

崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验[J]. 气象, 2010, 36(12): 56-61.

# 定量降水预报与水文模型耦合的 中小流域汛期洪水预报试验<sup>\*1</sup>

崔春光<sup>1</sup> 彭涛<sup>1,2</sup> 沈铁元<sup>1</sup> 殷志远<sup>1</sup>

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

2 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072

**提 要:** 预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度, 预见期愈长, 预见期内的降雨对预报值影响愈大, 预见期内的降雨越来越被人们重视。本文以湖北省漳河水库流域为例, 利用中尺度数值模式(AREM 模式)的预报降雨信息, 作为洪水预见期内的降雨, 输入新安江模型, 对流域 2008 年汛期典型洪水过程进行预报测试, 结果表明考虑预见期内的降雨相对于未考虑预见期降雨对洪水预报结果提高具有明显的优势。研究表明中尺度暴雨模式预报技术在水文预报学的应用具有广阔的发展空间。

**关键词:** AREM 模式, 预见期降雨, 新安江模型, 洪水预报, 定量降水预报

## The Flood Forecast Test on QPF Coupling with Hydrological Model in Flood Season in Medium and Small Catchment

CUI Chunguang<sup>1</sup> PENG Tao<sup>1,2</sup> SHEN Tiejuan<sup>1</sup> YIN Zhiyuan<sup>1</sup>

1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

2 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072

**Abstract:** The precipitation in forecast period greatly influences flood forecasting precision. The longer the forecast period is, the bigger the influence of the precipitation in forecast period on flood forecast will be, therefore the people more and more pay attention to the precipitation in forecast period. The paper uses the rainfall information that the mesoscale numerical model (AREM Model) forecast takes as the precipitation in forecast period, and inputs into the Xinanjiang hydrological model, to make the forecast experiments on flood process in flood season in 2008 in research area. The results show that the flood forecasts can be improved obviously when considering the precipitation in forecast period, and the numerical model forecast will have an expansive application prospect in the hydrology forecast.

**Key words:** AREM model, rain in forecast period, Xinanjiang model, flood forecast, QPF (quantitative precipitation forecast)

## 引 言

暴雨是影响我国的主要灾害性天气, 暴雨引起的洪涝灾害常给我国的人民生命财产和国民经济建

设带来巨大损失。预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度, 预见期愈长, 预见期内的降雨对预报值影响愈大, 为此预见期内的降雨与洪水预报耦合技术也逐步受到了广大水文和气象科技工作者的关注<sup>[1-4]</sup>。目前随着数值预报理论与方法的飞跃发展,

\* 国家自然科学基金资助项目 (40675070, 50879061); 湖北省科技攻关计划 (2007AA301B57); 公益性行业 (气象) 专项 (GYHY200806002); 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金 (2007B033); 武汉暴雨研究所基本业务专项课题 (0811, 1013) 共同资助

2009 年 11 月 20 日收稿; 2010 年 9 月 13 日收修定稿

第一作者: 崔春光, 主要从事数值模式预报及其应用方面的研究工作. Email: cgcu@whihir.com.cn

数值预报现正成为暴雨预报实现定点、定时和定量的科学手段,为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。因此,本文在中尺度暴雨数值模式预报技术的支持下,结合湖北省漳河水库流域 2008 年汛期的洪水过程对考虑预见期降水量的短期洪水预报进行试验研究。

### 1 流域概况

漳河发源于湖北省南漳县境荆山南麓之三景庄,流经保康、远安、荆门、当阳等县、市,于当阳市两河口与西支沮河汇流,全长 202 km。流域为一长条形,自西北向东南倾斜,平均长约 100 km,宽约 30 km,流域面积 2980 km<sup>2</sup>。漳河水库位于湖北省荆门市境内,承雨面积 2212 km<sup>2</sup>,总库容 20.35 亿 m<sup>3</sup>(如图 1 所示)。

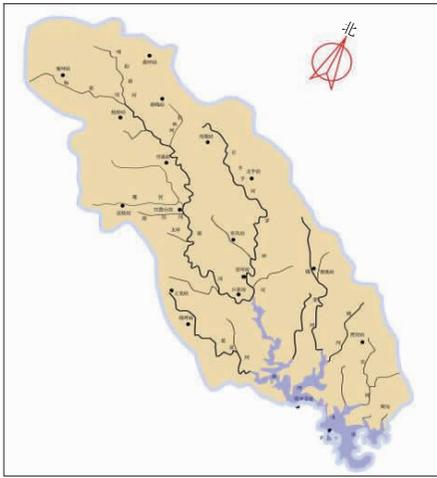


图 1 漳河流域的示意图

Fig. 1 The sketch map of Zhanghe Catchment

本流域属长江中游亚热带季风区,多年平均降雨为 1003.6 mm,降雨年分布极不均匀,集中在 5—9 月份,暴雨次数多,强度大,洪水陡涨陡落,汇流时间短。流域内水文监测网分布均匀(见图 1),并且位于宜昌雷达监测网之内,有利于短期洪水预报研究的开展。

### 2 AREM 模式预报简介

面对中国暴雨数值预报的挑战,广大气象工作者综合考虑中国区域的地形特点和复杂的水汽演变过程,在研发具有自主知识产权的数值模式过程中,通过不懈努力成功开发 5 层细网格原始方程降水预报模式(周晓平)和 REM 模式(宇如聪等)等<sup>[6]</sup>。中尺度暴雨数值模式 AREM 是中国科学院大气物理所和中国气象局武汉暴雨研究所在 REM 模式框架基础上发展而来,从 AremV2.1、AremV2.3 到目前的 AremV3.0 在模式分辨率、模式标准化、侧边界条件、模式物理参数化过程、模式初值方案等方面不断改进和完善<sup>[6-7]</sup>,并且开发了与之配套的三维变分同化方案,形成具有较高分辨率配有三维变分同化系统的中尺度暴雨数值预报模式系统。

多年的汛期预报结果表明:AREM 模式对我国南方汛期降水的时空分布有较强的预报能力,能够比较准确地给出华南前汛期雨带和梅雨期长江流域降雨带的分布,其主要降水中心位置及强度与实况接近,对降水发生、发展和结束的时间也能很好地预报,模式能正确反映我国南方夏季降水的时空演变特征<sup>[8-11]</sup>(见图 2)。

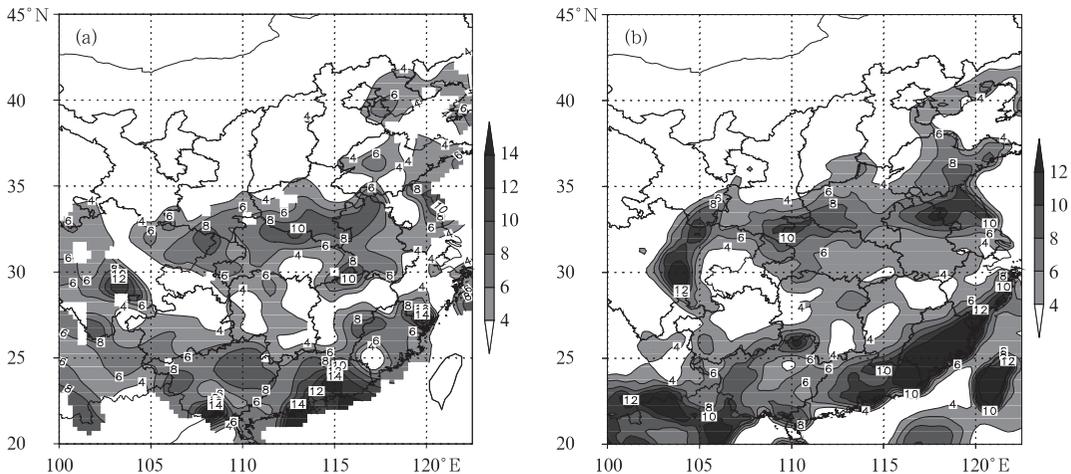


图 2 实况(a)与模式预报(b)平均 24 小时累加降雨量(引李俊<sup>[9]</sup>)  
(图中阴影所示为降水量,单位:mm)

Fig. 2 The 24 h accumulated precipitation of model forecast (a) and actual (a, from LI Jun)  
(the shadows stand for precipitation graded, unit: mm)

### 3 水文预报模型及其预报结果

#### 3.1 水文模型选取

根据试验流域湿润的气候特点,本文选择在国内外水文预报工作中得到较好应用的新安江模型作为流域水文预报模型<sup>[12-15]</sup>。该模型应用了蓄满产流与马斯京根汇流概念,有分单元、分水源、分汇流阶段的特点,结构简单,参数较少,各参数具有明确的物理意义,计算精度较高。模型通过把全流域分成多个单元流域,在每一个单元流域内,降水经过蒸散发的消耗后,以蓄满产流的方式经产流量水源划分后对各单元流域进行产汇流计算,得出单元流域的出口流量过程;再进行出口以下的河道洪水演算,把各个单元流域的出流过程相加,就求得了流域的总出流过程。

#### 3.2 洪水预报结果评定指标

汇流预报方案采用模型的有效性和洪峰流量场次合格率及峰现时差指标来评定。

##### (1) 模型有效性评定

对有效性评定采用确定性系数  $DC$ :

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^M [y_0(i) - y_0]^2} \quad (1)$$

式中  $DC$  为场次洪水流量过程确定性系数;其中的  $y_c(i)$  为场次洪水流量预报值,  $y_c(i)$  为场次洪水流量实测值;  $y_0$  为实测场次洪水流量均值;  $M$  为场次洪水流量过程总节点数。根据《水文情报预报规范》,当  $DC \geq 0.9$  时,预报方案可评级为甲等;当  $DC \geq 0.7$  且  $DC < 0.9$  时,预报方案可评级为乙等;当  $DC \geq 0.5$  且  $DC < 0.69$  时,预报方案可评级为丙等;凡已通过误差评定的预报方案,达到上述甲、乙两个等级者,即可用于作业预报;达到丙等的方案用于参考性预报,丙等以下的方案不能用于作业预报,只能作参考性估报用<sup>[16]</sup>。

##### (2) 洪峰相对误差 ( $DQ_m$ )

$$DQ_m = |Q_{\text{obv}} - Q_{\text{cal}}| / Q_{\text{obv}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{obv}}$  为实际观测流量;  $Q_{\text{cal}}$  为模拟计算流量。当模拟计算洪峰相对误差  $\leq 20\%$  时即认定该场洪水预报合格<sup>[16]</sup>。

##### (3) 峰现时差

$$DT = |T_{Q_{\text{计}}} - T_{Q_{\text{实}}}| \leq 3 \quad (3)$$

式中  $T_{Q_{\text{计}}}$  为预报洪峰流量峰现时间;  $T_{Q_{\text{实}}}$  为实测洪峰流量峰现时间。水文业务中常将 3 小时作为峰现时间预报许可误差<sup>[16]</sup>。

#### 3.3 数值模式与水文模型耦合方案

在没有考虑预见期降雨的预报中,对于预报初始时刻之后的每一时刻雨量设置为零,水文模型所输入的降水信息仅是初始预报时刻前  $t$  个时段的实况降水;在考虑预见期降雨的预报中,水文模型所输入的降水信息不仅含有初始预报时刻前  $t$  个时段的实况降水,而且还包含预报初始时刻之后预见期内的降水。

传统水文中预报中对预见期降雨的处理多为通过人工假定干预或者不考虑,这种处理方式严重影响了水文预报精度,为了有效充分利用数值模式预报产品降水信息,拟采用耦合数值预报模式与水文预报模型的方法进行水文预报试验,具体实施方案如下:①首先使用地面雨量站或者雷达定量估算降雨技术得到初始预报时刻前  $t$  个时段的实况降雨信息;②然后利用 AREM 数值模式得到初始预报时刻之后预见期内的降雨信息;③将所获取的实况降水及预见期降水信息输入水文模型对预见期洪水过程作提前的预报。

#### 3.4 试验过程及结果分析

2008 年 7 月 21—23 日湖北省普降大雨,48 小时内漳河流域累计降水达 150 mm,漳河水库水位 23 日晚猛抬升 2 m 左右(见图 3)。

针对这次典型的过程,根据设计的耦合方案在实际预报试验过程中,我们以 2008 年 7 月 22 日 08 时(北京时,下同)作为洪水预报初始时刻,该时刻观测降水作为水文模型初始降水;然后根据 AREM 数值模式 2008 年 7 月 22 日 08 时未来 60 小时逐时降水预报结果作为预见期降雨输入水文模型对洪水过程作提前预报。图 4 所反映的是洪水预报初始时刻流域未来 60 小时实况观测降水与模式预报降水对比分析图,从图中可以看出此次 AREM 模式预报结果与实况从空间分布上看较为一致;降水强度上看,AREM 模式预报结果相对实况偏小,但也达到了 100 mm 的量级,总体上预报结果较为理想,可以用作洪水预报试验。

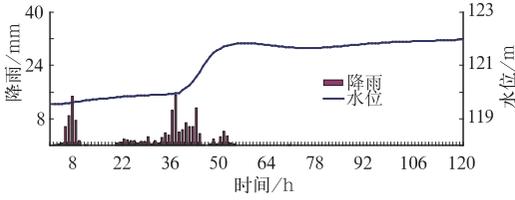


图 3 洪水过程降雨-水位过程曲线

Fig. 3 Rainfall (left, in mm) versus water level (right, in m) curve in the flood process

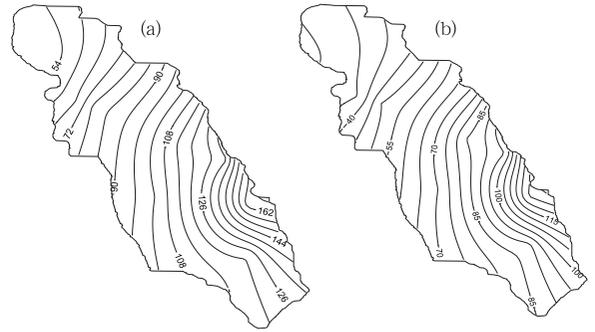


图 4 流域未来 60 小时累加降雨量实况(a)与 AREM模式预报(b)对比图(单位:mm)

Fig. 4 The forthcoming 60 h accumulative rainfall (unit:mm) in the research catchment based on (a) observation and (b) AREM model forecast

试验过程中,我们根据 AREM 模式预报结果分别提取了流域未来 6、12、18、24、36 小时逐时的降雨预报结果,输入新安江水文模型进行洪水预报试验,其洪水过程曲线如图 5 所示,对预报结果,我们采用

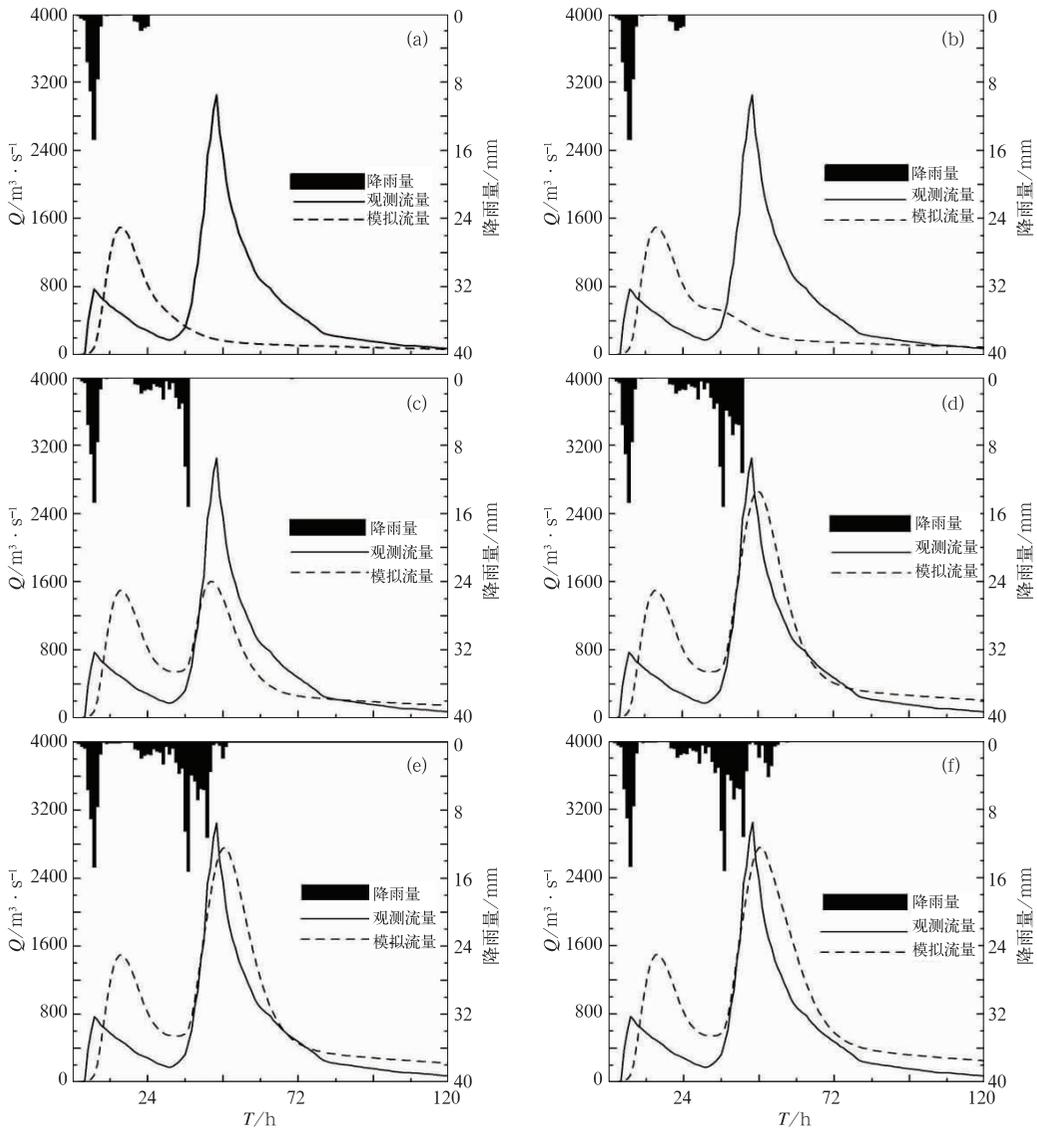


图 5 考虑不同预见期洪水预报洪水流量过程线对比图

(a) 未考虑预见期降水; (b) 考虑预见期降水(6 小时累积降雨); (c) 考虑预见期降水(12 小时累积降雨); (d) 考虑预见期降水(18 小时累积降雨); (e) 考虑预见期降水(24 小时累积降雨); (f) 考虑预见期降水(36 小时累积降雨)

Fig. 5 The contrast of flood flow processes considering the different rainfall in forecast period (a) result without rainfall in future, (b) result with accumulated rainfall in future (6 h), (c) result with accumulated rainfall in future (12 h), (d) result with accumulated rainfall in future (18 h), (e) result with accumulated rainfall in future (24 h), (f) result with accumulated rainfall in future (36 h)

有效性(确定性系数)、洪峰相对误差及峰现时差对试验结果进行了评定(表 1)。从图 5 中可以看出在没有考虑未来降水的情况下(未来降雨当作 0 处理),流量过程曲线呈现一致衰减趋势,与实际过程存在明显的差异(图 5a);当进一步考虑未来 6 小时降水,由于主要降水过程还发生,流量过程曲线与图 5a 基本差别不大(图 5b);当考虑未来 12 小时降水时,在降水的作用下,流量过程曲线会呈现一个先衰减,再上升的过程,形态上开始接近实际流量过程曲线,但是与实际仍存在一定的差距(图 5c);随着降水的进一步发展,当考虑未来 18 小时降雨时,主

要降水过程基本完成,在降水的作用下,流量过程曲线再上升过程十分明显,开始接近实际洪水过程曲线,但是与实际仍存在一定的差距(图 5d);未来 24 小时与 36 小时降雨差别不大,降雨过程基本上接近结束,流量过程曲线与实际吻合得较好(图 5e、f)。结果表明:在模式预报结果与实际降水接近的条件下,每场洪水在开始降雨时进行的预报,考虑预见期降雨的预报对洪水预报结果具有明显的作用,相对误差可缩小约 40%,但是随着预报时间的推移,当降雨过程趋于结束时,考虑未来降雨对洪水预报结果影响也随之减小。

表 1 考虑不同预见期降雨洪水预报洪水流量过程对比

Table 1 The contrast of flood flow processes considering the different rainfall in forecast period

预报时刻/月.日.时	未来降雨/h	实测洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%	峰现时差/h	确定性系数
7.22.08:00	0	3050	1496	50.95	-30	-0.41
	6	3050	1496	50.95	-30	-0.23
	12	3050	1604	47.41	-2	0.69
	18	3050	2665	12.61	2	0.85
	24	3050	2755	9.67	2	0.80
	36	3050	2755	9.67	2	0.78

### 3.5 业务对比试验分析

上述试验(3.4 节)证明:在模式预报结果与实际降水接近的条件下,考虑预见期降雨的预报对洪水预报精度的改善具有明显作用。为进一步突出考虑数值模式预报降雨对洪水预报结果的改善作用,特选取考虑未来 36 小时降水的洪水预报结果与水文业务常用的降雨径流以及人工假定预见期降雨 2 种预报方法结果进行对比分析(见图 6,表 2)。

降雨径流经验预报方法根据流域历史降水及径

流系列,建立能反映流域降雨特征和流域径流特征的经验统计关系,然后利用统计关系对径流实施实时洪水预报(图 6a)。人工假定预见期降雨预报方法即对预见期降雨进行假定,输入水文模型进行实时预报。试验中,我们将 AREM 模式预报未来 36 小时累计降水量平均到每小时,作为假定降水输入水文模型进行洪水预报(图 6b)。对比图 5f,可发现降雨径流经验预报洪水过程(图 6a)在形态上与实际洪水过程曲线较为一致,但是在洪峰预报值与实际有一定的差距,明显偏小;人工假定预见期降雨预

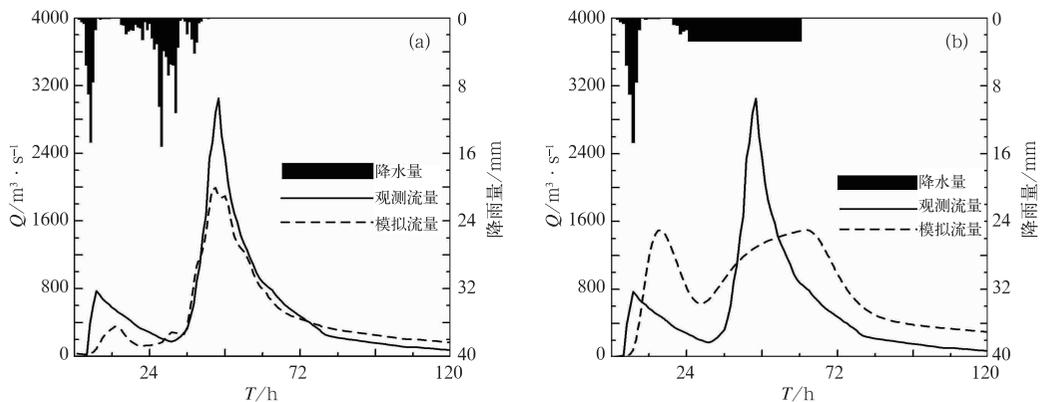


图 6 降雨径流以及人工假定预见期降雨预报洪水过程图

(a) 降雨径流经验预报; (b) 人工假定预见期降雨预报

Fig. 6 The flood flow processes based on (a) rainfall-runoff empirical forecast and (b) the man-made supposed rainfall forecast

表 2 降雨径流、人工假定预见期降雨以及模式降雨输入洪水流量过程对比

Table 2 The contrast of flood flow processes based on rainfall runoff, man-made supposed rainfall, and mode forecasts

预报时刻/月.日.时	未来降雨/h	预报方法	实测洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%	峰现时差/h	确定性系数
7.22.08:00	36	降雨径流	3050	1992	34.69	-1	0.87
		人工假定降雨	3050	1501	50.79	16	0.45
		模式预报降雨	3050	2755	9.67	2	0.78

报洪水过程(图 6b)无论在形态,还是洪峰预报值都与实际存在较大差距,并且峰现时间出现了明显的滞后。从表 2 可知,综合比较模式有效性(确定性系数)、洪峰相对误差及峰现时差 3 个指标,在模式预报结果与实际降水接近的条件下,将模式预报逐小时降水作为水文模型的输入水文模型进行水文预报,其总体洪水预报水平是最优的。

## 4 结 论

降雨量是洪水预报中最重要的信息之一,而预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度,预见期愈长,预见期内的降雨对预报值影响愈大,为此本文在前人研究的基础上,以湖北省漳河流域 2008 年汛期洪水过程为例,将 AREM 模式预报结果作为预见期内的降雨输入水文模型,对考虑预见期降雨的洪水进行预报试验,并与水文预报中常用的降雨径流以及人工假定预见期降雨 2 种预报方法结果进行对比分析,其结论如下:

(1) 洪水预报过程中,在未来发生降雨的条件下,考虑预见期内的降雨相对于未考虑预见期降雨对洪水预报结果显示出一定的优势,能够对整场雨的过程做出提前的洪水预报过程,但是随着整个降雨过程的逐步发展,当流域降雨过程趋于结束时(主要降雨过程已完成),考虑未来降雨对洪水预报结果影响不大。

(2) 在模式预报结果与实际降水接近的条件下,相对于水文预报中常用的降雨径流以及人工假定预见期降雨 2 种预报方法结果,将模式预报逐小时降水作为水文模型的输入水文模型总体洪水预报水平是最优的。

(3) 考虑预见期降雨的洪水预报结果与实际洪水过程仍存在一定的差距,这种差距在一定程度上表明预见期内降雨预报的准确率有待进一步提高。

(4) 预见期内的降雨对洪水预报的精度影响越来越被人们所重视,现代气象预报技术为考虑预见期内降雨的洪水预报提供了很好的技术支持,随着

数值模式预报的时间和空间分辨率以及预报精度的提高,数值模式预报在水文中将会有很大的应用前景。

## 参考文献

- [1] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究[M]. 北京:中国水利电力出版社,1997:82-93.
- [2] 杨文发,李春龙. 降水预报与洪水预报耦合应用初探[J]. 水资源研究,2003,24(1):38-40.
- [3] 王庆斋,刘晓伟,许珂艳. 黄河小浪花间暴雨洪水预报耦合技术研究[J]. 人民黄河,2003,25(2):17-19.
- [4] 李超群,郭生练,张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究[J]. 电能源科学,2006,4(4):31-35.
- [5] 宇如聪. 陡峭地形有限区域数值预报模式设计[J]. 大气科学,1989,13(2):139-149.
- [6] 宇如聪,薛纪善,徐幼平,等. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [7] Cui Chuguang, Li Jun, Shi Yan. Development and application of the advanced regional eta-coordinate numerical heavy-rain prediction model system in china[J]. Advances in Geosciences,2007(6):23-33.
- [8] 王叶红,王志斌. AREM 模式对 2002 年汛期降水的实时预报试验[J]. 气象,2005,31(2):17-22.
- [9] 李俊,沈铁元,宋星原,等. AREM 中尺度暴雨模式降水预报试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2007,40(1):13-17.
- [10] 何光碧,陈静,肖玉华,等. AREM 数值模式对 2005 年汛期四川的降水预报[J]. 气象,2006,32(7):64-71.
- [11] 公颖,张兵,廖移山,等. 2005 年 AREM 模式汛期试验结果评估分析[J]. 气象,2007,33(1):87-93.
- [12] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [13] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988,8(6):2-9.
- [14] 张亚萍,周国兵,胡春梅,等. TOPMODEL 模型在重庆市开县温泉小流域径流模拟中的应用研究[J]. 气象,2008,34(9):34-39.
- [15] Peng Tao, Song Xingyuan, Shen Tiejuan. The Application of Radar Quantitative Precipitation Estimation in Flood Forecasting during Flood Season[A]. The Proceedings of the 4th International Yellow River Forum on Ecological Civilization and River Ethics [C]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press,2010:309-314.
- [16] SL25-2000, 水文情报预报规范[S]. 18-22.