DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2009.03.001

基于气象模式的汉江流域洪水预报系统

郭生练[1],张 俊[1],郭 靖[1],陈桂亚[2],陈 华[1]

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;2.长江水利委员会水文局预报处,湖北 武汉 430010)

摘要:针对现行洪水预报方法的不足与汉江流域的特点,建立了汉江流域 MM5 气象预报模式和 VIC 分布式水文模型,耦合集成 3 种预报模式并开发了基于气象模式的汉江流域洪水预报系统。应用 2005~2007 年汛期日水文气象资料进行验证,结果表明所建 VIC 分布式水文模型具有较高的模拟与预报精度。基于气象模式的汉江流域洪水预报系统可为汉江流域的中长期水文预报和水资源综合管理提供技术支撑和决策参考。

关键词:气象模式;分布式水文模型;耦合预报;汉江流域

中图分类号:TV124;P338$^+$.9 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2009)03-0001-05

Flood forecasting system of Hanjiang Basin based on meteorological model//GUO Sheng-lian[1], ZHANG Jun[1], GUO Jing[1], CHEN Gui-ya[2], CHEN Hua[1](1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*; 2. *Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan* 430010, *China*)

Abstract: According to the limitations of the existing flood forecast methods and the characteristics of the Hanjiang Basin, the MM5 meteorological model and VIC distributed hydrological model of the basin are established. Three coupled forecasting models are integrated and the application software system for flood forecasting is developed for the Hanjiang Basin. The models are verified using the daily hydrological and meteorological data from the flood period of 2005-2007. Results show that the VIC distributed hydrological model has high simulation and forecast accuracy. It can provide technical support and decision references for medium- and long-term hydrologic forecasting and integrated water resources management for the Hanjiang Basin.

Key words: meteorological model; distributed hydrological model; coupled forecasting; Hanjiang Basin

汉江是长江中游最大的支流,发源于秦岭南麓,干流经陕西、湖北 2 省,于武汉市汇入长江,全长 1 570 余 km,流域面积 15.9 万 km^2。汉江流域幅员广阔,气候垂直分布明显,光、热和水资源空间差异大,是我国降水变率比较大、旱涝灾害频繁发生的地区之一。汉江流域在我国的防洪和供水等方面具有十分突出的地位,江汉平原是我国主要的商品粮生产基地之一,丹江口水库是南水北调中线工程的水源地。开展汉江流域洪水预报研究对保障汉江的防洪安全、兴利调度和南水北调中线工程的顺利实施具有重大的现实意义。

汉江流域现行洪水预报方案是在长期的防洪兴利实践中建立起来的,具有一定的预报精度,但尚存在以下不足:经验性较强,需要依赖预报人员的经验,推广受限;未考虑预见期内的降雨等信息,在一定程度上影响了洪水预报精度;现行的预报均是以“落地雨”为预报基础,预见期有限,削弱了预报的及时性,在很大程度上降低了可获得的效益[1]。可见,如何进一步提高预报精度、延长洪水预见期是汉江流域防洪减灾、兴利调度中非常重要和亟待解决的问题之一。

提高洪水预报精度、延长预见期的关键是引入更多的降雨等信息,其中一个有效途径是在洪水预报模型中耦合气象数值预报模式,提早获取即将发生的降雨信息[2]。近年来,随着计算机、探空探测技术的发展,数值预报模式取得了迅速的发展,出现了许多高分辨率的中尺度数值天气预报模式,如加拿大的 MC2、美国的 MM5 和 WRF 等,定量降水预报的精度显著提高,水平分辨率达到了几千米,预见期在 3 d 以上。数值天气预报模式的这些进步已引起了越来越多的水文气象学者的关注,也使得水文气象耦合成为水文预报模拟中的热点问题之一。Walter 等[3]、Anderson 等[4]、陆桂华等[5]、Yu 等[6]、Lin 等[7]分别采用单向和双向方法将数值模式与水文模型进

基金项目:国家自然科学基金(50679063,50809049);国际科技合作重点项目(2005DFA20520);湖北省自然科学基金(2007ABA061)

作者简介:郭生练(1957—),男,福建龙岩人,教授,博士,从事水文预报与水库调度、水资源与水环境研究。E-mail:slguo@whu.edu.cn

行耦合，在暴雨洪水预报方面做了试验研究，取得了良好的效果，获得了比传统预报方法更长的预见期。

笔者首先建立水平分辨率为 9 km 的汉江流域 MM5 气象预报模式，其次建立基于 9 km × 9 km 网格的汉江流域 VIC 分布式水文模型，最后构建了汉江流域洪水预报系统。

1 汉江流域 MM5 气象预报模式

MM5 是由美国宾夕法尼亚州立大学与国家大气研究中心联合开发的中尺度气象模式，被公认为世界上较成熟的、高水平的中尺度数值模式之一，已广泛应用于业务模式预报。

在实时应用中，建立了 1 套 3 层嵌套的 MM5 气象预报模式。该模式以汉江流域为中心，中心经纬度坐标为 110.296° E，32.754° N。第 1 层格距为 81 km，格点数为 110 × 102；第 2 层格距为 27 km，格点数为 91 × 145；第 3 层区域基本覆盖整个汉江流域，格距为 9 km，格点数为 91 × 121。该模式采用兰勃脱投影，预报时效为 72 h，输入场资料为中国 T213 和地面高空实测资料。该模式的输出为未来 72 h 的逐小时气象信息（2 m 处温度、2 m 处湿度、降水等）。图 1 给出了汉江流域 MM5 气象预报模式 9 km 输出格点分布。

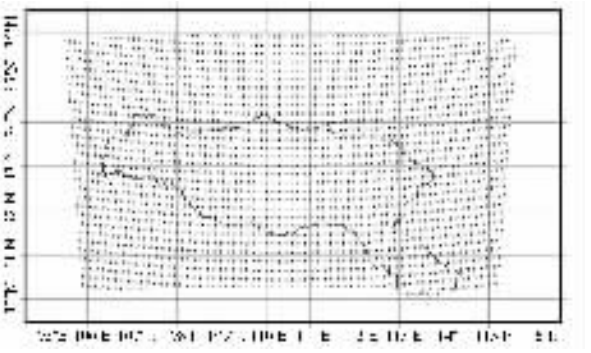


图 1 汉江流域 MM5 气象预报模式 9 km 输出格点分布

利用所建的 MM5 气象预报模式，对 2007 年 6 ~ 8 月和 2008 年 6 ~ 10 月丹江口水库以上区域进行定量降雨预报检验。为了方便对比，将逐时的预报降水结果累积为 8:00 至次日 8:00 的 24 h 累积降水，并与同期实测值进行比较，采用气象预报 Ts 评定方法评价该模式的预报精度，见表 1。图 2 给出了 2007 年 6 ~ 8 月丹江口水库以上区域面均雨量预报值与实测值的过程比较。分析表 1 和图 2 可知，MM5 气象预报模式对无雨和小雨情况的预报精度

表 1 丹江口水库以上区域 MM5 气象预报模式不同等级降雨预报精度 %

预见期/d	无雨（降雨量小于 0.1 mm）			小雨（降雨量 0.1 ~ 9.9 mm）			中雨（降雨量 10 ~ 24.9 mm）			大雨（降雨量 25 ~ 49.9 mm）		
	准确率	空报率	漏报率	准确率	空报率	漏报率	准确率	空报率	漏报率	准确率	空报率	漏报率
1	81.8	0.0	18.2	69.1	27.9	3.0	41.2	52.9	5.9	30.0	70.0	0.0
2	76.5	0.0	23.5	69.3	21.3	9.4	44.4	51.9	3.7	0.0	100.0	0.0
3	78.9	0.0	21.1	65.9	23.7	10.4	28.9	63.2	7.9	6.2	93.8	0.0

注：50 mm 以上的暴雨在已有资料期间仅发生 1 次，故未进行统计。

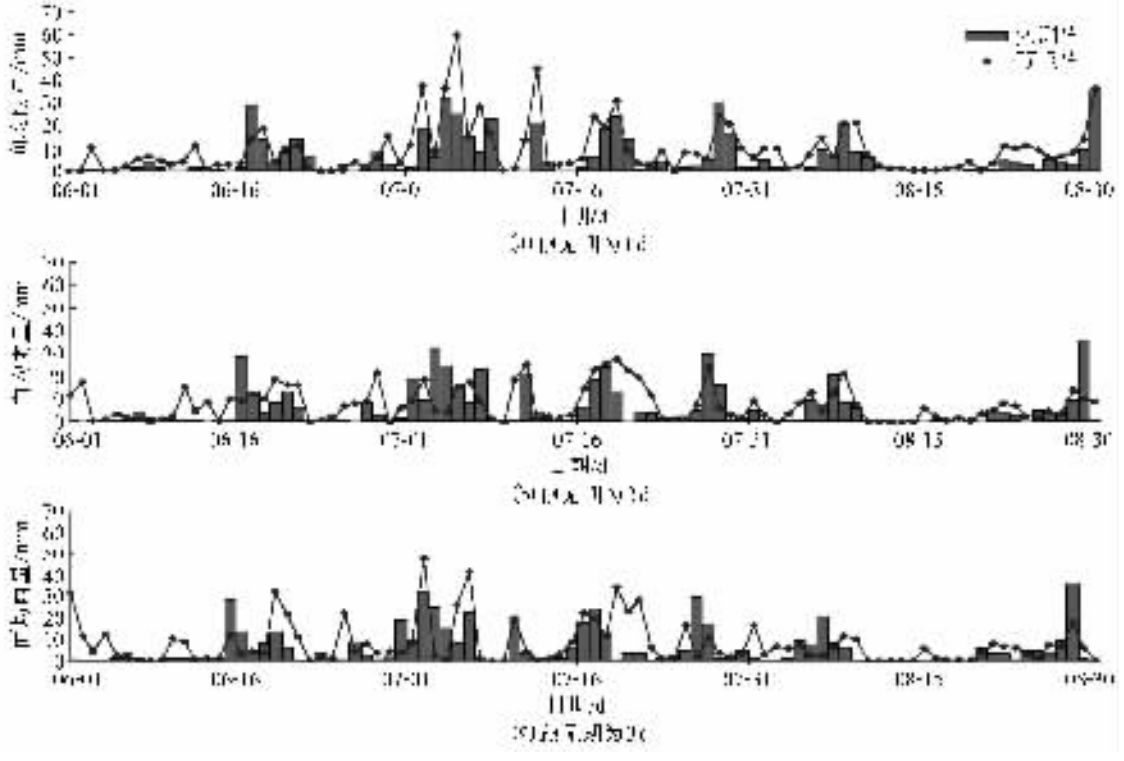


图 2 2007 年 6 ~ 8 月丹江口水库以上区域面均雨量预报值与实测值的比较

较高，且对发生的大降水过程均有反应，这反映出将 MM5 气象预报模式用于洪水预报的可能性，有一定的应用参考价值；MM5 气象预报模式对中雨和大雨的空报率较大，且预报值一般比实测值大 1 个量级，这说明 MM5 气象预报模式的预报精度还有待进一步提高，但从防洪安全角度看，防汛期间预报偏大是可以接受的。

2 汉江流域 VIC 分布式水文模型

分布式水文模型具有很多集总式模型无法比拟的优点，是现代水文模型发展的主流方向。针对汉江流域的特性，构建汉江流域 VIC 分布式水文模型[8]。

2.1 模型数据处理

从多种途径收集建模所需的大量数据，包括数字高程模型(DEM)资料、水文气象信息、土地利用和土壤分布信息等。将不同来源和不同格式的数据资料进行统一处理，形成一整套构建汉江流域 VIC 模型所需要的模型参数库和输入数据：①利用 DEM 资料提取汉江流域的特征信息(流域边界、水系、子流域分区等)，并构建覆盖整个汉江流域的 9 km × 9 km 网格，见图 3；②根据汉江流域的水文气象测站分布(图 3)，利用距离平方反比法将站点的实测水文气象数据插值到网格；③分别统计各网格的土地利用、土壤信息，建立汉江流域网格植被参数库和土壤参数库，汉江流域植被覆盖分布见图 4，土壤分布见图 5和图 6。

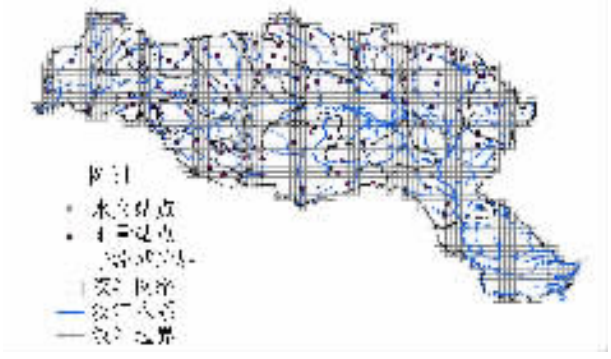


图 3 汉江流域特征信息

2.2 模型参数率定与模拟结果

VIC 分布式水文模型需要率定的水文参数有 7 个，共收集了汉江流域 1980 ~ 1990 年11 年的日水文气象数据，以 1980 ~ 1986 年为率定期，1987 ~ 1990 年为检验期，率定和检验该模型的水文参数。首先以各子流域为单元率定参数，在此基础上将参数网格化并利用汉江干流水文控制站资料适当重新率定修正，最终建立汉江流域 VIC 分布式水文模型的水文参数网格库。分析表2所列的模型率定结果，率定期各个干流控制站的模型效率系数 R^2 的平均值为 90.62%，检验期为 81.43%；无论是率定期还是检验期，径流总量相对误差 R_E 的平均值控制在 5% 以内，说明 VIC 分布式水文模型具有较高的模拟精度。

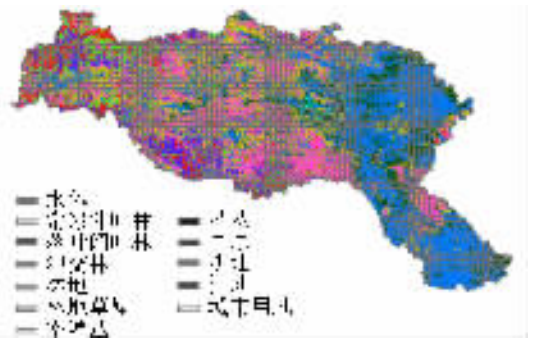


图 4 汉江流域植被覆盖网格分布

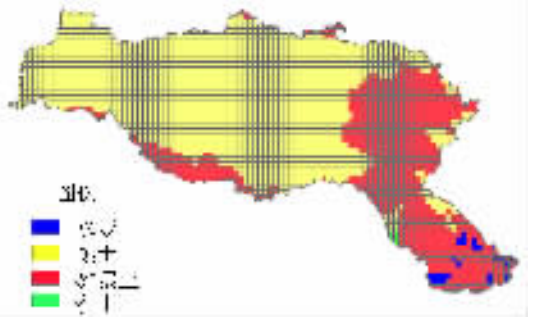


图 5 汉江流域上层土壤类型分布

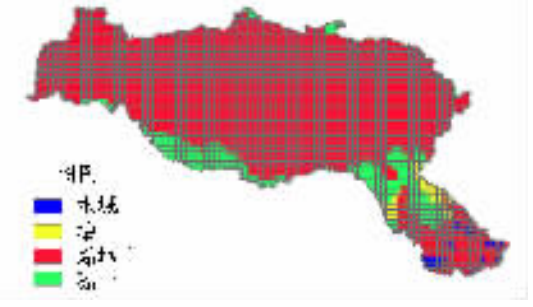


图 6 汉江流域下层土壤类型分布

表 2 汉江干流控制站 VIC 分布式水文模型率定和检验结果 %

控制站	率定期		检验期	
	R^2	R_E	R^2	R_E
石 泉	89.27	11.01	77.15	14.03
安 康	87.94	10.22	77.75	11.56
白 河	89.27	4.52	80.70	2.94
丹江口入库	88.43	-3.70	78.22	-8.06
襄 阳	95.69	-1.08	93.03	3.24
皇 庄	93.10	-5.67	81.71	-0.33

3 汉江流域洪水预报系统

在该汉江流域洪水预报系统中集成了 3 种不同的预报模式：传统预报模式、人工预报与 VIC 耦合模式以及 MM5 与 VIC 耦合模式。在实时运行时，预报模式的输入分为 2 个阶段：预报时刻以前和预报时

刻以后。预报时刻以前的降水和气温输入采用实测值。预报时刻以后的输入,传统预报模式设定未来3 d降水均为零,日最高、最低气温采用对应的历史平均值;人工预报与VIC耦合模式设定未来3 d降水为长江水利委员会水文局预报处气象室人工预报值,而日最高、最低气温采用对应的历史平均值;MM5与VIC耦合模式未来3 d的输入均采用MM5的预报值。采用单向方法耦合MM5气象预报模式和VIC分布式水文模型,如图7所示。

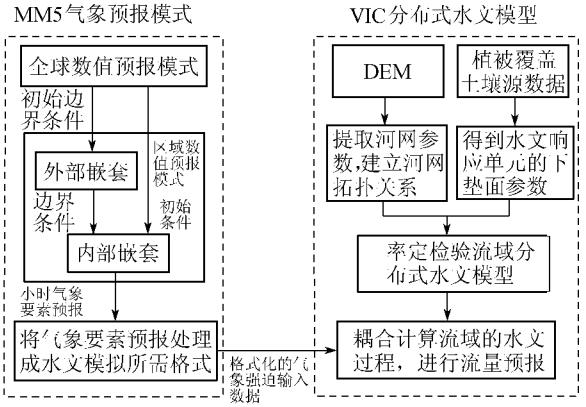


图7 汉江流域MM5气象预报模式与VIC分布式水文模型耦合示意图

汉江流域洪水预报系统具有图层管理控制、水雨情信息查询、模拟预报等功能,见图8。限于篇幅,笔者仅介绍其中最重要的一个应用,即流量过程模拟预报。

应用汉江流域VIC分布式水文模型对流域2005年、2006年和2007年汛期的日水文过程进行分布式模拟,表3列出了汉江流域主要干流控制站径流模拟结果,从表3中可以看到各干流控制站的模型效率系数 R^2 均超过了85%,径流总量相对误差 R_E 控制在±15%以内,这说明所构建模型对汉江流域的降水径流过程具有良好的模拟能力;从洪峰的模拟结果来看,各干流控制站的洪峰合格率 DQ_m 在70%~86%之间,而峰现时差合格率 D_T 在70%左右,均达到了乙级标准,说明该模型对汉江流域的洪水过程模拟较好。

表3 汉江干流控制站径流模拟结果 %

控制站	R^2	R_E	DQ_m	D_T
汉 中	90.79	14.44	75.1	74.1
石 泉	88.57	6.01	78.1	69.8
安 康	90.50	2.55	79.4	70.1
白 河	91.14	6.17	81.0	71.5
丹江口入库	87.43	8.33	80.3	66.7
襄 阳	94.61	-3.98	85.6	78.6
皇 庄	89.38	2.40	71.2	65.3

此外,应用汉江流域洪水预报系统的3种预报模式对丹江口水库2007年6月20日至7月29日的日水文过程进行预报。图9是3种预报模式预报结果与实测流量过程的对比,可以看出在已有实测降水数据的2007年6月20日至7月28日,3种模式的预报结果均与丹江口水库实际入库流量过程吻合较好。而在2007年7月29~31日(即未来3 d的预见期内),3种模式预报结果不尽相同 相比其他2种预报模式,MM5与VIC耦合预报模式预报结果最好,经分析可知,MM5与VIC耦合预报模式在2007年7月29日预报的未来3 d丹江口水库以上流域面均降水最接近实际降水,该预报模式对洪峰过程反应良好;考虑预见期降水预报模式(即人工预

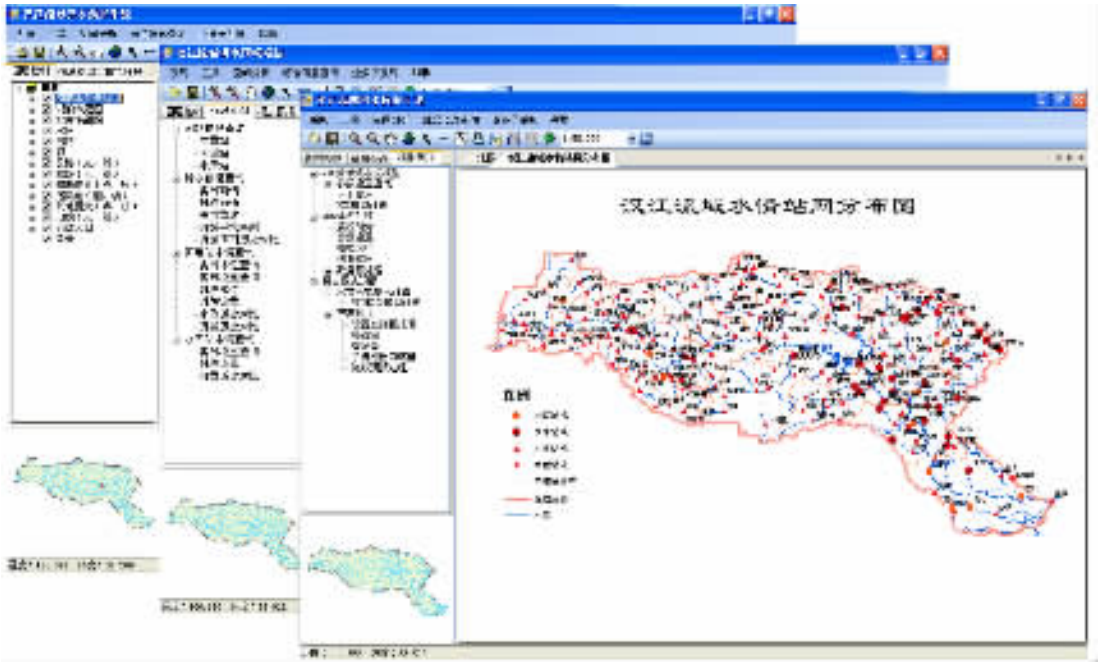


图8 汉江流域洪水预报系统界面

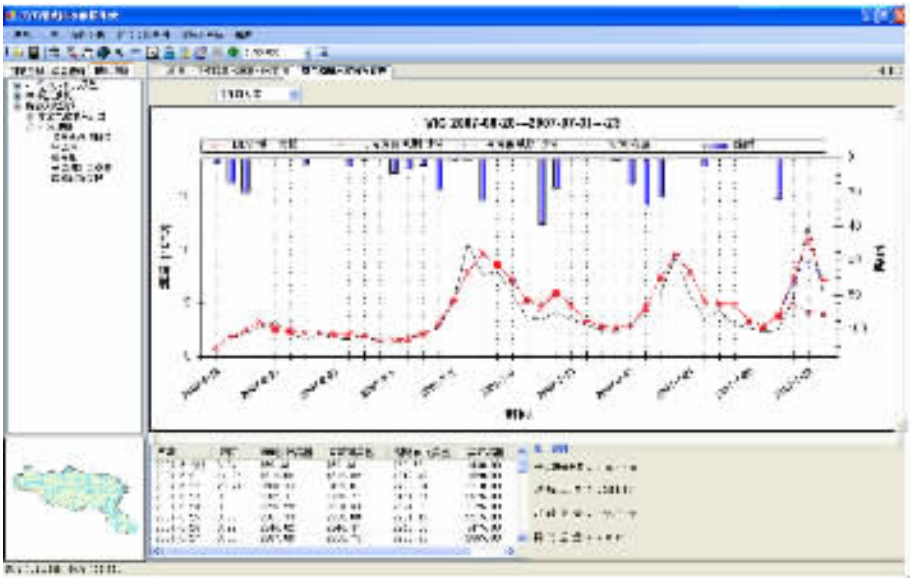


图 9　3 种预报模式流量过程预报结果比较

报与 VIC 耦合模式)的洪峰预报结果偏小,因为 7 月 29 日人工降水预报的未来 3 d 降水值较实际降水偏低,且人工降水预报较依赖于预报员的经验,存在预报精度不稳定的问题;未考虑预见期降水预报模式(即传统预报模式)的预报结果较差,因为它将未来 3 d 的降水均设置为零,降水信息的缺失导致预报结果错失了应出现的洪峰。

4　结　语

针对汉江流域的特点,构建了汉江流域 MM5 气象预报模式和 VIC 分布式水文模型,实现了人工降水预报结果与 VIC 模型、MM5 模式与 VIC 模型的耦合,开发了基于气象模式的汉江流域洪水预报应用集成系统,包括图层管理控制子系统、水雨情信息查询子系统、模拟预报子系统。实例研究结果表明,所建的 VIC 分布式水文模型对汉江的降雨径流关系和洪水过程有良好的模拟能力,相比未考虑预见期降水预报模式,将人工降水预报结果与 VIC 模型耦合的预报模式及 MM5 模式与 VIC 模型耦合的预报模式具有较高的预报精度和较长的预见期。目前汉江流域洪水预报系统已在长江水利委员会水文局预报处试运行,随着气象预报水平的不断提高,该系统可望为汉江流域的防洪调度决策与水资源综合管理提供重要的技术支撑。

参考文献:

[1] 庞博,郭生练,熊立华,等.基于人工神经网络的丹江口库周区预报模型研究[J].人民长江,2004,35(4):30-31.

[2] 张洪刚,郭生练,周芬,等.考虑预见期降水的三峡水库区间洪水预报模型研究[J].长江科学院院报,2005,22(1):9-12.

[3] WALTER C, REINALDO H, IVANILTO A, et al. Forecasting river uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model[J]. Journal of Hydrology, 2005,305:87-98.

[4] 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(4):312-318.

[5] 陆桂华,吴志勇,文雷,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.

[6] YU Zhong-bo,LAKHTAKIA M,YAMAL B,et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesocale meteorological and hydrologic model system[J]. Journal of Hydrology,1999,218:72-91.

[7] LIN C A, WEN Lei, BELAND M, et al. A couple of atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Haha River basin flash flood in Québes, Canada[J]. Geophysical Research Letters,2002,29(2):1-4.

[8] LIANG Xu, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. Journal of Geophysical Research,1994,99(D7):14415-14428.

(收稿日期:2008-08-28　编辑:骆超)

