

郭云云, 邓莲堂, 范广洲. 2015. GRAPES 中尺度模式中不同积云参数化方案预报性能对比研究. 气象, 41(8): 932-941.

# GRAPES 中尺度模式中不同积云参数化 方案预报性能对比研究<sup>\*</sup>

郭云云<sup>1</sup> 邓莲堂<sup>2</sup> 范广洲<sup>1,3</sup> 李泽椿<sup>2</sup>

1 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

2 国家气象中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

**提 要:** 利用我国新一代中尺度数值模式 GRAPES\_Meso, 采用 KFeta 和 BMJ 两种积云对流参数化方案, 对我国 2009 年冬季(1 月)和夏季(6—8 月)天气进行批量回报试验。回报试验结果表明: 在冬季, 两种方案对 GRAPES\_Meso 模式的预报性能影响差异较小。在夏季, 两种方案对模式回报效果的影响表现明显。在低层 BMJ 方案对形势场的回报性能略优于 KFeta 方案, 中层则是 KFeta 方案明显优于 BMJ 方案, 而在高层 KFeta 方案略优于 BMJ 方案。TS 评分检验表明 KFeta 方案对降水的预报总体上优于 BMJ 方案, 特别是中雨到暴雨量级在华南地区 KFeta 方案有明显的优势。两个方案预报积云降水平均贡献率的空间分布差异主要表现在低纬度洋面上, BMJ 方案的贡献率比 KFeta 方案大。两个方案积云降水贡献率的概率分布形态在小雨量级上都呈陡峭的“U”型分布。KFeta 方案随着降水量级的增大逐渐向大贡献率偏移, 特大暴雨量级时基本上是积云降水的贡献; 而 BMJ 参数化方案则是随着降水量级的增大逐渐向小贡献率偏移, 特大暴雨量级时基本上是格点降水的贡献。

**关键词:** GRAPES\_Meso, 积云对流参数化方案, 均方根误差, TS 评分, 积云降水贡献率

**中图分类号:** P435, P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 08. 002

## Comparative Analysis of Different Cumulus Parameterization Schemes in GRAPES\_Meso Model

GUO Yunyun<sup>1</sup> DENG Liantang<sup>2</sup> FAN Guangzhou<sup>1,3</sup> LI Zechun<sup>2</sup>

1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Based on the new generation numerical prediction model GRAPES\_Meso, the numerical experiments were carried out to evaluate the two kinds of cumulus convective parameterization schemes, Kain-Fritsch Eta scheme and Betts-Miller-Janjic scheme, for the winter (January) and summer (June—August) 2009. The results show that there is no obvious differences between the two schemes for winter, but some differences exist for the summer. The statistic characteristic of meteorological fields, such as wind, height and temperature, shows that BMJ performances slightly better than KFeta in the low atmospheric layer, but it does not do as well as KFeta in the middle and high layers. The results of T-Score verification

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41275103)资助

2014 年 3 月 12 日收稿; 2014 年 7 月 9 日收修定稿

第一作者: 郭云云, 主要从事数值天气模式物理过程研究. Email: 244052395@qq. com

通信作者: 邓莲堂, 主要从事中尺度气象学和数值天气预报研究. Email: denglt@cma. gov. cn

indicate that KFeta scheme has a higher score than BMJ scheme for precipitation forecast, especially in predicting moderate to heavy rains over southern China. The spatial distribution of the average contribution rate in total precipitation of the two schemes is different obviously in the low-latitude ocean region, where the contribution rate of BMJ scheme is greater than KFeta scheme. In the drizzle level, the probability distribution of cumulus precipitation contribution rate in total precipitation looks like steep “U” shaped. With the increase of precipitation levels, the proportion of cumulus precipitation of KFeta becomes large. On the contrary, the higher of the precipitation level is, the lower proportion of the cumulus precipitation reaches by using the BMJ cumulus scheme.

**Key words:** GRAPES\_Meso, cumulus convective parameterization scheme, RMSE, TS score, contribution rate of cumulus precipitation

## 引 言

积云对流活动通过动力、热力等因素影响大尺度环流,并在决定大气温湿场的垂直结构中扮演着非常重要的角色,与大尺度天气系统有着密切的关系。另外,积云对流还与强降水的发生发展紧密相关,但对它的预报一直都是数值预报中的重要难点。因此近几十年以来,很多学者致力于积云参数化方案的研究(许习华,1991;陈德辉,1997;林文实等,1998;董美莹等,1999;左瑞亭等,2008;王德立等,2013)。但是积云的典型尺度在一般的数值模式中是属于次网格过程,要使这种对流过程能够被模式可分辨的网格尺度所表达,模式必须将其参数化。由此而产生积云参数化方案,它是在大气环流模式或数值天气预报模式中,用大尺度可分辨的模式变量来描述属于次网格尺度物理过程的积云对流效应的方法。从提出积云对流参数化方案到目前为止,它在理论方面发展的已较为完善,许多具有代表性的参数化方案被提出并且产生了重要影响。如 Betts-Miller, Kuo, Arakawa-Schubert 和 Tiedtke, Kreitzberg-Perkey, Fritsch-Chappell 和 Kain-Fritsch 方案等(Frank, 1983; 1987; Betts, 1986; Kain et al, 1990; 1993; Arakawa et al, 2004; Anderson et al, 2007)。本文着重讨论 GRAPES 区域中尺度模式中主要积云参数化方案 Betts-Miller-Janjic 和 Kain-Fritsch Eta 方案在预报性能上的差别,选择 2009 年冬季(1 月)和 2009 年夏季(6—8 月)进行批量回报试验,比较两种方案的预报性能,为以后方案的改进提供依据。

## 1 GRAPES\_Meso 及两种参数化方案介绍

### 1.1 GRAPES\_Meso 区域中尺度模式

GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System)是中国气象局的科研人员自主研究发展的以动力模式为核心的、多尺度通用(全球区域一体化)的新一代数值预报模式系统。2006 年,水平分辨率为 30 km 的 GRAPES\_Meso 在中央气象台正式投入了业务运行,2007 年水平分辨率提升到 15 km,经多年的发展已表现出较好的预报效果(陈德辉等,2008;2012)。该模式采用完全可压缩的非静力学方程组;时间积分使用半隐式半拉格朗日方案;水平方向为球面坐标,垂直方向采用地形追随高度坐标;空间离散化时,模式水平方向采取 Arakawa-C 跳点经纬网格,垂直方向取 Charney-Phillips 变量配置(伍湘君等,2005;薛纪善等,2008;张人禾等,2008)。本文试验采用 GRAPES\_Meso V3.3.2.4 最新版本。

### 1.2 Betts-Miller-Janjic 方案

BMJ 方案是一种同时包含深浅对流的对流调整式方案,Betts-Miller 方案(Betts, 1986)中的深对流温度调整参考廓线取修正的湿绝热线或“观测的准平衡状态线”、浅对流温度调整参考廓线使用“混合线”。之后 Janjic(1994)为了解决 Betts-Miller 方案在实际模拟中出现的一些虚假降水,在 Betts-Miller 方案温度调整参考廓线的基础上再引入积云效率来表示对流组织的性质,熵的变化、降水量和云的平均温度决定了积云效率,积云效率参数又决定

了深对流参考廓线和松弛调整时间。而浅对流湿度参考廓线是要求熵的变化最小且非负。新形成的 Betts-Miller-Janjic 方案(以下简称 BMJ 方案)在许多数值模式中都表现出不俗的模拟效果。

### 1.3 Kain-Fritsch Eta 方案

Kain-Fritsch 方案是 Kain 等(1990;1993)基于 Fritsch-Chappell 方案(Fritsch et al, 1980)的闭合假设,通过修改云模式(可变云半径和云深)和夹卷效应而形成。Kain(2004)之后又通过引入浅对流过程、修改下沉气流以及设定夹卷率最小阈值对 Kain-Fritsch 方案进行了改进,改进后的方案称为 Kain-Fritsch Eta 方案(以下简称 KFeta 方案)。此方案中深对流以假定在一定时间内消耗约 90% 的对流有效位能,模式中的上升、下沉气流以及环境空气才会重新调整作为闭合假设,并采用简单云模式来判定积云对流和网格尺度的相互关系。该方案从地面开始,依次以垂直厚度至少为 60 hPa 的气层作为升源层(updraft source layers, USL),将气块从 USL 抬升至抬升凝结高度(LCL),计算在该高度处的温度( $T_{LCL}$ ),通过比较抬升凝结高度处气块温度(包括实际温度  $T_{LCL}$  和扰动温度  $\Delta T$ )和环境温度( $T_{ENV}$ )的高低来判定上升气流起始高度,上升气块通过浮力机制和环境相互作用,若上升气块未达到最低云高,则判定下一个 USL,若达到,则启动深对流。方案中的对流降水同时计算了气流上升、下沉过程中的卷入、卷出等过程。

## 2 试验设计及检验方法

本文为比较 BMJ 和 KFeta 方案在预报性能上的差异,设计了如下试验方案。选取 2009 年冬季 1 月和 2009 年夏季 6—8 月进行回报试验。回报试验的初始场和侧边界采用 NCEP 提供的 2009 年 1 和 6—8 月的时间间隔为 3 h 的 GFS 预报场,模式预报场区域为  $15^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ ,空间分辨率为  $0.15^{\circ}\times 0.15^{\circ}$ ,预报时长为 48 h,积分步长为 90 s,微理过程方案为 WSM6 方案、边界层方案为 MRF 方案、短波辐射为 Dudhia 方案、长波辐射为 RRTM 方案、近地面层方案为 Monin-Obukhov 方案、陆面过程方案为 Noah 方案、积云参数化方案采用 KFe-ta 方案和 BMJ 方案。

对试验结果进行统计检验的方法主要有误差统

计检验和 TS 评分(狄靖月等,2013;张涵斌等,2014;毛冬艳等,2014)。误差统计的范围为整个预报场区域,观测场资料采用 NCEP 的 2009 年 1 和 6—8 月的 FNL 逐日再分析资料,要素包括高度、温度、风场  $u$  分量和  $v$  分量、相对湿度。空间分辨率为  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ,垂直方向取 200、500 和 850 hPa 共 3 层,分别代表大气的高、中和低三个层次。统计量主要为平均值和均方根误差(RMSE),两个方案的差异显著性检验采用适用于小样本检验的  $t$  检验方法。TS 评分统计检验采用国家气象中心预报质量评分系统的降水预报累加检验方案,把 24 h 累计降水分为小雨( $\geq 0.1$  mm)、中雨( $\geq 10$  mm)、大雨( $\geq 25$  mm)、暴雨( $\geq 50$  mm)及特大暴雨( $\geq 100$  mm)五级,进行累加降水检验。即小雨累加检验为小雨以上所有量级降水(包括小雨、中雨、大雨、暴雨、特大暴雨)统计结果的累加,中雨累加检验为中雨以上所有量级降水统计结果的累加,以此类推。

## 3 试验结果误差统计分析

### 3.1 2009 年 1 月试验结果

对两个方案在 2009 年 1 月(图略)回报结果进行了误差统计(熊秋芬,2011)。统计时,在 850 hPa 等压面上去除了地形以下的点,从而去除了外插数据的影响。统计结果表明,两个方案在高层(200 hPa)的均方根误差约为 10~30 gpm,在中低层(850 和 500 hPa)的高度场均方根误差约为 6~16 gpm,但两个方案在各层均方根误差的差值约为  $\pm 0.1$  gpm,没有通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,表明两个方案之间没有明显差异。对于温度场而言,两个方案在低层误差大些,均方根误差约为  $1.2\sim 2.1^{\circ}\text{C}$ ,在中高层的温度场均方根误差则约为  $0.8\sim 1.7^{\circ}\text{C}$ ,两个方案的差值约为  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ,表明两个方案之间差异较小。就风场( $u$  和  $v$  分量)而言,在低层的均方根误差约  $2.1\sim 3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在高层稍大些,为  $2.5\sim 4.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但两个方案的均方根误差之间的差值为  $\pm 0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,两个方案之间的差异也较小。湿度场统计结果表明各个层次的均方根误差约为 14%~24%,但两个方案的均方根误差之间的差值约为 0.2%,两个方案之间的差异也不明显。

综上所述,在预报场区域内由于冬季的对流活动比较少,所以两个方案对 GRAPES\_Meso 模式的

预报性能的影响差异并不显著。

3.2 2009 年 6—8 月试验结果

对两个方案在 2009 年夏季 6—8 月预报结果进行了误差统计。统计时,同样在 850 hPa 等压面上去除了地形以下数据的影响。

3.2.1 高度场

从平均误差的统计结果来看(图略),随着预报时效的延长(预报时效从 12 h 到 48 h),在高层(200 hPa),KFeta 方案的平均误差从-1 gpm 增长到 12 gpm,BMJ 方案则从-3 gpm 增长到 9 gpm,KFeta 方案要比 BMJ 方案高 2~3 gpm;在中层(500 hPa),两个方案的误差平均值都是小于零,预

报高度场比观测场偏低 4~10 gpm,但 KFeta 方案比 BMJ 方案高 2~3 gpm;在低层(850 hPa),两个方案的误差平均值都是小于零,预报高度场比观测场偏低 6~20 gpm,然而 KFeta 方案比 BMJ 方案低 0~1.5 gpm。

图 1 是 2009 年夏季 6—8 月的两个方案的高度均方根误差平均图。从图中可以看出,两种方案在高层(200 hPa)24 h 之前是 KFeta 方案误差相对较小,24 h 之后则是 BMJ 方案较小;在中层(500 hPa)则是 KFeta 方案明显好于 BMJ 方案,通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验;低层(850 hPa)则是 BMJ 方案略好于 KFeta 方案,通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验。

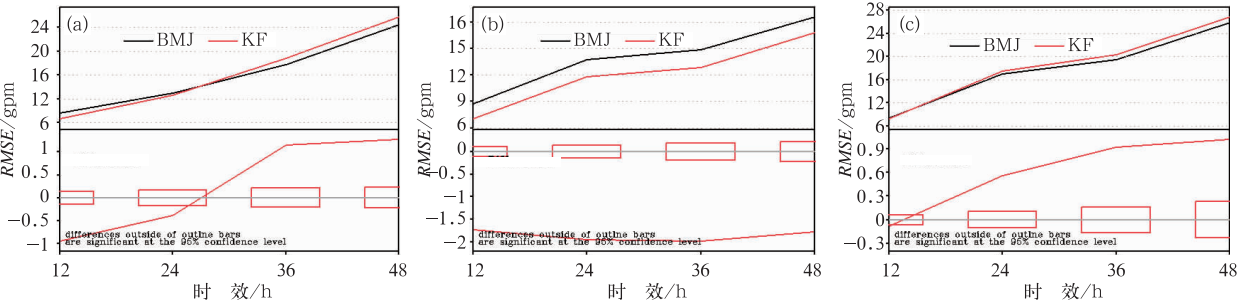


图 1 2009 年夏季(6—8 月)200 hPa (a)、500 hPa (b)和 850 hPa (c) 各层高度场均方根差的月平均图  
(通过  $\alpha=0.05$  显著性水平检验;方框代表置信区间;临界线之下的点划线代表 KFeta 方案的均方根误差与 BMJ 方案均方根误差之间的差值)

Fig. 1 The monthly average of RMSE of height at 200 hPa (a), 500 hPa (b), 850 hPa (c) in summer (June—August) 2009

(The 0.05 significance level being passed; boxes represent the confidence interval; dot dash line under the critical line represents the difference between the RMSE of KFeta and BMJ's)

由此可知,KFeta 方案在中层的预报效果明显优于 BMJ 方案,但在低层却不如 BMJ 方案。

3.2.2 温度场

从平均误差的统计结果来看(图略),在高层 KFeta 方案的平均误差从 0.16℃ 演变成-0.09℃, BMJ 方案则从 0.13℃ 演变成-0.22℃;在中层和低层,两个方案的温度平均误差均大于 0,预报的温度都比实况偏高。同时,在各个层次上,KFeta 方案温度偏差都比 BMJ 方案的温度偏差偏高 0.12℃。

图 2 是 2009 年夏季 6—8 月的两个方案的温度均方根误差平均图。从图中可以看出,两种方案在中、高层 24 h 之前是 KFeta 方案误差相对较小,24 h 之后则是 BMJ 方案较小;低层(850 hPa)则在 12 h 后,BMJ 方案一直都略好于 KFeta 方案,通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验。

由上面的分析可知,KFeta 方案预报的温度偏高,在中高层的预报前 24 h 效果比 BMJ 好,但在 24 h 后,以及在低层的预报都不如 BMJ 方案。

3.2.3 风场

从平均误差的统计结果来看(图略),在高层两个方案的风场  $u$  分量的平均误差都比实况偏小,KFeta 方案比 BMJ 方案偏小得多一些;两个方案的风场  $v$  分量都比实况偏大,但两个方案之间的差异不显著。在中层,风场  $u$  和  $v$  分量总体上都是比实况偏大,但 KFeta 方案的风场  $u$  分量平均误差总比 BMJ 方案大,风场  $v$  分量的偏差比 BMJ 方案小。在低层,风场  $u$  和  $v$  分量总体上均比实况偏大,但 KFeta 方案的风场  $u$  分量平均误差总比 BMJ 方案大,风场  $v$  分量的偏差与 BMJ 方案没有明显的区别。



图 3 是 2009 年夏季 6—8 月的两个方案的风场 ( $u$  和  $v$ ) 均方根误差平均图。从图中可以看出,在高层(图 3a 和 3b)KFeta 方案预报效果较好,在 36 h 之前差异是显著的。在中层(图 3c 和 3d)KFeta 方案的误差略小于 BMJ 方案。在低层(图 3e 和 3f)

KFeta 方案的风场  $u$  分量误差大于 BMJ 方案,效果不如 BMJ 方案,风场  $v$  分量两个方案相当。

由此可知,KFeta 方案预报风场在高层和中层的误差明显比 BMJ 方案小,然而低层的预报效果则不如 BMJ 方案。

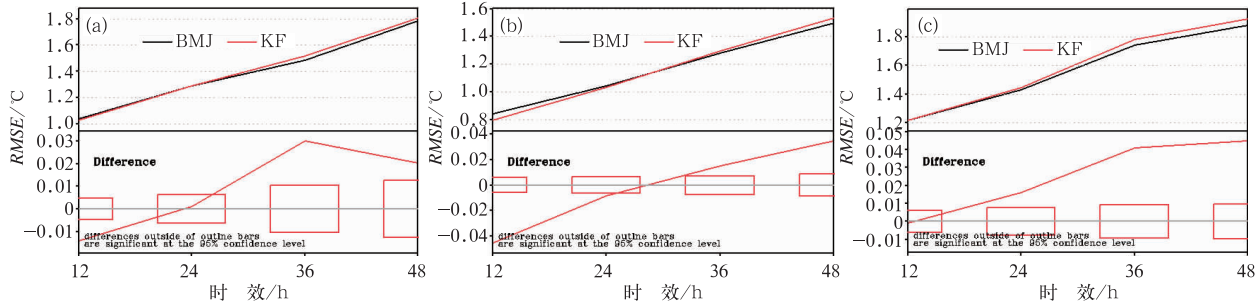


图 2 同图 1,但为温度均方根差月平均

Fig. 2 The same as Fig. 1, but for the monthly average of RMSE of temperature

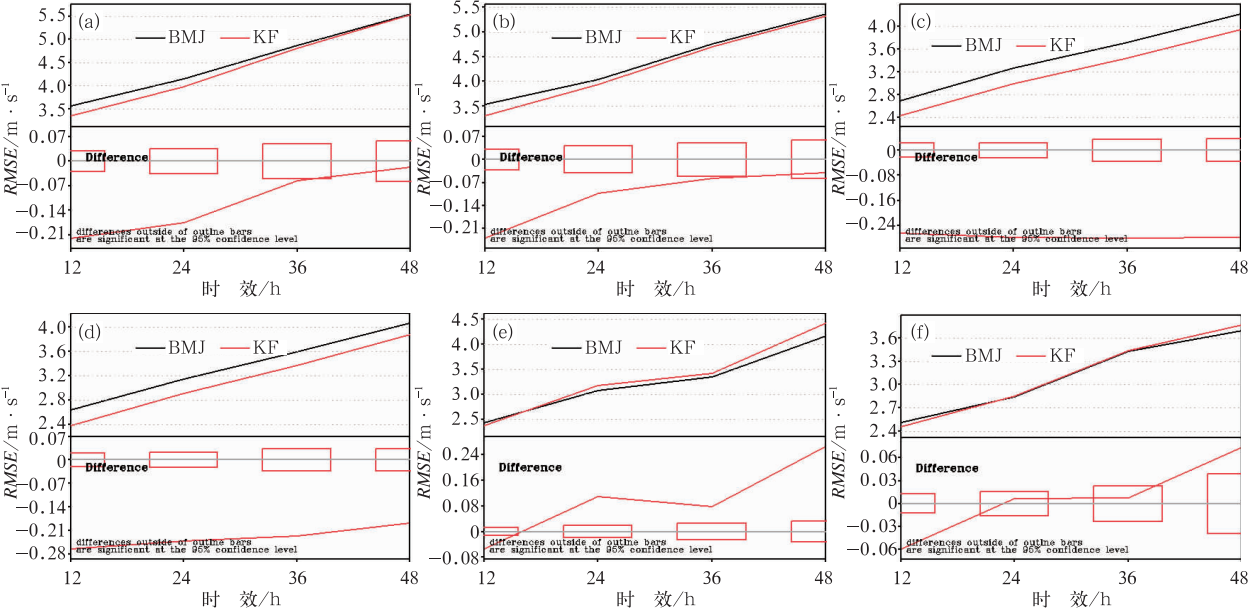


图 3 2009 年夏季(6—8 月) $u$  分量(a, c, e)和  $v$  分量(b, d, f)在 200 hPa (a, b)、500 hPa (c, d)和 850 hPa (e, f)均方根差月平均

(图注说明同图 1)

Fig. 3 The RMSE monthly average of wind  $u$  (a, c, e) and  $v$  (b, d, f) at 200 hPa (a, b), 500 hPa (c, d), 850 hPa (e, f) in summer (June—August) 2009

(Illustration is the same as in Fig. 1)

3.2.4 相对湿度

两个方案相对湿度的平均误差表明(图略),在高、中、低各层都比实况偏干。然而在高层 KFeta 方案比 BMJ 方案要好些,在中层和低层 KFeta 方案比 BMJ 方案更干,效果不如 BMJ 方案,均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验。

图 4 是 2009 年夏季 6—8 月的两个方案的相对湿度均方根误差平均图。从图中可以看出,在高层和中层(图 4a 和 4b)KFeta 方案的误差小于 BMJ 方案误差,回报效果较好。而在低层(图 4c)KFeta 方案的误差大于 BMJ 方案误差,回报效果比 BMJ 方案差,均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验。

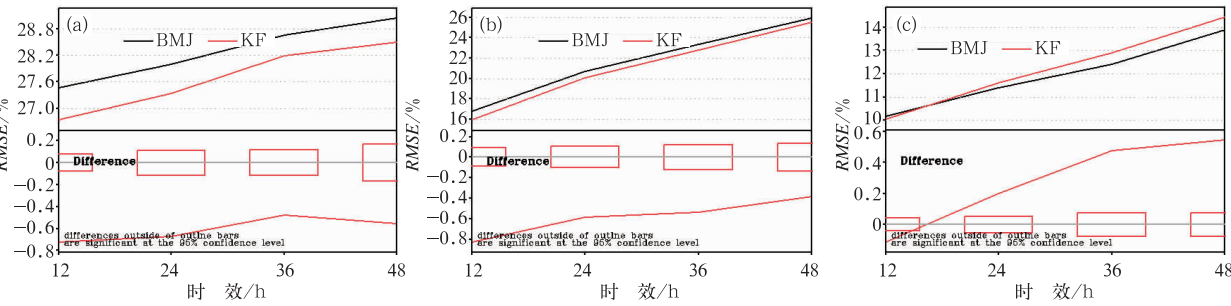


图 4 同图 1, 但为相对湿度均方根差月平均图  
Fig. 4 The same as Fig. 1, but for the RMSE monthly average of relative humidity

4 降水检验

根据前面的分析, 可知两个方案在冬季对 GRAPES\_Meso 模式的回报效果的影响差异不明显。因此, 本节仅对对流活动比较活跃的 6—8 月的降水回报效果进行对比分析。

4.1 空间 TS 评分检验

采用国家气象中心预报质量评分系统的降水预报累加检验方案, 对预报的降水进行累加降水检验。图 5 给出了 KFeta 和 BMJ 两种对流参数化方案的 24 和 48 h 预报降水的 TS 评分和系统偏差在 6—8 月的平均值。从 TS 评分图(图 5a 和 5b)中可以看出, 在小雨量级两个方案的 24 和 48 h 预报降水的 TS 评分相当, 但 KFeta 方案预报的降水在 24 和 48 h 小雨以上各个量级的 TS 评分都比 BMJ 方案高。从系统偏差上来看(图 5c 和 5d), 两个方案的 24 和 48 h 的小雨预报范围与实况很接近, 中雨到暴雨量级则是预报范围偏小, 漏报比较多, 但 KFeta 方案比 BMJ 方案要好, 更接近实况。特大暴雨的预报范围都偏大, 空报比较多, KFeta 方案空报相对更多。

4.2 时间系列 TS 评分检验

为了了解两个参数化方案对降水回报效果差异的空间分布, 本小节对我国范围内的 2513 个观测站中每个站点的时间序列进行了 TS 评分检验。检验方法参考国家气象中心的空间检验方法, 将检验时段(2009 年夏季 6—8 月)中的 92 d 数据当成 92 个站点数据, 分别统计它们的 TS 评分值。同样把 24 h 累计降水分为小雨( $\geq 0.1$  mm)、中雨( $\geq 10$  mm)、大雨( $\geq 25$  mm)、暴雨( $\geq 50$  mm)及特大暴雨( $\geq 100$  mm)五级。通过以上方法, 可以得到两个参数化方案预报降水的全国 2513 个站点不同降水等级的 TS 评分值。

图 6 是两个参数化方案夏季 24 h 预报的 24 h 累积降水 TS 评分差值分布。由于是数据站点形式, 所以这里先计算各个站点上的差值, 然后采用 GrADS 绘图软件的 Cressman 插值方法插值到 GRAPES\_Meso 模式的模拟格点上, 得到格点化的差值。其中, Cressman 插值的扫描半径  $r=24, 20, 16, 14, 12$ , 分别相当于 360, 300, 240, 210 和 180 km。从图 6 中可以看出在小雨量级上, 虽然总体上两个方案 TS 评分相当, 但从空间分布上看

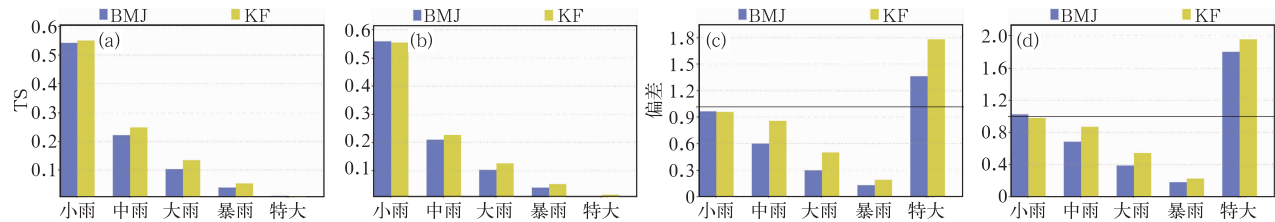


图 5 2009 年 6—8 月两种参数化方案 24 h(a,c) 和 48 h(b,d) 预报 TS 评分(a,b) 和系统偏差(c,d)  
Fig. 5 TS score (a, b) and system bias (c, d) of two parameterization schemes of 24 h forecast (a, c) and 48 h forecast (b, d) in June—August 2009

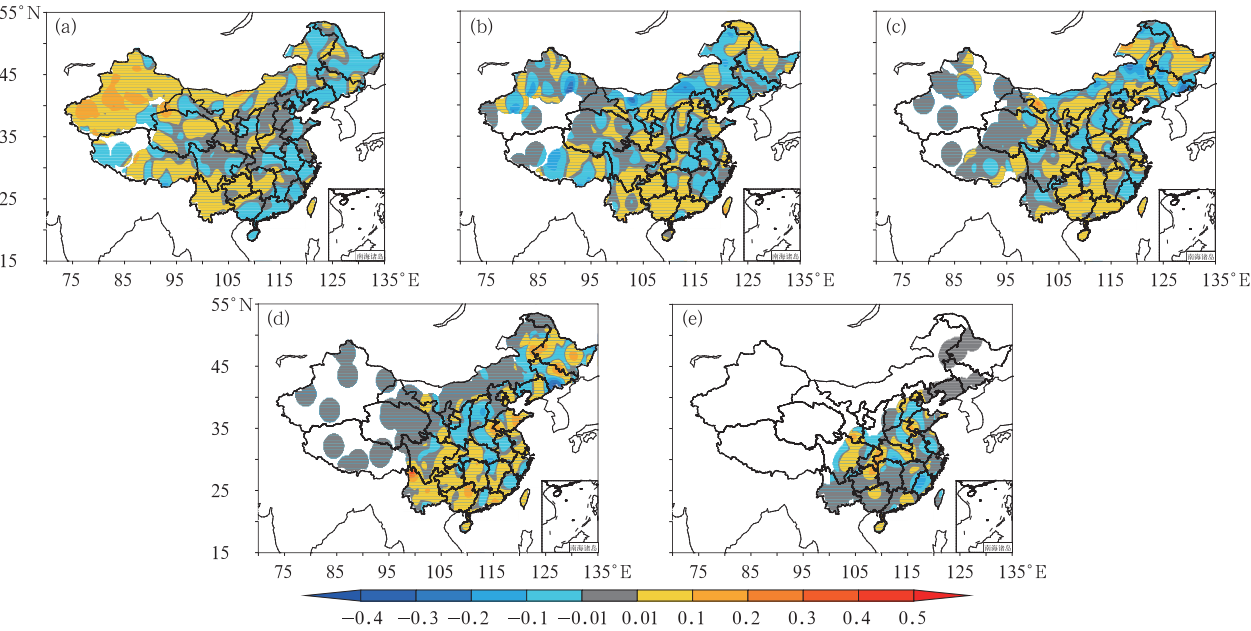


图 6 KFeta 和 BMJ 参数化方案夏季 24 h 预报的 24 h 累积降水 TS 评分差值分布  
(a~e 分别代表小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨)  
Fig. 6 The distribution of TS score differences by KFeta and BMJ schemes for  
24 h accumulated precipitation of 24 h forecast  
(a~e represent the drizzle, moderate rain, heavy rain, torrential rain  
and extremely severe rainstorm, respectively)

KFeta 方案在 110°E 以西有优势,但在 110°E 以东则不如 BMJ 方案。在中雨到暴雨量级上,KFeta 方案在华南有明显的优势。在中国西部,由于降水量较小,往往达不到大雨量级,所以在大雨及以上量级上两个方案的差异较小甚至没有差别,其差异主要在我国东部。特大暴雨量级的差异则主要在中东部,有好有坏,有很强的局地性。

4.3 积云降水贡献率分析

在数值模式 GRAPES\_Meso 预报的降水中,降水总量是积云降水量和格点降水量的总和。不同积云对流参数化方案因触发机制和计算过程都不同,这种不同便造成了在预报区域降水时不同积云对流参数化方案的选择会对积云降水量的计算造成不同的结果。为进一步讨论两种方案对预报降水效果的影响,本小节主要关注积云参数化方案在预报时对总降水所做的贡献,计算了积云降水在总降水中的比例。同时,获取了 ECMWF 的 2009 年 6—8 月 (year of tropical convection, YOTC) 逐日降水预报资料,使用的资料区域范围为 15°~65°N、70°~145°E,空间分辨率为 0.225°×0.225°,计算了积云降水在总降水中的比例。

图 7 给出了 2009 年夏季(6—8 月)GRAPES\_Meso 的 BMJ、KFeta 方案以及 YOTC 模式的 24 h 预报积云降水在总降水中的比例平均值的空间分布。平均值的计算方法是先计算每一天预报的积云降水在总降水中的比例,然后统计 92 d 的平均值。从图中可以看出,GRAPES\_Meso 的两个参数化方案预报积云降水平均贡献率的空间分布趋势基本一致,在陆面和洋面上都有明显的高纬度值小、低纬度值大的趋势。另外,在地形陡峭的青藏高原边缘也出现小值区。而 YOTC 的资料显示,除了在中纬度有一条高值带外,在陆面上并没有明显的纬度变化,降水以积云对流降水为主。在洋面上,YOTC 资料也没有 GRAPES\_Meso 模式表现得那么极端。GRAPES\_Meso 模式的两个参数化方案的积云参数化方案之间的差别主要表现在低纬度的洋面上。BMJ 方案在低纬度洋面上几乎没有格点降水,而 KFeta 方案的积云对流降水则在 80%左右。

图 8 给出了 2009 年夏季(6—8 月)GRAPES\_Meso 的 BMJ、KFeta 方案和 YOTC 资料的 24 h 预报积云降水在总降水中比例的各个量级概率分布。统计时没有求平均,而是直接统计各个量级的 92 d 的所有格点上的比例值,利用 Matlab 软件

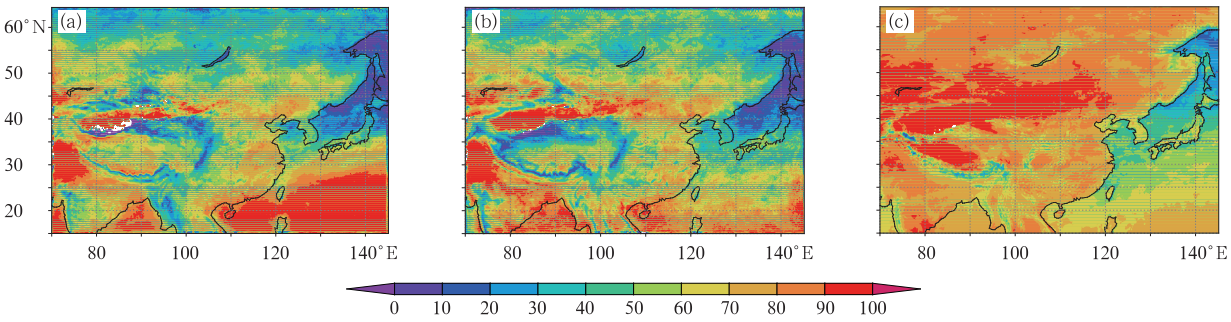


图 7 2009 年夏季(6—8 月)BMJ 方案(a)、KFeta 方案(b)以及 YOTC(c)的积云降水在总降水中所占比重的月平均图(单位: %)

Fig. 7 The monthly average of the percentage of cumulus precipitation in total rainfall in summer (June—August) 2009 for (a) BMJ, (b) KFeta, (c) YOTC (unit: %)

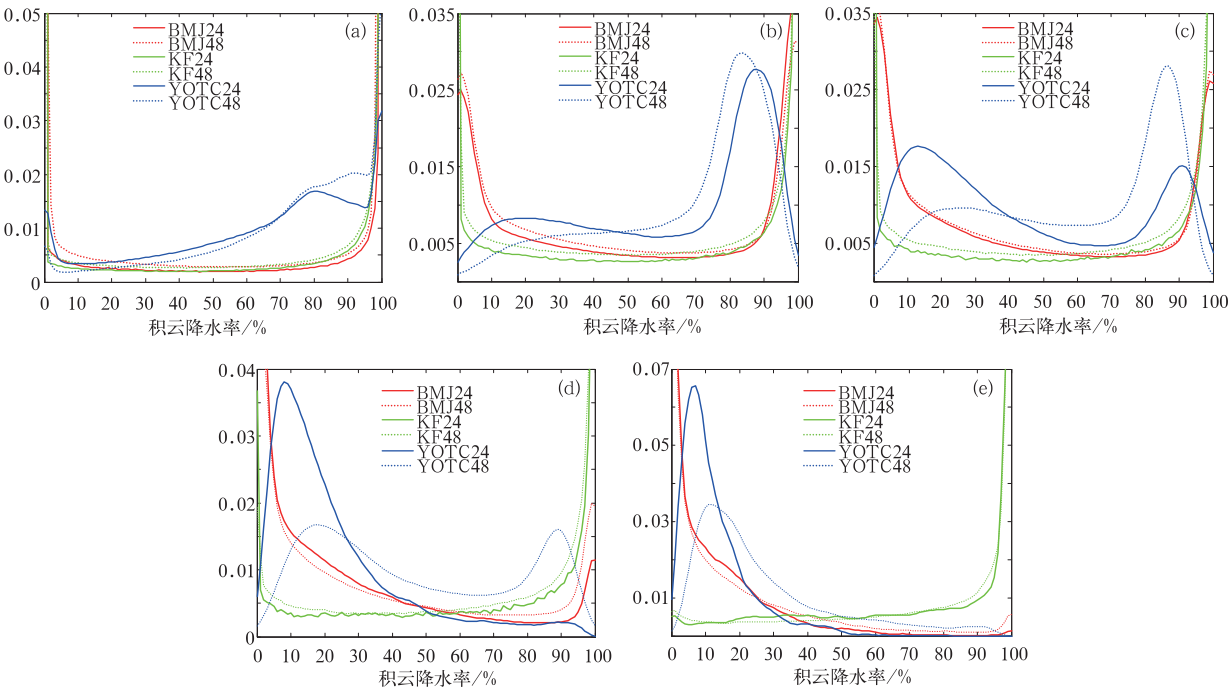


图 8 2009 年夏季(6—8 月)BMJ 方案、KFeta 方案和 YOTC 资料的 24 和 48 h 预报积云降水在总降水中的比例各个量级概率分布

(a~e 分别代表小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨)

Fig. 8 The probability distribution of cumulus precipitation contribution rate in each magnitude rainfall for the (a) BMJ, (b) KFeta, (c) YOTC 24 h and 48 h forecast in summer in 2009 (unit: %)

(a—e represent the drizzle, moderate rain, heavy rain, torrential rain and extremely severe rainstorm, respectively)

中的 ksdensity 函数进行计算。从总体上看,图 8 表明不同预报时效的概率分布形态相似,预报时效对贡献率的影响远小于不同方案 and 不同模式的影响。GRAPES\_Meso 的两个积云参数化方案的积云降水贡献率的概率分布形态在小雨量级上均呈陡峭的“U”字型分布。其中,KFeta 参数化方案随着降水量级的增大逐渐向大贡献率偏移,特大暴雨量级时

基本上是积云降水的贡献;而 BMJ 参数化方案则是随着降水量级的增大逐渐向小贡献率偏移,特大暴雨量级时基本上是格点降水的贡献。相比而言,EC 的模式则没有陡峭的“U”型分布,在小雨量级 80% 处还有一个峰值,在中到暴雨量级演变成双峰形态,分别对应于 10%~20% 和 80%~90%,特大暴雨量级则又演变成在 10% 处的单峰型。



因此,积云降水贡献率的概率分布形态表明,GRAPES\_Meso 模式的总降水要么 90% 以上是有积云参数化过程产生的,要么 90% 以上是有显示微物理过程产生的,积云参数化方案与显式微物理方案之间的协调性较差。从各个降水量级的形态演变趋势方面来看,BMJ 方案与 YOTC 资料接近,都是随着降水量级的增大逐渐向小比例值方向偏移,即格点降水的贡献率逐渐增大。

## 5 结 论

本文基于 GRAPES\_MesoV3.3.2.4 版本,通过对 2009 年冬季(1 月)和夏季(6—8 月)的批量回报试验,分析了 BMJ 和 KFeta 两种积云对流参数化方案的回报性能,并详细分析了两种参数化方案对模式预报降水的影响,得到的主要结论如下:

(1) 由于冬季的对流活动比较少,所以两个方案对 GRAPES\_Meso 模式的预报性能的影响差异非常小。

(2) 从形势场误差统计来看,夏季在模式的低层 BMJ 方案略优于 KFeta 方案,中层则是 KFeta 方案明显优于 BMJ 方案,而在高层 KFeta 方案略优于 BMJ 方案。

(3) 两个方案在夏季预报降水小雨量级 24 和 48 h 的 TS 评分相当;小雨以上量级,KFeta 方案预报的降水在 24 和 48 h 的 TS 评分都比 BMJ 方案高,预报范围比 BMJ 方案更接近实况。虽然两个参数方案在小雨量级的 TS 评分总体上相当,但在空间分布上却有明显的差异。KFeta 方案在  $110^{\circ}\text{E}$  以西有优势,但在  $110^{\circ}\text{E}$  以东则不如 BMJ 方案。在中雨到暴雨量级上,KFeta 方案在华南有明显的优势。在中国西部,由于降水量较小,往往达不到大雨量级,所以在大雨及以上量级上两个方案的差异较小甚至没有差别,其差异主要在我国东部。特大暴雨量级的差异则主要在中东部,有好有坏,有很强的局地性。

(4) 两个参数化方案预报积云降水平均贡献率的空间分布趋势基本一致,在陆面和洋面上都有明显的高纬度值小、低纬度值大的趋势。另外,在地形陡峭的青藏高原边缘也出现小值区。两个方案之间的差别主要表现在低纬度的洋面上,BMJ 方案的贡献率比 KFeta 方案大。与 YOTC 资料相比,GRAPES\_Meso 的对流参数化方案对流触发机制

相对较弱,对流过程的维持机制有些过强。而 KFeta 方案在低纬度的洋面上则比 BMJ 方案要好一些。

(5) 两个方案积云降水贡献率的概率分布形态在小雨量级上均呈陡峭的“U”型分布。其中,KFeta 参数化方案随着降水量级的增大逐渐向大贡献率偏移,特大暴雨量级时基本上是积云降水的贡献;而 BMJ 参数化方案则是随着降水量级的增大逐渐向小贡献率偏移,特大暴雨量级时基本上是格点降水的贡献。相比而言,YOTC 资料则没有陡峭的“U”型分布,而是呈单峰或双峰形态。从形态演变趋势方案来看,BMJ 方案与 YOTC 资料接近。

## 6 讨 论

相对于 BMJ 方案,KFeta 方案考虑了积云的卷入、卷出效应,并且考虑了积云对流过程对大气环境的风场的作用,因此在大气的高层,KFeta 方案对大气温、湿和风场的调整效果比 BMJ 方案好,误差变小。这可能是在总体上 KFeta 方案对形势场和降水的预报性能比 BMJ 方案略好的主要原因。通过时间系列 TS 评分检验,发现 BMJ 方案对降水(尤其是小雨量级)预报在东部沿海地区有优势,而在我国西部的内陆地区则不如 KFeta 方案。这说明由于 BMJ 方案的调整参考廓线是使用热带海洋大气试验观测资料得到的修正的廓线湿绝热线,比较适合在热带或者沿海地区,在我国的内陆地区则不太适合,使用 BMJ 方案时可能需要进一步做本地化的调整。相对而言,KFeta 方案的普适性要强些。

BMJ 方案在对流调整过程中对对流产生的凝结、感热和潜热的垂直输送可以不用显式方法表示出来,而是估算其总的作用,给出调整后的最终状态。该方案具有计算简单的特点,但在方案调整完成的瞬间,对模式的冲击较大,容易产生过度的降水。从图 7 中可以明显地看出,BMJ 方案(图 7a)在洋面上的积云降水比 KFeta 方案(图 7b)明显偏强,其主要原因就是由 BMJ 方案的对流调整机制造成的。

将图 7a 和 7b 与图 7c 的 YOTC 资料相比,GRAPES\_Meso 的积云降水和格点降水的协调性不好,要么全部是积云过程的降水,要么全部是微物理的格点降水,这可能与方案本身的设计有关。其中,YOTC 的数值模式中使用质量通量式积云参数

化方案,方案采用了准平衡闭合假设,积云对流描述得比较仔细,考虑了云和云之间以及云和大尺度环境之间彼此相互作用,并且显示出与边界层强烈的相互作用。该积云参数化方案与模式的其他物理过程之间的协调性较好,因此积云降水过程是微物理格点降水过程的有效补充。另一方面,就 KFeta 方案而言,该方案中需要用到一个滑动平均垂直速度( $W_{0AVG}$ ),其值取初始为零,那么用垂直速度( $w$ )计算第一步的  $W_{0AVG}$  时,它的值为  $w/2$ ,之所以用  $W_{0AVG}$  代替瞬时的垂直速度是为了用更加平滑的垂直速度计算局地温度扰动,进而判断对流初始激发(邓华,2008)。因为此方案的初始激发条件相对严格,因而可能会造成对流不容易被激发出来。一旦对流被激发出来后,由于对流有效位能(CAPE)在一定的调整时间内立即被释放。这可能是 GRAPES\_Meso 的两个方案积云降水贡献率的概率分布形态呈陡峭的“U”型或“L”型分布的原因之一。当然,积云降水的分布特征还有可能与其他的一些因素有关,如数值模拟初值场的选取,不同类型降水过程等,这还有待进一步的研究。

## 参考文献

- 陈德辉. 1997. 积云参数化技术. 应用气象学报, 8(增刊): 70-77.
- 陈德辉, 薛纪善, 沈学顺, 等. 2012. 我国自主研发的全球\_区域一体化数值天气预报系统 GRAPES 的应用与展望. 中国工程科学, 14(9): 47-54.
- 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. 科学通报, 53(20): 2396-2407.
- 邓华, 薛纪善, 徐海明, 等. 2008. GRAPES 中尺度模式中不同对流参数化方案模拟对流激发的研究. 热带气象学报, 24(4): 328-334.
- 狄靖月, 赵琳娜, 张国平, 等. 2013. 降水集合预报集成方法研究. 气象, 39(6): 691-698.
- 董美莹, 寿绍文. 1999. 积云参数化问题及其核心-闭合假设. 气象教育与科技, 2: 1-13.
- 林文实, 黄美元. 1998. 积云参数化研究的现状. 热带气象学报, 14(4): 375-379.
- 毛冬艳, 朱文剑, 樊利强, 等. 2014. GRAPES\_MESO V3.3 模式强天气预报性能的初步检验. 气象, 40(12): 1429-1438.
- 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. 气象, 39(2): 167-179.
- 伍湘君, 金之雁, 黄丽萍, 等. 2005. GRAPES 模式软件框架与实现. 应用气象学报, 16(4): 540-546.
- 熊秋芬. 2011. GRAPES\_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析. 气象, 37(2): 185-193.
- 许习华. 1991. 积云对流参数化方案研究进展. 高原气象, 10(1): 106-110.
- 薛纪善, 陈德辉, 等. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学应用与设计. 北京: 科学出版社.
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究. 气象, 40(9): 1076-1087.
- 张人禾, 沈学顺. 2008. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展. 科学通报, 53(20): 2393-2395.
- 左瑞亭, 王丽琼, 钱贞成, 等. 2008. 当前对流参数化研究存在问题的讨论. 热带气象学报, 24(6): 733-736.
- Arakawa A. 2004. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. J Climate, 17: 2493-2525.
- Anderson C J, Arritt R W. 2007. An Alternative mass flux profile in the Kain-Fritsch convective parameterization and its effects in seasonal precipitation. J Hydrometeor, 8: 1128-1140.
- Betts A K. 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observation and theoretical basis. Quart J Roy Meteor Soc, 112: 667-691.
- Fritsch J M, Chappel C F. 1980. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. J Atmos Sci, 37: 1723-1733.
- Frank W M. 1983. The cumulus parameterization problem. Mon Wea Rev, 111: 1859-1871.
- Frank W M, Cohen C. 1987. Simulation of tropical convective systems. Part I: A cumuls parameterization. J Atmos Sci, 44: 3787-3799.
- Janjic Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. Mon Wea Rev, 122: 927-945.
- Kain J S. 2004. The kain-Fritsch convective parameterization: An update. J Appl Meteor, 43: 170-181.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. J Atmos Sci, 47: 2784-2802.
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. Amer Metero Soc, 46: 165-170.