

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.001

ECMWF 集合预报在淮河蒋家集流域的应用

叶金印^{1,2}, 顾玮琪², 李巧玲², 李致家², 姚 成², 董小涛³

(1. 淮河流域气象中心, 安徽 合肥 230031; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 水利部综合事业局, 北京 100053)

摘要: 基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合降水预报产品(预见期为10 d), 提取淮河蒋家集以上流域的预报数据并进行降尺度处理, 驱动洪水预报模型, 对2008年8月的一次洪水过程进行模拟预报。为探讨ECMWF集合降水预报驱动洪水预报模型的应用效果, 将模拟预报的结果与仅采用地面降水观测数据驱动模型的模拟结果进行对比分析。结果表明: 采用ECMWF集合降水预报后, 洪水模拟预报精度有明显改进, 可使洪水预见期提前48 h; 洪水模拟预报流量过程线能刻画洪水预报的不确定性范围, 可为防洪减灾提供科学决策依据。

关键词: 洪水预报; ECMWF集合预报; 新安江模型; 洪水预见期; 淮河蒋家集以上流域

中图分类号: TU122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)06-0471-06

Application of ECMWF ensemble forecasts in Jiangjiaji Catchment of Huaihe River Basin

YE Jinyin^{1, 2}, GU Weiqi², LI Qiaoling², LI Zhijia², YAO Cheng², DONG Xiaotao³

(1. Huaihe River Basin Meteorological Center, Hefei 230031, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: Using an ensemble forecast product from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) with a ten-day lead time, forecast data in the Jiangjiaji Catchment of the Huaihe River Basin were extracted and disaggregated to drive a flood forecast model to simulate a flood event in August 2008. In order to study the effect of the flood forecast model driven by the ECMWF ensemble data, the simulated results from this model and the results from a model driven simply by the field precipitation data were compared and analyzed. The results show that the flood forecasting accuracy was improved using the ECMWF ensemble forecasts, and the lead time was extended 48 h. The forecasted discharge hydrographs can provide the uncertainty range of forecast discharges, which provides a scientific decision basis for flood control and disaster mitigation.

Key words: flood forecasting; ECMWF ensemble forecasting; Xin'anjiang model; flood lead time; Jiangjiaji Catchment of Huaihe River Basin

降水是洪水预报最重要的信息之一^[1-2], 目前广泛使用的降水资料主要是水文站/雨量站观测资料和雷达测雨数据^[3]。采用数值天气预报模式降水预报产品, 已成为延长洪水预报预见期的主要手段^[4], 降水预报精度及预见期的长短是影响洪水预报水平的主要因素。集合天气预报作为一种新的数值预报技术^[5], 其本质是将确定性天气预报向大气变量的完全概率预报转变, 为降水预报、径流预报提供了一种新思路和方法^[6]。水文集合预报在国外已广泛应用多年, 试验成果表明集合预报系统(Ensemble Prediction Systems, EPS)可以服务于洪水预报预警和防灾减灾决策支持, 而我国在这方面的研究相对较少^[7-10]。

收稿日期: 2015-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(41201028, 41130639); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201205)

作者简介: 叶金印(1968—), 男, 安徽桐城人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文气象研究。E-mail: yejinyin@sina.com

笔者选择淮河蒋家集以上流域作为研究流域,采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)50 个成员集合降水预报资料(预见期为 0~240 h)驱动洪水预报模型,与仅采用地面降水观测资料驱动洪水预报模型的模拟结果进行对比分析,探讨利用天气预报的预见期延长洪水预见期并改进洪水预报精度方面的实际应用效果。

1 流域概况与数据处理

史灌河发源于大别山,在蒋家集以上分为灌河和史河,是淮河南岸最大的支流和主要的洪水来源之一。灌河上游建有鲇鱼山水库,控制流域面积为 924 km²,总库容为 9.16 亿 m³。史河上游的梅山水库,控制流域面积为1970 km²,总库容为 23.37 亿 m³。流域位于北纬 31°12′~31°18′、东经 115°17′~115°55′,扣除这 2 个水库集水面积后,该流域面积约为3 036 km²。鲇鱼山水库、梅山水库在大洪水时放水泄流,本文将这 2 个水库放水作为流域入流,进行汇流演算至流域出口。蒋家集站为史河、灌河汇合后的控制站,根据淮河蒋家集以上流域内水文站布设和自然流域边界,将蒋家集站作为流域出口,用 ArcGIS 泰森多边形分块法,将流域划分为 8 个子流域。采用的 ECMWF 50 个集合降水预报成员的空间分辨率为 10 km×10 km,据此对流域进行栅格单元划分。流域分块及栅格单位划分如图 1 所示。

2 洪水预报模型构建

2.1 模型选择

分布式水文模型一般要求栅格空间分辨率为 1 km×1 km^[11],集合降水预报产品虽然也是栅格数据,但空间尺度要大得多,将其与分布式水文模型进行耦合,一般要进行降尺度处理。但降尺度处理又带来新的误差传递和不确定性问题,这是气象水文耦合技术上的难点之一^[12]。研究表明,水文模型的空间分辨率应与降水的空间尺度大小相近^[12-13]。基于子流域的水文模型,其子流域大小一般为 200~800 km²,空间分辨率与 ECMWF 集合降水预报产品空间分辨率(10 km×10 km)相近,可先将子流域内的降水预报产品资料按面积比例合并并尺度转换,再进行耦合应用^[14]。由河海大学研制的基于子流域的新安江模型^[15],在湿润和半湿润地区都有广泛的应用。蒋家集以上流域属于湿润流域,是新安江模型适用的流域。因此,选用新安江模型建立气象水文耦合洪水预报系统,以减少雨量尺度转换导致的误差传递。

2.2 参数率定

构建的气象水文耦合洪水预报系统选用新安江模型对蒋家集以上流域进行降雨径流预报,采用马斯京根法进行河道洪水演算。鲇鱼山水库和梅山水库的出库流量作为河道入流进行洪水演算并与区间河道洪水演算叠加,从而得到蒋家集出口断面的洪水过程。采用 SCE-UA 自动优选法率定新安江模型参数,根据 2008—2011 年淮河流域历史洪水资料进行参数率定,并选取 2012 年 2 场洪水进行模型检验,时间步长取为 1 h。参数率定结果见表 1。

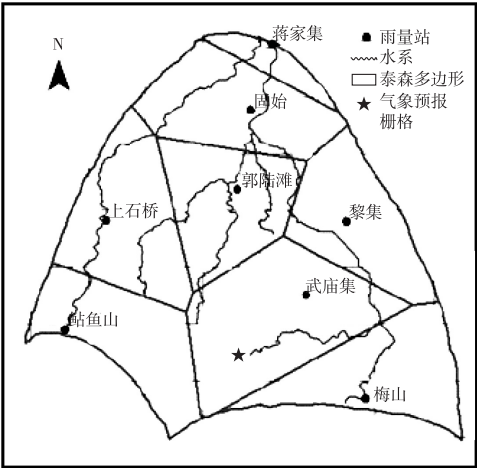


图 1 蒋家集以上流域分块示意图

Fig. 1 Sketch of Jiangjiaji Catchment

表 1 蒋家集新安江模型参数

Table 1 Parameters of Xin'angjiang model for Jiangjiaji Catchment

蒸散发 折算系数	流域蓄水容量 分布曲线指数	深层散发 系数	张力 水容量/mm	上层张力 水容量/mm	下层张力 水容量/mm	不透水 面积比例	自由 水容量/mm
0.82	0.4	0.2	140	20	60	0.01	35
流域自由水容量 分布曲线指数	地下水 出流系数	壤中流 出流系数	地下水 消退系数	壤中流 消退系数	河道汇流的 马斯京根法系数	河网水流 消退系数	河网汇流 滞时/h
1.5	0.58	0.12	0.98	0.59	0.2	0.35	12

2.3 模拟结果

新安江模型模拟结果见表 2,根据水文情报预报规范^[3],模拟的洪峰、峰现时间全部合格,径流深 6 场合格,合格率为 85.7%,达甲级预报精度;各场洪水的确定性系数都在 0.75 以上,达乙级预报精度;洪水过程线模拟结果见图 2,模拟效果较好。

表 2 蒋家集新安江模型模拟结果特征值统计
Table 2 Statistics of simulation results of Xin'anjiang model for Jiangjiaji Catchment

模拟阶段	洪号	实测径流深/ mm	预报径流深/ mm	洪量相对误差/ %	实测洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	预报洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰相对误差/ %	峰现误差/ h	确定性系数
率定	20080813	93.6	106.7	14.1	920	739	-19.6	-3	0.75
	20080828	67.1	75.8	13.0	620	556	-10.3	2	0.84
	20100715	163.2	146.4	-10.3	1660	1455	-12.3	-8	0.82
	20100824	49.4	43.1	-12.8	490	416	-15.0	-3	0.78
	20110810	34.1	31.4	-8.0	340	356	4.7	7	0.91
检验	20120809	40.6	49.1	20.8	410	468	14.3	3	0.75
	20120907	60.9	58.9	-3.2	780	878	12.6	4	0.90

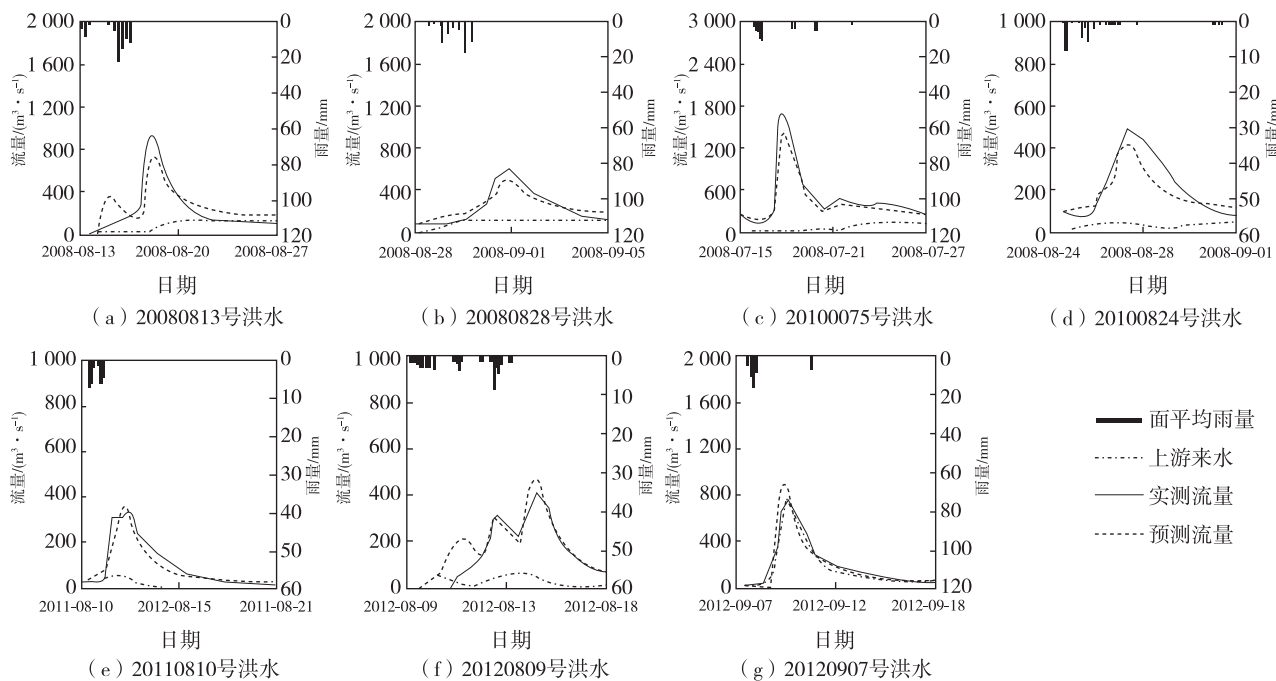


图 2 各场次洪水实测与模拟流量过程线
Fig. 2 Simulated and observed discharge hydrographs of different flood events

3 ECMWF 集合预报驱动的洪水预报检验

利用 ECMWF 集合降水预报 50 个成员分别驱动构建的气象水文耦合洪水预报系统,每个集合成员产生相应的洪水模拟预报过程。以淮河 20080828 号洪水为例,进行洪水预报性能及其不确定性研究,分析集合预报在淮河蒋家集流域的应用效果。

3.1 集合预报降雨分析

ECMWF 集合降水预报 50 个成员分别对应 50 组分辨率为 10 km×10 km 的雨量预报栅格数据,最长预见期为 240 h,前 96 h 为 3 h 间隔的降雨累计时段(共 32 个时段),96~240 h 为 6 h 间隔的降雨累计时段(共 24 个时段)。按照图 1 中 8 个子流域的分块面积进行雨量降尺度处理,并对累计时段降雨进行时间平均内插,形成 1 h 间隔 8 个子流域面雨量降雨数据,将其作为蒋家集以上流域新安江模型的输入。图 3 为 50 个预报成员在 2008 年 8 月 26 日及 28 日 20:00 发布的未来 10 d 的降雨量预报。

集合预报降水过程整体上与地面观测降水过程相似,量值上存在一定程度的误差。8 月 26 日 20:00 发布的集合预报降雨过程与 28 日趋势相似,但 28 日的预报成员比 26 日更能准确地预报出 29 日、30 日间的降

雨。由于预见期缩短,28日的降雨过程相对而言更加集中,精度有明显提高。

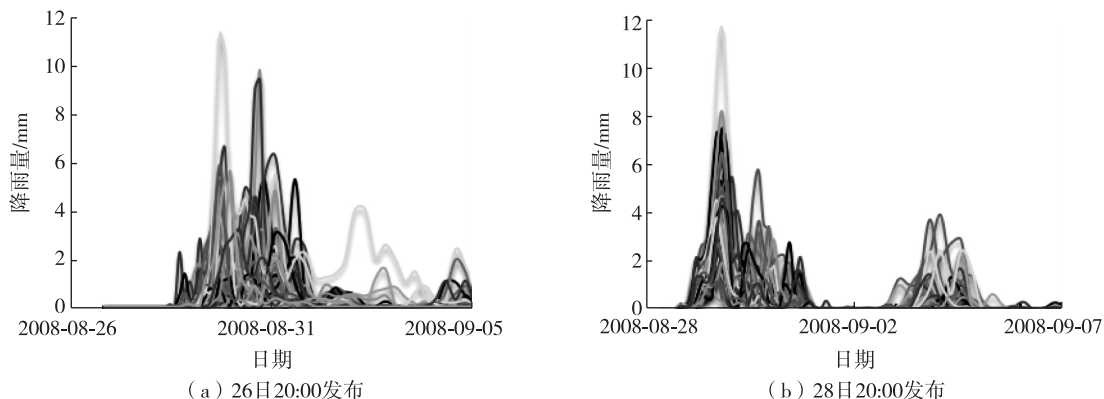


图3 2008年8月集合预报未来10d的50条降雨过程线

Fig. 3 Fifty precipitation hydrographs using ensemble forecasts from August 2008 with a ten-day lead time

另外,一些预报成员预报出9月4日会出现弱降水,而实际上地面观测数据并没有捕捉到这一降雨信号,地面流量过程线也没有明显的涨落。可见,个别集合预报成员的降雨预报可能存在一定误差。如果采用某一个集合预报成员的预报降雨,进行单一的确定性数值天气预报,难免会出现空报、漏报以及错报的情形,使洪水预报进入一个误区。集合降水预报考虑了大气初始条件和边界条件的不确定性,与单一确定性预报相比,它不仅刻画降雨的概率,而且可以提供更多的降雨信息,为洪水概率预报提供了新的思路^[5]。

3.2 集合预报模型模拟分析

3.2.1 过程线

应用ECMWF在2008年8月26—29日发布的集合预报降雨量分别驱动新安江模型,得到蒋家集站对应的流量预报过程线,如图4所示。

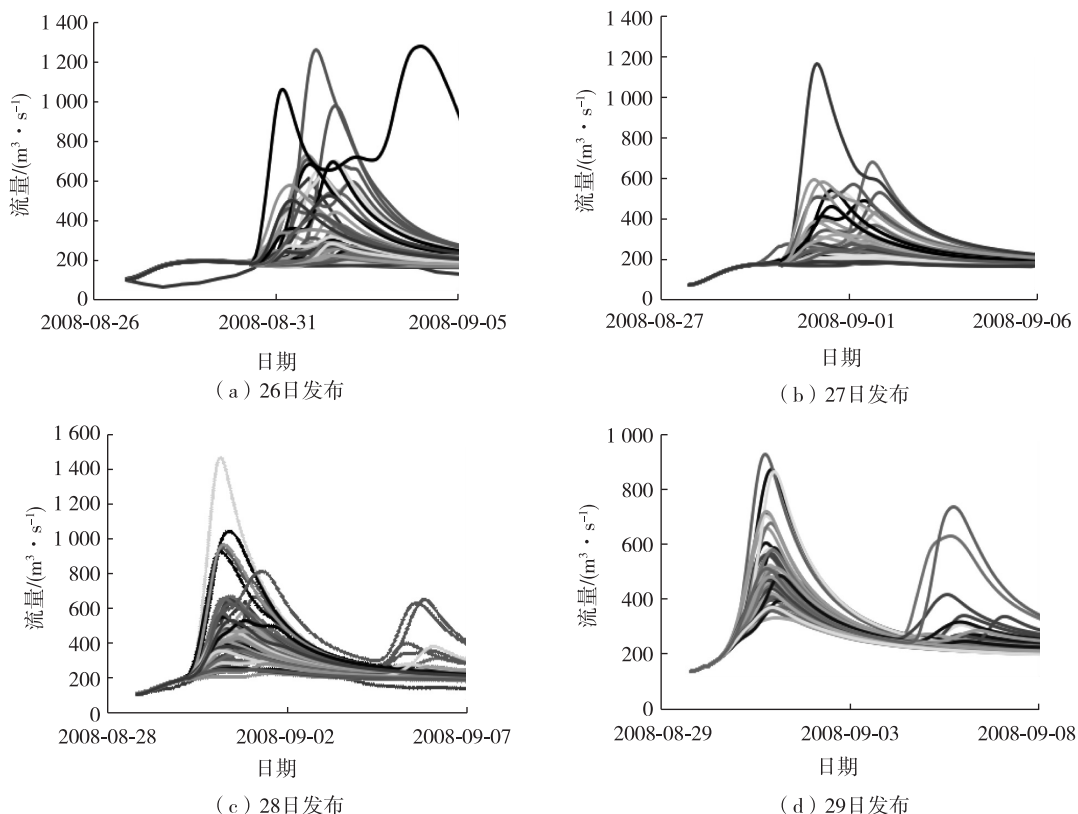


图4 2008年8月发布集合洪水预报驱动的50条流量过程线

Fig. 4 Fifty discharge hydrographs driven by ensemble precipitation forecasts from August 2008

从洪水过程的连续模拟结果看,用ECMWF在8月26日发布的集合预报降雨量驱动洪水模型,其预报

结果中已经可以探测到洪峰的微弱信号,从 28 日 20:00 开始,对洪峰的跟踪信号已经具备了一定的精度,29 日 20:00 集合预报成员显示出了相当一致的较密集的洪峰信号。从长预见期预报到较短期预报演进情况看,26—29 日各预报成员呈现出一致性的不断改进,表明了集合预报的可行性。集合预报流量过程可以反映蒋家集站的实际流量过程,且随着预报时间的临近,越来越接近实际的流量过程,集合预报精度越高。

3.2.2 不确定性

将集合洪水预报过程(5%、50%、75%以及 95%分位数过程线)以及采用地面降水观测资料的模拟过程,与实测流量过程进行对比分析,并选取集合预报流量过程的 90%置信区间定义流量预报过程的不确定性,探究气象水文集合洪水预报系统的实际应用效果。

由图 5 可以看出,集合预报模拟的 75%过程线基本接近实测流量过程,可作为该流域确定性预报过程线参考值。实测的流量过程基本处于集合预报流量过程的 90%置信区间范围之内。对于洪峰流量的模拟预报效果更佳,只有少量的低流量过程超出了 90%置信区间。洪水预报的不确定性随流量大小而变化,高流量过程模拟预报的不确定性较大,低流量过程模拟预报的不确定性则较小。在考虑降水预报不确定性的基础上,本文所构建的耦合洪水预报系统可以描述或刻画洪水预报结果的不确定性。

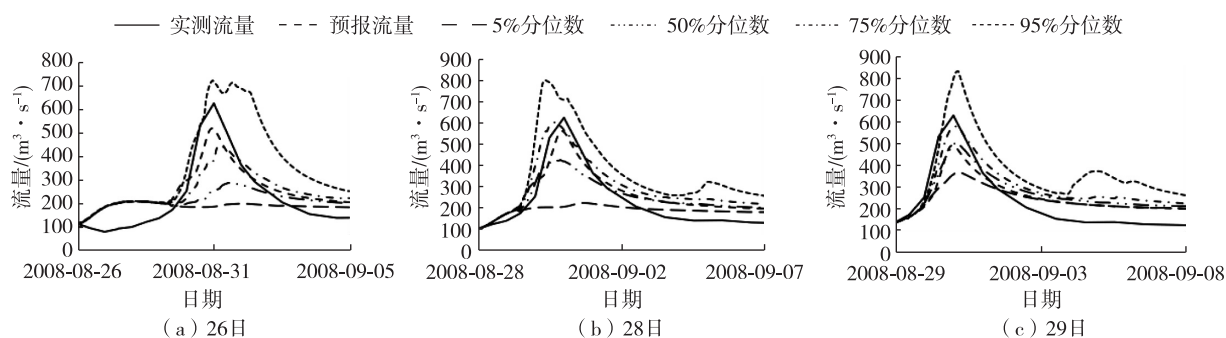


图 5 基于集合预报的蒋家集流域 2008 年 8 月洪水预报结果

Fig. 5 Flood forecasting results using ensemble forecasts from August 2008 in Jiangjiaji Catchment

3.2.3 预见期与精度

根据地面观测降水资料的洪水预报,其预见期是指降雨汇集到流域出口的平均汇流时间,一般依据降雨形心到洪峰的时间间隔即可确定,延长洪水预见期的有效途径之一是采用降雨预报。降雨预报准确率随预见期缩短(延长)而升高(降低),采用 ECMWF 集合预报驱动洪水预报模型,短预见期降雨预报必然对应于较高精度的洪水预报,反之亦然。因此,在一定精度许可范围内,降雨预报使得洪水预见期的延长成为可能。

对于一个特定的流域,流域平均汇流时间基本决定了其固有的洪水预见期。当上游水库放水不大且暴雨中心集中在区间流域时,区间集中降雨结束到下游预报断面洪峰出现的时间间隔即为洪水预见期。若不考虑预见期内的降雨预报而仅考虑落地雨,预见期内流域出口断面的流量过程预报可信度高,但超出预见期的洪水预报可信度必然降低,利用天气预报的预见期理论上可以延长洪水预见期并提高洪水预报精度。对比不同起报时间的洪峰流量(表 3)可以看出,预见期越短,集合预报的精度越高。本场洪水洪峰发生在 8 月 31 日 20:00,降雨结束在 8 月 30 日 16:00,洪水的预见期约为 28 h,洪峰误差为-17%。

表 3 不同预见期集合预报过程线洪峰误差对比

Table 3 Comparison of flood peak error of hydrographs from ensemble forecasts with different lead times

集合预报 开始时间	实测洪峰 流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	地面雨量计降雨 预报洪峰		集合预报过程线洪峰			
				5%过程线	75%过程线	95%过程线	
		$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	相对误差/%	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	相对误差/%	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$
2008-08-26T20:00	620	517	-17	206	441	-29	716
2008-08-27T20:00	620	517	-17	225	452	-27	752
2008-08-28T20:00	620	517	-17	237	524	-16	930
2008-08-29T20:00	620	517	-17	361	574	-7	821

本文采用的 ECMWF 集合预报产品 50 组降雨数据与蒋家集流域地面观测降雨数据相比偏小,因而选用 75%过程线作为确定性过程线。若采用 8 月 28 日 20:00 发布的集合预报数据,预报出 31 日的洪峰流量误

差为-16%,预见期延长到3 d;若采用29日的集合预报数据,预见期比28日缩短1 d,但洪峰误差缩小到-7%,远小于采用观测降水模拟所得的-17%的洪峰误差,精确度明显提高。分析结果表明,ECMWF集合降水预报与水文模型耦合,可以提高洪水预警预报的精度,也可以增长洪水预报的预见期。采用天气预报和水文模型耦合方式改进洪水预报性能是可行的,可以为防洪减灾提供科学决策依据。

4 结 语

洪水预报在防洪减灾中起着相当重要的作用,采用地面观测降雨进行洪水预报,预报精度和预见期不能满足要求。本文提取淮河蒋家集以上流域的ECMWF集合降水预报数据,进行降尺度处理后驱动洪水预报模型,以2008年8月典型洪水过程为例,模拟蒋家集流域的洪水过程,尝试利用天气预报的预见期延长洪水预见期并改进洪水预报精度。研究表明:采用ECMWF集合降水预报驱动水文模型,可以提高洪水预报精度并使洪水预见期提前48 h,取得了较好的预报效果,可为防洪减灾提供科学支撑。

降水预报的准确度分析是有效利用天气预报并发挥其效益的前提^[16]。由于预报模式以及预报初始场等因素,不同预报中心的天气预报性能也有差别,对集合预报模式的降水预报性能进行细致的评估,选择适合特定流域的集合预报产品值得进一步研究。对于一些高分辨率的水文模型,集合预报的时间和空间尺度不能与之匹配,气象模式与水文模型耦合的尺度转换一直是水文气象耦合的热点和难点之一,也是值得进一步研究的科学问题。

参考文献:

- [1] ANDERSON M G, BURT T P. Hydrological forecasting[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [2] MAIDMENT D R. Hydrology handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [3] 中华人民共和国水利部水文局,长江水利委员会水文局.水文情报预报技术手册[M].北京:水利电力出版社,2010.
- [4] CLOKE H L, PAPPENBERGER F. Ensemble flood forecasting: a review[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375: 613-626.
- [5] PAPPENBERGER F, RAMOS M H, CLOKE H L, et al. How do I know if my forecasts are better? Using benchmarks in hydrological ensemble prediction[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 697-713.
- [6] ALFIERI L, PAPPENBERGER F, WETTERHALL F, et al. Evaluation of ensemble stream flow predictions in Europe[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 913-922.
- [7] HE Y, WETTERHALL F, BAO H, et al. Ensemble forecasting using TIGGE for the July - September 2008 floods in the Upper Huai catchment: a case study[J]. Atmospheric Science Letters, 2010, 11: 132-138.
- [8] TAO Yumeng, DUAN Qingyun, YE Aizhong, et al. An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai river basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2890-2905.
- [9] YE J, HE Y, PAPPENBERGER F, et al. Evaluation of ECMWF medium-range ensemble forecasts of precipitation for river basins[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2014, 140: 1615-1628.
- [10] ABBOTT M B, REFSGAARD J C. Distributed hydrological modelling[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [11] 包红军,赵琳娜.基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J].水利学报,2012,43(2):216-224.(BAO Hongjun, ZHAO Linna. Flood forecasting research based on ensemble predictions of Huaihe river basin[J]. Journal of Hydraulic, 2012, 43(2): 216-224.(in Chinese))
- [12] HE Y, WETTERHALL F, CLOKE H L, et al. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions[J]. Meteorological Applications, 2009, 16(1): 91-101.
- [13] 姚成,李致家,章玉霞. DEM分辨率对分布式水文模拟的影响[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):11-14.(YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Yuxia. Effects of DEM resolution on distributed hydrologic simulation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 11-14.(in Chinese))
- [14] SEO D J, BREIDENBACH P, JOHNSON E R. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data[J]. Journal of Hydrology, 1999, 223: 131-147.
- [15] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等.新安江模型的起源及对其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):1-5.(RUI Xiaofang, LING Zhe, LIU Ningning, et al. Origin of Xin'anjiang model and further development[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 1-5.(in Chinese))
- [16] 张星星,朱成立,彭世彰,等.降水预报准确度分析及其在提高降水利用率中的作用[J].河海大学学报(自然科学版),2014(3):230-233.(ZHANG Xingxing, ZHU Chengli, PENG Shizhang, et al. Accuracy analysis of rainfall forecast and its application to improvement of utilization rate of rainfall[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014(3): 230-233.(in Chinese))