

顾家辉, 郭家力, 李颖, 等. 降水产品偏差校正方法在长江子流域应用效果[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 319-330. GU J H, GUO J L, LI Y, et al. Application effect of precipitation product deviation correction method in the Yangtze River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 319-330. (in Chinese)

降水产品偏差校正方法在长江子流域应用效果

顾家辉^{1,2,3}, 郭家力^{1,2,3,4}, 李颖^{1,2,3}, Shan-e-hyder SOOMRO^{2,3}, 程雄^{1,2}, 李英海^{1,2,3}

(1. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学水资源信息化研究所, 湖北 宜昌 443002; 4. 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室(中国长江电力股份有限公司), 湖北 宜昌 443133)

摘要: 降水产品的精度受到多种因素的影响, 相对于地面站点观测降水表现出不同程度的偏差, 需在实际应用前进行偏差校正并评估其适用性。为探寻适用于不同降水产品在长江流域不同区域内的偏差校正方法, 评估 CMFD、MSWEP 和 ERA5-Land 这 3 种降水产品在长江流域内 3 个气候、地形和面积有较大差异的子流域内的适用性, 并在此基础上对比使用 3 类 7 种方法对日尺度降水值进行偏差校正。结果表明: 校正后的降水产品的适用性得到了不同程度的提升, 而局部强度缩放与三伽玛分布结合校正法在 3 种降水产品和 3 个子流域的校正效果均为最优。校正方法的校正幅度与降水产品在研究区域的适用性存在反相关关系, 产品的适用性越差, 精度评价指标的改进幅度越明显。研究结果可为后期不同降水产品在长江流域不同子流域的准确应用提供可参考的校正方法。

关键词: 偏差校正; 降水产品; 长江流域; 精度评价指标

中图分类号: TV125 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0034

降水作为水循环过程中的关键环节, 在时空分布的不均匀与不稳定将直接引起洪涝、旱灾等自然灾害。高精度的降水数据不仅有助于水文、气象以及农业等学科的研究, 而且能够有效地预防洪涝等自然灾害^[1]。目前, 站点观测虽然是最直接、最精准获取降水的方式, 但因地面站点分布不均匀, 往往不能较好地反映降水的空间分布。具有高分辨率、连续时空分布且较容易获取的降水产品在一定程度上弥补了地面站点的不足, 并在流域水文模拟、极端降水预测等方面得到广泛应用。然而, 其精度受到云层性质、卫星传感器性能以及反演算法等的影响^[2], 往往表现出不同程度的偏差, 需在使用前进行适用性评估以验证其可靠性。

杜懿等^[3]研究表明, 对于表现不够理想的降水产品进行适当的后处理可以有效提高其适用性。偏差校正是最主要的后处理手段, 其核心是选择合

适的统计学方法, 以此来降低降水产品值与观测值之间的偏差^[4]。当下国内外常用的降水产品校正方法有线性缩合法、局部强度缩合法、参数转换法以及伽玛分布校正法等^[5-8], 通常从雨天发生的频率、降水量或者降水序列分布形状等角度对降水产品偏差进行校正^[9-11]。但现有研究大多局限于偏差校正方法对降水产品在特定区域内的应用效果分析, 鲜有探讨偏差校正方法对不同产品在不同区域是否具备同样的适用性。

为探寻适用于不同降水产品在长江流域不同区域的偏差校正方法, 依据研究区域内地面气象站在 1979—2018 年的逐日降水量观测数据, 对 CMFD、MSWEP 和 ERA5-Land 这 3 种降水产品在长江流域 3 个子流域的适用性进行评估, 并在此基础上对比使用 3 类 7 种方法对降水产品进行偏差校正, 选用描述探测能力、误差大小、拟合程度和综合

收稿日期: 2023-09-26 修回日期: 2023-12-03 网络出版时间: 2024-03-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240321.1137.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179018); 国家重点研发计划项目(2022YFC3203902-3); 湖北省自然科学基金项目(2022CFB785); 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室(中国长江电力股份有限公司)开放基金项目(242202000903); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2021889/KY)

作者简介: 顾家辉(1999—), 男, 江苏高邮人, 主要从事水文气象耦合研究。E-mail: 2246675160@qq.com

通信作者: 郭家力(1984—), 男, 湖北孝感人, 副教授, 博士, 主要从事水文模型及水文气象耦合研究。E-mail: Jiali.guo@ctgu.edu.cn

评价的 9 个评价指标对适用性和校正效果进行分析评估,以期对长江流域不同区域内降水产品的准确应用提供科学合理的偏差校正方法。

1 研究区概况

1.1 研究区域

长江流域干流全长约 6 300 km,总面积达 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$,为中国第一大流域。长江流域东西跨度大,地势起伏明显。综合考虑流域位置和面积、气候条件、站点密度等因素,选择长江上游的雅砻江流域(流域面积 $131\,331 \text{ km}^2$ 、多年平均降水量 740 mm、站点密度 $13\,133 \text{ km}^2/\text{站}$)、中游的清江流域(流域面积 $17\,140 \text{ km}^2$ 、多年平均降水量 1 394 mm、站点密度 $4\,285 \text{ km}^2/\text{站}$)以及下游的博阳河流域(流域面积 617 km^2 、多年平均降水量 1 434 mm、站点密度 $88 \text{ km}^2/\text{站}$)作为代表区域,以此探究偏差校正方法在不同区域的校正效果。研究区域站点基本信息见表 1。

表 1 站点基本信息

Tab. 1 Basic information of meteorological stations

流域名称	流域面积/ km^2	站点密度/ $(\text{站} \cdot \text{km}^{-2})$	站点	高程 /m	年均降水 /mm
博阳河	617	88	钟村	387	1 508
			幸福	81	1 436
			李树桥	62	1 400
			竹林下	79	1 446
			枣树李	141	1 442
			山脚下陈	330	1 401
			梓枋	35	1 452
清江	17 140	4 285	利川	1 091	1 302
			建始	567	1 437
			恩施	435	1 443
			五峰	689	1 362
雅砻江	131 331	13 133	清水河	4 429	527
			石渠	4 542	589
			甘孜	3 485	663
			道孚	3 643	635
			新龙	4 094	642
			理塘	3 973	753
			木里	4 393	821
			九龙	3 630	923
			盐源	2 598	813
			西昌	1 534	1 021

1.2 研究数据

随着卫星遥感技术的进步以及反演算法的应用,具有高分辨率、连续时空分布且较容易获取的降水产品飞速发展,常见的降水产品有 MSWEP、TRMM 3B42、CMORPH、PERSIAN-CDR、GSMaP、CHIRPS、SM2RAIN、ERA5、ERA-Interim、MERRA2 和 CMFD 等。在综合考虑时空分辨率、数据年限以及数据获取难易程度的前提下,选择 CMFD、MSWEP 和 ERA5-Land 校正数据,并与地面站点观测数据进行比较,以此探究偏差校正方法对不同降水产品的应用效果。

地面站点观测数据:使用 1979—2018 年国家基准气象站的地面观测逐日降水数据以及收集到的水文年鉴数据作为基准数据,用于评价降水产品的精度。各子流域的降水站点基本属性数据见表 1。

CMFD 再分析数据:时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,使用的是 1979—2018 年的降水率数据,并处理成日值数据。

MSWEP 再分析数据:空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,具有 1979 年实时 3 h 的数据,使用的是 1979—2018 的 3 h 降水数据并整理成日值降水数据。

ERA5-Land 再分析数据:时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,数据长度为 1950 年至今,使用的是 1979—2018 的 1 h 降水数据并整理成日值降水数据。

地面站点观测数据的时间为 UTC+8 时间,CMFD 再分析数据、MSWEP 再分析数据和 ERA5-Land 再分析数据的时间均为 UTC 时间,为保持一致,将地面站点观测数据转化为 UTC 时间,故本文中时间均为 UTC 时间。

2 校正方法及评价指标

2.1 校正方法

基于降尺度方法提取降水产品在站点位置上的降水数据,根据降水时间序列的数据属性^[12-16],采用 3 类方法包括基于降水序列的时间特性、降水序列的分布特性以及降水序列的时间和分布特性进行偏差纠正。采用的基于时间特性的偏差校正方法^[17]为:线性缩放法(linear scaling, LS)、局部强度缩放法(local intensity scaling, LOCI)以及参数转换法(parameter transformation, PT)。根据参数计算方法的不同,参数转换法又分为线性参数转换法(linear parameter transformation, LPT)和幂函数参数转换法

(power-function parameter transformation, PPT)。

分布映射法(distribution mapping, DM)是一种基于降雨序列符合某种理论概率分布函数的假定的校正方法。现有研究表明,伽玛分布与降雨序列分布特征具有高度符合度,故选择的基于分布特性的偏差校正方法为单伽玛分布校正法(single gamma, SG)以及三伽玛分布校正法(three gamma, TG)。与常规三伽玛分布校正法不同的是,使用的三伽玛分布校正法引入分位点寻优模块,即在校正前对站点观测降水按降水量大小进行升序,得到一个新的时间序列并使降水产品降水按此时间序列进行排序,令站点观测降水为零而降水产品降水不为零的降水产品降水归零,以此消除降水产品的误报部分,区别于固定降水序列的极小值和极大值分位点,采用逐步逼近寻优的方法,通过改变极小值和极大值分位点的大小来寻找最优的校正效果。见公式(1)~(3)。

$$P_{cor}(i) = F_o^{-1}(F_m(P_{mod}(i)|\alpha_{1,m},\beta_{1,m})|\alpha_{1,o},\beta_{1,o}), \quad (1)$$

$$P_{mod}(i) < P_{mod,min}$$

$$P_{cor}(i) = F_o^{-1}(F_m(P_{mod}(i)|\alpha_{2,m},\beta_{2,m})|\alpha_{2,o},\beta_{2,o}), \quad (2)$$

$$P_{mod,min} \leq P_{mod}(i) < P_{mod,max}$$

$$P_{cor}(i) = F_o^{-1}(F_m(P_{mod}(i)|\alpha_{3,m},\beta_{3,m})|\alpha_{3,o},\beta_{3,o}), \quad (3)$$

$$P_{mod}(i) \geq P_{mod,max}$$

式(1)~(3)中: $P_{mod,min}$ 和 $P_{mod,max}$ 为站点观测降水数据

的极小分位点和极大分位点的值; $\alpha_{1,o}$ 、 $\beta_{1,o}$ 、 $\alpha_{2,o}$ 、 $\beta_{2,o}$ 和 $\alpha_{3,o}$ 、 $\beta_{3,o}$ 分别为站点观测降水数据低于其极小分位点、位于极小分位点和极大分位点之间以及高于极大分位点的参数; $\alpha_{1,m}$ 、 $\beta_{1,m}$ 、 $\alpha_{2,m}$ 、 $\beta_{2,m}$ 和 $\alpha_{3,m}$ 、 $\beta_{3,m}$ 分别为降水产品降水数据低于其极小分位点、位于极小分位点和极大分位点之间以及高于极大分位点的参数。基于杜懿等^[3]在使用分段伽玛分布校正法时以降水序列的10%和90%分位点作为极小值和极大值分位点,假定极小值分位点与极大值分位点之和为1,设置初始极小值分位点为0.01,最终极小值分位点为0.49,取步长为0.01进行逐步寻优。

以上6种校正方法是基于降水序列的时间特性或者分布特性对降水产品进行校正的。基于降水序列的时间特性的校正方法只能校正降水量以及雨天的发生频率,不能对降水产品的分布进行校正,而基于降水序列的分布特性的校正方法虽然能够校正降水量以及时间序列的概率分布,但是无法校正雨天的发生频率。基于这两类校正方法只能对降水产品的单种特性进行校正,且何坤龙等^[12]将伽玛校正法与局部强度缩放法结合对GPM数据进行偏差校正取得较好的应用效果,将LOCI和TG两种方法结合,将经过LOCI法校正后的数据作为TG法的输入数据进行进一步校正。使用3类总共7种校正方法,对应校正方法的概述见表2。

表2 偏差校正方法概述
Tab. 2 Summary of bias correction methods

原理	方法	英文缩写	校正角度
基于时间特性	线性缩放法	LS	降水量
	局部强度缩放法	LOCI	雨天发生的频率及降水量
	线性参数转换法	LPT	雨天发生的频率及降水强度
	幂函数参数转换法	PPT	雨天发生的频率及降水强度
基于分布特性	单伽玛分布校正法	SG	降水量和降水序列分布形状
	三伽玛分布校正法	TG	降水量和降水序列分布形状
基于时间和分布特性	局部强度缩放与三伽玛分布结合校正法	LOCI-TG	雨天发生的频率、降水量和降水序列分布形状

2.2 评价指标

选用探测率 D_{PO} 、误报率 R_{FA} 、成功系数 I_{CS} 、平均绝对误差 E_{MA} 、相对偏差 S_{BIA} 、均方根误差 E_{RMS} 、皮尔逊相关系数 R 和纳什效率系数 E_{NS} 用来表征降水产品的适应性以及偏差校正方法的应用效果。此外,为了综合评价3种降水产品在3个流域内的适应性及校正效果,使用主成分分析法PCA,基于

上述8个评价指标构建一个新的相对综合评价指标: I_{CE} (Comprehensive Evaluation Indicators)。 I_{CE} 为无量纲参数,范围为0~1,越接近于1表明适用性越好。数学表达式为

$$I_{CE} = \sum_{i=1}^n \mu^T X \quad (4)$$

式中: n 为主成分个数; μ 为特征向量; X 为原始数据

矩阵。

根据上述 9 个评价指标的评价角度,将其分为探测评价指标、误差评价指标、过程评价指标以及综合评价指标 4 类。精度评价指标相关描述见表 3。

表 3 精度评价指标描述

Tab. 3 Description of accuracy evaluation indicators

分类	指标	指标含义	最优值
探测评价指标	D_{PO}	降水产品准确捕捉实际降水事件的能力	1
	R_{FA}	降水产品对降水事件的多测误差	0
	I_{CS}	降水产品成功观测到降水事件的比例	1
误差评价指标	E_{MA}/mm	降水产品数据与站点观测数据之间的平均绝对偏差程度	0
	E_{RMS}/mm	降水产品数据与站点观测数据之间的离散程度	0
	$S_{BIA}/%$	降水产品与站点观测数据之间的系统误差大小及相对偏差程度	0
过程评价指标	E_{NS}	降水产品对站点观测数据的拟合程度	1
	R	降水产品与站点观测数据之间的线性相关关系	1
综合评价指标	I_{CE}	综合评价	1

3 结果分析

在综合考虑流域位置、流域面积等因素的情况下,选择长江流域内流域面积、气候条件、站点密度差别较大的 3 个子流域作为研究对象^[18-20],选用目前国际上主流的 3 种降水产品,使用上述 7 种方法

分别校正,并评估校正方法对不同产品在不同流域的应用效果。

为直观地以流域为单位对降水产品适用性以及偏差校正效果进行分析,基于站点观测降水数据和降尺度至站点的降水产品降水数据,使用泰森多边形的方法计算出 3 个研究区域的面年均雨量,并使用同样的方法将各研究区域内的站点评价指标计算成整个流域的评价指标。

3.1 降水产品适用性评估

基于地面气象站点在 1979—2018 年的逐日降水量观测数据,从多年平均降水偏差量方面对 CMFD、MSWEP 和 ERA5-Land 这 3 种降水产品在长江流域子流域内的适用性进行评估,结果见表 4。

由表 4 可见,3 种降水产品对多年平均降水整体上呈高估态势,但程度不尽相同。其中,CMFD 在博阳河流域高估严重,年均降水量高估达到 559 mm,而在清江和雅砻江流域与站点观测的多年平均降水量十分接近,表明 CMFD 对降水量的刻画能力可能随着海拔的升高而增加^[21-23]。郭家力等^[24]研究发现降水产品精度在高海拔地区总体上高于低海拔地区也印证了这一点,也可能是在小区域的应用上由于空间随机性存在一定局限性,具体原因需要进一步深入研究。总体上,MSWEP 的刻画效果最优,在 3 个流域内年均降水量高估均不超过 100 mm; ERA5-Land 在 3 个流域内高估程度严重,特别是在清江和雅砻江流域,年均降水量高估分别为 563 mm 和 467 mm。

表 4 降水产品在研究区域多年平均降水量

Tab. 4 Inter-annual average precipitation of precipitation products for the study areas

流域	站点多年平均降水量/mm	产品	产品多年平均降水量/mm	产品与站点偏差量/mm	偏差量占站点多年平均降水量比例/%
博阳河	1 434	CMFD	1 993	559	38.97
		MSWEP	1 501	67	4.68
		ERA5-Land	1 657	223	15.52
清江	1 394	CMFD	1 407	13	0.93
		MSWEP	1 487	93	6.69
		ERA5-Land	1 957	563	40.38
雅砻江	740	CMFD	743	3	0.36
		MSWEP	782	42	5.67
		ERA5-Land	1 207	467	63.07

为进一步更直观地评估 3 种降水产品在研究区 过程评价指标和综合评价指标来进一步评估, 见 域内的适用性, 使用探测评价指标、误差评价指标、 图 1。

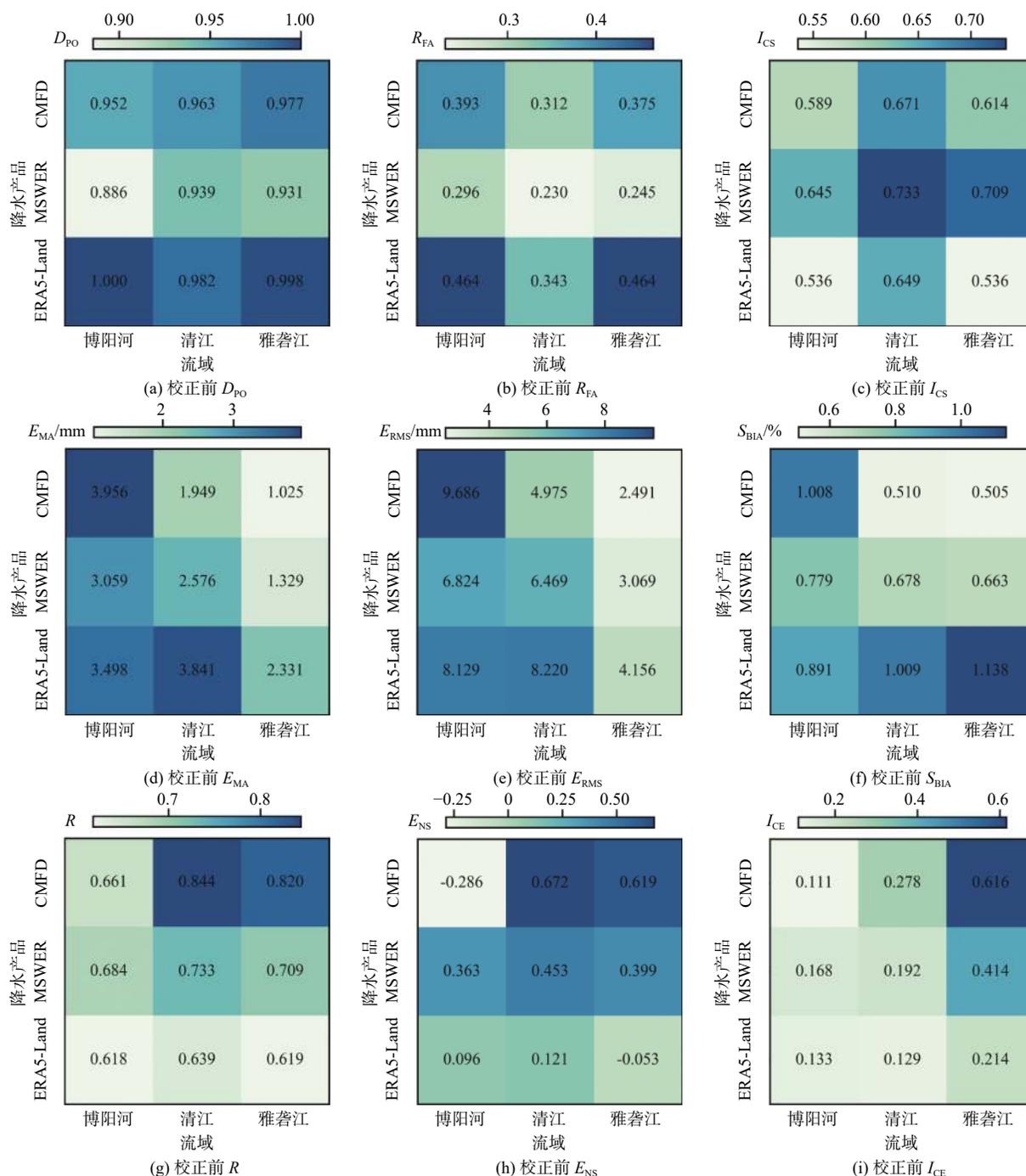


图 1 未校正降水产品对研究区域多年日降水事件评价指标热力图

Fig. 1 Heat map of uncorrected precipitation products for indicators evaluating multi-year daily precipitation events in the study area

从探测评价指标来看, 流域尺度对 D_{PO} 没有影响, 3 种降水产品在 3 个研究区域内都有较高的 D_{PO} 值, 除 MSWEP 在博阳河流域以外, 其余的 D_{PO} 值都超过 0.9, 其中 ERA5-Land 在博阳河流域的 D_{PO} 达到了最优值 1。MSWEP 在清江流域有最小的 R_{FA} 和最高的 I_{CS} 。 D_{PO} 与 R_{FA} 存在正相关关系, 而这二者与 I_{CS} 存在反相关关系, 即 D_{PO} 与 R_{FA} 增大时

I_{CS} 会随之减小。

从误差评价指标来看, CMFD 在雅砻江流域的所有误差指标值均最小, 误差程度最优, E_{MA} 为 1.025 mm, E_{RMS} 为 2.491 mm, S_{BIA} 为 0.505%, 但 CMFD 在博阳河流域表现不佳, E_{MA} 和 E_{RMS} 值高于其他情况, E_{MA} 达到了 3.956 mm, E_{RMS} 达到了 9.686 mm。

从过程评价指标来看: CMFD 在雅砻江流域的

适用性优于其他情况, $R > 0.8$, $E_{NS} > 0.6$; 而 CMFD 在博阳河流域以及 ERA5-Land 在雅砻江流域的 E_{NS} 为负值, 表明其对站点观测降水的模拟程度较差; 相对于其他两种降水产品, ERA5-Land 计算出的指标效果最差, 结合上述 ERA5-Land 对降水存在严重的高估现象, 不建议直接使用。

从综合评价指标来看: CMFD 在雅砻江具有最佳的适用性, 且 I_{CE} 值明显高于其他情况, 表明 CMFD 在高海拔地区具有较高的应用潜力, 但 CMFD 在博阳河流域的适用性最差; 3 种降水产品中, 除 CMFD 在博阳河流域以外, ERA5-Land 在各研究区域的 I_{CE} 值都是最低的, 适用性最差。在清江流域和雅砻江流域, CMFD 的适用性强于 MSWEP, 而在博阳河流域 MSWEP 的适用性强于 CMFD。

3.2 偏差校正效果对比

基于上述不同降水产品在长江流域不同子流域的应用效果, 通过对比线性缩放法(LS)、局部强度缩放法(LOCI)、线性参数转换法(LPT)、幂函数参数转换法(PPT)、单伽玛分布校正法(SG)、三伽玛分布校正法(TG)以及局部强度缩放与三伽玛分布结合校正法(LOCI-TG)3 类 7 种方法对降水产品的

日尺度降水进行偏差校正, 用表 3 中的指标分别从不同角度对校正效果进行评估。

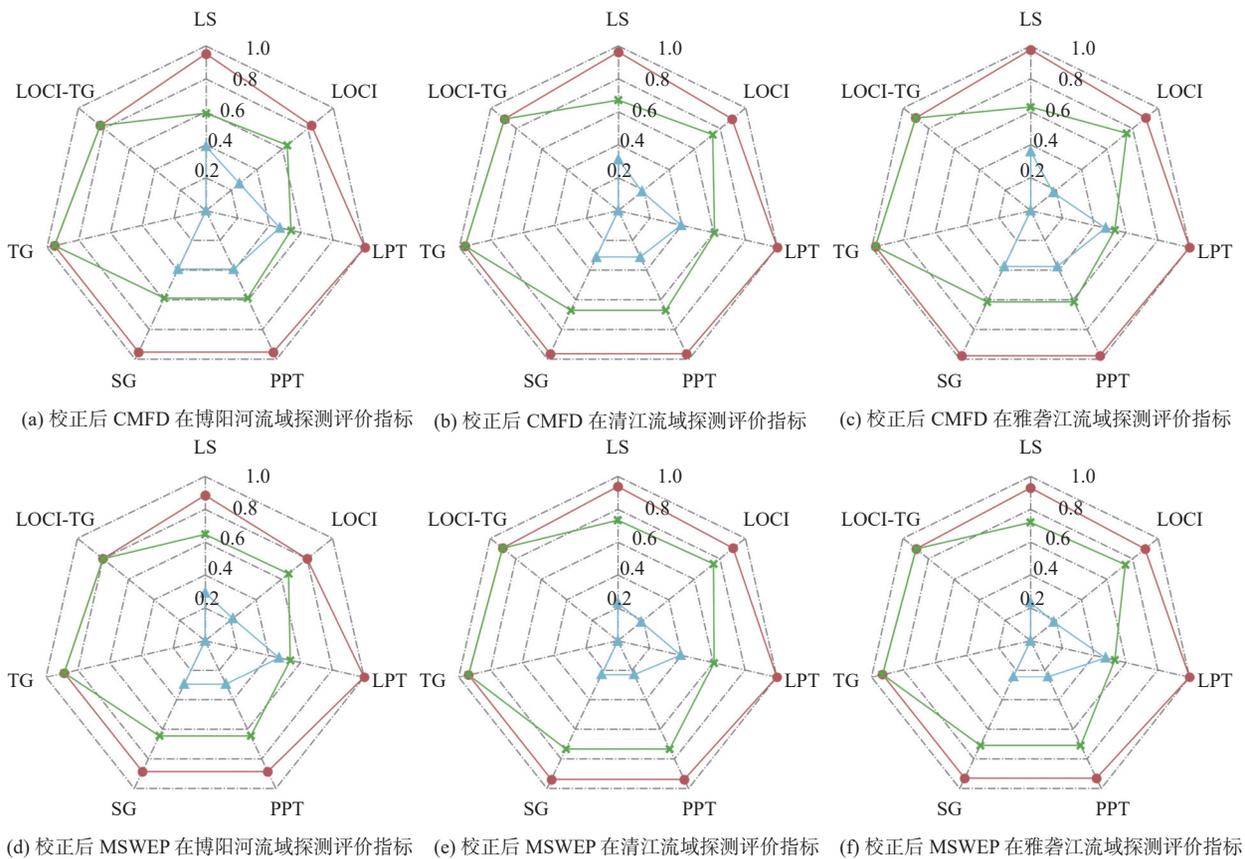
3.2.1 探测指标校正效果

使用雷达图对 D_{PO} 、 R_{FA} 和 I_{CS} 这 3 个探测指标的结果进行展示, 结果见图 2。

从图 2 知, 同一种校正方法对不同降水产品在不同子流域的 D_{PO} 、 R_{FA} 和 I_{CS} 具有相似的校正效果, 而不同的方法表现出的应用效果各异。经 PPT 法以及 SG 法校正后产品的 D_{PO} 、 R_{FA} 和 I_{CS} 没有发生变化; LS 法和 LOCI 法对 D_{PO} 、 R_{FA} 和 I_{CS} 影响不大, 校正后数值变化不明显; TG 法以及 LOCI-TG 法能够消除降水产品的 R_{FA} 并且可以显著提高降水产品的 I_{CS} , 但 LOCI-TG 法会使 D_{PO} 略有下降, 表明使用两种方法结合进行校正时会产生校正过度的问题; 而 LPT 法在将降水产品的 D_{PO} 提升至最优值 1 的同时却提高了 R_{FA} 。对比来看, TG 法对产品的综合探测能力有较好的提升效果, 经过其校正后的降水产品具有最优的探测能力。

3.2.2 误差指标校正效果

使用柱状图对偏差校正方法应用前后误差指标的差异进行分析, 结果见图 3。



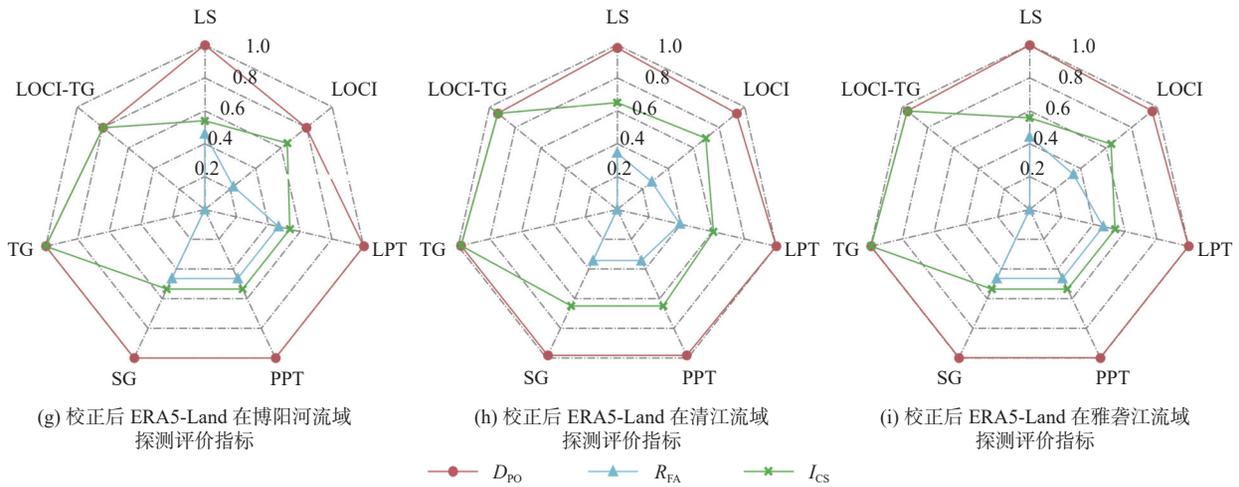


图2 校正后降水产品对研究区域多年日降水事件探测评价指标雷达图

Fig. 2 Radar map of indicators for evaluating the detection of multi-year daily precipitation events in the study area by corrected precipitation products

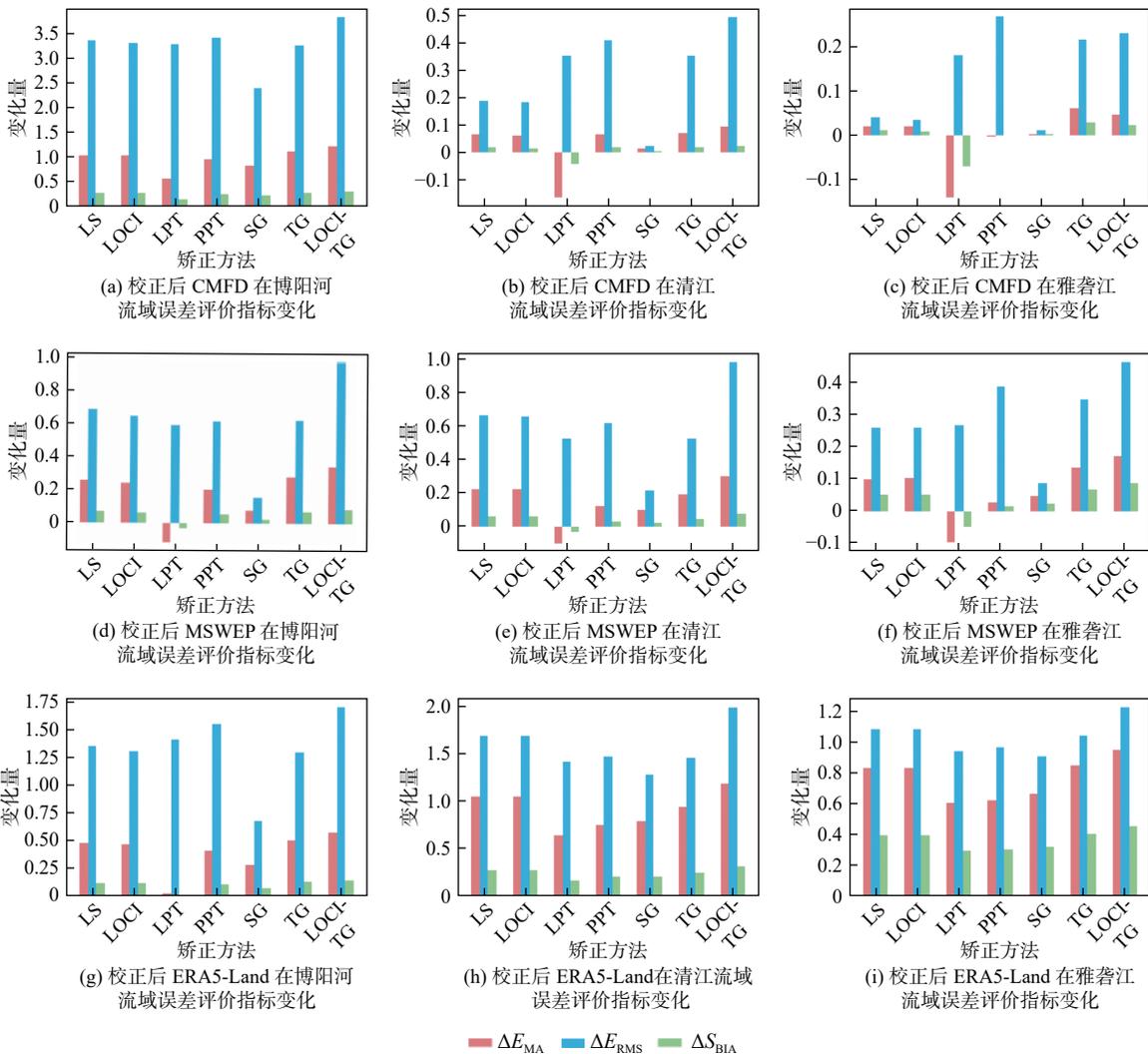


图3 校正后降水产品对研究区域多年日降水事件误差评价指标变化图

Fig. 3 Plot of changes in indicators for evaluating the error of corrected precipitation products for multi-year daily precipitation events in the study area

从子流域和降水产品角度分析偏差校正方法对误差评价指标的应用差异。从子流域角度分析:在博阳河流域,对于同种产品,LOCI-TG法的校正效果最好,对产品的校正效果 $CMFD > ERA5-Land >$

$MSWEP$,且经过 LOCI-TG 法的校正,CMFD 的 E_{RMS} 从 9.686 mm 降低至 5.877 mm,校正幅度超过 3.8 mm,而 MSWEP 经过 LPT 法的校正出现 E_{MA} 和 S_{BIA} 增大的现象,表明该方法对 MSWEP 的校正并

不全面,造成部分误差指标“不降反升”;在清江流域和雅砻江流域,LOCI-TG 法对误差评价指标的降低效果均优于其他方法,对产品的校正效果 ERA5-Land>MSWEP>CMFD, LPT 法对 CMFD 和 MSWEP 均表现 E_{MA} 和 S_{BIA} 增大。

从降水产品角度分析:对于 CMFD, LOCI-TG 法对于误差评价指标在 3 个子流域均表现出最好校正效果,校正幅度博阳河>清江>雅砻江,而 LPT 法对 CMFD 在清江和雅砻江的应用效果不佳,表现出 E_{MA} 和 S_{BIA} 小幅度的增大。此外,SG 法对 CMFD 在清江和雅砻江的校正幅度微弱, E_{RMS} 的变化量小于其他 6 种方法;对于 MSWEP, LOCI-TG 法的应用效果最佳。在同种方法的应用下,MSWEP 在博阳河和清江的校正效果相近,且对误差的校正幅度大于在雅砻江, LPT 法对 MSWEP 在 3 个子流域均表现出 E_{MA} 和 S_{BIA} 增大的现象,该方法对 MSWEP 的校正能力有待进一步研究;对于 ERA5-Land,各方法

在 3 个子流域对日降水事件的误差评价指标均表现出正向的优化,其中 LOCI-TG 法的优化效果最佳。

综合上述对图 3 的分析,对同一降水产品在同一子流域的情况下, LOCI-TG 法对 E_{MA} 、 E_{RMS} 和 S_{BIA} 均表现出最佳的优化的效果。除 LPT 法以外,其余校正方法对 3 种降水产品在各研究区域都能在一定程度上减小 E_{MA} 、 E_{RMS} 和 S_{BIA} ;而 LPT 法对于 3 种降水产品在清江流域以及 MSWEP 和 ERA5-Land 在博阳河流域会出现 E_{MA} 和 S_{BIA} 增大的现象,表明该方法对平均绝对误差和相对偏差的改进能力弱于其他校正方法。结合 3.1 节降水产品适用性评估结果发现,校正幅度与产品的适用性存在反相关关系,产品的适用性越差,误差评价指标的降低效果越明显。

3.2.3 过程和综合指标校正效果

类似地,使用柱状图对偏差校正方法应用前后过程和综合指标的差异进行分析,结果见图 4。

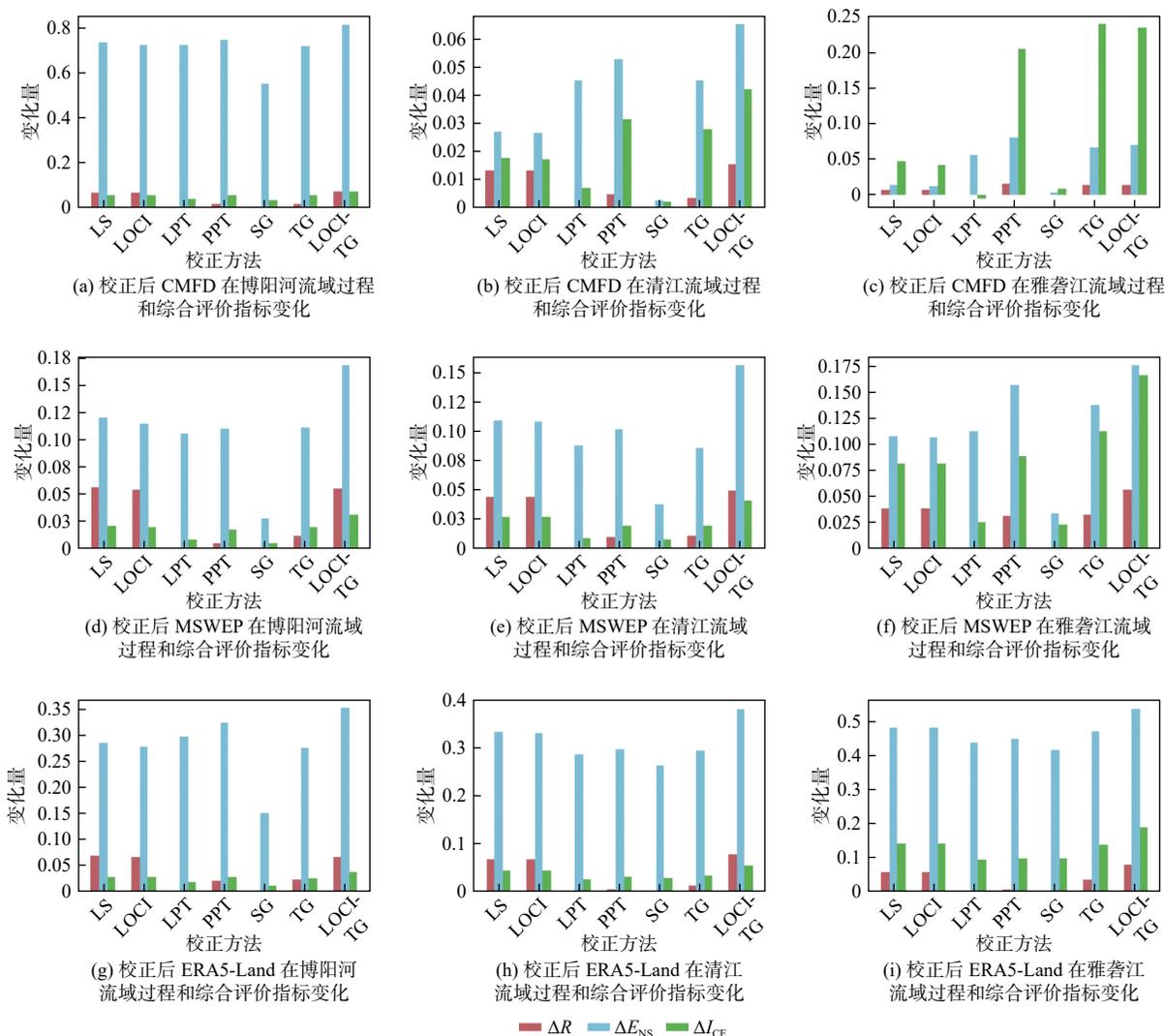


图 4 校正后降水产品对研究区域多年日降水事件过程和综合评价指标变化结果

Fig. 4 Plot of changes in the course of multi-year daily precipitation events and integrated evaluation indicators for the study area by corrected precipitation products

从子流域和降水产品角度分析偏差校正方法对过程评价指标的应用差异。从子流域角度分析:在博阳河流域,对于3种降水产品,各方法对 E_{NS} 的校正幅度明显大于 R 。对于同种产品,LOCI-TG法的校正效果最好,该方法对产品的校正效果 $CMFD > ERA5-Land > MSWEP$,经过LOCI-TG法的校正, $CMFD$ 的 E_{NS} 从 -0.286 提升至 0.528 ,校正幅度超过 0.8 。经过LPT法和SG校正后的降水产品的 R 值不会产生变化。在清江流域,LOCI-TG法对过程评价指标的提升均优于其他方法,对产品的校正效果 $ERA5-Land > MSWEP > CMFD$,且LPT法和SG校正表现出校正后 R 值不变的特性。在雅砻江流域:PPT法、TG法和LOCI-TG法对 $CMFD$ 的校正效果优于其他方法。 $CMFD$ 经LPT法校正后 R 值没有变化,表明该方法对过程评价指标的提升能力较弱。从降水产品角度分析:对于 $CMFD$,LOCI-TG法对于过程评价指标在3个子流域均表现出最好校正效果,校正幅度博阳河 $>$ 雅砻江 $>$ 清江,而LPT法对 $CMFD$ 在雅砻江的应用效果不佳,对 R 无提升效果。对于 $MSWEP$,LOCI-TG法的应用效果最佳。在同种方法的应用下, $MSWEP$ 在博阳河和清江的校正效果相近,LPT法和SG法对 $MSWEP$ 在3个子流域均表现出 R 无变化的现象;对于 $ERA5-Land$,各方法在3个子流域对日降水事件的过程评价指标均表现出正向的优化,其中,LOCI-TG法的优化效果最佳,LPT法和SG法对 R 亦表现出无提升效果。

综合评价指标 CEI 是基于探测、误差以及过程评价指标构建的兼顾多角度的评价指标,其变化反映校正方法对降水产品校正的整体效果。从子流域和降水产品角度分析偏差校正方法对综合评价指标的应用差异。从子流域角度分析:在博阳河流域、清江流域和雅砻江流域,对于同种产品,LOCI-TG法表现出最佳的校正效果,对 CEI 的提升效果最明显,其余方法也表现出不同程度的提升效果。但在雅砻江流域 $CMFD$ 经LPT法校正后 CEI 略有下降,表明该方法不稳定,对综合评价指标的提升能力较弱。从降水产品角度分析:对于 $CMFD$,LOCI-TG法对于综合评价指标在3个子流域均表现出最好校正效果,而LPT法对 $CMFD$ 在雅砻江的应用效果不佳, I_{CE} 小幅度降低。此外,SG法对 $CMFD$ 在清江和雅砻江的校正幅度微弱,校正效果明显弱于其他方法。对于 $MSWEP$,LOCI-TG法的应用效果最佳。在同种方法的应用下, $MSWEP$ 在

博阳河和清江的校正效果相近,且对 I_{CE} 的校正幅度小于在雅砻江。对于 $ERA5-Land$,各方法在3个子流域对日降水事件的综合评价指标均表现出正向的优化,其中LOCI-TG法的优化效果最佳。

综合上述对图4的分析,对同一降水产品在同一子流域的情况下,LOCI-TG法对过程和综合评价指标均表现出最佳效果。LPT法和SG法对 R 没有校正效果,经过这两种方法校正后的降水产品对站点观测数据的线性相关关系不会发生变化。除LPT法对 $CMFD$ 在雅砻江流域的 I_{CE} 略有下降以外,其余情况下,各校正方法对3种降水产品在3个研究区域的 R 和 E_{NS} 都有所提升。同样地,结合3.1节降水产品适用性评估结果发现,校正幅度与产品的适用性存在反相关关系,产品的适用性越差,过程评价指标以及综合评价指标的提升效果越明显。

结合图2至图4,LOCI-TG法对指标的提升能力明显优于其他方法,因为该法同时对降水序列的时间和分布特性进行偏差纠正,SG法的校正能力较弱,因为SG法假定降水产品的降水序列符合单段的伽玛分布,没有考虑降水序列的极小值以及极大值,导致校正效果的不理想。

4 讨论

结合第3节结果分析发现,偏差校正幅度与降水产品本身在研究区域的精度呈反相关关系,偏差校正方法对于精度较差的产品具备更强的校正潜力。已有研究表明,分段三伽玛分布法可以敏锐捕捉降雨极值,兼顾降雨序列的极小值、常规值和极大值的偏差校正的同时校正效果稳健。何坤龙等^[12]将局部强度缩放法和单伽玛分布校正法两种方法结合,结合校正法的校正效果进一步提升,在不同条件下的适用性也更好。基于上述研究,在原有分段三伽玛分布法的基础上引入分位点寻优模块并与局部强度缩放法结合构建了一种新的校正方法:局部强度缩放与三伽玛分布结合校正法(LOCI-TG)并将其应用于降水产品校正。相较于其他偏差校正方法,LOCI-TG法对3种降水产品在3个子流域均表现出最佳的校正效果,该方法不仅校正能力强,而且具备较好的适用性,对于不同特性的降水产品和气候、地形和面积有较大差异的区域都能发挥出良好稳定的性能。

已有研究^[25]发现,因为传感器系统误差以及反演算法不确定性等因素影响,不同降水产品在不同

地区表现出不同程度的偏差。因此,在进行区域应用研究时,偏差校正是至关重要的前提^[12],表现不够理想的降水产品经过偏差校正处理后,适用性会有效提高^[26-28]。所以,降水产品在应用于流域研究之前对其进行适用性评估和偏差校正是必要的。推荐流程如下:首先,获取降水产品并选择评价指标对其进行适用性评估,评价指标的选择取决于产品应用的目的,大致将常用指标分为探测评价指标、误差评价指标、过程评价指标以及综合评价指标 4 类,可根据应用需求自由选择,而上述研究表明 E_{RMS} 和 E_{NS} 这两个指标在偏差校正效果评价时是敏感的,可作为优先选择指标应用于研究之中;其次,对降水产品进行偏差校正,评估 3 类 7 种校正方法的应用效果,发现 LOCI-TG 表现出良好稳定的性能,其应用效果均优于常见的校正方法,且求解简单、操作方便,可作为偏差校正的首选方法;最后,在对不同特性的降水产品进行校正时需要考虑气候、地形和面积等因素选择校正方法和评价指标。

除常见的偏差校正方法以外,数据同化以及数据融合技术亦是提高降水产品质量的有效手段。数据同化是利用真值,如站点观测数据,纠正降水产品的预测偏差;数据融合是通过某种手段,如统计学方法、深度学习等,融合多种降水产品的数值,实现比单种降水产品更接近于真实值的效果。将数据同化以及数据融合技术应用到降水产品质量的提高将是日后研究的重点。

5 结论

基于 1979—2018 年的逐日降水量实测数据,对 CMFD、MSWEP 和 ERA5-Land 3 种降水产品在长江流域 3 个典型子流域的适用性进行评估,并在此基础上对比使用了 3 类 7 种方法对其在日尺度上的降水估计值进行偏差校正,并从探测指标、误差指标、过程和综合指标等方面进行评价,结论如下:

综合分析 7 种校正方法的应用效果: LOCI-TG 法校正效果最好,能够从多方面改善降水产品精度,且校正方法与降水产品类型和研究区域地理位置无明显关系; SG 法的校正能力较弱, LPT 法在部分情况会逆向校正,出现 E_{MA} 和 S_{BIA} 增大的现象; TG 法和 LOCI-TG 法能够消除降水产品的 R_{FA} 并且可以显著提高降水产品的 I_{CS} , 但 LOCI-TG 法产生校正过度问题,使得 D_{PO} 和 I_{CS} 略有下降。

校正方法的校正幅度与降水产品在研究区域的

适用性存在反相关关系,产品的适用性越差,精度评价指标的改进幅度越明显。在清江流域和雅砻江流域这样的大型流域, CMFD 的适用性强于 MSWEP; 而对于博阳河小型流域, MSWEP 的适用性强于 CMFD。从子流域角度分析,博阳河流域的 CMFD 校正幅度最大,而在清江和雅砻江流域, ERA5-Land 的校正幅度大于其余两种降水产品。从降水产品角度分析, CMFD 在博阳河流域的校正效果优于在清江流域和雅砻江流域, MSWEP 在博阳河流域和清江流域的校正幅度相近且大于在雅砻江的校正幅度, ERA5-Land 在清江流域的校正效果优于在博阳河流域和雅砻江流域。

参考文献:

- [1] 刘洁, 黄本胜, 陈晓宏, 等. GPM 遥感降水产品在广东省的极端降水事件适用性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 87-94. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2023.0010.
- [2] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2020.0055.
- [3] 杜懿, 林泽群, 王大刚. 不同降水产品在长江流域的偏差校正研究[J]. 水文, 2023, 43(1): 62-67. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210409.
- [4] 夏昕然, 田焜, 谭伟丽, 等. 多种卫星降水产品在中国的精度评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8): 29-40. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.003.
- [5] TEUTSCHBEIN C, SEIBERT J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 456: 12-29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- [6] RÄTY O, RÄISÄNEN J, YLHÄISI J S. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: Intermodel cross-validation using ENSEMBLESsimulations[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42: 2287-2303. DOI: 10.1007/s00382-014-2130-8.
- [7] OLSSON T, JAKKILA J, VEIJALAINEN N, et al. Impacts of climate change on temperature, precipitation and hydrology in Finland-studies using bias corrected regional climate model data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(7): 3217-3238. DOI: 10.5194/hess-19-3217-2015.
- [8] FANG G H, YANG J, CHEN Y N, et al. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China[J]. *Hydrology and Earth System Sci-*

- ences, 2015, 19(6): 2547-2559. DOI: 10.5194/hess-19-2547-2015.
- [9] TENG J, POTTER N J, CHIEW F H S, et al. How does bias correction of regional climate model precipitation affect modelled runoff? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(2): 711-728. DOI: 10.5194/hess-19-711-2015.
- [10] CHEN J, BRISSETTE F P, CHAUMONT D, et al. Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(7): 4187-4205. DOI: 10.1002/wrcr.20331.
- [11] HUSAK G J, MICHAELSEN J, FUNK C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications [J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 27(7): 935-944. DOI: 10.1002/joc.1441.
- [12] 何坤龙, 刘晓辉, 刘蛟, 等. 不同偏差校正方法对青藏高原地区GPM的应用效果研究 [J]. *山地学报*, 2021, 39(3): 439-449. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000609.
- [13] SCHMIDL J, FREI C, VIDALE P L. Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods [J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 26(5): 679-689. DOI: 10.1002/joc.1287.
- [14] 窦世卿, 张寒博, 徐勇, 等. TRMM降水数据在长江流域的降尺度分析与校正 [J]. *中国农业气象*, 2021, 42(5): 377-389. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2021.05.003.
- [15] 吴薇, 黄晓龙, 徐晓莉, 等. 四川省降水实况分析产品影响因素综合评估 [J]. *干旱气象*, 2023, 41(1): 143-151. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639.
- [16] 李昕潼, 李占玲, 韩孺村. 不同偏差校正法对GCM降水数据的应用效果分析 [J]. *水文*, 2023, 43(3): 93-100, 117. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.2022.0060.
- [17] 王戎蓉, 周建中, 杨鑫, 等. 再分析降水资料的适用性评估与偏差校正: 以长江中下游地区为例 [J]. *人民长江*, 2021, 52(9): 93-100. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.09.015.
- [18] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 70-77. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.009.
- [19] 向怡衡, 沈铁元, 殷志远, 等. 清江流域近60 a日降水特征变化分析 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(3): 264-273. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-002.
- [20] 梅梅, 高歌, 李莹, 等. 1961—2022年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征 [J]. *人民长江*, 2023, 54(2): 12-20. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.02.003.
- [21] 黄琦, 王瑞敏, 向俊燕, 等. 三种降水产品在雅砻江流域的时空适用性研究 [J]. *水文*, 2020, 40(4): 14-21. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190331.
- [22] 吴南, 张珂, 管晓祥, 等. 1979—2018年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 151-158. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.020.
- [23] 李冰雪, 李振华, 王德全. 基于二元混合分布分位数映射法的长江上游区域气候模式模拟降水偏差校正 [J]. *水文*, 2023, 43(1): 24-29. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210363.
- [24] 郭家力, 丁光旭, 杨旭, 等. 多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 230-242, 252. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0025.
- [25] 曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域TRMM 3B43数据精度检验 [J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 994-1004.
- [26] 嵇涛, 杨华, 刘睿, 等. TRMM卫星降水数据在川渝地区的适用性分析 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1375-1386. DOI: 10.11820/dlxxjz.2014.10.009.
- [27] 朱慧琴, 陈生, 李晓俞, 等. GPM卫星降水产品在“7·21”河南极端暴雨过程中的误差评估 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 1-13. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.001.
- [28] HASHEMI H, NORDIN M, LAKSHMI V, et al. Bias correction of long-term satellite monthly precipitation product (TRMM 3B43) over the conterminous United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(9): 2491-2509. DOI: 10.1175/JHM-D-17-0025.1.

Application effect of precipitation product deviation correction method in the Yangtze River basin

GU Jiahui^{1,2,3}, GUO Jiali^{1,2,3,4}, LI Ying^{1,2,3}, Shan-e-hyder SOOMRO^{2,3}, CHENG Xiong^{1,2}, LI Yinghai^{1,2,3}

(1. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Institute of Water Resources Informatics, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443133, China)

Abstract: As a key link in the water cycle, the uneven and unstable spatial and temporal distribution of precipitation directly causes natural disasters such as floods and droughts. Highly accurate precipitation data not only helps the research of hydrology, meteorology, and agriculture, but also can effectively be used to mitigate natural disasters such as floods. Although station observation is the most direct and accurate way to obtain precipitation, the distribution of ground stations is not uniform, which often does not reflect the spatial distribution of precipitation well. Precipitation products with high resolution, continuous spatial and temporal distribution, and easier access make up for the shortcomings of ground stations to a certain extent and are widely used in basin hydrological simulation and extreme precipitation prediction. However, their accuracies are affected by the nature of cloud cover, the performance of satellite sensors, and the inversion algorithms, which often show different degrees of bias, and need to be evaluated for applicability to verify their reliability before use. It has been shown that appropriate bias correction for less-than-optimal precipitation products can effectively improve their applicability.

The bias correction of precipitation products are compared using seven methods in three categories to explore the bias correction methods applicable to different precipitation products and to evaluate the applicability of three precipitation products such as CMFD, MSWEP, and ERA5-Land based on the day-by-day precipitation observation data from surface meteorological stations from 1979 to 2018 in three sub-basins of the Yangtze River basin. Three types of precipitation products are compared with seven methods for bias correction, and nine evaluation indexes describing the detection capability, error size, degree of fit, and comprehensive evaluation are used to analyze and evaluate the applicability and correction effect to provide scientific and reasonable bias correction methods for the accurate application of precipitation products in different regions of the Yangtze River basin.

The results show that the applicability of the corrected precipitation products was improved to different degrees, and the correction method combining local intensity scaling and triple gamma distribution was optimal for all three precipitation products and three sub-basins. There was no obvious relationship between the correction method and the type of precipitation products and the geographic location of the study area. There is an inverse correlation between the magnitude of correction of the correction methods and the applicability of the precipitation products in the study area, and the worse the applicability of the products, the more obvious the improvement of the accuracy evaluation indexes.

The research can provide a referable calibration method for the accurate application of different precipitation products in different sub-basins of the Yangtze River basin at a later stage. A new correction method, local intensity scaling combined with three gamma distribution is constructed based on the segmented three-gamma distribution method by introducing the quantile optimization module and combining it with the local intensity scaling method, and it is applied to the correction of precipitation products. Compared with other bias correction methods, the combined local intensity scaling and triple gamma distribution method shows the best correction effect for the three precipitation products in three sub-basins, which is not only capable of correction, but also applicable, and can perform well and stably for the precipitation products with different characteristics and in regions with large differences in climate, topography and area.

Key words: bias correction; precipitation product; Yangtze River basin; accuracy evaluation index