张衍达, 王东海, 尹金方, 等. 2016. 粒子下落末速度和粒子谱形参数对降水模拟影响的数值研究 [J]. 大气科学, 40 (4): 841–852. Zhang Yanda, Wang Donghai, Yin Jinfang, et al. 2016. Impacts of terminal velocity and drop size distribution shape on the numerical simulation of precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 841–852, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15193.

粒子下落末速度和粒子谱形参数对降水模拟 影响的数值研究

张衍达1 王东海^{2,1} 尹金方1 许焕斌³

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081 2 中山大学大气科学学院,广州 5102752 3 北京应用气象研究所,北京 100029

摘 要数值模式能否准确地对降水过程进行预报,很大程度上取决于云微物理参数化方案能否准确地对云内的物理过程进行描述。目前显式云微物理参数化方案中对粒子的下落速度、不同直径粒子的浓度分布两方面的微物理特征,分别使用质量加权下落末速度和粒子谱进行描述。因此,参数化方案中不同的描述方式直接影响数值模式对降水过程的模拟结果。本文使用耦合了一种新的体积水法双参数云微物理参数化方案的WRF模式(Weather Research and Forecasting Model)3.5.1版本对发生在2013年5月8日的一次华南强降水过程进行模拟,分别对Ferrier和Locatelli两种质量加权下落末速度计算方法,以及常数参数和根据东亚地区实际观测结果改进的谱形参数两种粒子谱形参数设置的模拟结果进行分析,并对他们的四组参数组合预报结果进行评估。结果表明:(1)质量加权末速度的改变对降水强度有一定影响;(2)粒子谱形参数对模拟降水的强度和发展都有明显的影响,且谱形参数对本次降水模拟的影响强于下落末速度的影响;(3)Ferrier质量加权末速度和改进的谱形参数的组合试验组对降水的预报效果,相对其他三组试验有较明显的优势。

关键词 数值模拟 下落末速度 粒子谱形参数 文章编号 1006-9895(2016)04-0841-12 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15193

中图分类号 P435

文献标识码 A

Impacts of Terminal Velocity and Drop Size Distribution Shape on the Numerical Simulation of Precipitation

ZHANG Yanda¹, WANG Donghai^{2, 1}, YIN Jinfang¹, and XU Huanbin³

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
 Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

3 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

Abstract The accuracy of numerical weather prediction is mainly affected by the description of physical processes in cloud microphysics schemes. In current microphysical parameterizations the fall speed and diameter–concentration distribution of hydrometeors are described using the mass-weighted terminal velocity and drop size distribution shape parameter. Therefore,

收稿日期 2015-05-13; 网络预出版日期 2015-07-22

作者简介 张衍达,男,1991年出生,硕士研究生,主要从事中小尺度数值天气预报和云微物理方面研究。E-mail: zhangyd91@163.com

通讯作者 王东海, E-mail: wangdh@camscma.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91437221,科技部公益性行业(气象)科研专项项目 GYHY201206039、GYHY201006014,国家重点基础研究发展计划(973计划)项目 2012CB417204

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 91437221), Public Welfare Industry Special Item of National Science Technology Department (Grants GYHY201206039, GYHY201006014), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2012CB417204)

the description in different schemes directly influences numerical weather prediction. In this study, the Weather Research and Forecasting (WRF) model (version 3.5.1), coupled with a new bulk two-moment microphysics scheme, was used to simulate a severe precipitation event that occurred in South China on 8 May 2013. Two descriptions of terminal velocity, two descriptions of the size distribution parameter, and four combinations of each, were evaluated and analyzed. The results were as follows: (1) Changes in snowfall terminal velocity had certain impacts on precipitation intensity; (2) Changes in the size distribution shape parameter generated more obvious impacts in terms of both the intensity and development of precipitation; (3) Combining the Ferrier mass-weighted terminal velocity and the improved size distribution shape parameter, using long-term observations in East Asia, showed clear advantages compared with three other sensitivity runs. **Keywords** Numerical simulation, Terminal velocity, Drop size distribution

1 引言

云和其内部的复杂微物理过程在各尺度的气候 和天气过程中起着重要的作用。从宏观角度来看,云 对地气系统的辐射收支有着很大影响效应(Quante, 2004)。此外,云降水过程中产生的潜热是各空间尺 度和时间尺度的天气现象的重要能量来源,并且对大 气环流有着重要的影响(Tao and Simpson, 1993)。从 微观角度来看, 云对天气和气候系统的作用和影响, 都是通过云内降水粒子、气溶胶粒子参与的多种云微 物理过程实现的(Baker, 1997)。云内不同浓度的凝 结核,如气溶胶粒子等,对降水起着重要的促进或抑 制作用 (Baker, 1997; Lim and Hong, 2010), 粒子的 下沉拖曳效应直接影响着云的发展和消散(徐文俊, 1985)。同时,研究表明,各项云微物理过程对降水 过程数值模拟结果也有着重要影响(Jankov et al., 2005; 陶玥和洪延超, 2007; 陶玥等, 2009; Wang et al., 2010; 孙晶等, 2011; 马严枝等, 2012)。

在云微物理参数化方案中,使用方程和函数对 众多复杂的云内物理过程进行了参数化。参数化方 案对物理过程的描述是否合理、准确直接影响了数 值模式对降水过程的预报(尹金方等,2014)。其 中粒子的下落末速度和粒子的直径一浓度分布对 降水过程有着重要的影响。

现阶段,在多数的云微物理参数化方案中,都 使用质量加权末速度来描述云中微物理粒子的下落 速度(Lin et al., 1983; Tao and Simpson, 1993; Ferrier, 1994; Hong et al., 1998; 楼小凤, 2002; Thompson et al., 2004; Morrison et al., 2005; 尹金方, 2013)。现在 数值模式中使用的加权质量下落速度的计算方式主 要有 Locatelli 质量加权末速度(Locatelli and Hobbs, 1974)和Ferrier 质量加权末速度(Ferrier, 1994)两 种计算方法。研究表明,粒子的下落速度的差异对 降水过程和云的发展都有重要的影响。台风过程中 霰粒子下落末速度的增强,会导致霰粒子的垂直和 水平分布的变化,并且会引起热带气旋降水强度增 强(Franklin et al., 2005)。降水粒子质量加权末速 度会对云内垂直水物质通量、降水粒子生长、垂直 水物质分布等多方面的物理过程和模式动力过程造 成影响,从而对地面降水强度和范围造成影响 (Bennetts and Rawlins, 1981)。

数值模式中使用 Γ 函数对粒子的直径—浓度关 系进行描述,在 Γ 函数中使用不同的谱形参数反映 各种云微物理粒子谱分布。根据不同的研究结果, 不同参数化方案中对粒子谱形参数的设置不同(Lin et al., 1983;胡志晋和严采蘩, 1986;许焕斌, 1995; 尹金方, 2013)。研究表明云中不同粒子谱形参数 对降水有复杂的影响(陶玥和洪延超, 2007)。

一系列的观测研究表明,受到高原地形、东亚 季风以及其他因素的影响,东亚地区具有相对独特 的云微物理特征(王东海等,2014;赵艳风等,2014; Yin et al., 2014; Wang et al., 2015)。在此背景下, 为了提高数值模式的预报准确率,需要针对不同的 典型性天气过程进行一系列的数值试验研究,以确 定云微物理参数化方案内部的最优参数组合。

本文使用耦合了基于东亚地区长期观测结果构 建的新云微物理参数化方案(方案尚未正式发布, 暂定名为Wang-Yin方案)(尹金方,2013)的WRF 模式(Advanced Research Weather Research and Forecasting Model),设计敏感性试验,对发生在2013 年5月的一次华南暖区暴雨进行模拟。通过试验结 果,对两组质量加权末速度计算方法和两组粒子谱形 参数对降水的影响进行对比分析。并通过敏感性试 验,确定质量加权末速度计算方法和粒子谱形参数 最优的参数组合。

2 过程简介

本次试验选取发生在 2013 年 5 月 7 日到 8 日

4 期张衍达等: 粒子下落末速度和粒子谱形参数对降水模拟影响的数值研究No. 4ZHANG Yanda et al. Impacts of Terminal Velocity and Drop Size Distribution Shape on the Numerical Simulation ...843

的一次华南前汛期强降水过程。本次降水过程主要 发生 2013 年 5 月 08 日 00 时至 12 时(协调世界时, 下同),受到高原涡、南支槽、西风槽、低空急流 和地面冷锋的综合影响,在我国江淮、华南地区形 成强降水。本次降水在广东、湖南交界处和珠江三 角洲周围形成两个强降水带,降水带中心 12 小时 累计降水强度达到 70 mm 以上,其中在珠海和江门



图 1 2013 年 5 月 08 日 00 时至 12 时主要降水区域(广东、广西、湖 南南部)的累计观测降水

Fig. 1 Observed 12-hour accumulative precipitation (units: mm) (0000– 1200 UTC 8 May 2013) in the main precipitation region (Guangdong, Guangxi, and the South Hunan) 地区达到 140 mm 以上(图 1)。

3 试验设计

本次试验使用耦合了 Wang-Yin 方案的 WRF 模式 3.5.1 版本进行数值试验。该模式为 3D、可压 缩、非静力中尺度数值模式。

本文分别在质量加权末速度计算方法和云微 物理粒子谱形参数设置两个方面设计敏感性试验。 模拟过程中采用 RRTM 方案作为模拟的长波辐射 方案,短波辐射方案采用 Dudhia 方案,近地层方 案采用 MM5 similarity 方案,陆面过程采用 RUC 方案。

试验中模式区域为三重双向嵌套,水平分辨率 分别为 36 km、12 km、4 km,三层水平网格格点数 分别为 259×282,292×313,250×250(图 2)。模 式垂直层数为 57 层,模式气压顶 50 hPa,使用 NCEP FNL 再分析资料(分辨率为 1°×1°)生成模式边界 场。采用 Kain-Fritsch 方案作为积云对流参数化方 案,试验中采用混合法进行模拟,即在 36 km 分辨 率和 12 km 分辨率的 domain1(d01)和 domian2 (d02)中同时使用积云对流参数化和云微物理参 数化方案进行积分,在4 km分辨率的 domain3(d03) 关闭积云对流参数化,只使用显式云微物理参数化



进行积分。

试验从 07 日 18 时开始积分至 08 日 12 时共积 分 18 小时。由于此次过程的降水主要集中在 2013 年 5 月 08 日 00 时至 12 时,所以将前 6 小时作为 积分的启动 (spin up)时间,主要针对这 12 小时的 模式结果进行研究。使用中国全国加密自动观测站 逐小时观测资料,对模式的模拟结果进行检验。此 次试验的具体设置见表 1。

表1 数值试验的具体参数设置

Table 1	Settings of the numerical experiment	
---------	--------------------------------------	--

区域	分辨率(经度×纬度)	积云对流参数化方案
d01	259°×282°	Kain-Fritsch 方案
d02	292°×313°	Kain-Fritsch 方案
d03	$250^\circ \times 250^\circ$	关闭

4 结果

4.1 下落末速度

Wang-Yin 方案中采用质量加权下落末速度的 计算方法,来描述云内水凝物粒子的混合比和数浓 度在下落的过程中发生的变化。质量加权下落末速 度计算公式可表示为

$$V(D_x) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} a D_x^{\ b} \mathrm{e}^{-jD_x}, \qquad (1)$$

其中, $V(D_x)$ 表示粒子直径为 D_x 的下落末速度, ρ 为空气密度, ρ_0 为地面空气密度,a,b为随粒子形状、大小变化的参数,f为随降水粒子种类变化的常数。

本文中使用 Locatelli 质量加权末速度(Locatelli and Hobbs, 1974)和 Ferrier 质量加权末速度(Ferrier, 1994)两种计算方法,对雪晶粒子的下落末速度进行描述(两组试验在下文中以 Locatelli 组和 Ferrier 组代称)。两种计算方法的具体设置在表 2 中给出。

表 2 Locatelli 和 Ferrier 质量加权末速度计算方法的雪晶 谱形参数设置

Table 2Parameters in the 'Locatelli' (Locatelli and Hobbs,1974) and 'Ferrier' (Ferrier, 1994) snowfall terminal velocities

,			
	a	b	f
Locatelli 组	11.720	0.4100	0
Ferrier 组	8.996	0.4200	0

地面空气密度采取 Thompson 的计算方式 (Thompson et al., 2004),即认为地面空气密度为 常数, $\rho_0 = 101325.0/(287.05 \times 298.0) \text{ kg m}^{-3}$ 。

对比图1和图3,可以看出Locatelli组和Ferrier

组都预报出了北部的雨带和广东南部的降水中心, 但是相比观测降水,两组模拟结果的北部雨带的范 围和降水量偏大,南部降水中心的位置比观测降水 中心向南偏移。两组试验整体上都预报出了此次降 水的基本降水形式。两组敏感性试验结果之间存在 一些差异,相比 Locatelli组,Ferrier组的降水在广 东和湖南交界处的虚假强降水带降水强度相对较 弱,同时南部珠江三角洲地区的降水中心面积更 强,更接近观测降水的降水形势。

为了定量的对降水预报效果进行分析评估,文中使用 P_{ETS}、P_{POD}、P_{BIAS}和 P_{FAR} 四种降水评分进行评估。

图 4 给出了 Locatelli 质量加权末速度和 Ferrier 质量加权末速度两组试验结果 12 小时累计降水的 *P*_{ETS}、*P*_{POD}、*P*_{BIAS}和 *P*_{FAR}四项评分,评分可以反映 模式预报的综合效果、预报准确率、误报率等信息。

12 小时累计降水按降水量划分为:中雨量级
(5~14.9 mm)、大雨量级(15~29.9 mm)、暴雨
量级(30~70 mm)和大暴雨量级(70 mm 以上)。

计算降水评分时采用分段式的计算方法。降水 评分的计算公式如下:

$$P_{\rm ETS} = \frac{n_x - R}{n_x + n_z + n_y - R}, \qquad (2)$$

其中,

$$R = \frac{\left(n_x + n_z\right) \times \left(n_x + n_y\right)}{n_x + n_z + n_y} .$$
$$P_{\text{POD}} = \frac{n_x}{n_x + n_z}, \qquad (3)$$

$$P_{\rm BIAS} = \frac{n_x + n_y}{n_x + n_z},\tag{4}$$

$$P_{\text{FAR}} = \frac{n_y}{n_x + n_y},\tag{5}$$

其中, n_x 为预报准确的站点数, n_y 为误报站点数, n_z 为漏报站点数。 P_{ETS} 评分综合地展现出 Ferrier 质量加权末速度在中雨量级(5~14.9 mm)、大雨量级(15~29.9 mm)和大暴雨量级(70 mm 以上)的预报效果优于 Locatelli 质量加权末速度。

同时 P_{POD} 评分反映出, Ferrier 末速度在中雨、 大雨量级上预报准确率相对优于 Locatelli 组。暴雨 和大暴雨量级上 Ferrier 组优势较小,两组结果基本 相同。

PFAR 评分给出了两组试验的误报率评估,从图

中可以看出,在中雨量级 (5~14.9 mm)、大雨量 级 (15~29.9 mm) 和暴雨量级 (3~70 mm 以上), Locatelli 组的误报率相对 Ferrier 组较大。

评分表明,使用 Ferrier 加权下落末速度计算公 式进行模拟得出的试验结果,相比于 Locatelli 计算 方法,在地面降水模拟方面,预报出的虚假的强降 水有一定程度上的减弱。

为了进一步分析两组数值试验对降水的模拟 结果,对本次试验4km分辨率区域内3184个自动 站逐小时降水数据以及站点对应位置上的逐小时 降水模拟结果进行区域平均,得到逐小时降水率结 果。



图 3 (a) Locatelli 组和 (b) Ferrier 组试验在 4 km 分辨率区域的 12 小时 (2013 年 5 月 8 日 00 时至 12 时) 累计降水

Fig. 3 Twelve-hour accumulative precipitation (units: mm) (0000-1200 UTC 8 May 2012) in the (a) 'Locatelli' and (b) 'Ferrier' sensitivity runs at 4-km resolution



图 4 Locatelli 组 (深色柱)和 Ferrier 组 (浅色柱)在 4 km 分辨率区域的 12 小时累计降水 (2013 年 5 月 8 日 00 时至 12 时)的 (a) P_{ETS}、(b) P_{POD}、 (c) P_{BIAS}和 (d) P_{FAR} 评分

Fig. 4 The (a) P_{ETS} , (b) P_{POD} , (c) P_{BIAS} , and (d) P_{FAR} scores of the 12-hour (0000–1200 UTC 8 May 2013) accumulative rainfall simulated in the model domain at 4-km resolution in the 'Locatelli' (dark bars) and 'Ferrier' (light bars) sensitivity runs

图 5 中可以看出,两组试验结果的逐小时降水 率在 00 时到 06 时呈现增强的趋势,在 06 时到 12 时减弱,变化趋势和观测基本一致。在降水增强阶 段的 6 小时里,模拟降水的降水率比观测降水率大 约强 0.5 mm h⁻¹。在 04 时到 09 时时间范围内,Ferrier 组的降水率模拟结果相对 Locatelli 组稍弱,降水强 度大约低 0.2~0.5 mm h⁻¹。

图 6 中给出了 2013 年 5 月 08 日 00、03、06、

09、12 时五个时刻, Locatelli 和 Ferrier 两组试验在 4 km 分辨率区域 (20°~26°N, 108°~117°E)区域 平均的雪晶和雨滴混合比垂直廓线。

从图中看出, Ferrier 组在对流层中层(600 hPa) 左右高度上的雪晶粒子含量高于 Locatelli 试验;对 应的在对流层中下层 Ferrier 组试验模拟出的雨滴 混合比低于 Locatelli 组试验的模拟结果。

从以上试验结果中可以看出,在本次过程中,







图 6 Ferrier 组(红色线)和 Locatelli组(蓝色线)在 2013 年 5 月 8 日 00、03、06、09 和 12 时五个时刻在 4 km 分辨率区域(20°~26°N, 108°~ 117°E)区域平均的雨滴和雪晶混合比垂直廓线

Fig. 6 Vertical profiles of the regionally mean rain and snow mixing ratios in the model domain (20°–26°N, 108°–117°E) at 4-km resolution, at 0000 UTC, 0300 UTC, 0600 UTC, 0900 UTC, and 1200 UTC on 8 May 2013, in the 'Ferrier' (red lines) and 'Locatelli' (blue lines) sensitivity runs

4 期 No. 4

对于地面降水的预报,Ferrier 质量加权末速度计算 方法相对优于 Locatelli 计算方法,模拟的降水量偏 大的情况相对后者有一定的改善,地面降水形势更 接近观测降水场。

观测和研究表明,冰相粒子本身具有复杂的形状。除了雹粒子以外,雪晶等冰相粒子具有疏松多 孔的结构特点,导致同质量的冰相粒子的体积大于 质量加权计算时考虑的理论值。

因此在使用质量加权末速度对粒子下落末速 度进行计算时,需要对除了雹粒子以外的冰相粒子 的下落末速度进行订正。Ferrier 方法中雪晶下落末 速度相对 Locatelli 方法中进行了修正,这可能是导 致 Ferrier 组中虚假降水较小的原因。

Ferrier 计算方法中雪晶的质量加权末速度小于 Locatelli 计算方法(表 2),对雪晶下落末速度进行 了订正。结合图 5、6显示的试验结果可以看出, 由于雪晶粒子下落末速度较小,引起 Ferrier 组中雪 晶粒子的垂直方向上质量通量较小,更多的雪晶粒 子停留在空中,使 Ferrier 组中预报出的区域平局雪 晶粒子混合比高于 Locatelli 组的模拟结果。垂直下 落末速度的改变通过影响粒子垂直质量通量,引起 粒子垂直分布的不同,进而导致地面降水的模拟结 果出现差异(许焕斌和段英, 1999)。

4.2 粒子谱形参数

研究表明, 广义 Γ 函数可以用于对云滴、雨滴、 冰晶、雪晶、雹粒子和霰粒子 6 种云微物理粒子谱 的分布进行描述。广义的 Γ 函数表示如下:

$$N_{x}(D_{x}) = N_{Tx} \frac{V_{x}}{\Gamma(1+\alpha_{x})} \lambda_{x}^{\nu_{x}(1+\alpha_{x})} D_{x}^{\nu_{x}(1+\alpha_{x})-1} \cdot \exp\left[-(\lambda_{x}D_{x})^{\nu_{x}}\right] V_{x}\alpha_{x}(1+\alpha_{x}), \qquad (6)$$

其中, $N_x(D_x)$ 表示粒子直径在 $D_x + \delta D_x$ 范围内的粒子数, N_{Tx} 为粒子总浓度, λ_x 为 Γ 函数斜率, ν_x 和 α_x 为粒子谱形参数, x代表粒子种类。

在数值模式的云微物理参数化方案中,一般会 对广义方程进行简化,简化的Γ函数表示为

 $N_{x}(D_{x}) = N_{0}D_{x}^{a_{x}} \exp\left[-\left(\lambda_{x}D_{x}\right)\right], \qquad (7)$

其中,

$$N_0 = \frac{N_{Tx} \lambda_x^{(1+\alpha_x)}}{\Gamma(1+\alpha_x)}.$$

Wang-Yin 方案中共有云滴、雨滴、冰晶粒子、 雪晶粒子、霰粒子和雹粒子6种可预报的云微物理 粒子,其中冰晶粒子谱形参数采用常数 1, 霰和雹的谱形参数取为 0。

在云滴谱、雨滴谱和雪晶谱的选择上 Wang-Yin 方案保留了两组选项,这两组分别为常数参数组 (Milbrandt and Yau, 2005,以下简称 Constant 组) 和根据东亚区域云微物理观测特征做出了调整的 改进组(尹金方, 2013,以下简称 Yin 组)。具体 的谱形参数设置如表 3 所示。

表 3 Yin 组和 Constant 组中的具体粒子谱形参数设置 Table 3 Settings of the drop size distribution shape parameter in the 'Yin' and 'Constant' sensitivity runs

		Constant 组粒
	Yin 组粒子谱形参数设置	子谱形参数设置
云滴(a _c)	$\min\left(12,\frac{10^9}{N_c}+2\right)$	3.0
雨滴(<i>a</i> _r)	$-0.08435\lambda_{\rm r}^2 + 1.468\lambda_{\rm r} - 2.443, \ 0 \le \alpha_{\rm r} \le 6$	0
雪晶(α_s)	$-0.00499\lambda_{s}^{2} + 0.798\lambda_{s} - 0.666, \ 0 \le \alpha_{s} \le 4$	0

本文使用 Wang-Yin 方案中的这两种谱形参数,设置敏感性试验,对此次华南强降水过程进行 模拟,结果如下:

图 7 给出了两组试验对于地面降水的模拟结 果,对比图 1 可以看出,Yin 组的预报效果相对 Constant 组有较明显的改进。Yin 组预报出了北部 雨带和南部降水中心的地面降水形势,同时相比 Constant 组,其北部的雨带的降水强度较弱、雨带 范围也较小。Constant 组在约(23°N,113°E)处预 报出的一个12小时累计降水强度超过140 mm的虚 假降水中心,在Yin 组结果中该虚假降水中心完全 消失,在(22°N,111°E)处的虚假降水中心也明 显减弱。同时,Yin 组试验再现出的珠江三角洲地 区的降水中心降水强度偏弱,小于实际降水和 Constant 组的降水强度。

可以看出 Yin 组的预报结果有效地减少了过强的虚假降水,地面降水的预报结果更加接近观测降水的地面降水分布形势。但是由于降水减弱,Yin 组对于强降水中心的预报效果略逊于 Constant 组。

为了进一步分析两组数值试验对降水的模拟 结果,对4km分辨率区域内3184个自动站逐小时 降水数据以及站点对应位置上的逐小时降水模拟 结果进行区域平均,得到逐小时降水率结果。图 8 中,通过对比模拟和观测降水可以看出:

(1) 在 00 时到 06 时的降水增强阶段,两组试验结果在这一阶段的降水率都呈现增强的趋势,



图 7 (a) Yin 组和(b) Constant 组在 4 km 分辨率区域的 12 小时(2013 年 5 月 8 日 00 时至 12 时)累计降水

Fig. 7 Twelve-hour (0000–1200 UTC 8 May 2012) accumulative precipitation (units: mm) in the (a) 'Yin' and (b) 'Constant' sensitivity runs at 4-km resolution



图 8 2013 年 5 月 8 日 00 时至 12 时,观测降水(灰色柱)、Yin 组、Constant 组试验在 4 km 分辨率区域的逐小时降水率

Fig. 8 Observed hourly rain rate (grey bars), and that simulated in the 'Yin' and 'Constant' runs during the 12 hours of the rainfall process (0000–1200 UTC 8 May 2013) in the model domain at 4-km resolution

Yin 组试验结果在 02 时到 06 时这一阶段强于 Constant 组的降水率结果。

(2) Yin 组试验结果中,降水率强度约在 07 时达到最强,在 05 时到 08 时为一个稳定的强降水阶段,降水率强度维持在 2.5 mm h⁻¹上下。Constant 组试验结果中降水率强度在 08 时达到最强。

(3)Yin 组试验在07时之后出现的明显的减弱, 模拟的降水率和观测降水率基本一致,而 Constant 组的试验结果则由于降水峰值出现较晚,在观测降 水的衰弱阶段出现了先增强后减弱的强度变化,且 在 07 时至 12 时这一阶段,降水率强于 Yin 组预报 降水率强度和观测降水率强度。

从以上分析可以大致看出,对于降水的时间— 强度分布的模拟预报方面,使用了基于东亚地区长 期观测的谱形参数的 Yin 组试验的预报效果要优于 Constant 组。Yin 组试验预报出的降水的发展形势 与观测降水更为接近,Constant 组的预报结果中, 整个过程降水的发展相位出现了错后的现象。

为了定量的对预报效果进行分析,此处同样对 两组试验结果的 12 小时累计降水在中雨(5~15 mm)、大雨(15~30 mm)、暴雨(30~70 mm)和 大暴雨(>70 mm)四个降水量级上,分别计算各 降水强度的分段 P_{ETS}、P_{POD}、P_{BIAS}和 P_{FAR}评分。

从 P_{ETS} 评分(图 9)可以看出,Yin 组预报结 果在中雨(5~15 mm)、大雨(15~30 mm)和暴 雨(30~70 mm)量级的评分相对 Constant 组都有 一定的优势。由于 Yin 试验组的模拟降水小于 Constant 组,在 70 mm 以上量级常数组的 P_{ETS} 综合 评分相对于 Constant 组有很大的优势。这种优势可 能是由于 Constant 组预报出的 70 mm 以上的降水区 域面积大于 Yin 组,覆盖了降水强度大于 70 mm 的 观测降水区域所导致。

*P*_{POD} 评分也显示了 Yin 组在中雨(5~15 mm)、 大雨(15~30 mm)和暴雨(30~70 mm)量级上的预报准性都优于 Constant 组试验。但是由于降水 量相对常数组偏小,导致了 Yin 组在 70 mm 以上量 级的预报准确率低于 Constant 组。通过 *P*_{FAR} 和 *P*_{BIAS}



图 9 Yin 组 (深色柱)和 Constant 组 (浅色柱)在 4 km 分辨率区域的 12 h (2013 年 5 月 8 日 00 时至 12 时)累计降水的 (a) P_{ETS}、(b) P_{POD}、(c) P_{BIAS}和 (d) P_{FAR} 评分

Fig. 9 The (a) P_{ETS} , (b) P_{POD} , (c) P_{BIAS} , and (d) P_{FAR} scores of the 12-hour (0000–1200 UTC 8 May 2013) accumulative rainfall simulated in the model domain at 4-km resolution in the 'Yin' (dark bars) and 'Constant' (light bars) sensitivity runs

评分可以看出,相对于 Constant 组,除了在小雨量级, Yin 组的试验结果在各个量级上的误报率都有一定的改善。

为了进一步研究粒子谱形参数改变对降水过 程造成的影响,对试验结果中的雨滴和云降水粒子 时间—空间分布特征进行分析。

图 10 中给出了两组数值试验分别在 2013 年 5 月 8 日 00 时、03 时、06 时、09 时和 12 时四个时 刻在 4 km 分辨率区域(20°~26°N, 108°~117°E) 区域平均的雨滴和云滴混合比垂直廓线。

从图 10 中可以看出粒子谱形参数的差异,对 雨滴和云滴的浓度的预报有明显的影响。Constant 组试验模拟出的大降水粒子(雨滴)在对流层中下 层的浓度小于 Yin 组的预报结果,同时小粒子(云 滴)的浓度大于 Yin 组的模拟结果。这一结果可能 导致 Constant 试验组中的降水粒子生长发展相对于 Yin 试验组中的降水粒子更为缓慢,使 Constant 组 的降水发展的相对 Yin 组缓慢,体现为降水的时间

相位整体落后(图8)。

4.3 综合试验

为了进一步针对此次华南强降水过程确定最 优的参数组合,本文设计四组敏感性试验,分别使 用两种加权下落末速度计算方法和两种粒子谱形 参数选项。对这四组参数组合的预报效果使用 P_{ETS} 评分和 Taylor 图进行定量的评估。

从 12 小时降水 *P*_{ETS} 评分(表 4)可以看出, 使用了 Ferrier 质量加权末速度和 Yin 谱形参数的试 验组(Ferrier–Yin 组)对降水的预报相对其他几组 试验(Ferrier–Constant 组、Locatelli–Yin 组、Locatelli –Constant 组)有较明显优势。

从表 4 中可以看出, Ferrier-Yin 组预报的 12 小时累计降水的 *P*_{ETS} 评分在中雨量级(5~15 mm)、 大雨量级 (15~30 mm) 和暴雨量级 (30~70 mm) 三个量级上都优于其余三组参数组合方式。 Ferrier-Yin 在小雨量级 (0~5 mm) 和大暴雨量级 (79~140 mm) 上的预报 *P*_{ETS} 分别低于



图 10 Yin 组(深蓝色线)和 Constant 组(浅蓝的线)在 2013 年 5 月 8 日 00 时、03 时、06 时、09 时和 12 时五个时刻在 4 km 分辨率区域(20°~26°N, 108°~117°E)区域平均的雨滴和云滴混合比垂直廓线

Fig. 10 Vertical profiles of the regionally mean rain and cloud mixing ratios in the model domain (20°–26°N, 108°–117°E) at 4-km resolution, at 0000 UTC, 0300 UTC, 0600 UTC, 0900 UTC, and 1200 UTC on 8 May 2013, in the 'Yin' (dark blue lines) and 'Constant' (light blue lines) sensitivity runs

Ferrier-Constant 组和 Locatelli-Constant 组。总体上 Ferrier-Yin 对此次降水过程的预报效果优于其他三 组参数组合方式。

表 4 分别使用两种质量加权末速度(Ferrier 和 Locatelli) 和两种粒子谱形参数(Yin 和 Constant)的四组敏感性试验 在 d03 区域的 12 小时 P_{ETS} 降水评分

Table 4 $P_{\rm ETS}$ scores of the 12-hour simulated accumulative precipitation in domain 03 using the four combinations of the two fall terminal velocities ('Ferrier' and 'Locatelli') and the two size distribution shape parameters ('Yin' and 'Constant')

	各降水量级上的评分				
敏感性试验	0~5	5~15	15~30	$30{\sim}70$	> 70
Ferrier-Yin 组	0.5211	0.2035	0.1893	0.2638	0.0995
Ferrier-Constant 组	0.5911	0.1928	0.1481	0.2110	0.2513
Locatelli-Yin 组	0.5153	0.1888	0.1811	0.2782	0.0890
Locatelli-Constant 组	0.5717	0.1941	0.1420	0.1559	0.2618
注, 四组试验在每个隆7	水量级 ()	単位・mn	1) 上的最	高评分使	用黑体标

出。

Taylor 图可以同时反映预报结果和观测场之间 的相关性和协方差等统计特征,能够综合对模拟效 果进行反映。从图 11 中可以看出对此次降水过程 的模拟预报,Taylor 图中 Ferrier-Yin 组的点距离 REF 点最近,与观测结果之间的相关性超过 0.2,



图 11 四组敏感性试验 12 小时累计降水的 Taylor 图 Fig. 11 Taylor Diagram of the 12-hour accumulative precipitation simulated in the four sensitivity runs

并且预报场和观测场之间的误差也最小(接近1.0), 与 PETS 评分得出的分析结果吻合。

同时由图 11 可以看出,Ferrier-Yin 组和 Locatelli-Yin 组试验的预报结果相近,Ferrieronstant组和Locatelli-Constant组试验的预报效果基 本相同。也可以看出,在粒子谱形参数和质量加权 末速度两种参数方式中,谱形参数的改变对降水结 果的影响更明显,根据云滴、雨滴(尹金方,2013) 和雪晶(Brandes et al., 2007)粒子的拟合关系进行 过调整的谱形参数相对于之前的常数参数的设定, 在地面降水的预报方面具有明显的优势。

5 结论

为了研究云微物理参数化方案中粒子下落末 速度和降水粒子谱形参数两方面的云微物理过程 对降水模拟的影响,本文设计敏感性试验,对发生 在 2013 年 5 月 8 日的一次华南强降水过程进行模 拟。试验主要得到以下结论:

(1)在假设地面空气密度为常量($\rho_0 = 101325.0$ / 287.05×298.0 kg m⁻³)的基础上,Ferrier 质量加权 末速度计算方法相对优于 Locatelli 计算方法,模拟 的降水量偏大的情况相对后者有一定的改善,地面 降水形势更接近观测降水场。两组试验的降水时间 分布规律基本一致,表明了质量加权末速度对于降 水生命过程的发展影响较小。Ferrier 组数值试验结 果在流层中层的雪晶浓度高于 Locatelli 组的雪晶预 报结果,同时预报出的对流层中下层的雨滴浓度小 于 Locatelli 试验的模拟结果,不同的质量加权下落 末速度计算方法通过影响雪晶粒子的质量通量和垂 直分布以及粒子间转化,对地面降水结果造成影响。

(2) 对云滴、雨滴和雪晶谱形参数分别采用根 据东亚长期观测统计结果的改进选项和常数选项 进行模拟,并对两组模拟结果进行对比分析。发现, 在 Yin 组的模拟结果中,虚假强降水的范围和强度 都明显小于 Constant 组,而且在降水时间分布方面 更接近观测降水结果。同时,从降水评分方面可以 综合看出,使用改进的谱形参数的试验组在中雨、 大雨和暴雨量级上,都对降水量偏大的现象有一定 修正效果。

(3) 在对本次降水过程的模拟中,质量加权下 落末速度选用 Ferrier 计算方法,粒子谱形参数的设 置采取 Yin 基于东亚区域长期观测的粒子谱拟合结 果的改进设置,为最优的参数选项组合。通过试验, 发现在此次华南强降水的模拟过程中,粒子谱形参 数对降水结果造成的影响大于质量加权末速度对 降水结果的影响。

以上结论只是针对此次华南强降水个例进行 模拟得出的初步结论,为了确定敏感性试验结果是 否具有普适性,下一步还需要选取不同地区、不同 类型的降水个例,进一步开展批量的模拟试验。

参考文献 (References)

- Baker M B. 1997. Cloud microphysics and climate [J]. Science, 276 (5315): 1072–1078, doi:10.1126/science.276.5315.1072.
- Bennetts D A, Rawlins F. 1981. Parametrization of the ice-phase in a model of mid-latitude cumulonimbus convection and its influence on the simulation of cloud development [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 107 (453): 477–502, doi:10.1002/qj.49710745302.
- Brandes E A, Ikeda K, Zhang G, et al. 2007. A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 46 (5): 634–650, doi:10.1175/JAM2489.1.
- Franklin C N, Holland G J, May P T. 2005. Sensitivity of tropical cyclone rainbands to ice-phase microphysics [J]. Mon. Wea. Rev., 133 (8): 2473–2493, doi:10.1175/MWR2989.1.
- Ferrier S B. 1994. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description [J]. J. Atmos. Sci., 51 (2): 249–280, doi:10.1175/1520-0469(1994)051<0249:ADMMPF>2.0.CO;2.
- 胡志晋, 严采蘩. 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一)——微物理 模式 [J]. 气象科学研究院院刊, 1 (1): 37-52. Hu Zhijin, Yan Caifan. 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I)—Microphysical model [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 1 (1): 37-52.
- Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q Y. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model [J]. Mon. Wea. Rev., 126 (10): 2621–2639, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2621:IOPCSF>2.0.CO;2.
- Jankov I, Gallus Jr W A, Segal M, et al. 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall [J]. Wea. Forecasting, 20 (6): 1048–1060, doi:10.1175/WAF888.1.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. Mon. Wea. Rev., 138 (5): 1587–1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22 (6): 1065–1092, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2.
- Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles [J]. J. Geophys. Res., 79 (15): 2185–2197, doi:10. 1029/JC079i015p02185.
- 楼小凤. 2002. MM5 模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理 方案的对比分析 [D]. 北京大学博士学位论文,127pp. Lou Xiaofeng. 2002. Development and implementation of a new explicit microphysical scheme and comparisons of original schemes of MM5 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University, 127pp.
- 马严枝, 陆昌根, 高守亭. 2012. 8.19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比 试验 [J]. 大气科学, 36 (4): 835–850. Ma Yanzhi, Lu Changgen, Gao Shouting. 2012. 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 (in Chinese), 36 (4): 835–850, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159.

- Milbrandt J A, Yau M K. 2005. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter [J]. J. Atmos. Sci., 62 (9): 3051–3064, doi:10.1175/JAS3534.1.
- Morrison H, Curry J A, Khvorostyanov V I. 2005. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description [J]. J. Atmos. Sci., 62 (6): 1665–1677, doi:10.1175/JAS3446.1.
- Quante M. 2004. The role of clouds in the climate system [J]. J. Phys. IV France, 121: 61–86, doi:10.1051/jp4:2004121003.
- 孙晶, 楼小风, 史月琴. 2011. 不同微物理方案对一次梅雨锋暴雨过程 模 拟的影响 [J]. 气象学报, 69 (5): 799–809. Sun jing, Lou Xiaofeng, Shi Yueqin. 2011. The effects of different microphysical schemes on the simulation of a meiyu front heavy rainfall [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (5): 799–809, doi:10.11676/qxxb2011.070.
- Tao W K, Simpson J. 1993. The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description [J]. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 4(1): 35–72.
- 陶玥, 洪延超. 2007. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值 研究 [J]. 气象学报, 65 (2): 221–230. Tao yue, Hong Yanchao. 2007. Numerical simulation of influence of drop size distribution shape on cloud and precipitation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (2): 221–230, doi:10.11676/qxxb2007.021.
- 陶玥, 齐彦斌, 洪延超. 2009. 霰粒子下落速度对云系及降水发展影响 的数值研究 [J]. 气象学报, 67 (3): 370–381. Tao yue, Qi Yanbin, Hong Yanchao. 2009. Numerical simulations of the influence of the graupel fall terminal velocity on cloud system and precipitation development [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67 (3): 370–381, doi:10.11676/qxxb2009.036.
- Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (2): 519–542, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2.
- 王东海,尹金方,翟国庆. 2014: 1960 年以来东亚季风区云—降水微物 理的直接观测研究. 气象学报, 72 (4): 639-657. Wang Donghai, Yin Jinfang, Zhai Guoqing. 2014. In-situ measurements of cloudpercipitation microphysics in East Asian monsoon region since 1960 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72 (4): 639-657, doi:10.11676/ qxxb2014.056
- Wang D H, Li X F, Tao W K. 2010. Torrential rainfall responses to radiative and microphysical processes of ice clouds during a landfall of severe

tropical storm Bilis (2006) [J]. Meteor. Atmos. Phys., 109 (3): 107–114, doi:10.1007/s00703-010-0097-5.

- Wang Donghai, Yin Jinfang, Zhai Guoqing. 2015. In-situ measurements of cloud–precipitation microphysics in the East Asian monsoon region since 1960. [J]. Meteor. Res. 29, 155–179, doi:10.1007/s13351-015-3235-7
- 徐文俊. 1985. 论水平旋转气流在超级单体风暴中的动力作用 [J]. 气象 学报, 43 (1): 106–111. Xu Wenjun. 1985. Study on the dynamic effect of the horizontal rotary flow on the supercell storm [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 43 (1): 106–111, doi:10.11676/qxxb1985.013
- 许焕斌. 1995. 云系模式研究: 云场的宏微观结构模拟 [J]. 气象学报, 53 (3): 349–357. Xu Huanbin. 1995. A study of cloud-system model: Macro and micro structure simulation of cloud field [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 53 (3): 349–357, doi:10.11676/qxxb1995.040.
- 许焕斌, 段英. 1999. 云粒子谱演化研究中的一些问题 [J]. 气象学报, 57 (4): 450–460. Xu Huanbin, Duan Ying. 1999. Some questions in studying the evolution of size-distribution spectrum of hydrometeor particles [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 57 (4): 450–460, doi:10.11676/qxxb1999.042.
- 尹金方. 2013. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构 建 [D]. 浙江大学博士学位论文, 178pp. Yin jinfang. 2013. The study on observation and prarmeterization of cloud-precipitation microphysical properties over East Asia [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Zhejiang University, 178pp.
- 尹金方, 王东海, 翟国庆. 2014. 区域中尺度模式云微物理参数化方案 特征及其在中国的适用性 [J]. 地球科学进展, 29 (2): 238–248. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing. 2014. A study of characteristics of the cloud microphysical parameterization schemes in mesoscale models and its applicability to China [J]. Advances in Earth Science, 29 (2): 238–248.
- Yin J F, Wang D H, Zhai G Q, et al. 2014. An investigation into the relationship between liquid water content and cloud number concentration in the stratiform clouds over North China [J]. Atmos. Res., 139 (2014), 137–143, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.004.
- 赵艳风, 王东海, 尹金方. 2014. 基于 CloudSat 资料的青藏高原地区云 微物理特征分析 [J]. 热带气象学报, 2, 239-248. Zhao Yanfeng, Wang Donghai, Yin Jinfang, 2014. A study on cloud microphysical characteristics over the Tibetan Plateau using CloudSat data [J]. Journal of Tropical Meteorology. 2, 239-248, doi:10.3969/j.issn.1004-4965. 2014.02.005