

陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用

陆桂华^{1,2}, 吴志勇^{1,2}, 雷 Wen³, 张建云⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水问题研究所, 江苏 南京 210098;
3. 加拿大 McGill 大学; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 采用加拿大区域性中尺度大气模式 MC2 (Canadian Mesoscale Compressible Community) 和新安江模型单向耦合模型系统, 对 2005 年 7 月 4~15 日发生在淮河流域的一场暴雨洪水, 进行了实时预报。采用王家坝以上流域的实测降水和王家坝断面的实测洪水资料, 对 MC2 预报降水的时空分布和陆气耦合模型预报的洪水过程进行了分析。结果表明, MC2 对该场强降水过程具有很好的预报能力, 陆气耦合模型有效地增长了洪水预报的预见期, 具有很好的应用前景。

关键词: 陆气耦合; 洪水预报; MC2 模式; 淮河

中图分类号: P338.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)06-0847-06

传统的洪水预报模型是以实测降水为输入的, 其预见期取决于流域的汇流时间, 往往只有几个小时。然而, 对于暴雨洪水, 我们希望能有更长的预见期, 最好能有 3~5 d 的预见期。要实现该目标, 传统的洪水预报方法无法实现, 必须在降水未发生前就获取预报所需信息, 才能增长洪水预报的预见期。

数值天气预报模式为解决这个问题提供了可能。它采用一套复杂的数学方程来描述大气运动的规律, 通过高效的数学方法求解, 能够预报较长时间大气的状态, 如温度、风、降水等。数值天气预报模式分为全球模式和区域模式。区域模式具有更高的时空分辨率, 其边界条件来自于全球模式, 所以必须嵌套到全球模式中运行。

近年来, 随着探空探测技术以及计算机技术的发展, 数值天气预报模式得到了较快的发展, 出现了许多高分辨率的中尺度数值天气预报模式, 降水预报的质量显著提高^[1], 如加拿大环境局开发的区域性中尺度大气模式 MC2^[2~5]。这些天气预报模式, 可以预报未来 3~4 d 分布式的逐时降水, 水平分辨率可以达到几公里。中尺度数值天气预报模式的这些进步, 能否为增长洪水预报预见期起到作用, 对于特定的流域、洪水和降水预报产品, 具体的作用又如何, 这些问题已被许多科学家关注。Anderson 等^[6]、Lin 等^[7]分别采用单向和双向的方法, 将大气模式和水文模型进行耦合, 成功地预报了暴雨和洪水, 获得了较长的预见期。

笔者首先以淮河流域为中心建立覆盖全国、水平分辨率为 20 km 的 MC2 大气模式, 并在王家坝以上流域建立新安江模型^[8,9], 对参数进行率定和验证; 其次, 检验 MC2 模式对淮河流域此次强降水过程的预报能力; 最后, 将 MC2 模式与新安江模型单向耦合构建了陆气耦合模型系统, 并对 2005 年 7 月 4~15 日淮河流域暴雨洪水进行了实时预报, 并讨论了相关问题。

1 2005 年 7 月 4~15 日淮河流域暴雨洪水

2005 年 7 月 4 日~10 日, 受北方弱冷空气和西南暖湿气流的共同影响, 淮河流域出现了一次持续时间长、范围广、强度大的强降水天气, 发生了一次较大洪水过程。淮河水系的降水总量就达 338 亿 m³; 次雨量超过 100 mm 的地区占全雨区范围 78%; 超过 300 mm 的占 11%; 超过 500 mm 以上的雨区近 1 800 km², 暴雨中心雨量高达 562

收稿日期: 2005-11-18; 修订日期: 2006-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40371023); 国家“948”计划资助项目 (200317); 教育部博士点基金资助项目

作者简介: 陆桂华(1962-), 男, 浙江东阳人, 教授, 博士, 主要从事水文模拟、水文循环、洪水与防洪等研究。

E-mail: lugh@hhu.edu.cn

mm。淮河上游河道的水位从7月4日起迅猛上涨。干流息县站出现了1968年以来的最大洪水；北部支流洪汝河班台站出现了1951年建站以来的第三大洪水。7月13日7时，洪峰到达王家坝水文站，洪峰水位29.14 m，洪峰流量 $6090 \text{ m}^3/\text{s}$ （含地理城分流为 $7030 \text{ m}^3/\text{s}$ ），水位和流量分别为1952年建站以来第9位和第8位。

2 模型系统

本文建立的陆气耦合模型系统，由MC2模式和新安江模型单向耦合而成。笔者采用1998年淮河流域能量与水分循环试验（HUBEX）期间和2003年淮河大水期间的降水和流量资料，分别对MC2模式和MC2—新安江单向耦合模型进行了适应性检验^[10]。

2.1 MC2 模式简介

MC2模式是加拿大环境局开发的区域性中尺度大气模式，控制方程为全弹、可压、非静力的连续的全欧拉方程，由于采用了先进的数值计算方法，在计算精度、快波处理和预报时效等方面优于其他中尺度模式，能够很好地处理地形对降水的影响。MC2的一个重要特点是，由于采用半隐式半拉格朗日平流方案，在做高分辨率模拟时，在一定的精度下，时间步长可以取普通显式时间差分步长的800倍，具有很好的时效性。MC2的另一个特点是，方便的自嵌套技术，可以进行任意分辨率之间的任意次数的自嵌套，大尺度的结果可以直接作为小尺度模拟的初始场，易于获得高分辨率的结果，例如，笔者曾在MC2-20 km的结果上通过自嵌套得到了MC2-5 km的结果^[10]。MC2已在北美和欧洲多个国家，进行了多次试验，均取得了良好的降水模拟精度，且预见期均在48 h以上。在新近进行的欧洲高山中尺度降雨模拟比较项目中，MC2被誉为当今世界计算效率最高、精度最好的三维天气数值模拟系统之一^[11]。

2.2 MC2 模式的设置

在本文的研究中，应用于实时预报的MC2模式水平分辨率为20 km，网格点阵为 409×301 ，垂直层数为40层。为尽可能提高预报精度，模型计算区域以淮河流域为中心，覆盖整个中国及周边地区，涵盖了影响中国天气的主要气团的源地，如西伯利亚气团、热带海洋气团和印度洋赤道气团，见图1(a)。MC2模式需要的地形数据和地面参数来自于加拿大气象中心的全球数据库。驱动MC2模式的初始场和侧边界条件，分别来自于加拿大气象中心（CMC）的全球分析场和预报场，水平分辨率为100 km。

MC2模式完成96 h的降水预报，需在超级计算机上运行5~6 h。加拿大气象中心每天在世界标准时间3:30~5:00（北京时间11:30~13:00）发布世界标准时间00时（北京时间08时）的分析场和预报场产品。MC2基于这个产品

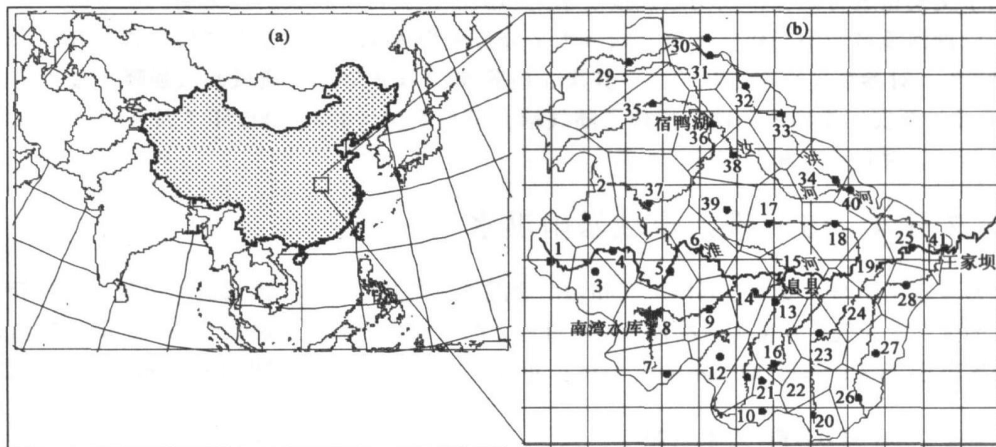


图1 (a) MC2模式的预报区域及(b)王家坝以上流域雨量站点、泰森多边形单元划分和20 km网格分布

Fig.1 (a) MC2 model domain, and (b) rain gauges, Thiessen polygons and 20 km model grids over Wangjiaba sub-region

在世界标准时间 5 30(北京时间 13 30)启动, 预报 96 h 内逐时降水量, 并在世界标准时间 10 30~11 30(北京时间 18 30~19 30)发布预报产品。因此, 除去计算处理时间, 实际可获得的有效预报时间约为 86 h。

2.3 新安江模型的设置和参数率定

本文在淮河王家坝以上流域建立新安江模型。根据王家坝以上流域的 41 个雨量站, 采用泰森多边形方法将流域分成 41 个单元, 见图 1(b)。新安江模型对每一个单元分别计算产流, 单元汇流采用滞后演算法, 河道汇流采用马斯京根法。由于本文主要讨论耦合未来 4 d 的降水预报和增长洪水预报预见期的问题, 因此, 暂不考虑水库调蓄对流域汇流的影响。

选用 1980 - 1989 年王家坝以上流域历史洪水资料来率定模型参数。首先, 分别选用 6 年(1980 - 1985 年)和 2 年(1987、1989 年)的日水文资料来率定和验证新安江日模型的参数。结果表明, 率定期和验证期年径流深相对误差都在正负 15 % 之间, 流量过程确定性系数都大于 0.84。然后, 分别选用 12 和 5 场洪水过程来进一步率定和验证新安江次模型的参数, 次模型的时段长为 3 h。从统计结果来看, 率定和验证期模拟的洪量和洪峰的相对误差在正负 20 % 以内, 确定性系数都在 0.75 以上。因此, 所建立的预报方案具有较好的精度。

2.4 陆气模型的耦合

陆气模型的耦合, 不管是单向的还是双向的, 首先要解决的是输入输出的尺度转换问题。在本文中, 王家坝以上流域内覆盖了 103 个 MC2 模式 20 km 的网格, 见图 1(b)。为了保持新安江模型的稳定性, 将这些网格的预报降水, 通过面积加权法聚集成 41 个单元的预报降水。MC2 模式输出的时段长为 1 h 降水过程, 被累积成 3 h 输入到新安江模型。耦合模型运行时, 预报时间以前的降水输入采用各雨量站实测值, 预报时间以后的降水输入采用各单元 MC2 的预报值。预报期间的蒸发输入采用相应时期多年平均值。通过这样的处理, 就完成了 MC2 模式与新安江模型的耦合。

3 实时暴雨预报成果分析

笔者利用 MC2 模式, 从 2005 年 7 月 3 日起, 对王家坝以上流域的降水, 进行了 96 h 的滚动预报, 预报结果与实测的比较, 详见表 1。实测流域面平均降水采用泰森多边形加权平均求得, 预报流域面平均降水, 则通过对流域内及周边的 MC2 - 20 km 预报格点进行面积加权平均获得。为方便实测降水与预报降水的对比, 将 MC2 逐时的预报降水累积为 08 时的 24 h 累积降水, 与同期实测值进行比较。同时, 建立一个标准来评价预报结果, 即当实测值超过 5 mm, 预报值与实测值的相对误差在正负 50 % 以内, 为合格的预报; 如果实测降水小于 5 mm, 预报值不超过 10 mm, 也为合格的预报。

表 1 2005 年 7 月 3~14 日王家坝以上流域预报与实测 24 h 面平均降水对比

Table 1 Comparison of forecasted and observed 24 h precipitation over Wangjiaba sub-region from July 3 to 14, 2005

预报 时间	第一天(24 h)			第二天(48 h)			第三天(72 h)			第四天(96 h)			合计(0~96 h)		
	实测 / mm	预报 / mm	相对 误差 / %	实测 / mm	预报 / mm	相对 误差 / %	实测 / mm	预报 / mm	相对 误差 / %	实测 / mm	预报 / mm	相对 误差 / %	实测 / mm	预报 / mm	相对 误差 / %
3 日	0.2	5	/	7.1	11	55	13.4	25	87	52.6	27	- 49	73.3	68	- 8
4 日	7.1	8	6	13.4	26	94	52.6	35	- 33	10.9	11	0	84.0	80	- 5
5 日	13.4	31	134	52.6	32	- 39	10.9	32	190	21.5	18	- 15	98.4	114	15
6 日	52.6	46	- 13	10.9	29	166	21.5	15	- 28	86.8	64	- 27	171.8	154	- 11
7 日	10.9	37	239	21.5	5	- 75	86.8	57	- 35	20.1	29	46	139.3	128	- 8
8 日	21.5	72	233	86.8	18	- 79	20.1	38	90	0.0	1	/	128.4	129	1
9 日	86.8	68	- 22	20.1	55	172	0.0	1	/	0.0	1	/	106.9	125	17
10 日	20.1	16	- 21	0.0	0	/	0.0	0	/	0.0	11	/	20.1	27	36
11 日	0.0	0	/	0.0	0	/	0.0	7	/	0.0	9	/	0.0	16	/
合格率	67 %			33 %			67 %			89 %			89 %		

从表 1 可以看到, MC2 预报的合格率为 64 %, 在 3 日~11 日所做的 36 个预报成果中, 有 23 个合格预报。其中, 对最大(9 日)和次大(6 日)的强降水日的预报合格率为 88 %, 明显高于总体情况。在 36 个预报成果中偏大的占

56%，其中预报不合格的主要为偏大的预报。预报偏大主要发生在弱降水或无雨日(如3日、4日、5日、7日、10日等)，相反，对于强降水日(6、9日)，预报值却都表现为偏小。从预报时效来看，第四天的预报的合格率最高，达到89%。从一次预报(0~96h)的总量来看，预报的合格率较高，为89%，相对误差介于-11%~36%之间。但是，对于特定的某一天，不同的预报时效的结果相差较大。

以上介绍和讨论了，王家坝以上流域面平均降水预报结果；下面将对这些预报的空间分布进行分析。检验预报空间分布的方法是，分别计算王家坝以上流域41个单元的预报和实测24h的面平均降水，统计合格的单元所占的百分比，比值越大说明预报的降水的空间分布越接近于实际分布。预报降水通过面积加权计算各单元的面平均降水，实测降水为单元内雨量站测量值。通过对36次各单元预报成果的统计得出，单元预报平均合格率为57%，说明在平均情况下，每次预报有超过一半单元是合格的。从预报时效来看，第四天的预报合格率最高，为62%；其次是第三天的预报，为60%。对于96h累积降水，预报单元合格率较24h的高。图2(a)、图2(b)和图2(c)分别为6日、7日、8日预报的和实测的96h累积降水的比较图。从图中可以看到，在41个单元中，6日、7日、8日预报的96h累积降水合格的单元数分别占85%、95%和71%，其平均相对误差分别为15%、-7.5%和-4.9%。

上述分析表明，MC2模式对此次王家坝以上流域的降水过程有很好的预报能力，尤其是对其中降水较强的时段的预报能力更强。模型能够很好地预报次降水的总量及其空间分布。当模型对面平均降水的预报较好的同时，其相应的空间分布也较接近实际情况。由于预报本身受天气形势变化的影响，不同预报时效的结果还不够稳定。

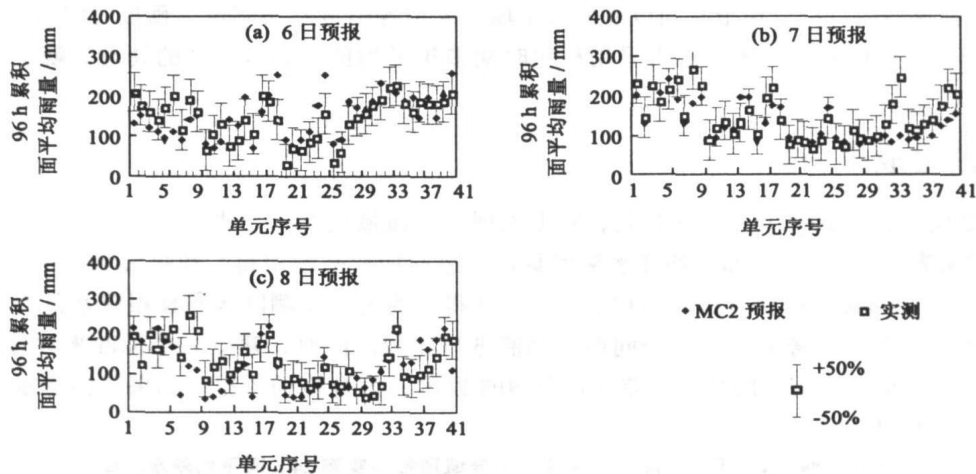


图2 王家坝以上流域41个单元MC2预报和实测的96h累积面平均降水对比

Fig.2 Comparisons of forecasted and observed 96-h precipitation of 41 units over Wangjiaba sub-region

4 实时洪水预报成果分析

在分析了MC2降水预报成果之后，再来看一下，耦合模型对王家坝断面洪水过程的滚动预报结果。为了检验和形象说明耦合预报的效果，将耦合模型预报的洪水过程，与实测的流量过程，以及传统的预报方法的洪水过程——没有耦合MC2预报降水，放在一起作详细对比。图3给出了其中4次预报的成果比较，图3(a)、(b)、(c)和(d)分别为7日20时、8日20时、9日20时和10日20时的预报成果。

图3(a)表明在7日20时，传统的预报方法没有预报出13日的洪峰，但耦合模型预报出了洪峰，预报的峰现时刻为12日23时，比实际峰现时间提前8h，预见期为123h，预报洪峰流量为4878 m³/s，比实际洪峰流量少31%。图3(b)表明8日20时传统的预报方法同样没有预报出13日的洪峰，但耦合模型预报出洪峰的峰现时刻为12日2时，仅比实际峰现时间提前5h，预见期为102h，预报洪峰流量为4689 m³/s，比实际洪峰流量少

33 %。图 3(c) 表明 9 日 20 时传统的预报方法还是没有预报出 13 日的洪峰，但耦合模型预报出洪峰的峰现时刻为 13 日 2 时，仅比实际峰现时间提前 5 h，预见期为 78 h，预报洪峰流量为 $8\,386\text{ m}^3/\text{s}$ ，比实际洪峰流量多 19 %。图 3(d) 表明在 10 日 20 时，传统的预报方法跟耦合模型预报的结果十分接近，两种方法预报的洪水过程线几乎重合；二者都预报出了 12 日 20 时，将出现洪峰流量为 $7\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水，比实际峰现时间提前 11 h，预见期为 48 h，比实际洪峰流量多 14 %。由于此次降水于 10 日 20 时停止，此时耦合模型采用 MC2 预报的降水后，对洪峰预报没有起到改进的作用；但是，MC2 预报出未来 4 天，将不会出现强降水过程，这一信息对防汛决策工作，起到了至关重要的作用。

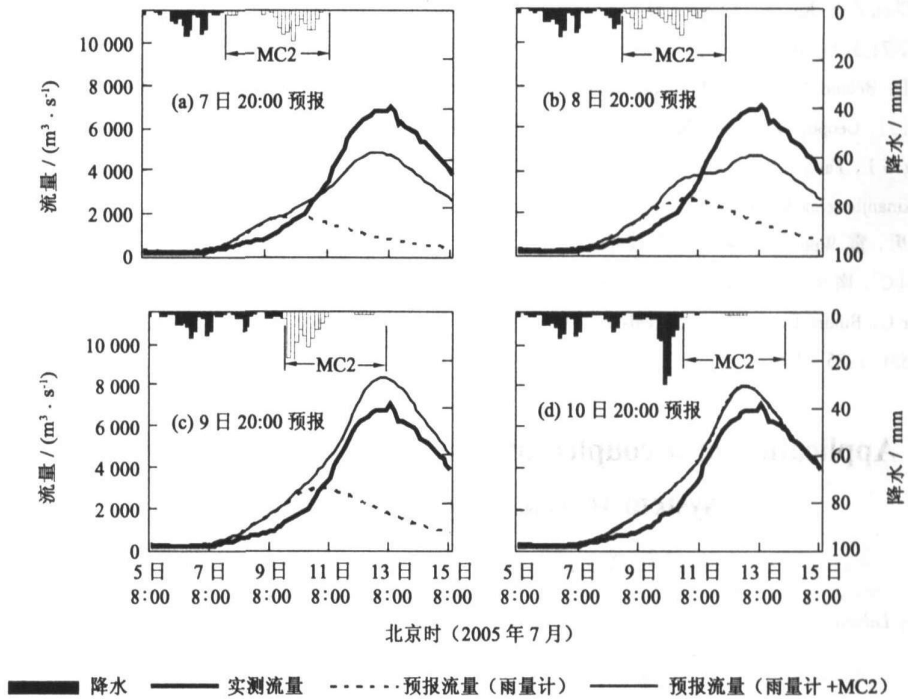


图 3 王家坝断面预报和实测流量过程对比

Fig. 3 Comparisons of forecasted and observed hydrographs in Wangjiaba cross section

5 结 论

本文利用陆气耦合模型，在 2005 年 7 月 4 ~ 15 日期间，成功地实时预报出了发生在淮河王家坝以上流域和王家坝断面的暴雨和洪水过程。预报 24 h 累积降水总量及其空间分布的合格率分别为 64 % 和 57 %；96 h 累积降水总量及其空间分布的合格率分别为 89 % 和 95 %。跟传统的洪水预报相比，利用耦合模型，能有效延长洪水的预见期。本文中提前了 5 d，预报出该次洪峰流量和峰现时间。而且，随着时间的推移，滚动预报的精度不断提高，当预见期比传统预报方法长 24 h 的时候，其精度已接近传统方法。

本文的实时预报成果，在实际防汛决策中应用，起到了一定的作用，得到了水利部水文信息中心的肯定。本文为利用陆气耦合模型，延长洪水预报的预见期，提供了一个令人振奋的实例；表明了陆气耦合模型的良好应用前景。

参考文献：

[1] Simmons A J, Hollingsworth A. Some Aspects of the Improvement in Skill of Numerical Weather Prediction[J]. Quarterly J Royal Meteorological Society, 2002, 128: 647 - 677.

- [2] Tanguay M, Robert A, Laprise R. A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model[J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 1970 - 1980.
- [3] Bergeron G, Laprise R, Caya D, *et al.* Formulation of the mesoscale compressible community (MC2) Model[M]. Cooperative Centre for Research in Mesometeorology. Montreal, 1994, 165.
- [4] Laprise R. The formulation of Andr Robert MC2 (Mesoscale Comprehensive Community) model[J]. *Atmosphere - Ocean*, 1995, 35: 195 - 220.
- [5] Benoit R, Desgagnés M, Pellerin P, *et al.* The Canadian MC2: a semi-lagrangian, semi-implicit wide-band atmospheric model suited for fine-scale process studies and simulation[J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 2382 - 2415.
- [6] Anderson ML, Chen ZQ, Kavvas, Feldman ML A. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff[J]. *J Hydraul Eng*, 2002, 7: 312 - 318.
- [7] Lin CA, Wen L, Band M, *et al.* A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Québec, Canada[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 10.1029/2001GL013827.
- [8] Zhao RJ, Zhang YL, Fang LR, *et al.* The Xinjiang Model. *Hydro[A]*. *Fore Pro Oxf Sym*, 1980, IASH 129: 351 - 356.
- [9] Zhao RJ. The Xinjiang model applied in China[J]. *J Hydro*, 1992, 135:371 - 381.
- [10] 陆桂华, 吴志勇, 雷文, 等. 陆气耦合技术应用研究进展[A]. 张建云, 等. 中国水文科学与技术研究进展-全国水文学学术讨论会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 2004. 14 - 20.
- [11] Benoit R, Schar C, Binder P, *et al.* The Real-Time Ultrafinescale Forecast Support during the Special Observing Period of the MAP[J]. *BAMS*, 2002, 83(1):85 - 109.

Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real-time flood forecast^{*}

LU Gui-hua^{1,2}, WU Zhi-yong^{1,2}, LEI Wen³, ZHANG Jian-yun⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Water Problems, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. McGill University, Montreal H3A 2K6, Canada; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A coupled atmospheric-hydrological modeling system is established over the Huaihe River Basin for predicting severe precipitation and real-time flood forecast. This system is the high-resolution regional atmospheric MC2 (Canadian Mesoscale Compressible Community) model that is one-way coupled to the Xinjiang hydrological model. The system was tested for the July 4 to 15, 2005 severe flood event in real-time over the basin. The MC2 precipitation is first evaluated using observations from rain gauges over the Wangjiaba sub-region. The Xinjiang model flood forecast is then validated with the observed hydrograph at the Wangjiaba Station. MC2 performs reasonably well in predicting severe precipitation with the forecast lead time up to 96-h. The flood forecast using MC2 precipitation shows a good result of flood timing and peak discharges at the Wangjiaba Station. The encouraging result obtained in this study demonstrates the potential of using mesoscale model precipitation for real-time flood forecast, which provides a longer flood lead time compared to many traditional methods.

Key words: coupled atmospheric-hydrological modeling system; Flood forecast; MC2; Huaihe River

* The study is financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371023).