

基于 WRF 的郑州市暴雨中心最大时降雨过程模拟分析

张金萍^{1,2}, 曾苜翔¹, 郭元¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国气象科学院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为探究 WRF 模式对郑州市暴雨中心雨量最大时降雨过程的模拟能力, 选用该模式常用的 5 种微物理过程方案, 模拟郑州市 2011-2018 年发生的 14 场短时暴雨, 结合时空分布、雨型、雨峰和降雨集中度等降雨特征进行分析。结果表明: WRF 模式可以模拟出对应场次的降雨, 但雨区位置有所偏移; 60% 以上场次降雨过程时间偏差在 180 min 内; 模式对累积雨量模拟较好, 模拟的降雨过程与实际过程相关性较高, 但对过程雨量的模拟有所欠缺; 采用模糊识别法分析雨型发现, WRF 模式对郑州市单峰雨型模拟较好, 对均匀类雨型模拟较差; WRF 模式对单峰类雨型模拟时, 其雨峰偏差基本控制在 $\pm 30\%$ 内; 13 场降雨模拟结果的降雨集中度与实测结果基本相同。WRF 模式总体模拟结果较为理想, 可为郑州市短时暴雨研究提供数值方法的支撑。

关键词: 最大时降雨过程; WRF 模式; 降雨模拟; 暴雨中心; 模糊识别法; 雨型特征; 郑州市

中图分类号: P458.1⁺21.1; P426.62

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0001-11

Simulation analysis of maximum hourly rainfall process in Zhengzhou rainstorm center based on WRF

ZHANG Jinping^{1,2}, ZENG Muxiang¹, GUO Yuan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the performance of WRF (weather research and forecasting) model on the simulation of maximum hourly rainfall process at the rainstorm center of Zhengzhou City, we selected five common microphysical process schemes to simulate the 14 short-term rainstorms that occurred in Zhengzhou City from 2011 to 2018, and analyzed the rainfall characteristics in combination with the temporal and spatial distribution, rain pattern, rainfall peak value and rainfall concentration. The results show that the WRF model can simulate the rainfall of the corresponding event, but with a deviation at the position of the rain area, and the time deviations of the rainfall process for more than 60% of the events are less than 180 min. The model performs well at the simulation of the accumulated rainfall, with a high correlation to the rainfall process, but lacking the ability to simulate the process rainfall amount. According to rain pattern analysis produced by the fuzzy recognition method, the WRF model performs well at the simulation of single-peak rainstorm pattern in Zhengzhou City, but poorly at the uniform rainfall pattern. When the WRF model is used to simulate the single-peak rainfall pattern, the rain peak deviation can be controlled within $\pm 30\%$. The simulated rainfall concentration of 13 rainfall events are consistent with the actual measurements. Research shows that the overall simulation results of the WRF model are ideal, which can provide numerical method support for the study of short-term rainstorms in Zhengzhou City.

Key words: maximum hourly rainfall process; WRF (weather research and forecasting) model; rainfall simulation; rainstorm center; fuzzy recognition method; characteristics of rainstorm pattern; Zhengzhou City

收稿日期: 2021-03-21; 修回日期: 2021-10-03

基金项目: 2019 年度河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) 项目 (192102310508); 河南省自然科学基金项目 (212300410404); 灾害天气国家重点实验室开放课题 (2021LASW-A15)

作者简介: 张金萍 (1979-), 女, 河南沁阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源开发利用与管理研究。

通讯作者: 郭元 (1987-), 男, 河南洛阳人, 博士, 主要从事水文模型与城市排水研究。

1 研究背景

随着气候变化趋势加强以及城市化进程加快,短时高强度暴雨事件在城市区域显著增加,导致洪涝事件频发^[1-4]。暴雨中心作为一场暴雨雨量最集中的区域,对城市洪涝的影响极大,因此对其降雨过程特征进行研究将对预防城市暴雨、降低洪涝损失起到重要的作用。目前,国内外对暴雨预报的水平仍有限,还不能很好地满足暴雨洪涝防灾减灾的需求^[5]。但随着新一代中尺度天气预报数值模式WRF(weather research and forecasting)的不断更新发展,该模式已被众多研究者用于业务预报、气候模拟等试验,成为目前暴雨过程模拟预报常用的方法之一^[6-10]。

国内采用WRF模式对区域强降雨天气的研究已有很多。诸葛丰林等^[11]采用WRF模式,通过更换微物理方案对江苏省里下河地区的一次暴雨过程进行了模拟,发现模式各方案能够基本模拟出雨带走向与降水落区位置;张思豆等^[12]使用WRF模式模拟了云南一次致灾暴雨过程,发现其能较好地指示强降水发生的高湿水汽条件、正涡度发展、下正上负垂直螺旋度结构等动力条件;黄天福等^[13]通过WRF模式模拟了贵州省西南部山区2012年的一次大暴雨天气,结果表明,WRF模式能较好地模拟出暴雨天气过程的大尺度环境、降水分布,能较好地重现其过程的演变;张杰等^[14]利用WRF模式对北京“7·21”特大暴雨进行了模拟,发现该模式能较为理想地模拟出导致暴雨形成的环流形势场和风矢量场;王田田等^[15]通过采用WRF模式对酒泉地区2012年6月4-5日发生的一次暴雨过程进行了参数敏感性试验,发现模式对暴雨发生阶段和结束后流场演变情况的模拟效果较好;杨显玉等^[16]利用WRF模式对甘肃省岷县2012年5月10-11日的一次强降水过程进行了模拟和分析,结果表明模式预报的降水中心与实际基本一致,且模拟结果能直观分析出此次降水过程影响系统的移动与发展。

上述这些研究主要是从气象角度分析WRF模式对区域暴雨过程的模拟。实际上,在一场致灾暴雨过程中,暴雨中心特征演变对区域洪涝过程的影响尤为重要,因此,更应着重分析暴雨中心时空分布的不确定性及其演变特性,从而为城市暴雨洪涝的预报提供参考。郑州市是国家重要的综合交通枢纽城市,近些年暴雨天气导致的城市洪涝灾害对郑州市的发展和当地居民的生活出行产生了较大的影

响,因此对郑州市近几年短时暴雨进行模拟,对城市地区的暴雨预报和防洪减灾具有重要的实践意义。

基于上述背景,本文采用WRF模式对郑州市短时暴雨进行模拟,分析研究时段内各场次暴雨中心雨量最大时降雨的时空分布、雨型、雨峰及降雨集中度等特征,以评估WRF模式对郑州市短时暴雨的模拟能力,以期对郑州市未来短时强降雨预警提供数值模拟方法支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 WRF模式简介

WRF模式是由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)以及俄克拉荷马大学的风暴分析和预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)等多所机构共同研发的新一代高分辨率中尺度预报模式^[17]。模式采用高度模块化与分层设计,包括驱动层、中间层和模式层3层,其中模式层内的动力框架与物理过程皆可拔插,从而为用户比较模式性能和进行集合预报提供了极大的便利^[18]。WRF模式提供两种动力内核选择,一是在NCAR的MM5模式基础上发展的ARW(advanced research WRF),二是在NCEP的Eta模式上发展而来的NMM(nonhydrostatic mesoscale model)^[19]。通过与其他数值天气预报模式的对比,发现WRF模式的稳定性好、物理过程详细、对中尺度天气的模拟和预报性能更优^[20],其在区域降雨模拟中能更好地模拟出雨带走向、暴雨中心、降水落区及时间等,提高了降雨天气预报的准确性,为水文过程的进一步研究提供了基础^[11]。

2.2 研究区域

郑州市地处我国华中地区,位于 $112^{\circ}42' \sim 114^{\circ}14'E$ 、 $34^{\circ}16' \sim 34^{\circ}58'N$ 。本试验选用WRF-ARW模式4.1版本,采用两重嵌套,区域中心位置为 $113.68^{\circ}E$ 、 $34.75^{\circ}N$,外层网格水平分辨率为3 km,格点数为80(经向)×60(纬向);内层网格水平分辨率为1 km,格点数为61(经向)×52(纬向),覆盖整个郑州市区。

2.3 数据来源

郑州市短历时暴雨数据均来源于郑州市各雨量站,观测资料长度为2011-2018年,共计14场,降水历时均在3 h内,各场次暴雨雨量站点实测累积雨量资料见表1,郑州市区雨量站分布见图1。驱动WRF模式运行的资料为美国国家环境预报中心提

供的 2011 - 2018 年时空分辨率为 6 h、水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球再分析资料。

表 1 2011 - 2018 年郑州市各场次暴雨雨量站点实测累积雨量

场次序号	场次编号	累积雨量/mm	雨量站	雨量站位置	
				经度/(°)	纬度/(°)
1	20110721	42.5	50606602(郑州水文局站)	113.612	34.7358
2	20120827	45.5	50606600(郑州站)	113.682	34.7737
3	20130606	42.5	50606605(高新区管委会站)	113.567	34.8083
4	20140729	57.5	50606602(郑州站)	113.682	34.7737
5	20150722	43.0	50606603(水利设计院站)	113.756	34.7644
6	20150803	50.5	50606612(黄河游览区站)	113.518	34.9172
7	20150829	40.0	50606602(郑州水文局站)	113.612	34.7358
8	20160605	51.5	50606600(郑州站)	113.682	34.7737
9	20160719	70.0	50606602(郑州水文局站)	113.612	34.7358
10	20160801	62.5	50606602(郑州水文局站)	113.612	34.7358
11	20160805	70.5	50606608(地震局站)	113.656	34.7531
12	20170812	50.5	50606605(高新区管委会站)	113.567	34.8083
13	20170818	69.0	50606602(郑州水文局站)	113.612	34.7358
14	20180801	63.0	50606605(高新区管委会站)	113.567	34.8083

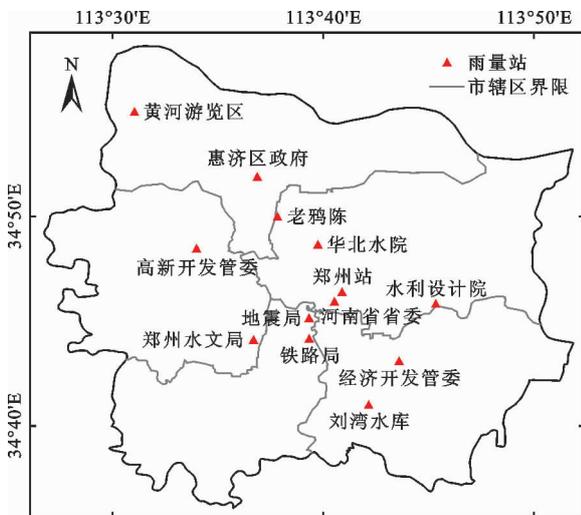


图 1 郑州市区雨量站分布

2.4 模拟方案设计

由于 WRF 模式中微物理过程可以影响积云对流的发生与发展,进而影响模式积云降水的模拟和预报^[11],因此,本文主要更换 WRF 模式的微物理过程方案,对每场降雨采用 5 种常用的微物理过程方案进行模拟,分别为 Thompson 方案^[21]、Kessler 方案^[22]、Eta 方案^[23]、Lin 方案^[24]、WSM6(WRF single-moment 6-class)方案^[25]。由于模拟区域的水平分辨率为 3 和 1 km,所以在选择方案时不考虑积云参数方案,其他参数方案选择如下:行星边界层方案为 MYJ(Mellor-Yamada-Janjic)方案^[26]、长短波方案均为 RRTMG(rapid radiative transfer model for GCMS)

方案^[27]、陆面过程方案为 Noah 方案^[28]、近地面层方案为 MO 方案^[29]。

表 2 为 5 种模拟试验参数方案设计,对每场降雨均进行各方案的模拟。每场降雨模拟的时间均为 18 h,其中前 3 h 为模式 spin-up 时间,模拟结果输出间隔为 10 min。

表 2 模拟试验参数方案设计

方案	微物理过程方案	其他参数方案
Test1	Thompson	MYJ, RRTMG, Noah, MO
Test2	Kessler	MYJ, RRTMG, Noah, MO
Test3	Eta	MYJ, RRTMG, Noah, MO
Test4	Lin	MYJ, RRTMG, Noah, MO
Test5	WSM6	MYJ, RRTMG, Noah, MO

3 结果与分析

3.1 降雨过程时空分析

由于试验所涉及的降雨场次过多,受篇幅所限,下面给出其中 3 场次降雨的实测与 WRF 模式模拟累积雨量以及 8 场次降雨的暴雨中心降雨时程分布。

图 2、图 3 分别为场次 20120827、20140729 和 20160605 的降雨实测最大时累积雨量与 WRF 模式模拟的最大时累积雨量。对比图 2 和图 3 可以看出:WRF 模式各方案均可在区域内实现 3 个场次降雨过程的模拟,但累积雨量与暴雨中心的位置均有不同程度的偏差;20120827 场次实测降雨主要集中在郑州站附近,而各方案模拟降雨的空间位置相较于实测有大

幅度偏移,大体偏向东南方;20140729 场次实测降雨集中在华北水院站附近,而各方案模拟的降雨相较于实测向北和向西偏移;20160605 场次实测降雨集中在郑州站附近,而各方案模拟降雨的空间位置有小幅度偏移,大体偏向西北方。从以上 3 个场次和其余场次

降雨空间位置的分析得出:在模拟郑州市短时暴雨时,WRF 模式可以在区域内模拟出对应的降雨过程,但是雨区的空间位置会有所偏移,且不同场次偏移程度各不相同。由此可见,本次试验所用的参数方案对郑州市暴雨空间位置的模拟效果有所欠缺。

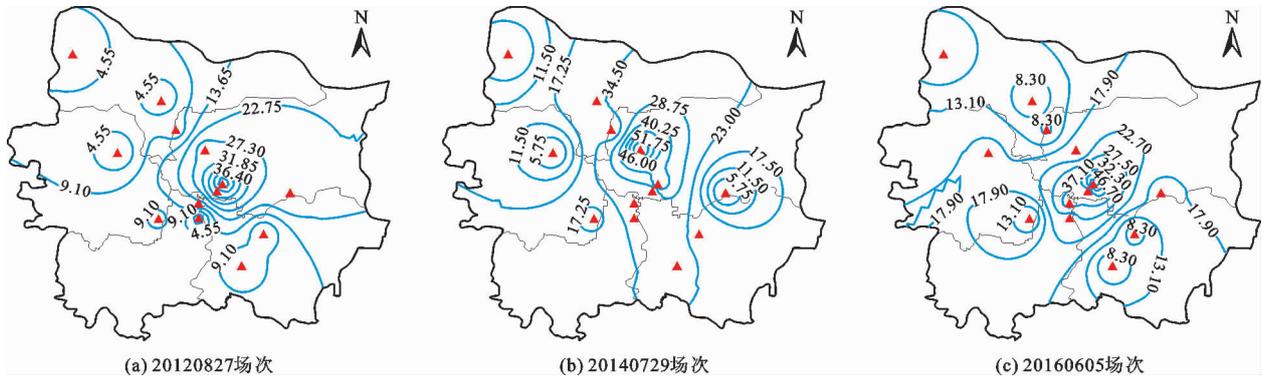


图2 郑州市 20120827、20140729 和 20160605 场次降雨实测最大时累积雨量等值线分布(单位:mm)

表 3 为各方案模拟暴雨中心降雨过程开始时间与实测时间的偏差;图 4 为 8 场次降雨实测暴雨中心与模拟暴雨中心雨量最大时的降雨时程分布。由表 3 与图 4 可知:20110721 场次降雨模拟中,各方案模拟出的暴雨中心降雨过程开始时间较实测暴雨中心偏差为 50 ~ 120 min;20120827 场次降雨模拟中,有 4 种方案的降雨过程开始时间较实测暴雨中心偏差超过 600 min;20130606、20150722 场次降雨模拟中则各有 4 种方案的时间偏差在 170 ~ 240 min;各方案对 20140729、20150803、20150829、20160719、20160801、20160805、20170812 这 7 个场次的降雨模拟中,均有 3 种及以上模拟方案的时间偏差在 60 min 内;20160605 场次降雨模拟中,各方案模拟的时间偏差在 130 ~ 180 min;20170818、20180801 场次降雨模拟中,均有 4 种方案模拟的时间偏差在 230 ~ 320 min。综上所述,使用 WRF 模式 5 种方案对 14 场暴雨进行模拟后,有 3 种及以上方案模拟结果的时间偏差在 180 min 内的场次为 9 个,占比超过 60%,由此可认为,应用 WRF 模式对郑州市各场次暴雨中心最大时的降雨模拟时,其时间偏差大致可维持在 180 min 内。

3.2 误差分析

由图 4 可以看出,经 WRF 模式模拟后,各场次不同方案模拟结果除时间外,其过程雨量与实测间也存在差异。为直观定量评价雨量的模拟结果,本文选用 4 种误差度量指标:皮尔森相关系数(R)、累积雨量相对误差(relative error, RE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, $MAPE$)

和百分比均方根误差(percentage - root, mean square error, $P - RMSE$),对各场次实测与模拟的暴雨中心雨量最大时的降雨过程进行分析。其中 R 用以评估 WRF 模式模拟的降雨过程与实际降雨过程的相关程度; RE 、 $MAPE$ 用以评估模拟的累积与过程雨量与实际的累积与过程雨量的偏差; $P - RMSE$ 用以评估模拟的降雨过程与实际降雨过程的误差。各指标的计算见公式(1)~(4)。

表 3 各方案暴雨中心降雨过程开始时间模拟与实测时间的偏差

场次编号	各方案时间偏差/min				
	Test1 方案	Test2 方案	Test3 方案	Test4 方案	Test5 方案
20110721	+120	+50	+80	+60	+110
20120827	+650	+570	+690	+660	+650
20130606	-230	-260	-180	-200	-180
20140729	+80	-50	-20	+80	+30
20150722	-210	-230	-170	-260	-170
20150803	-80	+50	-80	+60	-50
20150829	+40	0	0	0	-10
20160605	-150	-130	-170	-180	-160
20160719	+20	+20	+20	+210	+20
20160801	-110	-30	-150	-40	-50
20160805	+100	+20	+10	+30	+160
20170812	+250	-10	+240	-40	-50
20170818	+320	+440	+290	+230	+310
20180801	+250	+330	+300	+300	+260

注:“+”表示推迟,“-”表示提前。

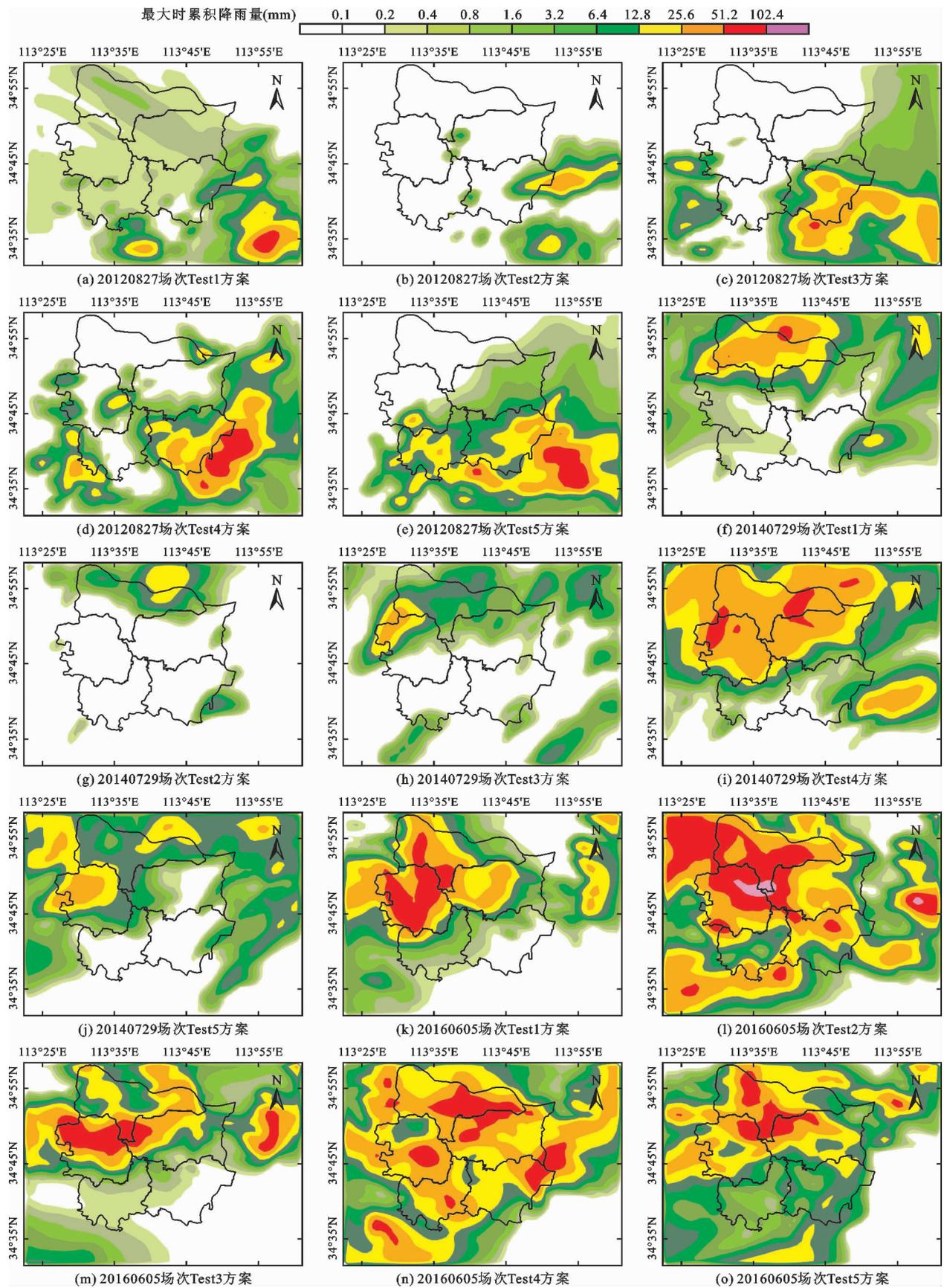


图 3 郑州市 20120827、20140729 和 20160605 场次降雨各方案模拟的最大时累积雨量分布

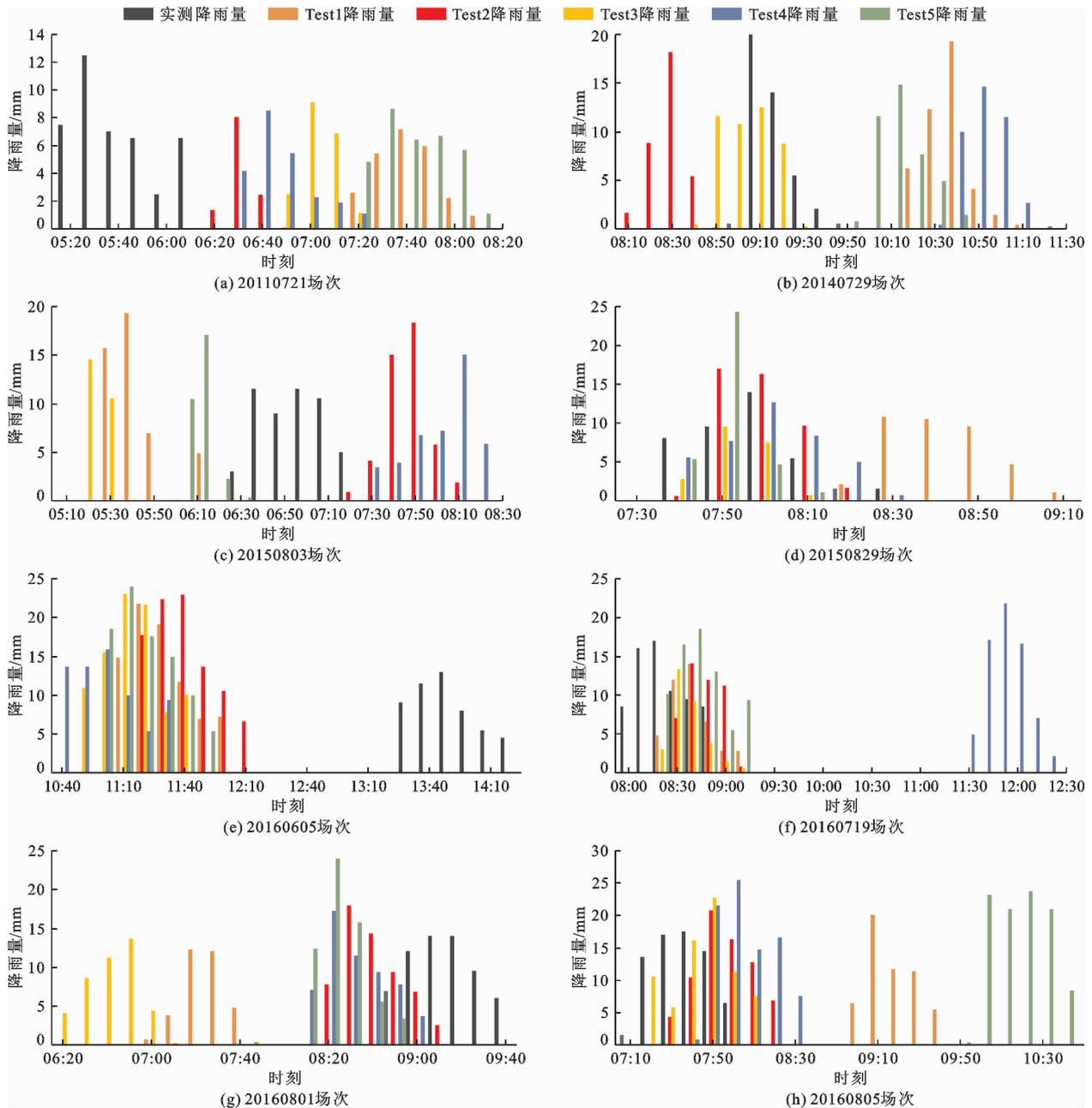


图4 8场次降雨实测暴雨中心与各方案模拟暴雨中心雨量最大时的降雨时程分布

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(r_i - \bar{r})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2}} \quad (1)$$

$$RE = \frac{(p - r)}{r} \times 100\% \quad (2)$$

$$MAPE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|p_i - r_i|}{r_i} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$P - RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - r_i)^2}}{\bar{r}} \times 100\% \quad (4)$$

式中： N 为总时段数，统一取值为6； r 、 p 分别为实测

与模拟出的暴雨中心最大时总雨量，mm； r_i 、 p_i 为实测与模拟的每时段雨量，mm； \bar{r} 、 \bar{p} 为实测与模拟的各时段平均雨量，mm。

4种误差度量指标计算结果见表4和5，4种指标中 R 的最优值为1，其余指标的最优值为0。由表4和5可以发现，在WRF模式模拟的14场降雨中，有10场降雨的3种及以上方案的 RE 在 $\pm 30\%$ 内，仅20160605场次全部方案的 RE 均超过30%；12场降雨有至少3种方案的 R 超过0.70，且其中7场有至少3种方案的 R 超过0.84；在全部场次降雨各方案模拟结果中， $MAPE$ 和 $P - RMSE$ 分属0~50%和

50% 以上区间的比例各占一半。由此可见,WRF 模式在模拟郑州市短时暴雨时,能较好地模拟暴雨中心心的累积雨量,且模拟的降雨过程与实际过程相关性较高,但在过程雨量模拟方面尚有不足。

表 4 所有降雨场次各方案模拟累积雨量的相对误差

场次编号	Test2 方案		Test3 方案		Test4 方案		Test5 方案	
	模拟雨量/mm	RE /%						
20110721	11.8	-72.1	19.6	-53.9	23.3	-45.2	33.3	-21.7
20120827	45.4	-0.2	53.9	18.6	45.2	-0.7	62.8	38.0
20130606	21.0	-50.5	22.6	-46.9	37.3	-12.2	15.3	-64.0
20140729	34.1	-40.7	44.0	-23.4	39.3	-31.7	41.1	-28.5
20150722	47.0	9.3	43.4	1.0	31.7	-26.2	67.4	56.8
20150803	46.0	-8.9	25.4	-49.7	42.2	-16.4	30.1	-40.4
20150829	45.2	12.9	20.4	-49.1	40.0	0.0	35.4	-11.5
20160605	93.9	82.3	89.0	72.8	67.8	31.6	90.3	75.3
20160719	45.2	-35.4	31.4	-55.2	69.6	-0.6	73.2	4.5
20160801	58.9	-5.8	42.1	-32.6	56.6	-9.5	61.1	-2.3
20160805	71.5	1.4	73.8	4.7	86.7	23.0	97.5	38.2
20170812	54.8	8.4	61.4	21.6	46.7	-7.5	55.9	10.6
20170818	73.3	6.2	62.0	-10.1	54.0	-21.7	93.5	35.5
20180801	80.1	27.1	48.8	-22.5	51.0	-19.1	57.1	-9.3

表 5 所有降雨场次各方案模拟降雨过程的相关系数、平均绝对百分比误差、百分比均方根误差

场次编号	Test1 方案			Test2 方案			Test3 方案			Test4 方案			Test5 方案		
	R	MAPE/ %	P-RMSE/ %												
20110721	0.39	38.42	59.37	0.88	80.44	74.92	0.80	63.08	61.46	0.83	45.45	50.77	0.44	47.82	45.33
20120827	0.54	132.83	58.57	0.93	41.78	38.80	0.95	77.81	32.66	0.72	54.47	55.45	0.67	163.07	64.73
20130606	0.88	106.35	65.86	0.86	70.91	80.36	0.85	37.53	85.27	0.91	44.49	43.96	0.91	77.68	89.79
20140729	0.80	75.16	49.16	0.92	52.31	48.91	0.84	40.99	42.35	0.97	48.99	35.80	0.97	37.23	33.62
20150722	0.90	51.23	48.52	0.78	44.17	48.07	0.95	36.09	22.51	0.90	45.86	39.47	0.76	124.70	79.93
20150803	0.44	65.46	78.90	0.60	61.89	64.43	0.43	72.90	81.85	0.41	33.82	49.01	0.48	73.00	79.04
20150829	0.66	70.80	52.93	0.77	62.74	71.43	0.84	66.74	60.89	0.85	67.19	34.70	0.81	60.38	84.42
20160605	0.95	55.46	67.42	0.98	79.64	89.71	0.70	78.23	88.12	0.87	37.68	37.23	0.86	72.50	87.08
20160719	0.97	43.48	40.12	0.57	49.05	52.32	0.92	61.50	57.57	0.88	39.27	38.42	0.88	18.23	18.82
20160801	0.92	55.01	51.03	0.72	30.38	34.15	0.96	40.53	36.74	0.68	25.33	31.16	0.92	45.59	51.82
20160805	0.85	39.94	35.80	0.91	43.00	20.95	0.27	121.97	46.51	0.82	33.02	42.50	0.79	46.28	48.37
20170812	0.50	87.25	66.56	0.87	71.07	46.38	0.96	36.13	29.01	0.94	53.21	32.84	0.76	48.80	48.47
20170818	0.26	24.31	28.00	0.66	32.20	39.34	0.79	42.96	43.21	0.72	26.44	27.56	0.64	46.91	52.84
20180801	0.90	32.55	37.13	0.37	115.25	78.88	0.74	51.36	53.09	0.75	68.30	52.04	0.71	72.53	53.72

3.3 降雨过程特征分析

3.3.1 雨型分析 雨型从数值上看是雨量的时程分配,实际是暴雨的结构特征或强度变化^[30]。对实测与模拟暴雨中心的雨型进行对比分析,可以直观

地评估 WRF 模式对郑州市暴雨中心降雨过程特征的模拟性能。不同场次暴雨过程均有特定的时程分配,时段分配比例的不同会形成不同的雨型特征^[30]。目前雨型分类研究较为常用的方法是通过

模糊识别法判别实际暴雨过程与经典模型间的相似性,通过就近原则确定雨型类别。

(1)经典雨型模型。本文经典雨型模型采用前苏联学者包高马佐娃等所提出的7种雨型^[31](见图5)。包高马佐娃等将每场典型降雨时长分为6段,

7种雨型中的I、II、III为单峰类雨型,雨峰分别处于降雨过程的前、后、中段;IV为均匀类雨型,无特别明显的雨峰,降雨过程雨量的时间分配比较均匀;V、VI、VII为双峰类雨型,雨峰分别处于降雨过程的前后、前中、中后段。

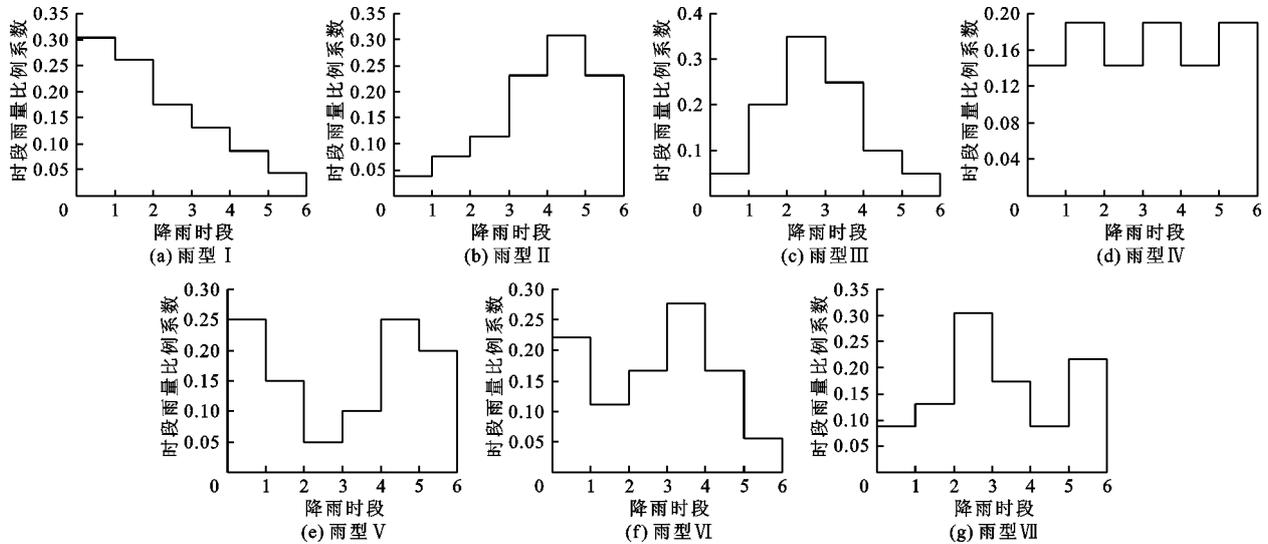


图5 7种经典暴雨雨型

(2)模糊识别法。首先计算场次降雨过程中各个时段雨量占比 X_i 。

$$X_i = \frac{H_i}{H} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中: X_i 为每时段雨量与总雨量的比值; H_i 和 H 分别为各时段雨量和场次过程总雨量,mm。

将一组 X_i 当作一场降雨的实际雨型指标,用 A 表示,其表达式如下:

$$A = (X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (6)$$

经典雨型指标用 B_k 表示,其表达式如下:

$$B_k = (V_{k1}, V_{k2}, \dots, V_{kN}) \quad (k = 1, 2, \dots, 7) \quad (7)$$

式中: V_{kN} 为经典场次中各时段雨量与总雨量的比值,具体见表6^[31]。

表6 7种经典暴雨雨型时程分配比例

雨型	V_{k1}	V_{k2}	V_{k3}	V_{k4}	V_{k5}	V_{k6}
I (B_1)	7/23	6/23	4/23	3/23	2/23	1/23
II (B_2)	1/26	2/26	3/26	6/26	8/26	6/26
III (B_3)	1/20	4/20	7/20	5/20	2/20	1/20
IV (B_4)	3/21	4/21	3/21	4/21	3/21	4/21
V (B_5)	5/20	3/20	1/20	2/20	5/20	4/20
VI (B_6)	4/18	2/18	3/18	5/18	3/18	1/18
VII (B_7)	2/23	3/23	7/23	4/23	2/23	5/23

场次降雨实际雨型与经典雨型的贴进度可由公式(8)计算得到,若场次降雨实际雨型与第 k 种经典雨型的贴进度最大,则该场降雨的雨型即为第 k 种雨型。

$$\sigma_k = \frac{\sum_{i=1}^N (A(X_i) \wedge B_k(V_{ki}))}{\sum_{i=1}^N (A(X_i) \vee B_k(V_{ki}))} \quad (k = 1, 2, \dots, 7) \quad (8)$$

式中: σ_k 为实际雨型与经典雨型的贴进度;运算符 \wedge 和 \vee 在模糊数学中分别表示为取小和取大。

(3)雨型分类结果分析。根据模糊识别法分类,各场次实测与模拟暴雨中心雨型结果见表7。由表7可知:在14场实测降雨中,暴雨中心雨型为第I类的有2场,第II类的有1场,第III类的有6场,第IV类的有5场,第V、VI、VII3类雨型则没有出现;应用WRF模式5种方案对9场单峰雨型的降雨模拟后,其中8场均有3种及以上方案模拟出的雨型与实际相同,模拟效果较好;应用WRF模式对5场均匀雨型的降雨进行模拟发现,多数方案模拟出的雨型为单峰类,与实际差异较大,模拟效果较差。通过对全部场次各方案模拟结果分析后发现,本次试验模拟后的暴雨雨型大多数为单峰雨型,而较少

模拟出另外两种类别的经典雨型。由此可认为 WRF 模式在郑州市短历时暴雨模拟中,若暴雨中心雨型为单峰类雨型,则模拟效果较好,若为均匀类雨型,则模拟效果较差。

表 7 各降雨场次实测与不同方案模拟的暴雨中心雨型

场次 编号	实测降 雨雨型	Test1 方案降 雨雨型	Test2 方案降 雨雨型	Test3 方案降 雨雨型	Test4 方案降 雨雨型	Test5 方案降 雨雨型
20120827	I	VII	I	I	I	I
20160605	I	I	I	III	I	I
20180801	II	VI	III	III	II	II
20130606	III	III	III	III	III	III
20140729	III	III	III	III	III	III
20150722	III	III	III	I	III	III
20150829	III	III	III	III	III	III
20160805	III	III	III	VI	III	III
20170812	III	VI	III	III	III	III
20110721	IV	III	I	III	I	IV
20150803	IV	I	III	III	II	III
20160719	IV	III	III	III	III	IV
20160801	IV	III	I	III	IV	IV
20170818	IV	IV	VII	III	I	III

3.3.2 雨峰分析 通过雨型特征分析可知,实测 14 场降雨中有 9 场实测降雨为单峰类雨型,为比较单峰

类雨型模拟结果与实测雨型的偏差,对这 9 场降雨的峰值雨量进行偏差分析,结果见表 8。需要说明的是,为便于分析,剔除了模拟结果中雨型为双峰类的方案。

由表 8 可知,20120827 和 20160805 两场降雨的 4 种方案中,各有 2 种模拟结果的雨峰偏差在 $\pm 30\%$ 内;20130606 和 20160605 两场降雨的 5 种方案中,各有 4 种方案模拟结果的雨峰偏差在 $\pm 30\%$ 以上;其余场次均有 3 种及以上方案模拟结果的雨峰偏差在 $\pm 30\%$ 内。综合比较后可认为,使用 WRF 模式模拟郑州市短历时暴雨,对暴雨中心峰值模拟的偏差基本可控制在 $\pm 30\%$ 内。

3.3.3 降雨集中度分析 采用降雨集中趋势度 (concentrated trend index, *CTI*) 比较实测与 WRF 模式模拟的暴雨中心降雨集中程度间的关联程度。*CTI* 表示某场降雨的峰值及其前、后相邻时段的雨量在整场降雨中的分布,因此该指标从雨强的变化方面体现降雨特性^[32]。其计算公式如下:

$$CTI = \frac{H_{t-1}^2 + H_t^2 + H_{t+1}^2}{\left(\sum_{i=1}^N H_i\right)^2} \quad (9)$$

式中: H_t 、 H_{t-1} 与 H_{t+1} 分别为场次降雨峰值时刻雨量及其前、后相邻时段雨量,mm; H_i 为场次降雨各时段雨量,mm。

表 8 9 场实测单峰雨型各方案模拟与实测暴雨中心的峰值雨量及模拟偏差

场次 编号	实测峰 值雨量/ mm	Test1		Test2		Test3		Test4		Test5	
		峰值雨 量/mm	雨峰偏 差/%								
20120827	15.0			20.9	39.4	13.3	-11.4	19.8	31.8	17.0	13.6
20130606	16.5	13.2	-19.9	9.4	-42.9	7.6	-54.2	4.7	-71.6	8.4	-48.8
20140729	20.0	19.3	-3.6	18.2	-9.1	12.5	-37.7	14.6	-27.1	14.8	-25.8
20150722	15.0	17.3	15.3	16.6	10.6	14.5	-3.4	11.2	-25.6	27.9	86.1
20150829	14.0	10.8	-23.2	16.9	20.9	9.5	-32.0	12.6	-9.7	24.3	73.6
20160605	13.0	21.8	67.9	22.3	71.9	23.0	77.0	15.8	21.7	23.9	84.0
20160805	17.5	20.1	14.6	20.8	18.8			25.5	45.8	23.7	35.4
20170812	17.0			20.9	22.8	18.0	6.0	19.1	12.6	21.0	23.4
20180801	23.0			20.8	-9.7	17.2	-25.4	20.6	-10.5	20.5	-10.8

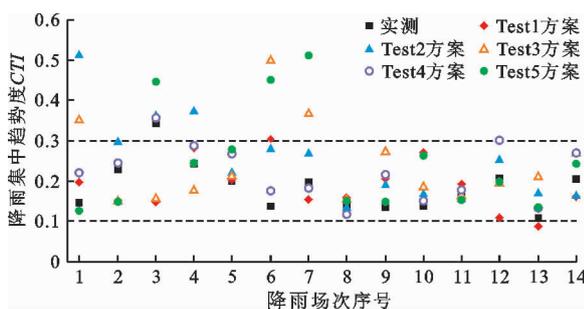
根据 *CTI* 值的大小,某场降雨的集中程度可分为 3 类,即均匀、分散和集中。表 9 为降雨集中程度分类表,其中 ν 与 μ 分别为均匀与集中两种类别 *CTI* 的边界值。当 *CTI* 小于 ν 时,场次峰值雨量及其前、后时段雨量相对整场降雨所占比例不大,雨量整体分

布较均匀;当 *CTI* 大于 μ 时则恰好相反,雨量整体分布较集中;*CTI* 处于 ν 与 μ 之间则雨量整体分布较分散。不同地区的边界值 ν 、 μ 有所差异,本文根据郑州市历史发生的短时典型均匀与集中降雨得出 ν 、 μ 值分别为 0.1 和 0.3。

表9 降雨集中程度分类表

降雨集中趋势度 CTI 值范围	分布类型
$CTI \leq \nu$	均匀
$\nu \leq CTI \leq \mu$	分散
$CTI \geq \mu$	集中

实测和各方案模拟场次降雨的 CTI 值分布见图6。由图6可以看出,14场实测降雨暴雨中心雨量最大时,降雨过程的 CTI 值基本处于0.1~0.3之间,雨量较为分散;WRF模式5种方案模拟后,其中13个场次均有3种及以上方案模拟出的暴雨中心降雨过程的集中程度与实测相同,表明WRF模式对郑州市暴雨中心降雨集中度的模拟效果较好。

图6 所有降雨场次实测及各方案模拟结果的 CTI 值分布

4 结论

本文基于WRF模式5种常用的微物理过程方案对郑州市2011-2018年的14场短时暴雨进行模拟,研究分析每场降雨实测与模拟暴雨中心雨量最大时降雨过程的时空分布、雨型、雨峰和降雨集中度等特征,得出结论如下:

(1) WRF模式可以在试验区域内模拟出对应场次的降雨过程,但是雨区的空间位置相较于实测结果有所偏移,不同场次的偏移程度不同,表明WRF模式对郑州市暴雨雨区位置的模拟有所欠缺;用该模式对各场降雨的暴雨中心雨量最大时降雨过程进行模拟,则60%以上场次的模拟时间偏差可以控制在180 min内,表现较为理想。

(2) 根据皮尔森相关系数(R)、累积雨量相对误差(RE)、平均绝对百分比误差($MAPE$)和百分比均方根误差($P - RMSE$)4种误差度量指标的计算结果可知,应用WRF模式模拟郑州市短时暴雨时,可较好地模拟出暴雨中心雨量最大时的累积降雨,且与实测降雨过程的相关性较高,但对过程雨量的模拟尚有不足,原因可能是驱动模式运行资料的空

间分辨率较低。

(3) 为探究WRF模式对郑州市暴雨中心雨量最大时降雨过程特征的模拟能力,结合模糊识别法,引入降雨集中趋势度对模拟结果的雨型、雨峰、降雨集中度进行分析,结果发现,WRF模式对郑州市单峰类雨型的降雨模拟表现较好,对均匀类雨型的模拟表现较差;当模拟对象为单峰类雨型时,雨峰模拟结果的偏差基本可控制在 $\pm 30\%$ 内;WRF模式模拟出的降雨过程的降雨集中度与实际情况较为符合,整体来看均为分散性降雨。

综上所述,WRF模式在郑州市短时暴雨的模拟中,虽然对暴雨中心具体位置的模拟不够准确,但在时间、累积雨量、降雨过程雨型、雨峰和降雨集中度等方面的模拟结果较为理想,这对郑州市未来短时暴雨的数值模拟预报研究具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 邹贤菊,张春桦,宋晓猛. 2018年我国城市暴雨洪涝事件调查及思考[J]. 水利发展研究,2019,19(8):45-50+71.
- [2] 倪志楠,李琼芳,杜付然,等. 南京市短时设计暴雨雨型研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):57-62.
- [3] 董俊玲,刘超,苏爱芳. 郑州地区城市化对一次暴雨过程影响的模拟研究[J]. 干旱气象,2019,37(6):922-932.
- [4] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [5] 赵玉春. 暴雨中尺度过程研究进展[J]. 气象科技进展,2014,4(2):36-44.
- [6] 李雪超,王颖,秦闯,等. WRF不同边界层参数化方案对重庆一次暴雨过程的模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(2):260-268.
- [7] 丁明月,王俐俐,辛渝,等. WRF云微物理参数化方案对新疆暴雨模拟能力的TS评分分析[J]. 干旱区研究,2019,36(6):1411-1418.
- [8] 袁有林,杨必华,周宏,等. WRF模式不同集合预报方案对一次大范围暴雨过程的模拟研究[J]. 干旱气象,2016,34(6):1027-1036.
- [9] 田亚杰,王春明,崔强. 2015年5月19-20日两广地区暴雨过程数值模拟与诊断分析[J]. 暴雨灾害,2017,36(1):18-25.
- [10] 李少英,张述文,邵毅,等. 2002年7月江淮流域一次暴雨的模拟诊断分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2016,52(2):211-218.
- [11] 诸葛丰林,郑有飞,吴荣军,等. 江苏省里下河地区一次暴雨过程的模拟研究[J]. 自然灾害学报,2014,23(5):164-176.
- [12] 张思豆,张杰,曹杰. 云南一次致灾暴雨过程WRF模式模拟分析[J]. 灾害学,2018,33(4):204-210.

- [13] 黄天福,高鹏,吴安坤,等. 基于 WRF 模式对贵州一次山地暴雨数值模拟研究[J]. 中低纬山地气象,2018,42(4):8-15.
- [14] 张杰,彭丽霞,史培军. 区域性暴雨的数值模拟和诊断分析的对比研究——以北京2012年7月21日暴雨为例[J]. 灾害学,2017,32(3):191-196+215.
- [15] 王田田,高晓清,尹宪志,等. WRF 模式物理过程参数化方案对酒泉地区暴雨模拟的影响[J]. 高原气象,2016,35(5):1257-1269.
- [16] 杨显玉,文军,王大勇,等. 一次甘肃强降水过程的数值模拟与诊断分析[J]. 高原气象,2016,35(3):726-733.
- [17] 王晓君,马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展,2011,26(11):1191-1199.
- [18] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象,2004,30(12):27-31.
- [19] 汤浩,贾丽红. 美国 ARW 模式系统简介[J]. 新疆气象,2006(6):24-26.
- [20] 阚煜,刘朝顺,乔枫雪,等. 不同云微物理方案对上海特大暴雨模拟影响的分析[J]. 热带气象学报,2017,33(3):399-414.
- [21] THOMPSON G, FIELD P R, RASMUSSEN R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(12): 5095-5115.
- [22] KESSLER E. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations[J]. Meteorological Monographs, 1969, 10(32): 88.
- [23] ROGERS E, BLACK T, DEAVEN D, et al. Changes to the operational "early" Eta analysis/forecast system at the National Centers for Environmental Prediction [J]. Weather and Forecasting, 1996, 11(3): 391-413.
- [24] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [25] HONG S Y, LIM J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. Journal of Korean Meteorological Society, 2006, 42(2): 129-151.
- [26] JANJI Z. The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 927-945.
- [27] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D13): D13103.
- [28] CHEN Fei, DUDHIA J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.
- [29] MONIN A S, OBUKHOV A M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. Contrib Geophys Inst Acad, 1954, 151(1): 163-187.
- [30] 孙周亮,鲍振鑫,舒章康,等. 南京市近25年短历时暴雨雨型特性[J]. 水文,2019,39(5):78-83.
- [31] 张鹭,李菁,裴海英,等. 南京市短历时暴雨雨型分析[J]. 气象科技进展,2019,9(3):15-20+55.
- [32] 刘美琪. 基于特征雨型的山洪灾害雨量预警模式研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.

