

# 多源融合降水对小尺度流域洪水模拟能力研究

石 朋, 徐昕杰, 瞿思敏, 江 鹏, 孙逸群, 方 正, 汪海洁

(河海大学水文水资源学院)

**摘要:**为研究降水输入的准确性对洪水模拟的影响,以大坡岭流域作为小尺度代表流域,评估了反距离加权插值(IDW)、最优插值(OI)、卡尔曼滤波(KF)3种融合算法对CMORPH卫星降水产品的改进效果,并基于新安江模型分析了不同降水数据源的洪水模拟能力。结果表明:OI法对CMORPH改进最为显著,其相关系数中位数提升至0.783,平均绝对误差和均方根误差中位数较原始数据分别降低了49.2%和36.6%,IDW法精度次之,KF法改进有限;利用OI法融合降水数据驱动的洪水模拟效果最佳,纳什效率系数均值较地面实测数据提升约32.8%,其中2000年后洪水场次模拟提升达57.1%,证实多源融合降水数据可有效提升大坡岭流域的洪水模拟精度。

**关键词:**卫星降水;多源融合;洪水模拟;新安江模型;小尺度流域;大坡岭流域

**Flood simulation capability study of multi-source precipitation fusion in small-scale watersheds**//Shi Peng, Xu Xinjie, Qu Simin, Jiang Peng, Sun Yiqun, Fang Zheng, Wang Haijie (*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*)

**Abstract:** To study the impact of the accuracy of precipitation inputs on flood simulation, the Dapoling Basin was selected as a small-scale representative watershed. The improvement effects of three fusion algorithms, namely, inverse distance weight (IDW), optimal interpolation (OI) and Kalman filter (KF), on the satellite precipitation products of CMORPH were evaluated, and the flood simulation capabilities of different precipitation data sources were analyzed based on the Xin'anjiang model. The results show that compared with the original data, the OI method improves CMORPH most significantly, with the median correlation coefficient raised to 0.783, and the median mean absolute error and root mean square error reduced by 49.2% and 36.6%, respectively. The accuracy of IDW method is second, and the improvement of KF method is limited. The flood simulation driven by using OI fused precipitation data is the most effective, with the mean Nash-Sutcliffe efficiency coefficient improved by about 32.8% compared with the ground data, of which the simulation of post-2000 flood field is improved by 57.1%, which confirms that the multi-source fused precipitation data can effectively improve the flood simulation accuracy of the Dapoling Basin.

**Key words:** satellite precipitation; multi-source fusion; flood simulation; Xin'anjiang model; small-scale watershed; the Dapoling Basin

降水数据是地区水文循环系统的重要动态输入,是分析径流的基础资料之一,同时也是气象、水文和环境等学科的主要研究对象之一,并且在气候变化、水资源开发管理及灾害预警与监测等方面都发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。降水时空分布受流域地形特征、区域气候条件及大气环流模式等多重因素调控,其变异性显著。然而,传统单源降水观测技术因仪器精度、环境干扰等限制,存在较大的数据不确定性,导致其在水文模拟、农业监测及生态研究等领域的应用中难以满足高精度、高时空分辨率的数据需求<sup>[3-5]</sup>。然而,不同来源的降水数据各有特点:地面

站点实测降水可靠性高,但其有限的站点分布导致时空不连续和代表性不足的问题<sup>[6]</sup>;地面雷达估算降水能弥补山区站点稀缺或无站点的不足,却受地物遮挡、雷达反射率与降水强度关系( $Z-R$ )关系不确定性、覆盖范围有限等因素影响,精度相比站点观测存在较大误差<sup>[7]</sup>;与地面观测不同,卫星遥感技术能够突破地形和区域限制,提供覆盖范围广、时空连续性强的降水数据,其观测精度和分辨率均具有显著优势,但其反演降水通常误差较大<sup>[8-11]</sup>。

随着全球气候变化的加剧,极端降水事件频发,对流域洪水预报与水资源精细化管理提出了更高要

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211400)

作者简介:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事水文学物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:ship@hhu.edu.cn

通信作者:瞿思敏(1977—),女,教授,博士,主要从事水文学物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:wanyily@hhu.edu.cn

求。但气象雷达、卫星遥感及其融合产品在降水监测中均存在数据误差,且其时空分辨率和观测精度存在差异。随着降水数据需求日益精细化以及观测技术的持续发展,综合利用地面站点观测、雷达探测和卫星遥感等多源降水数据有效弥补了单一数据在时空分辨率与精度上的不足,已成为提升数据质量与精度的关键途径。宋蕾玥等<sup>[12]</sup>基于随机森林模型提出FCM-RF算法,融合3种卫星降水产品与地面观测资料,证明该算法能有效提高长江流域降水模拟精度;潘畅等<sup>[13]</sup>采用最优插值方法成功融合中国3万个自动气象站逐时观测降水与CMORPH卫星逐时降水数据,验证结果显示融合方案有效,使产品各项统计误差指标较卫星数据降低了50%以上;郭家力等<sup>[14]</sup>通过集合卡尔曼滤波法融合日尺度卫星与地面降水数据,有效解决了卫星数据整体精度不足和地面插值数据在流域边界区域精度偏低的问题;岳甲寅等<sup>[15]</sup>结合CNN-LSTM模型融合星地降水,证明在中小流域将实测降水数据与卫星降水产品数据进行融合可以在一定程度上提升洪水预报模型的精度;王维等<sup>[16]</sup>采用外部漂移克里金方法融合雷达与雨量站数据,并使用融合数据驱动WRF-Hydro,结果表明融合降水的洪水模拟效果优于雨量站数据;阮惠华等<sup>[17]</sup>建立了基于XGBoost与克里金插值算法的地面观测-雷达-卫星遥感多源逐时降水融合模型,该模型逐时降水融合结果在不同暴雨过程的准确性均有明显改进。

近年来,将多源融合降水数据应用于洪水模拟已成为国内外学者的研究热点,相关研究已取得长足进步,但大多数研究都聚焦于大型流域,对于小尺度并且地形条件复杂的流域研究相对较少。鉴于此,本文选取大坡岭流域作为小尺度代表流域,选择研究区内12个雨量站及1个水文站的降水、流量数据作为地面实测数据,分别采用反距离加权插值(inverse distance weight, IDW)法、最优插值(optimal interpolation, OI)法、卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)法3种融合方法对CMORPH CDR卫星产品(以下简称“CMORPH”)与地面实测数据进行融合,并对融合数据从精度评定、水文效应两方面进行评估。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

淮河发源于河南省南阳市桐柏山区,自西向东流经鄂、皖、鲁、苏4省,并于江苏扬州注入长江。淮河干流全长约1000 km,流域面积27万 km<sup>2</sup>。大坡岭流域位于32°10' N ~ 32°50' N、113°10' E ~ 113°50' E,流域面积1640 km<sup>2</sup>,流域内地势呈南北

高、中部低的特征,高程为97~1134 m,地形以山区和丘陵为主,土地利用类型多为耕地和林地,植被覆盖率较高。大坡岭流域位于南北过渡带,是典型的暖温带季风气候,多年平均气温15.0℃,降水量933 mm,径流深339 mm,蒸发量915 mm。受季风影响,淮河流域降雨年际波动和季节变化较大,且时空分布不均匀。大坡岭流域内布设有固庙、桐柏、新集等12个雨量站以及大坡岭水文站,站网密度为126 km<sup>2</sup>/个。大坡岭流域概况如图1所示。

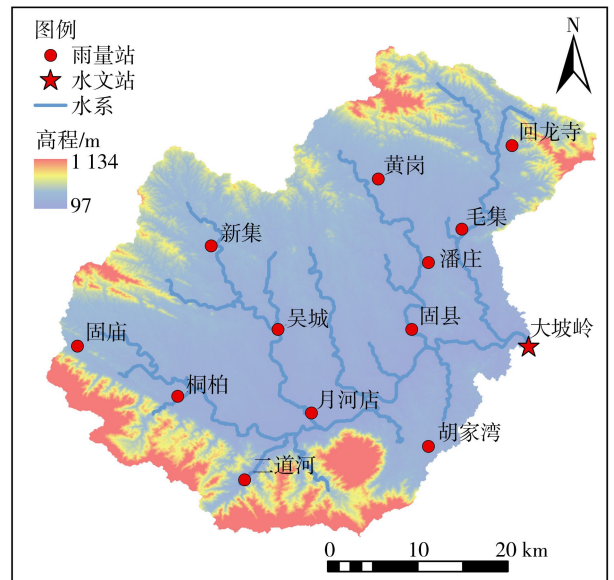


图1 大坡岭流域概况

Fig.1 Overview of the Dapoling Basin

### 1.2 数据来源

本文使用的DEM数据为GDEM V3 30 m分辨率产品,获取自地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)。卫星降水数据采用CMORPH,其原始时空分辨率分别为30 min、8 km,数据源自美国国家环境信息中心(<https://www.ncei.noaa.gov/data/cmorph-high-resolution-global-precipitation-estimates/access/>)。为便于后续数据融合处理,将CMORPH的时间分辨率通过累加处理至逐时尺度,空间分辨率通过重采样方法统一为0.07°×0.07°。大坡岭流域内雨量站的逐时降水观测数据以及水文站的蒸发、径流数据均摘录自《水文年鉴淮河流域第1册》。由于CMORPH的覆盖时段为1998年至今,本文选取1998—2020年共16场洪水资料,具体见表1。

## 2 研究方法

### 2.1 融合方法

#### 2.1.1 IDW法

IDW法依据托布勒地理学第一定律(即空间上邻近的事物比遥远的事物关联性更强)进行空间插

表 1 大坡岭流域洪水资料

Table 1 Flood data of the Dapoling Basin

研究时期	洪号	开始时间	结束时间	洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)
率定期	98070123	1998-07-01T23:00	1998-07-04T20:00	1140
	98080302	1998-08-03T02:00	1998-08-05T06:00	1730
	98080622	1998-08-06T22:00	1998-08-09T16:00	755
	98080921	1998-08-09T21:00	1998-08-12T19:00	1530
	98081308	1998-08-13T08:00	1998-08-18T15:00	1240
	03071701	2003-07-17T01:00	2003-07-24T09:00	1070
	05062518	2005-06-25T18:00	2005-06-27T20:00	1920
	05070902	2005-07-09T02:00	2005-07-12T00:00	3510
	05082902	2005-08-29T02:00	2005-08-31T20:00	2580
	07070221	2007-07-02T21:00	2007-07-05T18:00	1370
验证期	08072100	2008-07-21T00:00	2008-07-26T16:00	1630
	10071610	2010-07-16T10:00	2010-07-21T16:00	2020
	14092706	2014-09-27T06:00	2014-09-30T15:00	2040
	15062501	2015-06-25T01:00	2015-07-01T20:00	800
	17100110	2017-10-01T10:00	2017-10-08T23:00	755
	20062718	2020-06-27T18:00	2020-07-01T10:00	1250

值<sup>[18]</sup>,其基本思想为:对于待融合的目标点,依据周围已知样本与目标点的空间距离赋予权重,距离越近权重越高,通过加权平均整合多源数据信息,实现数据融合与空间插值。其计算公式为:

$$P_{IDW,j} = P_{sat,j} + \left( \sum_{i=1}^n w_i r_i \right) / \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

其中  $w_i = 1/d_i^p$   $r_i = P_i - P_{sat,i}$   
 式中: $P_{IDW,j}$  为第  $j$  个插值点经 IDW 融合后的降水量; $P_{sat,j}$  为第  $j$  个插值点对应的卫星估计降水量; $P_{sat,i}$  为第  $i$  个雨量站对应的卫星估计降水量; $n$  为雨量站数; $P_i$  为第  $i$  个雨量站的地面实测降水量; $w_i$  为第  $i$  个雨量站的权重; $d_i$  为目标格点到第  $i$  个雨量站的距离; $p$  为指数。

### 2.1.2 OI 法

OI 法是一种基于统计理论的空间数据融合方法,其核心思想为:通过量化变量的空间相关性和观测误差,对稀疏观测数据与连续背景场进行最优融合<sup>[19]</sup>。其计算公式为:

$$P_{OI,j} = P_{sat,j} + \sum_{i=1}^n w_i (P_i - P_{sat,i}) \quad (2)$$

式中: $P_{OI,j}$  为第  $j$  个插值点经 OI 融合后的降水量。 $w_i$  由下面的关系式计算:

$$\sum_{k=1}^n w_k \mu_{ik} + \eta_i w_i = \mu_{ij} \quad (3)$$

式中: $\eta_i$  为第  $i$  个雨量站点观测值的相对均方差; $w_k$  为第  $k$  个雨量站的权重; $\mu_{ik}$  为第  $i$  个雨量站与第  $k$  个雨量站之间的相关函数,本文选用  $\mu_{ik} = \exp(-D_{ik}/a)$ , $D_{ik}$  为雨量站点  $i, k$  的空间距离; $a$  为系数,根据实际情况取值,本文取 0.5。

### 2.1.3 KF 法

KF 法是一种基于递归贝叶斯估计的状态估计

算法,将其应用于融合降水的具体步骤为:首先使用普通克里金法完成地面雨量站观测降水的插值处理,构建与卫星降水产品分辨率匹配的降水场,同步量化插值误差协方差;其次引入卡尔曼滤波器,通过对比卫星与地面站点降水的不确定性(卫星误差由其误差场协方差矩阵表征,地面站点插值误差源于克里金插值方差),以卡尔曼增益权衡二者权重,实现卫星-地面降水数据融合<sup>[20]</sup>。其计算公式为:

$$P_{KF,j} = P_{sat,j} + K(P'_j - P_{sat,j} - \alpha_j) \quad (4)$$

其中  $K = \sigma_{sat,j} / (\sigma_{sat,j} + \sigma_j)$   
 式中: $P_{KF,j}$  为第  $j$  个插值点经 KF 法融合后的降水量; $P'_j$  为第  $j$  个插值点经克里金插值后的地面站网降水量; $K$  为卡尔曼增益; $\alpha_j$  为第  $j$  个插值点卫星估计降水与地面站网降水的平均偏差; $\sigma_{sat,j}$  为第  $j$  个插值点卫星误差场的协方差矩阵; $\sigma_j$  为第  $j$  个插值点地面降水在克里金插值过程中误差的方差。

## 2.2 三水源新安江模型

本文研究区属于湿润地区,故采用三水源新安江模型作为洪水模拟的水文模型,该模型由赵人俊<sup>[21]</sup>于 20 世纪 80 年代初在原新安江模型的基础上引入山坡水文学概念发展而来。三水源新安江模型由蒸散发计算、产流量计算、水源划分和汇流计算 4 部分组成。具体而言,蒸散发计算依据土壤水分的垂向异质性,构建了三层蒸散发模型;产流量计算采用蓄满产流机制;水源划分使用自由水蓄水库结构将总径流划分为地表径流、壤中流以及地下径流;汇流计算采用线性水库法,河道汇流演算采用马斯京根分段连续演算法。

## 2.3 评价指标

本文在评估融合效果时,采用留一法交叉检验

方法,将相关系数(CC)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)作为评价融合效果的指标,其中,CC值通常介于0~1之间,该值越接近1表明融合降水与实测降水的一致性越好;MAE和RMSE的取值范围均大于或等于0,其数值越小,说明融合降水数据的误差越小、精度越高。在评估水文效应时,采用纳什效率系数(NSE)、径流深相对误差、洪峰流量相对误差作为评估指标,NSE越接近1,表明模型模拟的径流过程线与实测过程线拟合程度越高,整体模拟效果越好;径流深相对误差和洪峰流量相对误差以百分比表示,其绝对值越接近0,分别说明模型对洪水总量和洪峰流量的模拟偏差越小、精度越高。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同融合方法效果比较

采用IDW法、OI法、KF法分别对大坡岭流域16场洪水降水过程的CMORPH与地面实测数据进行了融合。以2020年6月27日20:00—23:00的降水过程为例,对比地面观测、CMORPH原始产品及3种融合产品的表现,如图2所示。由图2可见,CMORPH对本次降水的捕捉能力较弱,尤其在21:00—23:00时段几乎未能反映有效降水信号,与地面实测到的强降水特征存在显著偏差;IDW法融合结果虽能大致反映降水的空间分布形态,但对强

降水中心的强度刻画明显偏低;OI法融合结果在降水范围和降水强度上更接近地面观测,特别是21:00—22:00的强降水中心,其位置和范围与观测的一致性最佳;KF法融合结果则全程降水信号偏弱,既未能有效捕捉强降水中心,也未能准确还原真实降水范围。综合来看,不同融合方法对降水的模拟效果差异显著,其中OI法表现最优,CMORPH卫星产品和KF融合的反演能力则相对不足。

图3为CMORPH及不同融合降水评价指标的箱线图。由图3可见,3种融合方法均对CMORPH进行了显著改进。其中,OI法综合表现最优,CC中位数提升至0.783(CMORPH的CC中位数为0.100),增幅显著;同时,OI法的MAE和RMSE中位数分别降低至0.895 mm和2.881 mm,较CMORPH的MAE和RMSE中位数分别降低了49.2%和36.6%,且误差分布更为集中,显示出更高的精度与稳定性。IDW法也表现出较高的相关性(CC中位数为0.779),但其MAE和RMSE中位数略高于OI法。相比之下,KF法虽较CMORPH亦有明显优化,CC中位数提升至0.454,MAE和RMSE中位数分别降低了约16.4%和13.8%,但其精度与稳定性均显著弱于OI法与IDW法。

总体而言,3种融合方法均能有效修正卫星降水数据的系统偏差。OI法通过优化空间权重能够

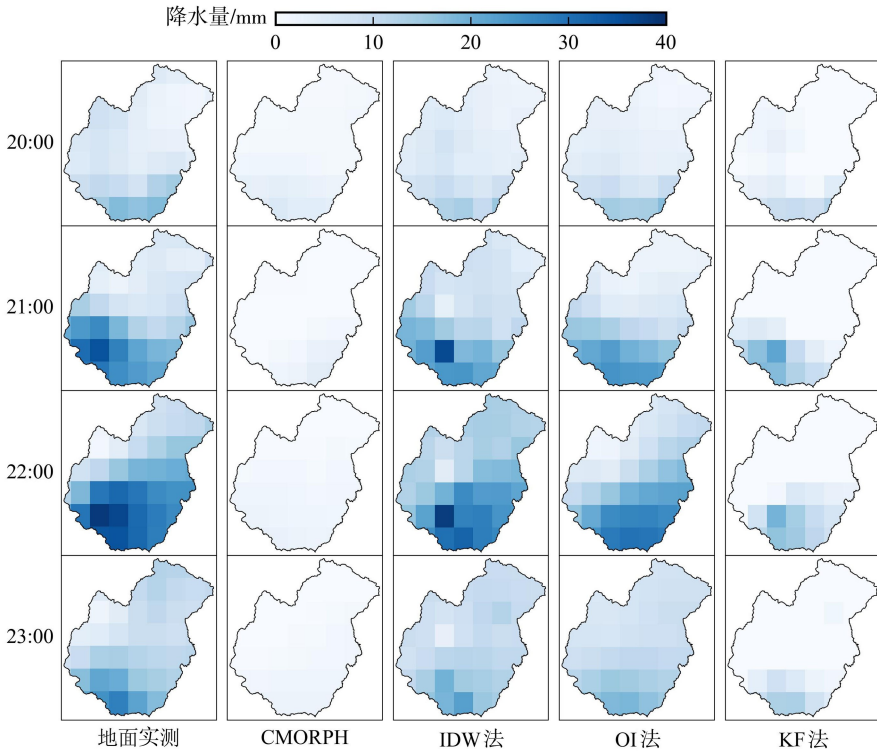


图2 2020年6月27日20:00—23:00的地面实测、CMORPH及不同融合方法的降水量

Fig.2 Precipitation from ground observations, CMORPH, and various fusion methods from 20:00 to 23:00 on June 27, 2020

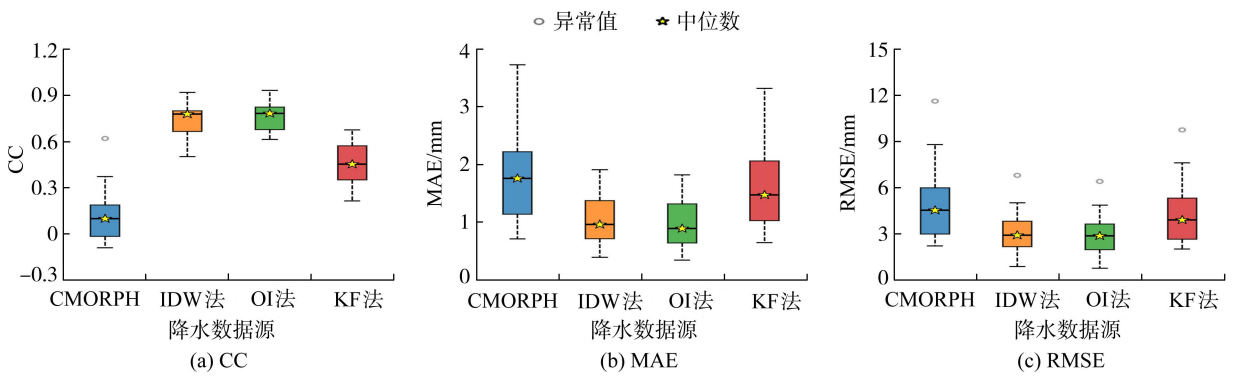


图3 CMORPH及不同融合降水评价指标的箱线图

Fig. 3 Box plots of evaluation indexes for CMORPH and different fusion precipitation

同时优化空间插值和校正卫星系统偏差,可以较好地捕捉降水场的空间连续性特征,因此在有较好站点支撑的研究区表现最为稳健和精确;IDW法则凭借其计算简便性实现了可靠的融合效果,作为一种几何插值方法,虽能有效利用空间邻近性,但缺乏对误差结构的考量,导致其对卫星固有偏差的修正能力不足;KF法的动态同化过程在应用于小尺度复杂地形流域时可能受限于误差协方差的准确估计,噪声传递可能导致其融合效果不稳定。尽管KF法对原始数据有所改进,但其综合性能指标在三者中相对较弱。IDW法与OI法在改善数据分布、显著提升相关性以及有效降低误差方面效果尤为突出,且OI法的整体性能优于IDW法。

### 3.2 基于不同融合降水的洪水模拟

为评估不同融合降水产品的水文效应,选取地面实测降水、CMORPH以及基于IDW法、OI法、KF法生成的3种融合降水数据,分别驱动三水源新安江水文模型对大坡岭流域16场历史洪水过程进行

模拟。为客观评价不同降水数据源对模型模拟性能的影响,采用动态参数法率定模型参数,针对每种降水数据,均利用SCE-UA算法独立优化一组模型参数,参数取值见表2。利用径流深相对误差( $R_{ER}$ )、洪峰流量相对误差( $R_{EQ}$ )及NSE评价不同降水数据源的模拟效果,评价指标值见表3。

由表2、表3可见,不同降水数据源在洪水模拟中的性能表现存在显著差异。基于地面实测降水数据的模型在率定期表现出相对较好的适应性,平均NSE为0.646,平均 $R_{ER}$ 和平均 $R_{EQ}$ 分别为20.5%和-18.2%;然而,该降水输入源在验证期模拟误差显著增大。相比之下,CMORPH卫星产品的整体适用性最低,其在率定期、验证期及总体评价中的平均NSE均为负值,且平均 $R_{ER}$ 和平均 $R_{EQ}$ 较大,表明该产品存在明显的系统性偏差,不适合直接用于大坡岭流域的洪水模拟。相比之下,融合降水数据则显著提升了模型的模拟性能。其中,OI法融合降水数据的表现均最为突出,无论是在率定期还是验证

表2 不同降水数据源的模型参数率定结果

Table 2 Model parameter calibration results for different precipitation data sources

降水数据源	$K_C$	$W_{UM}/mm$	$W_{LM}/mm$	$W_{DM}/mm$	$B$	$C$	$S_M/mm$	$E_X$	$K_1$	$K_C$	$C_S$	$C_1$	$C_C$	$X_E$
地面实测	1.35	13.8	50.0	56.2	0.4	0.11	30	1.5	0.1	0.6	0.7	0.9	0.934	0.11
CMORPH	0.50	11.3	82.2	26.5	0.4	0.11	30	1.5	0.5	0.2	0.7	0.9	0.959	0.10
IDW法	1.35	13.8	50.0	56.2	0.4	0.11	30	1.5	0.6	0.1	0.7	0.9	0.953	0.10
OI法	1.35	18.5	53.9	47.7	0.4	0.11	30	1.5	0.5	0.2	0.7	0.9	0.850	0.23
KF法	0.50	22.9	77.9	19.3	0.4	0.11	30	1.5	0.4	0.3	0.7	0.9	0.800	0.40

注: $K_C$ 为蒸散发折算系数; $W_{UM}$ 为上层张力水蓄水容量; $W_{LM}$ 为下层张力水蓄水容量; $W_{DM}$ 为深层张力水蓄水容量; $B$ 为流域蓄水容量曲线指数; $C$ 为深层蒸散发扩散系数; $S_M$ 为自由水蓄水容量; $E_X$ 为流域自由水蓄水容量曲线指数; $K_1$ 为壤中流日出流系数; $K_C$ 为地下径流日出流系数; $C_S$ 为地面径流消退系数; $C_1$ 为壤中流消退系数; $C_C$ 为地下径流消退系数; $X_E$ 为马斯京根演算算法参数。

表3 不同降水数据源模型模拟结果的评价指标值

Table 3 Evaluation index values of simulation results from different precipitation data sources

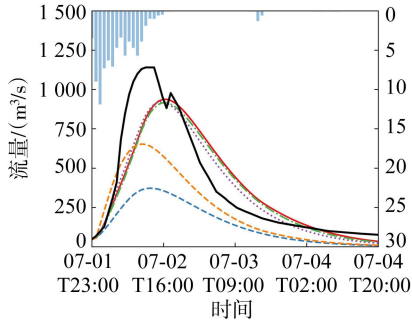
降水数据源	率定期			验证期			总体		
	$R_{ER}/\%$	$R_{EQ}/\%$	NSE	$R_{ER}/\%$	$R_{EQ}/\%$	NSE	$R_{ER}/\%$	$R_{EQ}/\%$	NSE
地面实测	20.5	-18.2	0.646	58.2	15.9	0.177	34.6	-5.4	0.470
CMORPH	-61.8	-71.9	-0.337	-18.4	-31.0	0.007	-45.5	-56.6	-0.208
IDW法	14.5	-21.1	0.594	46.4	9.8	0.379	26.4	-9.5	0.513
OI法	3.9	-25.8	0.676	32.0	3.6	0.538	14.4	-14.8	0.624
KF法	-32.1	-50.5	0.212	20.7	-4.7	-0.054	-12.3	-33.3	0.113

期,平均  $R_{ER}$  和平均  $R_{EQ}$  均显著低于其他降水数据来源;平均 NSE 较地面实测降水数据提升了约 32.8%。与地面实测数据相比,IDW 法融合降水数据平均 NSE 提升了约 9.2%,其平均  $R_{ER}$  也从 34.6%降低为 26.4%,尽管其在平均  $R_{EQ}$  上的表现略有不足,且整体精度稍差于 OI 法融合降水数据,但结果表明 IDW 法融合降水数据能够在一定程度上提升水文模拟的精度与可靠性。KF 法融合降水数据在 3 种融合方法中效果最弱,这与前期降水精

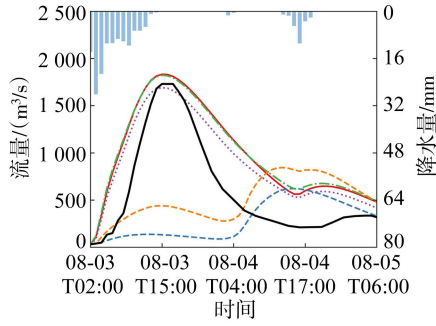
度评估结果一致,但其模拟效果仍优于原始的 CMORPH。

图 4、图 5 分别为率定期和验证期不同降水数据来源的洪水模拟过程线(图中地面模拟表示基于地面实测数据模拟得到的流量)。由图 4、图 5 可见,不同降水数据来源对洪水过程的刻画能力存在显著差异。原始 CMORPH 在所有场次洪水模拟中均表现出严重的系统性低估,其驱动的模拟过程线普遍呈现出洪峰流量显著偏低甚至无法捕捉有效降水信号

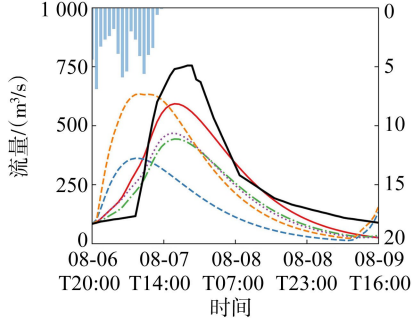
—实测流量    —地面模拟    - - -CMORPH    - - -IDW法    ····OI法    - - -KF法    ■降水量



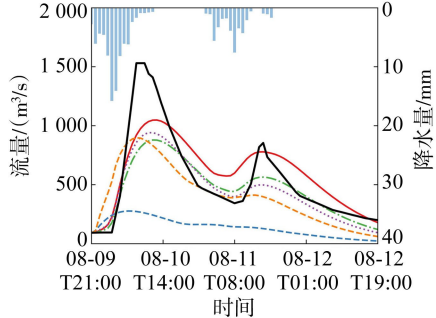
(a) 98070123



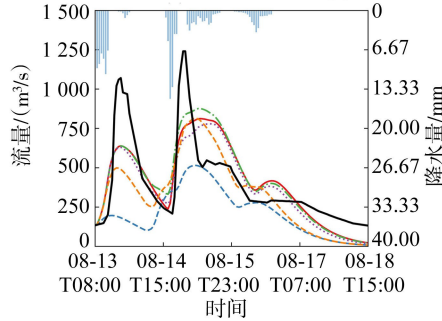
(b) 98080302



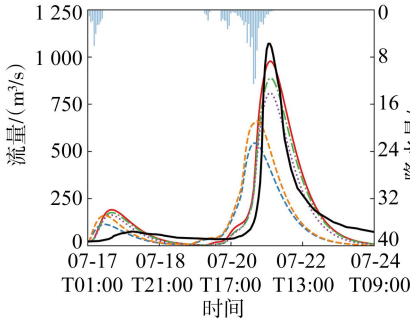
(c) 98080622



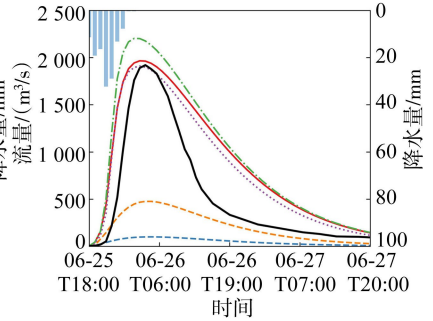
(d) 98080921



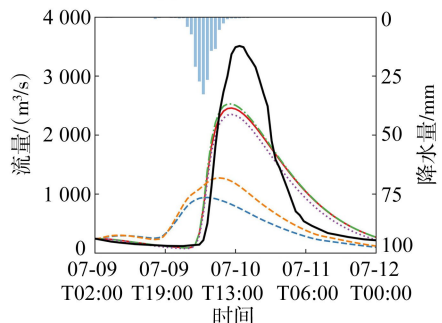
(e) 98081308



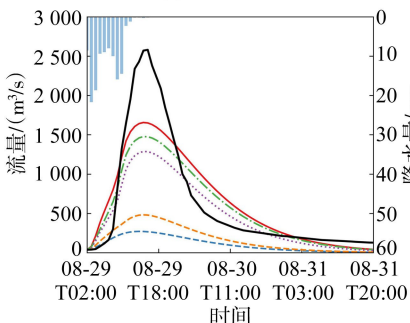
(f) 03071701



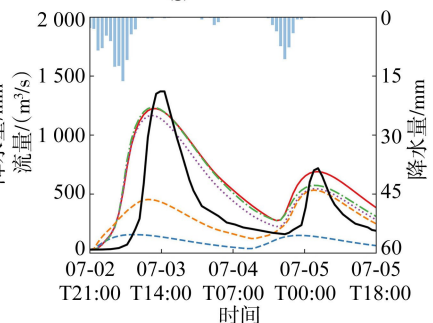
(g) 05062518



(h) 05070902



(i) 05082902



(j) 07070221

图 4 率定期不同降水数据来源的洪水模拟过程线

Fig. 4 Flood simulation process lines with different precipitation data sources at calibration-period

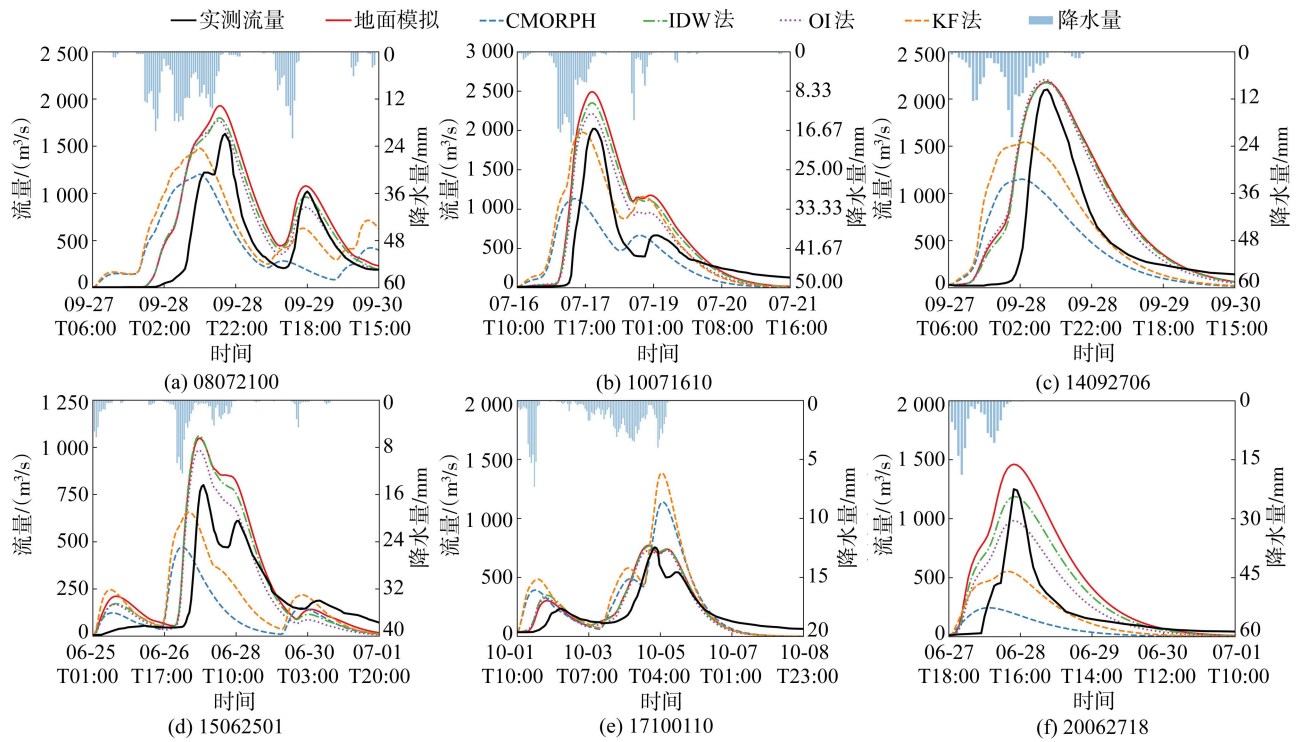


图5 验证期不同降水数据源的洪水模拟过程线

Fig. 5 Flood simulation process lines with different precipitation data sources at validation-period

的现象,表明其难以直接应用于大坡岭流域的高精度洪水模拟。通过三种融合方案修正卫星偏差后,模拟效果均获得不同程度的提升,其中OI法融合降水的驱动效果最为卓越。该方案驱动下生成的模拟过程线在起涨、峰值及退水阶段与实测流量过程吻合度极高,能够精准捕捉洪峰流量并准确还原峰现时间,展现出优异的降水场时空表征能力。在整个研究时段内,OI法融合降水的整体模拟性能均优于其他数据源,其在洪峰流量与径流深控制方面均表现稳健。这充分证明了采用OI法融合降水数据能有效弥补单一数据源在空间代表性上的不足,显著提升了小尺度流域在不同水文阶段洪水过程模拟的精度与可靠性。

除此之外,石朋等<sup>[22-24]</sup>研究发现,淮河上游在20世纪末环境发生了显著变化,大坡岭流域2000年以后的场次洪水模拟结果普遍存在模拟误差偏大、拟合效果不佳的现象。表4汇总了该时段基于不同降水数据源的洪水模拟结果,可以发现,虽然利用地面实测数据进行模拟的平均 $R_{EQ}$ 仅为1.2%,但其平均 $R_{ER}$ 和平均NSE均指示模型存在显著偏差。相比之下,OI法融合降水数据的模拟效果最佳,其平均NSE为0.608,较地面实测提升了约57.1%,这反映出OI法融合降水方案在维持洪峰模拟稳定性的同时,能有效降低径流深模拟误差,从而为变化环境下的大坡岭流域洪水模拟提供了更为可靠的降水输入。

表4 2000年以后的场次洪水模拟结果

Table 4 Flood event simulation result since 2000

降水数据源	$R_{ER}/\%$	$R_{EQ}/\%$	NSE
地面实测	44.6	1.2	0.387
CMORPH	-40.2	-52.8	-0.105
IDW法	36.8	-2.2	0.483
OI法	22.1	-9.2	0.608
KF法	-8.1	-31.6	0.049

## 4 结论

a. 以大坡岭流域作为小尺度代表流域,分别采用IDW法、OI法以及KF法融合地面实测数据与CMORPH,并以地面实测数据、CMORPH以及上述3种融合降水数据驱动三水源新安江模型进行洪水模拟。模拟结果表明,CMORPH与地面实测到的强降水特征存在系统性偏差,3种融合方法均显著改进了原始CMORPH。其中,OI法表现最优,其CC中位数提升至0.783,MAE与RMSE中位数较原始CMORPH分别降低了49.2%和36.6%,且误差分布更集中;IDW法的CC中位数提升至0.779,接近OI法,但其误差略高;相比之下,KF法在大坡岭流域的改进效果有限,精度提升不明显。这些结果表明OI法通过优化空间权重在大坡岭流域能够最有效地修正卫星数据的系统性偏差,并提升降水场空间连续性的表征能力。

b. 在三水源新安江模型模拟结果中,原始CMORPH和KF法融合降水数据模拟效果不佳;相

比之下, IDW 融合降水数据平均 NSE 较地面实测降水提升了约 9.2%, 表明模拟精度获得了一定提升; OI 法融合降水数据仍然表现最优, 其平均 NSE 较地面实测数据提升了约 32.8%, 尤其在 2000 年之后的洪水场次模拟中, OI 法融合降水数据平均 NSE 较地面实测数据提升了 57.1%, 且平均  $R_{ER}$  和平均  $R_{EQ}$  法综合表现更优, 这也表明在变化环境下 OI 法融合降水数据可以提供更为可靠的降水输入。

c. 多源降水数据融合技术通过整合地面观测的高可靠性与卫星遥感的大尺度覆盖优势, 有效弥补了单一站网在空间刻画上的不连续性局限, 显著提升了降水场在小尺度、复杂地形流域的表征精度。研究发现, 以 OI 法为代表的融合方案不仅能为水文资料匮乏地区提供高精度的驱动场, 在产汇流机制发生变异的非一致性环境下亦表现出极强的模拟稳健性。

## 参考文献:

[ 1 ] Zhang Xingxing, Jiang Liguang, Liu Zhaofei, et al. Flow regime changes in the Lancang River, revealed by integrated modeling with multiple Earth observation datasets[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 862: 160656.

[ 2 ] Zhong Ruida, He Yanhu, Chen Xiaohong. Responses of the hydrological regime to variations in meteorological factors under climate change of the Tibetan Plateau [ J ]. *Atmospheric Research*, 2018, 214: 296-310.

[ 3 ] 张婷, 李怡, 李建柱, 等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31 ( 1 ): 15-28. (Zhang Ting, Li Yi, Li Jianzhu, et al. Research progress on multi-source rainfall data fusion and their hydrological application [ J ]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31 ( 1 ): 15-28. ( in Chinese ))

[ 4 ] Kubota T, Shige S, Hashizume H, et al. Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: production and validation [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45( 7 ): 2259-2275.

[ 5 ] Tian Fuqiang, Hou Shiyu, Yang Long, et al. How does the evaluation of the GPM IMERG rainfall product depend on gauge density and rainfall intensity? [ J ]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19( 2 ): 339-349.

[ 6 ] Morrissey M L, Maliekal J A, Greene J S, et al. The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31 ( 8 ): 2011-2017.

[ 7 ] Wen Yixin, Hong Yang, Zhang Guifu, et al. Cross validation of spaceborne radar and ground polarimetric radar aided by polarimetric echo classification of hydrometeor types[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50( 7 ): 1389-1402.

[ 8 ] Beck H E, Van Dijk A I J M, Levizzani V, et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation ( 1979-2015 ) by merging gauge, satellite, and reanalysis data [ J ]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21( 1 ): 589-615.

[ 9 ] Ma Ziqiang, Shi Zhou, Zhou Yin, et al. A spatial data mining algorithm for downscaling TMPA 3B43 V7 data over the Qinghai-Tibet Plateau with the effects of systematic anomalies removed [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 200: 378-395.

[ 10 ] Romilly T G, Gebremichael M. Evaluation of satellite rainfall estimates over Ethiopian river basins [ J ]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15( 5 ): 1505-1514.

[ 11 ] Wen Yixin, Cao Qing, Kirstetter P E, et al. Incorporating NASA spaceborne radar data into NOAA national mosaic QPE system for improved precipitation measurement: a physically based VPR identification and enhancement method [ J ]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14 ( 4 ): 1293-1307.

[ 12 ] 宋蕾玥, 张珂, 晁丽君, 等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究 [ J ]. *水资源保护*, 2024, 40 ( 3 ): 125-132. ( Song Leiye, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [ J ]. *Water Resources Protection*, 2024, 40( 3 ): 125-132. ( in Chinese ))

[ 13 ] 潘漪, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [ J ]. *气象学报*, 2012, 70( 6 ): 1381-1389. ( Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [ J ]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70( 6 ): 1381-1389. ( in Chinese ))

[ 14 ] 郭家力, 郭东溟, 丁光旭, 等. 基于集合卡尔曼滤波法的清江流域多源融合降水分析 [ J ]. *中国农村水利水电*, 2023 ( 5 ): 72-78. ( Guo Jiali, Guo Donghao, Ding Guangxu, et al. Analysis of multi-source precipitation data fusion based on ensemble kalman filtering in Qingjiang River Basin [ J ]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023 ( 5 ): 72-78. ( in Chinese ))

[ 15 ] 岳甲寅, 刘招, 毛钦男, 等. 结合 CNN-LSTM 模型融合星地降水的洪水模拟研究 [ J ]. *中国农村水利水电*, 2025 ( 7 ): 52-59. ( Yue Jiayin, Liu Zhao, Mao Qinan, et al. Research on flood simulation by integrating satellite and ground precipitation with CNN-LSTM model [ J ]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025 ( 7 ): 52-59. ( in Chinese ))

[ 16 ] 王维, 刘佳, 李传哲, 等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究 [ J ]. *水资源保护*, 2023, 39( 5 ): 125-134. ( Wang Wei, Liu Jia, Li Chuanzhe, et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high

- resolution merging precipitation [ J ]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5) : 125-134. ( in Chinese ))
- [ 17 ] 阮惠华, 张钧民, 许剑辉, 等. 考虑降水时间相关性的地面观测-雷达-卫星遥感逐时降水融合方法研究[ J ]. *热带气象学报*, 2023, 39(3) : 300-312. ( Ruan Huihua, Zhang Junmin, Xu Jianhui, et al. An XGBoost-based geostatistical data fusion method for integrating hourly gauge-radar-satellite precipitation data by considering the temporal correlation characteristics of precipitation [ J ]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2023, 39(3) : 300-312. ( in Chinese ))
- [ 18 ] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data [ C ]//*Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*. New York: ACM, 1968: 517-524.
- [ 19 ] 李建通, 杨维生, 郭林, 等. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[ J ]. *大气科学*, 2000, 24(2) : 263-270. ( Li Jiantong, Yang Weisheng, Guo Lin, et al. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method [ J ]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(2) : 263-270. ( in Chinese ))
- [ 20 ] 周雪, 彭涛, 董晓华, 等. 资水流域多源降水数据融合精度评估及径流模拟应用[ J ]. *中国农村水利水电*, 2026(2) : 107-113. ( Zhou Xue, Peng Tao, Dong Xiaohua, et al. Accuracy assessment of multi-source precipitation data fusion and streamflow simulation application in the Zishui Basin [ J ]. *China Rural Water and Hydropower*, 2026(2) : 107-113. ( in Chinese ))
- [ 21 ] 赵人俊. *流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型* [ M ]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [ 22 ] 石朋, 丁松, 司伟, 等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[ J ]. *河海大学学报( 自然科学版)*, 2024, 52(3) : 1-6. ( Shi Peng, Ding Song, Si Wei, et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin'anjiang model [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences)*, 2024, 52(3) : 1-6. ( in Chinese ))
- [ 23 ] 吴洪石. 基于洪水相似性的实时洪水预报精度提升技术研究[ D ]. 南京: 河海大学, 2024.
- [ 24 ] Qu Simin, Bao Weimin, Shi Peng, et al. Evaluation of runoff responses to land use changes and land cover changes in the upper Huaihe River Basin, China [ J ]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(7) : 800-806. ( 收稿日期: 2025-08-09 编辑: 王芳)

( 上接第 22 页 )

- [ 50 ] Dai X, Wang L C, Hu Z Y, et al. Runoff and sediment dynamics induced by the "grain for green" programme: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China [ J ]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2025, 49(6) : 773-796.
- [ 51 ] 黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响[ J ]. *湖泊科学*, 2017, 29(1) : 22-31. ( Huang Chunlin, Li Xi, Sun Yongyuan. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age [ J ]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1) : 22-31. ( in Chinese ))
- [ 52 ] Gao W, Liu Y, Du Z, et al. Hedging effect alleviates the impact of land use on mainstream hydrological regimes: Evidence from Jinsha River, China [ J ]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(10) : 2011-2030.
- [ 53 ] Zhang X, Tian Y, Dong N, et al. The projected futures of water resources vulnerability under climate and socioeconomic change in the Yangtze River Basin, China [ J ]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109933.
- [ 54 ] 许继军, 袁喆. 2022 年长江流域干旱特征分析与新时期抗旱减灾应对模式探讨[ J ]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4) : 1-8. ( Xu Jijun, Yuan Zhe. Drought characteristics of Changjiang River Basin in 2022 and Drought mitigation response pattern under new circumstances [ J ]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4) : 1-8. ( in Chinese ))
- [ 55 ] 宋继鹏, 龚磊强, 王晓龙, 等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征: 回顾与展望[ J ]. *湖泊科学*, 2025, 37(3) : 716-733. ( Song Jipeng, Gong Lei, Wang Xiaolong, et al. Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project: Retrospect and prospect [ J ]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3) : 716-733. ( in Chinese )) ( 收稿日期: 2025-10-27 编辑: 彭桃英)