

2006年汛期VIC水文模型模拟结果分析

林 建¹ 谢正辉² 陈 锋² 肖子牛³ 薛建军¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所;
3. 云南省气象局)

提 要: 利用大尺度陆面水文模型 VIC 及其汇流模型模拟了 2006 年 5—9 月全国 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 逐日径流深和土壤相对湿度分布,对淮河流域 2006 年汛期(6 月 28 日—7 月 5 日)强降水过程期间的模拟结果进行了渍涝灾害的分析。同时对流域主要水文站逐日流量($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)过程进行了模拟,并与实况作了对比分析;并且针对淮河流域不同空间分辨率($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 及 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)下主要水文站点的逐日流量过程进行了比较。结果表明:VIC 模型模拟的径流深和土壤相对湿度分布与降水分布是一致的,模拟土壤湿度具有可用性。利用累计降水、径流分布和土壤相对湿度及流量变化可以监测渍涝灾害的发生;VIC 模型及其汇流模型在一定程度上可以反映出实际流量的变化趋势,模拟流量对降水较敏感,细网格模拟流量在量值上与实况更为接近;模拟结果误差可能跟汇流模型中流域边界的确定、参数率定、气象强迫资料等因素有关。

关键词: VIC 模型 径流 土壤湿度 流量 渍涝

Simulation of VIC Hydrologic Model During 2006 Flood Season

Lin Jian¹ Xie Zhenghui² Chen Feng² Xiao Ziniu³ Xue Jianjun¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences; 3. Yunnan Meteorological Bureau)

Abstract: The runoff and water content in soil and the discharge of hydrologic station in China during the flood season of 2006 are simulated by using the VIC (Variable Infiltration Capacity) hydrologic model, with emphasis on the water logging disaster produced by a heavy rainfall case from 28 June to 5 July 2006 in the valley of Huaihe River. Performance of the model in simulating the discharge over the Huaihe River basin is examined in different horizontal resolutions, e. g., coarse mesh and fine mesh($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ and $0.1^\circ \times 0.1^\circ$). Results show that patterns of simulated runoff and soil humidity are consistent with that of rainfall and the model output for soil humidity is reasonable for reference.

本文受国家自然科学基金(批准号:90411007)、国家重点基础研究发展规划(批准号:2005CB321703、2004CB418307)、中国气象局基建项目和淮河流域气象开放研究基金的联合资助。

收稿日期:2007年1月15日; 修定稿日期:2007年4月2日

Temporal variation in the accumulated rainfall, runoff and soil humidity can be used to monitor the water logging disaster. VIC land surface model and conflux model are able to reproduce the trend of realistic discharge in some degree. Discharge simulation is sensitive to rainfall and is more realistic in the case of fine mesh than in the case of coarse mesh. Model error likely comes from the unreasonable boundary of the drainage basin, calibration of parameters and atmospheric forcing data.

Key Words: VIC hydrologic model runoff humidity in soil discharge water logging disaster

引 言

VIC (可变下渗能力, Variable Infiltration Capacity) 模型是一个基于网格的半分布式水文模型,它对考虑入渗能力次网格空间变异性的陆面水文过程的描述及其参数的网格化特性,便于与气候模式和水资源模型嵌套以评价气候变化对水资源的影响,是目前应用最广泛的大尺度陆面水文模型之一。

VIC 模型最初由 Wood^[1] 根据一层土壤变化的入渗能力提出, Xu Liang 等在此基础上将其发展为两层土壤的 VIC-2L 模型^[2-3], 后来模型中又增加了一个 10cm 左右的薄土层, 变成三层土壤的 VIC-3L 模型^[4]。Liang and Xie^[5] 发展了新的地表径流机制, 它同时考虑了蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质的次网格非均匀性对产流的影响, Liang 等^[6] 及 Yang 等, 谢正辉^[7-9] 建立了地下水位的动态表示并用于 VIC-3L 模型^[8-9]。VIC 模型^[2,4,10] 可同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟, 也可只进行水量平衡的计算, 输出每个网格上的径流深和蒸发, 再通过汇流模型将网格上的径流深转化成流域出口断面的流量过程, 弥补了传统水文模型对热量过程描述的不足。

该模型已作为大尺度水文模型分别用于美国的 Mississippi、Columbia、Arkansas-Red、Delaware 等流域的大尺度区域径流模拟^[11-13]。谢正辉等发展了用于气候模拟的地表径流参数化方法^[5,14], 建立了适用于中国区域气候模拟的 50km×50km 分辨率网格的大尺度水文模型框架^[15], 并提出了根据气

候分区结合流域分区进行参数率定和移植的模型参数估计方案^[16], 建立气候变化对中国径流影响评估模型^[17]。近些年来, 面雨量^[18-19] 在防汛、抗洪方面得到了广泛的应用, 成为我国气象和水文两大学科相结合的纽带, 但在渍涝监测和预报方面的工作还处于起步阶段。本文利用改进的水文模型^[15] 模拟 2006 年 5—9 月全国 0.5°×0.5°逐日径流深和土壤相对湿度分布及各个主要水文站逐日流量过程, 重点分析 2006 年 6 月 28 日至 7 月 5 日淮河强降水过程引发的渍涝灾害, 对流域主要水文站模拟流量(0.5°×0.5°)与实况进行对比分析; 同时对 2006 年汛期淮河流域不同空间分辨率(0.5°×0.5°及 0.1°×0.1°)下主要水文站点的逐日流量过程进行比较, 并分析模拟可能存在的问题、误差来源及解决的办法(VIC 模型应用于不同区域不同分辨率的试验中, 对相关参数都进行重新率定)。

1 VIC 水文模式业务化流程

1.1 气象强迫场

图 1 给出了 VIC 水文模式业务化流程框图, 其中 VIC-3L 模型所需气象强迫场包括逐日降水资料和日最高最低气温资料, 降水量实况场是由逐日常规降水量、加密降水量或水文站降水量插值到全国范围模式所需网格上, 日最高最低气温实况场是将常规和加密最高最低气温插值到模式所需网格上。降水和日最高最低气温预报场由精细化预报提供, 文中采用 Barnes 客观分析法进行插值。模式每天运

行两次,9:30和15:30分别生成08和20点为起报时刻的00~72小时每24小时间隔的气

象强迫场用于水文模式驱动。

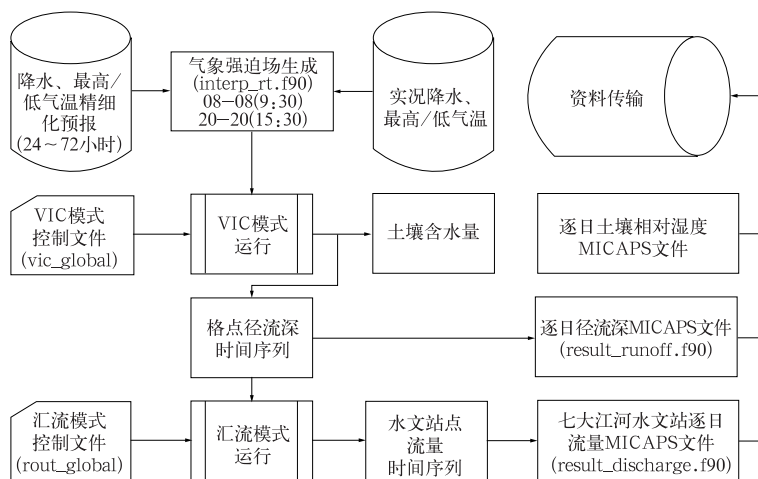


图1 VIC水文模式业务化流程框图

1.2 模型的全局控制文件

VIC模型及汇流模型的运行环境为UNIX工作站,整个运行过程受两个全局控制文件控制。VIC全局控制文件确定VIC模型分辨率和时间步长、模拟起止时间、是否运行融雪模块和冻土模块、所有输入输出文件的路径等等;汇流模型全局控制文件确定汇流模拟起止时间,汇流模型信息参数文件的路径等等。

1.3 径流深度、土壤湿度和水文站点流量资料转换

为方便日常业务需求和应用,把VIC-3L模式提供的单元网格的径流深、土壤含水量和水文站点流量时间序列转换成全国逐日径流深度、土壤相对湿度和全国(7大流域)水文站逐日流量分布,并以MICAPS格式给出。其中,

土壤相对湿度=(土壤含水量/土壤的饱和含水量) $\times 100\%$

模型输出文件中没有直接给出土壤的饱和含水量参数,但给出了土壤容重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ · s^{-1})、土粒密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ · s^{-1})以及土层

厚度(m),因此可以根据公式计算出饱和含水量(m),公式为:

饱和含水量=(1-土壤容重/土粒密度) $\times$ 土层厚度

2 VIC水文模型模拟结果分析

2.1 径流深及土壤湿度分布

2.1.1 2006年汛期全国径流深及土壤湿度分布

图2给出了2006年汛期(5—9月)全国累计降水分布及 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 径流深和土壤相对湿度分布图。可以看出,2006年汛期降水主要集中在淮河中下游及长江以南地区,为600mm以上,尤其是华南沿海地区,由于受台风影响,降水量达1200~1800mm;对应径流深为200mm以上,华南沿海地区700~900mm;全国径流深和土壤湿度分布总体上和降水分布是一致的,从东南向西北呈递减的趋势。流域产流(径流深)大的地方,相应的土壤也趋于饱和(土壤湿度增加)。为了更清楚地讨论径流深和土壤湿度分布对渍涝灾害监测的作用,下面对2006年6月28日

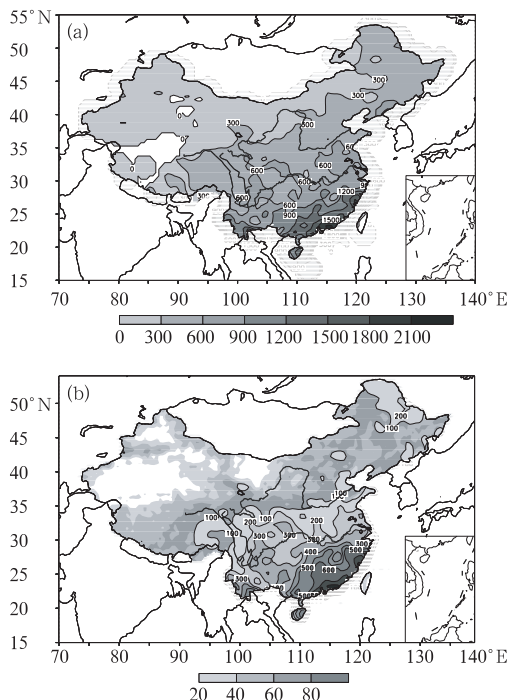


图 2 2006 年 5—9 月全国累计降水(a)、径流(实线)和土壤平均相对湿度(%，阴影)($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格)分布(b)

至 7 月 5 日淮河强降水过程引发的渍涝灾害进行较为详细的分析。

2.1.2 2006 年 6 月 28 日至 7 月 5 日淮河强降水过程引发的渍涝灾害分析

如图 3a 所示,2006 年 6 月 28 日至 7 月 5 日,受高空冷涡、西南低空急流和中低层切变的共同影响,淮河流域自北向南出现了一次强降水过程,尤其是在淮河中下游安徽和江苏中北部及山东南部累计降水达 200mm 以上,其中江苏中部达 300mm 以上,累计径流量(图 3b)达 50~100mm,局部 150~200mm。

为了进一步分析渍涝灾害的发生,首先给出土壤湿度模拟值与实况的对比。VIC 模型中土壤湿度的时间分辨率为 1 天,水平空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,垂直方向共分 3 层,但各层厚度并不相同,各个网格的表层土壤厚度在 0.07~0.5m,次表层在 1.5~3m,第三层厚度为 2~3m;而土壤湿度实况为每月第 8 日、18 日、28 日的旬观测值,分 10cm、

20cm、50cm 三层。为了便于比较,图 3c 给出了 6 月 28 日模拟的表层土壤湿度与实际观测的 20cm 土壤湿度的对比,这时淮河流域模拟的表层土壤湿度大都在 60%~80%之间,只有在江苏、安徽和山东三省交界的地区土壤湿度在 80%以上。而实际观测的土壤湿度大都也在 70%以上,三省交界地区土壤湿度也在 80%以上。6 月 28 日模拟的表层土壤湿度与实际观测的 10cm、50cm 土壤湿度的对比(图略)同样可以看出,模拟的表层土壤湿度和实测值在分布趋势上是一致的。这说明该水文模型模拟出的土壤湿度有一定的可用性。

随着 29 日雨带南压,淮河中下游地区土壤湿度(图 3d)一直持续在 80%及以上,土壤趋向于饱和状态。另外,由于黄淮平原地势低洼,为渍涝灾害易发区(图略)。根据淮河流域上报灾情得知:淮河中下游从 7 月 1 日就出现了部分农田积水和城市积涝,4 日部分地区出现内涝,流域水位上涨。从累计降水、径流深度及土壤湿度的演变图(图略)不难看出,截止到 7 月 1 日,淮河中下游的降水已达 150mm,局部地区甚至达 200mm 以上,径流深度达 50~100mm 以上,土壤也一直处于饱和状态,与此对应,部分地区出现了农田渍涝和城市内涝。随着 7 月 2—5 日降水的持续和加强,汛情持续并一度加重,5 日后西太平洋副高减弱,雨带南压,淮河流域降水基本结束,汛情才逐步得到缓解。

2.2 水文站模拟流量与实况对比检验

对淮河强降水引起的渍涝灾害的分析可以看出,径流深分布和土壤相对湿度分布在一定程度上可以反映和监测渍涝灾害的发生,但缺乏径流深的实测数据,土壤相对湿度观测值也只是旬观测值,因此无法对这些量进行验证。然而,对于一个流域水文站来说,有相应的出口断面流量的观测值,下面将模拟的流量和实测流量对比检验,以了解模型的性能。

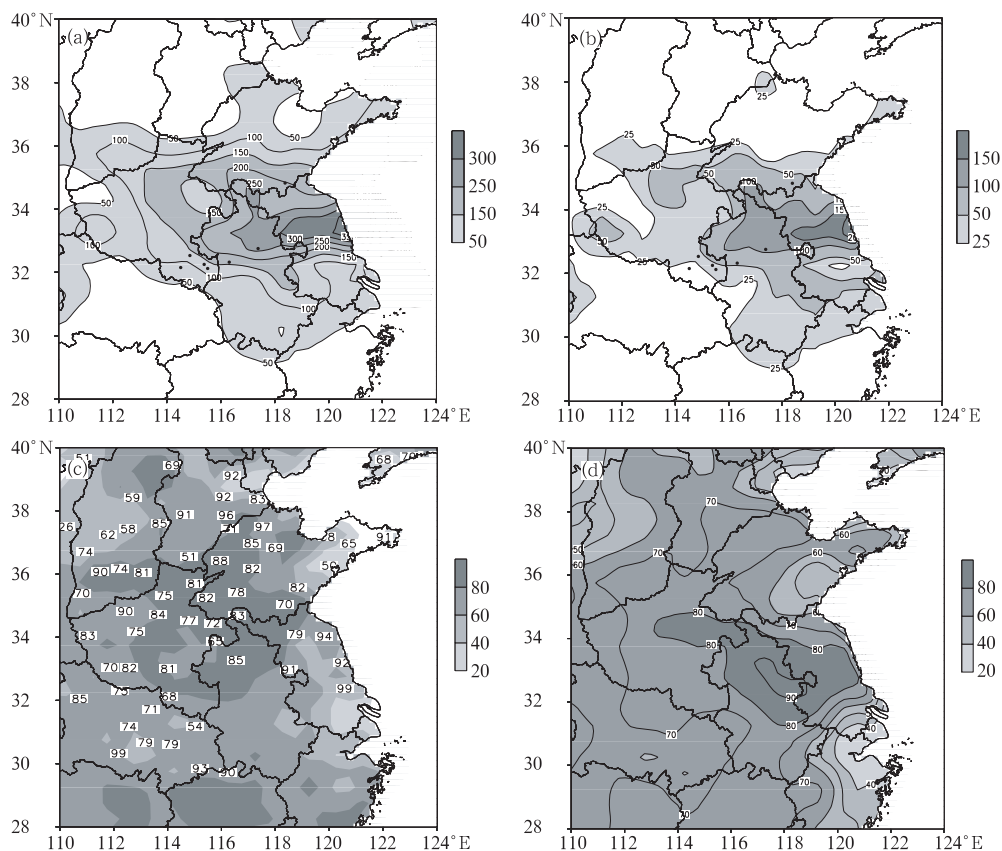


图3 2006年6月28日至7月5日淮河流域累计降水(a)和径流(b)分布(小黑点为水文站)、6月28日淮河流域模拟土壤相对湿度(%，阴影)和实况(数字)(c)及7月1日模拟土壤相对湿度(d) ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格)

实况流量资料从6月8日至8月14日,样本长度为68天, $R=0.25$ 达到相关系数95%显著性检验。该节图中降水是指该水文站控制流域中平均的面降水量,不只是该水文站点的降水。这个降水是由汇入该水文站点的每个网格的降水决定的,而每个网格的降水是通过已有气象观测站点插值而得到的。其次,径流深也是指该水文站控制流域中的平均径流深,而流量与径流深成正比,它是指单位时间内流经该站点的总水量平铺到整个控制流域面积上的水流平均厚度。

2.2.1 2006年汛期长江、松花江主要水文站模拟流量($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)与实况对比检验

图4给出了2006年5—9月长江流域寸滩、城陵矶水文站的模拟流量与实况的对比。可以看出,寸滩水文站模拟流量与实况具有

较高的相关系数($R=0.563$),量级也相当,在 $5000 \sim 30000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,但峰值稍滞后,6月下旬持续性的降水,流量在7月初达到峰值,模拟流量在7月中旬才达到峰值。城陵矶水文站相关系数 $R=0.435$,量级差别大,实况 $<2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,模拟在 $4000 \sim 45000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,流量对降水反映较为敏感,并且峰值落后于观测值。

松花江流域哈尔滨和大赉水文站模拟流量与实况的对比,可以看出,哈尔滨水文站模拟流量与实况相关系数 $R=0.809$ (大赉水文站相关系数 $R=0.642$),整体相关都很好,能反映流量变化趋势,但对降水较敏感,出现了多个峰值,并超前于实测值。另外,量级差了2倍,实况 $<2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,而模拟 $<7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

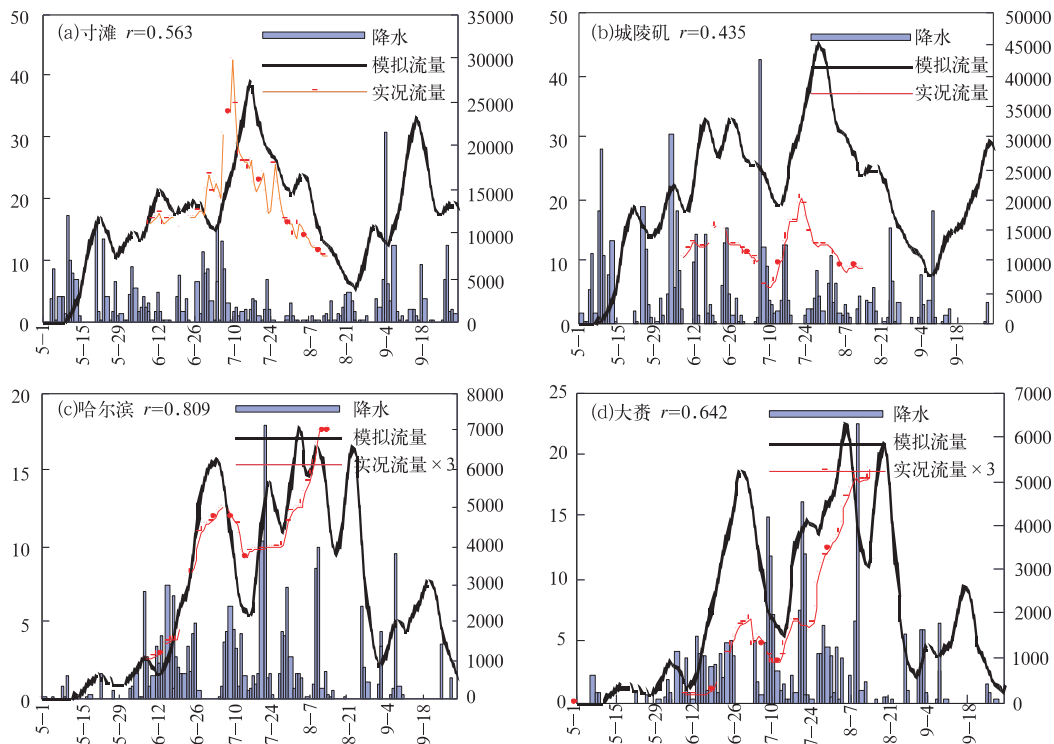


图 4 2006 年 5—9 月长江流域寸滩(a)、城陵矶(b)及松花江流域(实况流量 $\times 3$ 倍)哈尔滨(c)、大赉(d)降水及模拟流量($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格)与实况对比

2.2.2 2006 年汛期淮河流域水文站粗细网格模拟流量与实况对比

为了探讨模型水平分辨率对模拟结果的影响,对 2006 年汛期淮河流域不同空间分辨率下($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 及 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)主要水文站点的逐日流量过程进行比较分析。

图 5 给出了 2006 年汛期淮河流域吴家渡、王家坝、息县粗细网格降水及模拟流量与实况的对比。从吴家渡水文站流量过程可以清楚地看到 6 月 28 日至 7 月 5 日强降水过程引起的流量峰值出现在 7 月 7 日左右,达到了 $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,但 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格模拟流量与实况差别较大,不足 $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,并且峰值落后。但模拟与实况相关系数 $R=0.534$ 。 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格模拟相关系数有所下降($R=0.353$),峰值仍落后,但量值上更靠近了。

王家坝水文站汛期出现了两次峰值,前一次峰值出现在 6 月 28 日至 7 月 5 日强降水过后,后一次峰值出现在 7 月 19—22 日及 25—

28 日降水过程以后,峰值流量分别为 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格模拟流量与实况相关系数很高($R=0.846$),量值差别也不大,前期 7 月初的峰值比实况稍落后一些,对后期 8 月初峰值反映较为一致。 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格模拟相关系数稍有下降($R=0.735$),量级相当,但后一次峰值稍偏低。

息县水文站汛期同样出现了两次峰值, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格模拟流量与实况的相关系数较高($R=0.705$),但量级差别较大,实况 $< 600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,模拟 $< 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,峰值也稍落后。 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格模拟相关系数也有所下降($R=0.668$),峰值仍落后,但量级更接近了。

2.2.3 7 大流域主要水文站模拟流量与实况对比及可能存在的问题和原因

表 1 给出了 2006 年汛期 7 大流域主要水文站的模拟流量与实况的范围及相关系数。可以看出,大部分水文站模拟流量与实

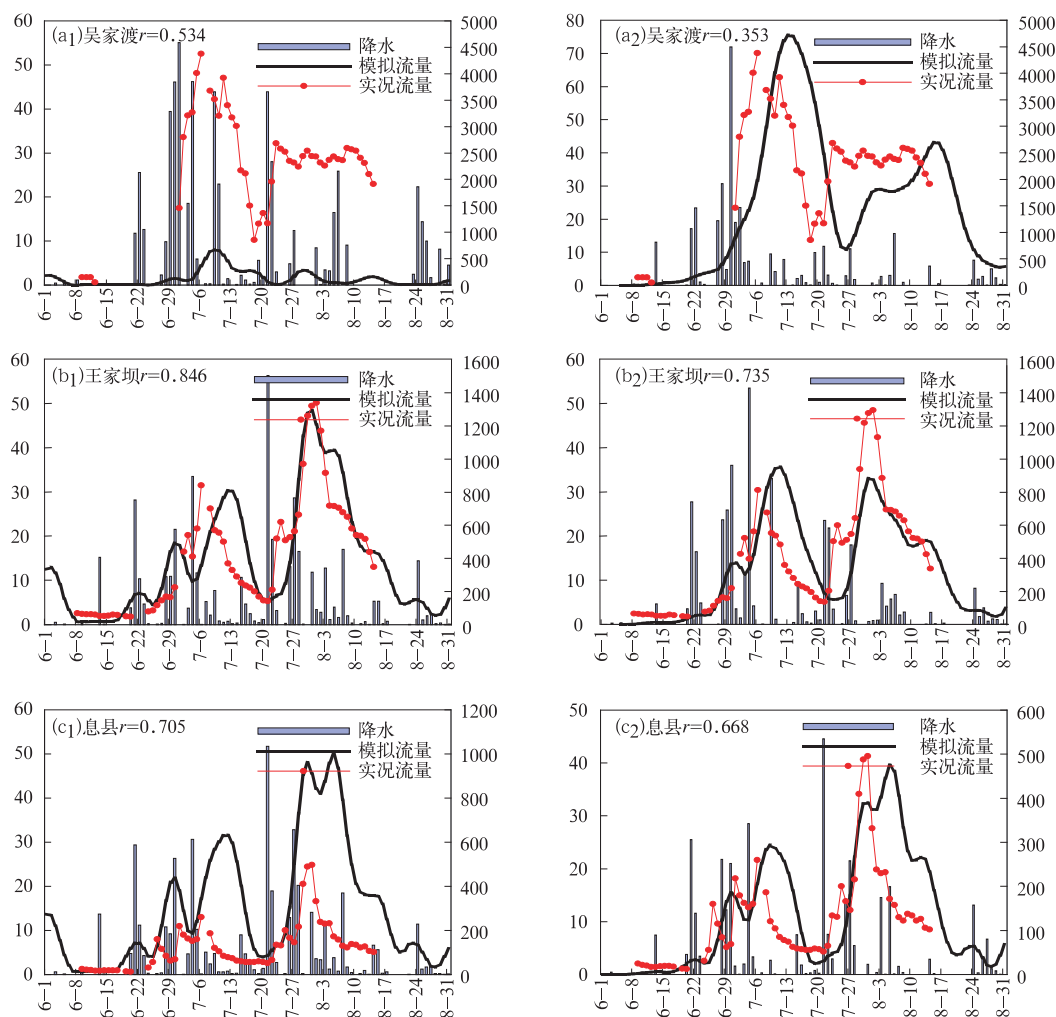


图5 2006年汛期(6—8月)淮河流域吴家渡、王家坝、息县粗($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, a_1 、 b_1 、 c_1)、细($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, a_2 、 b_2 、 c_2)网格降水及模拟流量与实况对比

况具有较高的相关系数,显著水平远远超过 $\alpha=0.05$,其中,部分水文站模拟洪峰流量量级与实况比较相近,部分水文站洪峰流量量级差别较大。另外,部分水文站模拟结果与实况相关较差。

综合分析各水文站的情况不难看出,水文模型在一定程度上可以模拟出实际的流量过程,但模拟流量对降水较敏感,当降水出现或停止时,流量即会出现相应的峰谷值;对出现的大降水或持续性降水,流量峰值,比实况有所滞后。同时我们注意到在一些小流域水文站点,模拟流量和实测值存在较大的偏差。

引起误差的可能原因主要是由于流域边界不确定或者说流域边界不够精确所引起的。因为大尺度条件下,汇流模型提取的流域信息比较粗糙,特别是比较小的流域,引起的汇流面积误差会相对更大。其次,误差由于VIC模型本身不完善引起。对于全国范围来讲,其空间差距很大。一个模型要兼顾干旱的沙漠和湿润的热带亚热带雨林不同的条件,有很大的困难。比如有些南方喀斯特地貌区,岩溶发展很快,但模型没有考虑到这些。再次,误差可能由参数率定带入。我们采用的率定标准是参照月平均流量过程,而这里所

表 1 2006 年 6 月 8 日—8 月 14 日七大江河流域
主要水文站模拟流量与实况对比

流域	水文站	相关系数	实况/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
珠江	南宁	0.254	2000~9000	<1000
	石角	0.0429	200~18000	<200
	柳州	-0.208	600~1600	<200
	桂林	0.136	<1000	500~3500
	梧州	-0.0814	500~30000	量级相当
	江口	-0.003	500~30000	量级相当
长江	寸滩	0.563	5000~30000	量级相当
	沙市	0.598	<30000	量级相当
	城陵矶	0.435	<2000	4000~45000
	河溶	0.394	<500	500~3000
	大通	-0.141	<60000	量级相当
	湖口	-0.303	<15000	10000~50000
	北碚	0.208	1000~4500	1000~8000
	九江	-0.204	10000~50000	量级相当
	汉口	0.284	20000~40000	<300
	宜昌	-0.013	10000~30000	<100
淮河	临沂	0.237	<200	<300
	0.1 * 0.1	0.152		<250
	吴家渡	0.534	<4500	<1000
	0.1 * 0.1	0.353		量级相当
	班台	0.681	200~1200	<200
	0.1 * 0.1	0.256		<600
	王家坝	0.846	<1400	量级相当
	0.1 * 0.1	0.735		<1000
	息县	0.705	<600	<1000
	0.1 * 0.1	0.668		量级相当
黄河	头道拐	0.528	<1000	<6000
	潼关	0.579	<2000	<6000
	龙门	-0.196	200~1800	<90
	小浪底	-0.430	<4000	<7000
	利津	-0.390	<4000	<7000
海河	雁翅	0.329	<20	<100
辽河	铁岭	-0.410	<150	<1200
松花江	江桥	0.538	<3000	<6000
	扶余	0.487	200~1400	<200
	哈尔滨	0.809	<2500	<7000
	大赉	0.642	<2000	<7000

注:黑体为 $\alpha=0.05$ 。

进行的模拟是日流量过程。因此,采用日流量过程来率定参数可能会减少误差。另外,误差也可由参数移植带入。我们对参数的率定只选取了有限的 20 个小流域,这对于整个中国区域来说是十分不足的,特别是西部和

珠江地区,没有率定流域或者只有 1 个,将这样的资料移植到大面积上,肯定会存在不少误差。其它引起误差的原因还有气象强迫资料的不确定性(毕竟这些都是由插值得到的),土壤覆盖数据,植被数据,以及参数化方案等等。

对比分析淮河流域粗细网格的结果,我们发现,由于网格精细化后,对流域边界或者高程等参数刻画更加细致了,最后我们得到的流量和实际观测值更为接近了,但相关系数有所下降。也就是说从趋势上并没有很好的改进。除了前面谈到的其它原因外,更重要的原因可能是气象强迫资料的不确定性,换句话说,是因为气象强迫资料精度不够造成的。尽管模式精度提高了,但初始场资料的精度没跟上,没有达到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 这样的精度。

3 结 论

综上所述,可以得出如下结论:

(1) 文中给出了 VIC 陆面模式和汇流模式业务化的整个流程,在对全国区域进行模拟后,重点对 6 月 28 日至 7 月 5 日淮河流域降水过程引起的渍涝灾害进行了分析。结果表明:模拟土壤相对湿度与实测值在分布趋势上是一致的,该次强降水过程引起淮河地区径流量大,土壤相对湿度大,表层土壤达到饱和,相应水文站出现了流量峰值,从而引起流域渍涝灾害的发生。

(2) 水文站的模拟流量和实况的对比分析表明,有些水文站模拟结果与实况相关性较好,说明水文模型在一定程度上可以反映出实际流量的变化趋势,但模拟流量对降水较敏感。另外,部分水文站模拟结果与实况相关较差。模拟结果误差可能跟汇流模型中流域边界的确定、参数的率定、气象强迫资料等因素有关。

(3) 淮河流域粗细网格的结果分析表明:网格精细化对流域边界或者高程等参数

刻画具有重要性,同时由于气象强迫资料精度不够又会降低与实况的相关系数。

由于流域边界不确定和气象强迫资料精度不够的问题我们将会进一步研究和分析。

参考文献

- [1] Wood E. F., Lettenmaier D. P., Zaitarian V. G. A land-surface hydrology parameterization with sub-grid variability for general circulation models [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1992, 97 (D3): 2717-2728.
- [2] Liang X., 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.
- [3] Liang, X., Lettenmaier D. P., Wood E. F. One-dimensional statistical dynamic representation of sub-grid spatial variability of precipitation in the two-layer Variable Infiltration Capacity Model [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [4] Liang, X., Wood E. F., Lettenmaier D. P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modifications [J]. *Global and Planetary Change*. 1996, 13: 195-206.
- [5] Liang X., Xie Z. H. A new surface runoff parameterization with subgrid scale soil heterogeneity for land surface models [J]. *Advances in Water Resources*. 2001, 24(9-10): 1173-1192.
- [6] Liang X., Xie Z. H., Huang M. Y. A New Parameterization for Groundwater and Surface Water Interactions and its Impact on Water Budgets with the VIC Land Surface Model [J]. *Journal of geophysical research*. 2003, 108(D16): 8613.
- [7] Yang H. W., Xie Z. H. A new method to dynamically simulate groundwater table in land surface model VIC [J]. *Progress in Natural Progress*. 2003, 13(11): 819-825.
- [8] Liang Xu, Xie Zhenghui, Important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater [J]. *Global Planetary Change*. 2003, 38: 101-114.
- [9] 谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位的参数化及初步应用[J]. *大气科学*. 2004, 28(3): 374-384.
- [10] Liang X., Wood E. F., Lettenmaier D. P., Lohmann D., et al. The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes [J]. *Global and Planet. Change*. 1998, 19: 137-159.
- [11] Abdulla F. A., Lettenmaier D. P., Wood E. F., Smith J. A. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red River basin [J]. *Journal of geophysical research*. 1996, 101 (D3): 7449-7459.
- [12] Lohmann D., Raschke E. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model [J]. *Hydrol. Sci. J.* 1998, 43(1): 131-141.
- [13] Nijssen B., Lettenmaier D. P., Liang X., Wetzel S., Wood E. F. Streamflow simulation for continental-scale river basins [J]. *Water Resour. Res.* 1997, 33: 711-724.
- [14] Xie Z. H., Su F. G., Liang X., et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC [J]. *Advances in atmosphere science*. 2003, 20(2): 165-172.
- [15] 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 基于全国50km×50km网格的大尺度陆面水文模型框架[J]. *水利学报*. 2004, 5: 76-82.
- [16] Xie Z. H., Yuan F., Duan Q. Y., Liang M. L., Zheng J., Chen F. Regional Parameter Estimation of the VIC Land Surface Model: Methodology and Application to River Basins in China [J]. *Journal of Hydrometeorology*. 2006, in press.
- [17] 苏凤阁, 谢正辉. 气候变化对径流影响的评估模型研究[J]. *自然科学进展*. 2003, 13(5): 502-507.
- [18] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用[J]. *气象*, 2001, 27(11): 13-16.
- [19] 董官臣, 冶林茂, 符长锋. 面雨量在天气预报中的应用[J]. *气象*, 2000, 26(1): 9-13.