

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0050

罗玮,朱阳,陈在妮,等.基于WRF模式的大渡河流域径流预报模型[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):469-476.  
LUO W, ZHU Y, CHEN Z N, et al. WRF-based runoff forecasting model for Dadu River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 469-476. (in Chinese)

# 基于 WRF 模式的大渡河流域径流预报模型

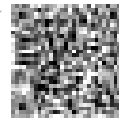
罗玮<sup>1</sup>, 朱阳<sup>1</sup>, 陈在妮<sup>1</sup>, 王军<sup>2</sup>, 胡义明<sup>2</sup>, 梁忠民<sup>2</sup>

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:**针对大渡河流域地形复杂,高差悬殊,气候垂直差异大等特点,构建基于四层嵌套网格的大渡河流域 WRF 模型;采用四维变分(4DVar)和集合卡曼滤波(EnKF)混合同化技术降低初始场误差,根据统计最优组合方法确定年内不同时期 WRF 模式参数方案集。将 WRF 输出作为预见期内新安江模型的输入,构建大渡河流域 WRF-新安江来水预报模型。选择 2010—2017 年汛期的 20 场、非汛期 10 场来水过程进行应用研究,结果表明:在预见期延长 7 d 的情况下,所建模型仍能够保证较高的预报精度。研究成果可为大渡河流域水力发电和防汛决策提供技术支撑,也可为同类研究提供借鉴。

**关键词:**气象水文耦合; WRF 模式; 新安江模型; 大渡河流域

中图分类号:TV11 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



提高预报精度和延长预见期是水文预报追求的目标<sup>[1]</sup>,然而,以落地雨为基本输入的水文预报的预见期为流域平均汇流时间,一般难以为防洪、发电等科学调度预留足够长的决策时间。鉴于此,围绕利用数值天气预报与水文模型耦合,或者将数值天气预报作为水文模型的输入进行水文预报得到了大量研究。在国外,Anderson 等<sup>[2]</sup>实现了 Eta 模式与 HEC-HMS 水文模型的结合,对美国加州北部的卡拉维拉斯河流域进行了水文预报,将有效预见期从 12 h 延长到 48 h。Amengual 等<sup>[3]</sup>将 MM5&HEC-HMS 模型应用于 Liobregat basin 的山洪预报,使有效预见期较传统的基于落地雨的洪水预报技术延长了近 48 h。为增强 WRF 对陆面水文过程的描述能力,Gochis 等<sup>[4]</sup>在 Noah 陆面模型的基础上开发了 WRF-Hydro 气象水文模拟预报系统,经过不断完善已形成一个用户导向型的完整开源耦合模型架构,为气象水文模型耦合研究与应用

提供了有力支撑。Senatore 等<sup>[5]</sup>在意大利南部流域的研究中发现,WRF/WRF-Hydro 的耦合模型比 WRF 模式能更好模拟陆面水循环过程。Ryu 等<sup>[6]</sup>在韩国山地小流域中应用 WRF/WRF-Hydro 模型,成功进行了山洪的预报。Wehbe 等<sup>[7]</sup>比较 WRF 模式与 WRF/WRF-Hydro 模型在阿联酋严重干旱环境下的水文过程模拟,认为模型能增强超干旱环境中降雨及径流的预报能力。Wagner 等<sup>[8]</sup>采用 WRF 模式与 HMS 水文模型双向耦合,对鄱阳湖流域进行了水量与能量的模拟,取得了很好的效果。我国的相关研究起步虽然相对较晚,但围绕基于气候模式预测降雨、WRF 与水文模型耦合等方面也开展了较多研究。Lu 等<sup>[9]</sup>基于 MC2 模式和新安江模型建立了气象水文预报模型,在淮河流域取得了较好的应用效果。王澄海等<sup>[10]</sup>耦合了 WRF 模式与 CLM 陆面模型,再现了 2001 年夏季中国降水和温度的时空分布特征。朱坚等<sup>[11]</sup>耦合 WRF 模

收稿日期:2020-12-08 修回日期:2021-03-08 网络出版时间:2021-03-11

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210310.1628.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(41730750);国能大渡河流域水电开发有限公司科技项目(PDP-KY-2019-001)

作者简介:罗玮(1982—),男,四川乐山人,工程师,主要从事流域梯级水库优化调度工作。E-mail:76415341@qq.com

通信作者:梁忠民(1962—),男,辽宁凤城人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:zmliang@hhu.edu.cn

式和 Noah 陆面模型,较准确地模拟和评估了淮北地区的一次土壤旱情。杨明祥等<sup>[12]</sup>通过结合 WRF 模式与 HEC-HMS 水文模型进行雅砻江洪水预报,结果表明考虑数值天气预报可以明显提高洪水预报精度。张雅琪<sup>[13]</sup>利用 WRF 产品作为水文模型输入对长江三峡入库洪水进行预报,通过将雨量量级人工综合预报与 WRF 高时空分辨率预报有机结合,可以有效提升洪水预报精度。陆桂华等<sup>[14]</sup>、包红军等<sup>[15]</sup>对基于气象水文的洪水预报问题进行了较系统的评述,并对未来的研究热点进行了展望。

整体而言,虽然我国针对基于气象水文相结合的水文预报研究取得了较多进展,但成果仍以理论方法为主,应用层面特别是用于作业预报的成果相对较少。本文以大渡河流域为研究对象,将欧洲中期天气预报中心、美国国家环境预报中心海量背景场数据引入 WRF 中尺度天气预报模式,通过尺度转换和气象水文要素衔接,建立大渡河流域来水作

业预报的 WRF-新安江模型,延长预见期,提高预报精度,为复杂地貌和气象条件的大渡河流域的来水预报提供解决方案。

## 1 大渡河流域 WRF 模式设置及参数化方案

### 1.1 预报区域设计

大渡河流域面积约 77 400 km<sup>2</sup>,地形复杂,高差悬殊,气候的垂直变化特点非常明显。为了充分解析天气尺度波动带来的过程性降水,大渡河 WRF 模型采用四层嵌套模式。四层嵌套的区域大小分别为 14 580 km×14 580 km, 9 720 km×9 720 km, 4 860 km×4 860 km, 1 620 km×1 620 km,对应的网格分辨率分别为 40.5、13.5、4.5 和 1.5 km;第一层区域基本覆盖了可能影响到大渡河流域的天气系统范围,第四层区域覆盖了整个大渡河流域,见图 1。其中,模式的初始和侧边界层条件均来自于美国 NCEP-GFS 全球的预报场数据。



图 1 大渡河流域 WRF 模型四层嵌套设计

Fig.1 Four-layer nesting design of the WRF model for Dadu River basin



图 2 4DVar 和 EnKF 混合数据同化方案

Fig.2 Diagram of 4DVAR and EnKF hybrid data assimilation scheme

### 1.2 资料同化设计

初始场误差是 WRF 模式主要的误差来源之一,资料同化技术可以利用多种观测资料相对准确地表达大气当前状态,并且能为数值预报提供动力和物理学约束下协调一致的大气运动实况分析值。使用的同化系统是美国 NCEP 的业务数据同化模式 GSI,同化数据主要是大渡河流域的 105 个雨量站逐小时累计降水的观测数据,采用四维变分(4DVar)和集合卡曼滤波(EnKF)混合数据同化的方式(Hybrid Data Assimilation)同化降水数据,生成更加准确的分析场;然后再将分析场作为背景场输出给 EnKF,由 EnKF 继续进行集合预报,进而计算背景场误差协方差矩阵,为下一次同化循环提供输入值。混合数据同化过程见图 2。

### 1.3 参数方案选择

根据预报和观测降雨数据之间的统计关系,对 WRF 模型参数进行优选,其具体做法是:预报系统每小时都会对前 6 个小时的降水预报进行评价,经过一段时间的预报积累,筛选出准确率较高且排位靠前的

参数化方案组合,将其固化为大渡河年内不同阶段的参数化方案组合。以下是通过上述方法得到的 3 套方案组合,分别应用于大渡河汛期的汛初、汛中、汛末和平枯期,其中陆面过程采用 Noah 的参数化方案。

表 1 不同时期 WRF 模式参数方案选择

Tab. 1 Selection of WRF mode parameter schemes in different periods

时期	汛初	汛中	汛末	平枯期
微物理方案	WSM5 方案	Lin 方案	Lin 方案	Lin 方案
积云对流方案	KF 方案	BMJ 方案	KF 方案	KF 方案
边界层方案	YSU 方案	YSU 方案	MYJ 方案	YSU 方案
陆面过程参数	Noah	Noah	Noah	Noah

尽管上述参数方案是通过统计方法筛选确定的,但均符合天气运动实际物理过程。以汛初参数方案为例,在汛初随着天气回暖,大渡河流域的降水主要是由一些系统性的天气过程,如南下的冷空气和本地暖湿空气相交汇,地面加热造成的局地弱对流降水等形成的。相应地,采用 WSM5 方案可以较好地刻画这一时期的天气微物理过程,WSM5 内含了冰的沉降和冰相参数化描述,方案中水物质分为水汽、云水或云冰、雨水或雪等 3 类;其中云水和云冰被作为同一类来计算,当温度低于或等于凝结点时按冰云处理,否则按云水处理,雨水和雪同理。因此,在汛初大渡河流域上空的温度比较低时,WSM5 方案可以较好地模拟云水、云冰的转化过程,且计算效率较高。类似地,KF 方案包含了水汽抬升和下沉运动的云模式,包括卷出、卷吸、气流上升和气流下沉现象,可以很好地描述汛初积云对流物理过程。考虑到汛期初期边界层内的湍流作用并不是特别显著,所以采用 YSU 参数化方案。

#### 1.4 大渡河 WRF 模型验证

为了验证大渡河流域 WRF 数值天气预报模式的预报效果,同时考虑到大渡河流域的地形特点,将流域分为 3 个区域进行逐日预报方案检验,其中一区为泸定以上的区域,二区为自泸定至溪沟的区域,三区为自深溪沟以下的区域。引入合格率指标,将预报合格条件设置为相对误差  $|D_r| \leq 40\%$ ,对预报效果进行评价。以 2017 年为例,利用 WRF 模式对大渡河流域 3 个区域未来 7 d 降水进行滚动预报,统计其合格率,结果见表 2。可以看出,整体而言 WRF 模式在研究区具有较高的预报精度,其中未来 3 d 的预报合格率约在 85% 以上,7 d 合格率约在 80% 以上。此外,三区的总体预报效果最好,二区次之,一区最差。分析认为,流域上游复杂的高山峡谷地形导致降雨变化剧烈,加之雨量站密度偏低使数据同化效果不佳等是导致一区 WRF 预报合格率降低的主要原因。

表 2 2017 年未来 7 d 预报方案合格率

Tab. 2 The qualification rate of the 7-day forecast scheme in 2017

单位: %

流域分区	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
一区	85.32	84.21	82.36	80.56	80.44	79.23	78.00
二区	87.36	85.23	83.21	83.10	82.23	82.00	80.35
三区	94.32	91.65	89.23	88.23	85.26	84.32	81.23
全区域	86.66	86.23	85.32	84.11	83.20	81.23	80.01

## 2 大渡河流域 WRF-新安江径流预报模型

### 2.1 水文模型的建立

大渡河流域整体属于湿润地区(上游少部分属于半湿润区),本次选用新安江模型作为本流域的流域水文模型。为充分利用大渡河流域已建的水雨情站网,并结合大渡河流域地理特征和水电站建设情况,在大渡河干流设置了双江口至铜街子共 12 个子流域出口,构建了全流域的分散式新安江模型。考虑到水电站调蓄对径流预报结果的影响,以下仅以不受水电站调蓄影响的上游丹巴断面为例,进行预报模型的验证研究。丹巴以上流域水系及预报模型拓扑关系见图 3。

### 2.2 新安江模型参数率定

根据新安江模型参数意义与对模型预报结果的影响,将 15 个参数分为 4 个层次:蒸发参数包括流域蒸散发折算系数、上层张力水容量、下层张力水容量、深层蒸散发折算系数;产流参数包括流域平均张力水容量、张力水蓄水容量曲线方次、不透水面积占全流域面积的比例;分水源参数包括表层自由水蓄水容量、表层自由水蓄水容量曲线方次、表层自由水蓄水库对地下水的日出流系数、表层自由水蓄水库对壤中流的日出流系数;汇流参数包括地下水消退系数、壤中流消退系数、河网蓄水消退系数、滞时<sup>[16]</sup>。大渡河流域水电站(群)具有防洪和发电双重任务,侧重的是日径流过程的预报,因此,在率定新安江日模型参数时,采用多目标准则。

(1) 水量误差最小

$$\min f_{1(\theta)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N | [Q_{\text{obs}}(i) - Q_{\text{cal}}(i)] | \quad (1)$$

(2) 全模拟期均方误差最小

$$\min f_{2(\theta)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{\text{obs}}(i) - Q_{\text{cal}}(i)]^2} \quad (2)$$

(3) 汛期流量均方误差最小

$$\min f_{3(\theta)} = \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_p} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} [Q_{\text{obs}}(i) - Q_{\text{cal}}(i)]^2} \quad (3)$$

(4) 非汛期流量均方误差最小

$$\min f_{4(\theta)} = \frac{1}{M_k} \sum_{k=1}^{M_k} \sqrt{\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} [Q_{\text{obs}}(i) - Q_{\text{cal}}(i)]^2} \quad (4)$$

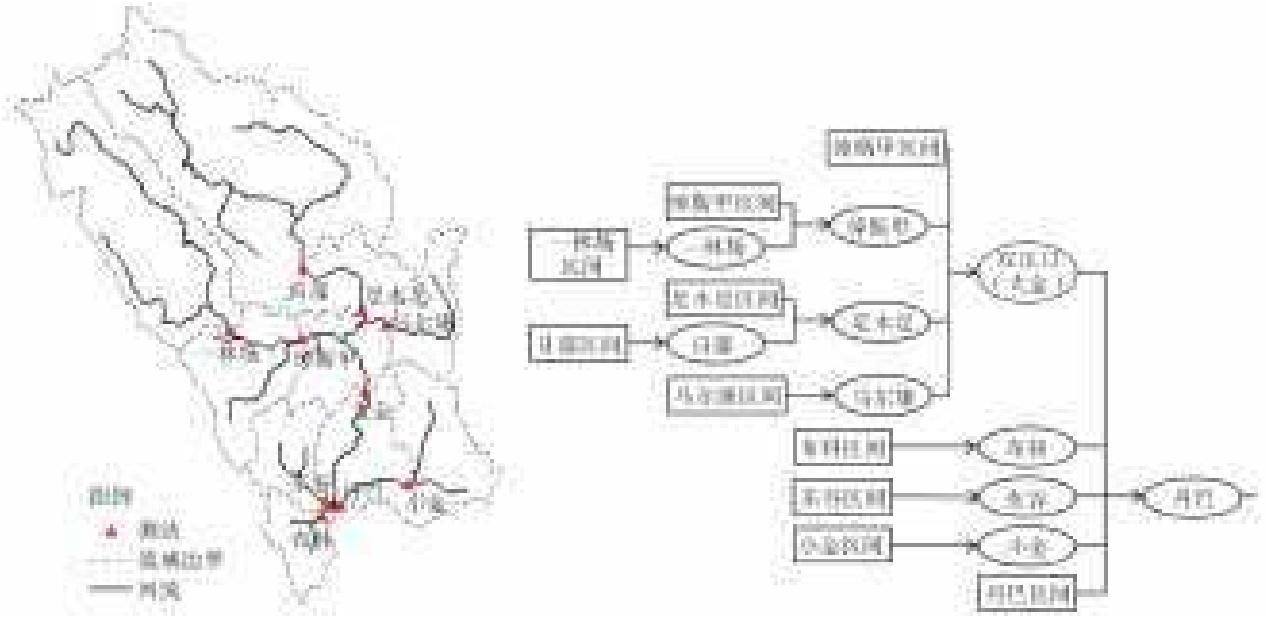


图 3 大渡河丹巴以上流域水系及预报模型拓扑关系

Fig. 3 The topological diagram of the river system and the forecasting models above Danba of the Dadu River basin

(5) 确定性系数

$$R_{DC} = \frac{\sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - Q_c(t)]^2}{\sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (5)$$

式中： $Q_{obs}$  为实测流量， $m^3/s$ ； $Q_{cal}$  为模型计算流量， $m^3/s$ ； $N$  为时段流量个数； $t$  为时间； $M_p$  为汛期过程个数； $M_f$  为非汛期过程个数； $n_j$  为第  $j$  个非汛期过程时段流量个数； $n_k$  为第  $k$  个非汛期过程时段流量个数； $\theta$  代表新安江模型参数集。

由于大渡河流域水雨情测报系统建设年代较晚，多数水雨情站仅有 2010 年至今的资料，因此选取

2010—2017 年的逐日实测水文气象数据进行模型率定与验证。其中，以 2010—2015 年为模型率定期，2016—2017 年为模型验证期，模型精度统计结果见表 3。由表 3 可知，在率定期的 7 个年份中，径流深相对误差在 20% 以内的，汛期（6—9 月）有 7 a，非汛期（10 月—次年 5 月）有 6 a，合格率分别为 100% 和 86%，平均确定性系数分别为 0.90 和 0.86；在验证期的 3 个年份中，汛期和非汛期的径流深相对误差均在 20% 以内，合格率均为 100%，平均确定性系数分别为 0.89 和 0.86。由此可见，所建立的新安江模型具有较高精度，可用于研究区日径流过程的作业预报。

表 3 丹巴断面新安江模型参数率定与验证结果

Tab. 3 Calibration and verification results of Xin'anjiang model parameters at Danba cross-section

时期	年份	汛期			确定性系数	非汛期			确定性系数
		实测径流深/ mm	计算径流深/ mm	径流深相对 误差/%		实测径流深/ mm	计算径流深/ mm	径流深相对 误差/%	
率定期	2009	171	178	3.84	0.93	321	346	7.69	0.87
	2010	159	151	-5.30	0.89	303	288	-4.89	0.91
	2011	174	178	2.30	0.91	264	291	10.11	0.90
	2012	201	213	6.08	0.87	403	396	-1.77	0.88
	2013	159	169	6.56	0.85	234	305	30.16	0.58
	2014	153	150	-1.95	0.95	355	338	-4.78	0.94
	2015	166	160	-3.71	0.93	288	298	3.38	0.91
验证期	2016	210	200	-4.58	0.82	203	214	5.61	0.80
	2017	234	239	2.28	0.96	318	328	3.26	0.88
	2018	215	214	-0.44	0.89	343	347	1.13	0.91

2.3 预报案例研究

以大渡河流域 WRF 模式的未来降雨为输入，

以率定的新安江模型为预报方案，选取大渡河干流丹巴断面进行预报研究。由于非汛期的降雨日

少于汛期,所以从 2010—2017 年的资料中分别选取了 20 场汛期、10 场非汛期的典型来水过程进行未来 7 d 的逐日径流预报,并将其与不考虑预见期降雨(仅使用前期实测降雨)的预报进行对比,即

将未来 7 d 视作无降雨处理,结果分别见表 4、5;并以 2012 年和 2017 年典型过程为例,汛期和非汛期预报结果过程线分别如图 4、5 和图 6、7 所示。

表 4 丹巴断面 2010—2017 年汛期代表性来水过程预报结果精度评定

Tab. 4 Accuracy evaluation of forecast results for typical inflow events of Danba cross-section during the flood seasons from 2010 to 2017

编号	实测 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	考虑未来降雨预报的径流预报					不考虑未来降雨预报的径流预报				
		预报 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	峰值相对 误差/ %	7 d 总径流 深相对误差/ %	峰值 滞时/ d	确定性 系数	预报 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	峰值相对 误差/ %	7 d 总径流 深相对误差/ %	峰值 滞时/ d	确定性 系数
20100628	2 091	2 024	-3.20	3.66	0	0.86	1878	-10.18	-0.71	-4	0.73
20100823	1 542	1 621	5.15	9.52	1	0.74	1 494	-3.09	1.40	-1	0.88
20110616	2 078	1 937	-6.78	-2.69	0	0.84	1 758	-15.42	-12.31	-5	0.69
20110714	2 392	2 512	5.00	3.32	0	0.87	1 979	-17.27	-8.69	0	0.70
20120614	2 724	3 125	14.71	-1.20	0	0.69	2 234	-17.98	-8.14	0	0.52
20120630	3 621	3 349	-7.51	4.61	-1	0.89	3 217	-11.17	-18.67	-4	0.45
20120714	3 650	3 577	-2.01	-4.29	1	0.96	2 889	-20.86	-28.62	-4	0.62
20120818	1 933	1 966	1.73	-9.54	1	0.90	1 737	-10.13	-24.17	-4	0.87
20130624	1 523	1 772	16.37	14.34	1	0.79	1 792	17.69	4.39	-1	0.79
20130715	2 816	2 492	-11.52	-13.41	1	0.85	2 151	-23.60	-17.26	-3	0.78
20140611	3 640	3 371	-7.40	-5.12	1	0.88	3 113	-14.48	-13.26	-3	0.81
20140627	3 870	3 773	-2.50	-6.81	-1	0.88	2 788	-27.95	-22.89	-1	0.70
20140820	2 286	2 369	3.64	-0.20	0	0.95	1 710	-25.19	-13.07	-2	0.75
20150617	2 519	2 481	-1.51	4.56	0	0.92	1 933	-23.27	-7.99	-4	0.64
20150704	3 901	4 134	5.97	2.95	-1	0.95	3 255	-16.56	-0.98	0	0.88
20150817	1 631	1 731	6.15	1.56	0	0.93	1 671	2.46	3.34	-2	0.91
20160714	2 580	2 467	-4.39	2.49	1	0.96	2 359	-8.58	-21.43	0	0.89
20160726	1 782	1 937	8.70	10.21	0	0.82	1 601	-10.18	-13.00	0	0.80
20170607	4 702	5 008	6.51	3.83	0	0.94	3 972	-15.52	-18.05	-1	0.81
20170705	2 624	2 713	3.40	-4.79	0	0.88	2 368	-9.74	-8.09	-1	0.85

表 5 丹巴断面 2010—2017 年非汛期代表性来水过程预报成果精度评定

Tab. 5 Accuracy evaluation of forecast results for typical inflow events of Danba cross-section during the non-flood seasons from 2010 to 2017

编号	实测 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	考虑未来降雨预报的径流预报					不考虑未来降雨预报的径流预报				
		预报 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	峰值相对 误差/ %	7 d 总径流 深相对误差/ %	峰值 滞时/ d	确定性 系数	预报 峰值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	峰值相对 误差/ %	7 d 总径流 深相对误差/ %	峰值 滞时/ d	确定性 系数
20100502	821	820	-0.12	4.77	1	0.85	797	1.12	-2.89	-1	0.83
20120423	943	909	-3.60	-3.86	0	0.93	856	-3.83	-9.21	0	0.86
20121003	2 232	2 137	-4.25	1.34	2	0.95	1 524	-17.67	-31.70	-4	0.53
20130514	1 022	1 052	2.90	2.40	-2	0.89	947	-10.09	-7.37	-2	0.77
20131014	824	949	15.16	22.22	1	0.64	1 004	4.43	21.87	-3	0.61
20150424	550	573	4.15	0.79	0	0.90	494	-5.88	-10.17	-1	0.8
20160505	755	799	5.78	12.32	0	0.93	789	-4.24	4.55	0	0.89
20161006	2 638	2 251	-14.67	-8.45	-1	0.57	2 145	-21.22	-18.70	-2	0.79
20170218	244	243	-0.41	-0.14	1	0.93	240	-1.64	-1.70	1	0.91
20171013	2 063	2 053	-0.50	4.09	0	0.98	2 030	-11.91	-1.59	-1	0.87

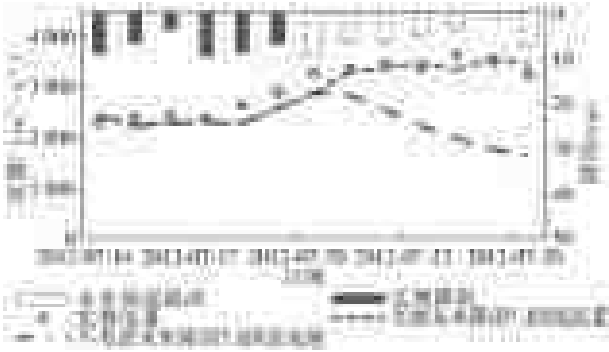


图 4 2012 年汛期 20120714 号来水预报过程线

Fig. 4 20120714# inflow forecast hydrograph in 2012 flood season

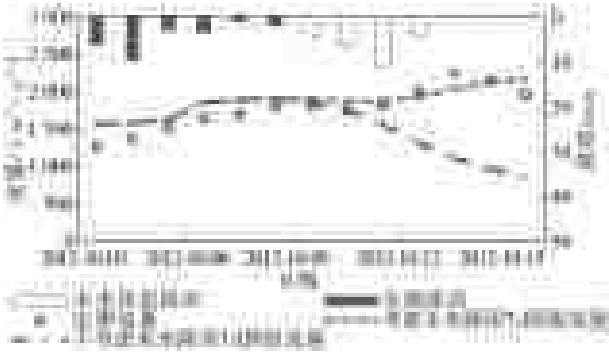


图 5 2012 年非汛期 20121003 号来水预报过程线

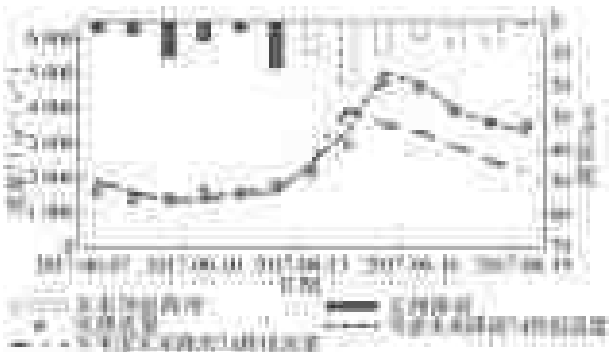
Fig. 5 20121003# inflow forecast hydrograph  
in 2012 non-flood season

图 6 2017 年汛期 20170607 号来水预报过程线

Fig. 6 20170607# inflow forecast hydrograph in 2017 flood season



图 7 2017 年非汛期 20170218 号来水预报过程线

Fig. 7 20170218# inflow forecast hydrograph  
in 2017 non-flood season

对汛期 20 场来水过程的预报结果表明:若考虑 WRF 的未来降雨输出,新安江模型预报的峰值

和 7 d 总径流深相对误差均在 20% 以内,合格率均为 100%;若不考虑未来降雨预报,新安江模型计算的峰值相对误差在 20% 以内的有 15 场,合格率为 75%,7 d 总径流深相对误差在 20% 以内的有 16 场,合格率为 80%,且峰值和 7 d 总径流深均存在整体偏小、峰值误差较大的情况。对考虑和不考虑未来降雨预报的两种情况,汛期来水过程的确定性系数分别为 0.86 和 0.75。对非汛期 10 场来水过程的预报,考虑和不考虑未来降雨预报,新安江模型计算的峰值相对误差在 20% 以内的分别有 10 场和 9 场,合格率分别为 100% 和 90%;径流深相对误差在 20% 以内的分别有 9 场和 8 场,合格率分别为 90% 和 80%;平均确定性系数分别为 0.86 和 0.79。

综上所述,不管对汛期还是非汛期,考虑了预见期降雨的径流预报,其精度较不考虑预见期降雨的情况均有提升,但汛期精度提高的幅度大于非汛期。这是因为对于汛期的雨洪过程,无论是降雨日数还是降雨量一般都多于非汛期,所以是否使用预见期降雨量对最终径流预报的影响,汛期大于非汛期,对汛期径流预报精度的提升作用也高于非汛期。

### 3 结论与讨论

以服务于大渡河流域防汛和发电的科学决策为目的,本文从气象水文相结合角度,建立了面向实时作业预报的大渡河流域来水过程预报模型,主要研究结论如下。

(1)采用四层嵌套网格 WRF 模型,解决因大渡河流域地形起伏大、气候垂直变异剧烈而带来的微气候难以模拟问题。采用四维变分(4DVar)和卡曼滤波(EnKF)混合同化技术,降低 WRF 模型初始场误差;采用分区分期的方式统计最优 WRF 模式参数方案集,最终实现未来 7 d 降雨预报,预报精度(合格率)整体达 80% 以上。

(2)构建了大渡河 WRF-新安江来水过程预报模型,通过 30 场(汛期 20 场、非汛期 10 场)来水过程应用的验证,结果表明:汛期洪峰和洪量预报合格率均达到了 100%,非汛期洪峰和洪量预报合格率分别达到了 100% 和 90%,精度比不考虑预见期降雨的预报相比有明显提升。研究成果已应用于大渡河流域的来水过程预报,在实际工作中发挥作用。

本文建立的 WRF-新安江模型虽然已成功应用于大渡河流域的实时水文作业预报,为地形复杂、高

差悬殊、气候垂直变化显著的流域水文预报提供借鉴,但模型的预报精度仍有待提升。未来随着水文气象资料的累积,需在更精细化的 WRF 和流域水文模型方面做深入研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 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. (ZHAO R J. Watershed hydrological simulation: Xin'anjiang model and northern Shaanxi model[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1984. (in Chinese))
- [2] ANDERSON M L, CHEN Z Q, KAVVAS M L, et al. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(4): 312-318. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(312).
- [3] AMENGUAL A, ROMERO R, GÓMEZ M, et al. A hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(3): 282. DOI: 10.1175/JHM577.1.
- [4] GOCHIS D J, BARLAGE M, DUGGER A, et al. The WRF-Hydro modeling system technical description (Version 5.0)[R]. NCAR Technical Note. Available online at: <https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydroV5TechnicalDescription.pdf>.
- [5] SENATORE A, MENDICINO G, GOCHIS D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7(4): 1693-1715. DOI: 10.1002/2015MS000510.
- [6] RYU Y, LIM Y J, JI H S, et al. Applying a coupled hydrometeorological simulation system to flash flood forecasting over the Korean Peninsula[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 53(4): 421-430. DOI: 10.1007/s13143-017-0045-0.
- [7] WEHBE Y, TEMIMI M, WESTON M, et al. Analysis of an extreme weather event in a hyper-arid region using WRF-Hydro coupling, station, and satellite data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(6): 1129-1149. DOI: /nhess-19-1129-2019.
- [8] WAGNER S, FERSCH B, YUAN F, et al. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: Development, application, and analysis of WRF-HMS[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 3187-3211. DOI: 10.1002/2015wr018185.
- [9] LU G H, WU Z Y, LEI W, et al. Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system[J]. *Science in China*, 2008, 51(7): 1049-1063.
- [10] 王澄海, 孙超. 一个基于 WRF+CLM 区域气候模式(WRFC)的建立及初步试验[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1626-1637. (WANG C H, SUN C. Design and preliminary test of the regional climate model (WRFC) based on coupling WRF and CLM[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(6): 1626-1637. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00021.
- [11] 朱坚, 杨涛, 黄丹青, 等. 基于 WRF-NoahLSM 耦合模型的江苏省淮北区土壤旱情评估[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(10): 10-13, 5. (ZHU J, YANG T, HUANG D Q, et al. Evaluation of soil drought in HuaiBei area of Jiangsu Province based on WRF noahls coupling model[J]. *Hydropower Energy Science*, 2014, 32(10): 10-13, 5. (in Chinese))
- [12] 杨明祥, 蒋云钟, 王忠静, 等. 雅砻江流域 WRF 模式构建及应用[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(4): 349-354. (YANG M X, JIANG Y Z, WANG Z J, et al. Building and application of WRF model in Yalong River basin[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2016, 49(4): 349-354. (in Chinese)) DOI: 10.11784/tdxbz201412079.
- [13] 张雅琦. 长江上游流域短期水文气象耦合预报技术研究[J]. *水电与新能源*, 2016(6): 1-6, 10. (ZHANG Y Q. On the short-term hydrological and meteorological coupling forecasting techniques for upper Yangtze River basin[J]. *Hydropower and New Energy*, 2016(6): 1-6, 10. (in Chinese)) DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2016.06.001.
- [14] 陆桂华, 吴志勇, 雷 Wen, 等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 847-852. (LU G H, WU Z Y, LEI W, et al. Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real-time flood forecast[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 847-852. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2006.06.016.
- [15] 包红军, 王莉莉, 沈学顺, 等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. *气象*, 2016, 42(9): 1045-1057. (BAO H J, WANG L L, SHEN X S, et al. A review: Advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology [J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(9): 1045-1057. (in Chinese)) DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.002.
- [16] 包为民. 水文预报[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (BAO W M. *Hydrological Forecast(Third Edition)* [M]. 3rd ed. Beijing: China Water&Power Press, 2006. (in Chinese))



**WRF-based runoff forecasting model for Dadu River basin**LUO Wei<sup>1</sup>, ZHU Yang<sup>1</sup>, CHEN Zaini<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, HU Yiming<sup>2</sup>, LIANG Zhongmin<sup>2</sup>(1. *Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;*2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** Hydrometeorological forecasting is a major measure to improve the accuracy and extend the lead time of runoff prediction for a large watershed, and remains a challenge to hydro-sciences. Although much progress has been made in the research of hydrological forecasting based on the combination of meteorology and hydrology in China, the results are mainly focused on theoretical methods, and there are relatively few highlights on the application level, especially for operational forecasts. Dadu River basin has the characteristics of complex topography, great height change and vertical climate variations, which brings extra difficulties for the hydrometeorological forecasting. Therefore, the Dadu River basin is taken as the research object, aiming to serve the scientific decision-making of flood control and power generation for the basin through scale conversion and the connection of meteorological and hydrological elements, and establishes a runoff forecast model for operational purpose based on the meteorologic-hydrologic coupling.

A four-layer nested grid WRF model was used to solve the difficulties of microclimate simulation caused by the large changes in topography and severe vertical variability of the Dadu River basin. Assimilation technologies including four-dimensional variational (4DVAR) and Ensemble Kalman filter (EnKF) hybrid were used to reduce the initial meteorological field error. The statistical optimal combination was employed to determine the model parameters of WRF in different periods of the year. The Xin'anjiang model was employed as the catchment-scale hydrological model since the Dadu River basin is a wet region (although there is a small part of the semi-humid area in the upper reaches). The outputs of future rainfall from WRF were used as the inputs of the Xin'anjiang model. Therefore, a WRF-Xin'anjiang model was established for runoff prediction for the Dadu River basin.

The constructed WRF model based on the four-layer nested grid for Dadu River basin can forecast rainfall in the next 7 days, and the overall forecast accuracy (qualification rate) reached over 80%. For the Xin'anjiang model, the qualified rates in flood season and non-flood season were 100% and 86%, respectively, and the average determination coefficients were 0.90 and 0.86, respectively. In the verification period, the qualified rates in flood season and non-flood season were both 100%, and the average determination coefficients were 0.89 and 0.86, respectively. For the WRF-Xin'anjiang model, 20 flood events were chosen in flood season and 10 flood events in non-flood season from 2010 to 2017 to verify the model. Results showed that the qualified rates of flood peak and flood volume in flood season both reached 100%, and the qualified rates of flood peak and flood volume in non-flood season reached 100% and 90%, respectively. It is indicated that with an extension of the lead time to extra 7 days, the WRF-Xin'anjiang model established could still guarantee a higher forecast accuracy.

The WRF-Xin'anjiang model established can provide a reference for hydrological forecasting of the basin with complex terrain, wide height difference and significant vertical climate change, and provide technical support for hydropower generation and flood control decision-making of Dadu River basin. At the same time, with the accumulation of hydrometeorological data in the future, it is necessary to do in-depth research on more refined WRF and hydrological model for the basin.

**Key words:** meteorologic-hydrological coupling; WRF model; Xin'anjiang model; Dadu River basin

☆ 全面节水,合理分水,管住用水,科学调水

☆ 人人参与节水爱水,共建绿水青山家园