

黄伟, 张旭, Jian-Wen Bao, 等. 2018. GFS 物理过程包在 GRAPES 区域模式中的实施及改进: 单柱试验 [J]. 大气科学, 42 (6): 1219–1234. Huang Wei, Zhang Xu, Jian-Wen Bao, et al. 2018. Implementation and improvement of the GFS physics package in the GRAPES regional model: Single column experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1219–1234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17169.

GFS 物理过程包在 GRAPES 区域模式中的 实施及改进: 单柱试验

黄伟^{1,2} 张旭^{1,2} Jian-Wen Bao³ 陈葆德^{1,2}

¹ 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

² 中国气象局台风数值预报重点实验室, 上海 200030

³ 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 地球系统研究实验室 (ESRL), 美国科罗拉多州波尔德 80305-3328

摘 要 将 NCEP 的中期全球预报系统 (GFS) 整套物理过程包引入 GRAPES 区域模式, 并利用美国 ARM 计划 (Atmospheric Radiation Measurement Program) 南部大平原外场 1997 年夏加强观测资料, 对 GRAPES 模式中原有物理过程和 GFS 物理过程进行了单柱试验的测试和比较, 评估了两组物理过程的模拟性能。单柱试验结果表明 GFS 试验模拟的位温和水汽混合比演变更为准确; 到地短波和长波辐射的误差更小; 其模拟的地面向上潜热通量与观测更为接近, 而原物理过程试验的感热偏大; GFS 试验对 2 m 气温最高和最低值的模拟也比原有物理过程更接近观测。进一步分析降水的模拟发现, 两组物理过程对强降水过程均有很好的预报能力, 但对中等强度降水存在漏报或者发生时间偏晚的倾向, 此外还存在对小雨的空报。在 3 个降水事件的模拟中, GFS 试验模拟的降水误差小于原物理过程试验。最后还对两组试验中明显的降水过程漏报和降水延迟进行了分析, 对 GFS 物理过程包中对流参数化的对流触发方式的修改, 可改进此次降水的模拟, 进而通过更准确的反馈过程, 改善对大尺度场的模拟。

关键词 GRAPES 区域模式 中期全球预报系统 (GFS) 物理过程包 单柱试验 对流参数化

文章编号 1006-9895(2018)06-1219-16

中图分类号 P435.1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17169

Implementation and Improvement of the GFS Physics Package in the GRAPES Regional Model: Single Column Experiments

HUANG Wei^{1,2}, ZHANG Xu^{1,2}, Jian-Wen Bao³, and CHEN Baode^{1,2}

¹ Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

² Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

³ Earth System Research Laboratory (ESRL), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Boulder, Colorado, USA 80305-3328

Abstract The physics package of the NCEP Global Forecast System (GFS) and its single column version have been implemented in the GRAPES-MESO model. Using the data collected at the ARM (Atmospheric Radiation Measurement

收稿日期 2017-05-22; 网络预出版日期 2018-01-02

作者简介 黄伟, 男, 1976 年出生, 研究员, 主要从事数值预报研究。E-mail: huangw@typhoon.org.cn

通讯作者 陈葆德, E-mail: baode@typhoon.org.cn

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206006, 国家重点研发计划 “政府间国际科技创新合作” 重点专项 2016YFE0109700, 国家自然科学基金项目 41575101、41505087

Funded by Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) Administered by the Chinese Ministry of Finance and the Ministry of Science and Technology (Grant GYHY201206006), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFE0109700), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41575101, 41505087)

Program) Southern Great Plain site during the intensive observing period in the summer of 1997, several experiments of single-column model (SCM) are conducted to test the performance of a set of original physical schemes of GRAPES-TCM and the GFS physics package implemented. Temperature, moisture, radiation, surface heat flux, surface air temperature and precipitation are evaluated. It is found that the potential temperature and water vapor mixing ratio simulated by the GFS experiment is more accurate than that simulated by the original physical schemes in GRAPES-TCM. Errors of surface downward solar and long-wave radiation fluxes simulated by the GFS experiment are less than that by the original physical schemes and upward latent and sensible heat fluxes also agree better with observations. The maximum and minimum 2-m air temperatures of the GFS experiment are close to observations compared with that simulated with the original physical schemes. Analysis of precipitation simulation shows that both sets of physical schemes can well reproduce heavy rainfall events. The failure and delay of moderate rainfall events and overestimation of drizzle events are commonly found for the two sets of experiments. For the case studies of three rainfall events, the errors of precipitation rate simulated by the GFS experiment are smaller than that simulated by the original physical schemes. This study also analyzes cases in which rainfall events are either missed or delayed in forecasts of both experiments and reveals that the modification of the trigger method in the cumulus parameterization scheme can significantly improve the simulation of precipitation, which subsequently improves the simulation of large scale fields via more accurate feedback.

Keywords GRAPES regional model, GFS (Global Forecast System for Medium Range) physics package, Single column model experiment, Convection parameterization

1 引言

数值预报模式由动力框架(网格尺度)和物理过程两部分组成。物理过程对次网格尺度运动的描述要通过参数化表达(近似),其优劣对模式的预报精度至关重要。由于模式物理的多样性与复杂性,在发展过程中往往针对某一特定过程设计,而且各个物理过程通常彼此独立研发,较少全面综合地考虑各过程之间,以及物理过程与动力框架之间的联系。近年来各大数值预报中心,例如欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts),美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)等,开始强调各物理过程之间的相互作用与协调,都在业务模式中将各种物理过程发展纳入统一考虑,并形成完整的物理过程包。

全球/区域同化与预报系统(GRAPES)是中国气象局研发的数值天气预报系统(陈德辉等, 2008),包括 GRAPES 全球模式和 GRAPES 区域模式两个版本。其物理过程的引入参考了美国大气科学研究中心 NCAR (National Center for Atmospheric Research)的 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)程序结构的设计,可选用物理过程也与 WRF 模式相当(徐国强等, 2008)。Yang and Shen (2011)基于 GRAPES 模式发展了一个单柱模式,并利用外场观测资料对 GRAPES 模式中陆面过程,边界层过程等进行了测试试验,并利用该

单柱模式对 GRAPES 模式中的对流参数化进行了测试和改进,为 GRAPES 模式中物理过程的发展提供了很好的试验平台。利用 GRAPES 进行科研、教学的各种数值试验时,物理过程的选择十分方便。但各物理过程之间相互作用并未有充分考虑,特别是在业务应用中,如何合理有效地进行各物理过程的组合,是一个难点。NCEP 的中期全球预报系统 GFS (Global Forecast System for Medium Range)的物理过程一直在持续发展中,在边界层方案,深对流方案和浅对流方案等进行了大量的改进,并充分考虑了各过程之间的相互作用(Han and Pan, 2006, 2011)。美国大气海洋局(NOAA)新一代全球非静力模式 FIM (Finite-Volume Icosahedral Model)以整套 GFS 的物理过程包作为基础,进行试验和改进(Bleck et al., 2015)。

本研究将整套 NCEP GFS 物理过程包引入 GRAPES 区域模式,利用 GRAPES 的单柱模式,使用外场观测资料对该物理过程包进行了进行调试、测试,并对对流参数化方案的触发方法进行了调整。希望通过一系列的试验与评估,较全面地了解 GFS 物理过程包的整体性能,为基于 GRAPES 区域模式数值预报系统精度的提高提供帮助。

2 模式、资料和方法

2.1 GRAPES 及其单柱模式

GRAPES 模式兼顾全球与有限区可选的预报区域设计,静力与非静力可选的平衡设计,采用半

隐式半拉格朗日时间差分方案, 经纬度格点的网格设计, 水平方向取 Arakawa C 格点, 垂直方向采用 Charney Philips 格式非均匀跳层变量配置, 高度为地形追随坐标。模式目前包含了辐射、边界层、积云对流、微物理、陆面等全套物理过程参数化方案(陈德辉等, 2008)。Yang and Shen (2011) 加入新的模块和外场观测资料的输入接口, 形成了 GRAPES 单柱模式试验平台。该单柱模式直接依附于 GRAPES 系统, 保证了单柱模式的物理过程与完整大气模式的物理过程一致

2.2 GFS 物理过程及引入

NCEP GFS 辐射参数化方案是在 RRTM 方案上改进的 (Mlawer et al., 1997; Clough et al., 2005), 该方案中包含臭氧、水汽、二氧化碳和氧气的吸收效应。云的光学厚度参数化为云粒子有效半径和云凝结路径的函数。方案中, 雨雪的辐射效应并未引入, 但大气中的气溶胶辐射效应已经考虑。长波辐射方案为 RRTM。深对流参数化采用 Simplified Arakawa-Schubert (SAS) 方案 (Grell, 1993), 但在多处进行了修订, 例如不再采用随机云顶; 指定有限的热量, 水汽和动量卷入卷出率; 在上层云中增加云水卷出 (Han and Pan, 2011)。2010 年, 浅对流方案中引入了新的质量通量方案, 定义边界层内最大湿静力能层为对流开始层; 云顶限定为 700 hPa, 卷入率给定为与高度成反比, 而卷出率定义为等于云底卷入率的常数。目前业务的 GFS 的微物理过程基于 Zhao and Carr (1997), 仍是简单的暖云方案。在辐射方案中则采用了诊断云方案 (Xu and Randall, 1996), 这一方案同时考虑对流和大尺度凝结产生的云量。边界层方案是一个非局地方案 MRF (Hong and Pan, 1996), 边界层高度使用总体 Richardson 数方法诊断得到, 而陆面过程是 4 层的 Noah LSM (Ek et al., 2003)。

在将 NCEP GFS 物理过程引入 GRAPES 区域模式的实施过程中, 由于 GFS 物理过程调用接口与 GRAPES 原有物理过程的调用接口有一定的差别, 考虑到物理过程的完整性和各个物理过程之间的相互作用, 并未在 GRAPES 原有物理过程可插拔接口基础上, 逐一引入 GFS 的各个物理过程方案, 而是将 GFS 物理过程作为一个整体调用。为此需要在程序上额外增加的工作包括: (1) 编写一个接口以便调用 GFS 的各个过程; (2) 以 GRAPES 现有的植被、土壤的分类及特征定义取代原有的 GFS 物理

过程中的设置; (3) 增加 GFS 过程所需的针对不同波长的反射率资料; (4) 引入 GFS 方案对二氧化碳、臭氧和其他微量气体分布。

2.3 资料

GRAPES 单柱试验所用的资料为 GCSS WG4 (Global Energy and Water Cycle Experiment Cloud System Study Working Group 4) 第三次个例模拟所用资料 (Ghan et al., 2000)。该资料来自 ARM 计划 (Atmospheric Radiation Measurement Program) 美国南部大平原地区 [观测场地中心位于 (36.61°N, 97.49°W)] 1997 年夏季的 6 月 18 日 23:30 (协调世界时, 下同) 至 7 月 17 日 23:30 的观测资料。数据集中的模式大尺度强迫采用了 Zhang and Lin (1997) 变分同化方案, 除了常规的大尺度气象场, 数据集还包括云量、辐射通量、陆一气热量通量等资料, 可同时用于评估模式的辐射过程, 边界层过程和云、降水过程。近 20 年来, 这些资料被广泛用于模式物理过程的评估和改进工作 (Xie and Zhang, 2000; Xie et al., 2002; Wang and Zhang, 2013; Wang, 2015; Wang and Pan, 2015)。

2.4 试验设计

从 2007 年起, 上海台风研究所以 GRAPES 区域模式为基础, 发展了区域 GRAPES-TCM 台风数值预报系统 (黄伟等, 2007), 已有一组业务物理过程选择 (黄伟和梁旭东, 2010)。为了评估 GFS 物理过程包的性能和特点, 本文将 GRAPES-TCM 中采用的物理过程选项, 包括 Dudhia (1989) 实施的简单短波辐射方案和 RRTM 长波辐射方案、WSM6 微物理方案 (Hong and Lim, 2006) 和 Xu and Randall (1996) 的云参数化方案, SAS 对流参数化方案、MRF 边界层方案和 NOAA 陆面过程方案在 WRF 中的版本。与 GFS 物理过程包相比, 这套方案除了短波辐射方案比较简单, 微物理过程相对复杂之外, 其他方案都与 GFS 物理过程包中的各方案相同或者类似, 不同之处在于各个方案在引入不同的数值模式时的具体实施的差异以及各方案在业务试验过程中对细节的调整。

利用 2.3 介绍的分析资料, 对 GRAPES-TCM 原有物理过程组合和 NCEP GFS 物理过程包进行了对比试验, 两组试验的结果称为 CTL 试验和 GFS 试验。主要的试验分为两个系列, 第一系列为整个观测期间的完整积分 (1997 年 6 月 18 日 23:30 至 7 月 17 日 23:30, 共 29 日), 用以评估这两组物理过

程的总体性能, 另外, 参考 Xu et al. (2002) 的分类, 对这一试验期间的 3 次主要降水过程分别作了 5 天的模拟, 用以评估 GFS 物理过程包对降水的模拟特征, 对应的时段为时段 A (1997 年 6 月 26 日 23:30 至 7 月 1 日 23:30)、时段 B (1997 年 7 月 7 日 23:30 至 12 日 23:30) 和时段 C (1997 年 7 月 12 日 23:30 至 17 日 23:30)。与杨军丽和沈学顺 (2012) 的工作类似, 所有的模拟试验结果都是通过集合样本的平均得到的, 具体做法为, 对各个试验的初始场在大气边界层 (取 2 km 内) 以标准差 0.5 K 位温随机扰动和标准差为 0.5 g kg^{-1} 的水汽混合比随机扰动获得, 每组试验有 20 个样本。此外, 初始场中具体的设置均与杨军丽和沈学顺 (2012) 一致。

3 结果分析

3.1 29 天长期积分特征

图 1 是 CTL 试验和 GFS 试验不同层次的位温模拟误差, 由于高层位温的绝对值大, 两组试验的结果均是高层误差较大, 而底层误差较小。两组试验的位温误差分布有类似的特点, 主要表现为高层偏冷, 低层 (边界层内) 略微偏暖; 相比而言, GFS 试验的位温误差比 CTL 试验更小, 特别是在中高层, CTL 试验模拟的位温明显偏冷, 部分时段绝对误差超过 20 K, 而 GFS 试验仅在 7 月 3 日左右位温冷偏差超过 10 K。

两组试验对水汽混合比的模拟结果是十分接近的 (图 2), 其主要特点为边界层内偏干, 中层 (2~6 km) 以偏湿为主, 而到了中高层, 由于大气的绝对湿度迅速减小, 水汽混合比的误差相对较小。相比而言, GFS 试验的水汽混合比误差略小于 CTL 试验的结果, 例如 CTL 试验边界层内偏干超过 4 g kg^{-1} , 而 GFS 试验偏小一些, 中层的偏湿也有类似特征, CTL 试验偏湿的 1 g kg^{-1} 等值线可向上伸展至 6 km, 相同时段, GFS 试验误差的 1 g kg^{-1} 等值线在 3 km 左右。

两组试验中的温度和水汽混合比模拟误差表现两组物理过程的综合性能, 其表现受各个过程的影响, 下面将以几个外场试验中可用的变量作为依据, 分别对整个试验阶段的辐射、近地面通量和温度, 以及降水结果进行评估。

图 3 和图 4 分别给出了近地面向下的短波辐射和长波辐射的模拟结果, 图中纵坐标为小时, 横坐标为日数。从向下短波辐射的模拟结果来看, 两组

试验均能模拟出辐射的日变化以及天气系统对辐射的影响, 但 GFS 物理过程模拟的短波辐射与观测更接近。首先, 从两组试验的误差分布来看, GFS 的结果误差更小; 其次, GFS 模拟的短波辐射峰值与观测更接近, 而 CTL 试验存在较大的负误差。图 5、图 6 是两组试验模拟结果与实况的比较分析。图 5 给出了期间两组试验模拟的云量与实况的比较, 虽然实况的云量与模式中模拟的次网格云量因定义的差别而存在较大的差异, 但可以看到两组试验对辐射的模拟结果与云的模拟结果密切相关。CTL 试验模拟的降雨期云系偏多, 导致模拟的短波辐射明显偏弱; 而在降雨间歇期 (结合图 7b), 模拟的云明显偏少, 又易造成较大正误差。两组试验对近地面向下长波辐射的模拟结果类似, 均以正误差为主, 这也与图 5 两组试验对云量的模拟结果一致, 表现为有降水过程时, CTL 试验模拟的云比实况和 GFS 试验更为深厚且不易消散, 导致 CTL 试验模拟的长波辐射误差明显大于 GFS 试验。

图 6 是两组试验模拟的近地面向上感热和潜热通量与观测结果比较的散点图。两组试验模拟的近地面热通量均与观测十分接近, 但从散点的分布形态来看, CTL 试验的模拟结果较为分散, 存在较多偏离 1:1 线远的点, 例如图 6a 中存在着大量实况大于 50 W m^{-2} 而模拟结果小于 50 W m^{-2} 的点; 图 6b 则存在 15 个以上模拟潜热大于 400 W m^{-2} 的样本, 实际观测中并不存在。相比之下, GFS 模拟的感热和潜热通量更接近观测。

图 7 是两组试验模拟的 2 m 气温和降水强度的演变。从 2 m 气温的模拟结果来看, 两组试验都能较好模拟气温的日变化以及气温的总体变化趋势, 但 GFS 试验的结果明显优于 CTL 试验, 主要表现在发生降水时, 其最高气温明显高于 CTL 试验而与实况接近; 而其最低温度一直低于 CTL, 并与观测更接近。需要指出的是, 两组试验模拟的最低 2 m 气温均明显偏高。同样, 两组试验均基本能模拟出近一个月中几次主要的降水过程, 同时两组试验也都有一定程度的空报, 最主要的一次是 7 月 7 日左右, 实际并无降水, 但两组试验都模拟出明显的降水过程; 另外, 两组试验还容易在主要降水过程的间歇期, 出现一些对小雨的空报, 例如 6 月 25 日左右, 6 月 27 日前后等。

为了进一步定量评估两组物理过程对以上几种主要物理量的模拟能力, 利用观测资料和两组试

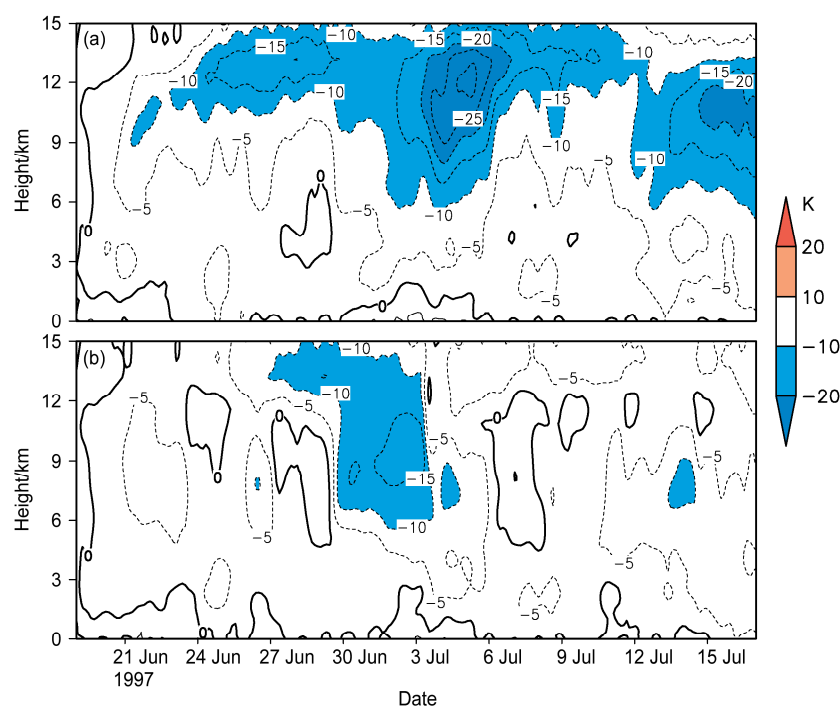


图 1 (a) CTL 试验和 (b) GFS 试验的位温误差 (单位: K) 高度—时间分布。横坐标为时间 (单位: d), 纵坐标为离地表高度 (单位: km), 填充色为误差超过色标所示数值的区域

Fig. 1 Time-height cross sections of simulated errors of potential temperature (units: K): (a) CTL experiment; (b) GFS experiment. The abscissa denotes the time (units: d) and the ordinate is for the vertical distance (units: km). Shaded areas indicate errors above the values shown in the color bar

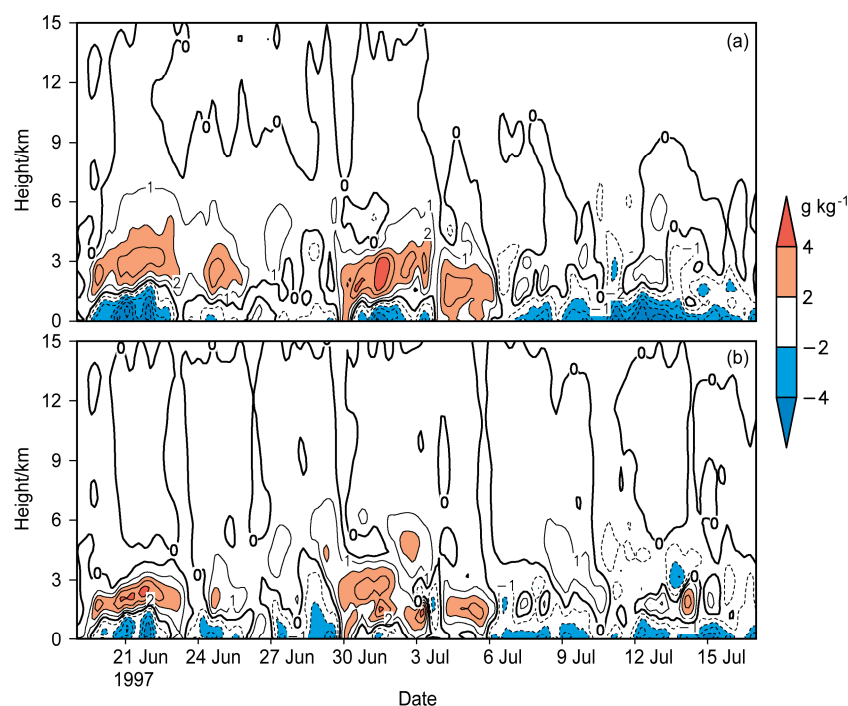


图 2 同图 1, 但为水汽混合比误差 (单位: g kg^{-1})

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the water vapor mixing ratio (units: g kg^{-1})

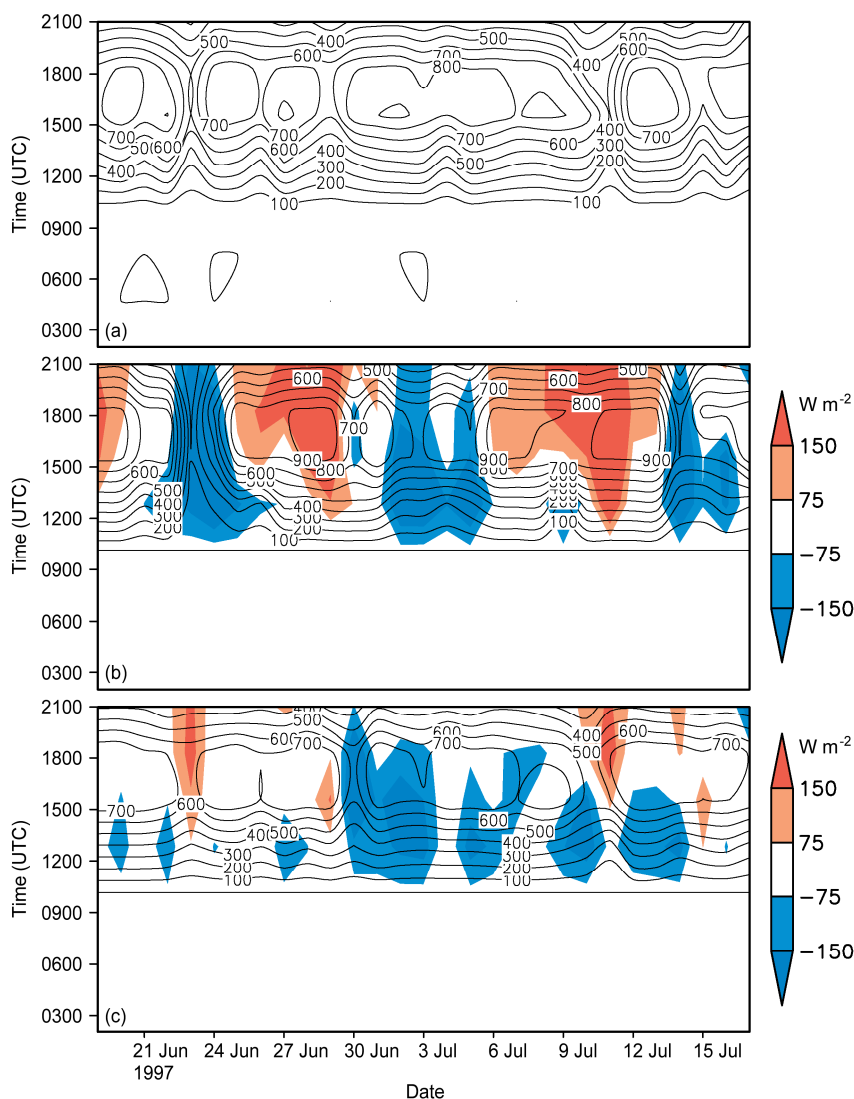


图3 (a) 实况观测、(b) CTL 试验以及 (c) GFS 试验的近地面向下短波辐射(等值线, 单位: W m^{-2}) 随时间分布。(b、c) 中填色为试验结果与实况观测的差异, 纵坐标为协调世界时, 横坐标为天数

Fig. 3 Distributions versus time for near surface downward solar radiation (units: W m^{-2}): (a) Observations, (b) CTL experiment, and (c) GFS experiment. Shaded areas represent differences between simulations and observations, the ordinate indicates the universal time, and the abscissa shows the number of days

验每日 8 次, 共计 232 次输出计算了整个试验阶段所模拟各个物理量均方根误差、偏差以及与观测的相关系数。均方根误差可描述模拟值与观测值的偏离程度, 偏差可反映模拟对观测的偏离方向和大小, 而相关系数可表征模拟与观测的一致性。从表 1 的结果来看, GFS 试验模拟的所有变量的均方根误差都比 CTL 试验的小。两组试验模拟的偏差结果则呈现出不同的特点, GFS 物理过程模拟的近地面入射短波辐射更为偏少, 这主要是 GFS 物理过程对积分第 12~15 日过程入射辐射模拟偏低, 事实上 CTL 试验也有同样的问题, 但由于 CTL 试验总体上对入射短波辐射以偏多为主, 其偏差因抵消而降

低了; GFS 试验对入射长波辐射通量模拟的偏差较小, 而 CTL 试验的结果有明显的正偏差; 从地—气热量通量的模拟偏差来看, GFS 试验对潜热模拟的正偏差主要由于对一些极大值的偏高模拟, 同时 CTL 试验则因同时对 150 W m^{-2} 左右的潜热的偏少模拟和对 300 W m^{-2} 左右潜热的偏多模拟使得平均偏差不明显, 两组试验的感热模拟都为负偏差, CTL 表现为总体上模拟偏弱, GFS 试验主要是夜间的负感热模拟偏弱造成; 两者对 2 m 气温和降水的模拟偏差基本一致, 主要表现为温度偏高和降水偏多。从两组试验结果与观测的相关系数来看, GFS 试验对以上所有变量的模拟与观测的相关均比 CTL 试

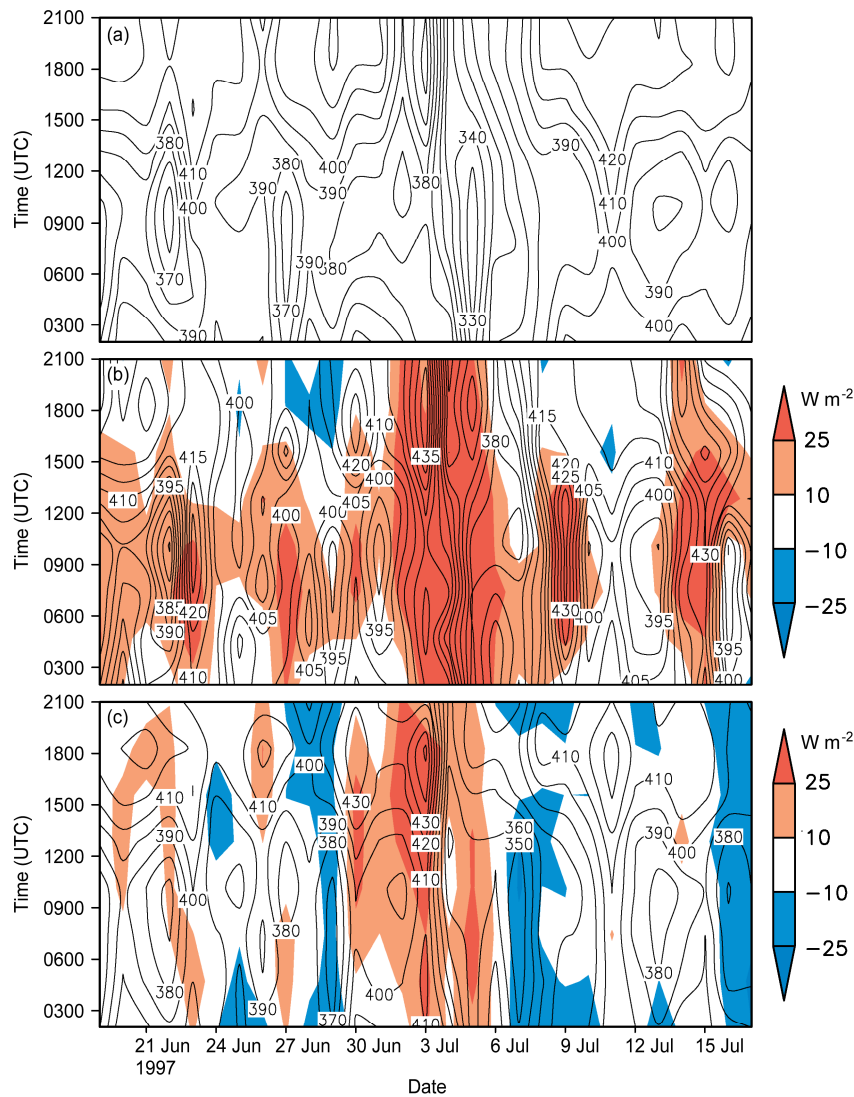


图 4 同图 3, 但为近地面向下长波辐射
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for near surface downward long-wave radiation

表 1 整个时段近地面短波入射、长波入射、感热通量、潜热通量、2 m 高度气温和降水强度的均方根误差和偏差比较
Table 1 RMSEs and biases of surface downward solar radiation, long-wave radiation, sensible heat flux, latent heat flux, 2-m air temperature and precipitation intensity during the whole period

	CTL 试验			GFS 试验		
	相关系数	均方根误差	偏差	相关系数	均方根误差	偏差
近地面入射短波	0.93	7.9 W m ⁻²	-2.2 W m ⁻²	0.97	4.7 W m ⁻²	-16.8 W m ⁻²
近地面入射长波	0.65	1.4 W m ⁻²	12.9 W m ⁻²	0.77	0.9 W m ⁻²	0.2 W m ⁻²
近地面潜热通量	0.90	3.9 W m ⁻²	4.4 W m ⁻²	0.95	2.3 W m ⁻²	10.3 W m ⁻²
近地面感热通量	0.85	2.2 W m ⁻²	-17.4 W m ⁻²	0.93	1.7 W m ⁻²	-11.3
2 m 气温	0.75	0.19 °C	0.20 °C	0.87	0.14 °C	0.21 °C
降水强度	0.77	0.020 mm h ⁻¹	0.051 mm h ⁻¹	0.82	0.013 mm h ⁻¹	0.049 mm h ⁻¹

验好, 这表明 GFS 试验的模拟结果与观测有更高的一致性。

3.2 对 3 次降水过程模拟试验

第一个系列两组试验积分时间近一个月, 后期

大尺度温度和水汽场误差较大, 而降水过程对此有很大的依赖性, 不利于对模式降水过程作客观评估, 为此针对该外场观测期间 3 次典型降水过程分别进行了 5 天的积分, 以对模式的降水过程进行更

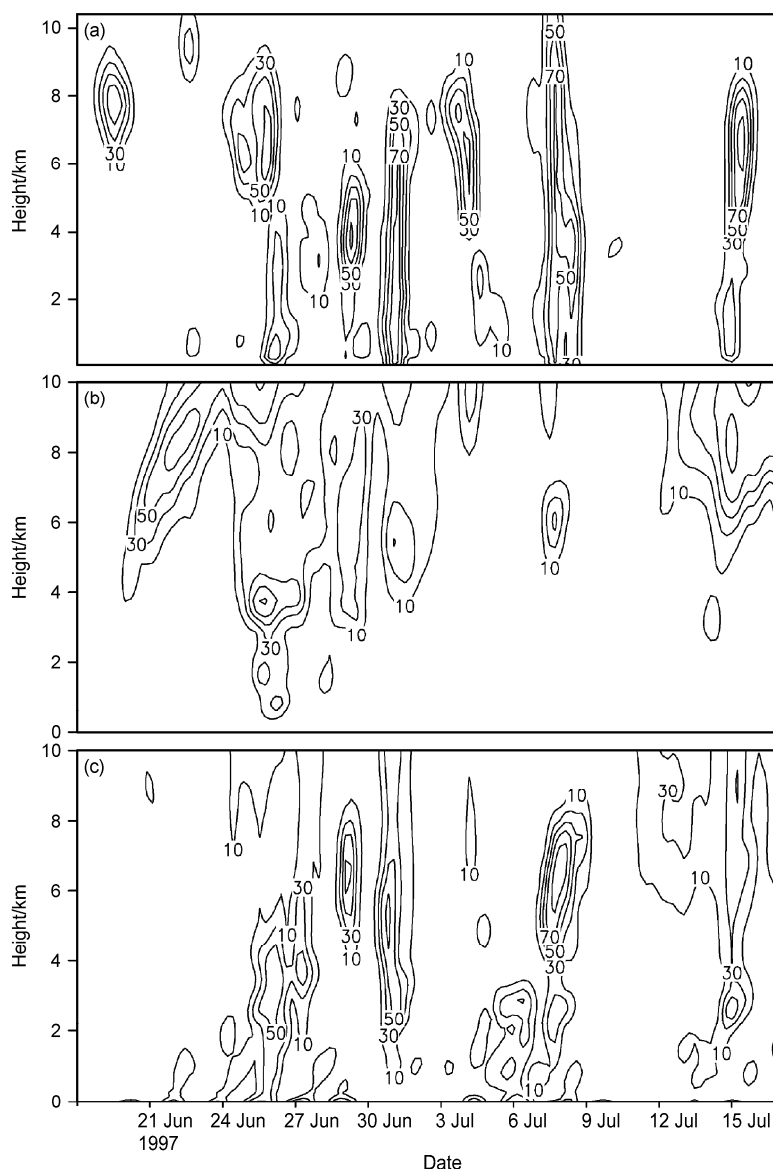


图5 (a) 实况观测、(b) CTL 试验以及 (c) GFS 试验的云量(单位: %) 高度—时间分布比较。横坐标为时间(单位: d), 纵坐标为垂直距离(单位: km)
Fig. 5 Time-height distributions of cloud fraction (units: %): (a) Observations, (b) CTL experiment, (c) GFS experiment. The abscissa indicates time (number of days) and the ordinate shows the vertical distance (units: km)

为细致评估。

图 8a、b、c 给出了两组试验在上述 3 个子时段(时段 A、B、C) 随时间的降水强度变化, 结果表明两组试验对子时段 A 过程的降水模拟结果较好; 而对子时段 B, 两组试验都能模拟出 3 次降水的后两次, 对第一次降水都模拟得偏晚; GFS 试验抓住了子时段 C 的两次主要降水过程, CTL 试验没有模拟出第一次降水过程, 且在第 3 天发生一次明显的空报。从统计结果来看(表 2), GFS 试验对子时段 A 的降水模拟与观测的相关达到 0.93, 均方根误差仅为 0.05 mm h^{-1} , 同时 CTL 试验的相关为 0.7, 均

方根误差为 0.07 mm h^{-1} ; 对于子时段 B, GFS 试验和 CTL 试验模拟的降水与观测相关分别为 0.55 和 0.51, 均方根误差均高达 0.49 mm h^{-1} , 且相关仅通过 0.1 的显著性水平检验; GFS 对子时段 C 的降水模拟更为成功, 相关系数达 0.85, 且通过 0.001 的显著性水平检验, 而 CTL 试验模拟的降水与观测相关仅为 0.56。从对 3 次降水模拟与实况的评分来看, 对子时段 B 的模拟结果最差, 特别是对其中的第一场降水, 两组试验均未能模拟出来。图 9 是两组试验模拟的对流降水和大尺度降水随时间的变化, 结果表明时段 B 的降水过程以对流性降水为主, CTL

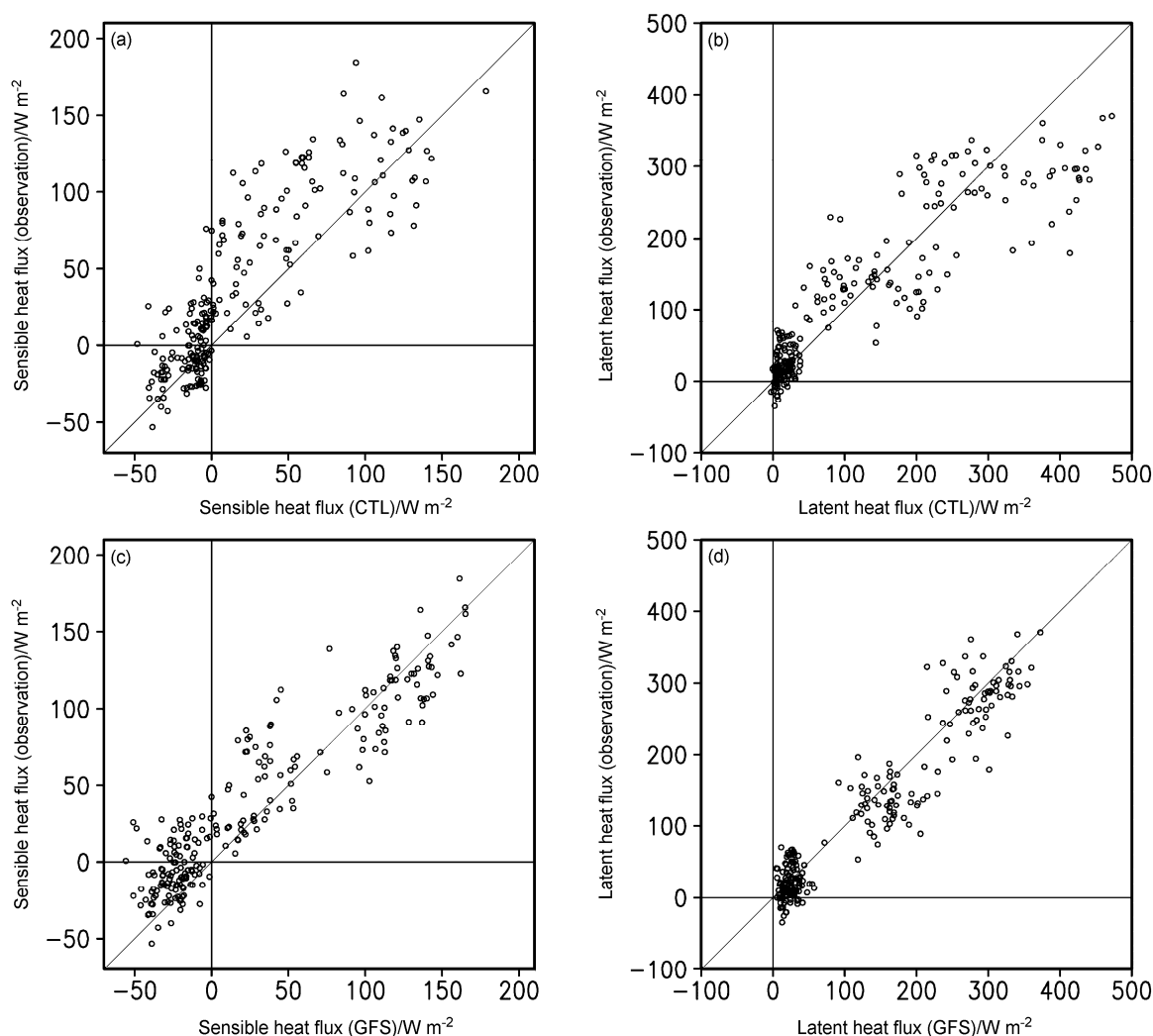


图6 近地面感热通量(左列, 单位: W m^{-2})、潜热通量(右列, 单位: W m^{-2})与实况观测结果散点对比: (a、b) CTL 试验与实况对比; (c、d) GFS 试验与实况对比。横坐标表示模拟结果, 纵坐标为观测

Fig. 6 Scatter plots of surface sensible heat fluxes (left column) and latent heat fluxes (right column) of simulations and observations: (a, b) CTL experiment; (c, d) GFS experiment. The abscissa shows simulations, and the ordinate shows observations

试验模拟的降水全部为对流性降水, GFS 试验模拟的第3次降水以大尺度降水为主, 第2次降水也有部分大尺度降水, 从 Xie et al. (2002) 给出的结果来看, 3次降水中均存在一定比例的大尺度降水, 尤以第2、3次降水的比例较高, 可见两组试验均低估了大尺度降水, 但 CTL 试验的这一倾向更为严重。第1次降水, 两组均全部模拟为对流性降水, 且对降水发生的时间均有 9~12 h 的延迟, 排除大尺度强迫的原因, 很大可能是对流参数化方案造成的。

利用网格尺度变量计算的视热源 (Q_1) 和视湿汇 (Q_2) 的垂直分布可反映对流效应对位温和水汽的作用。根据 Yanai and Johnson (1993) 的公式,

利用观测资料计算了子时段 B 中 Q_1 和 Q_2 的垂直分布 (图 10a), 对应 3 场明显的降水过程, 在 600~300 hPa 均有相应的明显 Q_1 正值; 而两组试验的对流参数化方案均未能正确模拟的第一次降水过程, 在降水发生的早期 (7 月 8 日 20:30), 中低层 (800 hPa 左右) 有明显的 Q_2 负值, 但 Q_1 的明显正值只延伸到 700 hPa, 这意味着该层由于偏干而被对流效应明显增湿, 但实际对流云底可能比该层高, 这与典型强对流过程 Q_1 , Q_2 垂直分布有所差异。两组试验模拟的 Q_1 和 Q_2 (图 10b、c) 在后两次降水过程与实况基本一致, 但在降水发生明显空报的 7 月 8 日 20:30 到 7 月 9 日 23:30, Q_1 、 Q_2 的分布与

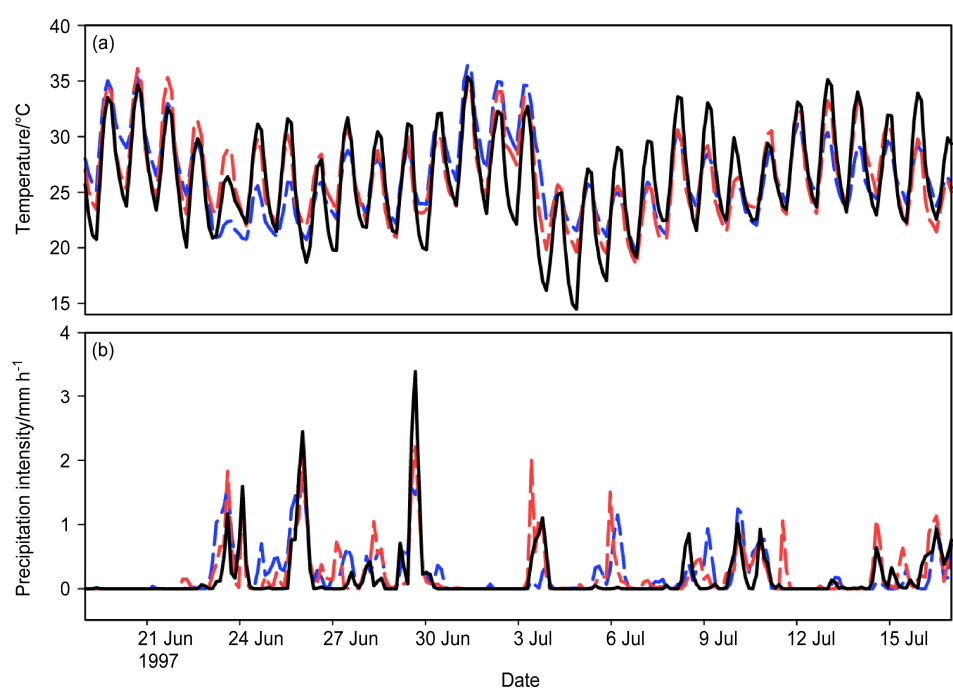


图7 模拟的逐3小时 (a) 2 m 气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (b) 降水强度 (单位: mm h^{-1}) 与实况观测结果的比较。横坐标为时间 (单位: d), 蓝色虚线为 CTL 试验, 红色虚线为 GFS 试验, 黑实线为实况

Fig. 7 Time series of (a) 2-m air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and (b) precipitation intensity (units: mm h^{-1}) at 3-hour intervals. The abscissa denotes the time (units: d). The blue dashed line represents the CTL experiment, the red line represents the GFS experiment, and the black solid line represents observations

实况差异较大。实况降水发生时, 模拟 Q_2 中低层负值明显放大, 同时 Q_1 正值局限于 400 hPa 以上, 且强度明显偏弱。后期两组试验则都有中高层的 Q_1 正值和中层 (700 hPa 左右) 的 Q_2 正值, 形成典型的对流降水。对比 Q_1 和 Q_2 的观测和模拟结果, 可以发现由于物理过程的反馈, 两组试验的大尺度场不稳定能量变弱而推迟触发, 结合降水触发阶段的实况 Q_2 在中低层的明显负值, 我们推断这可能与这次过程对流云底较高, 而现有的 SAS 对流参数化方案在实施过程中不能处理对流云底较高的降水有关。

表2 3个子时段两组试验模拟的降水与实况的相关系数和均方根误差比较

Table 2 Correlation coefficients and RMSEs of precipitation simulated by the two experiments in three sub-periods.

	子时段 A		子时段 B		子时段 C	
	相关	均方根	相关	均方根	相关	均方根
	系数	误差	系数	误差	系数	误差
CTL 试验	0.76	0.07	0.51	0.05	0.56	0.05
GFS 试验	0.93	0.05	0.55	0.05	0.85	0.03

3.3 对流参数化方案的敏感性试验

在 SAS 对流方案中, 在垂直方向确定湿静力能

最大层作为对流起始点 (SP), 气块以饱和湿静力能守恒上升直到自由对流层 (LFC), 作为云底。对流起始点和云底之间的气压差是影响次网格对流云是否发展的重要指标, 根据 Han and Pan (2011) 的方法, 气压差小于 120 hPa 时对流触发, 大于 150 hPa, 对流不触发, 如气压差在 120~150 hPa 之间, 则对流是否触发取决于大尺度垂直速度 (Hong and Pan, 1998)。一旦对流触发, 气块从云底上升并与环境大气发生相互作用 (卷入、卷出), 并以一定速率凝结出云水 (云冰), 直到云中湿静力能小于环境饱和湿静力能 (到达云顶)。本试验近地面气压约为 965 hPa (模式中最底层气压), 在第一次降水前后最大湿静力能均位于在模式最低层 (图略), 因而对流云底一定要在 815 hPa 以下, 不然对流无法触发。有理由认为实况大气在 800 hPa 附近偏干, 会导致试验模拟的对流云底偏高, 从而导致降水的漏报。

Kain-Fritsch 对流参数化方案 (简称 KF 方案; Kain, 2004) 在实施过程中, 首先定义模式最底层为 SP, 基于此, 计算抬升凝结层 (LCL), 并在该层判断施加了大尺度扰动的气块是否能克服对流抑制形成深对流; 如果不满足条件, 则该气块上升

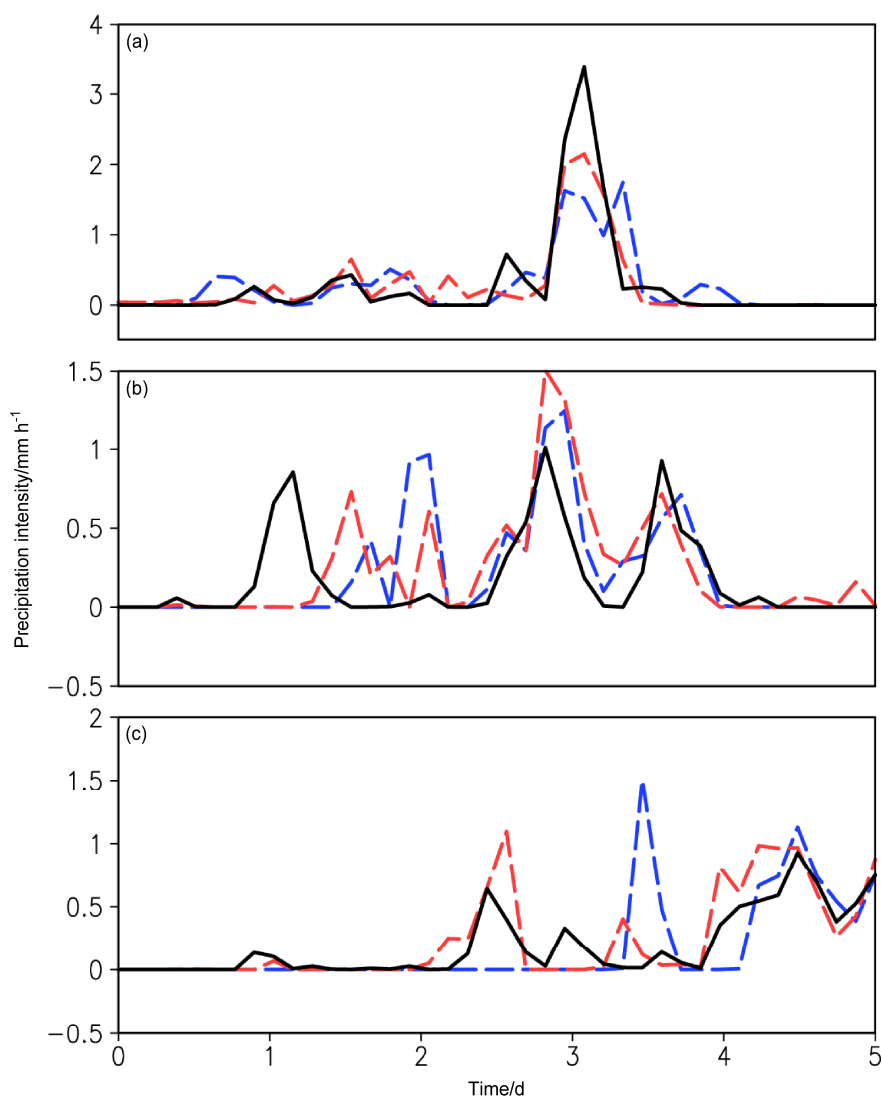


图 8 (a、b、c) 子时段 A、B、C 中, CTL 试验和 GFS 试验模拟的降水强度与实况的比较。横坐标为时间 (单位: d)。蓝色虚线为 CTL 试验, 红色虚线为 GFS 试验, 黑实线为实况观测结果

Fig. 8 Time series of precipitation intensity during (a-c) three sub-periods A, B, and C. The abscissa denotes the time (units: d). The blue dashed line shows the CTL experiment, the red dashed line is for the GFS experiment and the black solid line shows observations

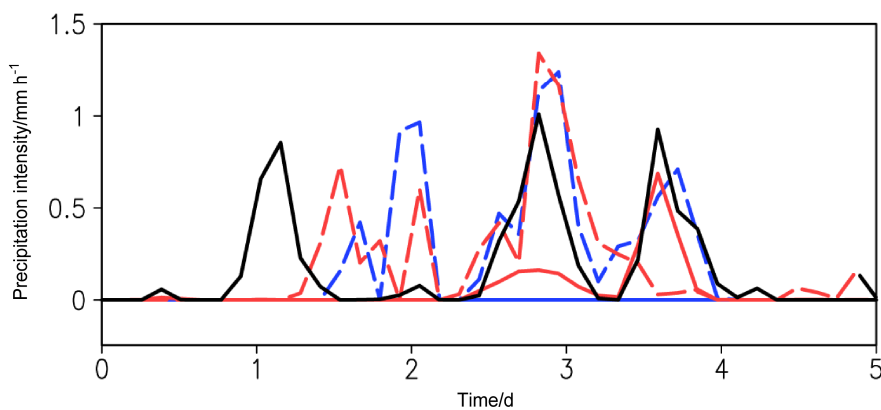


图 9 CTL 试验和 GFS 试验模拟的子时段 B 的对流降水和大尺度降水比较, 其中黑实线为实况, 蓝色实线为 CTL 试验大尺度降水, 红色实线为 GFS 试验大尺度降水, 蓝色虚线为 CTL 试验对流降水, 红色虚线为 GFS 试验对流降水

Fig. 9 Time series of precipitation intensity in sub-period B, where the black solid line shows observations, the blue line represents the CTL experiment and the red line is for the GFS experiment. Dashed lines indicate convective precipitation and solid lines show large scale precipitation

形成对流云的假定不成立，SP 向上移动一层，重新进行上述的触发判断（图 11b）。KF 方案和 SAS 方案由于闭合假定所用的物理量不同，因而在模式触发的表达上存在差异，但更重要地是触发方案在实

施过程中的不同处理——KF 方案采用逐层，连续判断，而 SAS 方案采用单层的一次性判断。目前，对对流触发的理解并不深入，也不存在大气中触发对流的一般性判据，因而触发方案的实施成为影响

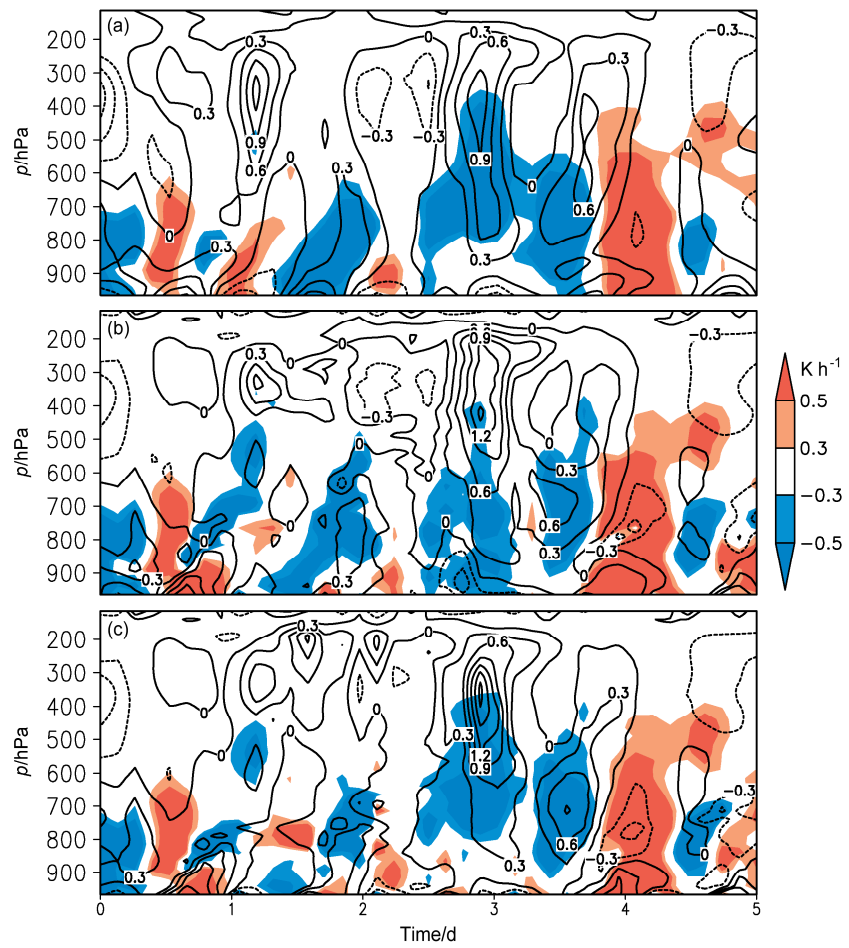


图 10 B 时段 (a) 实况、(b) CTL 和 (c) GFS 试验的 Q_1 和 Q_2 ，单位： K h^{-1} ，其中等值线为 Q_1 ，而填色为 Q_2

Fig. 10 Time–height cross sections of Apparent heat source(Q_1) and Apparent moisture sink(Q_2 ,units: K h^{-1}) for sub-period B. (a, b, c) show observations and simulations of the CTL and GFS experiments, respectively. The contours represent Q_1 and shaded areas represent Q_2

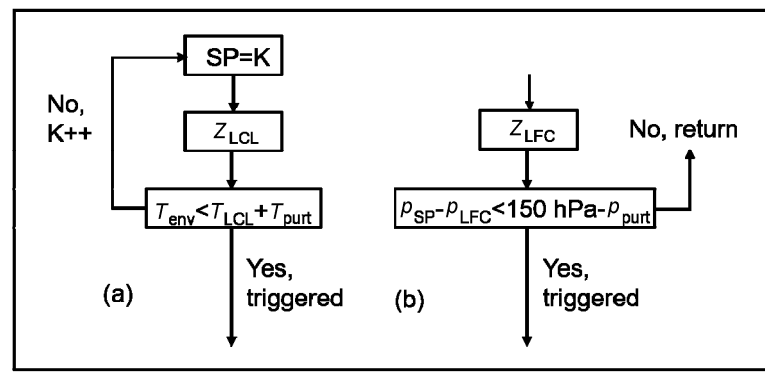


图 11 (a) KF 和 (b) SAS 对流参数化方案的触发流程示意图。其中，SP 表示对流起始点，Z 为高度，P 为气压，LCL 代表抬升凝结层，env 代表环境，pert 代表不同触发方案中的扰动项，LFC 代表自由大气层

Fig. 11 Flowchart of the triggering process in the (a) KF and (b) SAS cumulus parameterization schemes, where SP represents the starting point of convection, Z is the height, P is the pressure, LCL represents the lifted condensation level, env represents the environment, pert represents the perturbation term provided by different trigger functions and LFC represents the level of free convection.

对流方案性能的重要方面。显然,从物理上理解,KF 方案的逐层、连续判断更符合我们对对流云发展的认知。为了证实 SAS 触发方案的缺陷并解决这一问题,我们修改了方案触发的实施过程,发展了一个两次触发方法,即在第一次对流未触发时,将对流起始点上升至原云底高度附近寻找湿静力能最大值层,作为 SP,进行第 2 次触发判断。经此处理后重新对时段 B 进行模拟试验,称为 CSN 试验。

图 12 给出了 CSN 试验模拟的时段 B 的降水强度变化,相比 GFS 试验,CSN 试验很好的模拟出第一次降水过程,并有效改善 GFS 试验对后续降水的空报。此外,从综合的评分来看,CSN 试验模拟的 B 时段降水与实况的相关达到 0.6,均方根误差仅为 0.03,这都相比原 GFS 试验有很大改进。

对流参数化方案的调整也通过反馈对网格尺度的温度和湿度造成了影响,从 CSN 试验模拟的 Q_1 、 Q_2 分布(图 13)来看,第一次降水过程发生前后,模拟与实况更为接近。主要表现为对应降水峰值的 500 hPa 左右的 Q_1 正值区,同样的,800 hPa 左右的 Q_2 负值也与实况一致,其强度远比 GFS 和 CTL 的弱,这一结果表明,通过对流参数化方案触发方式的调整,不但改善了降水的模拟,同时也通过对流效应对大尺度场的反馈,改善了对模式大尺度场的模拟;而大尺度场的改善,又有利于后续降水的模拟,例如明显降低了后续的对流降水的空报。

图 14 所显示的 GFS 试验和 CSN 试验模拟的对流云的起点、云底和云顶分布可证实之前的推测。GFS 试验的 SP 在漏报降水前后一直在模式最底层,而且云底在 700~800 hPa,这一气压差因超过 SAS 方案定义的最大气压差使得对流无法触发,因而没有云顶值(理论上来说,对流没有触发时,也不应该有云底,这里仅为方便分析,将对流参数化方案中预估的对流云起点和云底直接称为 SP 和云底);CSN 试验相比 GFS 试验对流起点抬升至 800 hPa 左右,触发对流比 GFS 试验早 12 小时,之后降水空报时段,CSN 试验模拟的云底偏高而云顶偏低,整个对流云较浅,对流降水较弱,与实况更为一致。两个试验队后两次降水的过程的对流起点的模拟一致,这表明对后两次降水的模拟差异主要是由于对第一次降水模拟的结果影响了大尺度场。

4 结论和讨论

本文在 GRAPES 区域模式中引入了 NCEP GFS

物理过程,并利用 GCCS WG4 外场观测资料,通过与 GRAPES 一个原有的物理过程组合的对比试验,对 GFS 物理过程在 GRAPES 区域模式中的性能进行了评估。主要结论包括:GFS 试验长期积分的位温和水汽混合比误差均比 CTL 试验小,同时 GFS 试验对到达地面的短波和长波辐射、地面向上的感热通量和潜热通量模拟结果也优于 CTL 试验;GFS 试验对 2 m 气温的模拟结果优于 CTL 试验,两者对长期的降水模拟相当。对 3 个子降水时段试验结果表明,GFS 试验和 CTL 试验能抓住主要的强降水过程,但 GFS 模拟的降水总体误差小于 CTL 试验,且与观测的一致性好于 CTL 试验。两组试验都对某些降水过程存在漏报和发生时间偏晚的倾向,特别是,对于时段 B 的第一次降水均存在明显的漏报以及后续的空报,分析表明这与该降水过程云底较高,两组试验中的对流参数化在对流触发机制方面的局限有关。本文参考 KF 方案的对流触发流程,基于 SAS 方案发展了两次触发方法。对流参数化方案的敏感性试验表明新的触发流程可有效改善模式对这一次降水过程的模拟,同时通过反馈,进而提高模式对大尺度场的模拟能力。

虽然 GFS 物理过程包中单个物理过程相比 GRAPES 中原有相应物理过程差别不大,但本文的试验和分析结果表明 GFS 物理过程包在单柱模式中的性能明显优于 GRAPES-TCM 中原有物理过程组合。这应与这些单一物理过程在 NCEP GFS 模式中的长期业务测试中的不断改进,从而充分考虑了各个过程的相互作用有关。这一结果提示我们在模式物理发展过程中,特别是业务模式的改进过程中,应更多将物理过程视为一个整体,而非单个的物理过程的组合,Wang and Zhang (2013)对 CAM (Community Atmospheric Model)的不同版本的比较分析也有类似的结论。另一方面,由于 NCEP GFS 模式为分辨率较粗的静力模式,而 GRAPES 模式为非静力模式,我们目前发展的基于 GRAPES 区域模式的台风数值预报系统其水平分辨率可达 5 km 左右。在这种分辨率下,相关的物理过程,特别是对流参数化和微物理过程仍需进一步的改进和调试,以适应业务数值模式的需要。同时,NCEP GFS 物理过程本身也在不断改进,例如 Han et al. (2016)开始尝试在一个框架下考虑边界层过程和浅对流过程。目前 NOAA 的全球非静力模式的物理过程也正以 NCEP GFS 物理过程为基础进行发展和改进。

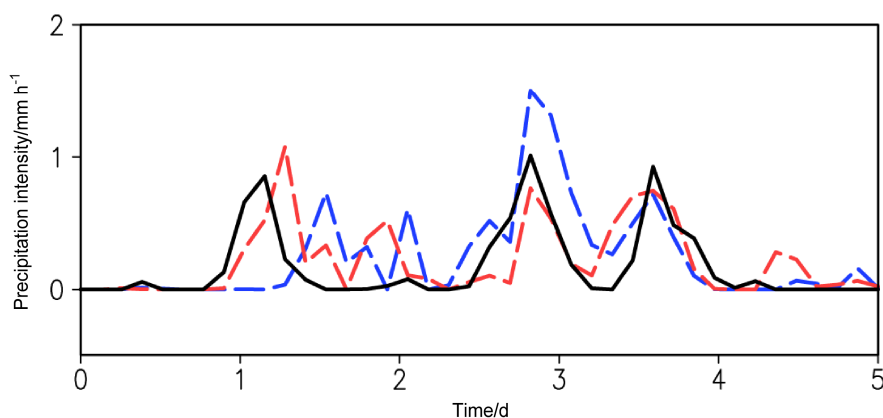


图 12 GFS 试验和 CSN 试验模拟的子时段 B 的降水强度比较, 其中蓝线为 GFS 试验, 红线为 CSN 试验, 黑实线为实况

Fig. 12 Time series of precipitation intensity during sub-period B. The blue and red dashed lines show results of the GFS and CSN experiments, respectively; the black solid line shows observations.

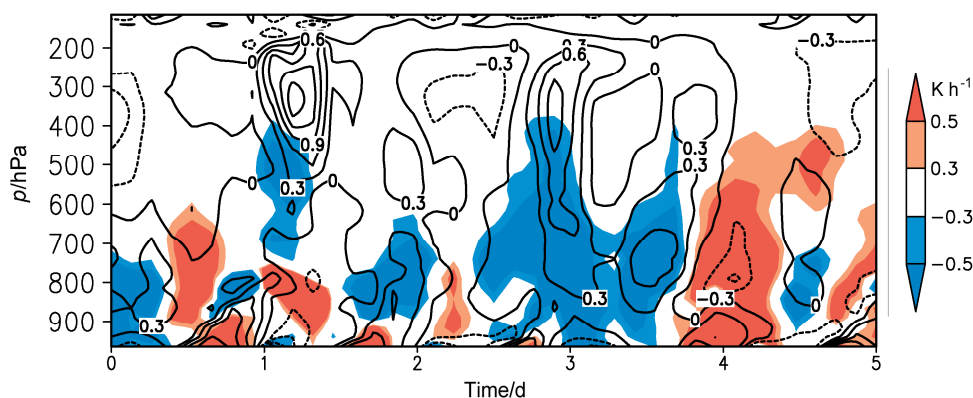


图 13 同图 10a, 但为 CSN 试验

Fig. 13 Same as Fig. 10a, but for the CSN experiment

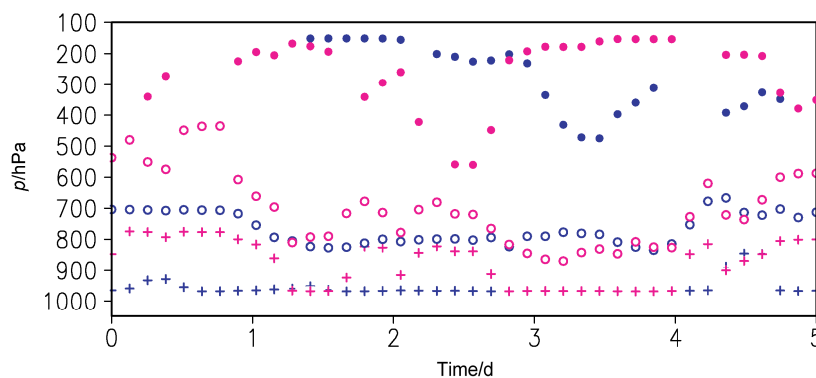


图 14 GFS 试验和 CSN 试验模拟的时段 B 逐 3 小时平均的对流起点 (十字)、云底 (空心圆) 和云顶 (实心圆) 的气压分布, 其中蓝色为 GFS 试验, 红色为 CSN 试验

Fig. 14 Time-height distributions of convection starting point (cross symbols) and cloud base (empty circles) and cloud top (solid circles), where the blue represents the GFS experiment and the red represents the CSN experiment

利用外场观测资料对模式物理过程进行评估是改进数值模式的重要途径之一。但由于外场资料的地域的局限性, 对物理过程的评估结果不可避免存在一定的局限性, 特别是对流参数化等基本假定

与天气系统、模式网格距密切相关的物理过程, 更需要与实际业务应用相结合, 在单柱试验基础上, 利用不同天气过程典型个例, 开展进一步的试验与分析。另外需要指出的是, 本文中对对流参数化方

案的触发方案的敏感性试验只是一个初步的尝试。目前基于质量通量假定的对流参数化方案多数采用一个总体的云模式,通过对云的卷入、卷出率或者云高进行参数化以确定对流云的性状,这是对 Arakawa and Schubert (1974) 的简单谱状云模式的简化。Yoshimura et al. (2015) 提出了一个新的谱状积云参数化方案,逐层计算不同卷入、卷出率的云内特征,虽然增加了计算量,但充分考虑对流云的复杂性。本文的敏感性试验提出了一种可能性,即对流云的起点在模式中也是在垂直方向有一定的分布。当然这一试验需要进一步完善,例如在对流云的云底进行逐层判断,形成对流云起点高度的谱分布,而不是简单的两次判断;另外这种起点的判断是否不仅同湿静力能有关,而应与湍流效应联系起来,这都是后续对流参数化方案进一步改进的方向。

参考文献 (References)

- Arakawa A, Schubert W H. 1974. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31: 674–701, doi:10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2.
- Bleck R, Bao J W, Benjamin S G, et al. 2015. A vertically flow-following icosahedral grid model for medium-range and seasonal prediction. Part I: Model description [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143: 2386–2403, doi:10.1175/MWR-D-14-00300.1.
- 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 Dehui, Xue Jishan, Yang Xuesheng, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53 (22): 3433–3445, doi:10.1360/csb2008-53-20-2396.
- Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 91 (2): 233–244, doi:10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077: NSOCOD>2.0.CO;2.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the national centers for environmental prediction operational mesoscale eta model [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108 (D22): 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Ghan S, Randall D, Xu K M, et al. 2000. A comparison of single column model simulations of summertime midlatitude continental convection [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105 (D2): 2091–2124, doi:10.1029/1999JD900971.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (3): 764–787, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAU>2.0.CO;2.
- Han J, Pan H L. 2006. Sensitivity of hurricane intensity forecast to convective momentum transport parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (2): 664–674, doi:10.1175/MWR3090.1.
- Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system [J]. *Wea. Forecasting*, 26 (4): 520–533, doi:10.1175/WAF-D-10-05038.1.
- Han J, Witek M L, Teixeira J, et al. 2016. Implementation in the NCEP GFS of a hybrid eddy-diffusivity mass-flux (EDMF) boundary layer parameterization with dissipative heating and modified stable boundary layer mixing [J]. *Wea. Forecasting*, 31 (1): 341–352, doi:10.1175/WAF-D-15-0053.1.
- Hong, S. Y. and J. O. J. Lim. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc* 42 (2): 129–151.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (10): 2322–2339, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2.
- Hong S Y, Pan H L. 1998. Convective trigger function for a mass-flux cumulus parameterization scheme [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (10): 2599–2620, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2599:CTFFAM>2.0.CO;2.
- 黄伟, 梁旭东. 2010. 台风涡旋循环初始化方法及其在 GRAPES-TCM 中的应用 [J]. *气象学报*, 68 (3): 365–375. Huang Wei, Liang Xudong. 2010. A cycling typhoon-like vortex initialization scheme and its application to GRAPES-TCM [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (3): 365–375, doi:10.11676/qxxb2010.036.
- 黄伟, 端义宏, 薛纪善, 等. 2007. 热带气旋路径数值模式业务试验性能分析 [J]. *气象学报*, 65 (4): 578–587. Huang Wei, Duan Yihong, Xue Jishan, et al. 2007. Operational experiments and its performance analysis of the tropical cyclone numerical model (GRAPES_TCM) [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (4): 578–587, doi:10.11676/qxxb2007.053.
- Kain J S. 2004. The Kain Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 170–181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102 (D14): 16663–16682, doi:10.1029/97JD00237.
- Wang X C. 2015. Development of a toy column model and its application in testing cumulus convection parameterizations [J]. *Sci. Bull.*, 60 (15): 1359–1365, doi:10.1007/s11434-015-0850-8.
- Wang Y C, Pan H L, Hsu H H. 2015. Impacts of the triggering function of cumulus parameterization on warm-season diurnal rainfall cycles at the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains site [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120 (20): 10681–10702, doi: 10.1002/2015JD023337.
- Wang X C, Zhang M H. 2013. An analysis of parameterization interactions and sensitivity of single-column model simulations to convection schemes in CAM4 and CAM5 [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (16): 8869–8880, doi:10.1002/jgrd.50690.
- Xie S C, Zhang M H. 2000. Impact of the convection triggering function on single-column model simulations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105 (D11): 14983–14996, doi:10.1029/2000JD900170.
- Xie S C, Xu K M, Cederwall R T, et al. 2002. Intercomparison and evaluation of cumulus parametrizations under summertime midlatitude

- continental conditions [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128 (582): 1095–1135, doi:10.1256/003590002320373229.
- 徐国强, 陈德辉, 薛纪善, 等. 2008. GRAPES 物理过程的优化试验及程序结构设计 [J]. *科学通报*, 53 (20): 2428–2434. Xu Guoqiang, Chen Dehui, Xue Jishan, et al. 2008. The program structure designing and optimizing tests of GRAPES physics [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53 (22): 3470–3476, doi:10.1360/csb2008-53-20-2428.
- Xu K M, Randall D A. 1996. A semiempirical cloudiness parameterization for use in climate models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53 (21): 3084–3102, doi:10.1175/1520-0469(1996)053<3084:ASCPFU>2.0.CO;2.
- Xu K M, Cederwall R T, Donner L J, et al. 2002. An intercomparison of cloud-resolving models with the atmospheric radiation measurement summer 1997 intensive observation period data [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128 (580): 593–624, doi:10.1256/003590002321042117.
- Yanai M, Johnson R H. 1993. Impacts of cumulus convection on thermodynamic fields [M]//Emanuel K A, Raymond D J. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models of the Atmosphere*. Boston, MA: America Meteorological Society, 24: 39–62.
- 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 Junli, Shen Xueshun. 2012. A case study of the GRAPES single column model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (2): 275–290, doi:10.11676/qxxb2012.027.
- 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, doi:10.1007/s00376-010-0062-8.
- Yoshimura H, Mizuta M, Murakami H. 2015. A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143 (2): 597–621, doi:10.1175/MWR-D-14-00068.1.
- Zhang M H, Lin J L. 1997. Constrained variational analysis of sounding data based on column-integrated budgets of mass, heat, moisture, and momentum: Approach and application to ARM measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (11): 1503–1524, doi:10.1175/1520-0469(1997)054<1503:CVAOSD>2.0.CO;2.
- Zhao Q Y, Carr F H. 1997. A prognostic cloud scheme for operational NWP models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125(8): 1931–1953, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1931:APCSFO>2.0.CO;2.