

李喆, 马占山, 刘奇俊, 等, 2019. GRAPES 双参数云微物理方案的改进和云降水个例模拟研究: GRAPES_SCM 对热带对流云个例的模拟研究[J]. 气象, 45(6): 756-765. Li Z, Ma Z S, Liu Q J, et al, 2019. The improvement of GRAPES double moment cloud scheme and case study of cloud precipitation: modeling study of tropical convective cloud via GRAPES_SCM[J]. Meteor Mon, 45(6): 756-765 (in Chinese).

GRAPES 双参数云微物理方案的改进和 云降水个例模拟研究: GRAPES_SCM 对热带对流云个例的模拟研究^{*}

李 喆^{1,2} 马占山^{1,2} 刘奇俊^{1,2} 杨军丽^{1,2}

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

提 要: 应用全球-区域同化预报系统单柱模式 (GRAPES_SCM), 对热带暖池国际云试验 (TWP-ICE) 个例进行数值模拟。通过和实际观测资料进行对比, 诊断并改进了 Liuma 云微物理方案对热带对流云微物理特征的模拟能力。结果显示在 GRAPES_SCM 框架下, Liuma 原方案和 WSM6 (WRF single moment) 方案均能呈现出 TWP-ICE 期间热带云系的发展特征, 并能够明显区分试验期间的季风活跃期和季风抑制期。活跃期 Liuma 原始方案和 WSM6 方案模拟的冰云组成结构差异显著, 在 Liuma 原始方案所模拟的冰相水凝物分布中, 存在冰雪含量过少、霰过多的现象。改进后的 Liuma 方案对程序中各微物理过程计算顺序进行了优化, 改进后霰质量混合比明显减少, 冰雪质量混合比明显增加, 冰相水凝物分布较合理。

关键词: GRAPES_SCM, TWP-ICE, Liuma 云微物理方案, 热带对流云

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.002

The Improvement of GRAPES Double Moment Cloud Scheme and Case Study of Cloud Precipitation: Modeling Study of Tropical Convective Cloud via GRAPES_SCM

LI Zhe^{1,2} MA Zhanshan^{1,2} LIU Qijun^{1,2} YANG Junli^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA Numerical Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: In this study, the TWP-ICE case is simulated using GRAPES_SCM. By comparing with the observation data, we found that both the Liuma initial scheme and the WRF single moment scheme (WSM6) can well simulated the development of tropical cloud systems during the TWP-ICE. Besides, the active monsoon period and the monsoon suppression period are also reproduced. The results also show that the vertical distribution of ice-phase hydrometeors simulated by the Liuma initial scheme is very different from that simulated by the WSM6 scheme. Compared with the WSM6 scheme, the Liuma initial scheme produces much more graupel but less ice and snow. In the modified Liuma scheme, the order of calculation of the microphysical process is optimized. In the simulation with the modified Liuma scheme, the mixing ratio

^{*} 国家重点研发计划 (2017YFC1501406)、国家自然科学基金青年基金项目 (41405102)、国家气象中心青年基金项目 (Q201706) 和数值预报中心青年基金项目 (NWPC-QNJ-201702) 共同资助

2018 年 3 月 9 日收稿; 2018 年 10 月 10 日收修定稿

第一作者: 李喆, 主要从事数值模式中云微物理方案研发与气溶胶-云相互作用研究. Email: liz@cma.gov.cn

of graupel becomes smaller while the mixing ratio of ice and snow becomes larger, and surface the precipitation rate is closer to the observation.

Key words: GRAPES_SCM, TWP-ICE, Liuma microphysics scheme, tropical convective cloud

引 言

在数值模式中,微物理过程直接影响着云的形成、发展和结构,进而影响到云降水的预报能力。因此,云微物理过程在数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)模式中起着重要的作用。近些年来,随着计算机的发展, NWP 模式趋向于使用高分辨率和引入复杂的物理参数化过程对天气过程进行模拟。所以研发更加准确精细的微物理方案是十分必要的。总体而言,高分辨 NWP 模式在描述云微物理过程时,常用的参数化方法有两种:谱方案微物理参数化方案(spectral bin microphysics, SBM)和体积水微物理参数化方案。SBM 方案将水凝物与气溶胶浓度和质量混合比的谱分布用数十个分档描述,因此 SBM 方案可以十分细致地模拟出精确的云微物理过程。但是,SBM 方案需要大量的计算资源,所以并不适用于长期模拟及全球气候模式。体积水参数化方案采用确定的谱型分布,例如 Gamma 或者 Marshall-Palmer 函数,描述每种水凝物浓度和质量混合比等预报量的分布。体积水参数化方法又可细致分为三类,一是单参数体积水参数化方案,水凝物的谱分布和微物理过程均由质量混合比的变化表征;二是双参数体积水参数化方案,水凝物的谱分布和微物理过程由质量混合比和浓度变化共同表征;三是参数体积水参数化方案在双参数方案的基础上增加了粒子谱的谱形预报和变化过程。由于柱水参数化方案描述每种水凝物所需的变量较少,需要的计算资源不多,因此更加适用于长期模拟和全球气候模式。

单柱模式(single column model, SCM)是检验和评估物理参数化过程的有利工具。SCM 可以被看作是全局/区域模式的一个格点,它可以在给定的大尺度条件下,对比模拟结果和观测结果来评估物理过程参数化的性能。Ball and Plant (2008)探讨了应用 SCM 检验大气环流模式中物理方案的潜力。结果显示尽管物理方案的表现 SCM 和大气环流模式中并不完全相同,SCM 仍然是十分实用的评估工具。Posselt and Lohmann (2007)利用

SCM 检验了一种新的降水诊断方案,并且指出强降水事件中地面降水主要由强迫场导致,并不受诊断方案影响,而弱降水事件中地面降水会因诊断方案时间步长选取而不同。Morrison et al (2003)将一个总体积水物法微物理方案引入 SCM,并对比分析了模拟与观测结果,结果显示该云微物理方案能够准确地模拟出云边界和总云量,但在云水含量和云水路径的模拟上存在较大偏差。Grabowski et al (2010)选用 2 个 SCM 研究亚马孙雨季白天陆地对流发展时发现,其模拟的深对流都过早发展成熟(日出后 2 h 内),这与已有的陆地降水日循环研究中发现的问题相同。杨军丽和沈学顺(2012)应用 SCM 检验了不同复杂度的两种陆面过程对温湿和降水的影响,结果指出 CoLM 方案模拟的累计降水大于 SLAB 方案,这是由于 CoLM 方案在模拟时期对流层低层偏湿、偏冷,会产生虚假降水。

Liuma 云微物理方案是基于全球-区域同化预报系统(GRAPES)研发的双参数体积水方案,并应用于地形云、暴雨和气溶胶-云相互作用的研究(刘奇俊等,2003;陈小敏等,2007;石荣光等,2015)。早期的 Liuma 云微物理方案的研究主要基于 GRAPES 区域和全球模式,陈小敏等(2007)使用 GRAPES_Liuma 研究祁连山地区的云并指出该方案可以反映出这一地区云的微物理结构。Hua and Liu(2013)应用 GRAPES_Liuma 研究了台风降水过程并指出该方案的路径模拟在登陆前与实况吻合很好。聂皓浩等(2016)同样使用 GRAPES_Liuma 对强降水个例进行了模拟和诊断研究并指出对流发展旺盛的云团中,冰相粒子尤其是霰粒子对对流的发展与降水起着主导作用。此外,不仅在 GRAPES 平台下, Li et al(2018)把 Liuma 云微物理方案移植到天气预报模式(WRF)中,模拟了台风个例。结果表明 Liuma 云微物理方案可以较好地模拟出台风路径、强度和结构,结果同时指出该方案模拟的云中冰相水凝物的分布尚存在不合理的地方需要改进,具体表现在霰的含量过多,冰、雪的含量过低。这说明 Liuma 云微物理方案对热带对流云系,特别是冰相过程的模拟能力尚需改进。因此,对 Liuma 云微

物理方案的全面检验,并改进该方案的工作十分必要。

1 模式和数据

1.1 GRAPES_SCM 与 Liuma 云微物理方案

GRAPES 系统是我国自主研发的新一代数值预报系统。其核心技术包括三维变分(可向四维变分拓展)同化系统,半隐式-半拉格朗日全可压非静力动力模式,可自由组合的物理过程参数化方案,全球、区域一体化的同化与预报系统,以及标准化、模块化、并行化的同化与模式程序。GRAPES 系统在业务中表现良好(熊秋芬,2011;陈超君等,2012;王静等,2017;沈学顺等,2017;赵滨和张博,2018),同时适用于科学研究(王德立等,2013;聂皓浩等,2016;万晓敏等,2017;陈炯等,2017;朱立娟等,2017;王宇虹和徐国强,2017;王婧卓等,2018;田伟红,2018)。GRAPES_SCM 发展基于 GRAPES 系统,最初通过在 GRAPES 系统中添加新模块等构建而成,其物理过程与 GRAPES 全球系统保持一致,主要物理过程包括:辐射传输、湍流混合、湿对流和格点尺度降水过程、陆表过程及次网格尺度地形重力波拖曳等(陈德辉等,2008;薛纪善和陈德辉,2008;杨军丽和沈学顺,2012)。近两年 GRAPES_SCM 进行了优化,去除了其旧版本中 SCM 积分不需要的程序代码和变量,使之成为独立的系统;优化后不仅大大缩短了积分时间,而且可以更灵活地检验不同版本 GRAPES 系统的物理过程。

Liuma 云微物理方案发展自胡志晋和严采繁(1986;1987)的双参数对流云和层状云方案。除了对水汽(Q_v)、云水(Q_c)、雨水(Q_r)、云冰(Q_i)、雪(Q_s)、霰(Q_g)的混合比进行预报外,还预报雨水(n_r)、云冰(n_i)、雪(n_s)、霰(n_g)的数浓度,同时为了计算云雨自动转化率和冰雪向霰的自动转化率和自动转化阈值,还引进了云滴谱拓宽函数(f_c),以及云冰(f_i)和雪(f_s)的淞附效率等预报量,克服了因为固定的粒子谱参数而带来的缺点,在微物理过程的描述上考虑了凝结蒸发、凝华升华、自动转化、碰并、冻结、冰晶核化与繁生等过程,具体过程详见胡志晋和严采繁(1986;1987)及陈小敏等(2007)。

1.2 TWP-ICE 外场试验

热带地区的对流系统发展深厚,驱动了全球的大气环流。深对流系统顶端的云砧面积大,在对流系统减弱后还能够空中停留较长时间,进而影响全球大气的辐射平衡。因此,检验和改进微物理方案在热带地区的模拟效果是十分重要。此外,深厚的对流系统中包含水云、冰云及混合相态云,也有利于全面检验微物理方案的模拟性能(金莲姬等,2007;沈新勇等,2015;梅海霞等,2015)。2006年1月20日至2月13日,在澳大利亚北部达尔文地区展开了针对热带对流发展的外场试验 TWP-ICE(图1)。试验旨在描述热带对流过程中的大尺度温湿、动量收支平衡、云的性质,以及云对于环境的影响(May et al, 2008)。在 TWP-ICE 期间,天气形势可分为具有典型特征的天气类型,分别为季风活跃期、晴空少云期和疾风衰退期(May et al, 2008)。文中所用大尺度强迫场以及其他观测数据的详细情况介绍见 May et al(2008)和 Xie et al(2010)。

1.3 模式设定

本文使用的 GRAPES_SCM 垂直分层为 60 层,最高层高度为 35 km。积分时段为 2006 年 1 月 19 日 03 UTC(世界时,下同)至 2 月 12 日 21 UTC。所使用的 SCM 强迫场来自最优估计强迫数据集(http://science.arm.gov/wg/cpm/scm/scmic6/forcing_data.html),数据的处理方法参考 Davies(2009),温湿等强迫数据被插值到每个时间步长上。本文选取其中的季风活跃期和抑制期(1 月 20 日至 2 月 1 日)着重进行分析,通过对比观测资料及 GRAPES_SCM 自带的 WSM6 方案的模拟结果,改进 Liuma 微物理方案冰相过程。

2 控制试验结果

2.1 地面降水

图 2 为季风活跃期与抑制期降水模拟和观测降水随时间的变化特征。如图 2 所示,实际观测中达尔文地区在季风活跃期,1 月 20—24 日降水较为频繁,其中 24 日发生的强降水峰值可达 $8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而在季风抑制期,即 1 月 24 日至 2 月 1 日少有降水发生,极值均弱于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Liuma 原始方案和

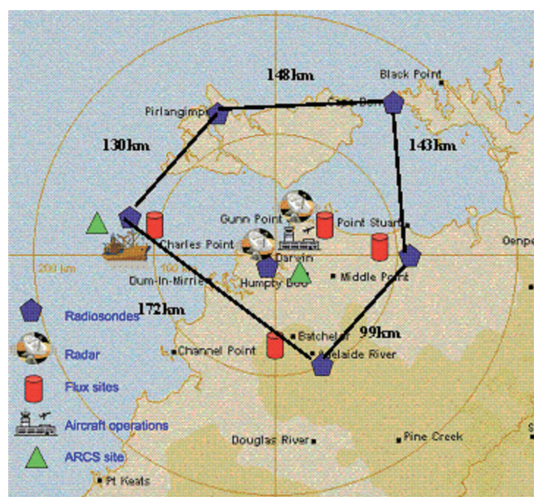


图1 TWP-ICE 观测站示意图

(Fridlind et al, 2010)

Fig.1 Diagram of the TWP-ICE observation sites

(Fridlind et al, 2010)

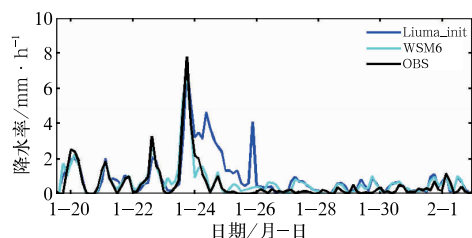


图2 2006年1月19日至2月2日降水模拟与观测降水随时间的变化特征

Fig.2 Time evolution of the observed and simulated precipitation rates from 19 January to 2 February 2006

WSM6 方案模拟的降水率随时间变化同样分为降水多发和少发两个阶段,WSM6 方案的模拟结果与观测更为接近,而 Liuma 原始方案模拟的降水多发时间偏长,1月24日的强降水过程一直持续到25日晚间。

2.2 云中水凝物分布

图3为季风活跃期与抑制期 WSM6 方案和 Liuma 原始方案模拟的水凝物质量混合比高度-时间剖面图。由于实际观测中在强降水发生阶段资料质量不佳,并且实际观测中仅可分辨水凝物相态,无法细致区分各相态中的不同水凝物如何分布,我们选取 WSM6 方案作为参考,诊断分析 Liuma 原始方案云中水凝物分布的合理性。如图所示,WSM6 方案与 Liuma 原始方案的水凝物质量混合比分布模

拟结果有着较大差异。这种差异主要体现在冰相水凝物质量混合比分布特征,以及水凝物质量混合比总量上。

如图 3a,3c,3e 所示,在季风活跃期,WSM6 方案模拟的云冰占整体冰相水凝物的绝大部分,其中云冰深厚,集中在 5~10 km 高度,云冰质量混合比可以高达 $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;雪和霰集中分布在 5 km (0°C 层)附近,雪和霰质量混合比同样可达 $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。同时期内,Liuma 原始方案模拟的霰占整体冰相水凝物的绝大部分,存在于 5~15 km 的高度内,极值高于 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;云冰和雪含量则很低(图 3b,3d,3f)。Liuma 原始方案中冰相水凝物的这种分布特征与之前的研究是一致的。而在季风抑制期,WSM6 方案模拟的冰相水凝物中只有少量的云冰存在,云冰集中在 10~15 km,含量低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,并不存在雪和霰。同一时期 Liuma 原始方案模拟的冰相水凝物同样主要是云冰,其中云冰含量较低,分布在 5~15 km 的高度,少量雪分布于 5 km 附近,不存在霰。至于液相水凝物分布,两方案在季风活跃期均模拟出质量混合比高达 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的云水(图 3g,3h),此时期 WSM6 方案模拟的雨水质量混合比极值为 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而 Liuma 原始方案模拟的雨水质量混合比极值较强,超过 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。季风抑制期内两方案模拟均在低层有少量云水,雨水质量混合比很弱(图 3i,3j)。由于季风活跃期 Liuma 原始方案模拟的霰和雨水质量混合比远高于 WSM6 方案的结果且其模拟的深厚对流云存在时间较长,导致了 Liuma 原始方案模拟的地面降水率在 1月24日后仍存在高值,这与图 2 降水率相符合。需要注意的是,我们同样使用 TWP-ICE 提供的云分辨模式结果分析了季风活跃期与季风抑制期的各水凝物分布,同样呈现出季风活跃期冰、雪、霰质量混合比较高,季风抑制期三者质量混合比减弱的特征。

3 云微物理方案改进

通过第二部分的分析可知,Liuma 云微物理方案的水凝物分布呈现出冰、雪质量混合比偏少,而霰质量混合比明显偏多的状态。这可能是由于(1)与霰产生相关的微物理需要调整,霰的生成率过大,冰雪等水凝物过多过快地转化成为霰,因此应当调整相关过程,抑制霰的产生;(2)微物理过程计算流程

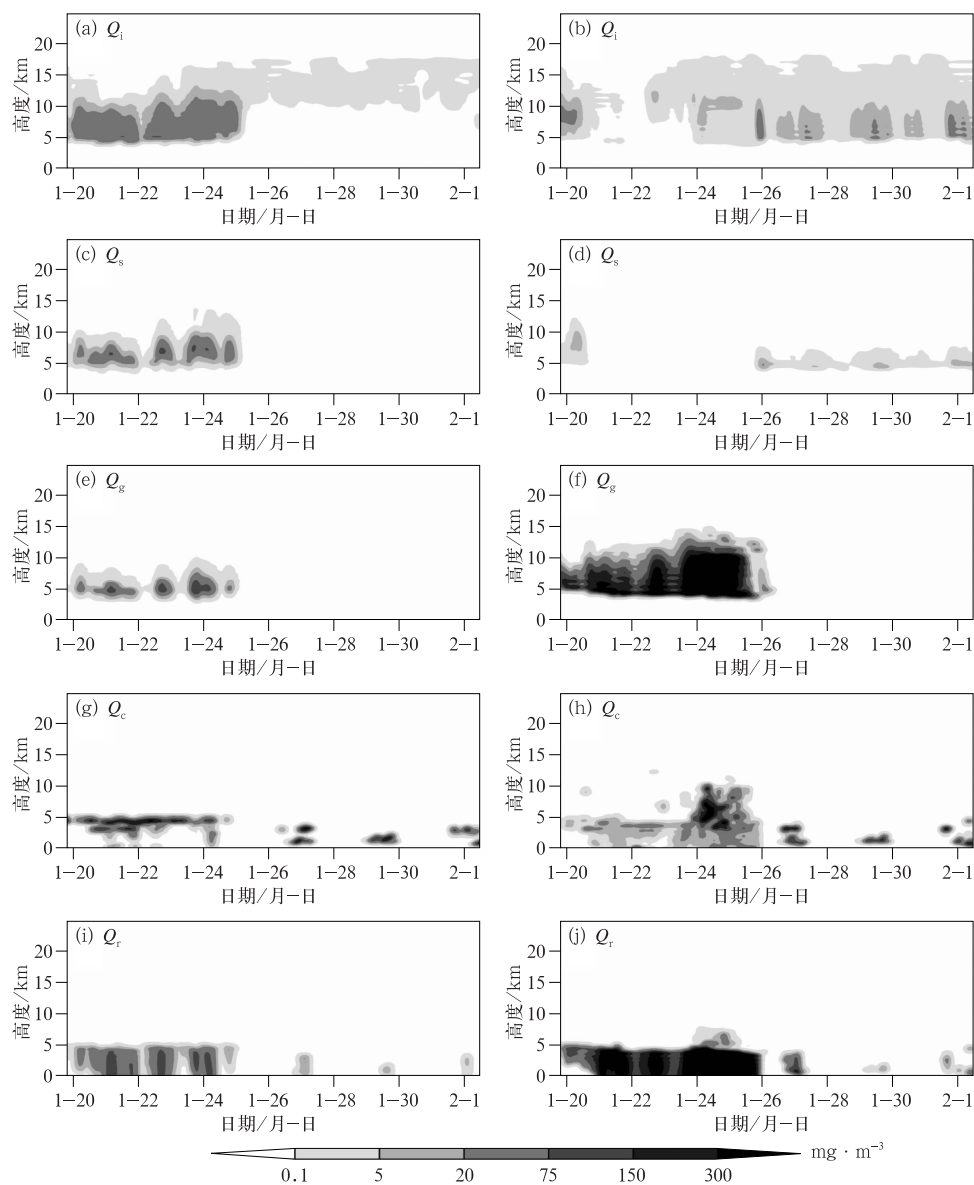


图 3 2006 年 1 月 19 日至 2 月 2 日(a,c,e,g,i)WSM6 方案和(b,d,f,h,j)Liuma 原始方案

模拟水凝物质量混合比(阴影)的高度-时间剖面

(a,b)云冰,(c,d)雪,(e,f)霰,(g,h)云水,(i,j)雨水

Fig. 3 Time-height distribution of the simulated hydrometeor mixing ratios (shaded)

by (a, c, e, g, i) WSM6 scheme and (b, d, f, h, j) Liuma_init scheme

from 19 January to 2 February 2016

(a, b) cloud ice, (c, d) snow, (e, f) graupel, (g, h) cloud water, (i, j) rain water

需要调整,现有微物理过程的计算顺序中产生霰的部分为最后计算,可能会造成过多的霰生产,因此应调整微物理过程计算顺序,使得各水凝物质量混合比同步更新,避免计算顺序可能造成的影响。

3.1 方案一:调整冻结参数化方案

在 Liuma 云微物理方案中,与霰产生主要相关

的微物理过程包括:霰碰并云滴,冰晶、雪团碰并成霰,以及雨滴、冰晶、雪团转化成霰等。其计算公式如下:

$$Ccg = \rho \times Q_c \times Q_g \times \frac{1}{\lambda_g^2} \times Avg$$

$$Cig = ncig \times Q_i \times \left[1 + \frac{\lambda_i}{\lambda_g} \times (4 + 10 \times \frac{\lambda_i}{\lambda_g}) \right]$$

$$C_{sg} = n_{csg} \times Q_s \times [1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_g} \times (4 + 10 \times \frac{\lambda_s}{\lambda_g})]$$

$$Frg = 100 \times \{ \exp[0.66 \times (T - 273.15) - 1] \} \times \rho \times Q_r^2 / (1000 \times n_r)$$

$$A_{ig} = \exp[18 \times (f_i - 1)] / 10 \times Q_i$$

$$A_{sg} = \frac{\exp[18 \times (f_s - 1)]}{10} \times Q_s$$

式中, A_{vg} 为碰并系数, ρ 为空气密度; Q_c 、 Q_r 、 Q_i 、 Q_s 、 Q_g 分别为云滴、雨水、云冰、雪、霰质量混合比 (单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); λ_i 、 λ_s 、 λ_g 分别为云冰、雪、霰粒子特征尺度; n_r 为雨滴数浓度; T 为温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$); f_i 、 f_s 分别为云冰、雪的淞附效率, 具体公式详见胡志晋和严采繁 (1986; 1987)。为了测试减弱霰的生成对改进冰相水凝物分布合理性的作用, 本研究简单地将上述转化率全部减弱为原始转化率的 1/10, 这种修改被记为 Liuma_graupel。需要注意的是, 我们对霰生成相关转化率的减弱程度进行过多种调整 (1/2~1/100), 此种调整对冰相水凝物分布影响

性质相似, 为避免冗赘, 仅选取 1/10 进行详细说明。

3.2 方案二: 调整微物理过程计算流程

在现有的 Liuma 云微物理方案中, 冰相云微物理过程所引起的潜热、水凝物质量混合比和浓度变化在每时步依次更新一次。其中雪团转化成霰是微物理过程计算的最后一个过程, 当更新霰的质量混合比和浓度时, 可能会导致雪霰之间的转化偏强。因此, 考虑到真实情况中各微物理过程为同时发生并相互竞争的关系, 本研究参照 WSM6 方案中的计算顺序, 将云冰、雪、霰生成和消耗的微物理过程及相变潜热同时计算, 对相关水凝物质量混合比、浓度和温度的变化进行统一更新, 替换了 Liuma 原始方案中这些微物理过程依次更新的计算流程。这种改变同时保证了云水、云冰、雪、霰质量混合比的正定性。其运算顺序的流程调整顺序如图 4, 这种修改记为 Liuma_order。

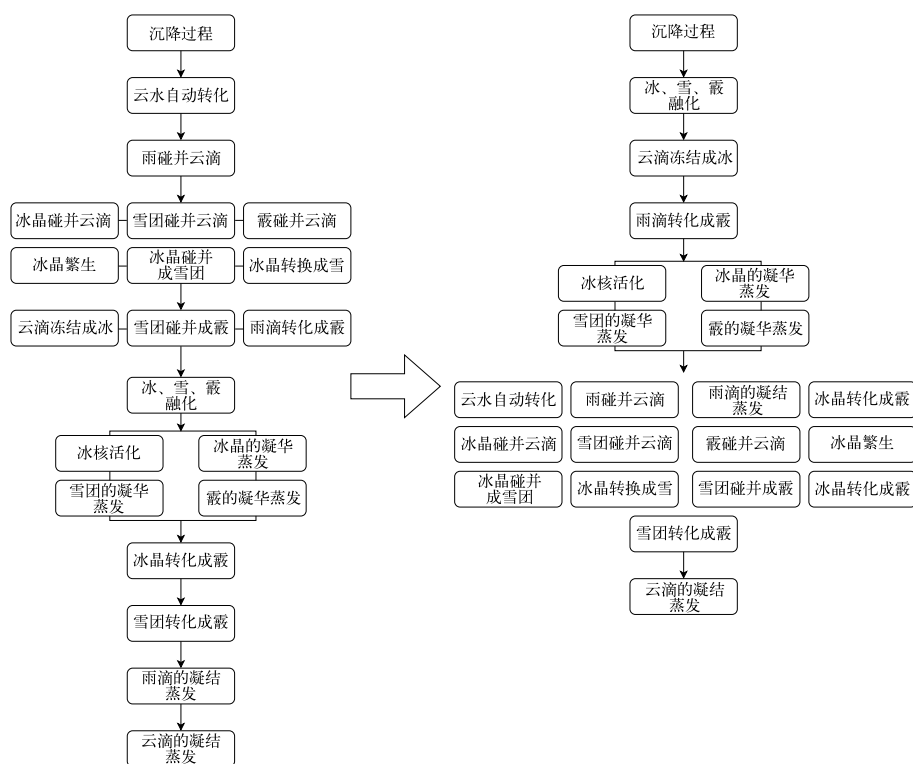


图 4 Liuma 云微物理方案运算流程图

(左侧为 Liuma 原始方案, 右侧为 Liuma_order 方案; 图中黑色箭头表示水凝物、温度的更新)

Fig. 4 Flow chart of the calculation order of Liuma scheme

(Left represents the Liuma_init scheme, right represents Liuma_order scheme, the solid black rows represent update of hydrometeor and temperature)

4 改进效果检验

4.1 地面降水

图 5 为 Liuma 云微物理方案调整后季风活跃期与抑制期降水模拟和观测降水随时间的变化特征。可以看到,两种改进方法均有效改善了 Liuma 原始方案对于降水的模拟,其在 1 月 26 日的 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水率都得到了减弱。但是, Liuma_graupel 方案在 1 月 24 日中午仍存在高值降水,这与观测不符。而 Liuma_order 方案的模拟结果较 Liuma_graupel 方案的模拟更接近观测,特别是在 1 月 24 日的强降水的强度和持续时间均与观测结果更加接近。

4.2 水凝物分布

图 6 为 Liuma 云微物理方案调整后季风活跃期与抑制期模拟的水凝物质量混合比高度-时间剖面图。如图 6a, 6c, 6e 所示, Liuma_graupel 方案模拟的云冰分布与 Liuma 原始方案较为接近,在季风活跃期稍有改善,24 日云冰质量混合比可以高达 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;雪和霰质量混合比的分布与 Liuma 原始方案较为接近,霰质量混合比极值高于 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,并未得到明显改善。而同时期内, Liuma_order 方案模拟的冰相水凝物分布较 Liuma 原始方案有很大改善。云冰集中在 $5 \sim 10 \text{ km}$ 的高度,质量混合比可达 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;雪同样分布在 $5 \sim 10 \text{ km}$ 的高度,在 22—24 日雪质量混合比可达 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;而霰质量混合比得到了有效减弱,霰同

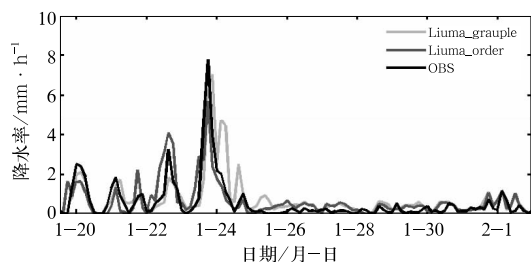


图 5 同图 2, 但为 Liuma_graupel 方案和 Liuma_order 方案模拟结果

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the results simulated by Liuma_graupel scheme and Liuma_order scheme

样集中分布在 $5 \sim 10 \text{ km}$ 的高度,霰质量混合比极值也下降至 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在季风抑制期, Liuma_graupel 方案中云冰和雪的分布与 Liuma 原始方案相似,并未有明显改善。而 Liuma_order 方案的冰、雪在此期间有所减弱,并没有霰存在。 Liuma_graupel 方案模拟的液相水凝物也与 Liuma 原始方案相似,并没有明显改变。而 Liuma_order 方案模拟的云水质量混合比在季风活跃期末期,即 24—25 日,有了明显的降低,原始方案中此时期的高液相水凝物分布造成了该时期降水的明显偏多。在季风活跃期, Liuma_order 改进方案模拟的云水质量混合比分布扩展到了 $5 \sim 10 \text{ km}$ 的高度,这意味着这段时期内对流发展旺盛,过冷水可以被带到很高的高度,这与深对流云的实际观测相一致 (Rosenfeld and Woodley, 2000),是 WSM6 方案及 Liuma 原始和 Liuma_graupel 改进方案都没有模拟出来的。此外, Liuma_order 改进方案降低了雨水混合比质量,极值为 $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,与 WSM6 方案相当 (图 3j, 图 6j)。因此,可以得出,相较于 Liuma_graupel 方案, Liuma_order 方案更有效地改善了冰相水凝物冰雪偏少、霰偏多的特征,同时对液相水凝物的模拟也更加合理。

5 结论与讨论

本文利用 GRAPES_SCM 模式,选用 Liuma 和 WSM6 两种微物理方案,对 TWP-ICE 试验进行了数值模拟。得到如下结论:

(1) 在 GRAPES_SCM 框架下, Liuma 原始方案和 WSM6 方案均能呈现出 TWP-ICE 期间热带云系的发展特征,能够明显区分试验期间的季风活跃期和季风抑制期。模拟的降水率量级和时间演变趋势与实际观测可比。在季风活跃期, Liuma 原始方案模拟的降水多发时间偏长,1 月 24 日的强降水过程一直持续到 25 日晚间,通过对比云中水凝物分布,这是由于 Liuma 原始方案在季风活跃期模拟的对流云发展过于旺盛,模拟的霰与雨质量混合比过多所致。

(2) 活跃期 Liuma 原始方案和 WSM6 方案模拟的冰云的组成结构差异显著, Liuma 原始方案所模拟的冰相水凝物分布中,存在冰雪含量过少、霰过多的现象,这与以前的研究结果相一致。

(3) 两种改进方案对于降水的模拟较 Liuma 原

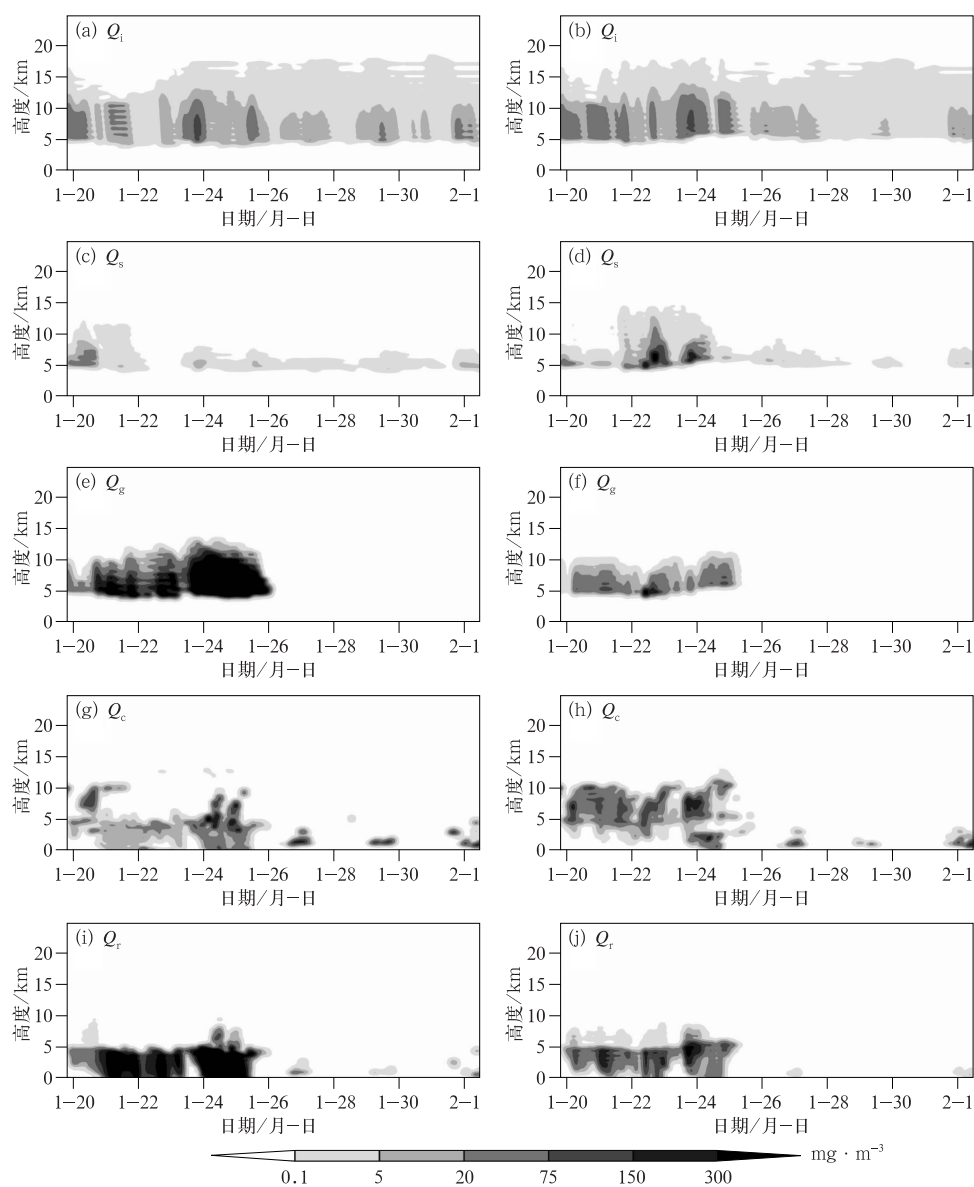


图 6 同图 3, 但为 (a, c, e, g, i) Liuma_graupel 方案和 (b, d, f, h, j) Liuma_order 方案模拟结果

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the results from Liuma_graupel scheme (a, c, e, g, i), and Liuma_order scheme (b, d, f, h, j)

始方案均有所改善。然而, Liuma_graupel 方案模拟的冰相水凝物与 Liuma 原始方案较为类似, 并在季风抑制期间的高层出现了霰, 改进效果不理想。Liuma_order 方案对程序中各微物理过程计算顺序进行了优化, 避免了由于顺序计算所带来的后序过程偏强的问题, 改进后霰质量混合比明显减少, 冰雪质量混合比明显增加, 整体冰相水凝物分布较为合理。

本文应用 GRAPES_SCM 仅针对一个热带个例进行模拟, 对比了两种微物理方案的模拟结果, 并

改进 Liuma 方案, 对其水凝物分布进行了调整。改进后 Liuma 方案的冰相水凝物分布更加合理。在后续的研究工作中, 改进后的 Liuma 方案将被应用于区域模式中进行测试, 通过大量的个例试验及批量试验, 检验调整后的 Liuma 方案对冰相水凝物分布和预报效果是否确有改进。

参考文献

陈超君, 王东海, 李国平, 等, 2012. 冬季高海拔复杂地形下 GRAPES-Meso 要素预报的检验评估[J]. 气象, 38(6): 657-668. Chen C J,

- Wang D H, Li G P, et al, 2012. A study of the GRAPES-Meso prediction verification for high altitude and complex terrain during winter time[J]. Meteor Mon, 38(6): 657-668(in Chinese).
- 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等, 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报, 53(20): 2396-2407. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific design[J]. Chin Sci Bull, 53(22): 3433-3445(in Chinese).
- 陈炯, 马占山, 苏勇, 2017. 适用于 GRAPES 模式 C-P 边界层方案的设计和实现[J]. 应用气象学报, 28(1): 52-61. Chen J, Ma Z S, Su Y, 2017. Boundary layer coupling to charney-phillips vertical grid in GRAPES Model[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 52-61(in Chinese).
- 陈小敏, 刘奇俊, 章建成, 2007. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究[J]. 气象, 33(7): 33-43. Chen X M, Liu Q J, Zhang J C, 2007. A numerical simulation study on microphysical structure and cloud seeding in cloud system of Qilian Mountain Region[J]. Meteor Mon, 33(7): 33-43(in Chinese).
- 胡志晋, 严采馨, 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 Z J, Yan C F, 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I)—microphysical model[J]. J Academy Meteor Sci, 1(1): 37-52(in Chinese).
- 胡志晋, 严采馨, 1987. 层状云微物理过程的数值模拟(二)——中纬度气旋云系的微物理过程[J]. 气象科学研究院院刊, 2(2): 23-32. Hu Z J, Yan C F, 1987. Numerical simulation of microphysical processes of stratiform clouds (II)—microphysical processes in middlelatitude cyclone cloud systems[J]. J Academy Meteor Sci, 2(2): 23-32(in Chinese).
- 金莲姬, 银燕, 王盘兴, 等, 2007. 热带深对流云砧数值模拟及云凝结核数浓度对其影响的初步试验[J]. 大气科学, 31(5): 793-804. Jin L J, Yin Y, Wang P X, et al, 2007. Numerical modeling of tropical deep convective anvil and sensitivity test on its response to changes in the cloud condensation[J]. Chin J Atmos Sci, 31(5): 793-804(in Chinese).
- 刘奇俊, 胡志晋, 周秀骥, 2003. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)云降水显式方案[J]. 应用气象学报, 14(S1): 60-67. Liu Q J, Hu Z J, Zhou X J, 2003. Explicit cloud schemes of HLAFS and simulation of heavy rainfall and clouds, part I: explicit cloud schemes[J]. J Appl Meteor Sci, 14(S1): 60-67(in Chinese).
- 梅海霞, 沈新勇, 王卫国, 等, 2015. 双参数微物理方案在 WRF 单柱模式中的模拟检验和对比研究[J]. 高原气象, 34(4): 890-909. Mei H X, Shen X Y, Wang W G, et al, 2015. Evaluation and comparison of two double-moment bulk microphysics schemes using WRF single-column model[J]. Plateau Meteor, 34(4): 890-909(in Chinese).
- 聂皓浩, 刘奇俊, 马占山, 2016. 高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究[J]. 气象, 42(12): 1431-1444. Nie H H, Liu Q J, Ma Z S, 2016. Simulation and analysis of heavy precipitation using cloud microphysical scheme coupled with high resolution GRAPES model[J]. Meteor Mon, 42(12): 1431-1444(in Chinese).
- 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 X Y, Mei H X, Wang W G, et al, 2015. Numerical simulation of ice-phase processes using a double-moment microphysical scheme and a sensitivity test of ice nuclei concentration[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 83-99(in Chinese).
- 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等, 2017. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化[J]. 应用气象学报, 28(1): 1-10. Shen X S, Su Y, Hu J L, et al, 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 1-10(in Chinese).
- 石荣光, 刘奇俊, 马占山, 2015. 利用 GRAPES 模式研究气溶胶对云和降水过程的影响[J]. 气象, 41(3): 272-285. Shi R G, Liu Q J, Ma Z S, 2015. Numerical simulation of aerosol effects on cloud and precipitation using GRAPES model[J]. Meteor Mon, 41(3): 272-285(in Chinese).
- 田伟红, 2018. 俄罗斯探空观测减少对 GRAPES 模式的影响分析[J]. 气象, 44(2): 320-325. Tian W H, 2018. Impact of the reduced observation of Russia radiosonde on GRAPES model[J]. Meteor Mon, 44(2): 320-325(in Chinese).
- 万晓敏, 田伟红, 韩威, 等, 2017. FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究[J]. 气象, 43(1): 1-10. Wan X M, Tian W H, Han W, et al, 2017. The evaluation of FY 2E reprocessed IR AMVs in GRAPES[J]. Meteor Mon, 43(1): 1-10(in Chinese).
- 王德立, 徐国强, 贾丽红, 2013. GRAPES 的积云对流参数化方案性能评估及其改进试验[J]. 气象, 39(2): 166-179. Wang D L, Xu G Q, Jia L H, 2013. The evaluation of cumulus parameterization schemes in GRAPES model and its improved experiments[J]. Meteor Mon, 39(2): 166-179(in Chinese).
- 王静, 陈静, 钟有亮, 等, 2017. GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估[J]. 气象, 43(4): 385-401. Wang J, Chen J, Zhong Y L, et al, 2017. Verification and evaluation of the southwest vortex forecast by GRAPES-REPS[J]. Meteor Mon, 43(4): 385-401(in Chinese).
- 王婧卓, 陈静, 庄照荣, 等, 2018. GRAPES 区域集合预报模式的初值扰动增长特征[J]. 大气科学, 42(2): 367-382. Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al, 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2): 367-382(in Chinese).
- 王宇虹, 徐国强, 2017. 青藏高原地形重力波拖曳的初步分析及数值模拟研究[J]. 气象学报, 75(2): 275-287. Wang Y H, Xu G Q, 2017. Preliminary analysis of the gravity wave drag on Qinghai-Tibet Plateau and its numerical simulation[J]. Acta Meteor Sin, 75(2): 275-287(in Chinese).

- 熊秋芬, 2011. GRAPES_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析[J]. 气象, 37(2): 185-193. Xiong Q F, 2011. Verification of GRAPES_Meso precipitation forecasts based on fine-mesh and station datasets[J]. Meteor Mon, 37(2): 185-193(in Chinese).
- 杨军丽, 沈学顺, 2012. GRAPES 单柱模式的试验研究[J]. 气象学报, 70(2), 275-290. Yang J L, Shen X S, 2012. A case study of the GRAPES single column model[J]. Acta Meteor Sin, 70(2): 275-290(in Chinese).
- 赵滨, 张博, 2018. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J]. 暴雨灾害, 37(1): 1-7. Zhao B, Zhang B, 2018. Application of neighborhood spatial verification method on precipitation evaluation[J]. Torr Rain Dis, 37(1): 1-7(in Chinese).
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 38-51(in Chinese).
- Ball M A, Plant R S, 2008. Comparison of stochastic parametrization approaches in a single-column model[J]. Philosophical Transactions, 366(1875): 2605-2623.
- Davie L. 2009. TWP-ICE single column model case[M]. Technical Report.
- Fridlind A M, Ackerman A S, Petch J, et al, 2010. ARM/GCSS/SPARC TWP-ICE CRM intercomparison study [M]. NASA Tech Memo.
- Grabowski W W, Bechtold P, Cheng A, et al, 2010. Daytime convective development over land: a model intercomparison based on LBA observations[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 132(615): 317-344.
- Hua C, Liu Q J, 2013. Numerical simulation of cloud microphysical characteristics of landfall typhoon Krosa[J]. J Trop Meteor, 19(3): 284-296.
- Li Z, Zhang Y T, Liu Q J, et al, 2018. A study of the influence of microphysical processes on Typhoon Nida (2016) using a new Double-Moment microphysics scheme[J]. J Trop Meteor, 24(2): 123-130.
- May P T, Mather J H, Vaughan G, et al, 2008. Characterizing oceanic convective cloud systems[J]. Bull Ame Meteor Soc, 89(2): 153-154.
- Morrison H, Shupe M D, Curry J A, 2003. Modeling clouds observed at SHEBA using a bulk microphysics parameterization implemented into a single-column model[J]. J Geophys Res Atmos, 108(D8): 1048-1053.
- Rosenfeld D, Woodley W L, 2000. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C [J]. Nature, 405(6785): 440-442.
- Posselt R, Lohmann U, 2007. Introduction of prognostic rain in ECHAM5: design and single column model simulations[J]. Atmos Chem Phys Discuss, 8(11): 2949-2963.
- Xie S C, Hume T, Jakob C, et al, 2010. Observed large-scale structures and diabatic heating and drying profiles during TWP-ICE [J]. J Climate, 23(1): 57-80.
- Yang J L, Shen X S, 2011. The construction of SCM in GRAPES and its applications in two field experiment simulations[J]. Adv Atmos Sci, 28(3): 534-550.