

三峡库区陆气耦合研究及应用

彭艳^{1,2,3}, 周建中¹, 贾梦¹, 曾小凡¹, 唐造造^{2,3}

(1. 水电与数字化工程学院 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 3. 广东省山洪灾害突发事件应急技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要:以延长洪水预见期、提高预报精度为目标, 研究气象水文耦合机制, 利用数值天气预报模式 WRF(Weather Research and Forecasting)驱动分布式 VIC(Variable Infiltration Capacity)水文模型, 构建三峡库区陆气耦合洪水预报系统, 并对 2007~2008 年期间四场暴雨洪水进行日滚动预报试验。结果表明, WRF 模式在三峡库区内有着良好的短期降水预报精度, 基于数值天气预报模式和分布式水文模型的陆气耦合洪水预报系统能有效延长三峡入库洪水预见期、提高洪水预报精度, 具有较大的应用潜力。

关键词:陆气耦合; VIC 模型; WRF 模式; 三峡库区; 洪水预报

中图分类号: P456.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0852(2014)03-0011-06

1 引言

三峡库区指的是长江干流寸滩、乌江武隆至宜昌区间, 河道长 658km, 区间面积为 55 907km², 区内暴雨频繁, 库区洪水具有汇流迅速、洪峰尖瘦, 且易与上游洪水遭遇等特点^[1], 是三峡水库入库洪水的重要组成部分, 对三峡水库安全运行的影响不可小觑。如何延长三峡库区洪水预见期、提高洪水预报精度, 是三峡入库洪水预报面临的一大难题。目前, 解决这一难题的有效途径是考虑预见期内降水, 将降水预报信息与洪水预报相融合^[2]。

国内外不少研究学者在气象水文耦合洪水预报方面开展了丰富的研究, 如张洪刚^[3]、陆桂华^[4]、郭生练^[5]、Walter^[6]等分别利用随机降雨预报模型、区域数值天气预报模式以及中尺度数值天气预报模式等降水预报信息驱动洪水预报模型, 均在不同程度上延长了洪水预见期。同时, 以上研究也指出制约提高预见期内洪水预报精度的技术瓶颈是降水预报的精度。近年来, 随着大型计算机数值计算能力和 3S 技术的迅猛发展, 降水预报和洪水预报研究均取得了较大的进展, 中尺度数值天气预报模式凭借时效性强、精度较高等特点, 在中短期天气预报领域得到广泛应用。而基于物理机制的

网格化分布式水文模型, 由于模拟精度高, 易于与数值气象模式耦合, 在洪水预报上有较大的应用潜力。为此, 本文分别利用新一代数值天气预报 WRF 模式和 VIC 水文模型对三峡库区内暴雨、洪水进行预报, 并提出了基于 WRF 和 VIC 的陆气耦合建模方法, 依此为基础构建了三峡库区陆气耦合暴雨洪水预报系统, 成功的延长了三峡入库洪水预见期、提高了预见期内入库洪水预报精度。

2 陆面模型

2.1 VIC 模型概述

VIC 水文模型基于 SVATS(Soil Vegetation Atmosphere Transfer Schemes)思想, 通过空间网格化和土壤空间概率分布函数来反映气候和下垫面因子的时空变异性, 也被称为“可变下渗容量模型”。新一代 VIC 模型将土壤分为 3 层, 从上自下分别为顶薄层、上层和下层, 在蒸散发计算上, 采用冠层湿部蒸发、植被蒸腾和裸土蒸发三种蒸发模式。在产流机制上, 将产流分为直接径流和基流两个部分, 其中直接径流包含蓄满和超渗两种产流机理, 分别用于饱和面积和未饱和面积上的产流计算; 采用 ARNO 方法描述基流, 且不考虑顶薄层和上层中的侧向流, 并假定基流只发生在最下

收稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAB29B0806); 科技部、水利部公益性行业科研专项(200701008); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)

作者简介: 彭艳(1988-), 女, 湖南醴陵人, 硕士研究生, 研究方向为分布式水文模型和陆气耦合。Email: pyzpengyan@gmail.com

层土壤^[7-8]。在汇流计算上, VIC 模型假定各个网格之间产流计算相互独立, 通过耦合 Routing 网格汇流模型^[9]来计算网格内和网格间汇流, 网格内汇流采用经验单位线法, 网格之间汇流则采用线性圣维南方程组方法求解。陆面过程模拟流程图见图 1。

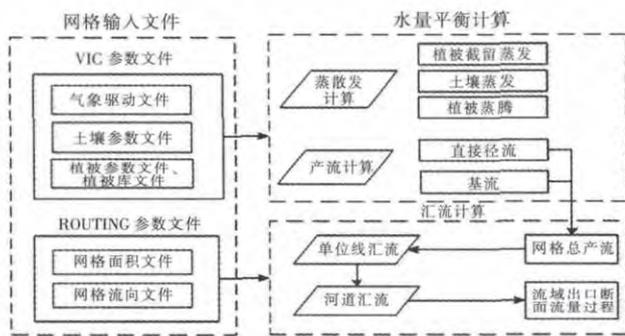


图1 VICROUTING 模型流程图
Fig.1 Flow chart of VICROUTING model

2.2 模型参数确定

VIC-Routing 模型参数可以分为产流和汇流参数, 产流参数包括网格植被类型、植被参数库以及土壤参数, 汇流参数包括网格面积比例、网格流向、流速以及扩散系数。利用 ArcGIS 软件, 通过水文分析和空间统计等处理先后生成网格面积比例、网格流向, 网格植被类型分布等参数文件, 通过参考 LDAS(Land Data Assimilation System) 相关成果来制作植被参数库文件。而对于网格土壤参数文件的制作, 由于土壤参数较多, 分与土壤类型相关的参数和与产流相关的经验参数, 需采用不同的方法确定, 前者采用基于网格优势土壤类型查表和公式计算相结合的方法确定, 后者则通过模型率定来确定。

为方便与数值天气预报模式耦合, VIC 网格目标分辨率与数值天气预报模式一致, 取为 10km, 统计结果表明, 寸、宜区间共由 680 个 10km×10km 网格覆盖, 其中共有 642 个网格产流量汇入三峡水库。

2.3 模型输入

本文中 VIC 模型只对水量平衡进行计算, 采用 24h 的时间步长, 模型输入为日降水和日最高、最低气温。在降水、温度数据网格插值上, 利用寸滩等 87 个雨量站的实测降雨数据和奉节等 7 个气象站的温度数据, 采用倒距离平方和插值法将站点数据插值到网格上, 考虑到三峡库区内雨量站和气象站点分布不均, 且雨量站比温度站密集, 故采用动态搜索法确定插值范围, 取距网格中心点最近的六个雨量站和最近的三个

温度站分别对雨量、温度进行网格插值计算。

2.4 模型参数率定

VIC-Routing 模型待率定的参数有 7 个与产流相关的土壤经验参数和 2 个汇流参数。对于土壤经验参数的率定, 考虑到 VIC 为基于网格的分布式水文模型, 对每个网格内的经验参数都进行率定, 计算量巨大, 计算时间过长, 可行性较低; 而三峡库区土壤类型分布较又较为均匀, 上层土壤(0~30cm)主要是壤土类, 下层土壤(30~100cm)主要是黏壤土和黏土, 且以万县为界, 万县上游主要为黏壤土, 万县下游主要为黏土, 并没有必要对每个网格内的土壤经验参数都进行率定。结合三峡库区水文控制站点流量资料情况的基础上, 将三峡库区以万县为界, 分为两个区间, 分别进行参数率定, 万县以上区间以寸武、清溪场子区间为代表流域, 万县以下分左右岸, 左岸以大宁河(巫溪站)为代表流域, 右岸以磨刀溪(长滩站)为代表流域。寸武、清溪场流量资料系列较长, 取 2001~2006 年为率定期、2007~2008 年为检验期, 而巫溪和长滩站径流资料有限, 取 2004~2005 年为率定期、2006 年为检验期, 采用 SCE-UA 优化算法, 以 Nash 模型效率系数 R^2 (确定性系数)为目标函数, 参数率定结果详见表 1。至于汇流参数的率定, 三峡库区虽然汇流地貌条件复杂, 但库区两岸支流较短, 汇流速度均较快, 且 Routing 模型中汇流速度和扩散性系数都有较明确的物理意义, 故可先利用相关资料估算初值, 再选取洪水过程进行调试, 最终调试结果表明, 流速可取 $3.5\text{m}^3/\text{s}$, 扩散性系数可取 $1\ 000\text{m}^2/\text{s}$ 。

表1 VIC模型土壤经验参数率定结果表
Table1 The values of soil parameters in VIC model after calibration

参数	参数物理含义	寸武~清溪	磨刀溪	大宁河
		场子区间	(长滩站)	(巫溪站)
B	蓄水容量曲线指数	0.21	0.12	0.13
D_s	非线性基流最大值的因子	0.62	0.43	0.34
D_{max}	基流最大流速	3.79	18.77	24.25
W_s	最大蓄水容量因子	0.63	0.73	0.82
$Depth_1$	顶薄层土壤厚度	0.10	0.11	0.09
$Depth_2$	上层土壤厚度	0.26	0.28	0.31
$Depth_3$	下层土壤厚度	0.31	0.64	0.51
	率定期纳什系数 /%	84.4	73.1	67.8
	检验期纳什系数 /%	82.1	72.1	66.6

2.5 VIC 模型检验

为检验 VIC 模型在三峡库区的模拟情况, 利用 2006~2008 年库区气象、水文以及径流资料, 分别对三

峡库区年径流量、汛期产流量(5月1日~11月1日)的场次洪水均对三峡入库洪水有重要影响,统计结果以及重要洪水过程等模拟结果进行统计分析,所选取详见表2~3。

表2 三峡库区年径流和汛期产流量模拟结果统计表
Table2 The statistic results of runoff simulation in flooding period and the whole year

年份	汛期产流量/10 ⁸ ·m ³			年径流量/10 ⁸ ·m ³		
	计算值	模拟值	相对误差/%	计算值	模拟值	相对误差/%
2006年	141.99	142.12	0.09	237.14	230.06	3.08
2007年	265.46	267.39	0.73	335.71	346.10	3.09
2008年	239.86	236.28	1.49	324.36	337.91	4.18

表3 场次洪水模拟结果统计表
Table3 The statistic results of flood progress simulation during 2006~2008

起止时间(年/月/日)	区间洪峰流量/m ³ ·s ⁻¹			区间洪量/10 ⁸ ·m ³				
	计算值	模拟值	相对误差/%	计算值	模拟值	相对误差/%	实际峰现时间	模拟峰现时间
2007/6/14~2007/6/25	10782.4	11272.8	4.5	72.0	58.5	18.9	2007/6/20	2007/6/20
2007/7/3~2007/7/16	6673.6	7028.5	5.3	35.9	30.5	15.2	2007/7/21	2007/7/21
2007/7/16~2007/8/8	10312.6	9972.5	5.2	33.1	34.1	3.2	2007/7/30	2007/7/30
2008/7/1~2008/7/15	11273.5	10906.9	3.4	28.4	28.9	1.9	2008/7/5	2008/7/5
2008/7/20~2008/7/29	7830.0	5582.2	40.3	25.2	22.2	11.8	2008/7/24	2008/7/24
2008/8/8~2008/8/22	6561.2	6494.2	1.0	26.5	30.3	14.3	2008/8/26	2008/8/26
2008/8/28~2008/9/3	9734.3	9365.4	3.9	29.8	30.0	0.4	2008/8/30	2008/8/30

由表2~3可知,2006年~2008年VIC模型三峡库区年径流模拟总量和汛期模拟产流量的相对误差均较低,年径流模拟总量相对误差分别为3.08%、3.10%、4.18%,汛期模拟产流量,分别为0.13%、0.73%和1.66%。进一步分析可知,在7场洪水模拟中,洪峰和洪量相对误差均在20%以内,且模拟峰现时间和实际峰现时间均完全拟合。根据水文情报预报规范(SL250-2000)^[10]相关评判标准,三峡库区VIC模型模拟精度较高,可以用于三峡水库入库洪水作业预报。

3 气象模式

3.1 WRF模式简介

WRF模式是由美国多家研究机构共同研发的一代中尺度预报模式和同化系统,采用模块化、并行化以及分层设计等技术,在计算精度、快波处理以及预报时效等方面优于其他中尺度气象模式,有着良好的降水、气温模拟精度^[11-13]。

3.2 WRF模式设置

本文WRF模式以三峡库区为计算区域的中心,采用粗细网格双重嵌套划分方法,粗网格和细网格的水平分辨率分别为30km和10km,分别覆盖影响长江

中上游的主要天气系统和影响三峡库区的主要天气系统,并根据网格水平分辨率将WRF模式积分步长设置为180s。在预报作业上,下载美国环境预测中心(NCEP)发布的全球分析场和预报场作为WRF模式的初始场和侧边界条件,并以3h为计算步长预报未来168h之内的天气状况。由于NCEP每天在北京时间8点20分左右发布资料,预报资料下载和WRF模式计算耗时约3h(本文采用8核惠普工作站,CPU主频3.3GHz,12GB内存,Fedora Core14_X64系统和并行计算环境),因此,每天可在11点20分左右发布有效预见期为165h的天气预报成果。本文通过自动运行脚本成功的控制了预报资料下载、预报计算以及预报结果输出等过程的自动运行。

3.3 WRF降水预报检验

为评价WRF在三峡库区的降水预报精度,参考《关于下发中短期天气预报质量检验办法(试行)的通知》气发(2005)109号文件相关要求,采用TS评分方法,利用三峡库区87个雨量站点实测资料,对WRF模式2007年7月逐日降水预报进行检验。为便于比较,实测值以及预报值时段统一整理为早8时至次日早8时,TS评分结果见表4。

表4 2007年7月WRF模式的TS评分结果
Table4 TS grading results of WRF model in July, 2007

预报时效/h	≥0.1mm	≥10mm	≥25mm	≥50mm	≥100mm
24	0.670	0.217	0.115	0.032	0.000
48	0.772	0.286	0.159	0.054	0.000
72	0.795	0.321	0.168	0.037	0.000
96	0.789	0.334	0.160	0.026	0.000
120	0.740	0.320	0.154	0.027	0.000
144	0.673	0.292	0.142	0.022	0.000
168	0.651	0.286	0.140	0.021	0.000

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC}$$

式中: TS 为评分值, 又称预报准确率, 气象上一般采用该值来评价降水预报的准确率, TS 评分值越高, 表示预报效果越好。 NA 为预报准确次数, NB 为空报次数, NC 为漏报次数。

由表 4 可知, WRF 模式降水预报结果的 TS 评分值与预报时效以及预报降水量级有关, 随着预报时效的延长、降水量级的增加, TS 评分值有减小的趋势。进一步分析可知, 96h 内降水预报结果的 TS 评分值较高且较稳定, 而 96h 之后的 TS 评分值有随预报时效的延长而递减的趋势。可见, WRF 模式在三峡库区的降水预报应用上, 有着良好的短期定量降水预报能力和一定的中期定性降水预报能力。

4 三峡库区陆气耦合洪水预报系统构建

4.1 WRF 与 VIC 耦合

陆面模型和气象模式耦合的关键问题是实现气象模式输出与陆面模型输入之间的时空尺度匹配。在空间尺度上, WRF 模式与 VIC 模型网格分辨率均为 10km, 且两者在地理空间上对应良好, 可直接利用 ArcGIS 软件实现 VIC 网格和 WRF 网格之间的空间匹配。在时间尺度上, WRF 模式和 VIC 模型的预报步长分别为 24h 和 3h, 而耦合系统的步长为 24h, 统一以早八时至次日早八时为计算时段, 依次提取 WRF 模式相应 24h 内累积降水量、最高气温和最低气温等预报要素, 并按 VIC 模型气象输入文件格式要求输出, 从而成功实现了 WRF 模式与 VIC 模型间的单向耦合。

4.2 陆气耦合洪水预报系统实现

三峡库区陆气耦合洪水预报系统主要由气象模式 (WRF)、陆面过程 (VIC-Routing)、数据库支撑、预报发

布以及自动运行控制 5 个模块组成。虽然天气预报和洪水预报计算均在 Linux 系统下完成, 但为便于与其它洪水预报系统集成, 系统将预报发布平台布设在 Windows 客户端, 通过采用服务器构架和数据库访问策略控制技术来解决不同系统间数据传递问题, 并研发了自动运行控制模块, 实现了系统内部自循环日滚动预报, 三峡库区陆气耦合洪水预报系统框架图和预报发布界面详见图 2~3。

5 暴雨洪水预报试验

为检验三峡库区陆气耦合洪水预报系统的预报精度, 选取表 4 中对入库洪水贡献最大的四场三峡库区洪水过程, 进行暴雨洪水预报试验, 各场洪水的峰现时间分别为 2007 年 6 月 20 日、2007 年 7 月 21 日、2007 年 7 月 30 日和 2008 年 8 月 16 日。结合 WRF 模式预报能力, 同时考虑到库区上游水文部门一般只提供未来 3 天寸滩站、武隆站径流过程预报, 本文选取 96h 为最长预见期, 利用耦合系统分别对以上四场洪水进行

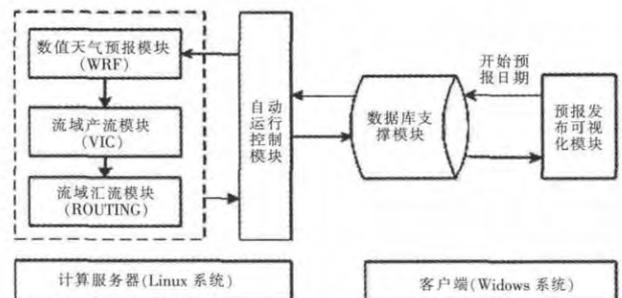


图2 陆气耦合预报系统框架图
Fig.2 Frame of Coupling forecast system

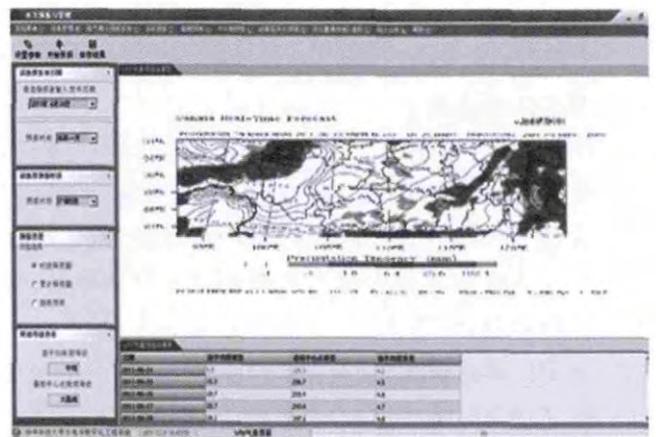


图3 陆气耦合系统天气预报结果展示图
Fig.3 The results of Weather forecasting

日滚动预报试验。

5.1 WRF 模式降水预报成果分析

与传统洪水预报方案检验不同,在检验陆气耦合洪水预报精度之前,应首先对定量降水过程进行检验。本文分别从对产汇流影响较大的面平均雨量(P_AVE)和网格最大雨量(P_MAX)两方面对降水预报精度进行检验,考虑到雨量等级对相对误差等级影响较大,所以大于5mm的降水以相对误差为衡量指标,而小于5mm的降水以绝对误差为衡量指

标。本次降雨试验共有40场降水预报成果,其中面平均雨量和网格最大雨量预报中偏大预报场数分别为24场和28场。分析表明,小雨事件预报值大于实测值的情况较多,暴雨事件预报值小于实测值的情况较多,且整体上WRF模式偏大预报要多于偏小预报。为进一步分析WRF模式降水预报精度的影响因素,统计WRF模式在不同预报时效和不同雨量等级下的降雨预报平均相对误差水平,统计结果详见表5。

表5 WRF模式降水预报评价相对误差统计
Table5 The relative error of WRF model rainfall forecasting

预报时效	≥5mm		≥10mm		≥20mm		≥30mm	
	P_AVE/%	P_MAX/%	P_AVE/%	P_MAX/%	P_AVE/%	P_MAX/%	P_AVE/%	P_MAX/%
24h	1.3	16.3	12.4	1.5	19.2	15.9	33.0	14.3
48h	26.7	95.4	13.4	29.5	20.2	28.6	26.1	43.3
72h	78.8	115.2	5.3	41.7	17.9	12.3	20.7	8.4
96h	180.2	290.5						

由表5可知,WRF模式降水预报精度同时受预报时效和预报等级的影响,对于同一预报时效,中到大雨的平均相对误差最低,大到暴雨次之,而小雨事件则不太稳定;对于同一雨量等级,预报精度有随预报时效的增长而递减的规律。此外,面平均雨量预报精度整体上比网格最大雨量高。总体上,WRF模式在三峡库区的降水预报精度良好,能够为洪水预报提供有效的降水预报信息。

5.2 入库洪水预报成果分析

为检验耦合系统洪水预报精度,以不考虑预见期降水的传统预报方法为参照,将三峡库区陆气耦合洪水预报系统的洪水预报结果与寸滩、武隆上游来水合成为三峡水库预报入库洪水,再与实际入库洪水进行对比分析,其中寸滩、武隆洪水演进采用马斯京根法。图4给出了不同预报时效的预报入库洪水与实际入库洪水以及传统预报入库洪水之间的对比情况,表6则给出了不同预报时效洪峰预报误差。

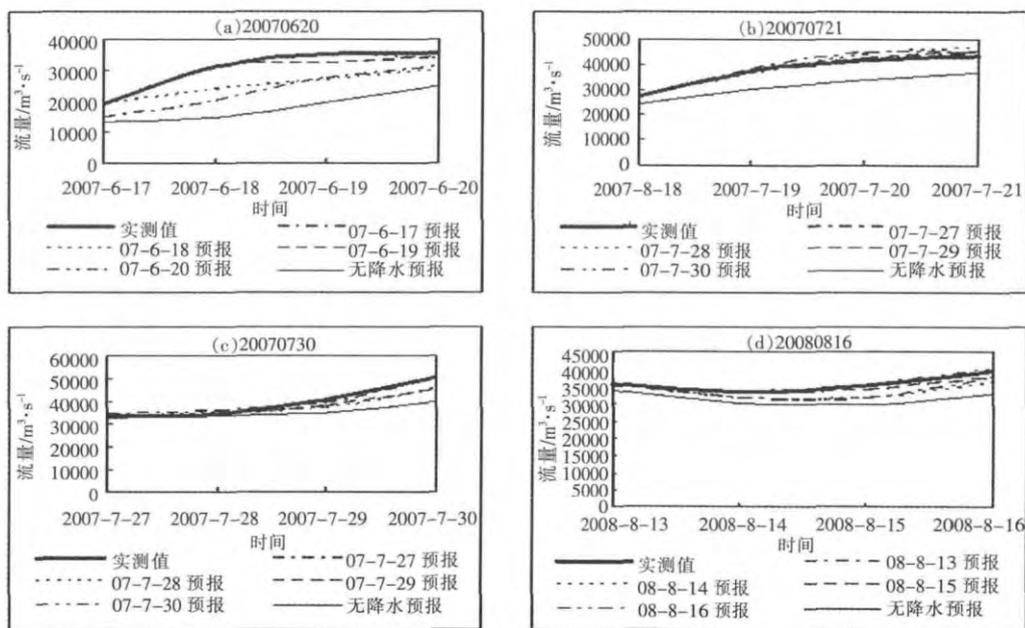


图4 三峡水库入库洪水过程预报值与实测值对比

Fig.4 Comparison between the forecasted and observed inflow of the Three Gorges reservoir

表6 三峡水库洪峰流量预报值与实测值对比表
Table 6 Comparison of the forecasted and observed peak flow of the Three Gorges reservoir

峰现日期	实测洪峰流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	无降水预报流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	预报时效	24h	48h	72h	96h
2007/6/20	35850.6	25068.2	预报/ $m^3 \cdot s^{-1}$	36224.3	36308.2	31604.6	32421.3
			相对误差/%	1.0	1.3	11.8	9.6
2007/7/21	43417.1	36743.5	预报/ $m^3 \cdot s^{-1}$	44623.1	44937.5	46435.4	44743.9
			相对误差/%	2.8	3.5	7.0	3.1
2007/7/30	50533.6	40221.0	预报/ $m^3 \cdot s^{-1}$	50743.4	45132.2	45531.2	50610.3
			相对误差/%	0.4	10.7	10.0	0.1
2008/8/16	39531.9	33037.7	预报/ $m^3 \cdot s^{-1}$	39653.2	37431.3	35937.9	37519.7
			相对误差/%	0.3	5.3	9.0	5.1
平均相对误差水平/%				1.1	2.8	5.9	2.9

由图4可知,与无降水预报相比,考虑三峡库区洪水的三峡入库洪水预报精度明显提高。通过表6进一步分析可知,在统计的16个三峡水库入库洪峰预报成果中,偏大预报为9个,最大正偏差为7.0%,偏小预报为7个,最小负偏差为11.8%。可见,洪峰预报精度与预报时效有关,预报时效越长,预报精度越低,24h~96h对应的平均相对误差水平分别为:1.1%、2.8%、5.9%和2.9%。根据水文情报预报规范(SL2502000),以实测洪峰流量的20%为许可误差,以上四场洪水预报试验洪峰预报误差均在许可误差之内。可见,三峡库区陆气耦合洪水预报系统96h以内洪水预报精度均符合水文预报作业标准,可以为三峡水库安全高效运行提供及时、有效的决策支持。

6 结论

本文在降水预报上,建立了三峡库区新一代数值天气预报WRF模式,降水预报试验结果表明WRF模式对三峡库区降水具有良好的预报能力,短期降水预报精度良好;在洪水预报上,建立了三峡库区VIC分布式水文模型,并采用SCE-UA优化算法对模型参数进行率定,模型检验结果表明VIC水文模型在三峡库区具有较高的确定性和预报精度。进而利用WRF模式降水、气温等预报数据驱动VIC模型,实现了WRF模式与VIC模型间的单向耦合,并构建了三峡库区日滚动暴雨洪水预报系统。最后,选取库区洪水对入库洪水贡献较大的四场洪水进行预报试验,分析结果表明三峡库区陆气耦合预报系统可以有效延长三峡入库洪水预见期,能够提高预见期内洪水预报精度。综上可知,基于数值天气预报模式和分布式水文模型的陆气耦合洪水预报系统在入库洪水预报上具有较大应用潜能。

参考文献:

- [1] 李玉荣, 闵要武, 邹红梅. 三峡工程蓄水水文特性变化浅析[J]. 水文, 2009, 29(4): 37-39, 51. (LI Yurong, MIN Yaowu, ZOU Hongmei. Discussion on hydrological characteristics changes of the Three Gorges Reservoir during storage period [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(4): 37-39, 51. (in Chinese))
- [2] 雍斌, 张万昌, 刘传胜. 水文模型与陆面模式耦合研究进展[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 961-970. (YONG Bin, ZHANG Wanchang, LIU Chuansheng. Advances in the coupling study of hydrological models and land-surface models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 961-970. (in Chinese))
- [3] 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, 20. (ZHANG Honggang, GUO Shenglian, ZHOU Fen, et al. Synthetic index of river bed stability for alluvial rivers [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(1): 9-12, 20. (in Chinese))
- [4] 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. (LU Guihua, WU Zhiyong, WEN Lei, et al. Application of a coupled atmospheric hydrological modeling system to real time flood forecast [J]. Advances in Water Resources, 2006, 17(6): 847-852. (in Chinese))
- [5] 郭生练, 张俊, 郭靖, 等. 基于气象模式的汉江流域洪水预报系统[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 1-5. (GUO Shenglian, ZHANG Jun, GUO Jing, et al. Flood forecasting system of Hanjiang basin based on meteorological model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3): 1-5. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F A. Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(7): 14415-14428.
- [8] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 385-408. (XU Zongxue. Hydrological Models [M]. Beijing: Science Press, 2009: 385-408. (in Chinese))

(下转第65页)

Characteristics of Water Pollution in Nulanjiang River Basin and Countermeasures for Water Resources Protection

XIE Yonghong , WU Xiuping

(Hydrology and Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China)

Abstract: The Niulanjiang River–Dianchi Lake Water Supplement Project, as a synthetic utilization project of water resources in Dianchi Lake basin and surrounding areas, is crucial for increasing the ecological and environmental water supplement and improving the quality of water resources in Dianchi Lake. As a consequence, this project plays a great strategic role in ensuring the construction of the new Kunming city and the economic and social sustainable development of Yunnan Province. But the monitoring results of recent years suggest that the quality of water resources in the Niulanjiang River has entered in a downtrend. Non–point source pollution has been considered as the major pollution sources in previous studies. This research shows that the major pollutant in the Niulanjiang River is total phosphorus, which mainly comes from the industrial discharge, most being found at the Qixingqiao Section. And based on the research, this paper also proposed some water resources protection countermeasures to control the water pollution. The reliability of the conclusion has been proved by the result of water environment governance measures and water quality monitoring.

Key words: Niulanjiang River; water quality; water pollution; water resources protection

(上接第 16 页)

- [9] Lohmann, D., R. Nolte Holube, E. Raschke. A large–scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes[J]. *Tellus*, 1996, 48A:708–721.
- [10] SL250–2000, 水文情报预报规范 [S]. (SL250–2000, Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting [S]. (in Chinese))
- [11] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia Jimy, et al. A Description of the Advanced Research WRF (Version 2) [Z]. NCAR Tech. Note NCAR/TH – 486 +STR, 2005.
- [12] James Donel, C.A. Davis, M. Weisman. The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2004, 5 (6):110–117.
- [13] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. *气象*, 2004, 30(12):27–31. (ZHANG Guocai. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States [J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(12):27–31. (in Chinese))

A Coupled Atmospheric–Hydrological Modeling System and Its Application for Three Gorges Reservoir Region

PENG Yan^{1,2,3}, ZHOU Jianzhong¹, JIA Meng¹, ZENG Xiaofan¹, TANG Zaozao^{2,3}

(1. School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

3. Guangdong Emergency Technical Research Center for Mountain Torrent Disaster Events, Guangzhou 510635, China)

Abstract: As to get longer flood lead–time and greater accuracy, VIC (Variable Infiltration Capacity) model for Three–Gorge Reach basin was calibrated and validated, then the high–resolution numerical atmospheric WRF (Weather Research and Forecasting) model was one–way coupled to the VIC model after temporal–spatial scale transformation in this paper. Choosing four floods as forecast experiment, the results show that WRF performs reasonably well in short–term quantitative precipitation forecast and the VIC model using WRF precipitation and temperature showed a good result of flood timing and peak discharges in the prediction of the Three Gorges Reservoir inflow.

Key words: coupled atmospheric–hydrological modeling system; VIC distributed hydrological model; WRF meteorological model; Three Gorges Reservoir region; flood forecasting