

山区流域暴雨洪水的数值模拟

郑子彦^{1 2} 张万昌³ 徐精文⁴

(1. 中国科学院东亚区域气候 - 环境重点实验室 ,北京 100029; 2. 中国科学院研究生院 ,北京 100049;
3. 南京大学水科学研究中心 ,江苏 南京 210093; 4. 四川农业大学资源环境学院 ,四川 雅安 625014)

摘 要: 基于中尺度天气研究预报模式 WRF 和流域水文模型对我国夏季山区的暴雨洪水进行模拟研究。首先,结合新安江水文模型和 TOPMODEL 自主研发了一个动态结合地面地下产流计算的新水文模型 XXT,并选取成熟的天气研究预报模式(WRF)的模拟结果作为 XXT 的输入进行洪水模拟。其中 WRF 模拟采取 3 重区域嵌套模拟再现了 2007 和 2008 年夏季山东南部沂沭泗河流域的 3 次暴雨过程。模拟结果表明,WRF 对暴雨的时空分布有较好的模拟与预测能力,模拟结果与观测一致性较好,逐时降水过程较观测更为连续,峰值有一定差异,总量略有偏大。WRF 模拟的逐时站点表层土壤湿度与自动站观测的变化趋势一致,峰值偏大,空间分布与降水有着较好的响应关系。总格点径流深的计算结果同样与降水对应得较好,基本能重现出暴雨 - 径流过程的时空变化特征。其后,利用收集的实测降水资料率定 XXT 的模型参数,进而将 WRF 模拟的降水和潜在蒸散发输入到 XXT 进行流域出口洪水流量的模拟,其中 2008 年的模拟结果取得了 0.91 的效率系数,而 2007 年 2 次个例由于偏高的降水,使得洪峰流量较观测有偏大,但与观测的时间相关系数高达为 0.89 和 0.91。研究对于山区暴雨洪水的预报预警和防汛决策具有一定的参考价值。

关键词: 数值模式;暴雨;WRF;XXT;洪水

中图分类号: P333

文献标识码: A

受东亚夏季风的影响,我国东部与华北地区全年降水的大部分集中在夏季。由于季风区强烈的水汽输送和高温导致的局地蒸散发的增多,暖湿空气极易在地形复杂的山区被抬升,进而成云致雨,引发严重的暴雨和山洪灾害。山区的地势往往十分陡峭,这会使暴雨洪水的汇流速度较快,更易在短时间能形成很大的洪水流量,对下游的城市平原区造成巨大的危害。对于一些植被稀疏和处于地震带的山区,更能引发滑坡、泥石流等灾害,对社会生产生活产生重大影响^[1]。

为了对山区暴雨和洪水作出有效的预报和预警,国内外学者近年来从多个不同的领域进行了许多有意义的研究^[2]。由于山洪和强对流降水的密切关系,气象工作者主要着眼于一些改进触发山洪

的强降水监测预警方面的研究^[3-5]。水文防汛部门则采用传统的水文学临界雨量阈值法,以及一些较为稳定的水文产汇流模型对山洪进行预报,根本上也极其依赖于气象预报^[6]。因此,气象上的强降水暴雨预报是山区洪水预报预警的关键。近年来,随着气象中尺度天气模式的不断发展,利用高分辨率的中尺度气象模式模拟区域降水过程,是目前研究降水事件的主要方法^[7]。基于数值模式的定量降水预报的研究也得到愈来愈多的关注^[8-9]。而在计算技术的支撑下,新一代中尺度模式能为业务应用提供更翔实的可用资料^[10]。而准确的山洪预报预警需要高时空分辨率的气象预报,这使得中尺度数值天气模式在山洪业务预报中有着广阔的前景。

与传统考虑流域特征较为精细的流域水文模型

收稿日期(Received date): 2011 - 08 - 11; 改回日期(Accepted): 2012 - 01 - 30。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展规划项目“高亚洲流域雪冰 - 水文 - 生态集成模式与预测研究”(编号: 2010CB951404)、国家自然科学基金(编号: 40971024)。[This study is financially supported by the National Key Developing Program for Basic Sciences of China (Grant: 2010CB951404), the Chinese Nature Science Foundation (Grant: 40971024).]

作者简介(Biography): 郑子彦(1984 -) 男,江苏常熟人,博士生。主要从事陆气相互作用方面的研究。[Zheng Ziyan (1984 -), male, born in Changshu, Jiangsu Province, Ph D student. Major in the research of atmosphere - land surface interactions.] E-mail: zhengzy@tea.ac.cn

相比,大气模式中的陆面过程模式中的水文参数化方案的处理比较简单^[11],这种适用于大尺度、长时间的水文方案难以提供典型山洪时空尺度上(10^4 km^2 ; 3~5 d)的产流计算。而另一方面,传统洪水预报模型以实测气象场为输入,其预见期取决于流域的汇流时间,往往只有几个小时^[12]。如果希望有更长的预见期,则必须在降水未发生前就获取预报所需信息以延长预报时效,单一依靠传统的洪水模型无法实现。而基于高效数学方法、能预报较长时间大气状态的中尺度数值天气则为这一问题的解决提供了可能。

为了结合中尺度天气模式和流域水文模型两者的优势,各取所长以更好地模拟和预报山区洪水,本文基于成熟中尺度天气研究预报模式(WRF)和自主开发的流域水文模型XXT,单向耦合构建了陆气耦合模式,并对我国山东沂蒙山区2007年和2008年的3次暴雨洪水过程进行了模拟和评估,以期为山区洪水的预报预警提供参考和依据。

1 模式概述

1.1 WRF 中尺度天气模式

WRF是由美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)等机构联合开发的新一代中尺度数值天气预报模式。它具有多层网格嵌套、非静力平衡动力学和四维同化能力及多项物理方案选择。在目前短期天气预报和研究中有广泛应用前景^[8,13]。众多的应用研究已经表明WRF模式对于短期和长期的中小尺度和大尺度降水有着较好的模拟能力,能够给水文模型提供较准确的降水和蒸散发等输入,是构建陆气耦合模式理想的大气模式平台^[14-16]。

1.2 XXT 流域水文模型

XXT是基于新安江模型的流域土壤蓄水容量曲线结合TOPMODEL地下产流计算框架发展的一个新水文模型^[17]。具体做法是将地下水位的表达引入到土壤蓄水容量曲线中,并以此新蓄水容量曲线导出新的地表产流 Q_s 的如下计算式

$$\begin{aligned} Q_s &= 0 \quad (P - SRZ \leq 0) \\ Q_s &= P - SRZ - \bar{Z} \quad (P - SRZ > W'_{mm} - W'_m) \\ Q_s &= P - SRZ - \bar{Z} + WM \times \left[1 - \frac{(P - SRZ - W'_{ml})}{WM \times (1+B)} \right]^{(1+B)}, \\ &\quad (0 < P - SRZ \leq W'_{mm} - W'_m) \end{aligned}$$

式中 P 代表降水, SRZ 为植被层截流, \bar{Z} 为土壤水分亏缺深(地下水位), WM 为流域平均土壤蓄水容量; W'_{mm} 和 W'_{ml} 分别代表流域内土壤蓄水容量在某一点的值和最大值,而 W'_{ml} 为降水发生时流域内某点的土壤蓄水容量, B 则为表示土壤蓄水容量空间分布异质性的参数。

XXT的地下产流 Q_g 基于TOPMODEL的方案^[18]来计算

$$Q_g = Q_{g \max} e^{-f\bar{Z}}$$

式中 $Q_{g \max}$ 为流域内某点在地下水位为0时的最大地下径流量, f 为饱和水导率在垂直方向上的衰减率。

这样,XXT模型就用地下水位 \bar{Z} 将地面与地下产流动态地连接了起来,能够更加客观地反映整个土壤层的产流情况,这是XXT的一大优点。对XXT模型在多尺度、多流域和多气候区的测试结果表明,大部分情况下XXT模型的模拟效果优于经典的新安江模型和TOPMODEL^[17]。加上XXT需要率定的参数相对较少,一定程度上减少了不确定性,使得XXT更加适于结合中尺度天气模式以对山区洪水进行预报预警。

2 实验设计

2.1 模拟策略与方案选取

本文的模拟试验采用WRF的3层嵌套策略,嵌套各层分辨率分别为27 km、9 km和3 km。模式积分步长为120 s,结果逐小时输出。模式微物理方案第一层选用Thompson graupel scheme方案,第二和第三层选用WRF Double Moment 6 class方案。长波部分选取Rapid Radiative Transfer Model(RRTM)方案,短波部分第一层采用Dudhia scheme方案,第二和第三层选取Goddard shortwave scheme。陆面过程采用Noah方案。边界层部分第一层选取Yonsei University方案(YSU),第二和第三层选取Mellor-Yamada-Janjic(Eta)TKE scheme方案。而积云对流参数化方案则选取New Grell scheme方案。

研究选用NCEP提供的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料驱动WRF模式,随后将WRF输出的降水和潜在蒸散发输入至XXT模型,实现流域出口断面洪水流量的模拟。

2.2 个例、研究区及使用数据集

本研究选取沂蒙山区2007-08-11、2007-08-17以及2008-07-22的3次暴雨洪水过程进行

模拟研究。研究区选在山东南部沂沭泗河水系的临沂子流域,临沂水文站控制的上游地区,位于沂蒙山区的下游,对发生的该山区的暴雨洪水有着最直接的响应。具体流域概况和相关站点如图 1 所示。

模拟研究中使用到以下数据集: 1. 全国约 1 000 余个雨量站的降水数据; 2. 华北地区约 120 个农业气象站旬土壤湿度数据; 3. 研究流域内 6 个自动站逐小时降水数据; 4. 莒县和泰安土壤自动观测站的逐小时土壤湿度数据; 5. 3 次个例中临沂水文站的逐时洪水流量数据; 6. 全球陆地数据同化系统(GLDAS) 的 Noah 模式结果。

3 模拟结果分析

3.1 降水

图 2 为 3 次暴雨过程中 WRF 的第二层区域模拟的总降水量与观测的分布图对比,观测雨量分布由雨量站测值插值得到。从图中可以看出, WRF 基本模拟出了我国夏季“西南-东北”向的雨带,其形状和位置都和观测的十分接近。2007 年的 2 次个例模拟雨带范围略有偏长,强度偏高。2008 年的结果与观测对应得最好,基本能将河南与山东南部的强降水区刻画出来。

进一步对比第三层嵌套区域内的流域内平均降水量的时间变化可知,模式在流域尺度上刻画的降水时间变化与实际符合较好(图 3)。从图 3 可以看出, WRF 模拟的降水变化与观测基本一致。2007-08-10 过程的最高降水峰值略有滞后,峰值略大; 2007-08-17 过程第一个降水最高峰的模拟值偏小,但 2 次过程中流域总降水量都显著偏大。从曲线形态上来看,模拟的降水曲线在时间上连续性较好,而观测降水时间序列曲线的间歇性比较明显,故而模拟值总量偏大。2007-08-17 主峰模拟偏低的原因,可能是主峰出现在模拟开始的不久,模式降水场尚未能调整至最佳状态导致。2008 年的个例依然有最好的效果,主峰的量值和位置基本和观测重合,降水总量也大致持平,略低。

3.2 表层土壤含水量

土壤含水量是陆气相互作用过程中极其重要的因子,除了对气候变化的巨大影响外,对中小尺度天气同样有着显著的影响^[19-20]。表层土壤含水量决定土壤的饱和程度,进而决定着降水在地表的下渗,最后决定地面径流的产流量。如果表层土壤湿度的模拟不理想,是不可能正确描述水文过程的。为弥补表层土壤湿度观测数据的不足,选取 GLDAS 中的 Noah 模型结果与模拟值进行对比,如图 4 所示。

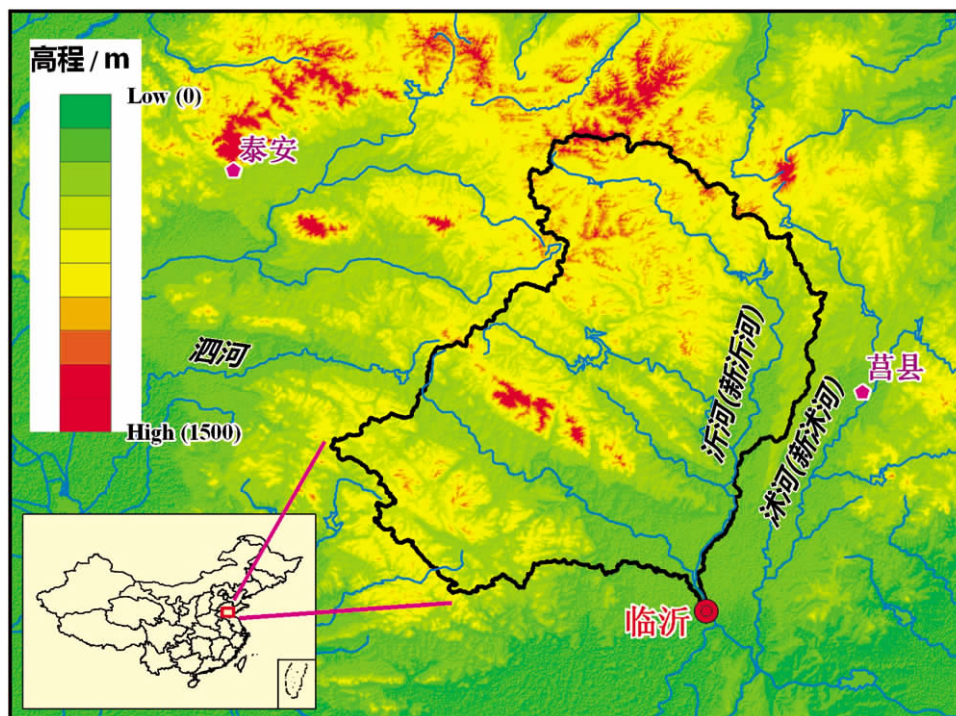


图 1 临沂流域位置地形概况与及相关测站位置

Fig. 1 The location and topography of linyi basin and the soil moisture observational sites

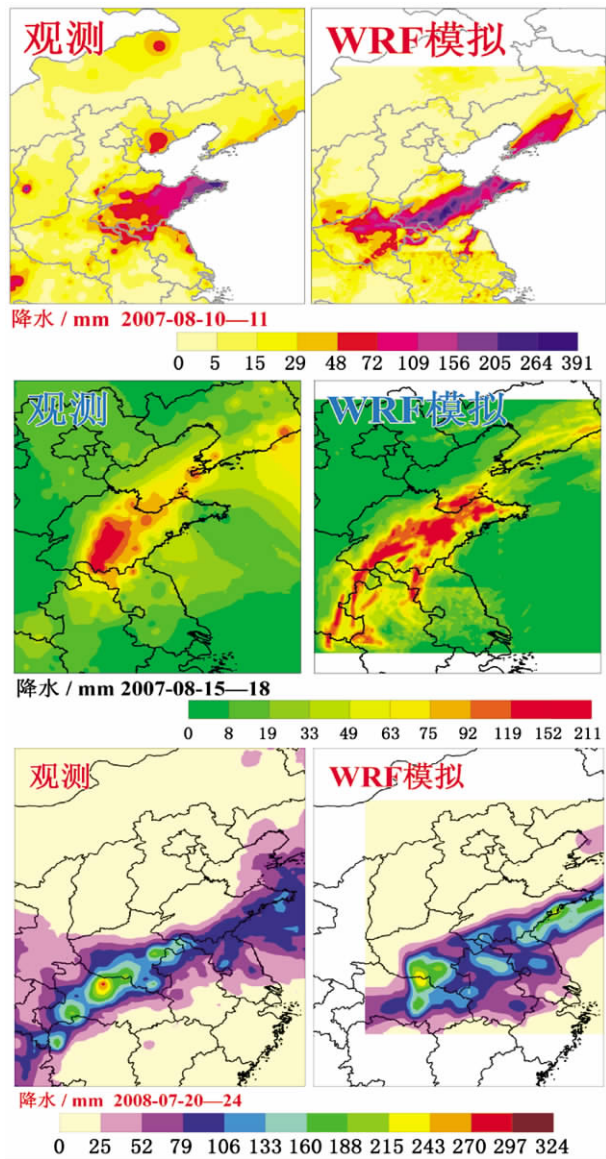


图 2 3 次暴雨个例降水量空间分布与观测的对比
Fig.2 The comparison of precipitation distribution in the three study cases between simulated results and observations

从图 4 可以看出模式模拟的 3 次个例过程中, 表层土壤含水量的分布与 GLDAS 的空间分布一致, 山东南部与东部以及往南的高值区都被模拟出来。这些区域由于前期的降水会导致土壤不断趋于饱和, 从而使得后期的降水大多转化为径流, 最后汇成洪水。为了进一步考察模式对土壤湿度时间变化的模拟能力, 将莒县站 2007 年和泰安站 2008 年的观测数据与模拟值进行对比得到图 5。从图 5 可以看出模式模拟的表层土壤湿度变化趋势和观测值一致, 相关系数较高(表 1), 量值则高于观测值, 这可能是由于 WRF-Noah 模式中“水桶”近似的下渗方案过快的下渗速度造成的。总体而言模式对于表层土壤含水量时间变化的模拟较为理想。图 6 是 2008 年个例 WRF-Noah 模式与全国农气站的旬 10 cm 厚度土壤湿度在相应时刻的对比。可以看出模式的模拟值显著高于观测值, 这之前得出的结论一致, 即过快的下渗使得表层土壤变湿显著。但两者空间分布的一致性很好, 模式对辽宁中部以及山东、河南及其南部的高值区刻画得比较成功。

3.3 径流深与洪水流量模拟

图 7 为 3 次个例模拟的总径流深空间分布。对比图 2 的降水, 可见模式模拟的径流深与降水有着比较好的空间响应, 基本模拟出了山东东南部的产流高值区。2007-08-10 和 2007-08-17 的 2 次过程, 流域最大径流深分别能达到约 190 mm 和 150 mm, 2008 年个例的流域最大径流能达到约 100 mm。由此可见模式本身对径流空间分布的计算基本准确。

最后, 将第三层嵌套区域的平均逐时降水和潜在蒸散发输入到 XXT 模型进行流域出口洪水流量的模拟。首先我们基于搜集到的流域内 6 个自动站观测的降水和蒸散发数据率定 XXT 模型的参数(表

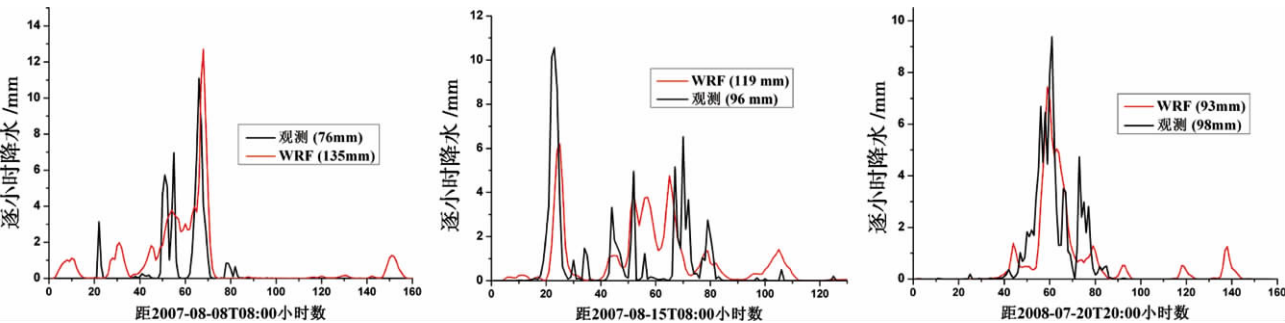


图 3 3 次个例的流域平均降水时间序列图
Fig.3 The average precipitation over linyi basin in the three study cases

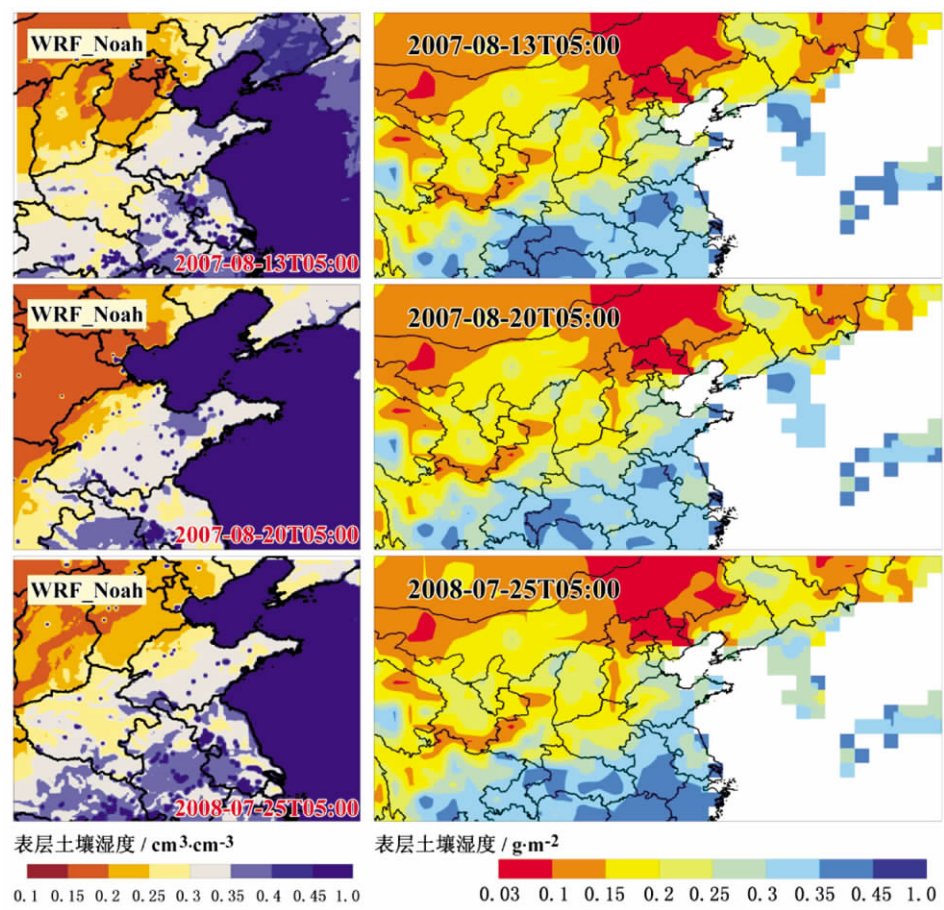


图4 WRF_Noah 模拟的表层土壤含水量(10 cm)与 GLDAS 的 Noah 模型结果对比
Fig.4 The 10 cm depth soil water content derived from WRF_Noah results and GLDAS_Noah datasets

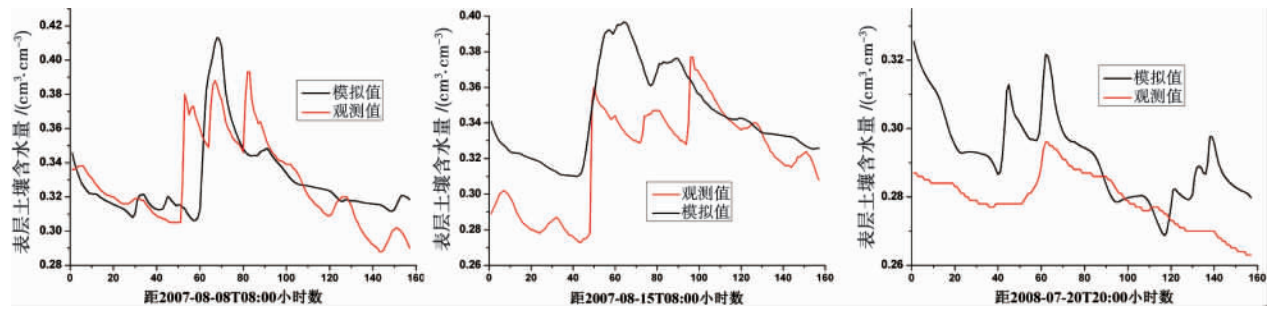


图5 模式模拟的表层土壤含水量变化与观测对比(2007 年于莒县 2008 年于泰安)
Fig.5 The simulated and observed 10 cm depth soil water content (2007 in Juxian and 2008 in Taian)

2) ,并基于 Nash – Sutcliffe 模型效率系数(NE) 对率定结果进行评估^[21]。从图 8 可以看到在 3 个个例的率定期内 ,XXT 模型有着较好的表现 ,模拟结果的 NS 系数按个例发生先后分别为 0. 82、0. 94 和 0. 97。其中 2007 – 08 – 17 和 2008 – 07 – 22 个例的模拟水平平均达到甲等 2007 – 08 – 10 过程的结果达到乙等 ,均符合《水文情报预报规范》洪水作业预报的要求。

表 1 图 5 所示模拟结果与观测值的相关系数		
Table 1 The correlation coefficient of the results shown in fig. 5		
个例	相关系数	观测站
2007 – 08 – 11	0. 66	莒县
2007 – 08 – 17	0. 72	莒县
2008 – 07 – 22	0. 46	泰安

注: 系数均通过 0. 99 的显著性检验
Note: Coefficient with the significant test of $P>0. 99$

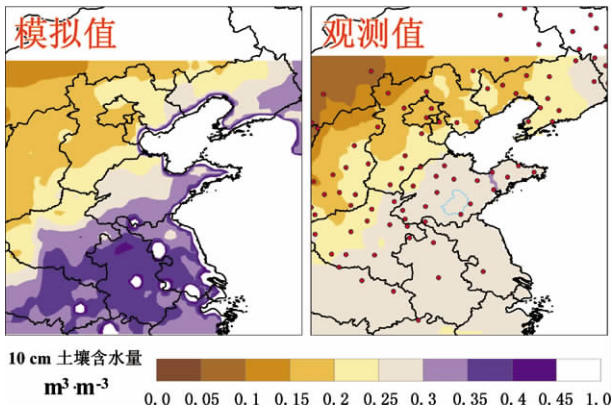


图 6 2008-07-22 个例表层土壤含水量模拟与观测值比较
Fig.6 The spatial distribution of 10 cm depth soil water content derived from model results and observation in study case of 20080722

将 WRF 计算的降水和蒸散发输入到 XXT 模型中进行验证,得到图 8 中蓝色曲线的结果。其中 2008 年个例的模拟效果最好,验证的 NE 系数也高达 0.91,洪峰峰现时间和洪峰流量均与观测吻合较好,洪峰略有提前。而 2007 年的两次个例由于降水模拟偏大而使得模拟洪水洪峰相应偏大,NS 系数为负,尤其是以 2007-08-10 个例的结果更为明显。然而从洪水过程线的形态来看,2007 年 2 次个例的曲线与观测流量的趋势一致性非常好,其时间相关系数分别为 0.89 和 0.91 (通过 0.99 的显著性检验),且洪峰的位置几乎与观测一致,只是洪峰流量有正的位移,这对防汛部分的洪水预报以及制度定

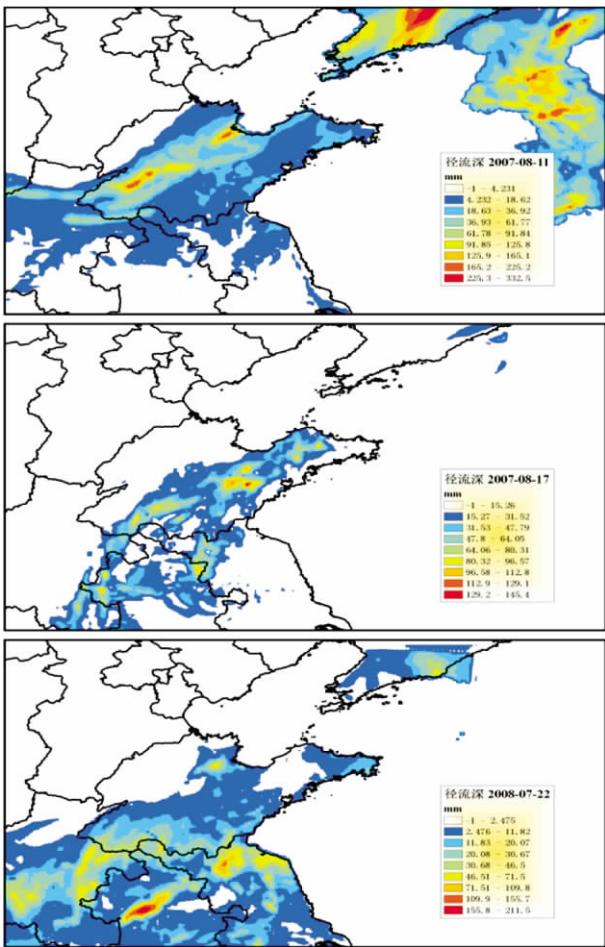


图 7 3 次过程的累计径流深分布
Fig.7 The spatial distribution of accumulated runoff depth in three study cases

表 2 XXT 模型对 3 次洪水过程率定的参数
Table 2 The calibrated XXT model parameters in three study cases

日期	f $/((1 \cdot m^{-1}))$	Qg $/m$	SRZ $/m$	CHV $/((km \cdot h^{-1}))$	WM $/m$	B	ZWT $/m$
2007-08-11	97.32	0.5	0.44	9.85	46.51	$4.16E-03$	0.14
2007-08-17	47.73	0.96	0.41	9.36	77.96	$5.23E-03$	0.19
2008-07-22	69.71	0.21	0.40	9.53	67.96	$7.49E-03$	0.14

注:表中 CHV 为汇流速度,地下水位 ZWT 为初始值。Note: CHV indicates for the routing speed and ZWT is the initial value of water table depth.

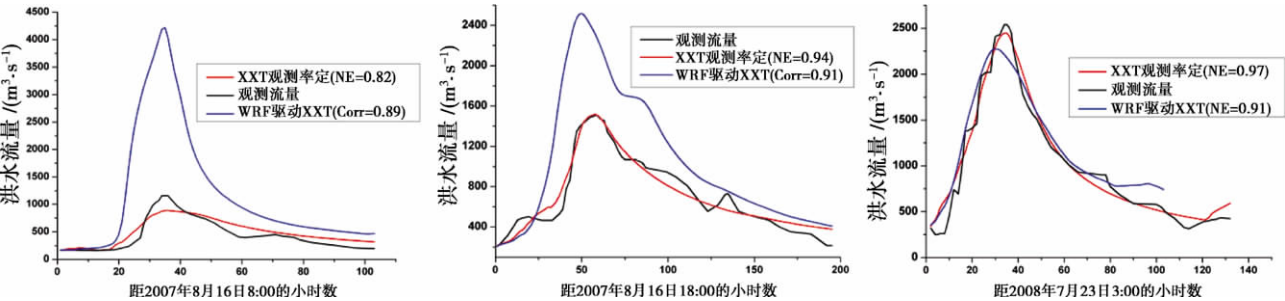


图 8 XXT 模型 3 次个例率定和验证的结果
Fig.8 The calibration and validation results of XXT model in three study cases

防灾决策提供一定的参考和依据。

4 结论与展望

本文基于 WRF 模式,结合借鉴新安江模型和 TOPMODEL 自主开发的 XXT 流域水文模型,以期结合中尺度天气模式和流域水文模型各自优势提高我国山区洪水的预报精度和预报时效。文中对 2007 和 2008 年夏季发生我国山东南部沂沭泗河临沂流域的 3 次暴雨洪水个例进行模拟试验,检验模式对我国夏季山区暴雨洪水的预报能力,结论如下:

1. WRF 模式基本能够正确模拟我国夏季华北地区的“西南-东北”向的大范围雨带。3 次个例模拟的雨带位置和强度基本上和观测雨带相一致,2007 年 2 次个例的雨带强度和范围略有偏大。流域范围内平均降水的时间变化同样与观测值有较好的对应,基本能模拟出降水时间变化曲线的形态和最高峰位置,峰值有所差异。由于模式模拟的降水变化较为连续,相对于比较离散的观测序列而言,2007 年 2 次个例的平均流域总降水要高于观测值。

2. WRF-Noah 陆气耦合模式能够正确模拟表层土壤湿度的空间分布和时间演变,模拟值高于观测值。这与 WRF-Noah 模式本身采用径流参数化方案中过快的下渗速度有关。WRF-Noah 模式模拟的累积径流深的空间分布与降水的响应较好。

3. XXT 模型在率定期的高效表现说明模型适用于夏季短时间山区洪水模拟。以 WRF 模拟的降水和蒸散发结果作为模型输入进行验证,结果表明 XXT 对洪水趋势的刻画比较成功。2008 年个例的结果效率依然高达 0.91。而 2007 年的个例模拟效率系数虽然较低,但其与观测值的很好时间相关性以及准确的洪峰峰现时间使得模拟结果对洪水预报预警和防灾决策依然有一定的参考价值。

本文的研究表明,WRF 模式和 XXT 模型对山区暴雨洪水的模拟能力较好,适于作为构建完善陆气耦合模型的平台。从结果来看,由于中尺度天气模式对山区流域小尺度的对流性降水演变过程的刻画和模拟的精确度和稳定性有待提高,并且 XXT 流域水文模型对大气边界层的反馈作用的研究尚有待于与 WRF 进行紧密耦合,这些都是在将来的进一步研究中需要完善的地方。

参考文献(References)

[1] Li Jun, Liao Yishan, Zhang Bing, et al. The preliminary application

of ensemble prediction in flash flood forecasting [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26: 854 - 861 [李俊, 廖移山, 张兵, 等. 集合数值预报方法在山洪预报中的初步应用 [J]. 高原气象, 2007, 26: 854 - 861]

[2] Wang Lixian, Yu Zhimin. The forecasting of mountain torrents and mud-rock Flows [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001: 1 - 23 [王礼先, 于志民. 山洪及泥石流灾害预报 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 1 - 23]

[3] Li Zhijia, Liu Jintao, Ge Wenzhong, et al. Coupling of weather radar rainfall data with hydrological model and its application to flood forecasting [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32: 601 - 606 [李致家, 刘金涛, 葛文忠, 等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32: 601 - 606]

[4] Zhang Huoqing, Wei Wenqiu. The application of weather radar in flood warning and forecast [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1996, 16: 21 - 25 [张火青, 魏文秋. 天气雷达在洪水预警中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 1996, 16: 21 - 25]

[5] Zhang Tingzhi, Li Shouzhi. The features of severe rainstorm inducing mountain torrents and mud-rock flows [J]. Chinese Journal of Meteorology, 1996, 22: 43 - 47 [张廷治, 李守智. 诱发山洪泥石流特强暴雨的特征 [J]. 气象, 1996, 22: 43 - 47]

[6] Rui Xiaofang. The principle of hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004 [芮孝芳. 水文学原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004]

[7] Ma Hongyun, Guo Pinwen, Song Jie. Simulation of “2007. 7” heavy rainfall case in the Changjiang-Huaihe valley using the WRF model with different land surface schemes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(3): 557 - 567 [马红云, 郭品文, 宋洁. 耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟 [J]. 大气科学, 2009, 33(3): 557 - 567]

[8] Done J, 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: 110 - 117

[9] Yong Bin, Ren Liliang, Chen Xi, et al. Development of a large-scale hydrological model TOPX and its coupling with regional integrated environment modeling system RIEMS [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(8): 1954 - 1965 [雍斌, 任立良, 陈喜, 等. 大尺度水文模型 TOPX 构建及其与区域环境集成模式 RIEMS 的耦合 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1954 - 1965]

[10] Cheng Linsheng. The current status of mesoscale numerical model development and its application prospects [J]. Plateau Meteorology, 1999, 18: 350 - 360 [程麟生. 中尺度大气数值模式发展现状和应用前景 [J]. 高原气象, 1999, 18: 350 - 360]

[11] Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 935 - 949 [林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 陆面水文过程研究进展 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 935 - 949]

[12] Lu Guihua, Wu Zhiyong, Lei Wen, et al. Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real time flood forecast [J]. Advances in Water Science, 2006, 17: 847 - 852 [陆桂华, 吴志勇, 雷文, 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: 847–852]
- [13] Zhang Guocai. Progress of Weather Research and Forecast (WRF) Model and application in the United States [J]. Chinese Journal of Meteorology 2004, 30(12): 27–31 [章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象 2004, 30(12): 27–31]
- [14] Decharme B, C Ottlé S, Saux – Picart et al. A new land surface hydrology within the Noah – WRF Land – Atmosphere Mesoscale Model applied to semiarid environment: evaluation over the Danti-andou Kori (Niger) [J]. Hindawi Publishing Corporation 2009: 1–13
- [15] Hong S Y, J W Lee. Assessment of the WRF model in reproducing a flash – flood heavy rainfall event over Korea [J]. Atmospheric Research 2009, 93: 818–831
- [16] Lo J C F, Z L Yang, R A Pielke Sr. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model [J]. J. Geophys. Res. 2008, 113, D09112
- [17] Xu Jingwen. Development of a basin hydrological model based on soil moisture storage capacity distribution curve integrated with TOPMODEL concept and its coupling with the Noah LSM [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 1999 [徐精文. 基于蓄水容量曲线和 TOPMODEL 概念的流域水文模型构建及其与 Noah LSM 的耦合研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所 2009]
- [18] Sivapalan M, K Beven, E F Wood. On hydrologic similarity: 2. a scaled model of storm runoff production [J]. Water Resour. Res., 1987, 23: 2266–2278
- [19] Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. Soil moisture——an important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. Climatic and Environmental Research 2007, 12: 20–28 [郭维栋, 马柱国, 王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨[J]. 气候与环境研究 2007, 12: 20–28]
- [20] Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. Advance in Earth Sciences 2001, 16: 563–568 [马柱国, 符凉斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展 2001, 16: 563–568]
- [21] Nash J E, Sutcliffe J V. River flowforecasting through conceptual models, Part 1——a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282–290

Numeric Simulation of Torrential Rainfall and Flash – Flood in a Mountainous Basin

ZHENG Ziyang^{1,2} ZHANG Wanchang³ XU Jingwen⁴

(1. Key Laboratory of Regional Climate – Environment Research for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center for Hydro – Sciences Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

4. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The summer torrential rain which frequently occurred in the mountainous area in China often leads to flash – flood disasters. This research focus on the summer mountainous torrential rain and flood simulation based upon mesoscale numeric weather model and basin scale hydrological model. We first develop a new hydrological model name XXT based upon Xin'anjiang model and TOPMODEL which dynamical connect the surface and sub-surface runoff calculation through water table depth. Three torrential rain events happened in the south Shandong province in 2007 and 2008 summer are reproduced by the Weather Research & Forecasting model (WRF). Then the simulation results from WRF are used as the inputs of XXT in order to simulate the flood. The results show that WRF has the strong capability of precipitation simulation in temporal and spatial distribution which agree well with observations. The temporal series precipitation calculated by WRF are more continuous than observed series and have higher peaks and sum values. WRF also produces the reasonable surface layer soil moisture distribution and temporal series on observational sites with higher peak values. The accumulated runoff depth calculated by WRF have good response to precipitation. Finally we use the precipitation and potential evapotranspiration from WRF results as the inputs of XXT in order to validate the flood simulation after calibrate XXT with observed data. The performance of XXT is well and the model efficacy of 2008 case is as higher as 0.91 during validation. The results of two 2007 cases have higher peak values mainly due to the overestimation of precipitation, but still with good temporal correlation with observed series with the indexes of 0.89 and 0.91 respectively. These results may provide some useful information to the torrential rain and flood operational prediction and decision maker in mountainous area.

Key words: numeric model; torrential rain; WRF; XXT; flash-flood