部流域、五级~七级流域与站点实况降水量的空间分布特征一致性较好。

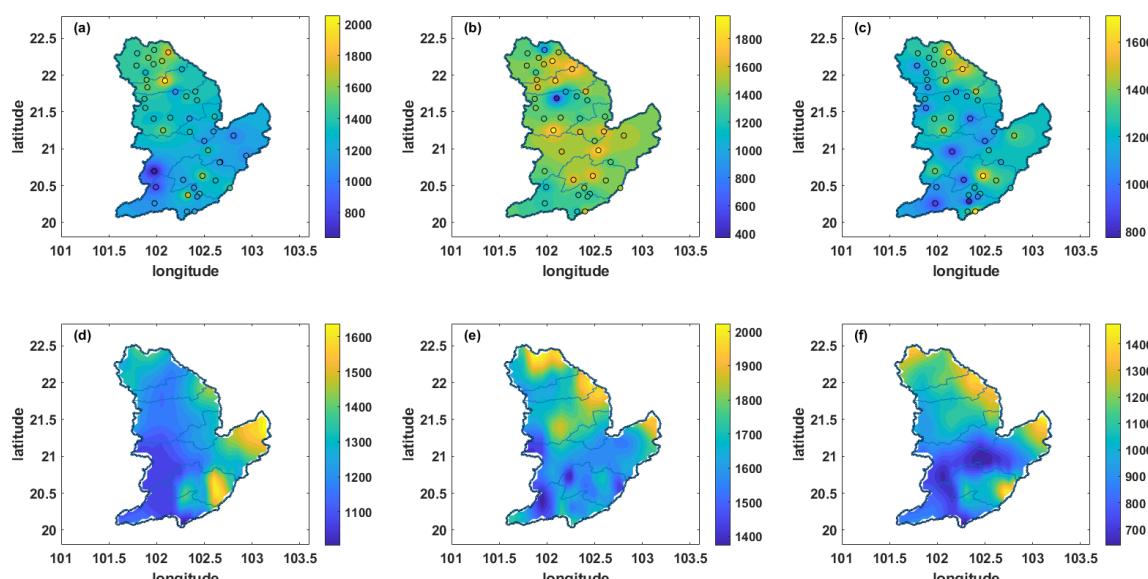


Figure 1. Spatial distribution of CMPAS (a) (b) (c) and station observation precipitation (d) (e) (f) from 2021 to 2023 (a) (d): 2021, (b) (e): 2022, (c) (f): 2023

图 1. 2021~2023 年站点实况降水(a) (b) (c)与融合降水量空间(d) (e) (f)分布(a) (d): 2021 年, (b) (e): 2022 年, (c) (f): 2023 年

表 1 为南欧江一级至七级流域融合降水与实测降水偏差(BIAS)、平均值误差(ME)、均方根误差(RMSE)以及相关系数(COR)的计算结果, 由表可知, 南欧江流域一级至七级流域 BIAS 在 0.95~1.10, 二级、三级、七级更接近 1.00。此外, 三级、五级至七级等流域 BIAS < 1.00, 融合降水产品相较于实况降水有所低估, 其中六级流域 BIAS 最小, 为 0.95; 一级、二级、四级流域 BIAS 均 > 1.00, 融合降水产品相较于实况降水有所高估, 四级流域 BIAS 最大, 为 1.10。一级至七级流域 ME 在 -0.21~0.36 mm 之间,

一级、二级和四级流域 ME >0 , 其余流域均 <0 , 其中二级、三级、七级流域 ME 分别为 0.03 mm、-0.03 mm 和 -0.03 mm, 二级、三级、七级流域融合降水较其余流域更为接近实况降水。一级至七级流域 RMSE 在 12.91~13.71 mm 之间, 五级流域 RMSE 最小, 为 12.79 mm。一级至七级流域 COR 在 0.33~0.49 之间, 一级流域 COR 最小, 为 0.33, 四级流域 COR 最大, 为 0.49。

Table 1. Evaluation results of CMPAS and station observation precipitation from grade 1 to 7 of Nam Ou River Basin
表 1. 南欧江一级至七级流域融合降水与站点实况降水各评估指标结果

流域	偏差 BIAS	平均值误差 ME	均方根误差 RMSE	相关系数 COR
一级	1.03	0.09	12.91	0.33
二级	1.01	0.03	12.98	0.38
三级	0.99	-0.03	13.24	0.40
四级	1.10	0.36	13.71	0.49
五级	0.97	-0.11	12.79	0.38
六级	0.95	-0.21	13.56	0.37
七级	0.99	-0.03	13.33	0.45

从不同站点的实况降水和对应的融合降水误差和相关系数的分析得知(图 2), BIAS 接近 1.0 的站点主要分布于西南部海拔较低的一级至四级流域以及北部七级流域, 88%的站点 BIAS 在[0.8, 1.2]区间。融合降水和实况降水 ME 大致东部低估、西部高估的特征, 34%站点平均误差在[-0.2, 0.2]区间, 这些站点同样主要分布在西南部海拔较低一级至四级流域以及北部七级流域。RMSE 误差空间分布大体呈现东部高西部低的特征。融合降水和实况降水 COR 较大的流域主要分布在三级~四级、六级~七级等流域。

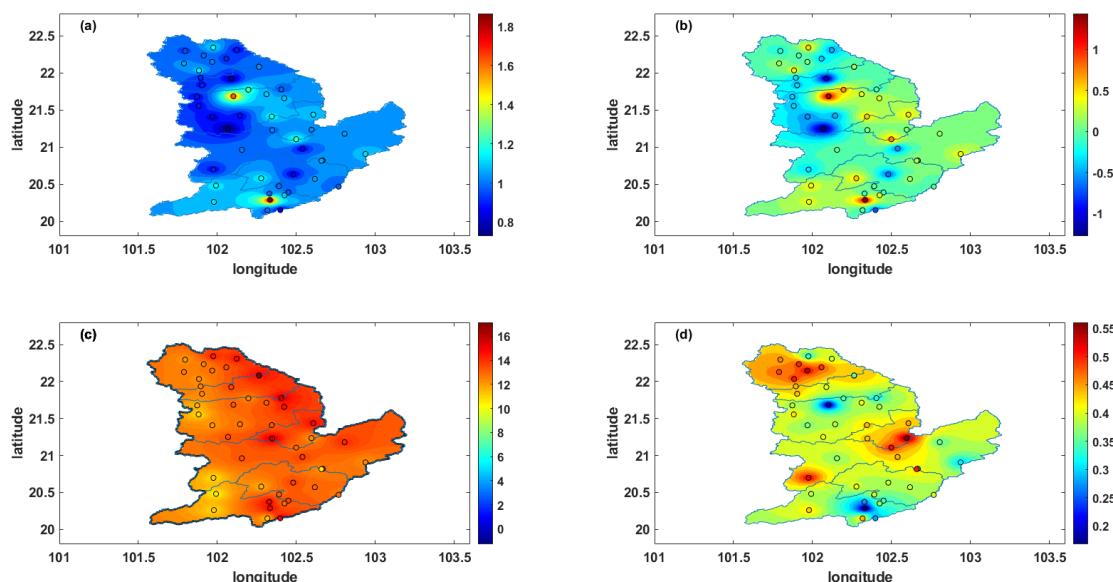


Figure 2. Spatial distribution of error and correlation coefficient between CMPAS and station observation precipitation ((a). BIAS, (b). ME, (c). RMSE, (d). COR)

图 2. 融合降水与站点实况降水误差和相关系数空间分布((a). BIAS, (b). ME, (c). RMSE, (d). COR)

3.2. 融合降水误差月变化

以上分析了融合降水和实况降水的空间误差和相关系数, 现对其月变化进行分析。由图 3 可知, 4~10

月融合降水和实况降水 BIAS 值更接近 1.0，11 月一次年 3 月 BIAS < 1.0 且偏差较大。融合降水和实况降水 ME 随月份波动较大，特别是 6 月和 8 月，ME > 1.9 mm，对实况降水明显高估；干季(11 月一次年 4 月)融合降水和实况降水 ME 除 4 月外，其余月份均 < 0，对实况降水有所低估。融合降水和实况降水 RMSE 在雨季(5~10 月)值较大，RMSE > 9.60 mm，其中 8 月 RMSE 值最大，为 25.75 mm；干季 RMSE 值整体较雨季小，其中 12 月 RMSE 值最小，为 3.64 mm。融合降水和实况降水 COR 在干季值较大，在雨季 COR 值相对较小，其中，COR 最大出现在 2 月，为 0.65，最小出现在 4 月，为 0.29。

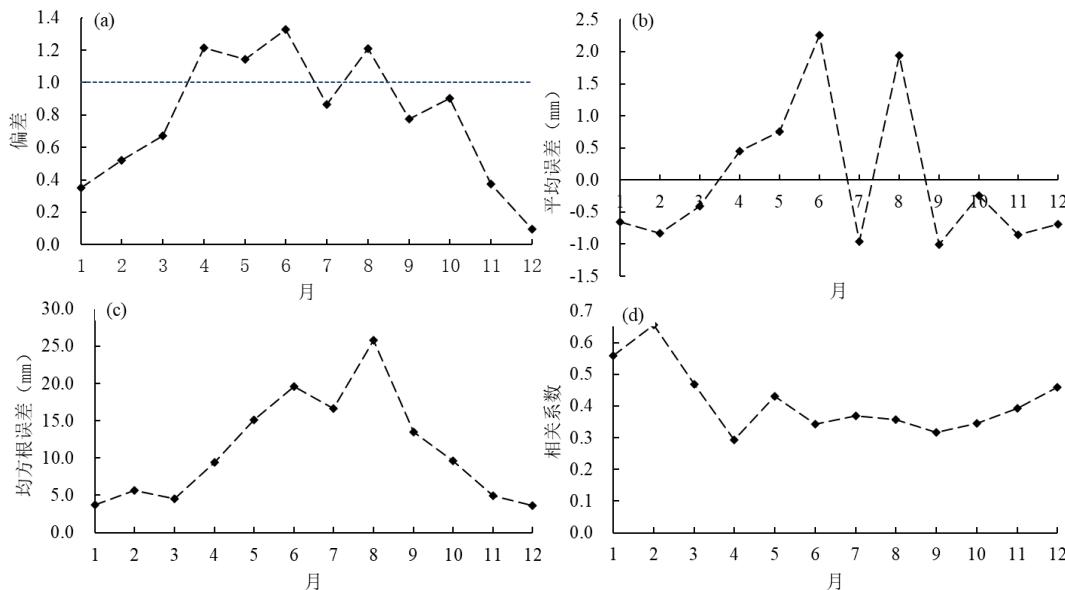


Figure 3. The monthly variation of the error and correlation coefficient between CMPAS and station observation precipitation ((a). BIAS, (b). ME, (c). RMSE, (d). COR)

图 3. 融合降水与站点实况降水误差和相关系数的逐月变化((a). BIAS, (b). ME, (c). RMSE, (d). COR)

4. 分量级的融合降水评估

4.1. 分量级融合降水误差分析

为进一步评估融合降水在老挝南欧江流域强降水过程的适用性，本节对不同降水量级的融合降水与实况降水误差进行了分析研究。将日降水量划分为 5 个等级，即小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)、大暴雨(≥ 100.0 mm)。

由表 2 可知，融合降水和实况降水 BIAS 对小雨有所高估，其余量级降水有所低估，随降水量等级的增加 BIAS 逐渐减小，低估越明显；中雨量级降水 BIAS 最接近 1.0。融合降水和实况降水 ME 和 BIAS 的特征相似，不同的是小雨量级降水 ME 最接近 0。融合降水和实况降水 RMSE 随降水量等级的增加值越大，小雨量级 RMSE 最小。总的来说，中雨及以上量级降水，各评估指标均表现出随降水量等级的增加融合降水表现效果越差的特征，其中小雨量级的评估效果优于其余量级降水。

Table 2. Error of CMPAS and station observation precipitation in different precipitation levels
表 2. 不同降水量等级的融合降水与站点实况降水误差

降水量 等级	偏差 BIAS	平均值误差 ME	均方根误差 RMSE
小雨	1.65	2.11	13.63

续表

中雨	0.81	-2.93	24.40
大雨	0.67	-11.41	35.98
暴雨	0.43	-36.50	49.16
大暴雨	0.38	-85.84	105.64

对融合降水和实况降水分降水量等级进行误差逐月变化分析,由图4可知,在整个流域范围内,4~10月小雨的BIAS>1,融合降水对该时段小雨量级实况降水有所高估,其余月份BIAS<1,有所低估,小雨量级BIAS在9月份最接近1,表现最好;对于中雨,在6月、8月融合降水有所高估,其余月份均有所低估,中雨量级BIAS在6月份表现最好;而对于大雨、暴雨及大暴雨,融合降水均低估了实况降水,大雨、暴雨及大暴雨BIAS分别在8月、2月和5月表现最好;随着降水量级的增大,偏差趋于减小并小于1,表明降水量越大,融合降水越低估实测降水。各月小雨量级降水的ME在-2.89 mm(12月)~5.49 mm(8月),小雨量级ME在9月份最接近0,表现最好,相较于其余量级降水,小雨量级融合降水表现较好;中雨量级降水的ME在-15.27 mm(12月)~-2.95 mm(8月),中雨量级ME在6月份表现最好;大雨及以上量级,融合降水ME<0,表明大雨及以上降水量级,融合降水均存在低估,对于暴雨和大暴雨低估更明显,大雨、暴雨及大暴雨ME分别在8月、2月和5月表现最好。RMSE对于小雨、中雨和大雨,雨季时段的误差大于干季;暴雨的RMSE峰值出现在6月(58.62 mm),最小出现在1月(37.51 mm),大暴雨的RMSE最大出现在6月(137.96 mm),最小出现在5月(68.61 mm),RMSE反映出随着降水量级的增长而误差增大的趋势。

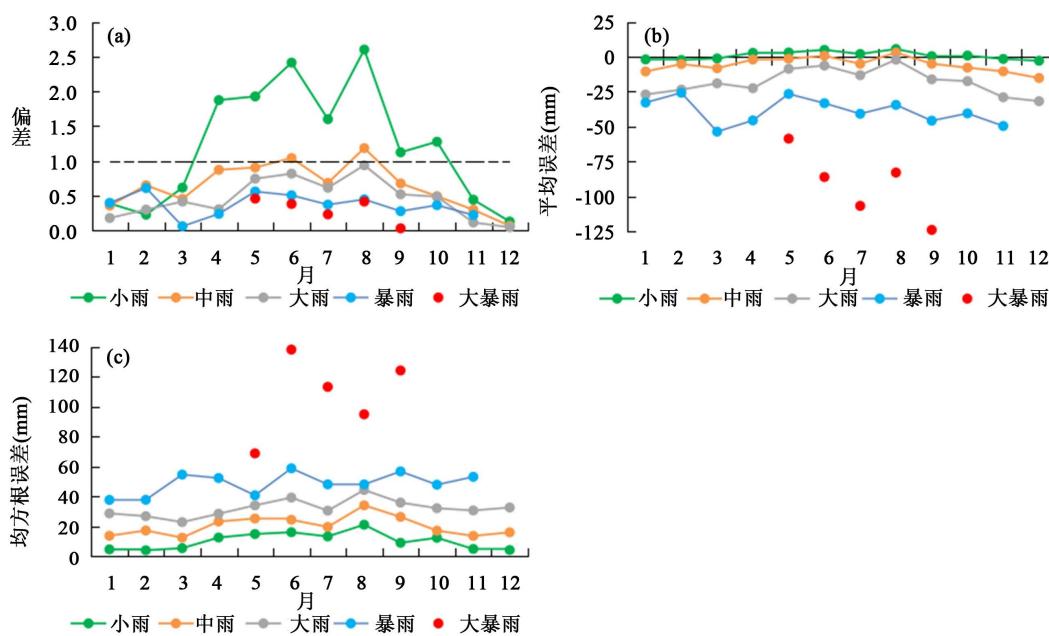


Figure 4. The monthly variation of CMPAS and station observation precipitation errors in different precipitation levels ((a) BIAS, (b) ME, (c) RMSE)

图4. 不同降水量等级的融合降水与站点实况降水误差的逐月变化((a) BIAS, (b) ME, (c) RMSE)

4.2. 分量级、分流域融合降水误差分析

如图5所示为一级至七级流域分流域、分降水量等级的融合降水与实况降水间的误差分析,由图可

知, 南欧江流域七个流域段仅小雨的 BIAS > 1, 其余量级降水的 BIAS < 1, 融合降水在各流域段均对小雨量级的降水量有所高估, 对其余量级的降水量有所低估, ME 也体现了相似的特征。各流域段融合降水小雨~大暴雨量级的 ME 最接近 0 值出现的流域分别为: 七级(1.42 mm)、七级(-1.49 mm)、四级(-5.43 mm)、四级(-17.70 mm)、四级(-47.90 mm)。各流域融合降水小雨~大暴雨量级的 RMSE 最小值出现的流域分别为: 七级(10.83 mm)、四级(20.17 mm)、六级(29.00 mm)、五级(44.66 mm)、三级(74.67 mm), 此外从一级~七级流域随着降水量级增大误差越大, 暴雨和大暴雨尤其明显。

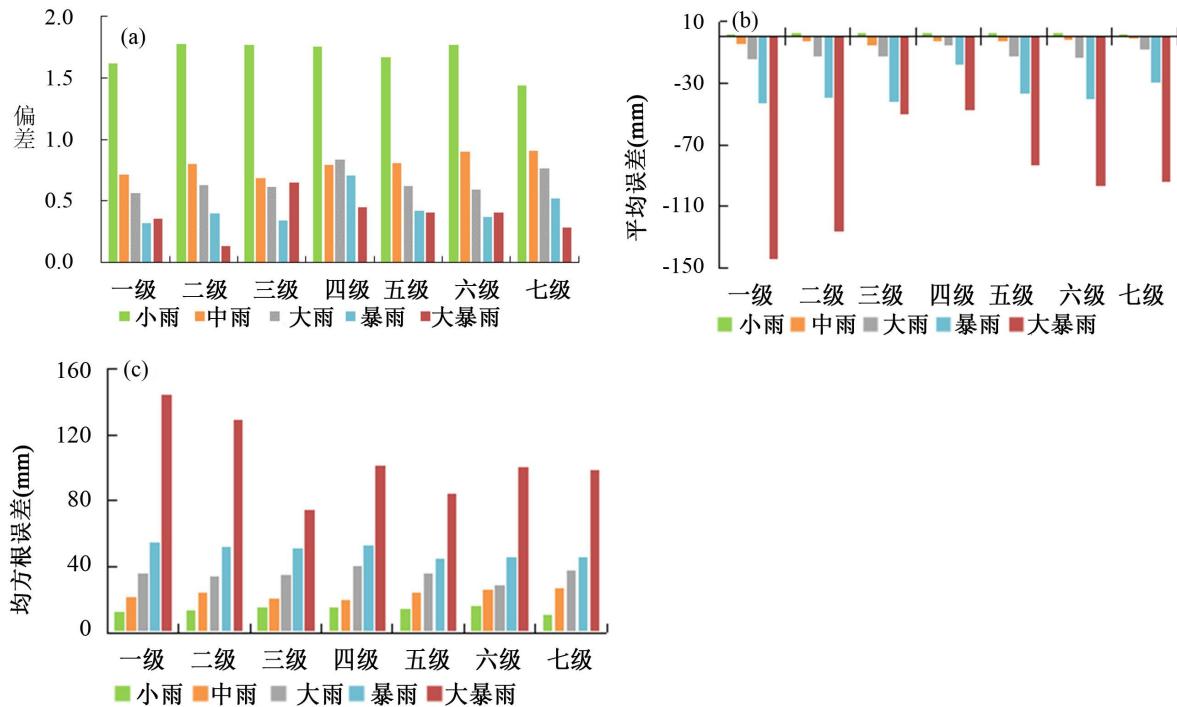


Figure 5. The error of CMPAS and station observation precipitation in different precipitation classes of sub-watershed ((a) BIAS, (b) ME, (c) RMSE)

图 5. 分流域的不同降水量等级的融合降水与站点实况降水误差((a) BIAS, (b) ME, (c) RMSE)

5. 结论

通过对老挝南欧江流域 2021~2023 年站点实况降水和 5 km 三源融合降水产品的适用性研究, 得到以下结论:

- (1) 站点实况平均降水量最大出现在 2022 年, 最少出现在 2023 年, 对应时段的融合降水也反映了此趋势特征, 一级~三级西部流域、五级~七级流域融合降水与站点实况降水的空间分布特征一致性较好。
- (2) 综合各评估指标, 西南部海拔较低的一级至四级流域以及北部七级流域融合降水与站点实况降水误差相对较小且相关系数较大, 有一定的参考性。此外, 融合降水和实况降水大致呈现东部低估、西部高估的特征。
- (3) 针对不同降水量等级, 从年变化来看, 整个流域而言, 融合降水对雨季有所高估, 对干季降水有所低估。综合来说, 雨季时段内, 大雨、暴雨及大暴雨分别在 8 月、5 月和 5 月表现最好。
- (4) 从一级~七级流域, 融合降水和实况降水对各级流域小雨均有所高估, 其余量级降水有所低估; 一级~七级流域随降水量等级的增大, 融合降水误差越大, 低估越明显。

基金项目

云南省气象局青年科技创新团队《大湄公河流域水力资源评估及预测关键技术研究》(2022QN02);
《南欧江流域强对流预报技术及服务产品研发》(YZ202327)。

参考文献

- [1] 见道网. 赋能老挝, 打造东南亚蓄电池! 中国方案在南欧江水电项目中大放异彩[EB/OL]. <https://www.seetao.com/details/233529.html>, 2024-04-16.
- [2] 张毅, 张冀. 数值天气预报在南欧江水情系统中应用[J]. 企业管理, 2020(S1): 249-251.
- [3] 卢鹏, 杨子俊, 余江游, 等. 南欧江流域梯级水电站联合防洪调度研究[J]. 云南水力发电, 2023(12): 313-319.
- [4] 师春香, 潘旸, 谷军霞, 等. 多源气象数据融合合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
- [5] 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 544-553.
- [6] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 177-186.
- [7] 潘旸, 谷军霞, 徐宾, 等. 多源降水数据融合研究及应用进展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 143-152.
- [8] 韩帅, 师春香, 姜志伟, 等. CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-1.0)研发及进展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 102-108, 116.
- [9] 许冠宇, 李琳琳, 田刚, 等. 国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(4): 400-408.
- [10] 李显风, 周自江, 李志鹏, 等. 基于江西省水文资料对中国融合降水产品的质量评估[J]. 气象, 2017, 43(12): 1534-1546.
- [11] 龙柯吉, 师春香, 韩帅, 等. 中国区域高分辨率温度实况融合合格点分析产品质量评估[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 67-74.
- [12] 潘旸, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 755-766.
- [13] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 177-186.