

23 Quantitative Analysis of Parameterized Uncertainty of

通讯作者 王东海, E-mail:wangdh7@mail.sysu.edu.cn

收稿日期 2023-12-21; 网络预出版日期

作者简介周金炫,女,1999年出生,硕士研究生,主要从事云降水物理和数值模拟研究。E-mail: zhoujx53@mail2.sysu.edu.cn

资助项目 广东省基础与应用基础研究重大项目 2020B0301030004,国家重点研发计划资助 2019YFC1510400,佛山市社会领域科技攻关专项项目资助 2120001008761,澳门特别行政区科技发展基金 项目资助 001/2022/NIF

Funded by Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research (Grant 2020B0301030004), National Key R&D Program of China (Grant 2019YFC1510400), Foshan Special Project on Science and Technology in Social Field (Grant 2120001008761), The Science and Technology Development Fund, Macau SAR (Grant 001/2022/NIF)

24	Physical Processes in Rainstorm Simulation over South
25	China
26	ZHOUJinxuan ^{1,2} , WANGDonghai ^{1,2,3} , ZHANGChunyan ⁴ , CHENYihao ^{1,2}
27	1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangdong Province Key Laboratory
28	for Climate Change and Natural Disaster Studies, Key Laboratory of Tropical Atmosphere-Ocean
29	System, Ministry of Education, Zhuhai, Guangdong 519082
30	2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082
31	3 Affiliation National Observation and Research Station of Coastal Ecological Environments in
32	Macao; Macao Environmental Research Institute, Faculty of Innovation Engineering, Macau
33	University of Science and Technology, Macao SAR 999078, China
34	4 Guangdong Meteorological Data Center, Guangzhou 510610
35	JAN SA
36	Abstract More and more attention has been paid to the influence of the uncertainty of the physical
37	processes on the prediction accuracy. This paper utilizes the WRF (v4.4) model, taking a rainstorm
38	in South China from May 21 to 22, 2020 as an example, to quantify the uncertainty among
39	microphysics process, boundary layer process and cumulus convection process which are closely
40	related to precipitation, and to compare the discrepancy among different parameterization schemes
41	in the same physical process, using multivariate analysis of variance method and Tukey's test.
42	Furthermore, the influence of the differences of microphysics schemes on the precipitation
43	simulation error was analyzed. The results show that the microphysics scheme is the most
44	important for precipitation simulation and model prediction, and the interactions between different
45	physical processes cannot be ignored. On this basis, the optimal parameterization scheme
46	combination, determined through Taylor skill score, is selected as WSM7 scheme for
47	microphysics process + YSU scheme for boundary layer process + GF scheme for cumulus
48	convection process. From the perspective of hydrometeors and microphysics conversion processes
49	in different microphysics schemes, hail plays an important role in the simulation of the extreme
50	precipitation. The change of rainwater mixing ratio is mainly due to the melting term of ice
51	particles. The evaporation of rain affects the intensity of cold pool through latent heat absorption,

24

52 and then affects the subsequent precipitation propagation, finally affects the distribution of heavy

53 precipitation.

54 Keywords Heavy precipitation in South China, Numerical simulation,

55 Parameterization scheme, Uncertainty quantification, Source and sink terms

56 1. 引言

华南地区前汛期期间,西太平洋副高北移,夏季偏南季风将热带洋面上大量暖湿空气输 57 送到华南地区,在西风带冷空气的共同作用下,形成了一个季节性雨带(陶诗言等,1980; 58 赵玉春和王叶红,2009)。华南前汛期具有一定地域性特征,其降水区通常出现在锋前暖区, 59 而不是出现在锋前或锋后(何立富, 2016)。几次外场加密观测科学试验表明(Kuo and Chen, 60 1990; 薛纪善, 1999; 周秀骥, 2003), 华南暴雨具有明显的暖区强降雨特征, 常常与强对 61 流活动相联系,突发性强,短时雨强大,容易引起洪涝灾害,对华南地区的经济发展以及人 62 63 民安全造成威胁。现阶段对暖区暴雨物理机制的研究还不够深入,且由于其独特的中尺度对 流特征以及华南地区的复杂地形,暖区暴雨的预报一直是天气预报业务中的难点问题(吴乃 64 庚等,2020)。 65

66 区域中尺度天气模式 Weather Research and Forecasting Model (WRF)已成为研究及预
67 测复杂天气的重要工具,然而与观测数据相比,WRF模式对于降水的模拟仍存在误差。数
68 值模式中的初始以及边界条件误差、物理过程以及参数化方案中的参数规范是数值模式的误
69 差主要来源(Allen et al.,2000; Smith et al.,2001; Danforth et al.,2007; Di et al.,2017)。1963 年,
70 Lorenz发现大气具有混沌特征,初始状态的微小差异会使得预报结果产生显著差异

71 (Lorenz,1963)。为了减小初始及边界条件下的误差,人们发展了数值同化技术,通过利
72 用观测中的信息来严格限制模式,以降低模式初始场与观测之间的差异,并使得模式的初始
73 场获得更多观测信息,以提高预测精度。

74 数值模式基于动力框架通过对小尺度的、微尺度的过程,如辐射、积云对流、湍流等物
75 理过程参数化来描述不同尺度的天气过程(马雷鸣和鲍旭炜,2017),WRF模式中物理过
76 程的参数化包括云微物理参数化、积云对流参数化、边界层参数化、长短波辐射参数化、陆
77 面参数化等。不同的参数化方案在模拟过程中起着不同的作用,且每一种物理过程参数化有
78 着不同的选择,不同方案的组合对模拟结果有着重要的影响。同一物理过程中不同参数化方
79 案的选择对模拟结果的影响已经被广泛研究,例如,Evans等(2012)研究了 36 种物理方
80 案组合在模拟美国东海岸低气压的 4 个降雨事件上的表现,发现 MYJ 行星边界层方案和

BMJ 积云对流方案的组合可以显著改善暴雨的模拟; 王洪等(2014)将云微物理方案分为 81 82 单参和双参两组,评估两组方案对华南暴雨的模拟效果,结果显示不同双参方案之间的模拟 效果差异较大,需要合理地选择双参方案才有助于提高模式的降水预报能力;Tian等(2021) 83 针对中国东南沿海的台风暴雨事件设计了36种参数化方案组合,发现WSM6云微物理方案、 84 RRTMG 长短波辐射方案和 KF 积云对流方案整体上优于其他方案;而 Liu 等(2021)发现 85 WSM6 云微物理方案、MYJ 行星边界层方案以及 Grell-Freitas 积云对流方案的组合是埃及极 86 端降水事件模拟的最优模式配置。这些研究说明,物理参数化方案在不同的研究区域的作用 87 存在差异,一个区域的最优参数化组合并不适用于其他区域,优化模拟结果需要选择适当的 88 参数化方案。 89

针对不同模式输出变量,起主要作用的参数化方案不同。Wang 等(2021)对比WRF 90 模式中与亚马逊地区陆地-大气相互作用相关的物理参数化方案的相对重要性,得出积云对 91 92 流方案对土壤湿度、比湿、地表潜热等最为重要,边界层方案则主导了边界层高度的变化, 2m 气温主要受到陆面方案的影响,而且云微物理方案与积云对流方案的相互作用对降水以 93 及土壤水分有着显著影响。对于关注的研究对象,找出起主要作用的参数化方案,有助于之 94 后针对性地进行模式改进以提高模式预测精度。除参数化方案本身对结果的影响之外,不同 95 96 物理过程之间还存在相互作用。以降水事件的模拟为例,行星边界层方案的选择会影响对流 层下部的温度和湿度分布,进而与积云对流方案相互作用,影响降水的模拟(Jankov et 97 al.,2005),云微物理方案中水成物相态的相互转换,会影响潜热的吸收和释放,与对流方 98 99 案相互作用影响对流的发生发展(马雷鸣和鲍旭炜, 2017)。

100 尽管已经有许多相关研究来评估不同的参数化方案的性能,但通常选用的是少量的方案 101 组合,较少关注不同参数化方案表征的不同物理过程之间的相互作用对模拟结果的影响。因 此,本文结合多因素方差分析以及 Tukey's 检验(Tukey, 1949)来量化与物理过程参数化相 102 关的模式不确定性,并挑选出最优参数化方案组合。以 2020 年 5 月 22 日发生在华南地区的 103 104 一次暖区暴雨为例,对与降水模拟密切相关的云微物理过程(MP)、边界层过程(PBL) 以及积云对流过程(CU)的不确定性及两两相互作用进行量化,定量对比不同物理过程参 105 数化方案对降水模拟的重要性,利用 Tukey's 检验对比同一物理过程中不同参数化方案之间 106 的差异,根据检验结果得出最优参数化方案组合。最后从水成物的比含水量分布及其源汇项 107 出发,研究云微物理方案影响降水模拟结果的物理机制。 108

109 2. 数据和方法

110 2.1. 数据简介

111 文中使用的数据资料包括: (1)欧洲中期天气预报中心(European Centre For Medium
112 Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的水平分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 1 h 的
113 全球再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA5),作为WRF模式的初值条件和侧边界条
114 件,并将其用于天气形势分析。(2)来自国家气象信息中心的逐小时降水观测数据集,针
115 对本文研究强降水个例选取时间范围为 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时(北京时),
116 空间范围为 112.2°E~114.8°E, 22.5°N~24.5°N,共包含 3064 个区域自动站的降水资料。主要
117 用于展示降水实况和评估模拟结果。

118 2.2. Cressman 插值

119 Cressman 插值方法是一种逐步订正的空间插值方法,其基本原理是在空间上确定观测
120 点的邻域范围,给定初始猜测场,根据邻域内的观测点与待插值点的距离对应的权重,逐步
121 订正初始猜测场,直到订正场逼近实际观测场为止(Cressman, 1959)。具体公式如下:

$$y' = y_0 + \Delta y_{ij} \#(1)$$

122 其中:

$$\Delta y_{ij} = \left[\sum_{n=1}^{N} \left(F_{ijn}^2 \Delta y_n\right)\right] \left| \left(\sum_{n=1}^{N} F_{ijn}\right) \#(2)\right|$$

123 其中 F_{ijn} 是权重函数,计算公式如下:

$$F_{ijn} = \begin{cases} \left(L^2 - d_{ijn}^2\right) / \left(L^2 + d_{ijn}^2\right), \ \left(d_{ijn} < L\right) \# \# \\ 0, \ \left(d_{ijn} \ge L\right) & \# (3) \end{cases}$$

124 式中, *y* 为任意气象要素值, *y*'是变量 *y* 在待插值点(i,j)上的订正值, *y*₀ 是变量 *y* 在待插值点
125 (i,j)上的初始猜测值, △*y*_n 是观测点 *n* 上的观测值与初始猜测值之差, *N* 是影响半径 *L* 内的
126 观测站点数。*d*_{ijn}是待插值点(i,j)到观测点 *n* 的距离, *L* 是人为选择的影响半径, 一般取常数。
127 (张红杰等, 2009)。
128 2.3. 评估指标

129 本文使用泰勒评分(*TSS*)作为评估指标。该评分可综合考量模拟数据与观测数据的相
 130 关性以及偏差(Taylor and Karl, 2001)。泰勒评分的范围为 0~1,越接近于 1,说明模拟效
 131 果越好。其具体表达式如下所示:

 $TSS = [4(1+R)^4] / [(\sigma_{obs} / \sigma_{sim} + \sigma_{sim} / \sigma_{obs})^2 (1+R_0)^4] \# (4)$

132 其中 R 为观测数据与模拟数据的相关系数, R_0 为模式集合中的最大相关系数, σ_{obs} 和 σ_{sim} 分

133 别为观测数据和模拟数据的标准差。计算时使用 Cressman 插值方法将站点观测数据插值到

134 格点数据上使用。

135 2.4. 不确定性量化方法

136 2.4.1. 多因素方差分析

137 方差分析是数据统计分析中的重要方法之一,利用方差比较的方法,判断离散因素对连
138 续因变量的影响是否显著。其基本原理就是将引起模式输出变化的所有因素进行分解,并计
139 算出不同因素的均方,最后使用F检验,对因素的影响进行显著性检验。本文对云微物理
140 过程、边界层过程和积云对流过程三种离散因素对模式输出降水的影响进行了方差分析,量
141 化了三种物理过程对于模拟结果的主效应和两两方案之间的交互效应,以更加清晰了解不同
142 物理过程对模拟降水结果的重要性。

143 以双因素方差分析为例,因素 A 有 *a* 个水平,因素 B 有 *b* 个水平,则因素 A 的自由度
144 df(A)为 *a*-1,因素 B 的自由度 df(B)为 *b*-1。把观测变量的总离差记为 *SS_T*,它分为两个部分,
145 一部分是由控制变量引起的离差,记为 *SS_V*(组间离差平方和),另一部分是由随机变量引
146 起的 *SS_E*(组内离差平方和),而控制变量引起的离差包括单个因素的独立影响 *SS_A*, *SS_B*147 以及多个因素之间交互作用的影响 *SS_{AB}*。

 $SS_T = SS_V + SS_E = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \#(5)$

148 参考 Wang 等(2021)的文章,使用均方来量化不同因素对因变量的影响。对于单个因素,
149 使用该因素的平方和除以该因素的自由度,可得到该因素的均方 *MS*。对于因素之间的交互
150 作用,其自由度 df(AB)为两因素的自由度相乘,则交互效应可以定义为两因素的均方除以
151 两因素的自由度。则 A、B 的主效应 *ME* 以及二者之间的交互效应 *IE* 分别为:

 $ME(A) = MS(A) = SS_A/df(A) = SS_A/(a-1) \#(6)$

 $ME(B) = MS(B) = SS_B/df(B) = SS_B/(b-1) \#(7)$

 $IE(A, B) = MS(AB) = SS_{AB}/df(AB) = SS_{AB}/[(a-1)(b-1)] #(8)$

152 最后通过使用各个因素的均方除以组内均方误差 MS(E)计算 F 统计量,进行 F 检验,
153 置信度水平定为 0.05,若 p<0.05,拒绝原假设,说明该因素对因变量有显著影响,以因素 A
154 为例,F 统计量的计算公式为:

$$F = MS(A)/MS(E) = [SS_A/df(A)]/{SS_E/[(n-1) - df(A) - df(B) - df(AB)]} #$$

= [SS_A/(a-1)]/{SS_E/[n-a-b-(a-1)(b-1)+1]} #(9)

155 在进行方差分析之前,本文对试验数据进行了正态性检验和方差齐性检验,均通过检验。

156 2.4.2. Tukey's 检验

157 Tukey's 检验可用于检验同组方案之间是否存在显著性差异,以此对方案进行分类(Tukey,

158 1949)。对于参数化方案 A, 假设有 a 种方案, 且不同方案对应的模式输出平均值为 $(\overline{Y}_1,$

159 \overline{Y}_2 , …, \overline{Y}_a)。Tukey's 多重检验使用学生化极差分布, 则

$$q = (\overline{Y}_{max} - \overline{Y}_{min}) / \sqrt{(MSE/n)} \# (10)$$

- 160 $MSE = \left[\sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} \overline{Y}_i)^2\right] / (n-a) # (11) 其中 \overline{Y}_{max}$ 为模式输出平均值的最大值, \overline{Y}_{min} 为模式161输出平均值的最小值。不同方案对应的样本量分别为 $(n_1, n_2, ..., n_a)$, 试验总数
- 162 $n=n_1+n_2+...+n_a$ 。如果

163 $(\overline{Y}_l - \overline{Y}_m) / \sqrt{(MSE/n)} > q_{\alpha}(a, n - a) # (12) 则认为这两组方案在显著性水平 a 上存在差异, <math>q_a$

164 的值可通过查表获取(John, 2011)。本文使用该多重检验方案对比不同方案之间的差异,

165 显著性水平设为 0.05,将没有显著差异的方案分在同一组,将存在显著差异的方案分在不同

- 166 的组,以此对参数化方案进行分类,以寻求最优参数化方案组合。
- 167 2.4.3. 不确定性量化流程
- 168 本文用于量化模式物理过程不确定性的方法包括以下步骤:
- 169 1). 选择对于降水模拟常用的参数化方案,并排除无法兼容或不适用于研究区域的参数化方170 案组合。
- 171 2). 使用多因素方差分析方法计算不同物理过程(云微物理过程、边界层过程、积云对流过
- 172 程)对模拟降水结果的主效应以及交互效应。这一步可以量化不同物理过程对模拟结果影响173 的重要性。
- 174 3).使用 Tukey's 检验对比同一物理过程中不同参数化方案之间的差异,根据检验结果确定最175 优参数化方案组合。
- 176 2.5. 个例简介

2020年5月21日晚至22日凌晨, 广东省出现一次极端强降水, 广州全市有42个站点 177 破小时雨强历史记录,其中黄埔区录得全市最大小时雨量 167.8 mm,破黄埔区历史极值记 178 179 录, 增城区新塘镇出现全市3小时最大雨量,为297mm,东莞地区出现351mm的破历史 记录最大3小时降水量,引起了严重的城市内涝,并且造成了巨大的经济损失(麦子和张涛, 180 2020)。图1显示的是2020年5月21日20时至22日08时(除特殊说明外均为北京时, 181 下同) 广东部分区域(112.2°E~114.8°E, 22.5°N~24.5°N, 除特殊说明外研究区域均为该区 182 域,下同)12小时累积降水量的空间分布,可以看出降雨主要集中在广州以及东莞地区, 183 这两个地区的12小时累积降水基本达到大暴雨级别,黄埔、增城等区甚至达到特大暴雨级 184 别。 185

186 图 2 基于 ERA5 再分析数据,展示了暴雨发生初始时刻不同高度层风场及位势高度场的
分布情况。在 500 hPa 高度层上,暴雨区位于副高边缘,副高北部呈现阶梯槽结构。偏西的
850 hPa 槽线与之对应构成前倾槽,存在不稳定的大气条件。暴雨区位于大槽的南部,有利
于强对流活动的发生发展。此外,广东北部低层存在切变线(大致位置为115°E,25°N),
有利于上升运动。其南侧为低空西南风急流(风速≥12 m s⁻¹),能将水汽和能量源源不断
输送到降水区,也促进了不稳定层的维持和发展(图 2)。由此可见,这次广州"5.22"特
大暴雨为典型的暖区暴雨过程,各层环流特征及其配置对降水的形成和发展起到了关键作用。



- 195 Fig.1 Cumulative precipitation distribution at stations from 20:00 on May 21, 2020 to 08:00 on
- 196 May 22, 2020 (BJT) (units: mm)

193

194





198 图 2 2020 年 5 月 21 日 20 时的 500 hPa 位势高度场(黑色实线,单位: dagpm), 850 hPa
199 位势高度场(填色,单位: dagpm)以及 925 hPa 风场(单位: m s⁻¹)分布, 红色风向标表
200 示风速≥12 m s⁻¹,黑色方框为暴雨区

Fig.2 The distribution of geopotential height at 500 hPa (solid black line, units: dagpm) and 850 hPa (shaded, units: dagpm) superimposed with wind vectors at 925 hPa (red bards $\geq 12 \text{ m s}^{-1}$, units: m s⁻¹) at 20:00 on May 21, 2020. The black box is the rainstorm area

204 2.6. 试验设置

197

205 采用 WRF (v4.4) 模式,选用 ECMWF 0.25°×0.25°的 ERA5 再分析数据作为模式的初
206 值条件和侧边界条件。模式的区域设置如图 3 所示,试验采用单向双层嵌套方案,双层网格
207 的水平分辨率分别为 9 km, 3 km,水平的网格数分别为 185×130, 271×211,垂直方向上

208 共分为 51 层,模式层顶的气压被设置为 50 hPa。模式采用的投影方式为墨卡托投影,中心
209 位置为 22.25°N,113°E。模拟的起始时间为 2020 年 5 月 21 日 14 时(北京时),模拟时长
210 为 30 h,前 6 小时作为模式 spin-up 时间,模拟结果的输出频率为逐小时。

本研究主要选择了与降水密切相关的物理过程进行不确定性评估,包括云微物理过程、 211 边界层过程以及积云对流过程。云微物理过程主要通过云中不同相态水成物之间的相互转换 212 影响动力和热力输送,进而在天气过程模拟中起关键性作用(马严枝等,2012;周志敏等, 213 214 2021)。根据水成物粒子预报量的不同,描述云微物理过程的方案可以分为单参方案和双参 方案,单参方案仅预报水成物比含水量,双参方案则同时预报水成物比含水量和数浓度(王 215 洪, 2014)。不同云微物理方案间预报量的差异会导致模拟结果的不同。本文选择了5种云 216 微物理方案: Lin 方案 (Lin et al., 1983; Chen and Sun, 2002)、Goddard 方案 (Tao et al., 1989; 217 Tao et al., 2016)、Thompson 方案(Thompson et al., 2004; Thompson et al., 2008)、Morrison 218 219 方案(Morrison et al., 2009)以及 WSM7 方案(Hong and Lim, 2006; Bae et al., 2018), 云微 物理方案具体的预报变量如表 2 所示。边界层过程在模式中的作用主要在于提供陆气之间动 220 量、热量和水汽的交换,直接决定大气边界层的稳定状况,进而影响天气及气候(任华荣等, 221 2017),描述边界层过程不同方案之间的差异来自于计算湍流通量时是否考虑湍流的非局地 222 223 效应以及湍流闭合的阶数。本文选择了4种边界层方案:YSU方案(Hong et al., 2006)、 MYJ 方案(Mesinger, 1993; Janjic and Zavisa, 1994)、QNSE 方案(Sukoriansky et al., 2005) 224 和 ACM2 方案(Pleim and Jonathan, 2007)。积云对流过程被认为是模式中最重要的非绝热 225 湿物理过程,主导了降水的模拟(李祥等,2020),在定义积云参数化问题时,需要选择合 226 227 适的闭合假设,根据不同的闭合假设,发展出了四类描述积云对流过程的方案,分别为对流 调整型、对流侵入型、质量通量型和对流有效位能释放型参数化方案(颜曦, 2018)。本文 228 选择了 KF 方案 (Kain and John, 2004)、BMJ 方案 (Janjic and Zavisa, 1994)、GF 方案 (Grell 229 230 and Freitas, 2014)和 New Tiedtke 方案(Zhang and Wang, 2017)4种积云对流方案。三种过 231 程之间共有 5×4×4 即 80 种组合方式(见表 1),共进行了 80 组试验。除了改变以上提及

232 的参数化方案之外,其他方案及设置不做任何改变,陆面过程采用 Noah 方案,长波辐射过
233 程采用 RRTMG 方案,短波辐射过程采用 Dudhia 方案。积云参数化方案只在外层开启。

234 此外,为进一步分析雨滴蒸发对此次降水模拟的影响,在 3.3.2 节中设置多组敏感性试
235 验,具体设置如表 3 所示,边界层方案为 YSU,积云对流方案为 GF,选用 Goddard 方案和
236 WSM7 方案的原设置作为控制试验,命名为 GoddCTL 和 WSMCTL,将 Goddard 方案的雨

237 滴蒸发项分别削弱为原来的二分之一和四分之一,分别命名为 Godd0.5 和 Godd0.25;将
238 WSM7 方案的雨滴蒸发项分别增强为原来的一点五倍和两倍,命名为 WSM1.5 和 WSM2,



边界层方案+近地面

WSM7(24)

YSU(1)/MM5(1)

MYJ(2)/Eta Similarity(2)

在稳定层结下采用湍流谱闭合模式发展而

1.5 阶局地闭合方案

单参方案

1 阶非局地闭合方案

	层方案(PBL+SL)	QNSE(4)/QNSE(4)	来的 K-E模式,在不稳定层结下采用流	 清流
			动能闭合方案	
		ACM2(7)/MM5(1)	1 阶局地-非局地混合型闭合方案	
		KF(1)	对流有效位能释放型方案	
	积云对流方案(CU)	BMJ(2)	对流调整型方案	
		GF(3)	尺度自适应方案	
		New Tiedtke(16)	质量通量型方案	
250	1/x			
251	表2云微物理力	5案的预报变量简介, 持	舌号中数字表示 namelist.input 中的选项	
252	Table2 The predictor variables of microphysics schemes, the numbers in parentheses represent the			the
253	options in namelist.input			
	方案名称		预报变量	
	Lin (2)		Qc, Qr, Qi, Qs, Qg	
	Goddard (7)		Qv, Qc, Qr, Qi, Qs, Qg, Qh	
	Thompson (8)		Qc, Qr, Qi, Qs, Qg, Ni, Nr	
	Morrison (10)	(Qc, Qr, Qi, Qs, Qg, Nr, Ni, Ns, Ng	
	WSM7 (24)		Qv, Qc, Qr, Qi, Qs, Qg, Qh	
254	Qx: 粒子 x 的比含水量(单位: kg/kg)			
255	Nx: 粒子 x 的数浓度(单位: 1/m ³)			
256	x: v(水汽); c(云滴); r(雨滴); i(冰晶); s(雪); g(霰); h(雹)			
257	注: Morrison 方案预报变量为比浓度(单位: 1/kg),为统一,输出变量时均转化为数浓度			衣度
258	(单位: 1/m ³)	57	X	
259	表3 敏感性试验设置			
260	Table3 Sensitivity experiment settings			
	试验名称		试验设置	
	控制试 GoddCTL	边界层方案为YSU,积	云对流方案为GF,选用Goddard方案和WS	M7
	验 WSMCTL	方	案的原设置作为控制试验	
	Godd0.5	削弱 Goddard 方案的雨	雨滴蒸发项为原来的二分之一,其余设置不	变

	Godd0.25	削弱 Goddard 方案的雨滴蒸发项为原来的四分之一,其余设置不变
敏感性	WSM1.5	增强 WSM7 方案的雨滴蒸发项为原来的一点五倍,其余设置不变
试验	WSM2	增强 WSM7 方案的雨滴蒸发项为原来的两倍,其余设置不变

- 261
- 262 3. 模拟结果
- 263 3.1. 不同物理过程及其相互作用的重要性

不同参数化方案表征的不同物理过程及其相互作用对模拟结果的重要性,可以使用多因 264 素方差分析的方法来量化,数值越大,说明该物理过程或相互作用对模拟结果越重要。本文 265 分析中使用的变量均为 d02 模拟结果, 且针对暴雨区(图 2 中黑色方框所示)。由于 d02 266 区域没有开启积云对流方案,因此本节不考虑积云对流过程与其他物理过程的相互作用,结 267 果如表4所示,三种物理过程及相互作用对于暴雨区累积降水模拟均有显著影响,云微物理 268 269 过程的重要性可被量化为188.12,边界层过程为136.86,积云对流过程为65.47,云微物理 270 过程与边界层过程的相互作用的重要性虽小于单个物理过程,但同样通过了显著性检验。积 云对流过程的影响不太大可能由于 d02 区域关闭了积云对流方案,其贡献较小。而对于泰勒 271 272 评分 TSS, 即模拟准确率的影响, 所有物理过程均有着显著影响, 云微物理过程的重要性为 0.24,积云对流过程为0.15,边界层过程为0.10,两两之间的相互作用则小于0.08。云微物 273 理过程的重要性明显大于其他物理过程及相互作用,单个物理过程的作用大于不同物理过程 274 之间的相互作用。但相互作用对模拟结果的重要性大部分通过了显著性检验,不可忽略。 275

276

表 4 不同物理过程及其相互作用的重要性

277

Table4 The importance of different physical processes and their interactions

方差来源	MP	PBL	CU	MP * PBL
累积降水	188.12	136.86	65.47	20.88
TSS	0.24	0.10	0.15	0.076

278 3.2. 同一物理过程中不同参数化方案的差异

279 为了进一步分析不同参数化方案之间的差异,并挑选出最优的参数化方案组合,本文使
280 用 Tukey's 检验,对比在模拟降水时同一物理过程中不同参数化方案的差异。在分析过程中,
281 根据同一物理过程中参数化方案的数目,将 80 组试验进行分组。例如,针对云微物理过程,
282 共有 5 个参数化方案,可将试验分为 5 组,每组仅包含一个云微物理方案。图 4 是使用 Tukey's
283 检验同一物理过程中不同参数化方案对模拟降水泰勒评分的差异。根据差异结果是否显著进

284 行分组,不存在显著性差异的参数化方案用同一字母标注,存在显著性差异的参数化方案用
285 不同字母标注(杨启东等,2021)。泰勒评分最高的一组方案标注为C组,B组次之,最
286 低为A组。

对于云微物理过程(图 4a), Goddard 方案和 WSM7 方案显著优于其他三种方案,可 287 能原因是 Goddard 方案和 WSM7 方案均包含 4 种冰相粒子,考虑了雹的存在,雹的存在倾 288 向于增加强降水而减少弱降水(Tao et al., 2016; Bae et al., 2018)。因此四类冰粒子方案对于 289 强降水的模拟具有更大优势。对于边界层过程(图4b),4种边界层方案之间不存在显著性 290 差异,说明对于降水模拟,尽管边界层方案对于模拟结果很重要,但边界层方案的改变对模 291 拟结果的影响并不明显。最后在积云对流过程中, BMJ 方案的泰勒评分低于其他方案。根 292 据 Tukey's 检验结果,挑选出不同种物理过程中最优的一组方案,如云微物理方案为 Goddard 293 294 方案、WSM7 方案;边界层方案为 YSU 方案、MYJ 方案、QNSE 方案、ACM2 方案;积云 参数化方案为 KF 方案、GF 方案、New Tiedtke 方案。将初步挑选出的这几组方案进行组合, 295 使用泰勒评分进行评估比较(图4d),挑选出针对该个例的最优参数化方案组合,为WSM7 296 297 云微物理方案+YSU 边界层方案+GF 积云对流方案。





300 C表示存在显著差异的分组, (a)为云微物理过程, (b)为边界层过程, (c)为积云对

301 流过程, (d)为初步挑选出最优组别的方案的泰勒评分结果, 其中 G 代表 Goddard 方案,

302 W 代表 WSM7 方案, NT 代表 New Tiedtke 方案

Fig.4 Tukey's test was used to test the difference in Taylor skill score of (a) microphysics scheme, (b) boundary layer scheme, (c) cumulus convective scheme in simulated precipitation. A, B, and C represent the groups with significant differences, and (d) is the results of the Taylor skill score of the scheme with the optimal group were initially selected, G stands for Goddard scheme, W for WSM7 scheme and NT for New Tiedtke scheme

308 3.3. 云微物理方案

309 前两节量化了不同物理过程对模拟结果影响的不确定性,结果表明云微物理过程对降水
310 模拟效果的重要性最大。另外,在云微物理过程中,不同参数化方案之间存在显著性差异。
311 为了进一步了解云微物理参数化方案对降水模拟的影响机制,下面从水成物分布及其源汇项
312 差异的角度出发,选择 YSU 边界层方案以及 GF 积云对流方案,只改变云微物理方案进行
313 敏感性试验,研究不同云微物理方案对该次华南暴雨模拟的影响。

314 3.3.1. 降水及水成物分析

图 5 为 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时累积降水的观测和模拟结果。可以看出, 5 315 316 个方案均模拟出了指定区域的降水,但降水强度以及强降水落区存在差异。根据 《GB/T28592-2012 降水量等级》,本文将站点累积降水大于 140 mm 的区域定义为特大暴 317 雨区,将累积降水大于 70 mm 的区域定义为大暴雨区。从特大暴雨所覆盖的区域来看,含 318 有 4 种冰相粒子的 Goddard 方案以及 WSM7 方案能模拟出较大范围的特大暴雨区,且大暴 319 320 雨区的分布更加集中,与观测结果更加近似。Lin 方案的降水极值虽然与观测最为接近,但 模拟出的特大暴雨区偏小。Thompson 方案和 Morrison 方案模拟出的降水极值点与观测偏差 321 较大。综合来说,对于累积降水,WSM7 方案模拟效果最优。 322

图 6 为时间区域平均的水成物比含水量垂直分布,可以看出不同方案之间的水成物分布
存在较大差异。云滴主要分布在 200 hPa 以下,存在两个峰值,分别在 550 hPa 和 850 hPa
左右。不同方案的云滴差异主要存在于 500 hPa 至 900 hPa 之间,云滴比含水量从大到小排
序为 Thompson、Goddard、Lin、WSM7、Morrison。对于雨滴比含水量,所有方案的雨滴比
含水量极值均大于云滴比含水量,且分布略低于云滴,主要分布在 400 hPa 以下,峰值在 575
hPa 左右,WSM7 分布范围更广,最高可达 350 hPa,峰值在 700 hPa 左右,峰值为 0.167 g/kg,
Thompson 方案的雨滴比含水量最小,峰值仅为 0.125 g/kg,尽管 WSM7 方案的雨滴比含水

330 量极值小于 Goddard 方案和 Lin 方案,但在接近地面处,三种方案的雨滴比含水量几乎相等。 冰晶主要分布在 575 hPa 以上, Goddard 方案的冰晶比含水量明显高于其他方案, 几乎为其 331 他方案的四倍,峰值为 0.109 g/kg。雪主要分布在 600 hPa 以上, Thompson 方案和 Goddard 332 方案的雪比含水量最大,约为其他方案的2倍,两个方案的峰值所在高度不同,除Lin方案 333 之外,其余方案的雪比含水量均高于其他水成物。霰主要分布在800 hPa以上,峰值在500 hPa 334 左右, Lin 方案的霰比含水量明显高于其他方案。对于 Goddard 和 WSM7 方案,含有 4 种冰 335 相粒子,相较于其他方案增加了雹粒子,对比两个方案的雹比含水量垂直分布,WSM7方 336 337 案能到达更低高度,在 800 hPa 左右,峰值在 550 hPa 左右,而 Goddard 方案主要分布在 600 hPa 以上, 峰值在 500 hPa 左右。 338

339 为进一步了解雹在强降水模拟中的作用,利用 Morrison 方案能够在模拟时切换霰为雹
340 的特点,对比仅含霰的原方案和切换为雹的新 Morrison 方案对此次降水模拟的影响。如图 7
341 所示,将霰切换为雹之后,新方案的模拟降水更加集中,强度更强,且降水极值落区十分接
342 近观测结果,模拟效果更优。

343 综上所述,不同方案的粒子分布存在明显差异,Goddard 方案冰晶和雪明显偏多,Lin
344 方案霰明显偏多。对于含有雹的方案,如WSM7方案,因为雹比霰有更大的直径,所以能
345 产生更快的下落速度,从而能到达更低高度,有利于降水增强。这也解释了WSM7方案模
346 拟的特大暴雨区更加集中且降水强度更大。

347 根据 Tukey's 检验结果, Goddard 方案和 WSM7 方案是最优的云微物理方案。而从累积
348 降水分布可以看出, WSM7 方案的模拟结果更加接近于观测事实。比较两种四类冰粒子方
349 案, WSM7 方案的雹垂直分布范围较 Goddard 方案更广,而 Goddard 方案的冰晶和雪则明
350 显多于 WSM7 方案。

为了进一步研究两种方案的差异,图8分析了两种方案模拟的区域平均水成物比含水量 351 随时间和高度的演变,从云滴分布来看,两种方案不仅在分布的高度上有差异,极值中心的 352 353 大小也有差异。Goddard 方案中云滴比含水量最高在-10°C 等温线左右,极值为 0.139 g/kg, 而 WSM7 方案最高能到达 30℃ 等温线,极值为 0.125 g/kg,0℃ 层附近均出现 0.11 g/kg 等 354 值线,为WSM7方案的云滴比含水量极值所在处,Goddard方案的该等值线持续时间明显 355 长于 WSM7 方案。对两个方案模拟的雨滴来说,其分布最高均能达到 0°C 层以上,WSM7 356 357 方案的雨滴分布甚至到达-10°C 层以上,两个方案中的雨滴比含水量演变及极值也存在较大 358 差异,Goddard 方案的雨滴极值为0.284 g/kg,WSM7 方案的雨滴极值为0.31 g/kg,但 Goddard 359 方案的雨滴在演变过程中出现了两个极值,22时两个方案均出现第一个极值,在02时
360 Goddard 方案出现第二个极值,Goddard 方案雨滴比含水量极值所对应 0.26 g/kg 等值线主要
361 分布在 900 hPa 以上,而 WSM7 方案该等值线可到达 1000 hPa。

冰相粒子的演变及垂直分布差异比起液滴更大, Goddard 方案的 4 种冰相粒子在演变过 362 程中均出现了两个极值,出现时间与雨滴相同。在降雨时段内,冰晶的存在时间长于其他冰 363 相粒子,雪比含水量的极值始终高于其他冰相粒子。两种方案的冰晶、雪、霰均存在于 0°C 364 层以上,Goddard 方案的冰晶以及雪比含水量明显高于 WSM7 方案,WSM7 方案的霰比含 365 366 水量极值为 0.219 g/kg, 高于 Goddard 方案, 极值为 0.187 g/kg。对于雹的演变及垂直分布(图 8e、f),两个方案的极值差距不大,但分布范围有较大差异,Goddard 方案的雹主要存在于 367 0°C 层以上, 而 WSM7 方案的雹甚至能到达雨滴比含水量极值所在高度。可能原因是两种 368 方案的雹下落末速度存在差异,一般来说粒子下落末速度与粒子直径存在指数增长关系,粒 369 370 子下落末速度的增强,会导致粒子的垂直分布发生变化。Goddard 方案虽然使用了固定截断 参数,但设置了两个阈值,当雹的比含水量小于最小阈值时使用适用于小冰雹的截断参数(例: 371 0.240 cm⁻⁴),大于最大阈值时则使用适用于大冰雹的截断参数(例: 0.0048 cm⁻⁴)(Lang et 372 al., 2014; Tao et al., 2016), 而 WSM7 方案使用的是统一的截断参数(例: 0.0004 cm-4), 模 373 374 拟的均为大冰雹(Bae et al., 2018),对于大冰雹,直径较大,下落速度更快,因此WSM7 方案模拟的雹能到达更低高度,模拟降水强度更接近观测。 375



377 图 5 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时 (a) 观测与 (b) Lin 方案、 (c) Goddard 方案、
378 (d) Thompson 方案、 (e) Morrison 方案、 (f) WSM7 方案模拟的 12 h 累积降水分布 (填)

379 色,单位: mm),圆圈〇表示观测极大值点,三角形△表示不同方案的模拟极大值点

Fig.5 Spatial distribution of the 12-h cumulative rainfall in (a) observations and based on (b) Lin scheme, (c) Goddard scheme, (d) Thompson scheme, (e) Morrison scheme, (f) WSM7 scheme during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020 (shaded, units: mm). The circle \bigcirc represents the maximum value of observed precipitation and the triangle \triangle represents the maximum value of simulated precipitation under different schemes



385

386 图 6 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时时间区域平均的不同水成物比含水量的垂直分布,

387 (a)云滴比含水量; (b)雨滴比含水量; (c)冰晶比含水量; (d)雪比含水量; (e)

- 388 霰比含水量; (f) 雹比含水量(单位: g/kg); 黑色实线为平均温度 (单位: ℃)
- 389 Fig.6 The vertical distribution of the average mixing ratio of (a) cloud water; (b) rain water; (c)
- cloud ice; (d) snow; (e) graupel; (f) hail during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020
- 391 (units: g/kg). The black solid lines indicate the average temperature (units: °C)





392

393 图 7 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时 (a) 观测与 (b) Morrison 方案、 (c) 将霰切换

- 394 为雹的 Morrison 方案模拟的 12 h 累积降水分布 (填色,单位:mm),圆圈 ○表示观测极大
 395 值点,三角形△表示不同方案的模拟极大值点
- 396 Fig.7 Spatial distribution of the 12-h cumulative rainfall in (a) observations and based on (b)
- 397 Morrison scheme, (c) Morrison scheme that switches graupel to hail during 20:00 BJT 21 May to
- 398 08:00 BJT 22 May 2020 (shaded, units: mm). The circle O represents the maximum value of
- 399 observed precipitation and the triangle \triangle represents the maximum value of simulated
- 400 precipitation under different schemes







402 图 8 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时, Goddard 方案(左列)、WSM7 方案(右列)

403 中水成物比含水量的区域平均值随时间演变:冰晶(第一行);雪(第二行);霰(第三行);
404 雹(第四行)。填色表示冰相粒子比含水量(单位:g/kg);黑色实线为平均温度,等值线
405 为0°C~-40°C,间隔10°C;红色虚线表示云滴比含水量,等值线为0.01~0.15 g/kg,间隔
406 0.05 g/kg;蓝色虚线表示雨滴比含水量,等值线为0.01~0.30 g/kg,间隔 0.05 g/kg

Fig.8 Time evolution (during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020) of area-averaged 407 vertical profiles of cloud ice (top line), snow (second line), graupel (third line) and hail (bottom 408 line) by Goddard (left column) and WSM7 (right column) schemes, respectively. The shaded area 409 indicates the mixing ratio of ice phase hydrometeors (units: g/kg). The black solid lines indicate 410 the average temperature and the contours are from 0°C to -40°C with 10°C of intervals. The red 411 dashed lines indicate the cloud water mixing ratio (units: g/kg), and the contours are from 0.01 412 g/kg to 0.15 g/kg with 0.05 g/kg of intervals. The blue dashed lines indicate the rain water mixing 413 ratio (units: g/kg), and the contours are from 0.01 g/kg to 0.30 g/kg with 0.05 g/kg of intervals 414

415 3.3.2. 源汇项特征分析

416 两种方案粒子比含水量演变及垂直分布的差异是降水模拟结果存在差异的主要原因。为
417 深入了解降水时的粒子转换过程,对两种液滴以及4种冰相粒子的源汇项进行分析,为更加
418 清晰描述液滴与冰相粒子之间的相互转换过程,对于液滴,首先将冰相粒子作为一个整体进
419 行考虑,比较不同方案的差异,然后再分析不同冰相粒子之间的转换过程。具体源汇项可见
420 表 5。

图 9、10 为 Goddard 方案和 WSM7 方案模拟时段内的具体微物理转换过程。对于云滴, 421 422 在 Goddard 方案中, 通过水汽凝结增长, 主要汇项为冰晶的凝华增长以及雨滴对云滴的碰并 423 作用,WSM7 方案的主要源项与 Goddard 方案相同,主要汇项除雨滴对云滴的碰并作用之 外,还通过云滴向雨滴的自动转换以及冰相粒子碰并云滴来消耗,对于水汽凝结过程,两个 424 方案的极值以及最大凝结高度存在差异,Goddard 方案极值为 4.538×10⁻⁵ kg kg⁻¹ s⁻¹,最大 425 凝结高度为 375 hPa 左右, WSM7 方案为 2.776×10⁻⁶ kg kg⁻¹ s⁻¹,最大凝结高度为 250 hPa 426 左右。虽然水汽凝结项存在较大差异,但 Goddard 方案中雨滴对云滴的碰并作用项与 WSM7 427 方案相当(图 9a、b)。 428

429 对于降水模拟结果,最直接的影响是雨滴源汇项,比较两组方案的雨滴源汇项发现,二
430 者雨滴源汇项的值差异不大,对于雨滴比含水量的增加,起主要作用的项为冰相粒子的融化
431 项,冰相粒子的融化主要发生在 0°C 层附近,但 WSM7 方案中的融化项可向下延伸到更低

432 高度至 800 hPa。除此之外, Goddard 方案的雨滴还通过雨滴对冰相粒子的碰并作用增加,

433 而 WSM7 方案中雨滴对冰相粒子的碰并作用对雨滴增加的贡献不明显,并且 Goddard 方案

434 中雨滴的蒸发项较为显著, WSM7 方案雨滴的主要汇项则明显小于其主要源项(图 9c、d)。

- 由前可知,两个方案中,冰相粒子的融化项均对雨滴比含水量的增长有重要作用,对比 435 两个方案中冰晶的源汇项,发现 WSM7 方案的冰晶源汇项明显小于其他粒子,主要通过冰 436 晶的初始核化过程产生以及水汽凝华增长,主要汇项为冰晶粒子碰并形成雪,而 Goddard 437 方案的冰晶变化发生在 0°C 层以上,主要源项为冰晶的初始核化过程、水汽以及云滴凝华 438 439 增长,主要汇项为雪的凝华增长(贝吉龙过程),冰晶的汇项明显小于其源项(图 10a、b)。 对于雪、霰、雹三种冰相粒子,在两种方案中均表现减少趋势,Goddard 方案通过雪的凝华 440 增长(贝吉龙过程)增加雪含量,消耗则是通过雪的升华,雨滴对雪的碰并作用以及雪的融 441 化过程。WSM7 方案中雪的变化则主要是通过其融化过程消耗雪,且该方案的霰以及雹的 442 443 变化均主要由对应粒子的融化项导致。这三种冰相粒子的融化主要发生在 0°C 层左右, WSM7 方案中雹的融化项可向下延伸到更低高度。除冰相粒子的融化项外, Goddard 方案中 444 霰的汇项还包括雨滴对霰的碰并作用(图 10c-h)。 445
- 综上所述,Goddard 方案和 WSM7 方案产生雨滴的过程存在差异。在 Goddard 方案中, 446 447 云滴通过水汽凝结过程增长,冰晶通过初始核化过程产生然后通过水汽凝华和云滴凝华过程 增长,雪通过部分冰晶的凝华过程(贝吉龙过程)增长。在 0°C 层以上,雪升华形成水汽。 448 雪、霰、雹几种冰相粒子增大到一定尺度至上升气流无法支撑时下落,在0℃层以下,冰 449 相粒子都能通过融化形成雨滴,雪和霰还能通过碰并过程形成雨滴。WSM7 方案同样首先 450 是云滴通过水汽凝结过程增长,冰晶通过其初始核化过程产生以及水汽凝华增长。云滴以及 451 冰晶的源汇项相对其他项较小。在0℃层以下,主要通过冰相粒子(雪、霰、雹)的融化过 452 453 程形成雨滴。

454 由前可知,冰相粒子的融化项对于雨滴比含水量的增加具有重要作用,雹的存在有助于
455 强降水的模拟。但对于降水落区,两个方案的模拟结果均偏离于观测事实,Goddard 方案落
456 区偏西,而WSM7方案偏东。对比两个方案雨滴比含水量的源汇项,发现除冰相粒子相关
457 项不同外,雨滴的蒸发项也存在较大差异,Goddard 方案的雨滴蒸发明显强于WSM7方案。
458 已有研究指出,雨滴蒸发是影响冷池强度的关键因素(袁招洪,2015;Huang et al.,2020)。
459 对比两个方案地面温度以及风场的分布可以看出,此次降水的水汽来源于较强的西南风,因
460 此雨带由西南向东北方向移动。但Goddard 方案中对流触发后由于雨滴的蒸发在地面形成较

461 强的冷池,导致降水落区较观测偏西,且冷池及冷池附近出现较为集中的强降水。而 WSM7462 方案的雨滴蒸发项偏弱,降水落区较观测偏东(图 11)。

为进一步分析雨滴蒸发对此次降水模拟的影响,设置多组敏感性试验,具体试验设置见 463 2.8节。从累积降水的模拟结果可以看出,对于 Goddard 方案,随着雨滴蒸发项减弱,大于 464 140 mm 的特大暴雨区逐渐向东北方向移动,且分布较控制试验更加分散。WSM7 方案的降 465 水模拟对于雨滴蒸发项的变化更加敏感,随着雨滴蒸发项的增强,特大暴雨区逐渐向西南方 466 向移动。当雨滴蒸发项增大为原来的两倍时,累积降水极值中心与观测几乎一致。这表明雨 467 滴蒸发项的增强有助于提高 WSM7 方案对降水落区模拟的准确度(图 12)。对于此次降水 468 事件,两个方案模拟的雨带均是由西南向东北方向移动,当雨滴蒸发项较强时,对流触发后 469 在雨滴蒸发的作用下形成冷池,在冷池及其周围产生强降水,降水落区偏西,如 Goddard 470 方案;当雨滴蒸发项较弱时,如 WSM7 方案,降水落区偏东。雨滴蒸发项的存在对于冷池 471 472 的产生有直接的影响,影响对流的移动以及后续的降水传播,最终影响降水的强度和分布。

473

表5具体源汇项含义

4	7	4
	'	•

Table5 The microphysical source/sink terms

源汇项	含义
CLcr	雨滴碰并云滴
CLet	冰相粒子碰并云滴
CLcs	雪碰并云滴
CLcg	霰碰并云滴
CLch	雹碰并云滴
CLtr	雨滴碰并冰相粒子
CLir	雨滴碰并冰晶
CLsr	雨滴碰并雪
CLgr	雨滴碰并霰
CLrt	冰相粒子碰并雨滴
CLrs	雪碰并雨滴
CLrg	霰碰并雨滴
CLrh	雹碰并雨滴
CLis	雪碰并冰晶

CLig	霰碰并冰晶
CLih	雹碰并冰晶
CLsg	霰碰并雪
CLsh	雹碰并雪
CLgh	雹碰并霰
ATcr	云滴向雨滴的自动转换
ATis	冰晶向雪的自动转换
ATsg	冰向雪的自动转换
ATgh	霰向雹的自动转换
EPrv	雨滴的蒸发
VDvc	云滴的凝结增长
VDci	冰晶的凝华增长
VDcs	雪的凝华增长(贝吉龙过程)
VDis	雪的凝华增长(贝吉龙过程)
VDiv	冰晶的凝华增长/冰晶的升华
VDsv	雪的凝华增长/雪的升华
VDgv	霰的凝华增长/霰的升华
VDhv	雹的凝华增长/雹的升华
FRrt	雨滴冻结成冰相粒子
FRrg	雨滴冻结成霰
FRrh	雨滴冻结成雹
MLtr	冰相粒子融化形成雨滴
MLic	冰晶融化形成云滴
MLsr	雪融化形成雨滴
MLgr	霰融化形成雨滴
MLhr	雹融化形成雨滴
INT	冰晶的初始核化
RIM	淞附增长



476

477 图 9 Goddard 方案(左列)和 WSM7 方案(右列) 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时时
478 间区域平均的(a、b)云滴; (c、d)雨滴的微物理转换过程(单位: 10⁻⁵ kg kg⁻¹ s⁻¹)的垂
479 直分布。水平黑色实线表示 0°C 层的高度

480 Fig.9 Vertical profiles of averaged conversion rate (units: 10⁻⁵ kg kg⁻¹ s⁻¹) of (a,b) cloud water,
481 (c,d) rain water during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020 for Goddard (left column)
482 and WSM7 scheme (right column). The horizontal solid black line indicates the height of the 0°C
483 layer.



485 图 10 Goddard 方案(左列)和 WSM7 方案(右列) 2020 年 5 月 21 日 20 时至 22 日 08 时时
486 间区域平均的(a、b)冰晶;(c、d)雪;(e、f)霰和(g、h)雹的微物理转换过程(单位:
487 10⁻⁵ kg kg⁻¹ s⁻¹)的垂直分布。水平黑色实线表示 0°C 层的高度

Fig.10 Vertical profiles of averaged conversion rate (units: 10^{-5} kg kg⁻¹ s⁻¹) of (a,b) cloud ice, (c,d) snow, (e,f) graupel and (g,h) hail during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020 for Goddard (left column) and WSM7 schemes (right column). The horizontal solid black line indicates the height of the 0°C layer.



492

493 图 11 Goddard 方案 (a-c) 和 WSM7 方案 (d-e) 模拟的地面温度(填色,单位: °C),大于
494 15 mm/h 的小时降水量 (黑色等值线,单位: mm) 10 m 风场 (矢量,单位: m s-1) 的时
495 间演变。圆圈 ○表示观测极大值点,三角形△表示不同方案的模拟极大值点

Fig.11 Time evolution of ground temperature (shaded, units: °C), hourly precipitation greater than 15 mm/h (black contour, units: mm), and the 10 m wind field (vector, units: m s⁻¹) by Goddard (a-c) and WSM7 (d-e) scheme. The circle \bigcirc represents the maximum value of observed precipitation and the triangle \triangle represents the maximum value of simulated precipitation under different schemes



501

502 图 12 Goddard 方案和 WSM7 方案控制试验以及改变雨滴蒸发试验的 2020 年 5 月 21 日 20
503 时至 22 日 08 时(北京时)的累积降水量的空间分布(单位: mm)。圆圈〇表示观测极大
504 值点,三角形△表示不同方案的模拟极大值点

Fig.12 Spatial distribution of the 12-h cumulative rainfall simulated by Goddard scheme, WSM7 scheme and modification of rain water evaporation tests during 20:00 BJT 21 May to 08:00 BJT 22 May 2020 (shaded, units: mm). The circle \bigcirc represents the maximum value of observed precipitation and the triangle \triangle represents the maximum value of simulated precipitation under different schemes

510 4. 讨论与结论

511 本文通过 WRF (v4.4)模式,针对 2020 年 5 月 21~22 日一次华南暴雨过程进行数值模
512 拟。基于不同参数化方案组合得到的 80 组试验,使用多因素方差分析方法和 Tukey's 检验,
513 量化了不同物理过程以及两两之间的相互作用对降水模拟结果的重要性,并挑选出最优参数
514 化方案组合。基于不确定性量化结果,探讨不同云微物理参数化方案中水成物分布和微物理
515 转换过程对降水模拟的影响。主要得到的研究结论如下:

516 (1) 三种物理过程及其相互作用对于降水模拟结果均有显著影响,云微物理过程对于
517 降水模拟结果以及模式预报效果均相对最重要,积云对流过程相对不重要的原因可能是模式
518 分辨率较高,内层关闭了积云对流参数化方案,因此积云过程相对其他过程重要性较小。此
519 外,不同物理过程之间的相互作用不可被忽略。

520 (2) Tukey's 检验结果表明,对于云微物理过程, Goddard 方案和 WSM7 方案显著优

521 于其他三种方案,可能原因是 Goddard 方案和 WSM7 方案均包含 4 种冰相粒子,考虑了雹
522 的存在,雹的存在倾向于增加强降水而减少弱降水。四种边界层方案之间不存在显著性差异,
523 对于降水模拟结果,边界层方案的改变对模拟结果的影响并不明显。在积云对流过程中,
524 BMJ 方案的泰勒评分显著低于其他方案。根据泰勒评分挑选出针对该个例的最优参数化方
525 案组合,为 WSM7 方案+YSU 方案+GF 方案。

526 (3)由于冰相粒子在雨滴比含水量的源项中起主要作用,雹的存在对于极端强降水的
527 模拟有积极作用。包含雹的 Goddard 方案以及 WSM7 方案均模拟出了较大范围的特大暴雨
528 区,且大暴雨区域分布更加集中。对于雹的演变及垂直分布,两个方案的主要差异在于雹垂
529 直分布范围上,Goddard 方案的雹主要存在于 0°C 层以上,而 WSM7 方案的雹甚至能到达
530 雨滴比含水量极值所在高度。差异可能来源于方案中与雹相关的固定参数的不同。WSM7
531 方案模拟的雹较 Goddard 方案大,对于大冰雹,直径较大,下落速度更快,因此 WSM7 方
532 案的模拟结果能到达更低高度。

533 (4)雨滴蒸发项对模拟降水的落区有重要影响。Goddard 方案的雨滴蒸发项明显大于
534 WSM7 方案,两个方案模拟的降水落区有着较大差异,当改变雨滴蒸发项的强度时,累积
535 降水极值落区同样产生变化。对于 WSM7 方案,当雨滴蒸发项增大为原来的两倍时,累积
536 降水极值中心与观测几乎一致。雨滴蒸发项的大小直接影响冷池的强度,进而影响后续的降
537 水传播,最终作用于模拟降水的强度以及分布。

综上可知,不同云微物理方案之间的差异来源于对具体水成物属性及微物理转换过程的 538 处理不同。由于冰相粒子的形状不规则,密度范围大,对其生长过程有较大的影响。不同方 539 案中对冰相粒子的相关定义(如形状、密度、下落末速度等)存在差异,因此模拟结果不同 540 (Lin and Colle,2011; Zhou et al.,2020)。另一方面,参数化方案中的经验参数通常源于实际 541 观测结果,不同地区的云系结构存在差异,因此方案中的固定参数存在适用性问题(尹金方, 542 2013)。对于参数的校正,一种方法是使用历史观测数据进行校准(Duan et al., 1992, 1994), 543 但这种方法存在缺陷,一是观测相对有限,二是需要优化的参数有许多,需要耗费大量计算 544 资源以及时间,因此,人们开始使用不确定性量化的方法,使用灵敏度分析方法筛选出少量 545 需要优化的重要参数,再进行后续参数优化(Curt and Covey,2013; Di et al.,2017; Wang et 546 al.,2019)。在缺少外场观测的情况下,参数扰动集合有助于减小固定参数引起的误差,提 547 548 高预报效果(Thompson et al.,2021), Yussouf 等(2010)在集合卡尔曼滤波数据同化中结 549 合了水成物密度以及截断参数的多参数集合,改进了对强风暴的模拟结果。

- 550 因此,为了改进参数化方案,除了对方案之间差异进行对比分析,选出最优参数化方案
 551 之外,方案中的固定参数也需要相应校正,以便改进模式预测结果。本文只对一个个例进行
 552 了分析,对比量化了不同参数化方案对模拟降水结果的重要性,结论只是初步,更详细的影
- 553 响机制分析以及方案优化还需要后续深入研究。
- 554

555 参考文献

- Allen M R, Stott P A, Mitchell J F B, et al. 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of
 anthropogenic climate change[J]. Nature, 407:617–620. doi:10.1038/35036559
- 558 Bae S Y, Hong S Y, Tao W K. 2018. Development of a single-moment cloud microphysics scheme
- 559 with prognostic hail for the weather research and forecasting (WRF) model[J]. Asia-Pacific
- 560 journal of atmospheric sciences, 55:233-245. doi:10.1007/s13143-018-0066-3
- 561 Chen S H, Sun W Y. 2002. A one-dimensional time dependent cloud model[J]. Journal of the
- 562 Meteorological Society of Japan, 80(1):99-118. doi:10.2151/jmsj.80.99
- 563 Covey C, Lucas D D, Tannahill J, et al. 2013. Efficient screening of climate model sensitivity to a
- 564 large number of perturbed input parameters[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems,
- 565 5(3):598-610. doi:10.1002/jame.20040
- 566 Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. Monthly Weather Review,
- 567 87:367–374. doi:10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2
- 568 Danforth C M, Kalnay E, Miyoshi T. 2007. Estimating and correcting global weather model
- 569 error[J]. Monthly Weather Review, 135(2):281-299. doi:10.1175/MWR3289.1
- 570 Di Z H, Duan Q Y, Gong W, et al. 2017. Parametric sensitivity analysis of precipitation and
- 571 temperature based on multi-uncertainty quantification methods in the Weather Research and
- 572 Forecasting model[J]. Science China Earth Sciences, 60(5):876-898.
 573 doi:10.1007/s11430-016-9021-6
- 574 Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual
- 575 rainfall-runoff models[J]. Water
 - Resources I

Research,28(4):1015-1031.

- 576 doi:10.1029/91WR02985
- 577 Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method 578 for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 158(3-4):265-284.

- 579 doi:10.1016/0022-1694(94)90057-4
- 580 Evans J P., Ekstroem M , Ji F. 2012. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over
- 581 South-East Australia[J]. Climate Dynamics, 39:1241-1258. doi:10.1007/s00382-011-1244-5
- 582 Grell G A, Freitas S R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for
- 583 weather and air quality modeling[J], Atmospheric chemistry and physics, 14(10):5233-5250.
- 584 doi:10.5194/acpd-13-23845-2013
- 585 何立富,陈涛,孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559-569. He Lifu,
- 586 Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J].
- 587 Journal of Applied Meteoroligical Science (in Chinese), 27(5):559-569.
 588 doi:10.11898/1001-7313.20160505
- 589 Hong, S Y, Lim J J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J].
- 590 Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 42:129-151.
- 591 Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of
- 592
 entrainment
 processes[J].
 Monthly
 weather
 review,
 134(9):2318-2341.

 593
 doi:10.1175/MWR3199.1
- 594 Huang Y J, Wang Y P, Xue L L, et al. 2020. Comparison of three microphysics parameterization
- schemes in the WRF model for an extreme rainfall event in the coastal metropolitan City of
- 596
 Guangzhou,
 China[J].
 Atmospheric
 Research,
 240(6):104939.

 597
 doi:10.1016/j.atmosres.2020.104939
- Janjic Z I. 1994. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the
 convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Monthly Weather Review,
- 600 122(5):927-945. doi:10.1175/1520-0493(1994)1222.0.CO;2
- 601Jankov I, Gallus W A, Segal M, et al. 2005. The impact of different WRF model physical602parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall[J]. Weather and
- 603 Forecasting, 20(6):1048-1060. doi:10.1175/WAF888.1
- 604 John A R, 田金方. 2011. 数理统计与数据分析[M]. 机械工业出版社. John A R, Tian
- 505 Jinfang. 2011. Mathematical statistics and data analysis[M]. China Machine Press (in Chinese).
- 606 Kain J S. 2004. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update[J]. Journal of Applied
- 607 Meteorology and Climatology, 43(1):170–181.

- 608 doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- 609 Kuo Y H, Chen G T J. 1990. The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): An overview[J].
- 610 Bulletin of the American Meteorological Society, 71:488–503.
- 611 doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0488:TTAMEA>2.0.CO;2
- Lang S E, Tao W K, Chern J D, et al. 2014. Benefits of a fourth ice class in the simulated radar
 reflectivities of convective systems using a bulk microphysics scheme[J]. Journal of the
- 614 Atmospheric Sciences, 71(10):3583-3612. doi:10.1175/JAS-D-13-0330.1
- 615 李祥,张立凤,王敬囝. 2020. 梅雨锋暴雨预报对分辨率与积云参数化的敏感性[J].暴雨灾害,
- 616 39(6):637-646. LI Xiang, ZHANG Lifeng, WANG Jingnan. 2020. The sensitivity of the
- 617 prediction of Meiyu torrential rainfall to model resolution and cumulus parameterization[J].
- 618 Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 39(6): 637-646.
- 619 doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.012
- 620 Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud
- 621 model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 22(6):1065–1092.
 622 doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
- 623 Lin Y L, Colle B A. 2011. A New Bulk microphysical scheme that includes riming intensity and
- temperature-dependent ice characteristics[J]. Monthly Weather Review, 139(3):1013-1035.
- 625 doi:10.1175/2010MWR3293.1.
- 626 Liu Y, Chen Y H, Chen O, et al. 2021. To develop a progressive multimetric configuration
- 627 optimization method for WRF simulations of extreme rainfall events over Egypt[J]. Journal of
- 628 Hydrology, 598:126237. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126237
- 629 Lorenz E N. 2004. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,
- 630 20(2):130-141. doi:10.1007/978-0-387-21830-4 2
- 631 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,
- 632 36(4):835-850. Ma Yanzhi, Lu Changgen, Gao Shouting. 2012. The effects of different
- 633 microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18-19 August
- 634 2010[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(4):835-850.
- 635 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159
- 636 马雷鸣,鲍旭炜. 2017. 数值天气预报模式物理过程参数化方案的研究进展[J].地球科学进展,

- 637 32(7):679-687. Ma Leiming, Bao Xuwei. 2017. Research progress on physical
 638 parameterization schemes in numerical weather prediction models[J]. Advances in Earth
 639 Science (in Chinese), 32(7):679-687. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.07.0679
- 640 麦子,张涛. 2020. 2020 年 5 月大气环流和天气分析[J].气象, 46(8):1122-1128. Mai Zi, Zhang
- Tao. 2020. Analysis of the May 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon (in
- 642 Chinese), 46(8):1122-1128. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.011
- 643 Mesinger F. 1993. Forecasting upper tropospheric turbulence within the framework of the
- Mellor-Yamada 2.5 closure[J]. Res. Activ. in Atmos. and Ocean. Mod., WMO, Geneva,
 CAS/JSC WGNE Rep. No. 18, 4.28-4.29.
- 646 Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of
- trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment
- 648 schemes[J]. Monthly Weather Review, 137(3):991–1007. doi:10.1175/2008MWR2556.1
- 649 Pleim J E. 2007. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer.
- 650 part I: model description and testing[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology.
- 651 46(9):1383-1395. doi: 10.1175/JAM2539.1
- 652 任华荣,高志球,李煜斌,等. 2017. 不同边界层方案对一次华北暴雨数值模拟的敏感性研究[J].
- 653 气象科学, 37(1):10-20. Ren Huarong, Gao Zhiqiu, Li Yubin, et al. 2017. Sensitivity study of
- 654 different boundary layer parameterization schemes on the numerical simulation of a rainstorm
- over North China. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 37(1):10-20.
- 656 doi:10.3969/2015jms.0065
- Smith O D, Barkmeijer J, Palmer T N. 2001. Model error in weather forecasting[J]. Nonlinear
 Processes in Geophysics, 8(6):357-371. doi:10.5194/npg-8-357-2001, 2001
- 659 Sukoriansky S, Galperin B, Perov V. 2005. Application of a new spectral model of stratified
- 660 turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice[J]. Boundary-Layer Meteorology.
- 661 117(2):231-257. doi:10.1007/s10546-004-6848-4
- 662 陶诗言等. 1980. 中国之暴雨[M].科学出版社. Tao Shiyan, et al. 1980. Rainstorms in
- 663 China[M]. Science Press (in Chinese).
- 664 Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J].
- 665 Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106(D7):7183-7192.

- 666 doi:10.1029/2000JD900719
- Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment[J]. Monthly
 Weather Review, 117(1):231–235. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2
- 669 Tao W K, Wu D, Lang S, et al. 2016. High-resolution NU-WRF simulations of a deep
- 670 convective-precipitation system during MC3E: further improvements and comparisons between
- 671 Goddard microphysics schemes and observations[J]. Journal of Geophysical Research:
- 672 Atmospheres, 121(3):1278-1305. doi:info:doi/10.1002/2015JD023986.
- 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]. Monthly
 Weather Review, 132(2):519-542. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2
- 676 Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation
- 677 using an improved bulk microphysics scheme. part II: implementation of a new snow
- 678 parameterization[J]. Monthly Weather Review, 136(12):5095–5115.
- 679 doi:10.1175/2008MWR2387.1
- Thompson G, Berner J, Frediani M, et al. 2021. A stochastic parameter perturbation method to
 represent uncertainty in a microphysics scheme[J]. Monthly Weather Review, 149(5):1481-1497.
- 682 doi:10.1175/MWR-D-20-0077.1
- Tian J Y, Liu R H, Ding L Q, et al. 2021. Evaluation of the WRF physical parameterisations for
- Typhoon rainstorm simulation in southeast coast of China[J]. Atmospheric Research,
 247:105130. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105130
- Tukey J W. 1949. Comparing individual means in the analysis of variance[J]. Biometrics,
 5(2):99-114. doi:10.2307/3001913
- 688 王洪,尹金方,王东海, 2014. 单双参云微物理方案对华南暴雨的模拟对比分析[J].高原气象,
- 689 33(005):1341-1351. Wang Hong, Yin Jinfang, Wang Donghai. 2014. Comparative analysis
- 690 of single-moment and double-moment microphysics schemes on a local heavy rainfall in South
- 691
 China[J].
 Pleteau
 Meteorology
 (in
 Chinese),
 33(005):1341-1351.

 692
 doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00119
 (in
 Chinese),
 33(005):1341-1351.
- 693 Wang C, Qian Y, Duan Q Y, et al. 2020. Assessing the sensitivity of land-atmosphere coupling 694 strength to boundary and surface layer parameters in the WRF model over Amazon[J].

- 695 Atmospheric Research, 234:104738. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104738
- Wang C, Qian Y, Duan Q Y, et al. 2021. Quantifying physical parameterization uncertainties
- 697 associated with land-atmosphere interactions in the WRF model over Amazon[J]. Atmospheric
- 698 Research, 262(6):105761. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105761
- 699 吴乃庚,温之平,邓文剑等. 2020. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J].气象科学, 40(5):605-616.
- 700 Wu Naigeng, Wen Zhiping, Deng Wenjian, et al. 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall
- during the first rainy season in South China[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in
 Chinese), 40(5):605-616. doi:10.3969/2020jms.0077
- 703 薛纪善. 1999. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 185pp. Xue Jishan.
- 704 1999. Study on the summer heavy rainfall in South China in 1994[M]. Beijing: China
 705 Meteorological Press (in Chinese), 185pp.
- 706 颜曦,赵军. 2018. 大气数值模式积云对流参数化方案综述[C]. 中国气象学会年会, Yan xi,
 707 Zhao Jun. 2018. A review of numerical atmospheric model cumulus convection
- parameterization schemes[C]. Annual meeting of the Chinese Meteorological Society (inChinese).
- 710 杨启东,吴涧,丹利,2021. Noah-MP 陆面过程模式对西双版纳热带雨林下垫面碳水热通量
- 711 的模拟评估 [J]. 高原气象, 40 (6): 1484-1496. Yang Qidong, Wu Jian, Dan Li,
- 712 2021. Assessment of the Noah-MP land surface process model simulation performance on the
- 713 carbon, water and heat fluxes of the Xishuangbanna tropical rain forest [J]. Plateau
- 714 Meteorology (in Chinese), 40(6):1484-1496. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk009
- 715 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
- 716 学位论文. Yin Jinfang. 2013. The study on observation and parameterization of 717 cloud-precipitation microphysical properties over East Asia[D]. Ph.D. dissertation (in Chinese),
- 718 ZhejiangUniversity,163pp.
- 719 袁招洪. 2015. 不同分辨率和微物理方案对飑线阵风锋模拟的影响[J]. 气象学报,
- 720 73(4):648-666. Yuan Zhaohong. 2015. Study of the influence of the different horizontal
- 721 resolutions and microphysical setups on the idealized simulation of a squall line[J]. Acta
- 722 Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(4):648-666. doi:10.11676/qxxb2015.049
- 723 Yussouf N, Stensrud D J. 2010. Comparison of single-parameter and multiparameter ensembles

for assimilation of radar observations using the ensemble kalman filter[J]. Monthly Weather

725 Review, 140(2):562-586. doi:10.1175/MWR-D-10-05074.1

- 726 张红杰,马清云,吴焕萍等. 2009. 气象降水分布图制作中的插值算法研究[J].气象,
- 727 35(11):131-136. Zhang Hongjie, Ma Qingyun, Wu Huanping, et al. 2009. Research on the
- 728 interpolation algorithm for meteorological precipitation choroplethic map[J]. Meteor Mon (in

729 Chinese), 35(11):131-136. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.11.017

- 730 Zhang C X, Wang Y Q. 2017. Projected future changes of tropical cyclone activity over the
- 731 western North and South Pacific in a 20-km-mesh regional climate model[J]. Climate,
 732 30(15):5923-5941. doi:10.1175/JCLI-D-16-0597.1
- 733 赵玉春, 王叶红. 2009. 近 30 年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害, 28(3):193-202,228.
- 734 Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2009. A review of studies on torrential rain during Pre-summer
- flood season in South China since the 1980's[J]. 2009. Torrential Rain and Disasters (in
- 736 Chinese), 28(3):193-202,228. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.03.001
- 737 周秀骥. 2003. 98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 228pp. Zhou Xiuji. 2003.
 738 A scientific experimental study of heavy rain in South China in 1998[M]. Beijing: China
 739 Meteorological Press (in Chinese), 228pp.
- 740 周志敏,崔春光,胡扬,等. 2021. 一次梅雨锋暴雨过程数值模拟的云微物理参数化敏感性研究
- 741 [J]. 大气科学, 45(6):1292-1312. Zhou Zhimin, Cui Chunguang, HU Yang, et al. 2021.
- 742 Sensitivity of microphysical parameterization on the numerical simulation of a Meiyu front
- heavy rainfall process[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6):
- 744 1292-1312. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21025
- Zhou Z M, Deng Y, Hu Y, et al. 2020. Simulating heavy Meiyu rainfall: A note on the choice of
 the model microphysics scheme[J]. Advances in Meteorology, 2020(5):1-17. doi:
 10.1155/2020/8827071
- 748 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2012. GB/T
 749 28592-2012,降水量等级[S]. 北京:中国标准出版社, 1-6. State General Administration of
 750 the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine,
- 751 Standardization Administration of the People's Republic of China. 2012. GB/T 28592-2012,
- 752 Grade of precipitation[S]. Standards Press of China (in Chinese), 1-6.