庞琦烨，平凡，沈新勇，等. 2019. 不同微物理方案对台风“彩虹”（2015）降水影响的比较研究 [J]. 大气科学, 43 (1): 202–220. Pang Qiye, Ping Fan, Shen Xinyong, et al. 2019. A comparative study of effects of different microphysics schemes on precipitation simulation for typhoon Mujigae (2015) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 202–220, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17291.

不同微物理方案对台风“彩虹”（2015）降水影响的比较研究

庞琦烨[1,2] 平凡[1,2] 沈新勇[1] 刘靓珂[1]

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044
2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室（LACS），北京 100029

摘 要 本文以 GFS 资料为初始场，利用 WRF（v3.6.1）模式对 2015 年第 22 号台风“彩虹”进行了数值研究。采用 CMA（中国气象局）台风最佳路径、MTSAT 卫星、自动站降水为观测资料，对比了 4 个微物理方案（Lin、WSM6、GCE 和 Morrison）对“彩虹”台风路径、强度、结构、降水的模拟性能。模拟发现上述 4 个云微物理方案都能较好地模拟出“彩虹”台风西行登陆过程，但是其模拟的台风强度、结构及降水存在较大差异；就水成物而言，除 GCE 方案对雨水的模拟偏高以外，其他方案对云水、雨水过程的模拟较为接近，其差异主要存在于云冰、雪、霰粒子的模拟上。本文对比分析了 WSM6 和 Morrison 两个方案模拟的云微物理过程，发现 WSM6 方案模拟的雪和霰粒子融化过程显著强于 Morrison 方案，但是冰相粒子间转化过程的强度明显弱于 Morrison 方案。云微物理过程的热量收支分析表明：WSM6 方案模拟的眼区潜热更强，暖心结构更为显著，台风中心气压更低。细致的云微物理转化分析表明，此次台风降水的主要云微物理过程是水汽凝结成云水和凝华为云冰；生成的云水一方面被雨水收集碰并直接转化为雨水，另一方面先被雪粒子碰并收集转化为霰，然后霰粒子融化成雨水；而生成的云冰则通过碰并增长转化为雪。小部分雪粒子通过碰并收集过冷水滴并淞附增长为霰粒子，随后融化为雨水，大部分雪粒子则直接融化形成地面降水。

关键词 台风降水 云微物理过程 数值模拟 “彩虹”台风
文章编号 1006-9895(2019)01-0202-19 **中图分类号** P435 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17291

A Comparative Study of Effects of Different Microphysics Schemes on Precipitation Simulation for Typhoon Mujigae (2015)

PANG Qiye[1,2], PING Fan[1,2], SHEN Xinyong[1], and LIU Liangke[1]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education* / *Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change* / *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms* (*LACS*), *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract Using GFS (Global Forecast System) data as the initial field, numerical simulations of typhoon Mujigae in

收稿日期 2017-11-29；**网络预出版日期** 2018-04-11
作者简介 庞琦烨，女，1993出生，硕士研究生，研究方向为台风中小尺度气象。E-mail: pangqiye@yeah.net
通讯作者 沈新勇，E-mail: shenxy@nuist.edu.cn
资助项目 国家重点研究发展计划项目2018YFC1506801，国家重点基础研究发展计划项目2015CB453201，国家自然科学基金项目41675059、41375066、41530427
Funded by National Key Resaerch and Development Program of China (Grant 2018YFC1506801), National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453201), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675059, 41375066, 41530427)

2015 were conducted using the WRF3.6.1 (Weather Research and Forecasting Model). A comparative study of four microphysical schemes (Lin, WSM6, GCE, and Morrison) with concerns of the simulated typhoon track, intensity, precipitation, and contents of hydrometeors were carried out using the best track dataset from CMA (China Meteorological Administration), MTSAT satellite data, and precipitation data collected at automatic weather stations. It is found that all the four cloud microphysical schemes can well simulate the westward movement and landfall of the typhoon. However, the simulated typhoon intensity, structure, and precipitation are quite different using the four different cloud microphysics schemes. In terms of the water content, precipitation is overestimated by the GCE scheme, while the other three schemes yield similar simulations of cloud water and rain. This result indicates that the differences among the schemes mainly exist in the simulation of cloud ice, snow, and graupel particles. Comparing the cloud physical transformation processes simulated by the WSM6 and Morrison scheme, it is found that the simulation of melting snow and graupel particles by the WSM6 scheme is better than that by the Morrison scheme, whereas the simulated strength of the conversion process between ice phase particles is weaker than that by the Morrison. The heat budget analysis for cloud microphysical process shows that strong diabatic heating is more concentrated over the eye area in the WSM6 scheme, which results in stronger warm core structure and lower central pressure than in other schemes. Detailed analysis of cloud microphysical conversion shows that the main cloud microphysics process involved in typhoon precipitation is the condensation and/or sublimation of water vapor into cloud water and/or cloud ice. The cloud water is then partly accreted directly into rainwater, and partly accreted by snow particles and form graupels, which finally become rainwater as the graupel particles descend to the melting layer. Through accretion, the cloud ice is converted into snow, while part of the snow particles collect super-cooled water droplets and rim into graupels, which then melt into rain. A considerable part of snow particles directly melt to form precipitation.

Keywords Typhoon rainfall, Cloud microphysical process, Numerical simulation, Typhoon Mujigae

1 引言

近年来的统计分析表明：在海南岛及台湾地区台风降水占其全年降水的 40%以上，华南及华东大部分地区的台风降水贡献率约在 30%～40%，华中地区的部分降水也与台风水汽的远距离输送有关（王咏梅等，2008）。登陆台风引发的暴雨不仅会造成严重的灾害，还往往伴随着山洪暴发、山体滑坡等次生灾害,每年都给我国造成巨大的经济损失和人员伤亡（程正泉等，2005）。近年来，随着外场试验加密资料的增多、资料同化及中尺度数值模拟关键技术的迅速发展，我国对台风降水的预报能力有了一定程度的提高，这为研究不同微物理过程对台风降水的影响提供了可能。

对强降水的预报一直是天气预报的难点问题，一个关键原因是对强降水中云微物理过程的作用及影响机制缺乏深入了解，特别是不同的微物理方案对强降水的模拟存在不确定性。目前云微物理对台风路径及强度的影响已有大量研究成果。Yang and Ching（2005）在 MM5 模式下采用多组物理参数化实验模拟台风 Toraji（2001），发现不同的微物理方案模拟的台风路径差别较小，但是其对台风强度、结构和降水的模拟能力差别较大，具有“个例依赖”的特征（李响，2012）。Tao et al.（2011）利用 WRF 模式进行了不同微物理参数化方案的敏感性研究，发现单纯的暖云方案由于不考虑云滴的蒸发冷却及冰颗粒的融化，使得模拟的下沉气流偏弱，从而导致台风气压下降迅速，强度偏强。Franklin et al.（2005）研究了热带气旋对冰相微物理参数的敏感性，发现数值模式对霰下降速度参数的变化最为敏感。

近年来的研究主要集中在云微物理过程对台风降水的影响上。杨文霞等（2010）在非静力中尺度模式 ARPS 下，研究了 Wipha 台风各阶段的暴雨云微物理过程特征，指出冷云降水过程对不同阶段台风暴雨的形成至关重要；花丛和刘奇俊（2013）以 0716 台风“罗莎”为例，利用 GRAPES 中尺度模式模拟后提出：不同的微物理过程下台风的云系结构差异明显，其中霰粒子在维持地面降水以及螺旋雨带的强度方面作用显著；邓琳等（2016）对比了单参数 WSM6 云方案和双参数 WDM6 云方案对“威马逊”台风的模拟效果，认为 WDM6 方案对云滴活化、云雨转换及云、雨谱型有一定的改进，其能较合理地模拟出雨滴谱随台风发展的演变特征。

综上所述，目前有关云微物理对台风降水影响的研究，还缺乏一致的、确定的结论，特别是缺乏不同云微物理方案对台风降水模拟的比较研究。事实上，不同微物理过程会影响台风眼区的对流分布和三维结构，进而影响台风降水的强度及区域。同

时，云微物理过程的潜热释放会对台风眼区的加热分布及暖心结构产生重要影响。因此本文以 2015 年登陆我国广东省的 1522 号台风“彩虹”为研究个例，采用不同的微物理方案模拟研究了台风“彩虹”的强降水过程，比较研究了不同微物理方案对“彩虹”台风降水路径、强度、结构及台风降水的影响，诊断分析了不同方案对台风的模拟性能，揭示了云微物理过程影响台风降水的可能机制,以期加深云微物理过程对台风降水影响的科学认识，为台风降水的模拟和预报提供思路。

本文的组织结构概括如下：一是引言；二是“彩虹”台风发生的天气环境背景及数值模拟实验的配置；三是模拟结果的诊断分析；四是云微物理过程影响台风的可能机制分析；五是结论和讨论。

2 “彩虹”台风天气环流形势分析及数值模拟配置

2.1 “彩虹”台风过程概况

“彩虹（Mujigae）”台风是建国以来 10 月登陆广东的最强台风，具有移动速度快、近海加强剧烈、降水强度大的特点。台风于 2015 年 10 月 1 日 18 时（协调世界时，下同）在吕宋岛以东洋面生成，2 日 02 时增强为热带风暴，04 时升格为强热带风暴，22 时升格为台风并在 3 日 10 时到达强台风级别。4 日 06:10，台风在坡头区沿海登陆，中心附近最大风速为 50 m s^{-1}，中心最低气压达 935 hPa。于此同时，台风外围环流触发的小尺度龙卷自东南向西北影响佛山、顺德、汕尾等地（李彩玲等，2016）。“彩虹”登陆后继续向西北移动，在 4 日 10 时进入广西省境内，强度减弱为台风，5 日 03 时中央气象台对其停止编号（郭浩鑫等，2016）。台风共造成 747.9 万人受灾，19 人死亡，直接经济损失超过 250 亿元。

此次“彩虹”所带来的降水以 2015 年 10 月 5 日 03 时为界主要分两个阶段（黄巾旗等，2017）：第一阶段是 5 日 03 时之前的台风自身环流引起的降水，第二阶段则为台风减弱形成的槽式环流和冷空气配合下的降水。本文主要着眼于台风登陆时自身环流引发的降水，进行不同微物理方案的模拟对比，进而揭示云微物理过程对台风特别是台风降水影响的可能机制。

2.2 天气环流形势分析

本节运用 GFS（Global Forecast System）再分析资料分别考察台风远海（2 日 00 时）及登陆前（4 日 06 时）的大气环流场（图 1），回顾了台风生命史中关键时期的天气形势。

图 1a、d 分别为 2015 年 10 月 2 日 00 时与 4 日 06 时瞬时的 200 hPa 位势高度场及风场叠加。可以看到，在 2 日 00 时北半球中高纬为两脊一槽的经向型环流分布，外兴安岭到鄂霍次克海上空为深厚的切断低压；南亚高压中心位于（23°N，85°E）附近，主体偏西偏南；高空急流的轴线位于 40°N 附近；“彩虹”台风位于（16°N, 120°E），对应着 200 hPa 的反气旋外围环流区（图 1a）。到 4 日 06 时，中高纬环流由经向型转为纬向型分布；高空急流收缩变窄，轴线位于 40°N 附近；南亚高压主体东移到 120°E 附近，有利于中层副热带高压的西伸；“彩虹”高层对应着南亚高压中心，高层辐散出流条件好（图 1d）。这种高层辐散配合低层的气旋式辐合流入有利于气流在眼墙及螺旋云带中的快速上升，为台风降水提供了有利的动力条件。

图 1b、e 分别为 2015 年 10 月 2 日 00 时与 4 日 06 时 500 hPa 瞬时位势高度场及风场叠加。2 日 00 时外兴安岭至鄂霍茨克海的切断低压发展旺盛，东亚大槽主体位于海上，从（50°N，130°E）延伸到（30°N，120°E）附近；强大的西太平洋副热带高压（以下简称副高）的中心位于 140°E，5920 gpm 等位势线延伸到台湾岛东部洋面，在 500 hPa 可以清楚地看到台风闭合环流（图 1b）。到 4 日 06 时，随着中高纬低压的东移，槽东移北抬，斜压性增强；伴随着高层南亚高压的东移，副高加强西伸，西伸脊点达到了到 110°E；“彩虹”位于副高 5920 gpm 线的西南侧，受副高阻挡及中高纬度环流配置影响，台风保持西北行并未发生转向（图 1e）。

图 1c、f 分别为 2015 年 10 月 2 日 00 时与 4 日 06 时 850 hPa 位势高度场及水汽通量的叠加。2 日台风的水汽来源主要有两个，一是越赤道气流带来的暖湿空气，二是西南季风下的西南暖湿空气。此时充沛的水汽输送有利于台风的进一步发展加强（图 1c）。到了 4 日，随着台风的移动，其纬度变高，越赤道气流的水汽输送变得不重要。从孟加拉湾经中南半岛的强大西南水汽开始向“彩虹”输入，同时副高西南侧的东南水汽通道也已打通。这两支强大的西南水汽、东南水汽源源不断地向台风输送，为台风提供了重要的能量以及水汽来源，是“彩虹”近海加强的重要因素，此阶段水汽主要集中在台风的

东北部（图 1f）。

在“彩虹”生命史中的高低层天气形势有利于台风的发生发展：受到副高南侧稳定且强劲的东南气流引导，“彩虹”快速向西北方向移动，路径十分稳定未发生转折。同时南亚高压的位相变化有利于副高的西伸，高层辐散出流与低层辐合的配合产生了强的上升运动。西南气流和水汽输送以及低层弱冷空气的卷入导致“彩虹”出现近海加强现

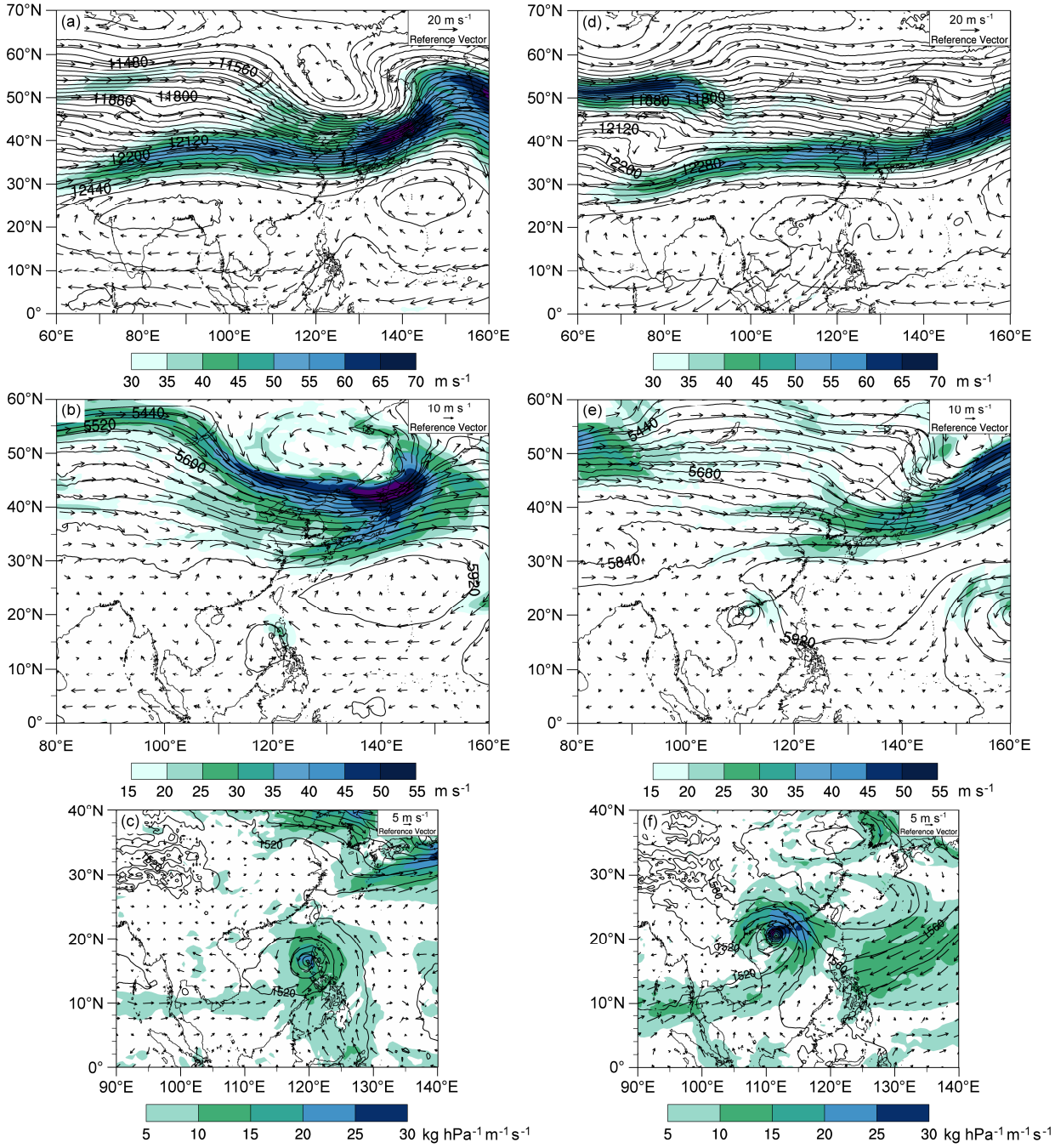

图 1　（a–c）10 月 2 日 00 时（协调世界时，下同）、（d–f）10 月 4 日 06 时环流形势场：（a、d）200 hPa 风场（矢量，单位：m s^{-1}）、位势高度场（黑色等值线，单位：gpm）、高空急流（填色，单位：m s^{-1}）；（b、e）500 hPa 风场（矢量，单位：m s^{-1}）、位势高度（黑色等值线，单位：gpm）、大风区（填色，单位：m s^{-1}）；（c、f）850 hPa 风场（矢量，单位：m s^{-1}）、位势高度（黑色等值线，单位：gpm）、水汽通量（填色，单位：kg hPa^{-1} m^{-1} s^{-1}）

Fig. 1　Circulation patterns at (a–c) 0000 UTC 2 October and (d–f) 0600 UTC 4 October 2015: (a, d) 200-hPa wind (vectors, units: m s^{-1}), 200-hPa geopotential height (black contours, units: gpm), 200-hPa high-level jet (shadings, units: m s^{-1}); (b, e) 500-hPa wind (vectors, units: m s^{-1}), 500-hPa geopotential height (black contours, units: gpm), 500-hPa strong wind areas (shadings, units: m s^{-1}); (c, f) 850-hPa wind (vectors, units: m s^{-1}), 850-hPa geopotential height (black contours, units: gpm), 850-hPa water vapor fluxes (shadings, units: kg hPa^{-1} m^{-1} s^{-1})

象并引发降水过程。

2.3 数值模拟设计及微物理方案简介

以 GFS 再分析资料（0.5°×0.5°）及 NCAR（National Center for Atmospheric Research）的海温资料为背景初始场，运用 WRF（Weather Research and Forecasting Model）V3.6.1 数值模式对“彩虹”台风进行数值模拟。模拟时间从 2015 年 10 月 2 日 00 时至 5 日 00 时，该时段包含了台风发展、加强以及登陆广东后西北移动的过程，详细的模式配置方案见表 1。模拟采用双层嵌套，具体嵌套区域见图 2。

表 1 WRFV3.6.1 模式配置

Table 1 Configuration of WRFV3.6.1 (Weather Research and Forecasting Model)

名称	描述
背景场	GFS 再分析资料（0.5°×0.5°）；NCAR 海温资料
模拟区域	D01: 361×301×51；D02: 637×574×51
中心点	（20°N, 113°E）
水平分辨率	10 km；3.33 km
垂直顶高	50 hPa
垂直层数	51
微物理参数化方案	Lin 方案；WSM6 方案；GCE 方案；Morrison 方案
积云参数化方案	Kain-Fritsch
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
陆面参数化方案	Noah
行星边界层方案	Yonsei

目前 WRF 模式中有 Kessler、Lin scheme、WSM5（WRF Single-Moment 5 class scheme）、WSM6（WRF Single-Moment 6 class scheme）、Goddard Gce、Morrison Double-moment 等十余种物理方案。本文设计四组试验对比了单参、双参云微物理方案对“彩虹”台风的模拟性能，分别为 Lin 方案、WSM6 方案、GCE 方案以及 Morrison 方案。其中前三个方案属于单参方案，Morrison 方案为完全双参方案。除云微物理方案选取不同之外，其余的模拟参数设置完全一致。

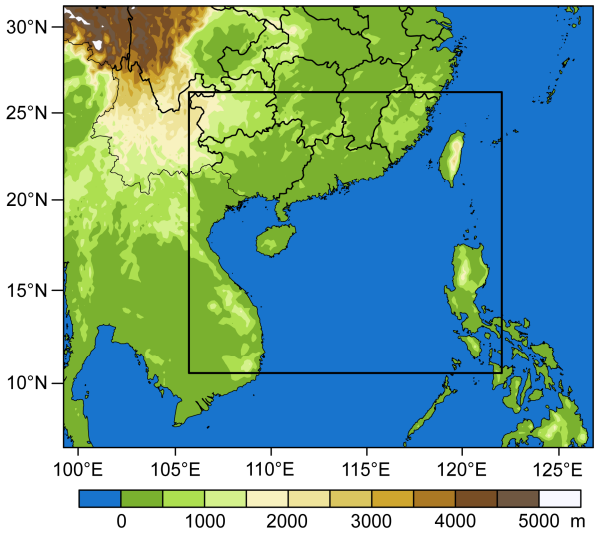

图 2 模拟区域示意图，阴影表示地形高度（单位：m）

Fig. 2 Model domain for numerical simulation, shadings indicate terrain height (units: m)

四种方案对降水的预报量一致，暖性降水预报量都包含水汽混合比（q_v）、云水混合比（q_c）、雨水混合比（q_r），冷性降水的预报量包括云冰混合比（q_i）、雪混合比（q_s）、霰混合比（q_g）。此外 Morrison 方案还增加了相应的数浓度预报，详细预报量见表 2。

表 2 数值试验云微物理方案的预报量

Table 2 Forecast variables of cloud microphysical schemes in numerical simulation

方案名称	方案预报量
Lin 方案（单参）	q_v、q_c、q_r、q_i、q_s、q_g
WSM6 方案（单参）	q_v、q_c、q_r、q_i、q_s、q_g
GCE 方案（单参）	q_v、q_c、q_r、q_i、q_s、q_g
Morrison 方案（完全双参）	q_v、q_c、q_r、q_i、q_s、q_g/n_c、n_i、n_s、n_r、n_g

注：n_c、n_i、n_s、n_r、n_g 分别表示云水数浓度、冰晶数浓度、雪数浓度、雨水数浓度、霰粒子数浓度。

Lin 方案考虑了 22 种微物理过程，是 WRF 模式中相对成熟的方案，适用于实时数据的高分辨率模拟。它的参数化选项是基于 Lin et al.（1983）以及 Rutledge and Hobbs（1984）提出的参数化方案。Tao et al.（1989）在原先的 Lin 方案上增加了饱和修正方案，从而确保了在一个清晰（混沌）的网格点上不存在过饱和（半饱和）状态。该方案中，当温度（T）低于结冰点（$T<-40$°C）时，云水（雨水）全部处理为云冰（雪）；$T>0$°C 时云冰全部处理为云水；当温度在二者之间时云水、云冰、雨水、霰、雪五种物质并存。

WSM6 方案在 WSM3 及 WSM5 方案的基础上加入了固态水成物霰粒子预报。WSM6 中基本的微物理过程与 Lin 方案类似。运用 Dudhia（1989）及 Hong et al.（1998）的方案分别处理水和冰的饱和过程。该方案将雪粒子的截距参数修改为温度的函数，在粒子下降过程中考虑凝结、融化过程，并采用雪和霰的单一下落速度值，从而提高了过程加热项的计算精度。通过在小步长中计算冰晶的动力沉降，进一步降低了方案对时间步长的敏感度。通过

碰并过程及经验参数的改进，该方案在美国的 4KM 预报模式中的表现优于 Lin 方案（Hong et al., 2009）。

Goddard Gce 方案是美国宇航局戈达得太空飞行中心发展的体积水方案。它的参数化方案基础与 Lin 方案相同，主要进行了四项改进：一是设置了选项开关来选择霰粒子或雹粒子作为第三类冰粒子；二是运用 Tao et al.（1989）的饱和技术，更好地解决了饱和问题；三是所有的微物理过程都在相同的热力学状态下进行计算，以保证所有过程得到平行的处理而不是按次序先后计算，从而降低了对霰粒子的偏高估计；四是修改了沉降过程的计算方式，以保证微物理循环中水成物收支平衡，为模拟获得更真实的冰项水成物提供了保证（Tao et al., 2014）。

Morrison 双参方案是四种方案中开发时间最短的（Morrison and Pinto, 2005）。作为完全双参方案，它显式求解云中的过饱和度和凝结、凝华项，考虑了包括核化、繁生、碰并等 40 种云物理过程。该方案设置了多个过程开关，例如可以选择开启或关闭冰项过程，云滴的数浓度可设定为常数或采用预报的云滴数浓度等。方案考虑了水成物质量浓度和数浓度，可用来考察气溶胶谱变化对降水天气过程的影响，应用较为广泛（沈新勇等，2015）。

上述四种方案作为目前高分辨数值模式中常用的方案，各有特点，因此本文选这四种方案进行比较研究。

3 数值试验结果诊断分析

基于上述的模式参数方案设置，本节主要分析了台风路径、强度、台风眼区对流结构及螺旋云带的时空演变，特别是登陆期间台风降水的时空分布特征，对比分析了不同微物理方案对台风模拟的效果。

3.1 台风路径及强度

采用中国气象局（CMA）上海台风所发布的台风最佳路径观测资料对数值模拟结果进行检验。总体而言所有的数值试验方案都较成功地模拟出了“彩虹”西北移动的过程，不同方案间的差异较小。由观测及模拟的台风路径（图 3a）可知：Morrison 方案（绿）除了最后两个时次偏南外，对登陆台风的路径模拟效果最好，与实况（黑）基本重合。其余三种方案模拟的路径都有不同程度的北偏。就登陆点模拟而言，Lin 方案（紫）、WSM6 方案（红）、Morrison 方案（绿）的登陆点都接近实况，几乎没有时滞。

台风强度运用台风中心气压和近地面最大风速表示，对模拟与实况进行对比（图 3b、c）。如图 3b 所示，模拟与观测的台风中心气压随时间的演变趋势基本一致。其中 WSM6 方案模拟出了 4 日 06 时台风的最低气压值 938 hPa，与观测的最低值 935 hPa 仅偏差 3 hPa。Lin 方案模拟的中心最低气压略低于观测，出现时间比实况提早 6 h。值得注意的是：在 2～3 日期间，所有模拟方案的模拟效果相似，3 日 00 时后各方案模拟的中心最低气压差异增大，Lin 方案与 GCE 方案模拟的差值到达了 35 hPa。从图 3c 中可以看出：不论是是实况还是模拟的近地面最大风速都呈现出先增强后减弱的趋势。各模拟方案下的最大风速都出现在 4 日 00 时左右。与图 3b 类似，各方案模拟的最大风速之间的差异在 3 号以后愈发显著，而该阶段正对应着台风的近海快速增强。方案对快速发展的前期（2～3 日）风速模拟都偏大，偏差在 10 m s^{-1} 左右。

综合以上的对比可知，4 组试验都较好地再现了“彩虹”生命史中路径、气压以及风速的变化趋势。WSM6 方案的整体模拟效果最接近实况；Lin 方案次之，主要是由于该方案模拟下的最低气压及最大风速出现时间要早于实况；而 GCE 方案对此次过程的模拟效果与实况最不贴近。

3.2 台风登陆前结构

对于成熟的热带气旋而言，其结构包括少云的眼区、对流活动深厚的眼墙以及外围的螺旋云带。图 4 给出了美国海军实验室（United States Naval Research Laboratory）合成的 MTSAT 卫星红外云图叠加 SSMI85GHz（weak）频道红外亮温图，以及各试验模拟的雷达反射率分布。85GHz（weak）通道增强了较暖粒子的信息，能有效探测水汽、云水和雨水成物的分布，冰相粒子越多，则该通道亮温越低（傅云飞等，2007）。

本节主要比较了不同微物理方案对台风结构及对流活动的影响。图 4a–d 分别为“彩虹”台风登陆前快速增强阶段的眼区和螺旋云带的分布。2015 年 10 月 2 日 20 时 29 分，台风眼墙及螺旋云带中的对流已经发展得很旺盛，从卫星图上能看到清晰的眼墙以及螺旋云带结构，其中南侧的螺旋云带相对集中（图 4a），此时台风眼区尚未闭合；到了 3 日 07 时 11 分，螺旋云带进一步发展，大于 50

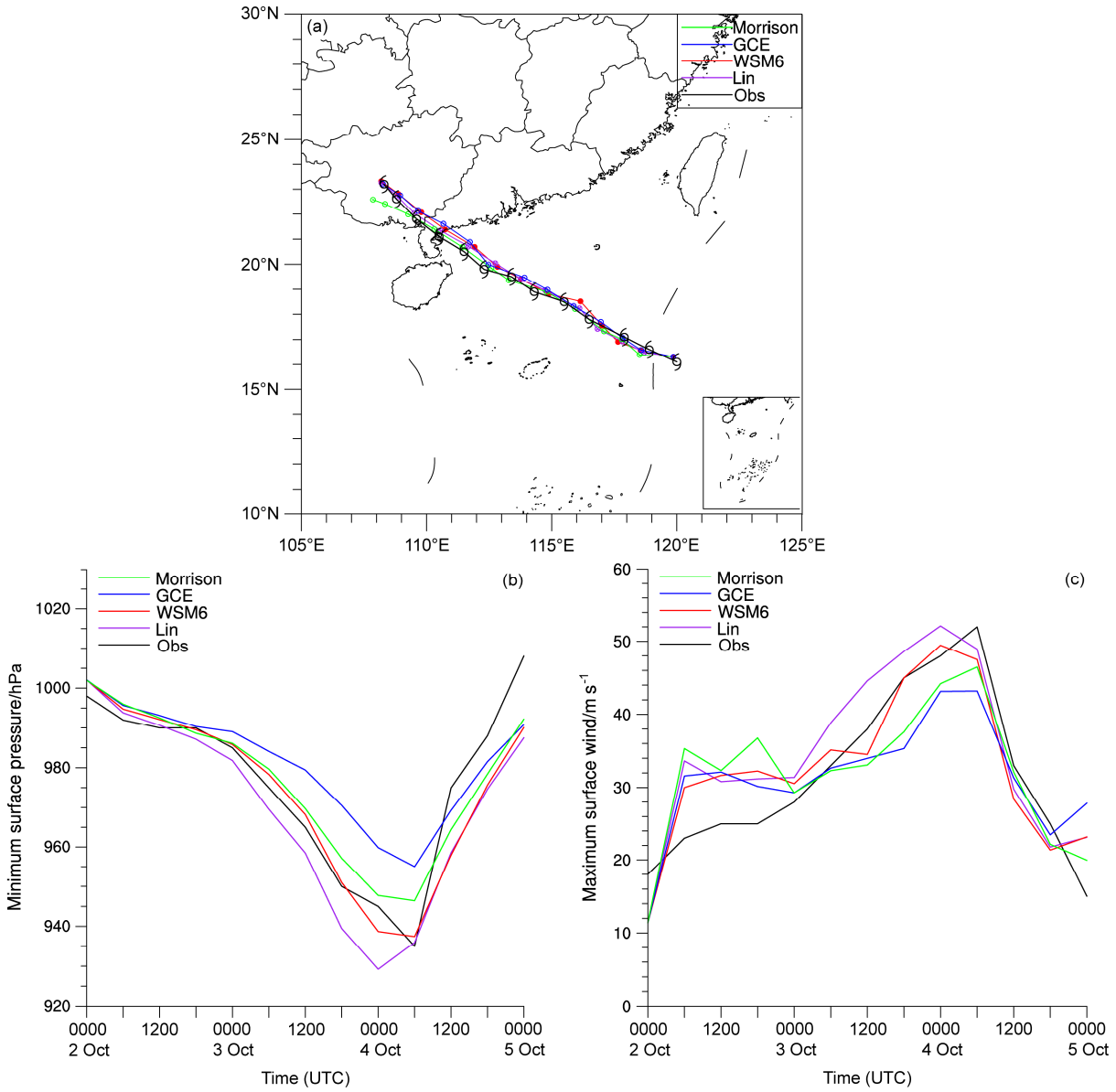

图 3 2015 年 10 月 2 日 00 时到 5 日 00 时（间隔 6 h）台风“彩虹”的 CMA 实况观测和四个模拟方案的模拟：（a）路径；（b）中心海平面最低气压（单位：hPa）；（c）海平面最大风速（单位：m s^{-1}）

Fig. 3 Typhoon Mujigae's (a) Tracks, (b) minimum central sea level pressures (units: hPa), (c) maximum surface wind speeds (units: m s^{-1}) observed by the CMA (China Meteorological Administration) and simulated by four schemes from 0000 UTC 2 October to 0000 UTC 5 October 2015 (the interval is 6 h)

dBZ 的回波区域增大，南侧眼墙的对流发展旺盛，台风眼区由非对称逐步向对称分布发展（图 4b）；3 日 11 时 42 分台风眼区收缩，且呈现出闭合的眼区结构，强对流区域主要分布在眼区的东侧（图 4c）；3 日 19 时 42 分，眼区进一步收缩，南侧眼墙对流发展强盛，改变了原来较为对称的眼墙结构。原本处于眼区南侧的较强的螺旋雨带减弱（图 4d）。

分别选取四个时次：2 日 18 时、3 日 06 时、12 时及 18 时的模拟雷达反射率与实时卫星观测进行对比。通过对比可知：除了 GCE 方案对四个时刻的台风结构模拟效果偏强较多以外，四个方案都较好地模拟出了台风登陆前处于近海海域时的眼区由非对称到对程的结构变化及螺旋雨带的发展、生消过程。这为下文进一步考察模拟的降水分布奠定了基础。

3.3 台风登陆期间的降水

在对比台风路径强度及结构的基础上，运用中国气象数据网（http://data.cma.cn/ [2018-03-01]）的

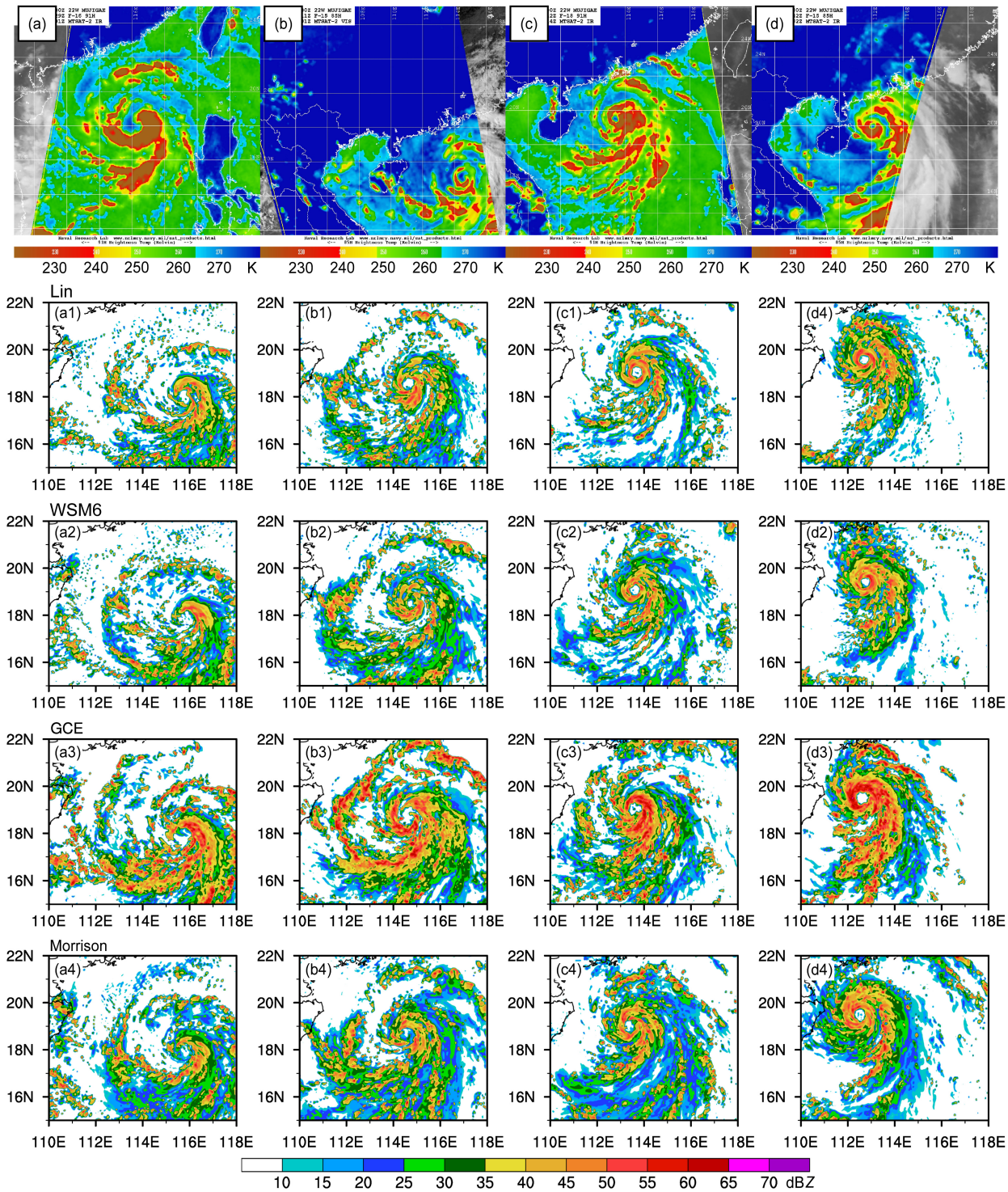

图 4　（a–d）MTSAT 卫星红外云图、SSMI85GHz（weak）频道的红外亮温叠加（单位：K）与（a1–d4）模拟雷达回波对比。实况：（a）2 日 22:06；（b）3 日 07:11；（c）3 日 11:42；（d）3 日 19:42。Lin 方案模拟的雷达组合反射率（单位：dBZ）：（a1）3 日 00:00、（b1）3 日 06:00、（c1）3 日 12:00、（d1）3 日 18:00；与（a1–d4）对应时刻的（a2–d2）WSM6 方案模拟、（a3–d3）GCE 方案模拟、（a4–d4）Morrison 方案模拟的雷达组合反射率

Fig. 4　Comparisons between (a–d) MTSAT satellite infrared cloud image overlapped with the weak channel (SSMI85GHz) infrared bright temperature (units: K) and (a1–d4) radar echoes simulated by four schemes. Observation: (a) 2206 UTC 2 October; (b) 0711 UTC 3 October; (c) 1142 UTC 3 October; (d) 1942 UTC 3 October. Simulated radar composite reflectivity (units: dBZ) by the Lin scheme at (a1) 0000 UTC 3 October, (b1) 0600 UTC 3 October, (c1) 1200 UTC 3 October, (d1) 1800 UTC 3 October. Simulated radar composite reflectivity by (a2–d2) the WSM6 scheme, (a3–d3) the GCE scheme, (a4–d4) the Morrison scheme at the corresponding time in (a1–d4)

自动站与 cmorph 降水融合资料考察台风降水特征，进一步对比模拟与实况的降水。由于该资料仅在陆地上有数值，因此选取“彩虹”登陆当天 10 月 4 日作为研究时间段。

图 5 为 10 月 4 日 06 时、12 时、18 时及 24 时的 6 h 累计降水实况及四个方案模拟降水分布。降水实况中，强降水中心在前期主要出现在湛江、茂名两市（图 5a）；随后在雷州半岛和珠江三角洲以西出现两个降水中心（图 5b）；到了 18 时随着台风的登陆西行，强降水中心西移到广西（图 5c）；5 日 00 时的累积降水大值中心西移北抬，同时沿海的降水依然充沛（图 5d）。反观四组高精度模拟试验方案，GCE 方案对 4 日台风的强降水中心模拟效果较差，其余方案基本刻画出了降水中心的空间分布及随时间的演变。由于各个方案对台风的位置模拟不同，使得各方案的强降水中心与实况位置稍有偏差。

进一步考察台风降水量级，模拟的降水量都较实况的格点降水偏高，均出现了大于 100 mm 的降水中心，其中以 GCE 方案模拟的降水强度最大（图 5a3–d3）。对所有方案降水量进行降水区域（20°N～23.5°N, 109°E～113.8°E）平均可知：四个方案模拟

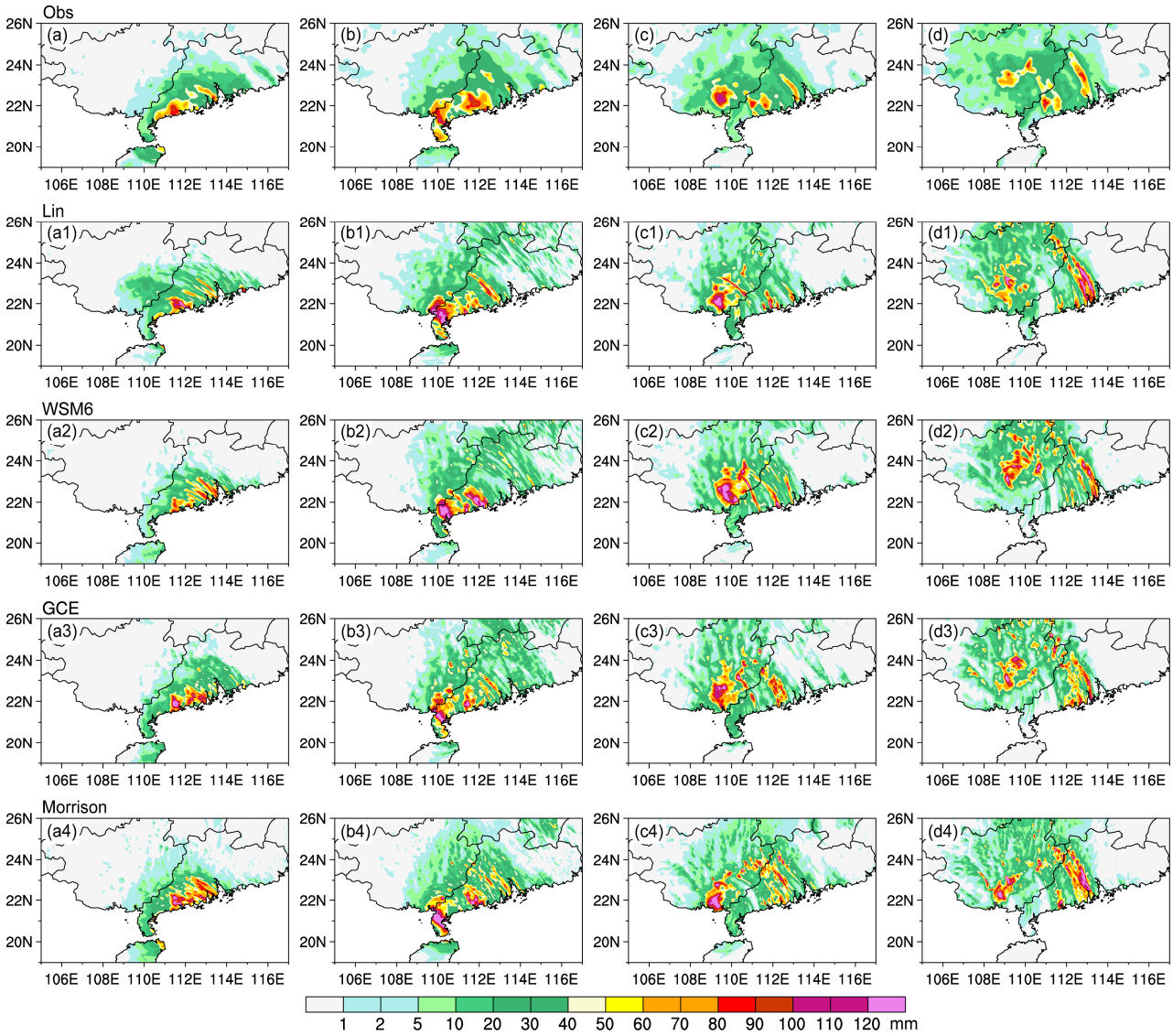

图 5 2015 年 10 月 4 日（a, a1–a4）06 时、（b, b1–b4）12 时、（c, c1–c4）18 时、（d, d1–d4）5 日 00 时的地面 6 h 累积降水量（单位：mm）分布：（a–d）实况；（a1–d1）Lin 方案模拟；（a2–d2）WSM6 方案模拟；（a3–d3）Gac 方案模拟；（a4–d4）Morrison 方案模拟

Fig. 5 Accumulated 6-h precipitation (units: mm) from (a–d) observations, (a1–d1) simulations by the Lin scheme, (a2–d2) simulations by the WSM6 scheme, (a3–d3) simulations by the GCE scheme, (a4–d4) simulations by the Morrison scheme at (a, a1–a4) 0600 UTC 4 October, (b, b1–b4) 1200 UTC 4 October, (c, c1–c4) 1800 UTC 4 October, (d, d1–d4) 0000 UTC 5 October 2015

的 4 日当天区域平均降水数值与实况接近。尽管 Morrison 方案对台风强度模拟效果差强人意，其对降水量的模拟与实况最为接近。偏差最大的是 GCE 方案的 18.1 mm，比实况偏大了 2.7 mm（表 3）。在数值模式中，地面累计降水由底层雨水通量计算得到，是云微物理过程的最终输出量。因此云中水成物的分布及降水中微物理转化过程的差异有时并不能直接体现在降水量的大小上。下文主要从微物理转化及雨水收支层面来考察对比不同方案下的微物理过程。

表 3 2015 年 10 月 4 日区域平均累积降水量（单位：mm）
Table 3 Area averaged cumulative precipitation (units: mm) on 4 October 2015

方案名称	区域累积降水量/mm
实况	15.6
Lin 方案	16.4
WSM6 方案	16.9
GCE 方案	18.1
Morrison 方案	15.5

4 云微物理过程对台风降水影响的机制分析

4.1 不同微物理方案下水成物垂直分布情况

云微物理过程中，水成物的分布在很大程度上反映了湿物理过程中水汽与降水粒子之间相互转换的热力动力过程（许广等，2017）。开展云微物理过程特别是水成物的分析，有助于了解台风降水的机制。

运用数值模式的模拟结果对“彩虹”台风暴雨云微物理过程进行分析，主要关注了 2 日 00 时至 5 日 00 时云中水成物分布和各种水成物之间的云微物理转化过程随时间的演变。图 6 给出了 10 月 2 日 00 时到 10 月 5 日 00 时平均的台风主体云中水成物垂直剖面分布。具体做法选取台风中心最低气压所在位置±20 格距（200 km）范围作为台风主体，再进行区域面平均。从图 6 中可以看出，从 3 日 00 时开始，云中水成物含量与前期相比均明显增多。雨水主要分布于 0°C 层之下（图 6a1–d1），且以 GCE 方案模拟的雨水数值最大，这与表 2 得到的该方案模拟降水偏多一致；云水的最大值中心位于 0°C 层以下，在 0°C 层之上存在着相当数量的过冷水（图 6a2–d2）。以 Lin 方案的云系发展最为高大，云水高度达到了 11 km。GCE 方案下的低云发展旺盛，云水含量高达 0.36×10^{-5} g kg^{-1}，这可能与该方案下云内下沉速度比其他方案大有关；固态水成物霰（图 6a3–d3）、雪（图 6a4–d4）以及云冰（图 6a5–d5）主要分布于 0°C 层之上，这三者的最大值中心以云冰的高度最高，雪粒子次之，霰粒子所在的高度最低。值得注意的是：Lin 方案下雪粒子的含量明显偏少，极值出现的高度则是所有方案中最高的。Morrison 方案中的云冰含量几乎是其他方案的三倍，冰晶效应显著。

进一步分析不同微物理方案中水成物垂直分布及各自的量级情况。图 7 显示的是登陆当天 00 时至 06 时 6 h 的水成物垂直分布廓线，物理量的计算方法是该时间段内台风主体范围内水成物累计量。可以清楚看出垂直方向为三层云结构：12 km 附近冰晶集中层，7 km 雪霰混合最大值层，云水和雨水主要分布在 6 km 以下的暖区。对于液态水成物即雨水、云水而言，除 GCE 方案对雨水的模拟偏高以外，各方案的 q_r 和 q_c 廓线分布大体一致。这表明各方案对暖雨过程模拟近似，差异主要存在于对固态水成物（云冰、雪、霰）的模拟上。

与剖面图（图 6）类似的，对于雪廓线，Lin 方案的模拟值最小（图 7a），仅为 0.03 g kg^{-1}，且最大值出现高度为 10 km。其他方案模拟最大值出现在 7～8 km，其中 Morrison 方案的雪混合比最大，达到了 0.23 g kg^{-1}。在霰廓线中，四个方案模拟的最大值出现高度比较一致，但方案之间的极大值仍有差异。相较于雪和霰，不同方案模拟的云冰最大值出现高度最为一致，基本都出现在 11 km。然而 Morrison 方案下云冰的最大值达到了 0.21 g kg^{-1}，明显大于其他方案。综上所述，Lin、WSM6 及 Morrison 这三个方案中都是冰相粒子混合比占比最高。虽然 GCE 方案中冰项水成物混合比数值并不小，但它的特点在于雨水混合比是所有水成物中最大的，超过了任何一项冰项水成物，这表明该方案的雨水转化率高。

4.2 云微物理转化项

研究表明，强降水主要发生在冰水混合云中，即冰相粒子的存在对强降水的形成有重要作用（王在志和闫敬华，2007），因此，需要着重讨论固态水成物的具体收支情况，以比较方案对台风降水的模拟差异。

为深入揭示不同方案的冰相水成物含量存在差异的原因，选取 WSM6 及 Morrison 作为单参、

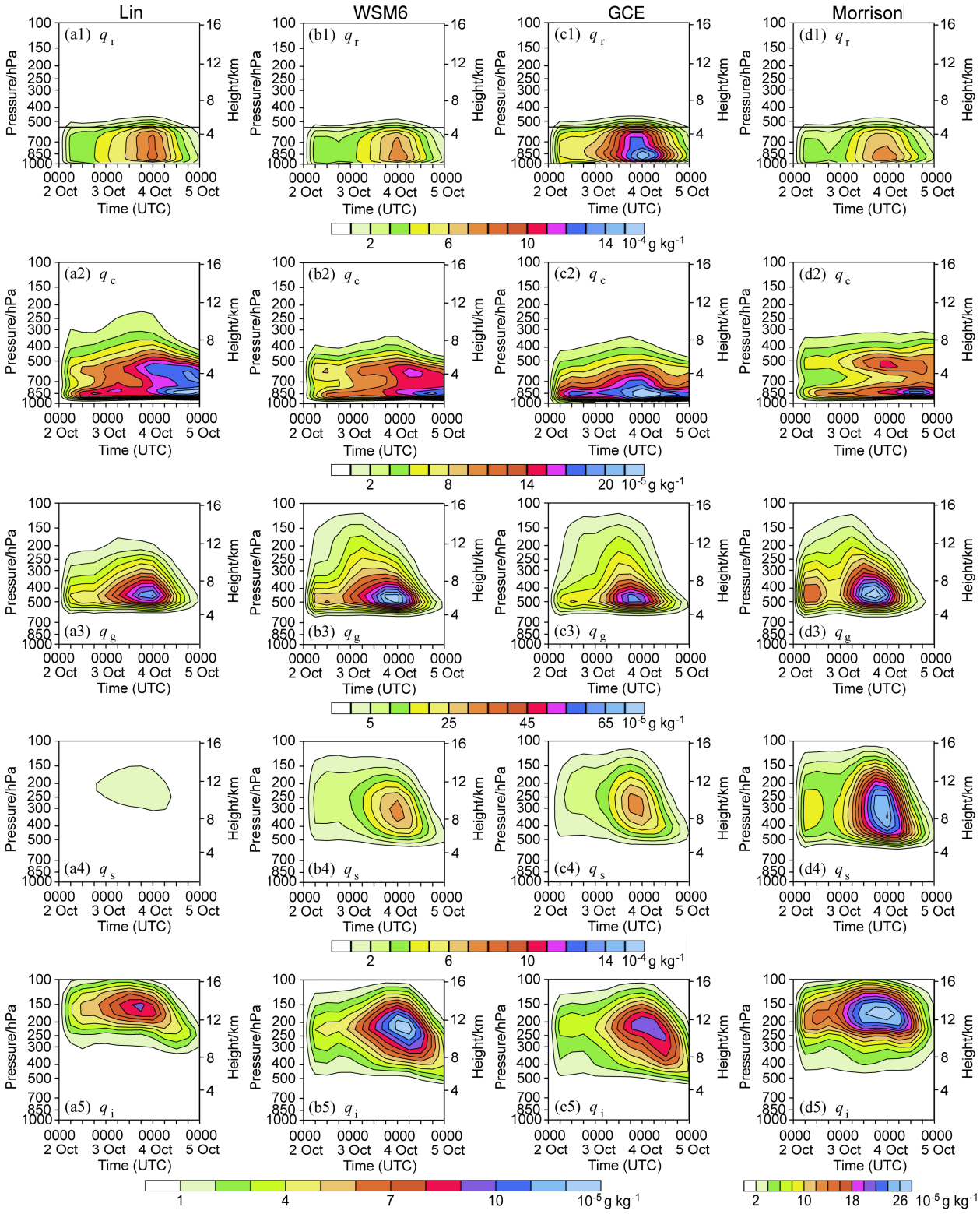

图 6 2015 年 10 月 2 日 00 时至 5 日 00 时平均的（a1–a5）Lin 方案模拟、（b1–b5）WSM6 方案模拟、（c1–c5）GCE 方案模拟、（d1–d5）Morrison 方案模拟的台风主体水成物混合比的垂直剖面：（a1–d1）雨水（q_r）；（a2–d2）云水（q_c）；（a3–d3）霰（q_g）；（a4–d4）雪（q_s）；（a5–d5）云冰（q_i）。图 a1–d1 中黑色实线为 0°C 线

Fig. 6 Vertical cross sections of mean mixing ratio of hydrometeors along the main body of the typhoon from 0000 UCT 2 to 0000 UCT 5 October 2015: (a1–d1) Rain (q_r), (a2–d2) cloud water (q_c), (a3–d3) graupel (q_g), (a4–d4) snow (q_s), (a5–d5) ice (q_i) simulated by (a1–a5) the Lin scheme, (b1–b5) the WSM6 scheme, (c1–c5) the GCE scheme, (d1–d5) the Morrison scheme. In Figs. a1–d1, the solid black line is the 0°C line

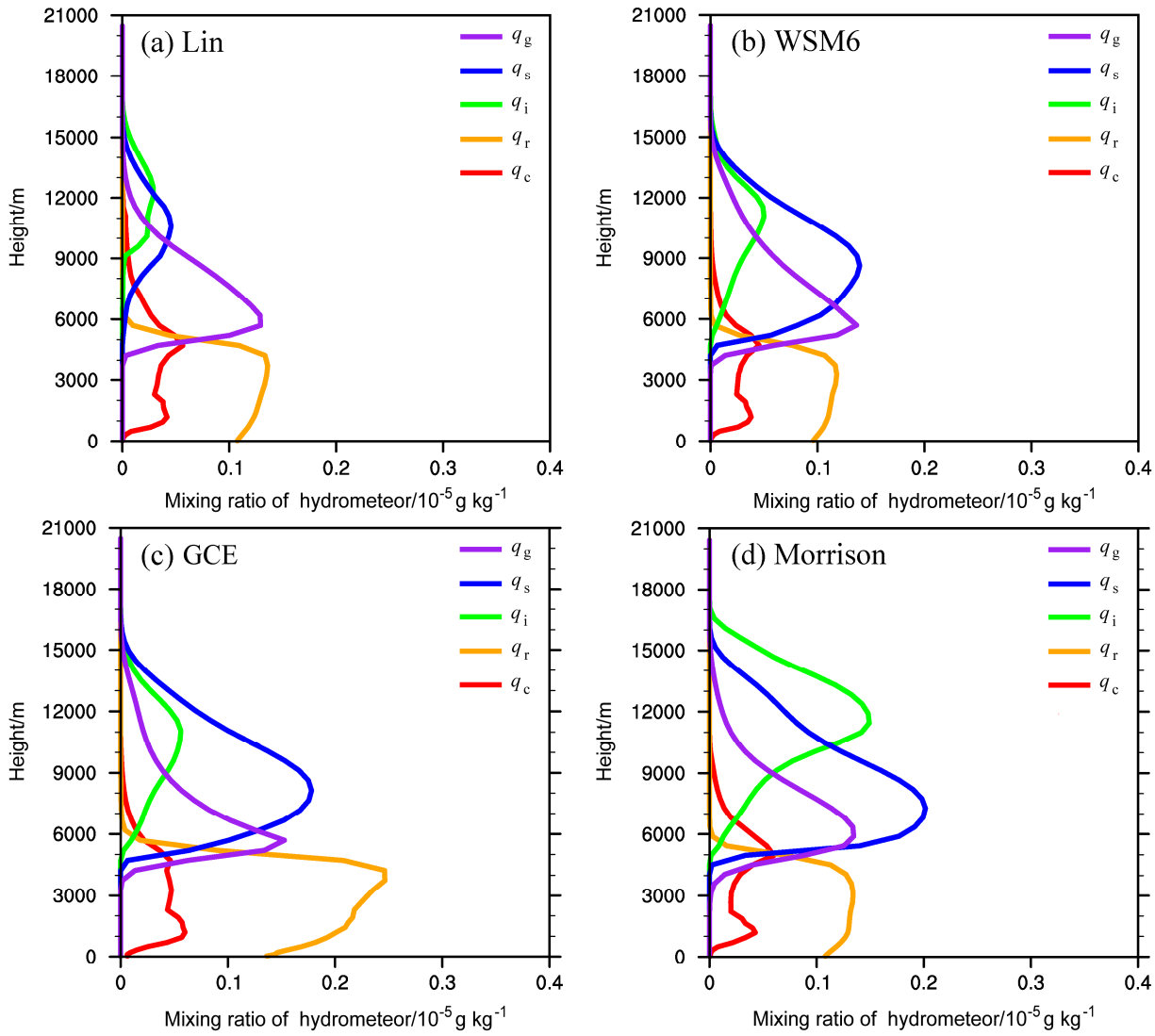

图 7　4 种方案模拟的 2015 年 10 月 4 日 00 时至 06 平均的水成物混合比（单位：10^{-5} g kg^{-1}）随高度（单位：m）的演变

Fig. 7　Vertical distributions of mean mixing ratio of hydrometeors (units: 10^{-5} g kg^{-1}) simulated by four cloud microphysical schemes from 0000 UCT to 0600 UCT 4 October 2015

双参方案代表，输出方案中云微物理过程的转化项进行对比分析，对转化项的数据处理方式为 2 日 00 时至 5 日 00 时（共计 72 h）台风主体的转化过程之和。

两个方案对此次台风降水的云微物理过程模拟一致：丰富的水汽在低层凝结成云水（WSM6：Pcond；Morrison: Pcc）在高层则凝华为云冰（WSM6：Pigen；Morrison: Prd）。生成的云水一方面被雨水碰收集直接转化为雨水（WSM6：Pracw；Morrison: Pra），另一方面先被雪粒子碰并收集转化为霰（WSM6：Psacw；Morrison: Psacwg），最终通过霰的融化生成雨水（Pgmlt）。生成的云冰则通过碰并增长转化为雪（WSM6：Psaci；Morrison: Prai），一部分雪粒子碰并收集过冷水滴淞附增长为霰粒子（Pracs），最终霰粒子被下沉气流带到低层融化转化为雨水，另有相当一部分雪粒子直接融化形成地面降水。

图 8 给出了两个方案模拟下台风主体区域平均的云中水成物主要的转化过程及其 72 h 合计转化大小，图 8 中英文缩写对应的各个微物理转化过程详见文末附录。由图 8a 可知，在 WSM6 方案中，与强降水相关的云中雨水含量的主要来源有四项，按数值大小排序分别是 Psmlt（雪粒子融化使得雨水增长）、Pgmlt（霰粒子融化使得雨水增长）、

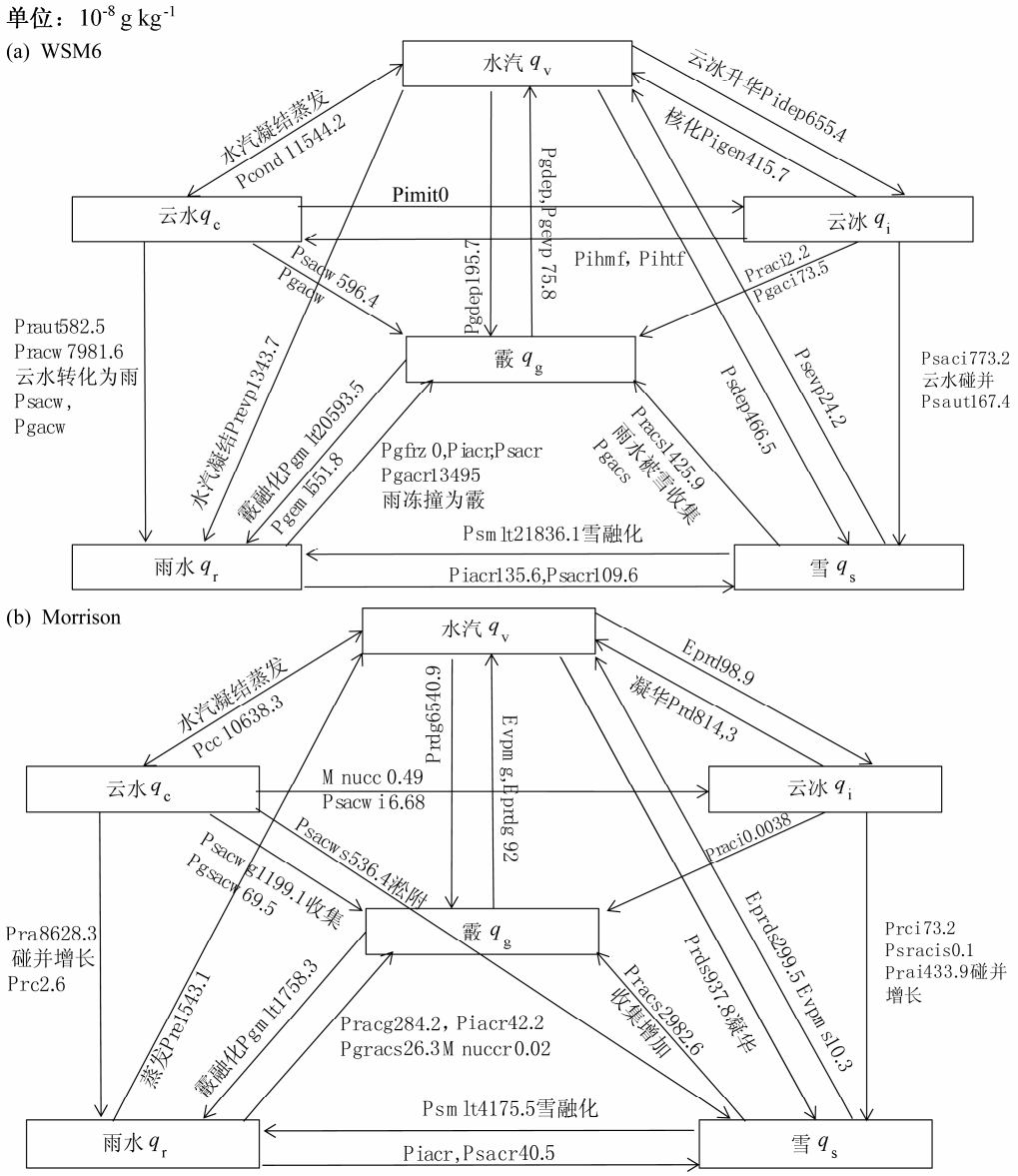

图 8 2015 年 10 月 2 日 00 时到 5 日 00 时（a）WSM6 方案、（b）Morrison 方案模拟的水成物混合比（单位：10^{-8} g kg^{-1}）微物理转化过程。图中英文缩写对应的各个微物理转化过程详见文末附录

Fig. 8 Microphysical conversion processes of mixing ratio of hydrometeors (units: 10^{-8} g kg^{-1}) averaged from 0000 UTC 2 to 0000 UTC 5 October 2015 in (a) the WSM6 scheme and (b) the Morrison scheme. Microphysical conversion processes are described in the appendix at the end of this article

Pracw（雨水碰并云水使得雨水增长）以及 Prevp（水汽凝结为雨水）；而 Morrison 方案中雨水含量的源项仅有 Pra（雨水碰并云水使得雨水增长）、Psmlt 以及 Pgmlt 过程三项作为主要的雨水来源（图 8b），并且雪粒子、霰粒子的融化与 WSM6 相比差了一个量级。就云水收支而言，云水与雨水碰并过程中对云水的消耗主要由过饱和水汽凝结为云水来补充（图 8a、b）。就冰相粒子而言，Pgmlt 过程对霰粒子的消耗是霰粒子的主要汇项，在 WSM6 方案中这主要是由 Pgacr 项（霰碰并雨水使得霰增长），Pracs 项（雨水碰并雪成霰）以及 Psacw 项（雪碰并云水造成雪/霰增长）来补尝。在 Morrison 方案中仅由 Pracs 项（雨水碰并雪成霰）以及 Psacwg 项（雪碰并云水造成雪/霰增长）来补偿对霰粒子的消耗。因此在 WSM6 方案中霰和雨水之间的转化与 Morrison 方案相比更加活跃。Psmlt 以及 Pracs 过程作为两个方案云中雪粒子的主要消耗项，在 WSM6 方案中主要由 Psaci（雪碰并云冰造成雪增长）以及 Psdep（水汽凝华增长）来补充。在 Morrison 方案中雪粒子主要由 Prds（水汽凝华为雪）、Psacws（云

水淞附造成雪增长）以及 Praci（云冰碰并增长为雪）过程提供。就云冰而言，Morrison 方案中贝吉龙过程要强于 WSM6 方案，且升华为水汽作用弱，因此该方案下云冰的含量要远高于 WSM6。

结合 4 日 06 时强降水中心的水成物垂直加热率廓线和垂直速度分布，考察台风强降水发生时云中水成物间的相互转换过程的云微物理成因。采用的 Hjelmfelt et al.（1989）的方法计算微物理过程的非绝热加热（冷却）率以及净加热率。由图 9a、c 可知降水时段整层总体表现为净加热，在近地面（0～1 km）雨水蒸发带来的冷却作用要强于潜热释放，因此总体表现为弱的净冷却。WSM6 方案中冷却作用基本出现在 6 km 以下（图 9a），相应的主要吸热过程为近地面云水蒸发（Pcond），3～6 km 间大量雪粒子和霰粒子融化（Psmlt, Pgmlt）以及 5～7 km 间霰粒子升华（Pgdep）（图 9b）。而 Morrison 方案中融化的雪粒子和霰粒子数目要低于 WSM6 方案，且在中高层的冷却主要对应着雪碰并云水生成霰（Psacwg）、云冰升华为水汽（Eprd）以及过冷云水蒸发（Eprdg）过程（图 9d）。

中低层的加热主要是由水汽凝结释放潜热引起，WSM6 方案中高层加热主要是由 7～12 km 间水汽凝华为雪（Psdep）及 6～15 km 间水汽异质核化为云冰（Pigen）过程释放。Morrison 方案中对应的转化过程量级是 WSM6 的两倍以上，其水汽凝华（Prds）过程的加热率的极大值更是达到了 0.1×

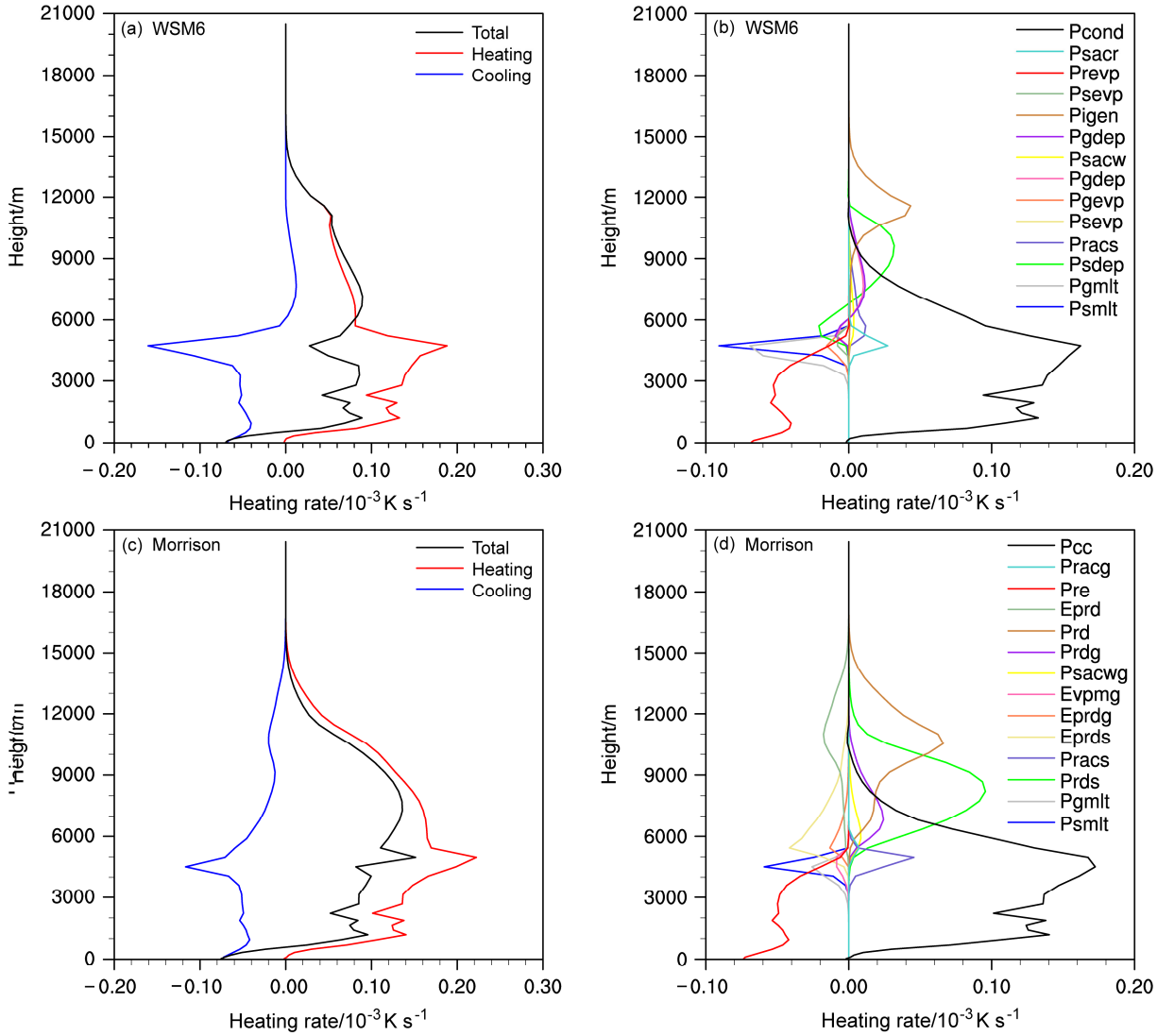

图 9　2015 年 10 月 4 日 06 时（a、b）WSM6 方案、（c、d）Morrison 方案模拟的主要降水中心的（a、c）加热（冷却）率廓线及（b、d）各项水成物相变的加热率（冷却率）廓线（单位：10^{-3} K s^{-1}）

Fig. 9　Vertical profiles of (a, c) total heating (cooling) rates and (b, d) respective heating（cooling) rates of hydrometeors phase transition (units: 10^{-3} K s^{-1}) in the main precipitation center at 0600 UCT 4 October 2015: (a, b) Simulation by the WSM6 scheme; (c, d) simulation by the Morrison scheme

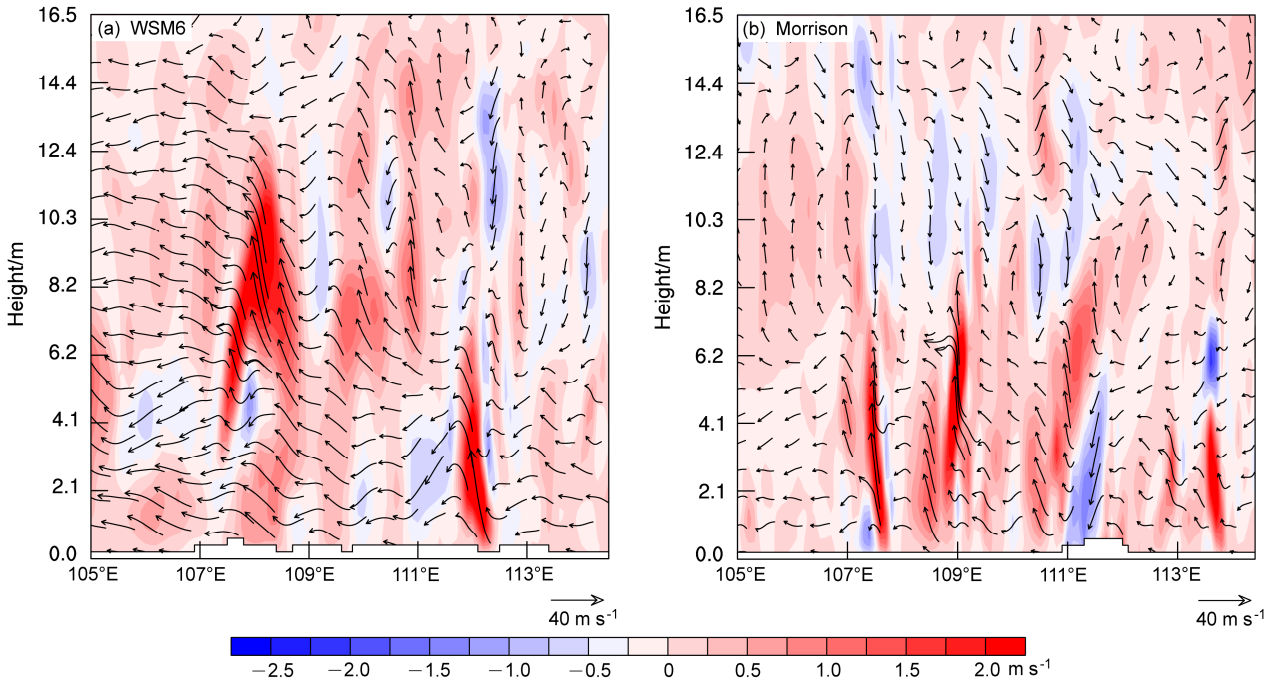

图 10 2015 年 10 月 4 日 06 时（a）WSM6 方案、（b）Morrison 方案模拟的沿强降水中心的速度剖面。箭头表示水平风矢量（单位：m s^{-1}），填色表示垂直上升（正值）、下沉（负值）运动（单位：m s^{-1}）

Fig. 10 Vertical cross sections of speed along the heavy precipitation center from simulations of (a) the WSM6 scheme and (b) the Morrison scheme at 0600 UTC 4 October 2015. Arrows and shadings indicate horizontal wind (units: m s^{-1}) and vertical wind (positive: ascending motion, negative: descending motion, units: m s^{-1})

10^{-3} K s^{-1}。综上分析，两个方案模拟的相变差异主要出现在中高层，主要是由于 WSM6（图 10a）方案对于高层的下沉运动模拟比 Morrison 方案偏小（图 10b），因此对冰相粒子雪和云冰之间的相互转化要弱于 Morrison 方案，但 WSM6 方案对于中层雪和霰粒子融化作用的模拟则强于 Morrison 方案。因此在 WSM6 方案下冷却作用主要由雨水蒸发、雪霰融化引起，而在 Morrison 方案中冷却主要由雨水蒸发、雪及云冰升华为水汽以及霰粒子融化引起。

图 10 另一特点是 WSM6 方案的中高层（6～12 km）上升运动强于 Morrison 方案，这可能与局地加热有关。作为单参数方案，WSM6 方案只能通过斜率的变化来反映谱变化，造成只能通过大粒子分布的变化来反映谱演变，在个例模拟中单参数方案容易在局部区域出现集中的强对流（Yin et al., 2017）。与之相对的双参数方案（例如 Morrison 方案）由于粒子数浓度的引入增加了粒子谱的浓度，使得水成物的数量及质量分布在物理机理上更为协调。

4.3 云微物理过程对台风结构及强度影响

在 4.1 及 4.2 节中我们讨论了不同微物理方案下水成物的分布及微物理转化项的差异，那么不同微物理过程究竟对台风的结构和强度有何影响？本节依旧以 WSM6 和 Morrison 方案为考察对象，分析了微物理过程对台风具体强度的影响。

图 11 是台风快速增强时期（4 日 00～06 时）过台风中心的垂直剖面图，其中彩色填色部分为微物理转化过程的加热率，灰度填色为平均的雷达反射率。选取了对加热贡献最大的两项微物理过程进行考察，分别是水汽凝结（WSM6：Pcond；Morrison: Pcc）以及水汽凝华为云冰（WSM6：Pigen；Morrison: Prd。对比图 11a、c 和 11b、d 可以看到：WSM6 方案下无论是水汽凝结还是水汽凝华过程的强加热中心都比 Morrison 方案模拟的更靠近眼区；扰动温度中心在 12 km 附近达到了 6 K，高于 Morrison 方案的 4 K，暖心结构更为明显。可以认为由于方案对微物理过程模拟的位置及强度的差异，使得 WSM6 方案比 Morrison 方案释放了更多凝结潜热，导致其暖心结构更强，受到梯度风关系的影响，WSM6 方案模拟的台风中心最低气压要低于 Morrison 方案。此外，由于靠近眼区非绝热加热作用显著，WSM6 方案的眼壁上对流活动更为活跃，具有较强的上升气流。

通过本节对台风路径及强度的分析，认为云微物理过程对台风路径及中心强度的影响，一方面是

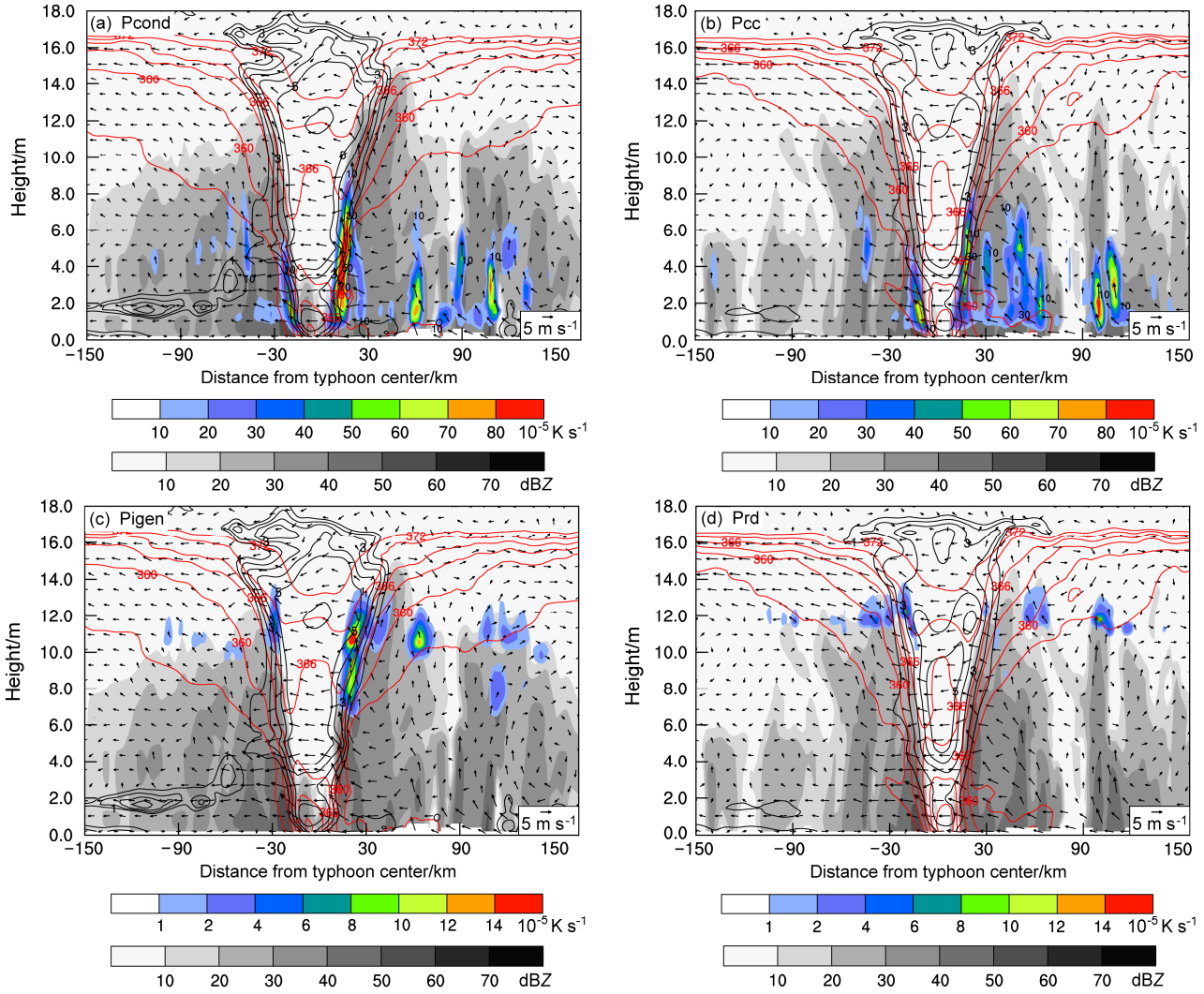

图 11　2015 年 10 月 4 日 00～06 时沿台风中心的主要云微物理过程加热率的垂直剖面。图 a、c 中彩色阴影分别为 WSM6 方案下水汽凝结过程、水汽凝华为云冰，图 b、d 中彩色阴影分别为 Morrison 方案下水汽凝结过程、水汽凝华为云冰。灰度填色表示雷达反射率（单位：dBZ），箭头为水平风场（单位：m s^{-1}），红色实线为相当位温场（单位：K），黑色实线为扰动温度场（单位：K）

Fig. 11　Vertical cross sections of main cloud microphysical processes heating rate along the typhoon center during 0000–0600 UTC 4 October 2015. The color shaded areas represent (a, b) the condensation of water vapour and (c, d) the sublimation of water vapour to cloud ice simulated by (a, c) the WSM6 scheme and (b, d) the Morrison scheme. The areas shaded in gray represent radar reflectivity (units: dBZ), arrows represent the horizontal wind (units: m s^{-1}), the red solid lines show equivalent potential temperature (units: K), and the black solid lines indicate the disturbance temperature (units: K)

由于台风眼区及螺旋云带上的相变过程潜热加热的分布不均匀，导致台风眼区及螺旋云带的热动力环境的变化，从而影响台风结构的对称性；另一方面相变潜热直接影响眼区及螺旋云带上的对流活动的形成演变（对流的触发和组织化）。台风结构的变化和眼区对流活动的变化使得台风路径及中心强度的改变。

5　结论和讨论

目前云微物理过程对台风降水影响的研究，尚缺乏一致的、确定性的结论，本文采用 WRF3.6.1 模式，对 2015 年 10 月登陆我国广东省的台风“彩虹”进行了四种不同云微物理参数化方案下高分辨率数值研究。文章着重对比了 WSM6 方案和 Morrison 方案下多种云中水成物粒子的转化，讨论了影响台风降水的云微物理过程，诊断了云微物理的质量和热量收支分析，本文的主要研究结论如下:

（1）尽管 4 个云微物理方案均能模拟出“彩虹”西行登陆过程，但是其模拟的台风强度、结构及降水较路径更为敏感。Lin 和 WSM6 方案模拟的

台风强度变化与实况更为接近，Lin 方案模拟的台风最低气压及最大风速的时刻较实况偏早。就台风结构而言，GCE 方案模拟的螺旋云带发展最为旺盛，强度比实况更强，这可能是其模拟降水最多的原因，其余方案模拟的台风结构与实况相近。总体而言，单参方案中的 WSM6 方案模拟效果最佳，其次为 Lin、Morrison 和 GCE 方案。

（2）分析对比 4 个云微物理参数化方案模拟的降水过程水成物垂直分布及垂直廓线，揭示了台风降水系统的垂直三层云结构：12 km 附近冰晶集中层，7 km 雪霰混合层，及 6 km 以下包含云水和雨水的暖区。从水成物廓线来看，4 个方案对此次降水模拟的差异主要出现在固态水成物（霰、雪、云冰）的冷云降水过程中。

（3）对比分析了 WSM6 方案及 Morrison 方案模拟台风降水的主要云微物理过程。研究发现：来自孟加拉湾的西南暖湿气流带来丰富的水汽，一部分凝结成云水，另一部分上升到高层凝华为云冰。生成的云水一方面被雨水碰收集直接转化为雨水，另一方面先被雪粒子碰并收集转化为霰，最终霰粒子下沉到融化层生成雨水。生成的云冰则通过碰并增长转化为雪，一部分雪粒子碰并收集过冷水滴淞附增长为霰粒子，最终霰粒子被下沉气流带到低层融化转化为雨水，另有相当一部分雪粒子直接融化形成地面降水。

（4）深入分析了 WSM6 方案及 Morrison 方案的云微物理转化过程。结果发现：两个方案中雨水最主要的源项都是冰项水成物霰和雪粒子的融化，其次都是云水碰并为雨水以及水汽凝结；云水的源项主要为过饱和水汽的凝结。两个方案的差异在于：WSM6 方案模拟的雪和霰粒子融化过程要强于 Morrison 方案，WSM6 方案的中高层（6～12 km）上升运动强于 Morrison 方案，这可能与单参数方案模拟的局地加热有关。

（5）台风眼区的云微物理过程潜热释放与其强度变化密切相关。WSM6 方案下潜热释放相比 Morrison 方案更向眼区集中，对流发展地更旺盛，暖心结构更为显著，其模拟得到的台风强度更强。

本文的研究是基于不同微物理方案对 2015 年第 22 号台风“彩虹”个例的数值模拟结果，其研究结论尚需更多台风模拟个例的验证和支撑。本文的观测资料仅限于常规观测、地面自动站、TRMM 卫星遥感资料。由于台风的路径、强度变化主要发生在海上，缺乏细致的观测资料可供检验，未来的工作将基于葵花卫星和 FY-4 卫星高时空分辨的垂直探测资料，进行细致地对比分析不同微物理方案模拟的云水粒子的时空分布及三维结构，探讨云微物理影响台风降水的可能机制。同时，海温对台风强度和路径有显著影响，未来的工作考虑将海水温跃层及海表资料同化入数值模式，细致的考虑大气及海洋的外部强迫对台风路径、强度特别是眼区对流活动及结构的影响。另外一个需要重点关注的方向是对沿海地区的雷达资料，特别是 X 波段及 C 波段的偏振雷达资料对台风降水过程的反演，观测分析台风降水过程中的眼区对流系统及螺旋云带的降水粒子的种类及相态，以验证台风降水中云水物质时空分布及三维结构的模拟结果。

参考文献（References）

程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展 [J]. 气象, 31 (12): 3–9. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 31 (12): 3–9, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2005.12.001.

邓琳, 端义宏, 高文华, 等. 2016. 超强台风“威马逊”(2014) 云微物理特征的模拟与对比分析 [J]. 气象学报, 74 (5): 697–714. Deng Lin, Duan Yihong, Gao Wenhua, et al. 2016. Numerical simulation and comparison of cloud microphysical features of super typhoon Rammasun (2014) [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74 (5): 697–714, doi:10.11676/qxxb2016.058.

Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.

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.

傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征 [J]. 气象学报, 65 (3): 316–328. Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (3): 316–328, doi:10.11676/qxxb2007.031.

郭浩鑫, 杨杰颜, 张新新, 等. 2016. 1522 号强台风“彩虹”特征分析 [J]. 广东气象, 38 (5): 6–9. Guo Haoxin, Yang Jieyan, Zhang Xinxin, et al. 2016. Analysis of the characteristics of severe typhoon Mujigae (1522) [J]. Guangdong Meteor. (in Chinese), 38 (5): 6–9.

Hjelmfelt M R, Roberts R D, Orville H D, et al. 1989. Observational and numerical study of a microburst line-producing storm [J]. J. Atmos. Sci., 46 (17): 2731–2744, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<2731:OANSOA>2.0.CO;2.

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.

Hong S Y, Sunny Lim K S, Kim J H, et al. 2009. Sensitivity study of cloud-resolving convective simulations with WRF using two bulk microphysical parameterizations: Ice-phase microphysics versus sedimentation effects [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 48 (1): 61–76, doi:10.1175/2008JAMC1960.1.

花丛, 刘奇俊. 2013. 云微物理过程影响登陆台风结构及降水的数值试验 [J]. 热带气象学报, 29 (6): 924–934. Hua Cong, Liu Junqi. 2013. Sensitivity of landfalling typhoon structure and precipitation to varying cloud microphysical processes [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29 (6): 924–934.

黄巾旗, 王盛繁, 梁毅进, 等. 2017. 2015 年秋季台风“彩虹”暴雨诊断分析 [J]. 中国农学通报, 33 (14): 87–94. Huang Jinqi, Wang Shengfan, Liang Yijin, et al. 2017. Diagnostic analysis of rainstorm associated with typhoon “Rainbow” in the autumn of 2015 [J]. Chin. Agric. Sci. Bull. (in Chinese), 33 (14): 87–94.

李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等. 2016. 1522 号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析 [J]. 热带气象学报, 32 (3): 416–424. Li Cailing, Yan Lijun, Li Zhaohui, et al. 2016. Analysis of a tornado in outside-region of typhoon Mujigae in 2015 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 32 (3): 416–424, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.03.013.

李响. 2012. WRF 模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (12): 1966–1978. Li Xiang. 2013. Sensitivity of WRF simulated typhoon track and intensity over the Northwest Pacific Ocean to cumulus schemes [J]. Science China Earth Sciences, 56 (2): 270–281, doi:10.1007/s11430-012-4486-0.

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.

Morrison H, Pinto J O. 2005. Mesoscale modeling of springtime arctic mixed-phase stratiform clouds using a new two-moment bulk microphysics scheme [J]. J. Atmos. Sci., 62 (10): 3683–3704, doi:10.1175/JAS3564.1.

Rutledge S A, Hobbs P V. 1984. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands [J]. J. Atmos. Sci., 41 (20): 2949–2972, doi:10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2.

沈新勇, 梅海霞, 王卫国, 等. 2015. 双参数微物理方案的冰相过程模拟及冰核数浓度的影响试验 [J]. 大气科学, 39 (1): 83–99. Shen Xinyong, Mei Haixia, Wang Weiguo, et al. 2015. Numerical simulation of ice-phase processes using a double-moment microphysical scheme and a sensitivity test of ice nuclei concentration [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 83−99, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13310.

Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment [J]. Mon. Wea. Rev., 117 (1): 231–235, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2.

Tao W K, Shi J J, Chen S S, et al. 2011. The impact of microphysical schemes on hurricane intensity and track [J]. Asia–Pacific J. Atmos. Sci., 47 (1): 1–16, doi:10.1007/s13143-011-1001-z.

Tao W K, Lang S, Zeng X P, et al. 2014. The Goddard Cumulus Ensemble model (GCE): Improvements and applications for studying precipitation processes [J]. Atmos. Res., 143: 392–424, doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.005.

王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 2008. 中国台风降水的气候特征 [J]. 热带气象学报, 24 (3): 233–238. Wang Yongmei, Ren Fumin, Li Weijing, et al. 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 24 (3): 233–238, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.03.004.

王在志, 闫敬华. 2007. 水成物分析及在数值模式中的应用综述 [J]. 热带气象学报, 23(1): 85–89. Wang Zaizhi, Yan Jinghua. 2007. A review of the analysis of moisture variables and the application in numerical models [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 23 (1): 85–89, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.01.014.

许广, 费建芳, 黄小刚, 等. 2017. 一次飑线过程的云微物理参数化方案数值试验及其成因分析 [J]. 气象科学, 37 (3): 283–292. Xu Guang, Fei Jianfang, Huang Xiaogang, et al. 2017. Simulation experiments of cloud microphysical parameterization schemes on a squall line and its genesis analysis [J]. J. Meteor. Sci., 37 (3): 283–292, doi:10.3969/2016jms.0027.

Yang M J, Ching L. 2005. A modeling study of typhoon Toraji (2001): Physical parameterization sensitivity and topographic effect [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 16 (1): 177–213, doi:10.3319/TAO.2005.16.1.177(A).

杨文霞, 冉令坤, 洪延超. 2010. 台风 Wipha 云微物理特征数值模拟 [J]. 科技导报, 28 (23): 34–39. Yang Wenxia, Ran Lingkun, Hong Yanchao. 2010. Numerical study of the characters of typhoon Wipha cloud microphysical processes [J]. Sci. Technol. Rev. (in Chinese), 28 (23): 34–39.

Yin L, Ping F, Mao J H. 2017. A comparative study between bulk and bin microphysical schemes of a simulated squall line in East China [J]. Atmos. Sci. Lett., 18 (5): 195–206, doi:10.1002/asl.742.

附 录

表 A1 WSM6 方案主要转化过程

Table A1 The main transformation processes of WSM6 scheme

缩写	描述
Pgaci	霰碰并云冰造成霰增长
Pgacw	霰碰并云水造成霰增长
Pgacr	霰碰并雨水造成霰增长
Pgacs	霰碰并雪造成霰增长
Psaci	雪碰并云冰造成雪增长
Psacw	雪碰并云水造成雪增长
Pracs	雨水碰并雪造成霰增长
Psacr	雪碰并雨水生成雪或霰
Praci	云冰与雨碰并生成雪或霰
Piacr	云冰粘附雨水生成雪或霰
Pracw	雨水碰并云水造成雨水增长
Pgmlt	霰融化为雨水
Psmlt	雪融化为雨水
Pgeml	增大的霰融化率导致的雨水增加
Pseml	增大的雪融化率导致的雨水增加
Prevp	雨水与水汽间转化（雨水蒸发/水汽冷凝）
Psdep	雪与水汽间转化（雪升华/水汽凝华）
Pgdep	霰与水汽间转化（水汽凝华/霰升华）
Praut	云水自动转化为雨水
Psaut	云冰自动转化为雪
Pgaut	雪自动转化为霰
Pgevp	霰融化时的蒸发作用
Psevp	雪融化时的蒸发作用
Pcond	云水与水汽间转化（云水蒸发/水汽冷凝）
Pgfrz	雨水冻结
Pimlt	云冰瞬时融化
Pihmf	云水均匀冻结为云冰
Pihtf	云水不均匀的冻结为云冰
Pidep	水汽与云冰间转化（水气凝华/云冰升华）
Pigen	水汽异质核化为云冰

表 A2 Morrision 方案主要转化过程

Table A2 The main transformation processes of Morrison scheme

缩写	描述
Pre	雨水蒸发成水汽
Pra	雨水碰并云水造成雨水增长
Pcc	云水与水汽间转化（云水蒸发/水汽冷凝）
Prc	云水自动转化为雨水
Psacwg	云水淞附造成霰增长
Psacws	云水淞附造成雪增长
Psacwi	云水淞附造成云冰增长
Pgsacw	云水收集转化为霰
Piacr	云冰粘附雨水造成雪或霰增长
Pgracs	霰碰并雨水使得霰增长
Pracg	霰收集雨水
Pgmlt	霰融化为雨水
Psmlt	雪融化为雨水
Piacrs	雪收集转化雨水
Pracs	雨水碰并雪成霰
Psacr	雪碰并雨水生成雪或霰
Prci	云冰自动转化为雪
Pracis	云冰碰并增长为雪
Prai	云冰碰撞增加为雪
Prd	水汽凝华为云冰
Prds	水汽凝华为雪
Prdg	水汽凝华为霰
Evpms	雪融化时的蒸发作用
Evpmg	霰融化时的蒸发作用
Eprds	雪升华