DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200085

不同微物理参数化方案对降雨数值模拟的影响试验

——以北京为例

侯爱中,胡智丹,朱 冰,付 静,周国良

(水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心),北京 100053)

摘 要:城市暴雨预报对防洪排涝具有重要意义。基于中尺度数值天气预报模型 WRF,构建北京市暴雨模拟模型,采用 13 种微物理参数化方案,对 2007 年 8 月 1 日下午至 8 月 2 日凌晨的暴雨过程进行了模拟试验。结果表明,对该场降雨,Kessler 方案模拟得到的面平均降雨量与实测值最接近;WSM5 方案模拟得到的面平均降雨过程与实测过程吻合最好;累积降雨高值区域落区模拟和最大 1h 降雨强度模拟,Milbrandt 方案表现最好;综合考虑降雨量、降雨过程、累积降雨高值区域落区范围和最大 1h 降雨强度指标,Milbrandt 和 Thompson 方案表现最好。此外,相比单矩方案,采用多矩方案可能会提高对微物理过程的描述精度。研究结果对北京市暴雨预报具有一定参考意义。

关键词:数值降雨预报;WRF;微物理参数化方案;北京

中图分类号:P456.7;TV125 **文献标识码:** A **文章编号:**1000-0852(2020)05-0041-08

云通过潜热释放参与热传输过程,对长波和短波辐射有重大的影响[1]。对云物理过程进行充分描述,是中尺度数值天气模拟和预报中一个很具有挑战性的任务[2]。随着计算能力的提高,处于研究或实际运行中的数值天气预报模式开始采用为高精度云分辨模型而开发的复杂微物理方案[3]。有研究表明,显式微物理参数化方案代替隐式积云参数化方案可改善定量降雨预报[4]。由美国大气研究中心(NCAR)、环境预测中心(NECP)等组织研发的中尺度天气研究和预报模式 WRF(Weather Research and Forecasting)包含十多种云物理参数化方案[5]。这些方案中有些比较简单易算,比如 Kessler 暖雨(无冰相)方案[6]和 WSM3 方案[7]等;有些则比较复杂且计算量较大,比如 Morrison 2-mom 方案[1]和 Milbrandt 2-mom 方案[8]。在云和降水的微物理参数化方案领域,复杂方案并不一定比简单方案模拟效果好[9],并且对流系统的相速度、降雨区域以及强度等对微物理参数化方案非常敏感[4],这就给实际降雨预报参数化方案的选用带来了麻烦。尽管云微物理参数化方案有明确的物理基础,但不同方案对微物理过程的具体描述方法不同,因此在实际暴雨预报中,究竟采取哪一种方案结果会更理想,仍需要深入研究[10]。

近些年北京市夏季暴雨逐渐增多,对暴雨落区、强度、降雨过程等的精确预报可以提高城市防洪排涝工作部署的针对性和有效性。本文基于 WRF 模式(Version 3.3),在北京及周边地区建立高精度网格的数值试验框架,并对北京市 2007 年 8 月 1 日暴雨过程进行模拟,分析 13 种微物理参数化方案对暴雨模拟的敏感性,以期对北京市的暴雨预报提供参考。

1 研究区域及计算方案

研究区域以北京市为中心(见图 1),为反映地形和海风的影响,东延伸至渤海湾,西延伸至属于太行山脉的西山,北延伸至燕山山脉的军都山,南面是华北平原,区域中心坐标为(40.0°N,116.5°E),包括河北、天津及周围多个省份。东西向距离约 463km,南北向约 323km,海拔高度范围从渤海平面到 2 200m。计算网格取 3.6km×3.6km,网格数 129×90 个,垂向分层 27 层。

收稿日期:2020-04-05

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目“城市洪涝灾害预警与全景式决策云平台”(91846203);国家重点研发计划项目“中小河流洪水防控与应急管理关键技术研究与示范”(2018YFC1508100,2018YFC1508103)

作者简介:侯爱中(1983-),男,河南济源人,博士,高工,主要从事水文情报预报、城市防洪等研究工作。E-mail:houaizhong@mwr.gov.cn

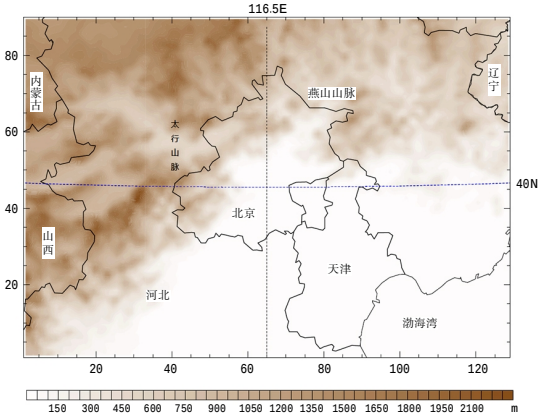

图1 研究区域范围及DEM

Fig.1 The boundary and DEM of the study area

地形信息采用ASTER Global Digital Elevation Model数据(https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/aster_products_table / routine / global_digital_elevation_model/v1/astgtm),精度约30m;土地利用信息采用2005年中科院发布的全国1:25万(约100m精度)土地覆盖遥感调查监测数据库(25-category),模拟时采用静态数据替换的方法。其他所需静态数据,如土壤类型、温度等都采用WRF模式提供的默认值(见表1)。

模型初始及边界气象条件,采用NCEP全球分析数据(空间分辨率1°×1°,时间分辨率6h)。实测降雨发生时间为8月1号下午至2日凌晨,模型计算时加上1d预热时间,最后选取的计算时段为当地7月31日08时至8月2日08时(共48h)。WRF3.3版本13种微物理参数化方案全部用于数值试验,方案主要信息见表2。

表1 研究采用的静态数据描述

Table1 The applied static data description

数据类型	数据描述	数据类型	数据描述
DEM	ASTGTM(30m)地形数据	SOILCBOT	2′的16类底层土壤类型
ALBEDO	0.144°的逐月地表反照率数据	GREENFRAC	0.144°的逐月植被覆盖数据
SOILTEMP	1°的全球年均深层土壤温度数据	SNOALB	1°的最大雪地反照率数据
SOILCTOP	2′的16类表层土壤类型	SLOPECAT	1°的地形坡度数据

从表2中可见,不同参数化方案的变量个数不同,相应的复杂程度也不同。只将混合比Q作为预报变量的单矩方案有8个,将Q和成分数量N作为预报变量的双矩方案有4个,Milbrandt方案还将雷达反射率因子作为预报变量,是唯一的多矩方案。参数化方案的详细介绍,可参考表2中列出的相关文献。本文WRF模式中涉及到的其他参数化方案选择如下:地表采用MM5(Mesoscale Model Version 5)相似性方案,陆面过程采用Noah LSM(Land Surface Model)方案,行星边界层采用YSU(Yonsei University)方案,长波辐射采用RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)方案,短波辐射采用MM5方案。由于选用的网格不到5km,因此不

表2 敏感性实验使用的WRF(V3.3)微物理参数化方案

Table2 The list of micro-physic schemes of WRF(V3.3) used in the numerical test

序号	方案名称	简要描述	预报变量	集成年份	参考文献
1	Kessler	暖雨(无冰相)方案,在理想条件下的云模拟研究中普遍使用。	Q_c,Q_r	2000	[6]
2	Lin (Purdue)	包含冰、雪和霰的复杂方案,适合高精度真实数据模拟。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g	2000	[11]
3	WSM3	包含冰和雪过程的单矩方案,适合中尺度网格。	Q_c,Q_r	2004	[7]
4	WSM5	比WSM3稍微复杂一点,允许混合相和超冷却水存在。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s	2004	
5	Eta Ferrier	NCEP运行模型中使用的方案,包含对混合相过程的诊断。	Q_c,Q_r,Q_s,(Q_t^*)	2000	[12]
6	WSM6	包含冰、雪和霰过程的方案,适合高精度模拟。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g	2004	[13]
7	Goddard GCE	包含冰、雪和霰过程的方案,适合高精度模拟。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g	2008	[14]
8	Thompson	包含冰、雪和霰过程的方案,适合高精度模拟。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g N_r,N_i	2009	[15]
9	Milbrandt	增加了雨、冰、雪、霰和雹的雷达反射率因子作为预报变量,因此为三矩方案。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g,Q_h N_c,N_r,N_i,N_s,N_g,N_h Z_r,Z_i,Z_s,Z_g,Z_h	2010	[8]
10	Morrison	包含雨、冰、雪和霰过程的双矩方案。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g N_r,N_i,N_s,N_g	2008	[16]
11	SBU-YLin5	包含云、雨、冰和雪过程,通过预测霜化强度描述混合相过程。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s	2011	[17]
12	WDM5	类似WSM5,增加云和雨的数量预测。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s N_n^{**},N_c,N_r	2009	[18]
13	WDM6	类似WSM6,增加云和雨的数量预测。	Q_c,Q_r,Q_i,Q_s,Q_g N_n^{**},N_c,N_r	2009	

注:下标c,r,i,s,g,h为各种水分存在形态:云、雨、冰、雪、霰和雹;Q为各成分的混合比;N为各成分的数量;Z为各成分计算得到的雷达反射率因子;* 为对流总凝结体;** 为凝结核数量。

采用积云(对流)参数化方案。除微物理参数化方案以外，其他参数化方案的设置在13个计算方案中保持一致。

2　暴雨概况及预报评价指标

2.1　北京“2007.8.1”暴雨概况

根据北京市187个自动气象站的实测结果，当地时间8月1号下午15时左右西部太行山脉开始下雨，17时左右雨区移到北部燕山山脉，此后雨区开始南移,20时左右进入北五环附近,20时至21时和平西桥站小时降雨量达到93mm；雨区继续南移,21时30分至22时,南召站半小时降雨量达到44mm。此后雨区移向西南,降雨量开始减少,至8月2日凌晨2时左右本次降雨过程基本结束,总历时在12h以内。主要降雨区在南部主城区,北部还有一个次中心。单站雨量最大值为和平西桥的147.5mm，奥体中心的118.4mm次之。累积雨量在50~100mm的测站有25个，在30~50mm之间的测站有41个,在5~30mm之间的测站有85个。整个过程全市平均降雨量27mm,最大小时雨量为和平西桥93mm(20时至21时)。

2.2　暴雨预报评价指标

降雨预报准确率检验，一般从降雨的落区、降雨量、降雨过程和强度,将预报值和实测值作对比分析。本文采用落区检验（模拟和实测降雨覆盖区域重合度TS、模拟降雨与观测降雨面积之比BS、错报率FAR、探测失败率POFD、成功探测率POD)、降雨量检验(标准偏差MB)、降雨过程检验(NS效率系数)、相关系数(CC)等8个指标[19-20]。

3　微物理敏感性试验结果

3.1　累积降雨量对比

模型输出的降雨量为格点值,为便于与实测点降雨量进行对比,这里假设与187个气象站位置对应的栅格雨量即为气象站预报雨量,然后统计各参数并与实测雨量进行对比;为比较各方案的优劣,以模拟范围内所有栅格平均降雨量模拟结果作比较。计算得到的各方案预报雨量跟实测的标准偏差(MB)及偏差百分比、各方案187个测站的预报降雨累积值和实测降雨累积值相关系数CC_1见表3(187站实测平均雨量27mm)：

表3中标准偏差(MB)均为负值,说明所有方案站均预报降雨量都比实测值偏小,其中Kessler方案与实测值最接近;其次是Lin方案和Eta Ferrire方案,预报比实测偏小约10%;WSM3方案误差最大,偏小52%,WDM6、Milbrandt和WSM6三个方案误差也在30%以上。从相关系数CC_1来看,预报降雨累积值和实测降雨累积值相关度较高的为Milbrandt方案，其次为Thompson、Eta Ferrier和SBU-YLin5方案。

表3　各参数化方案预报雨量的标准偏差(MB)统计

Table3　The standard mean bias of different micro-physics to observation

参数化方案	站均过程雨量/mm	与实测雨量偏差(MB)/mm	偏差百分比/%	相关系数CC_1
Kessler	26.83	-0.17	-0.6	0.19
Lin	24.59	-2.41	-8.9	0.03
WSM3	12.95	-14.05	-52.0	0.01
WSM5	21.66	-5.34	-19.8	0.13
Eta Ferrier	23.29	-3.71	-13.7	0.33
WSM6	18.50	-8.50	-31.5	-0.10
Goddard GCE	22.70	-4.30	-15.9	0.00
Thompson	20.39	-6.61	-24.5	0.34
Milbrandt	18.25	-8.75	-32.4	0.40
Morrison	22.56	-4.44	-16.4	0.20
SBU-YLin5	22.50	-4.50	-16.7	0.28
WDM5	19.65	-7.35	-27.2	0.24
WDM6	17.51	-9.49	-35.1	0.02
预报均值	20.87	-6.13	-22.7	0.19

3.2　平均降雨过程对比

将各方案187个测站处的预报降雨过程进行算术平均,与实测平均降雨过程进行对比,绘制降雨过程对比图并统计NS系数(见图2和表4)。总体看来,各方案都预报了这次过程,但不同方案预报的最大小时面雨量、出现时间及降雨过程不尽相同。从NS系数看,WSM5方案预报过程跟实测过程吻合最好，其次为Goddard和WSM6方案，较差的为SBU-YLin5、Milbrandt和Eta Ferrier方案。从图2还可看出,所有方案都未模拟出从8月1日15时至18时之间和8月2日0时以后的小雨过程。

3.3　全区累积降雨范围和分布

图3为13个方案计算得到的累积降雨量面分布。各方案模拟得到的降雨落区范围基本一致,大体集中于从北到南的一个条带区域,且南、北各有一个降雨中心,与实测结果基本吻合,累积雨量范围位于0~80mm，但不同方案模拟得到的不同量级降雨范围和分布情况不尽相同。各方案预报结果累积降雨分布的TS、BS、FAR、POFD和POD指标（这里以35mm为阈值进行说明)如表5所示。对累积降雨35mm以上

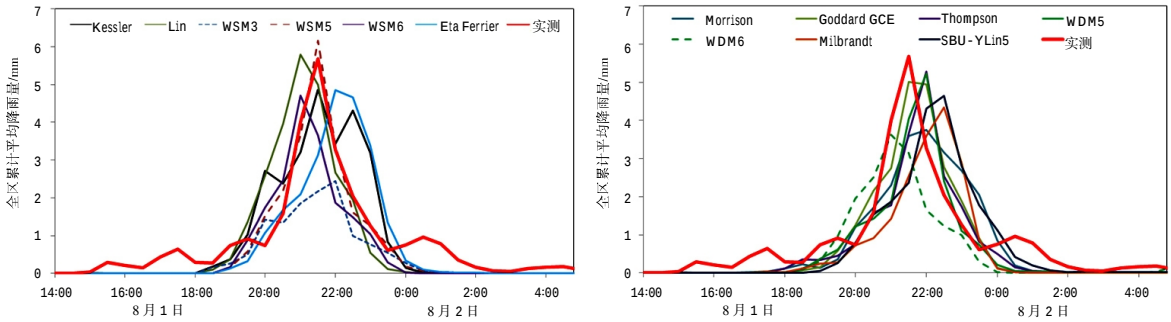

图2 累积平均预报降雨和实测降雨过程对比

Fig.2 The comparison of simulated rainfall process and observation of different micro-physics

表4 平均预报降雨过程和实测降雨过程的NS系数

Table4 The NS coefficient of simulated rainfall process and observation of different micro-physics

参数化方案	NS
Kessler	0.68
Lin	0.68
WSM3	0.59
WSM5	0.91
Eta Ferrier	0.49
WSM6	0.78
Goddard GCE	0.82
Thompson	0.71
Milbrandt	0.48
Morrison	0.71
SBU-YLin5	0.46
WDM5	0.74
WDM6	0.71
预报均值	0.83

表5 以累积降雨35mm为阈值计算得到的各个指标值

Table5 The scores of different index at the threshold of 35 mm

参数化方案	TS	BS	FAR	POFD	POD
Kessler	0.31	1.02	0.53	0.22	0.48
Lin	0.16	0.91	0.71	0.26	0.26
WSM3	0.04	0.07	0.50	0.02	0.04
WSM5	0.13	0.63	0.71	0.18	0.19
Eta Ferrier	0.30	0.70	0.45	0.13	0.39
WSM6	0.06	0.52	0.82	0.17	0.09
Goddard GCE	0.12	0.56	0.70	0.16	0.17
Thompson	0.18	0.43	0.48	0.08	0.22
Milbrandt	0.35	0.50	0.22	0.05	0.39
Morrison	0.20	0.56	0.53	0.12	0.26
SBU-YLin5	0.22	0.63	0.53	0.14	0.30
WDM5	0.13	0.30	0.50	0.06	0.15
WDM6	0.17	0.43	0.52	0.09	0.20

区域,TS 表现最好的是 Milbrandt 方案,预报雨区范围跟实测匹配度达 35%, 其次是 Kessler 和 Eta Ferrier 方案,分别为 31%和 30%。BS 得分最高(雨区面积最接近)的为 Kessler 和 Lin 方案,其中 Kessler 方案预报 35mm 以上区域的面积跟实测几乎一样。FAR 最低的是 Milbrandt 方案,仅 22%,WSM6 方案最高,达 82%。POFD 最小的是 WSM3 和 Milbrandt 方案,POD 最大的是 Kessler、Eta Ferrier 和 Milbrandt 方案。

对同一个指标以不同量级的累积降雨为阈值进行统计和对比,分析不同参数化方案对不同量级累积降雨的模拟效果。选择的几个累积降雨级别分界点分别为 1mm、5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、30mm、35mm 和 40mm。其中 1mm 作为“晴雨”预报的分界阈值。限于篇幅,只列出 TS 得分的统计结果(见表 6 和图 4)。

从 TS、BS 和 FAR 的统计结果可以看出, 在 1mm 阈值处各参数化方案的 TS、BS 评分都较高,说明晴雨预报能力都很强。随着降雨阈值的增大,TS 和 BS 呈递减、FAR 呈增加趋势,说明降雨越强,模拟能力越低。在 30~40mm 区域,TS 评分表现最好的为 Milbrandt 方案,其次为 Kessler 和 Eta Ferrier 方案,表现最差的是 WSM3 方案;BS 评分表现最好的 Kessler 方案,其次是 Lin 方案,表现最差的还是 WSM3 方案;FAR 表现最好的还是 Milbrandt 方案,表现最差的是 WSM6 方案。

3.4 最大小时雨强对比

对城市防洪以及很多其他应用 (如水文模型、污染物冲刷等)而言,降雨强度是一个很重要的指标。本文计算了各参数化方案模拟得到的各站最大小时雨强,与实测的最大小时雨强(93mm/h)偏差及偏差百分比, 以及 187 个站模拟得到的最大 1h 雨强和实测最大 1h 雨强的相关系数 CC_2(见表 7)。从表 7 中可见,Thompson 方案得到的单站最大小时雨强最大,约 76mm, 与实测最大小时雨强最接近, 误差在 20%以

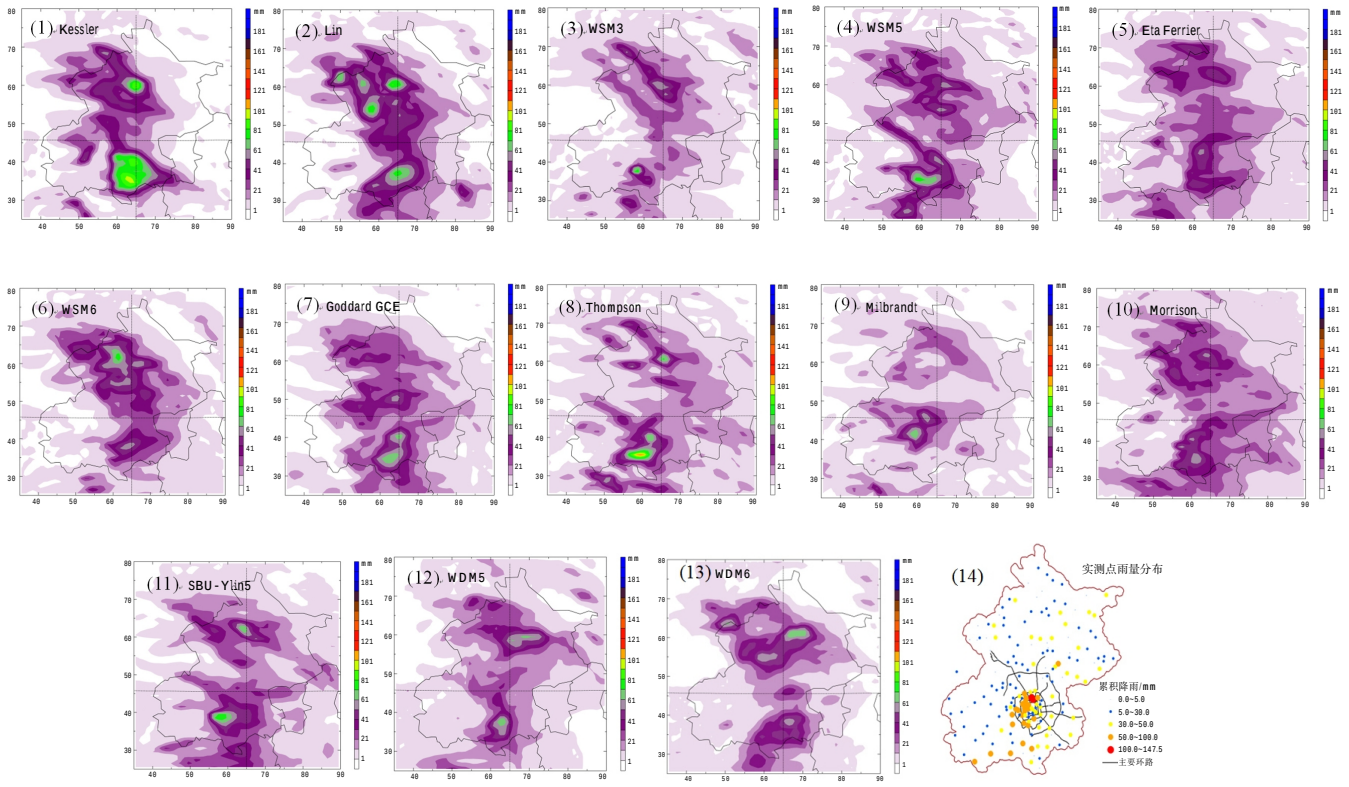

图 3 各个参数化方案的预报累积面雨量分布

Fig.3 The simulated rainfall distribution of different micro-physic schemes

内；其次是 Kessler 方案，误差不到 25%；最差的是 WSM3 方案,误差近 70%。从相关系数来看,模拟最大 1h 雨强和实测最大 1h 雨强相关系数最高的为 Milbrandt 方案,达到了 0.4,其次为 Thompson 方案(0.37)。

3.5　综合评价指标

为便于综合评价，本文构建一个综合评价指标 CAI(Comprehensive Assessment Index)来综合反映各参数化方案对降雨量、降雨过程、降雨范围和降雨强度的模拟效果。为此,从降雨量评价指标中选取各参数化方案模拟得到的 187 个测站的预报与实测累积雨量的相关系数 CC_1 指标、从降雨过程评价指标中选取 NS 指标、从降雨面分布评价指标中选取以高值降雨为阈值(本次降雨选取 35mm 得到的 TS 指标、从降雨强度评价指标中选取所有测站最大小时雨强和实测最大小时雨强的相关系数 CC_2 指标。上述各指标都是越接近 1 越好,可以构建 CAI 指标如式(1)：

$$CAI=\alpha_1 CC_1+\alpha_2 NS+\alpha_3 TS+\alpha_4 CC_2 \qquad (1)$$

式中:α_i,i=1,2,3,4 表示用户定义的权重,和为 1。可根据关注的重点对不同指标赋以不同的权重，以选用适合自己的参数化方案,这里暂假定均为 0.25。根据该式,计算得到各参数化方案的 CAI(见表 8)。

从表 8 中可见,对该次北京夏季暴雨,如果综合考虑降雨量、降雨过程、雨区范围和最大 1h 降雨强度指标，表现最好的微物理参数化方案是 Milbrandt 和 Thompson 方案,表现最差的是 WSM6 和 WSM3 方案。这与前面对各个单项指标的分析结果基本一致。与其它方案相比,Milbrandt 方案将雷达反射率因子增加为预报变量,由此可以得到一个提示,即增加雷达反射率因子作为预报变量,可能会有效提高对云物理过程的描述精度。这与梅海霞、王文君、马严枝、陈功、牛俊丽等人的研究结论比较吻合[21-24]。

4　结论与展望

本文基于中尺度数值天气预报模式 WRF(Version 3.3),构建了北京市暴雨模拟模型,针对 2007 年 8 月 1 日下午至 8 月 2 日凌晨的一场暴雨过程进行了模拟。本文采用 13 种微物理参数化方案分别进行了试验,从降雨量、降雨过程、雨区范围和最大 1h 降雨强度等方面对各方案模拟结果与实测结果进行了对比,并选用多个指标进行评价,得到的主要结论为：

表6 各参数化方案对不同量级累积降雨模拟结果的TS评分
Table6 The TS scores of different thresholds of different micro-physics

参数化方案	TS								
	1mm	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm
Kessler	0.76	0.65	0.55	0.49	0.45	0.39	0.34	0.31	0.23
Lin	0.77	0.66	0.57	0.50	0.43	0.37	0.27	0.16	0.12
WSM3	0.81	0.60	0.45	0.34	0.14	0.10	0.06	0.04	0.02
WSM5	0.84	0.73	0.61	0.50	0.40	0.35	0.23	0.13	0.13
Eta Ferrier	0.86	0.75	0.63	0.56	0.45	0.38	0.36	0.30	0.24
WSM6	0.77	0.64	0.52	0.41	0.30	0.20	0.15	0.06	0.05
Goddard GCE	0.81	0.72	0.61	0.54	0.36	0.23	0.17	0.12	0.13
Thompson	0.85	0.77	0.60	0.54	0.45	0.41	0.28	0.18	0.12
Milbrandt	0.84	0.70	0.49	0.41	0.38	0.38	0.32	0.35	0.27
Morrison	0.86	0.75	0.61	0.55	0.44	0.37	0.35	0.20	0.16
SBU-YLin5	0.86	0.76	0.61	0.53	0.45	0.42	0.34	0.22	0.14
WDM5	0.85	0.71	0.59	0.51	0.41	0.37	0.27	0.13	0.11
WDM6	0.83	0.66	0.53	0.38	0.28	0.16	0.17	0.17	0.08

(1)就该场降雨而言,Kessler 方案模拟得到的 187 个测站处的平均降雨量与实测值最接近;而 Milbrandt 方案模拟得到的所有测站累积降雨和预报降雨相关度最高。就参数化方案本身而言,相同大气条件下由于对微物理过程的处理不同,Morrison 方案形成的降雨最多,WSM3 方案形成的降雨最少,两者几乎相差一倍。

(2)WSM5 方案模拟得到的面平均降雨过程与实测过程吻合最好,NS 系数达到 30.91。

(3)各个参数化方案对于是否降雨(晴雨预报)以及在何处降雨的预报能力均较强,但是各个方案的模拟能力都随着暴雨量的增多而降低。相对而言,对于累积降雨高值区域的落区模拟,Milbrandt 方案表现最好。

(4)Thompson 方案计算得到的单站最大 1h 雨强在所有方案中最接近实测最大值,但从所有测站统计来看,Milbrandt 方案对于最大 1h 降雨强度的模拟较优一些。

表7 各参数化方案模拟得到的单站最大1h雨强与实测对比
Table7 The maximum hourly rainfall of different micro-physics to observation

方案名称	模拟最大小时雨强 /mm·h⁻¹	与实测最大小时雨强偏差/mm·h⁻¹	偏差百分比/%	相关系数 CC_2
Kessler	70.90	-22.10	-23.76	0.08
Lin	62.31	-30.69	-33.00	0.04
WSM3	28.25	-64.75	-69.62	0.01
WSM5	53.54	-39.46	-42.43	0.16
Eta Ferrier	38.65	-54.35	-58.44	0.19
WSM6	52.13	-40.87	-43.94	-0.17
Goddard GCE	46.13	-46.87	-50.4	0.00
Thompson	75.88	-17.12	-18.41	0.37
Milbrandt	59.23	-33.77	-36.31	0.40
Morrison	39.65	-53.35	-57.37	0.10
SBU-YLin5	38.78	-54.22	-58.30	0.28
WDM5	49.04	-43.96	-47.27	0.29
WDM6	49.69	-43.31	-46.57	0.00

(5)如果综合考虑降雨量、降雨过程、累积高值降雨落区范围和最大 1h 降雨强度指标,表现最好的微物理参数化方案是 Milbrandt 和 Thompson 方案。

表8 各参数化方案CAI计算结果
Table8 The CAI score of different micro-physic schemes

参数化方案	降雨量 CC_1	降雨过程 NS	落雨范围 TS	1h 最大雨强 CC_2	综合指标 CAI
Kessler	0.19	0.68	0.31	0.08	0.32
Lin	0.03	0.68	0.16	0.04	0.23
WSM3	0.01	0.59	0.04	0.01	0.16
WSM5	0.13	0.91	0.13	0.16	0.33
Eta Ferrier	0.33	0.49	0.30	0.19	0.33
WSM6	-0.10	0.78	0.06	-0.17	0.14
Goddard GCE	0.00	0.82	0.12	0.00	0.24
Thompson	0.34	0.71	0.18	0.37	0.40
Milbrandt	0.40	0.48	0.35	0.40	0.41
Morrison	0.20	0.71	0.20	0.10	0.30
SBU-YLin5	0.28	0.46	0.22	0.28	0.31
WDM5	0.24	0.74	0.13	0.29	0.35
WDM6	0.02	0.71	0.17	0.00	0.23

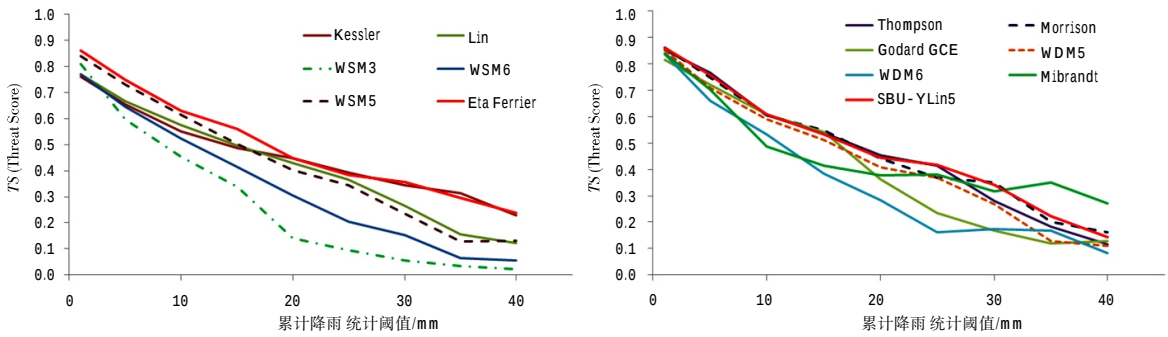

图 4 各参数化方案对不同量级累积降雨模拟结果的 TS 评分变化趋势
Fig.4 The TS varying trends of different thresholds of different micro-physics

(6)与单矩方案相比,将混合比 Q、成分数量 N 以及雷达反射率因子等作为预报变量的多矩方案可能会提高对云物理过程的描述精度。

由于篇幅所限,本文并没有讨论 WRF 中所含其他参数化方案的影响。由于各种参数化方案之间存在着相互作用,有可能其他的参数化方案组合能够得到更好的结果。除此之外,不同网格尺寸、网格嵌套等不同的试验设计方案也会对结果产生一定的影响。这些都需要更进一步的深入研究。

参考文献:

[1] Morrison H, Curry J A, et al. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005,62(6): 1665-1677.

[2] Lin W S, Sui C H, Bueh C, et al. Numerical comparison study of cloud microphysical parameterization schemes for a moderate snowfall event in North China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007,95(3-4):195-204.

[3] Tao W K, Shi J, Lang S, et al. An improved bulk microphysical schemes for studying precipitation processes: comparisons with other schemes [J]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2007, abstract id: A21C-0653.

[4] Fritsch J M, Carbone R E. Research and development to improve quantitative precipitation forecasts in the warm season: A synopsis of the March 2002 USWRP Workshop and statement of priority recommendations [R]. Technical report to UEWRB Science Committee, 2003.

[5] William C S, Joseph B K, Jimy D, et al. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note, 2008.

[6] Kessler E. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations [J]. Meteorological Monographs, 1969,10(32):88.

[7] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Monthly Weather Review, 2004,132(1):103-120.

[8] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(9): 3051-3064.

[9] Straka J. Cloud and Precipitation Microphysics-Principles and Parameterizations[M]. Cambridge, Cambridge University Press, 2009.

[10] 王文君, 朱彬, 杨素英, 等. 两类双参数云微物理方案对夏季强降水事件模拟能力的对比研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(6): 721-730. (WANG Wenjun, ZHU Bin, YANG Suying, et al. Comparison and analysis of strong precipitation simulation capability of morrison and milbrandt-yau two-moment cloud micro-physical schemes [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(6): 721-730. (in Chinese))

[11] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. Journal of Applied Meteorology, 1983,22(6):1065-1092.

[12] Rogers E, Black T, Ferrier B, et al. Changes to the NCEP Meso Eta analysis and forecast system: Assimilation of satellite radiances and increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis[R]. NWS Technical Procedures Bulletin, 2001,488:15.

[13] Hong S, Lim J J. The WRF Single-Moment 6-class Microphysics Scheme (WSM6) [J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 2006,42(2):129-151.

[14] Tao W K, Simpson J, Mccumber M, et al. An ice-water saturation adjustment [J]. Monthly Weather Review, 1989,117(1): 231-235.

[15] Thompson G, Field P R, Mnning K, 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.

[16] Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes [J]. Monthly Weather Review, 2009,137(3):991-1007.

[17] Lin Y, Colle B A. A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature-dependent ice characteristics [J]. Monthly Weather Review, 2011,139(3):1013-1035.

[18] Lim K S, Hong S. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. Monthly Weather Review, 2010,138(5):1587-1612.

[19] Maussion F, Scherer D, et al. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China-an assessment using remote sensing and ground observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(6):1795-1817.

[20] 吴志勇. 定量降雨与实时洪水预报研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007. (WU Zhiyong. Study on Quantitative Precipitation and Real-Time Flood Forecast [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))

[21] 梅海霞, 沈新勇, 王卫国, 等. WRF 单柱模式中单参数方法对热带对流模拟能力的影响 [J]. 气候与环境研究, 2015,20 (6): 685-704. (MEI Haixia, SHEN Xinyong, WANG Weiguo, et al. Effects of one-moment parameterization on the capacity to simulate tropical convection using a single-column model [J]. Climatic and Environmental Research, 2015,20(6):685-704. (in Chinese))

[22] 马严枝, 陆昌根, 高守亭. 8.19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比实验 [J]. 大气科学, 2012,36 (4):835-850. (MA Yanzhi, LU Changgen, GAO Shouting. The effects of different microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18-19 August 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012,36(4):835-850. (in Chinese))

[23] 陈功, 廖捷, 孙凌. WRF 微物理方案对四川一次强降水模拟的影响[J]. 高原山地气象研究, 2012,32(1):43-50. (CHEN Gong, LIAO

Jie, SUN Ling. Effect of micro-physical scheme on simulation of a heavy rainfall process in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012,32(1):43-50. (in Chinese))

[24] 牛俊丽. 中尺度模式中不同微物理方案对强降水预报的影响[D]. 北京：中国气象科学研究院, 2007. (NIU Junli. Influence of Different Microphysical Parameterization Schemes on Forecast of Heavy Rainfall [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2007. (in Chinese))

Numerical Test of Different Micro-Physic Schemes to Heavy Rain Forecast: Take Beijing as an Example

HOU Aizhong, HU Zhidan, ZHU Bing, FU Jing, ZHOU Guoliang

(Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: Heavy rain forecast is very important to urban flood control and drainage system. Based on WRF, the numerical rainfall model of Beijing metropolitan area was established and 13 kinds of micro-physic schemes were tested to simulate the heavy rain in the evening of August 1st, 2007. The results show that, the Kessler scheme performs the best in the simulation of rainfall volume, the WSM5 scheme performs the best in the distribution of rainfall process, and the Milbrandt scheme performs the best in the heavy rain landing area and the maximum hourly rainfall intensity. Taking all the factors into consideration, the Milbrandt scheme and Thompson scheme behave the best. The study could provide a reference for the heavy rain forecast in Beijing.

Key words: numerical rainfall forecast; WRF; micro-physic scheme; Beijing

(上接第 **90** 页)

[20] 肖璁,杜尧,陈柳竹,等.南海北部沉积盆地油田水水化学特征及其成因分析[J]. 水文地质工程地质,2015, 42(2): 16-23. (XIAO Cong, DU Yao, CHEN Liuzhu, et al. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the oilfield water in the north part of the sedimentary basins in the South China Sea [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 16-23. (in Chinese))

[21] 邢立亭,张凤娟,李常锁,等.鲁北平原浅层地下水水化学特征[J]. 灌溉排水学报,2015, 34(6): 90-94. (XING Liting, ZHANG Fengjuan, LI Changsuo, et al. Hydro-chemical characteristics of shallow groundwater in the north Shandong plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 90-94. (in Chinese))

[22] 支兵发,姚普,姜守俊,等.珠江三角洲地下咸水形成的水化学证据[J].水文地质工程地质,2015, 42(4): 133-139. (ZHI Bingfa, YAO Pu, JIANG Shoujun, et al. Hydrochemical evidences of saline groundwater genesis in the Pearl River delta area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 133-139. (in Chinese))

[23] Michael J Lace, John E Mylroie. Coastal Karst Landforms [M]. USA: Coastal Research Library, 2013.

Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in Coral Islands

TANG Jianjian[1,2,3], HU Mingjian[2], WANG Ren[1,2,3]

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2.Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3.Guangxi key Laboratory of South Sea Coral Reef Research, College of Marine, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Coral islands are distributed in the tropical and marine areas of China, and its groundwater is of great significance to the marine environment and plant ecological pattern. In order to reveal the evolution mechanism of groundwater in coral islands, this paper analyzed the overall distribution characteristics of groundwater hydrochemistry and the relationship between main ion components based on the hydrogeological survey of a coral island in Xisha and the collection and analysis of wild water samples by carrying out the main hydrochemical ion field and indoor tests, and it explored the evolution of groundwater. The results indicate that the groundwater hydrochemical types of coral islands are Cl-Na and Cl-Na·Mg, and the dissolution of active carbonate minerals is more likely to occur in the groundwater surface of coral islands. Under the effects of seawater blending, evaporation concentration, aquifer mineral dissolution and sedimentation, the different ion components of groundwater in coral islands would be increased or decreased.

Key words: coral islands; underground water; hydrochemistry; carbonate