

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.015

高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究

王 维^{1,2}, 刘 佳², 李传哲², 于恩涛³, 王一之², 邱庆泰⁴

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029; 4. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为了满足陆面水文模式和数值大气模式耦合构建降雨径流模拟系统的需求, 构建了基于天气雷达与雨量站观测降水的3种高分辨率降水数据(雷达估测降水、雨量站插值降水和基于雷达与雨量站观测数据的融合降水), 采用雨量站插值降水和融合降水数据对陆面水文模式 WRF-Hydro 的关键产汇流参数进行率定, 探讨了不同降水驱动 WRF-Hydro 开展径流模拟在我国北方山区中小尺度流域的适用性。结果表明: 融合降水的误差指标相比传统插值降水有不同程度的改善, 融合降水的时空准确性也更为突出; 采用雨量站插值降水和融合降水均可有效改善 WRF-Hydro 的关键产汇流参数, 其中融合降水率定参数组的洪水模拟效果要优于雨量站插值降水; 以高分辨率融合降水数据为驱动, 可获得更准确的 WRF-Hydro 关键产汇流参数, 有效提高 WRF/WRF-Hydro 陆气耦合系统在研究流域的适用性。

关键词: 降雨径流模拟; 高分辨率融合降水; 雨量站插值降水; WRF; WRF-Hydro; 天气雷达

中图分类号: TV121⁺.2; P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)05-0125-10

Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation // WANG Wei^{1,2}, LIU Jia², LI Chuazhe², YU Entao³, WANG Yizhi², QIU Qingtai⁴ (1. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: To meet the demand of constructing the rainfall-runoff simulation system coupling the land-surface hydrologic model and the numerical atmospheric model, three types of high-resolution precipitation data based on weather radar and rainfall station observations are acquired, namely radar estimated precipitation, rainfall station interpolated precipitation and radar and rainfall station merging precipitation. The key runoff parameters of the land-surface hydrological model WRF-Hydro are calibrated using both rainfall station interpolated precipitation and radar and rainfall station merging precipitation. The applicability of WRF-Hydro driven by different precipitation for runoff simulation in small and medium scale catchments in the mountainous regions of northern China is explored. The results show that the error indices of merging precipitation are improved by different degrees compared with that of traditional interpolated precipitation, and the spatial and temporal accuracy of merging precipitation is also improved. Both rainfall station interpolated precipitation and merging precipitation can effectively improve the key runoff generation and concentration parameters of WRF-Hydro, and the results of flood simulation with the merging precipitation rate parameter set are better than that of rainfall station interpolated precipitation. Driven by high-resolution precipitation data, more accurate WRF-Hydro key runoff generation and concentration parameters can be acquired, which effectively improves the applicability of the coupled WRF/WRF-Hydro system in the studied basin.

Key words: rain-runoff simulation; high-resolution merging precipitation; rainfall station interpolated precipitation; WRF; WRF-Hydro; weather radar

基金项目: 国家自然科学基金项目(51822906); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502405)

作者简介: 王维(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要从事陆面水文过程与中尺度数值大气模拟研究。E-mail: wangwei_hydro@163.com

通信作者: 刘佳(1983—), 正高级工程师, 博士, 主要从事陆气耦合流域水文模拟与预报研究。E-mail: hettyliu@126.com

WRF-Hydro 最初是天气研究与预报模式 (weather research and forecasting, WRF) 的陆面水文扩展模块,而后逐渐演变为并行、多核、多尺度、多物理过程描述的全分布式陆面水文模式;WRF-Hydro 提供了一种将陆面水文过程耦合到中尺度以及其他地球建模系统的途径,能够更精准反映水循环过程中的地表状态与水热通量变化^[1]。陆面水文模式在水文、地理、气象等多个学科交叉领域均有广阔的应用前景,尤其是基于数值大气模式结果与 WRF-Hydro 开展的单向耦合,在中小河流暴雨洪水的预报预警方面具有巨大的潜力,近年来广受国内外学者的关注^[2-5]。在长期模拟方面,Naabil 等^[6]用单向耦合的 WRF/WRF-Hydro 成功模拟了西非小流域的年径流过程,但发现部分时段存在流量快速回落情况;Silver 等^[7]对美国干旱与半干旱区的 5 场洪水进行了单向模拟,并通过土地利用类型将参数变量值进行了分类修正,修正后的流量过程明显优于系统默认参数取值的结果;李光伟等^[8]较早开始用 WRF-Hydro 开展长时段模拟,并对我国三江源区 2017 年的陆面水文过程进行了水热平衡分析,比较了土壤湿度与湍流热通量的变化情况。在短期模拟方面,孙明坤等^[9]对比了 WRF-Hydro 和新安江模型在陕西半湿润区的应用效果,结果表明 WRF-Hydro 能够更好地反应洪水细节,但对中小流域的洪水模拟精度仍需加强;顾天威等^[10]用 WRF-Hydro 模拟了湿润区清江流域内的 13 场洪水,模拟的纳什效率系数在 0.50~0.94;晁丽君等^[11]探究了多源降水融合驱动下 WRF-Hydro 在中小河流洪水预报中的适用性。以上研究展现了 WRF-Hydro 对我国不同区域、不同尺度陆面水文过程的适用性,但是在模式的关键产汇流参数率定方面,多数研究仍存在欠缺和不足。实际上,当将 WRF-Hydro 用于洪水过程的时空动态模拟时,关键产汇流参数的确定与传统水文模型相比,更为依赖可靠的高分辨率输入降水数据。

输入降水的准确性是制约陆面水文模式系统模拟精度的重要因素。雨量站可以在相对精确的位置对点雨量进行观测,但其维护检测成本相对较高,我国雨量站的站网密度往往不能满足流域空间建模的需求,通过对雨量站插值的方式也很难反应降水在局部空间上的异质性^[12]。雷达站数据具有较高的时空分辨率,单个雷达站覆盖半径为 200~300 km,非常适合中小尺度范围的气象观测^[13]。从 1940 年开始利用气象雷达观测雨量的空间特性,到近几十年气象雷达数据的不断更新,对雨量的估测精度不断提高,气象雷达的应用也越来越广泛^[14]。将气象雷达观测数据转化为降雨强度的过程较为复杂,加

之我国雷达站网布设较早,硬件设置并不完善,导致观测过程中往往会产生多种误差,降水产品质量尚存在一定的不确定性。在此背景下,利用雨量站与雷达站的各自优势,实现对两种数据的融合成为了获得稳定高分辨率高准确性降水数据的有效方法。本文以大清河南北两支的两个典型山区流域为例,探讨雨量站和雷达站的高分辨率降水数据融合方法,以及单向的 WRF/WRF-Hydro 耦合系统(以下简称“耦合系统”)对我国北方山区陆面水文过程的适用性,以期 WRF-Hydro 提供更精确的降水数据用于关键产汇流参数的率定。

1 研究区概况

以阜平和紫荆关两个典型山区流域为研究区,雨量站以及流域高程情况如图 1 所示。阜平流域面积为 2210 km²,紫荆关流域面积为 1760 km²,两流域分别位于我国北方大清河流域的南北支上游,处于半湿润、半干旱气候区,降雨径流时程短,极易引发洪涝灾害。

2 研究数据

2.1 雨洪数据

降水观测数据来自阜平流域的 8 个雨量站和紫荆关流域的 11 个雨量站(图 1,包含流域出口处的雨量站)以及石家庄雷达站。石家庄雷达站为 S 波段多普勒雷达系统,该雷达系统的初始数据来自中国气象局,两个研究流域均在雷达站的扫描覆盖范围内。研究区内降雨产流过程筛选比较困难,尤其是近十几年来,阜平流域和紫荆关流域降水量处于历史较低水平,流域内较为干旱,受限于降水量和下垫面的情况,某些量级较大的降水场次存在降雨未产流现象。为此,对 2005—2018 年的降雨径流数据进行整理分析,尽可能选择峰高量大、峰谷差异明显、暴雨中心相对集中的洪水,同时兼顾了多峰型洪水和小洪水,最终筛选出用于 WRF-Hydro 模式试验的 10 场雨洪过程(表 1),其中场次 5 和场次 8 分别是发生在紫荆关和阜平流域的较大雨洪过程,24 h 内流域降水的时空分布也更为集中。

2.2 高分辨率降水数据

降水准确性是影响 WRF-Hydro 径流模拟的关键,而对于我国北方半湿润、半干旱地区而言,降水过程的时空分布不均匀程度较大^[15]。为了提高耦合系统在研究流域的适用性,本文进一步构建了雷达估测降水、雨量站插值降水和基于雷达与雨量站观测数据的融合降水(以下简称“融合降水”)3 种高分辨率降水数据。

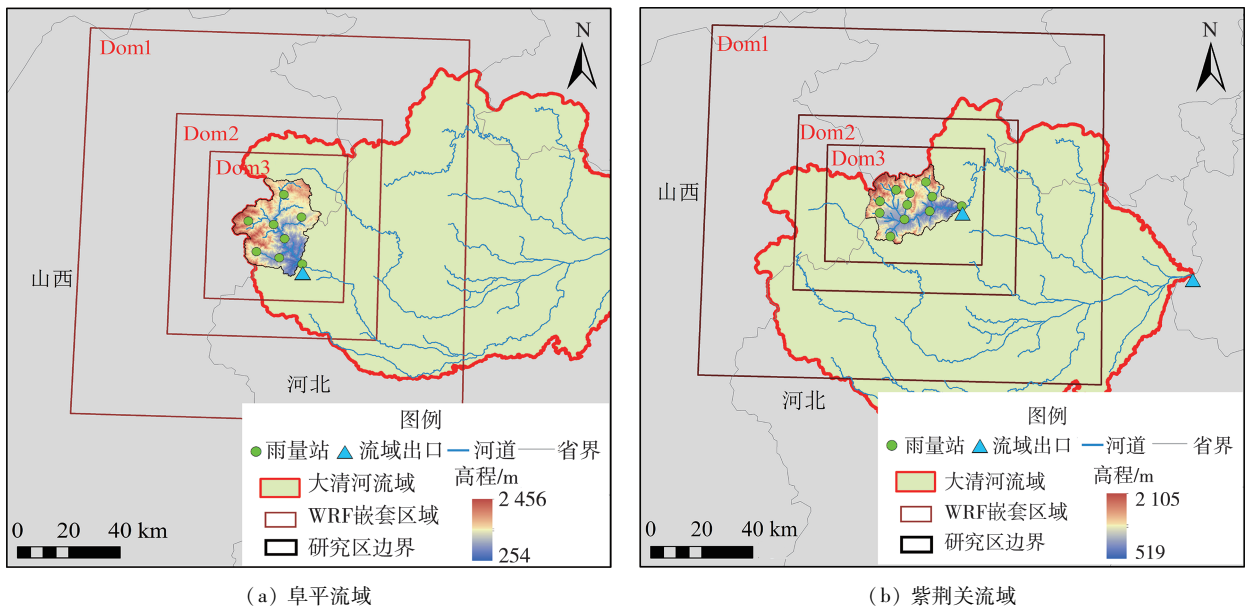


图1 研究区地形高程、站网分布与 WRF 嵌套区域

Fig. 1 Topographic elevation, gauge network location and nested area with WRF of the studied area

表1 研究区典型雨洪过程

Table 1 Typical rainfall-runoff processes in the studied area

雨洪场次	流域	统计时段	面雨量/mm	洪峰流量/(m ³ /s)
场次1	阜平	2007-07-29T18:00—2007-08-01T18:00	63.4	29.7
场次2	阜平	2012-07-30T11:00—2012-08-02T07:00	50.5	70.7
场次3	阜平	2013-08-11T07:00—2013-08-14T05:00	30.8	46.6
场次4	紫荆关	2008-08-10T00:00—2008-08-11T11:00	49.7	6.8
场次5	紫荆关	2012-07-21T04:00—2012-07-23T00:00	172.2	2580.0
场次6	紫荆关	2013-06-06T23:00—2013-06-08T08:00	52.1	9.8
场次7	阜平	2012-09-01T07:00—2012-09-04T05:00	40.3	13.7
场次8	阜平	2016-07-23T18:00—2016-07-26T18:00	59.6	1740.0
场次9	紫荆关	2007-05-22T00:00—2007-05-23T10:00	39.5	4.1
场次10	紫荆关	2016-07-18T18:00—2016-07-21T00:00	54.1	53.4

a. 雷达估测降水。雷达估测降水是在石家庄雷达数据基础上,通过中国气象局的雷达估测降水集群系统进行质量控制得到的。质量控制内容主要包括电磁波衰减校正、非降雨回波抑制、组合反射率拼图、设置雷达反射率和雨强转换方程等^[16]。石家庄雷达反射率 Z 与雨强 R 的关系可以表示为

$$Z = aR^b \quad (1)$$

式中 a 、 b 为转换参数,参照相关地区雷达估测模拟结果,本文所采用的转换关系为:当降雨类型为对流降雨时, a 、 b 分别取值 300 和 1.4;为层状降雨时,分别取值 200 和 1.6^[16]。处理后雷达估测降水数据的空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 6 min。

b. 雨量站插值降水。降水的地面空间插值可以大致分为两大类:一类是确定性插值,一类是基于地统计学的地理统计插值^[17],其中反距离加权(inverse distance weighting, IDW)方法是最常用的

确定性空间插值方法。IDW 方法根据插值区域内各采样点的相似度,假设网格对应位置处的估值可由局部邻域内所有数据点的距离加权平均值表示,可以表示为

$$Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i/d_i^2)}{\sum_{i=1}^n (1/d_i^2)} \quad (2)$$

式中: Y_0 为网格插值点处的估计值; Y_i 为第 i 个雨量站的观测值; d_i 为需要插值的网格点与雨量站点间的距离; n 为研究区的雨量站总数。本文通过 IDW 方法将雨量站观测降水数据插值到与雷达估测降水分辨率相同的 1 km × 1 km 网格上。

c. 融合降水。外部漂移克里金(Kriging interpolation with external drift, KED)插值方法是地统计学方法中广义克里金插值法的一种扩展,该方法允许合并多个附加变量作为背景信息来对主变量进行插值^[18]。在实现雷达与雨量站观测数据的融合时,石家庄站的雷达数据被视为唯一的附加变量。

KED 插值中主变量 G_x (研究区雨量站 x 处的降水量的期望值) 与附加变量 P_x (雨量站 x 处的雷达估测降水量) 之间符合如下关系:

$$G_x = p + qP_x \quad (3)$$

式中 G_x 、 P_x 满足系数 p 和 q 的线性趋势。

在给定位置 x_0 处的估计值是由线性估计器导出的, 权重与给定位置附加变量计算公式如下:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i P_{x_i} = P_{x_0} \quad (5)$$

式中: λ_i 为第 i 个雨量站对应的权重; P_{x_0} 为经过加权计算后的雷达降水估计值; x_i 为第 i 个雨量站位置; x_0 为未知雨量的位置。

3 耦合系统设置

耦合系统采用了 WRF 模式的 3 层降尺度嵌套方案(图 1)。最内层 Dom3 的分辨率为 1 km, 第 2 层 Dom2 分辨率为 3 km, 最外层 Dom1 分辨率为 9 km。WRF 模式的驱动数据采用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的分辨率为 0.7° 的欧洲中期天气再分析过渡数据 (ECMWF re-analysis interim data, ERA-interim)。基于两个研究区的气候特征和潜在对流降雨条件, 选取了行星边界层方案 YSU (Yonsei University)^[19]、微物理过程方案 Lin (Pudue-Lin)^[20] 和积云对流方案 KF (Kain-Fritsch)^[21] 进行模拟分析。该组方案能够较好地反映我国北方对流降雨过程的物理形成机制, 在我国北方半湿润、半干旱地区中尺度气象模拟中取得了较好的模拟效果^[22-24]。积云对流方案没有在 Dom3 中开启, 发生在该层的对流降雨默认为显式解决^[25]。

WRF-Hydro 主要包括陆面过程模块、汇流模块以及用于处理陆面与水文分辨率不匹配的聚解-聚合(降尺度-升尺度)过程模块^[26]。其中陆面过程通过 4 层土柱模拟土壤层情况, 提供大气下边界条件和次网格的水热通量, 并与大气边界层和植被层相互作用。聚解-聚合过程采用特定的映射方式将需要的水文变量从较粗的陆面模式网格分解并转换到更精细的次网格, 用于解析影响陆面水分重力再分布的关键局部地形梯度特征^[27]。本文将 WRF 模拟获得的 1 km 分辨率 Dom3 作为气象驱动场以及降水插值场来与 WRF-Hydro 单向耦合, 并进一步在汇流中降尺度到 100 m。

表 2 给出了耦合系统中 WRF 与 WRF-Hydro 的基本参数配置。由于 WRF-Hydro 目前采用的基流

模型与实际情况存在较大差异, 容易造成过多的河道入流^[27], 因此在模拟中关闭了 WRF-Hydro 的基流选项。对于每场雨洪过程, 耦合系统在正式模拟前均进行了 16 d 的预热, 以保证较为准确的初始土壤水分状态。

表 2 耦合系统参数配置

Table 2 Configurations of the WRF/WRF-Hydro modeling system

模式	名称	所选配置
WRF	驱动数据	6 h ERA-interim
	WRF 输出间隔	1 h
	阜平嵌套中心	39°4'15"N, 113°59'26"E
	紫荆关嵌套中心	39°25'59"N, 114°46'1"E
	顶层气压	50 hPa
	水平方向分辨率	9、3、1 km
	垂直分层	40 层
	陆面模式	Noah-MP
	投影方式	Lambert
	长波辐射	RRTM
	短波辐射	Dudhia
	微物理过程	Lin
	积云对流	KF/显式解决
WRF-Hydro	行星边界层	YSU
	WRF-Hydro 输出间隔	1 h
	降尺度后汇流分辨率	100 m
	汇流模型时间步长	6 s
	降尺度比例	10
	土壤层(4 层)厚度	10、40、100、200 cm
	地下汇流	准三维地下汇流
	坡面汇流	扩散波模型
河道汇流	马斯京根-康吉	

4 结果与分析

4.1 不同高分辨降水数据的精度对比

对于 WRF 模拟降水, 田济扬等^[15] 在大清河流域开展的陆气耦合研究表明, WRF 模式所提供的降尺度降水数据在时间和空间上具有较大的不确定性。表 3 给出了 10 场雨洪过程的 WRF 模拟降水结果, 降水量相对误差范围为 $-39.5\% \sim 51.3\%$, 绝对值的均值为 20.2%, 显著的误差会对后续陆面水文过程模拟产生较大影响。

采用留一交叉验证 (leave one out cross validation, LOOCV) 方法^[28] 对雷达估测降水、雨量站插值降水和融合降水 3 种高分辨率降水产品的时空精度进行验证, 针对流域内的雨量站进行逐小时降水评估, 选择系统偏差 (BIAS)、均方根误差 (RMSE) 和均方根转换误差 (MRTE) 来定量对比雨量站观测数据与高分辨率降水数据的差异。基于留一交叉验证方法对构建的 3 种降水数据在 10 场降水过程中的表现进行评价, 结果见图 2。整体来看,

表3 WRF 模拟的累计降水量及相对误差

Table 3 Relative error of rainfall accumulations via WRF simulation

雨洪场次	WRF 模拟累计降水量/mm	相对误差/%
场次 1	65.3	3.0
场次 2	52.1	3.2
场次 3	46.6	51.3
场次 4	33.0	-33.6
场次 5	115.4	-33.0
场次 6	54.7	5.1
场次 7	24.4	-39.5
场次 8	42.2	4.4
场次 9	34.9	-11.6
场次 10	87.1	17.5

融合降水能够更好地再现研究区的降水空间关系。虽然对于 BIAS 指标,雨量站插值降水和融合降水

的 BIAS 值(均值分别为 -0.163 和 -0.169)比较接近,但 RMSE 和 MRTE 指标均表明,融合降水所对应的箱型图变化范围更小(RMSE 均值由 2.844 下降为 1.347,MRTE 均值由 0.873 下降为 0.423),能够获得更稳定的降水时空模拟结果。雷达估测降水在整个研究区内对降水过程的模拟效果均不太理想,与雨量站插值降水相比,均低估了雨量,这和 Qiu 等^[16]的研究结论一致。可见,雷达估测降水更适合作为一种辅助性降水数据用于解析降水过程的空间分布。

图 3 和图 4 分别给出了 4 种高分辨率降水数据在场次 1 和场次 5 的空间累计雨量情况。可以看出,WRF 模拟降水的空间分布与观测降水相比仍存在一定的差异。雨量站插值降水在雨量站点处与观

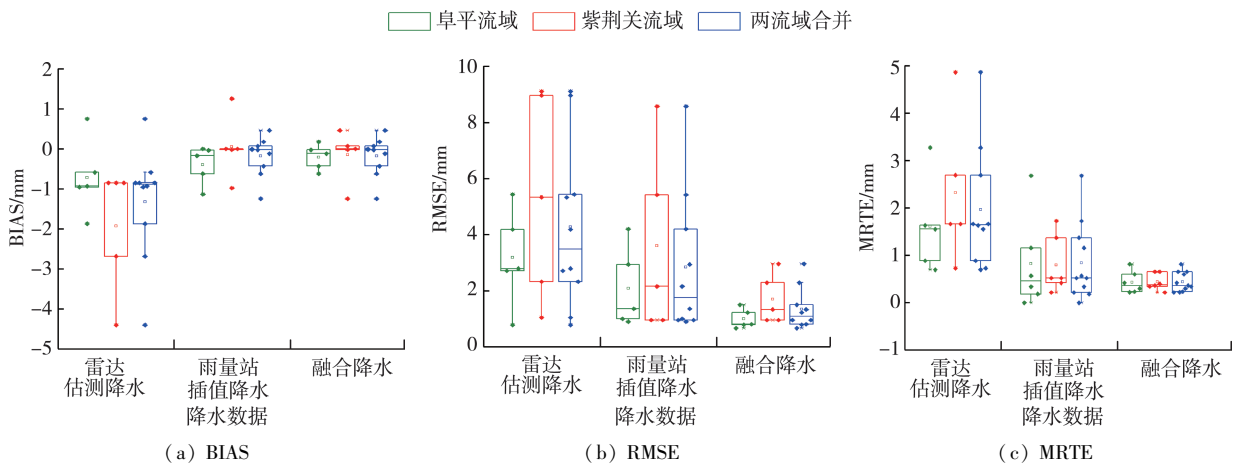


图 2 不同高分辨率降水数据评价指标箱型图

Fig. 2 Box plots of the evaluation indices for different high-resolution precipitation data

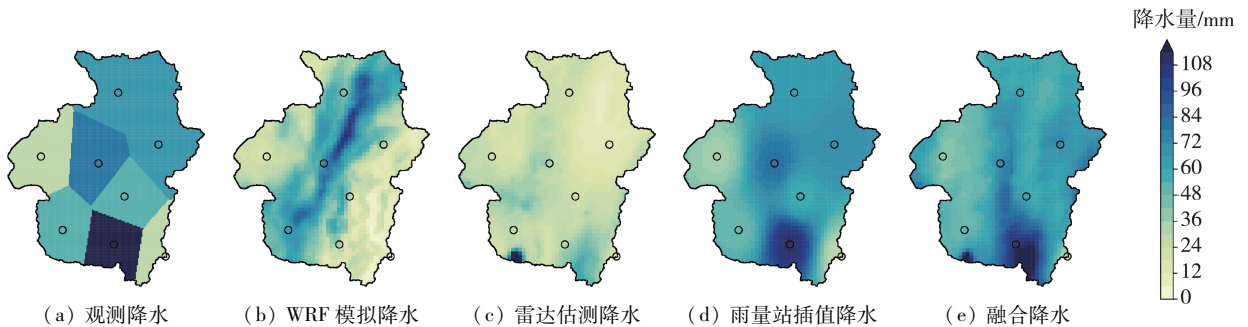


图 3 场次 1 不同降水数据的累计雨量空间分布

Fig. 3 Cumulative rainfall spatial distribution of different precipitation data in event 1

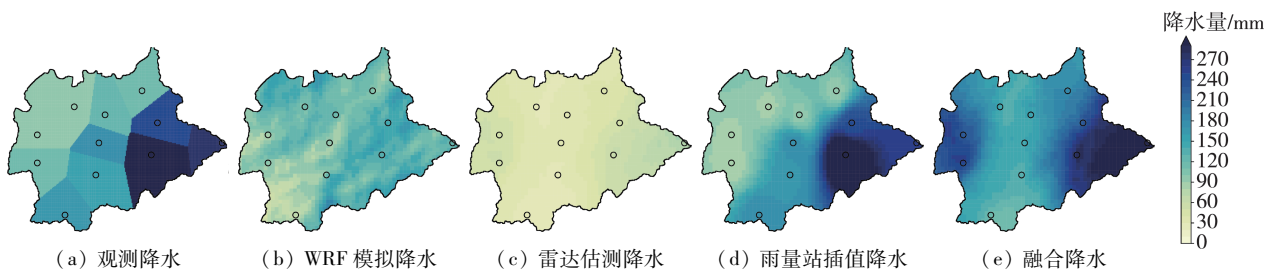


图 4 场次 5 不同降水数据的累计雨量空间分布

Fig. 4 Cumulative rainfall spatial distribution of different precipitation data in event 5

测降水一致,但由于研究区站网密度较为稀疏,插值仍无法保证雨量站周边区域雨量的一致性。当降水的空间分布相对均匀时(如场次1),插值效果与融合降水相差不大,但遇到空间分布不均的大暴雨(如场次5),则可能出现较大误差,尤其是在场次5的西部和北部区域,雨量站插值降水与观测降水和融合降水相比,降水量上呈现了更大的差异。雷达估测降水虽具有较强的空间表现,但在雨量的准确性方面较为欠缺,仍需借助雨量站观测降水通过插值融合方法进行调整^[29-30]。4种降水中,雷达估测降水的准确性与观测降水相比最差,不能直接用于耦合系统模拟,但经过雷达与雨量站数据融合后,所获得的融合降水在3种评价指标上均呈现了最好的效果,可以为耦合系统的模拟提供更为准确的降水空间信息。

4.2 WRF-Hydro 关键产汇流参数率定

考虑到雷达估测降水的精度较差,后续仅分析雨量站插值降水和融合降水对耦合系统模拟的影响。首先对 WRF-Hydro 关键产汇流参数进行率定,为提升参数解集寻优过程的收敛速度,率定过程中采用了并行动态多维搜索(parallel dynamic-ally dimensioned search, P-DDS)^[31]算法,选取克林-古普塔效率系数(Kling-Gupta efficiency, KGE)作为目标函数。在指标计算过程中, KGE 能够同时考虑量级较小的洪水过程,更有利于对洪水过程模拟效果的

综合评判^[32]。KGE 计算公式为

$$I_{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (6)$$

式中: I_{KGE} 为 KGE 值; r 为模拟系列与观测系列标准偏差的比率; α 为模拟系列与观测系列平均值的比率; β 为两个系列的相关系数。当 KGE 等于 1 时,说明模拟能力达到最佳,而当 KGE 为负值时,则认为模拟效果较差。分别将雨量站插值降水和融合降水两种降水数据作为 WRF-Hydro 的输入,对关键产汇流参数进行调参,采用 2016 年以前的雨洪过程(即场次 1~6、7、9)率定关键产汇流参数,2016 年发生的场次 8 和场次 10 用于验证。WRF-Hydro 模式中率定的参数、率定初始区间及率定结果见表 4。

除了 KGE 指标,进一步选取洪峰误差(R_p)、洪量误差(R_v)、纳什效率系数(NSE)并结合泰勒图对不同降水驱动下的洪水模拟结果进行评价。

基于两种高分辨率降水数据的 WRF-Hydro 洪水模拟评价结果见表 5,洪水模拟指标箱型图见图 5。从 NSE 和 KGE 来看,融合降水参数组的模拟结果要好于雨量站插值降水参数组,其中 NSE 均值由 0.633 增大为 0.716, KGE 均值由 0.484 增大为 0.502。由于研究流域内洪水陡涨陡落,且水库常年处于缺水状态,因此洪峰误差也是一个十分重要的评价指标。由表 5 和图 5 可以看出,融合降水参数

表 4 WRF-Hydro 关键产汇流参数率定结果

Table 4 Calibrated WRF-Hydro key runoff parameters

水文过程	参数	物理意义	参数区间	雨量站插值降水率定结果	融合降水率定结果
产流	R_{efkdt}	土壤下渗系数	0.1~3.0	1.105	1.780
坡面汇流	$O_{vrought}$	地表粗糙度	0.1~1.0	0.635	0.523
河道汇流	M_{ann}	曼宁糙率系数	0.4~3.0	1.484	1.034
	C_{bslp}	河道边坡坡度	0.1~2.0	0.444	0.508

表 5 WRF-Hydro 洪水模拟评价结果

Table 5 Flood evaluation results of WRF-Hydro simulations

雨洪场次	雨量站插值降水参数组驱动				融合降水参数组驱动				
	$R_p/\%$	$R_v/\%$	NSE	I_{KGE}	$R_p/\%$	$R_v/\%$	NSE	I_{KGE}	
率定期	场次 1	-13.0	-28.6	0.668	0.726	-7.8	-21.6	0.891	0.815
	场次 2	29.7	0.5	0.876	0.796	9.0	-10.8	0.899	0.756
	场次 3	-36.2	-6.9	0.683	0.822	-27.4	-10.4	0.804	0.857
	场次 4	-20.5	31.5	0.475	0.651	-35.7	-5.3	0.781	0.671
	场次 5	-53.2	-33.7	0.709	0.338	-43.8	-21.3	0.848	0.448
	场次 6	17.3	0.9	0.968	0.563	72.2	17.4	0.764	0.517
	场次 7	-25.5	-34.6	0.684	0.075	-17.0	-27.3	0.760	0.108
	场次 9	2.6	15.0	0.566	0.445	-2.8	-30.8	0.654	0.312
	验证期	场次 8	-71.1	-62.5	0.348	0.282	-50.9	-65.3	0.519
场次 10		-30.4	-33.9	0.199	0.312	-9.0	-41.4	0.305	0.389
均值	-20.0	-20.4	0.633	0.484	-8.6	-23.5	0.716	0.502	

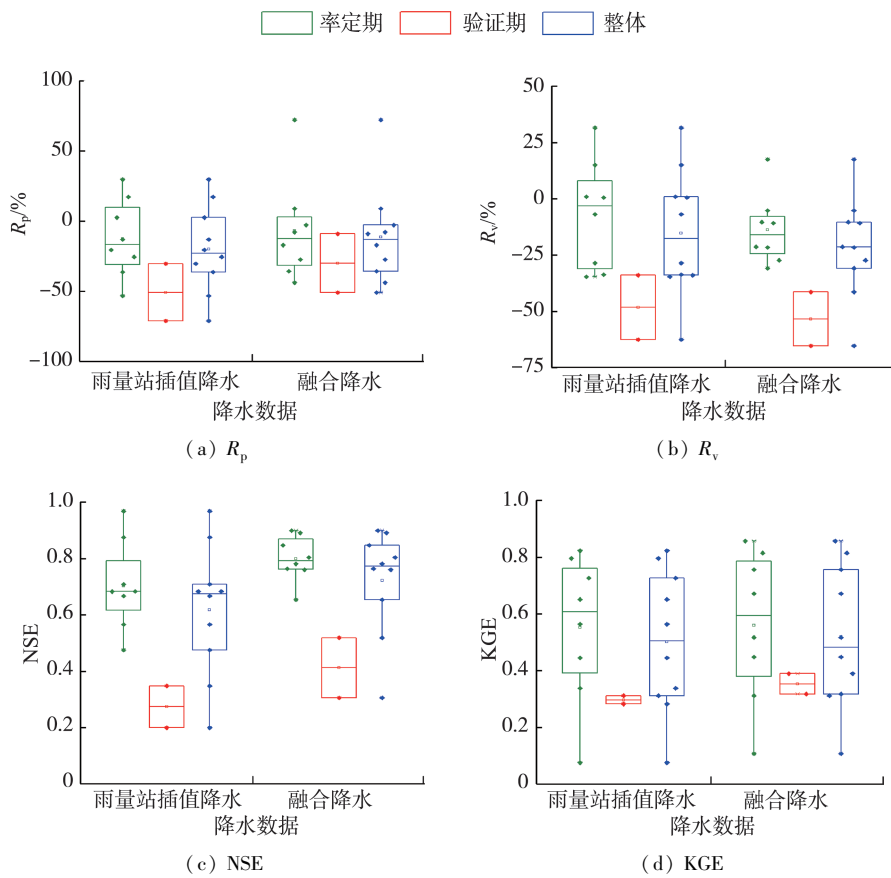


图5 WRF-Hydro 洪水模拟指标箱型图

Fig. 5 Box plots of flood evaluation indices of WRF-Hydro simulations

组与雨量站插值降水参数组驱动下的多数雨洪场次洪峰、洪量均偏小,这可能与高分辨率降水与观测降水相比整体偏小有关。与雨量站插值降水参数组相比,融合降水参数组多数场次的洪峰误差均有所降低,整体洪峰误差降低了 11.4%。此外,融合降水与雨量站插值降水相比,对较高洪峰较大洪水的过程有更好的模拟效果,尤其是场次 5 和场次 8,使用融合降水参数组驱动与使用雨量站插值降水参数组驱动相比,洪峰误差分别降低了 9.4% 和 20.2%。

4.3 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟结果

采用前面率定的关键产汇流参数组(融合降水参数组和雨量站插值降水参数组),得到使用雨量站插值降水、融合降水与 WRF 模拟降水作为 WRF-Hydro 驱动的结果如图 6(图中数字为雨洪场次编号)所示,图 7 为选取的 4 场典型雨洪过程(图中横轴是以场次雨洪的起始时刻(见表 1)为零点的时间)。

由图 6 可以见,无论采用哪种参数组,WRF 模拟降水的标准差偏离实际范围更大,且负偏离居多,以场次 3 为例,其标准差由雨量站插值降水和融合降水时的整体基本无偏差(标准差接近于 1)到采用 WRF 模拟降水驱动时的较大偏差(标准差接近于

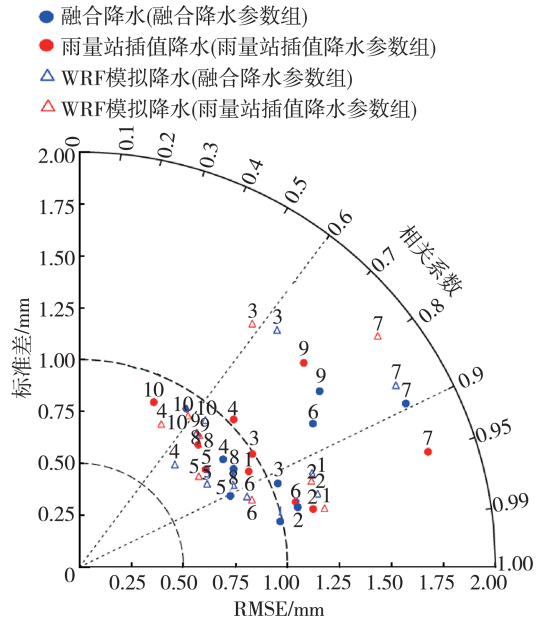


图6 WRF-Hydro 模拟结果泰勒图

Fig. 6 Taylor diagram of the WRF-Hydro simulations

1.5),其他场次的指标表现也说明了 WRF 模拟降水与高分辨率降水相比,不确定性更大。筛选的 10 场雨洪在产流过程中具有典型的混合产流特性,不同的产流主导成分(以超渗产流为主或以蓄满产流为主)导致了多样的洪水过程,尤其是引入场次 6 这

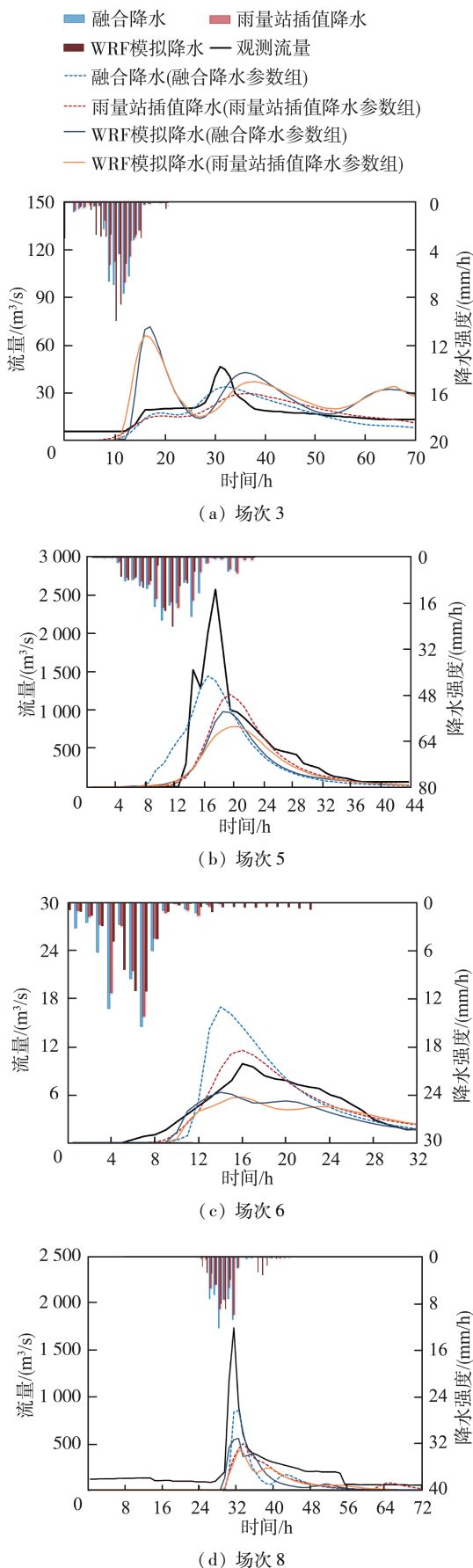


图7 不同情景下 WRF-Hydro 模拟的洪水过程
Fig. 7 Hydrographs of the WRF-Hydro simulations under different scenarios

种洪量、洪峰均较小的洪水,一定程度上导致了模拟偏差的扩大。即便如此,当降水驱动从 WRF 模拟降水换成高分辨率降水时,与 WRF 模拟降水相比,采用雨量站插值降水和融合降水作为驱动,洪水模拟效果更好(图7)。此外,结合图6和图7,由于研究区雨洪过程的复杂性,其中洪峰、洪量较小的雨洪过程波动范围更大(如场次6),不同降水驱动配合融合降水参数组/雨量站插值降水参数组对于洪峰较大的洪水过程(如场次5和场次8)均能够获得较高的模拟精度,10场洪水的整体相关性系数基本能够保持在0.6以上。

在实际应用中,高分辨率融合降水在长时段连续模拟中并不易获得,因此采用融合降水参数组,完全依靠 WRF 模式提供气象驱动,对研究区 2012 年主汛期雨洪过程开展了耦合系统试验,结果见图8。可见,通过融合降水率定的关键产汇流参数,也能在耦合系统的连续模拟中取得较好效果。

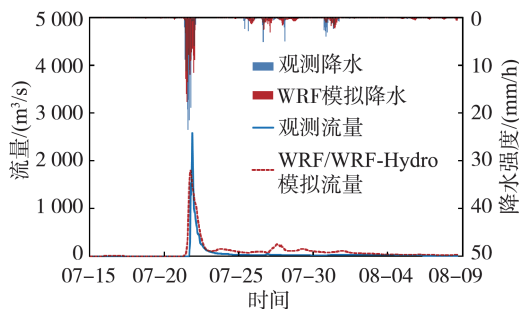


图8 WRF/WRF-Hydro 模拟的 2012 年长时段雨洪过程
Fig. 8 Hydrographs of the WRF/WRF-Hydro simulations for a long rainfall-runoff period in 2012

5 结语

本文采用融合降水作为驱动,获得了更准确的 WRF-Hydro 关键产汇流参数,有效提高了耦合系统在我国北方山区流域的适用性。WRF 模拟降水和雷达估测降水均存在一定程度的不确定性,对于研究区而言,雷达估测降水明显低估了降水量;雨量站插值降水与融合降水的误差接近,但融合降水能够更好地表现降水的时空分布,这对于 WRF-Hydro 的关键产汇流参数率定更为关键;采用融合降水作为驱动可有效改善 WRF-Hydro 的关键产汇流参数,特别是洪峰流量较大的洪水过程,其改善效果最为明显;在 WRF 模拟降水驱动下,采用融合降水率定参数的洪水模拟效果要优于雨量站插值降水,然而, WRF-Hydro 对于量级较小的洪水场次的模拟结果仍不理想。

在今后的研究中,可以针对流域特性对 WRF-Hydro 的产汇流结构进行调整,采用精度更高的观

测数据和驱动数据对影响陆面水文过程的关键水文变量做进一步的校准和验证。

参考文献:

- [1] 刘昱辰,刘佳,李传哲,等. WRF-Hydro 模式在水文模拟与预报应用中的研究进展[J]. 水电能源科学,2019,37(11):1-5. (LIU Yuchen, LIU Jia, LI Chuanzhe, et al. Advances of WRF-Hydro and its application in hydrological simulation and forecasting [J]. Water Resources and Power,2019,37(11):1-5. (in Chinese))
- [2] 占车生,宁理科,邹靖,等. 陆面水文-气候耦合模拟研究进展[J]. 地理学报,2018,73(5):893-905. (ZHAN Chesheng, NING Like, ZOU Jing, et al. A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations [J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(5):893-905. (in Chinese))
- [3] 芮孝芳. 数值天气预报的成功经验对洪水预报的启示[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):1-6. (RUI Xiaofang. Inspirations of successful experience of numerical weather prediction to flood forecasting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(1):1-6. (in Chinese))
- [4] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))
- [5] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):28-35. (in Chinese))
- [6] NAABIL E, LAMPTEY B L, ARNAULT J, et al. Water resources management using the WRF-Hydro modelling system: case-study of the Tono dam in West Africa [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 12: 196-209.
- [7] SILVER M, KARNIELI A, GINAT H, et al. An innovative method for determining hydrological calibration parameters for the WRF-Hydro model in arid regions [J]. Environmental Modelling & Software,2017,91:47-69.
- [8] 李光伟,孟宪红. WRF-Hydro 模型对三江源水文气象参数的模拟评估研究[C]//第35届中国气象学会年会: S3 高原天气气候研究进展. 北京:中国气象学会,2018:96.
- [9] 孙明坤,李致家,刘志雨,等. WRF-Hydro 模型与新安江模型在陈河流域的应用对比[J]. 湖泊科学,2020,32(3):850-864. (SUN Mingkun, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Application of WRF-Hydro modeling system in Chenhe Basin and comparison with Xin'anjiang model [J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):850-864. (in Chinese))
- [10] 顾天威,陈耀登,高玉芳,等. 基于 WRF-Hydro 模式的清江流域洪水模拟研究[J]. 水文,2021,41(3):63-68. (GU Tianwei, CHEN Yaodeng, GAO Yufang, et al. Study of flood simulation in Qingjiang River Basin based on WRF-Hydro model [J]. Journal of China Hydrology, 2021,41(3):63-68. (in Chinese))
- [11] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))
- [12] 廖一帆,林炳章,丁辉. 广东省暴雨高风险区划[J]. 水资源保护,2022,38(2):7-16. (LIAO Yifan, LIN Bingzhang, DING Hui. High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2022,38(2):7-16. (in Chinese))
- [13] 孙鸿博,汤达章,李培仁,等. 多普勒雷达非降水回波在临近预报中的应用研究[J]. 气象科学,2007,27(3):272-279. (SUN Hongpin, TANG Dazhang, LI Peiren, et al. Application of doppler weather radar to nowcasting [J]. Scientia Meteorologica Sinica,2007,27(3):272-279. (in Chinese))
- [14] 刘佳,邱庆泰,李传哲,等. 降水临近预报及其在水文预报中的应用研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(1):129-142. (LIU Jia, QIU Qingtai, LI Chuanzhe, et al. Advances of precipitation nowcasting and its application in hydrological forecasting [J]. Advances in Water Science, 2020,31(1):129-142. (in Chinese))
- [15] 田济扬,刘佳,严登华,等. 双校正模式下的大清河流域陆气耦合洪水预报研究[J]. 水文,2019,39(3):1-7. (TIAN Jiyang, LIU Jia, YAN Denghua, et al. Flood forecast in using a coupled atmospheric-hydrologic modeling system with dual correction models in Daqinghe Basin [J]. Journal of China Hydrology,2019,39(3):1-7. (in Chinese))
- [16] QIU Qingtai, LIU Jia, TIAN Jiyang, et al. Evaluation of the radar QPE and rain gauge data merging methods in Northern China [J]. Remote Sensing,2020,12(3):1-25.
- [17] LY S, CHARLES C, DEGRÉ A. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(7):2259-2274.
- [18] HABERLANDT U. Geostatistical interpolation of hourly

- precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event[J]. *Journal of Hydrology*,2007,332(1/2):144-157.
- [19] HONG S, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*,2006,134(9):2318-2341.
- [20] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization; an update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,2004,43(1):170-181.
- [21] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,1983,22(6):1065-1092.
- [22] TIAN Jiyang, LIU Jia, WANG Jianhua, et al. A spatio-temporal evaluation of the WRF physical parameterisations for numerical rainfall simulation in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China [J]. *Atmospheric Research*,2017,191:141-155.
- [23] TIAN Jiyang, LIU Jia, YAN Denghua, et al. Ensemble flood forecasting based on a coupled atmospheric-hydrological modeling system with data assimilation[J]. *Atmospheric Research*,2019,224:127-137.
- [24] TIAN Jiyang, LIU Jia, WANG Yang, et al. A coupled atmospheric-hydrologic modeling system with variable grid sizes for rainfall-runoff simulation in semi-humid and semi-arid watersheds; how does the coupling scale affects the results? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2020,24(8):3933-3949.
- [25] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF (version 3) [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research,2005.
- [26] GOCHIS D J, BARLAGE M, DUGGER A, et al. The WRF-Hydro modeling system technical description (version 5.0) [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research,2018.
- [27] LAHMERS T M, GUPTA H, CASTRO C L, et al. Enhancing the structure of the WRF-Hydro hydrologic model for semiarid environments [J]. *Journal of Hydrometeorology*,2019,20(4):691-714.
- [28] VEHTARI A, GELMAN A, GABRY J. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC [J]. *Statistics and Computing*,2017,27(5):1413-1432.
- [29] LIN P, LARRAY J H, YANG Z L, et al. Insights into hydrometeorological factors constraining flood prediction skill during the May and October 2015 Texas Hill Country flood events [J]. *Journal of Hydrometeorology*,2018,19(8):1339-1361.
- [30] CASSIRAGA E, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J J, BERENQUER M, et al. Spatiotemporal precipitation estimation from rain gauges and meteorological radar using geostatistics [J]. *Mathematical Geosciences*,2021,53(4):499-516.
- [31] TOLSON B A, SHARMA V, SWAYNE D A. A parallel implementations of the dynamically dimensioned search (DDS) algorithm [M]. Prague: Czech Republic,2007.
- [32] GUPTA H V, WAGENER T, LIU Y. Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation [J]. *Hydrological Processes*,2010,22(18):3802-3813.

(收稿日期:2022-06-23 编辑:熊水斌)

(上接第124页)

- [16] 闻昕,李精艺,谭乔凤,等. 南水北调东线工程江苏段中长期优化调度研究[J]. *水力发电学报*,2022,41(6):65-77. (WEN Xin, LI Jingyi, TAN Qiaofeng, et al. Study on medium and long-term optimal dispatching of Jiangsu section of eastern route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*,2022,41(6):65-77. (in Chinese))
- [17] OUYANG Shuo, QIN Hui, SHAO Jun, et al. Multi-objective optimal water supply scheduling model for an inter-basin water transfer system: the South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China [J]. *Water Supply*,2022,20(2):550-564.
- [18] 艾学山,冉本银. FS-DDDP方法及其在水库群优化调度中的应用[J]. *水电自动化与大坝监测*,2007,31(1):13-16. (AI Xueshan, RAN Benyin. FS-DDDP method and its application to optimal operation of groups of reservoirs [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*,2007,31(1):13-16. (in Chinese))
- [19] 冯仲恺,廖胜利,牛文静,等. 梯级水电站群中长期优化调度的正交离散微分动态规划方法[J]. *中国电机工程学报*,2015,35(18):4635-4644. (FENG Zhongkai, LIAO Shengli, NIU Wenjing, et al. Orthogonal discrete differential dynamic programming for mid-long term optimal operation of cascade hydropower system [J]. *Proceedings of the CSEE*,2015,35(18):4635-4644. (in Chinese))
- [20] 李振,吴兆丹,郭伟建,等. 南水北调东线一期工程运行成本降低途径与措施[J]. *水利经济*,2020,38(2):7-11. (LI Zhen, WU Zhaodan, GUO Weijian, et al. Approaches and measures to reduce operation costs of eastern Route Phase I Project of South-to-North Water Diversion [J]. *Journal of Economics of Water Resources*,2020,38(2):7-11. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-17 编辑:熊水斌)