

# 修正的质量通量积云对流方案及其模拟试验研究 I: 方案介绍及对 1991 年洪涝过程的模拟\*

刘 鸣 一 | 汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

文中在综合比较各类积云对流参数化方案优缺点的基础上, 主要参考陈伯民等修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案, 对其进行简化和修改, 发展了一个质量通量积云对流参数化方案, 文中表示为 MFS (Mass Flux Scheme)。MFS 是一种综合型的方案, 既考虑了大尺度水汽辐合的重要性, 又考虑了积云中的上升运动、下沉运动、环境中的补偿下沉运动, 以及卷入、卷出和蒸发等, 用总体云模式来描述积云与环境的相互作用, 同时考虑了深对流和浅对流。

将 MFS 植入 NCAR 区域气候模式 RegCM 2 中, 对 1991 年 5~7 月江淮地区特大降水过程的夏季风气候特征和变化进行了模拟, 并与 NCAR RegCM 2 选用 Kuo 方案, 在同样初、边值条件和其它物理过程选择下的模拟结果进行了对比分析。分析结果表明, 植入 MFS 后的模式能够模拟这次极端的降水气候事件。在某些方面, 如地表气温, 降水的模拟上, 植入 MFS 后的模式的模拟结果要比原模式的结果更合理。

关键词: 积云对流参数化, 质量通量方案, 区域气候模式。

## 1 引 言

积云对流参数化是数值模式中最重要非绝热加热物理过程之一。积云对流参数化尝试始于 20 世纪 50 年代中期, 从现有积云对流参数化方案的发展过程考虑, 可将其大体分为浅对流参数化方案和深对流参数化方案两大类<sup>[1]</sup>。浅对流过程一般只能引起云底至云顶气柱内温度和湿度垂直分布的改变, 而不能产生净的潜热释放和对流降雨。深对流过程不仅会引起温度和湿度垂直分布的改变, 还会产生净的潜热释放和对流降雨。有关深对流参数化方面的研究要比浅对流参数化方面的研究广泛、深入得多。深对流参数化方案大体可分为 4 类: (1) 湿对流调整方案<sup>[2~4]</sup>; (2) 郭(晓岚)型方案<sup>[5~8]</sup>, 是一种广为应用的积云参数化方案; (3) 质量通量方案<sup>[9, 10]</sup>, 以 Arakawa-Schubert 方案为代表; (4) 中尺度模式积云参数化方案<sup>[11~14]</sup>, 此类方案在中尺度数值模拟中有重要应用。

湿对流调整方法是首先预报去掉凝结后的比湿和温度, 然后, 按热力学第一定律调整

\* 初稿时间: 1999 年 4 月 23 日; 修改稿时间: 1999 年 10 月 9 日。  
资助课题: 国家重点基础研究发展规划《我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究 (G1998040900) 项目和国家自然科学基金委 49794030 项目。

比湿和温度, 以便消除超绝热直减率和过饱和。湿对流调整方案常低估降水量, 加热层次过低, 计算量小, 多用于 GCM 模式。

郭型方案假设对流发生在有深厚条件不稳定的层次和低层有大尺度辐合的区域, 积云形成后立即通过侧向混合加热、增湿改变环境场的温度和湿度。云柱中净辐合的水汽一部分凝结作为积云降水, 另一部分则用于湿润环境空气。在该类方案中, 不同版本之间的主要差别之一是如何选取湿润因子  $b$ 。Kuo 型方案的主要优点是仅用大尺度变量来直接决定积云尺度加热和水汽通量, 而不必计算云的动力过程(如卷入、卷出和下曳气流)和云的微物理过程。Kuo 型方案预报效果较好, 加热廓线较真实, 计算量较小, 常用于业务预报模式。

Arakawa-Schubert(A-S) 方案主要说明积云群和大尺度环境如何相互作用, 是一种谱模式, 在任一时刻都有不同尺度的云同时存在。该方案认为积云之间由对流引起的下沉运动是造成大尺度环境观测到的热量分布的主要原因。由于 A-S 方案对湿物理过程考虑的较细, 因而在大尺度和中尺度过程的预报中, 效果是最好的, 但与 Kuo 型方案计算时间比较, 计算量较大, 多用于研究模式。

上述 3 类是适用于粗网格模式的参数化方案, 而对于中尺度模式, 积云参数化方案要同时描述积云和中尺度环境、大尺度系统的相互作用, 云模式相对要复杂些, 一般包含云的微物理过程和水汽相变过程。目前广泛采用的中尺度模式积云参数化方案是 Fritsch-Chappell 方案。

从 20 世纪 70 年代后期, 特别是 80 年代以来, 各种参数化方案的进展十分迅速<sup>[15]</sup>。如在对流调整型方案方面, Betts 和 Miller 在 1986 年提出了一种新的对流调整方案, 称之为饱和点对流调整方案; 在质量通量型方案方面, 又出现了一些综合型的质量通量方案, 如 ECMWF 现行的 Tiedtke<sup>[16]</sup> 方案, 它是 Kuo 型和 A-S 型两种方案的结合, 其预报效果既优于前者, 而又不如后者复杂。本文在陈伯民<sup>[17, 18]</sup> 工作的基础上, 参考 Tiedtke 方案, 简化发展了一个质量通量方案, 在本文中记为 MFS, 将其引入 NCAR RegCM2 中, 对中国季风区的夏季区域气候特征进行模拟试验。下面首先介绍质量通量方案 MFS, 然后简要介绍 NCAR RegCM2 和模拟试验设计, 最后分析模拟结果并给出结论。

## 2 质量通量积云对流方案 MFS

### 2.1 基本方程

从原始方程出发, 用总体模式来考虑积云群的总性质, 经过推导并将其转换到  $P$  坐标中, 可得到如下方程<sup>[17, 18]</sup>:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla S + \omega \frac{\partial S}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} [M_u S_u + M_d S_d - (M_u + M_d) S] + L(c_u - e_d - \tilde{e}_l - \tilde{e}_p) + Q_R \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} [M_u q_u + M_d q_d - (M_u + M_d) q] - (c_u - e_d - \tilde{e}_l - \tilde{e}_p) \quad (2)$$

方程(1)和(2)是质量通量积云对流参数化方案 MFS 的热力学方程和水汽方程。积云对流参数化的目的是求出积云对流加热和增湿以及积云降水量:

$$P_c = \frac{1}{g} \frac{P_B}{P_T} (G_p - e_d - \tilde{e}_p) dp \quad (3)$$

其中:  $M_u$  是积云群总体的上升质量通量,  $M_d$  是积云群总体的下沉质量通量,  $-(M_u + M_d)$  为诱生的环境补偿下沉质量通量;  $S_u$  是上升气流的加权平均的干静力能,  $S_d$  是下沉气流的加权平均的干静力能,  $q_u$  是上升气流的加权平均的比湿,  $q_d$  是下沉气流的加权平均的比湿;  $c_u$  为上升气流的凝结率,  $e_d$  为下沉气流的蒸发率,  $\tilde{e}_i$  为云空气卷出到环境中的蒸发率,  $\tilde{e}_p$  是降水在不饱和云下层的蒸发率,  $P_c$  是积云降水量,  $G_p$  是云水向雨水的转换率,  $P_T, P_B$  分别是云顶和云底的气压值。

## 2.2 上升气流的质量和能量平衡方程

积云上升气流始于模式边界层, 当空气抬升到自由对流高度时成云, 积云上升气流假定为稳定状态, 其质量、干静力能、水汽和云水的总方程为:

$$\frac{\partial M_u}{\partial \phi} = D_u - E_u \quad (4)$$

$$\frac{\partial (M_u S_u)}{\partial \phi} = D_u S_u - E_u S - L c_u \quad (5)$$

$$\frac{\partial (M_u q_u)}{\partial \phi} = D_u q_u - E_u q + c_u \quad (6)$$

$$\frac{\partial (M_u l)}{\partial \phi} = D_u l + G_p - c_u \quad (7)$$

其中:  $D_u$  是积云上升气流的质量卷出率,  $E_u$  是积云上升气流的质量卷入率,  $l$  是云中液态水含量。

积云的质量卷入有两种: 一是通过积云边缘的混合质量卷入, 以上标(1)代表; 二是和大尺度辐合有关的有组织的质量卷入, 以上标(2)代表, 即

$$E_u = E_u^{(1)} + E_u^{(2)} \quad (8)$$

积云的质量卷出也有两种: 一是通过积云边缘的混合质量卷出, 以上标(1)代表; 二是云顶的有组织的质量卷出, 以上标(2)代表, 即

$$D_u = D_u^{(1)} + D_u^{(2)} \quad (9)$$

## 2.3 下沉气流的质量和能量平衡方程

积云下沉气流与积云上升运动产生的积云对流降水以及环境空气的侵入有关。积云下沉气流的质量通量、干静力能和水汽分布由下列公式表示:

$$\frac{\partial M_d}{\partial \phi} = D_d - E_d \quad (10)$$

$$\frac{\partial (M_d S_d)}{\partial \phi} = D_d S_d - E_d S - L e_d \quad (11)$$

$$\frac{\partial (M_d q_d)}{\partial \phi} = D_d q_d - E_d q + e_d \quad (12)$$

其中:  $D_d$  是积云下沉气流的质量卷出率,  $E_d$  是积云下沉气流的质量卷入率。

在文中同时考虑了深、浅积云对流。无论是深积云对流还是浅积云对流, 上述积云模式形式不变, 但是针对不同的对流, 有不同的假设和参数值。

## 2.4 深积云对流

很多诊断分析表明, 深积云对流主要发生在对流不稳定区域, 并且低层有大尺度的辐合形势。通过云底卷入到云中的质量必须使得云下层在大尺度输送、湍流输送和对流输送存在的条件下保持水汽平衡。根据云模式, 深对流的闭合假设为:

$$[M_u(q_u - q) + M_d(q_d - q)]_B = - \frac{P_s}{P_B} \left[ \nabla \cdot (q\mathbf{V}) + \frac{\partial(\omega q)}{\partial p} \right] dp + E_s \quad (13)$$

其中 B 代表云底,  $P_B$ ,  $P_s$  分别表示云底气压和地面气压。这闭合假设使得云下层水汽含量保持准稳定状态。

积云上升气流中有组织的卷入存在于有大尺度水汽辐合的层次上, 并且与大尺度水汽辐合直接成比例:

$$E_u^{(2)} = - \frac{1}{q} \left[ \nabla \cdot (q\mathbf{V}) + \frac{\partial(\omega q)}{\partial p} \right] \quad (14)$$

深积云上升气流的有组织的卷出仅发生在云顶, 即

$$D_u^{(2)} = \frac{(M_u)_{k+1/2}}{p} \quad (15)$$

深积云是有对流性降水的积云, 其云水向雨水的转换率和云中液态水含量成比例。

## 2.5 浅积云对流

当大尺度辐合气流很小甚至没有时, 会出现浅积云对流。研究(LeMone 和 Pennell, 1976) 表明, 云底净向上水汽通量和地表扰动水汽通量几乎相等, 所以, 浅积云对流的云底闭合假设同深积云对流, 即式(13)。所不同的是, 浅积云对流来自大尺度的水汽辐合很小, 甚至为负数, 水汽供应主要通过地表蒸发。

在模式中, 我们不考虑非常浅薄的浅积云, 这种积云往往在云底之上立即大量卷出。我们考虑略厚一些的浅积云。由于我们使用的模式有 23 层, 垂直分辨率较高, 所以可以考虑浅积云的上冲效应<sup>[16]</sup>, 即浅积云的一部分在云顶层卷出到环境中, 而另一部分冲入到上一层, 在那儿卷出到环境中。则有组织的卷出可以表示为:

$$D_u^{(2)} = (1 - \beta) \frac{(M_u)_{k+1/2}}{p} \quad \text{云顶层}(K_{\text{top}} \text{层}) \quad (16)$$

$$D_u^{(2)} = \beta \frac{(M_u)_{k+1/2}}{p} \quad \text{云顶上一层}(K_{\text{top}} - 1 \text{层}) \quad (17)$$

其中  $\beta$  参数表示上冲效应的强度。浅积云对流属于无对流降水型积云。

## 3 模式简介

文中使用的区域气候模式是美国 NCAR 发展的第二代区域气候模式 RegCM2<sup>[19, 20]</sup>。刘永强等<sup>[21, 22]</sup>、赵宗慈等<sup>[23]</sup>、罗勇和赵宗慈<sup>[24]</sup>对 RegCM2 以及利用该模式进行的区域气候模拟作了详细介绍和综合评述。RegCM2 的工作原理是由大气环流模式(如 CCM2)模拟或同化分析输出大尺度气象场, 利用这些大尺度气象场作为初始条件和边界条件提供给 RegCM2, 然后在选定的模拟试验区域利用 RegCM2 进行模拟, 来揭示大尺度背景场

下区域气候的更准确更详细的特征,而 RegCM2 与全球模式(如 CCM2)的嵌套是单向影响嵌套,即全球模式(如 CCM2)为区域模式 RegCM2 提供初始场和侧边界值,而区域模式的模拟结果不反馈给全球环流模式。NCAR 在改进和发展 RegCM2 的同时,也利用 RegCM2 开展了大量的区域气候模拟试验研究。Liu 等<sup>[25]</sup>、刘永强等、罗勇和赵宗慈的研究表明,RegCM2 对区域气候特征已经具有一定的模拟能力,并且在许多方面要比分辨率较粗的大气环流模式模拟得好。另一方面,对 RegCM2 中的物理过程参数化方案的模拟研究表明<sup>[26-28]</sup>,区域气候模式 RegCM2 对物理过程参数化方案非常敏感。而在目前的模式中关于物理过程的处理还是一个相当薄弱的环节,因而进一步完善和改进物理过程的处理对提高区域气候模式 RegCM2 的模拟质量非常重要。

#### 4 模拟试验设计

区域气候模式 RegCM2 中的积云对流方案有两种选择,即 Kuo 方案和 Grell 方案。现将 MFS 方案加入其中,作为第 3 种选择。为了更好地考察 MFS 对积云对流过程的模拟能力,文中选取同样的模拟对象,分别选用 Kuo 方案和 MFS 方案进行模拟,然后对比分析模拟结果。

1991 年 5~7 月中国江淮地区出现了 20 世纪罕见的特大洪涝灾害<sup>[29]</sup>,这次持续性特大降水过程是中国近 40 a 出现的一次著名大暴雨事件。它的雨量之大、持续时间之久、影响之广、灾害之重都为历史上所少见。这场暴雨是发生在江淮的梅雨季节,其主要特点是:梅雨来得早,持续时间长,梅雨期降水量大,暴雨时段集中,强度大,落区少动。选择这次洪涝灾害进行模拟试验的目的也是为了进一步考察区域气候模式 RegCM2 对于中国特大降水的区域气候特征的模拟能力。

模式采用的资料是美国西北太平洋实验室提供的 ECMWF-TOGAII 的初始场和边界场资料,侧边界条件每隔 12 h 更新 1 次,采用指数松弛强迫法进行嵌套。月平均海表面温度为  $2 \times 2$  的观测值,按时间权重系数线性插值到每 12 h 的时间层上,同侧边界条件一起更新。模式积分时间是 1991 年 5 月 1 日~7 月 31 日,积分步长为 120 s。模拟的区域是  $10 \sim 45 \text{ N}$ ,  $100 \sim 150 \text{ E}$ ,即东亚和西太平洋地区,中心位置是  $30 \text{ N}$ ,  $120 \text{ E}$ 。模式水平分辨率是 60 km,南北方向是 65 个格点,东西方向是 85 个格点,垂直方向是 23 层,其中,在大约 850 hPa 以下有 6 层,在 300 hPa 以上有 6 层,模式顶层气压是 10 hPa。模式的边界缓冲区是 18 圈。模式采用真实的海陆分布和地形分布,下垫面的植被状况分 18 种类型。研究区域包括青藏高原的部分地区,最大高度为 5200 m。下垫面的植被类型主要有牧场和草地、热带和副热带森林、落叶林、针叶林、沙漠、热带草原以及少量的农田等。

模拟试验选用的物理过程参数化方案包括:CCM2 的辐射方案;Hotslag 行星边界层物理模式;BATS 陆气传输方案;大尺度降水过程为隐式方案。确定了相同的模拟区域、模拟积分时段、积分步长、模式结构和物理过程方案之后,分别选用 Kuo 方案和 MFS 方案进行了 3 个月的长时间积分,下面分析其模拟结果。

#### 5 模拟结果

选用 MFS 方案的 RegCM2 进行了 3 个月的长时间积分,初步表明将 MFS 植入

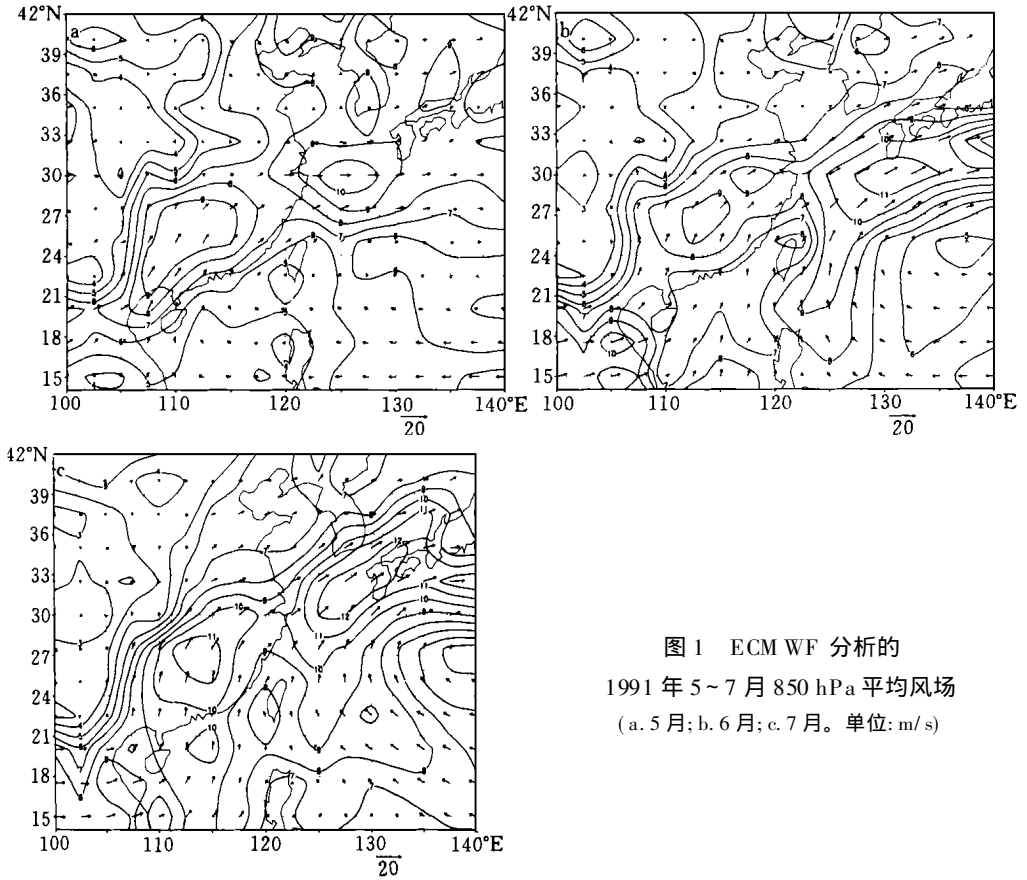


图 1 ECMWF 分析的  
1991 年 5~7 月 850 hPa 平均风场  
(a. 5 月; b. 6 月; c. 7 月。单位: m/s)

RegCM2 中是成功的。下面详细分析其模拟结果, 首先与观测分析资料进行对比分析, 然后与 Kuo 方案的模拟结果进行对比分析。

### 5.1 选用 MFS 方案模拟的中低层形势场与观测资料的比较分析

选用 MFS 方案的 RegCM2 模拟的中低层形势场和要素场的基本形势与 ECMWF 分析资料基本一致, 并且更细致地刻画了模拟区域的区域气候特征。图 1 是 ECMWF 分析的 5~7 月 850 hPa 风场的月平均分布, 图 2 给出了模拟的 5~7 月 850 hPa 风场的月平均分布, 图 3 给出了模拟的 5~7 月 850 hPa 比湿场的月平均分布。在 5 月份, 中国西南地区为一低值系统, 其东侧是强偏南风; 中国华东和东南地区低空盛行强西南季风; 中国东南沿海为西太平洋副热带高压的外围所控制, 是强的西南风。这一结果与该年 5 月份西太平洋副热带高压第一次北跳过早, 主要的低层辐合区发生在中国西南、江淮及以北地区的观测分析结果是一致的, 比湿场表现为从中南半岛到华南、华东地区为一湿舌, 这也与 5 月份雨季在这一地区开始相一致, 而华南地区无强降水发生。6 月份的模拟结果与 5 月份相比发生了较大的变化。原来自西南至华北西部的偏南风减弱, 华东至东南仍是西南季风控制, 但比 5 月份偏强, 范围也有所扩大。比湿场在华南—江淮地区也明显增加。这和华东至西南地区出现持续的强降水过程是一致的。到了 7 月份, 西南季风明显北上至渤海湾, 这与观测到的 7 月中下旬西太平洋副热带高压第 2 次北跳相一致。850 hPa 的比湿在北方

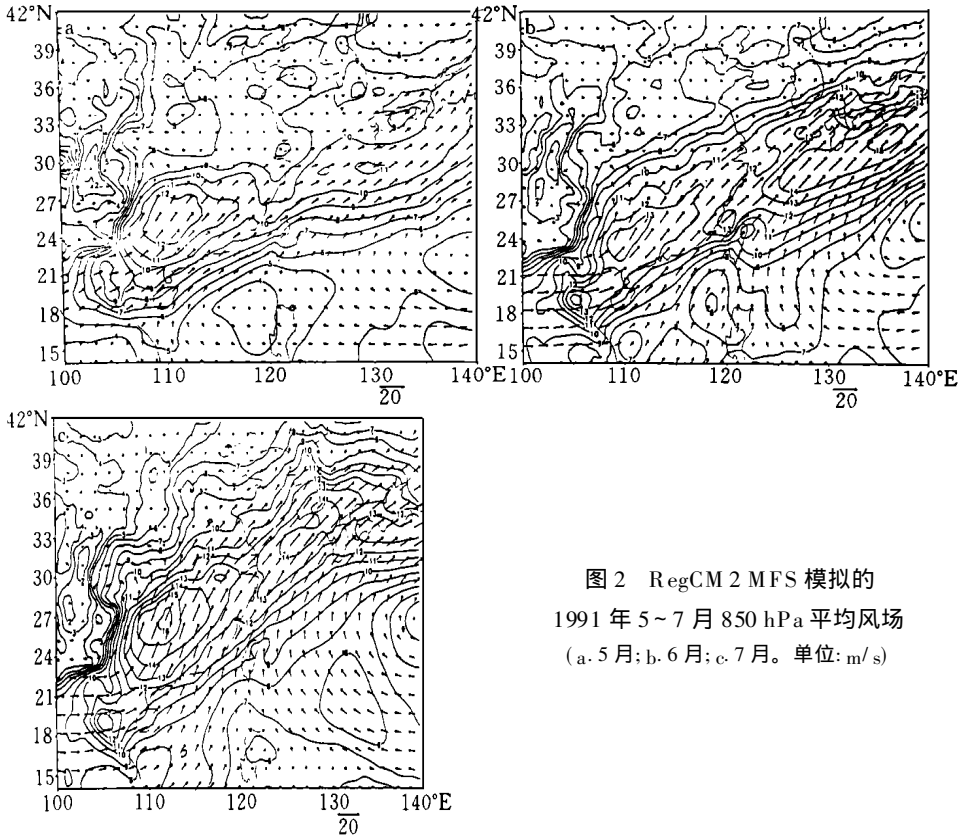


图2 RegCM 2 MFS 模拟的  
1991年5~7月850 hPa平均风场  
(a. 5月; b. 6月; c. 7月。单位: m/s)

地区有大幅度上升,这时江淮流域的持续性强降水过程逐渐结束,主要雨带北移。从500 hPa图上(图略)也可以明显地看到西南季风的盛行、北上以及西太平洋副hPa图上(图略)也可以明显地看到西南季风的盛行、北上以及西太平洋副热带高压系统的北跳。

综观上述模拟结果,选用MFS方案的RegCM 2不但能够模拟大尺度形势场的基本特征,模拟东亚环流的异常,反映了1991年5~7月东亚夏季风的活动,还进一步揭示了较细致的局地区域气候特征。

## 5.2 MFS方案与Kuo方案模拟的地面要素场的对比分析

地面降水和地面气温是区域气候预测和模拟的主要对象。图4分别给出了1991年6月实测的和分别采用MFS方案与Kuo方案模拟的地面降水的分布。图4a是江淮地区132个站点降水实况资料绘制的6月降水量,实况降水分布是雨带呈东西走向,位于30~34°N附近。有两个雨量最大值区:一个雨量最大值区位于33°N附近,其中400 mm等值线位于33°N, 116°E附近,最大雨量中心为478 mm,另一个雨量最大值区位于31°N, 110°E附近,最大雨量中心为430 mm。从图中可以看出,无论是采用Kuo方案,还是采用MFS方案,模拟的月降水量都明显偏大,Kuo方案模拟的6月份降水的雨量最大值区比较零散,而MFS方案模拟的6月降水比较好地反映了实况降水中位于东部的大范围降水区。模拟的降水量偏大与模式的物理过程、模式的初始场和侧边界场、模式的误差有关。另外个别异常强降水中心就是所谓的“数值点风暴”(Numerical Point Storm)。

图5给出了1991年5~7月江淮地区(28~34°N, 114~122°E)降水的日变化,粗实线

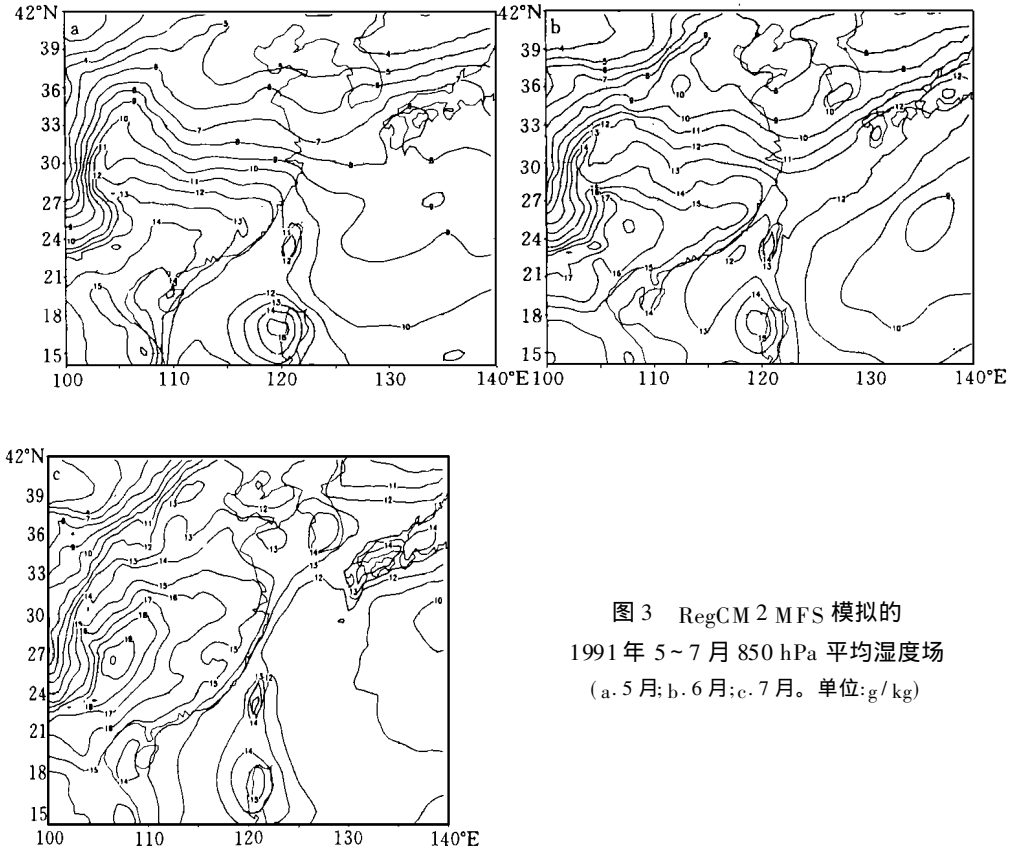


图3 RegCM 2 MFS 模拟的  
1991年5~7月850 hPa平均湿度场  
(a. 5月; b. 6月; c. 7月。单位: g/kg)

是实况降水日变化, 虚线是采用  $K_{uo}$  方案模拟的, 带点实线是采用 MFS 方案模拟的。1991年江淮地区的梅雨由3次降雨过程组成, 第1次降雨过程从5月18~26日, 第2次降雨过程从6月2~19日, 第3次降雨过程从6月30日到7月13日。第1次降雨过程可称为早黄梅, 第2、3次降雨过程是典型梅雨。对实况和两种积云方案的模拟结果进行比较发现, 两种积云方案模拟的日降水量均比实况偏大; 两种方案都能够模拟出江淮地区降水过程随时间的变化规律, 3次强降雨过程均表现出来了; 但  $K_{uo}$  方案在第1次降水过程和第2次降水过程之间多模拟了1次虚假的降水过程, 模拟结果明显不如 MFS 方案, MFS 方案很清晰地模拟了3次降水过程和其间两次间隙过程。

图6是1991年6月ECMWF分析的和采用  $K_{uo}$  方案、MFS 方案模拟的地面气温月平均场。从6月份月平均地表气温来看, 江淮地区处于296 K的暖舌中。模式模拟的地表气温在海洋上和实况十分接近, 但在陆地上有明显偏差。用  $K_{uo}$  方案模拟的地表气温在江淮地区和四川地区有302 K的暖中心, 比实况偏高5~6 K, 华南地区也偏高2~3 K, 在中南半岛上有306 K的暖中心, 比实况偏高8~10 K; 而 MFS 方案模拟的地表气温在中南半岛上比实况偏高4~6 K, 江淮地区偏高2~4 K; 这表明, 使用质量通量积云对流参数化方案 MFS 对地表气温的模拟有很大的改进。

## 6 结 论

本文中简化和发展了质量通量积云对流参数化方案 MFS, 将其植入区域气候模式



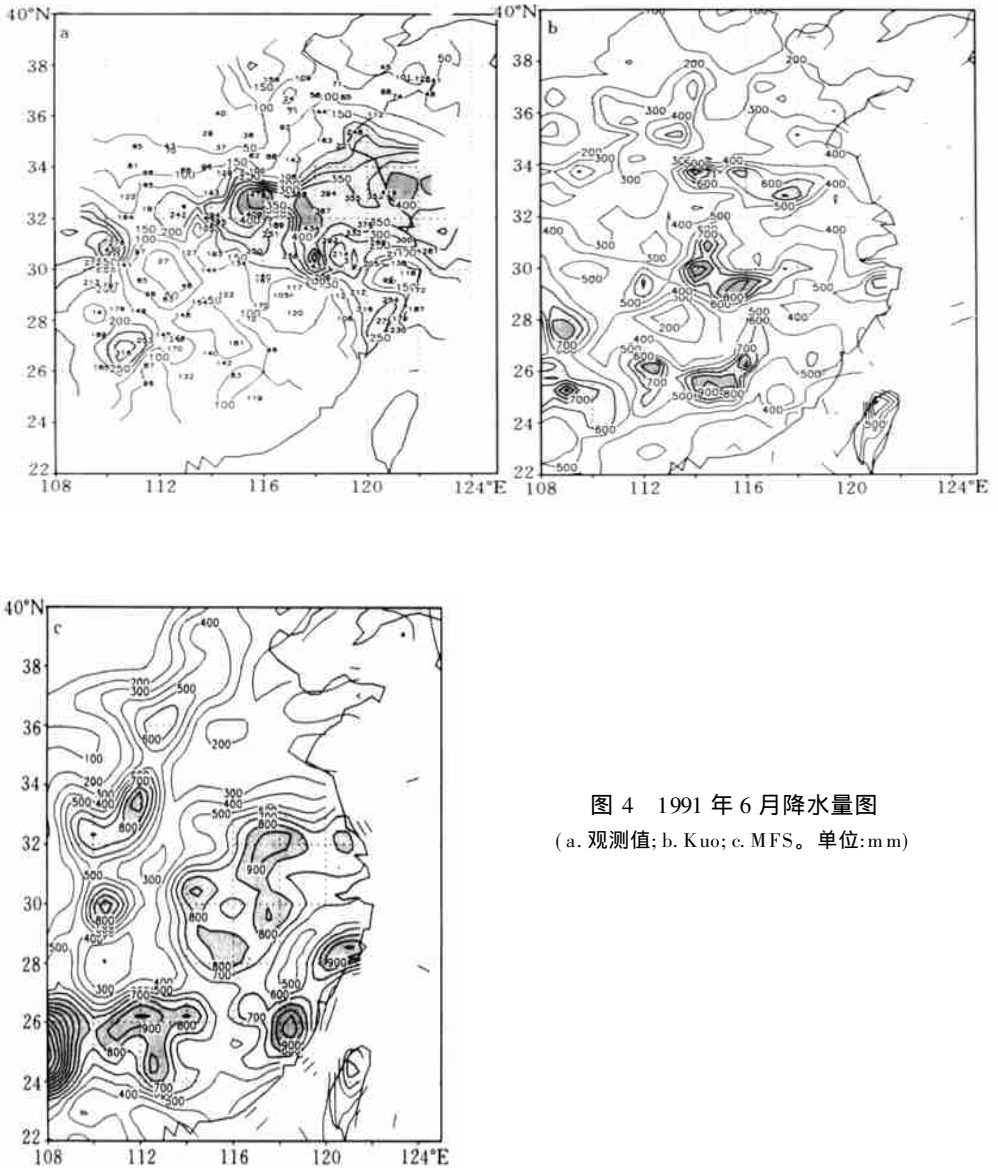


图4 1991年6月降水量图  
(a. 观测值; b. Kuo; c. MFS. 单位:mm)

RegCM2中,并模拟了1991年5~7月中国夏季强降水过程的区域气候特征。主要结论如下:

1) MFS是一种综合型的方案,它是Kuo型方案和A-S型方案的结合。在该方案中,考虑了积云中的上升运动,下沉运动,环境中的补偿下沉运动,以及卷入、卷出和蒸发等,用总体云群模式来描述积云与环境的相互作用;同时考虑了深对流和浅对流;考虑浅积云的上冲效应;充分考虑了云层和云下层的相互作用。

2) 将MFS方案植入到区域气候模式RegCM2中,成功地积分了3个月,这表明植入是稳定的、成功的。用MFS方案对1991年5~7月江淮特大降水过程进行了模拟。其模拟的结果和ECMWF的分析结果基本一致。该方案能够模拟东亚环流的异常,反映东亚夏季风的进程,细致地刻画了模拟区域气候特征和变化,如1991年5月西太平洋副热带

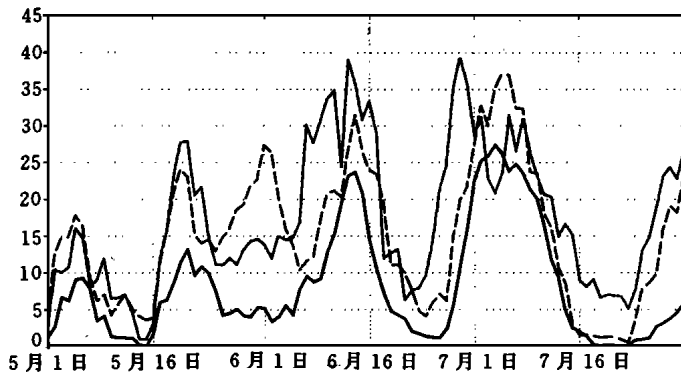


图5 1991年5~7月江淮地区降水日变化  
(粗实线: 实况; 细实线: Kuo; 点线: MFS; 单位: mm/d)

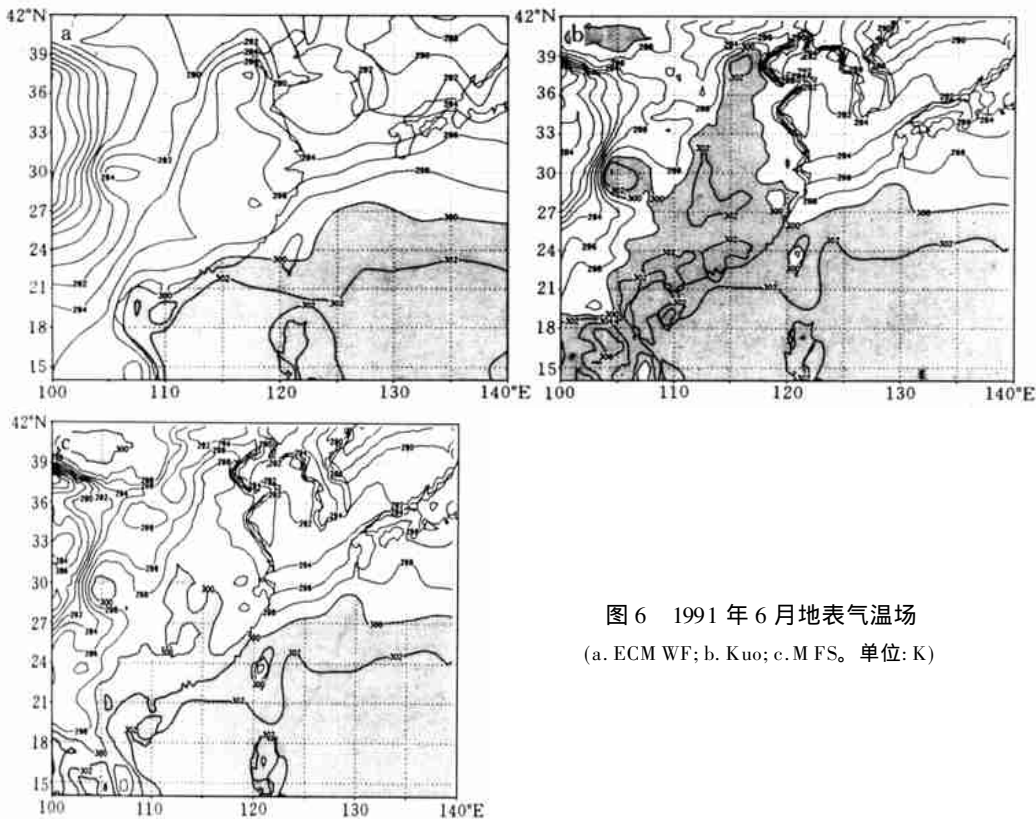


图6 1991年6月地表气温场  
(a. ECMWF; b. Kuo; c. MFS。单位: K)

高压过早北跳越过 20°N, 西南季风直接影响到江淮地区, 导致江淮梅雨过早开始; 6~7月上旬, 西太平洋副热带高压比正常位置偏南, 梅雨环流形势长时间维持, 西南季风持续盛行于江淮地区, 使得梅雨期过长; 7月西南季风明显北上, 江淮梅雨结束。模拟结果能够再现江淮地区特大降水过程的时空分布, 这表明植入 MFS 后的模式对区域气候特征和变化具有一定的模拟能力, 但模拟的雨量偏大, 这是 Kuo 方案和 MFS 方案模拟结果中所

共有的缺点,主要是由于非对流降水模拟偏大所造成,这还有待于进一步的改进。

3) 将 MFS 模拟结果和 Kuo 方案模拟结果进行对比发现,使用质量通量积云对流参数化方案 MFS 对地表气温的模拟有很大的改进,减小了对中南半岛、华南—江淮—华北地区地表气温模拟的偏差。对降水落区的模拟,以 MFS 方案的模拟结果最接近实况;对 3 场降水的时段分布的模拟来看, MFS 方案很好地模拟出强降水时段和 3 次降水过程中的间歇时段,比 Kuo 方案模拟结果有所改善。

致谢:感谢陶诗言先生、吴国雄先生、王绍武教授、刘式达教授、谢安教授、李维京研究员的热情指导和鼓励。美国 NCAR 的 F. Giorgi 同意本研究使用他们的模式 RegCM 2, 赵宗慈研究员为完成本文提供了相关资料,在此,一并表示感谢。

## 参考文献

- 1 陈德辉. 积云对流参数化技术. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 69~77
- 2 Manabe S, et al. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. *Mon Wea Rev.* 1965, 93: 769- 798
- 3 Betts A K. A new convective adjustment scheme, Part I: Observational and theoretical basis. *Quart J Roy Meteor Soc.* 1986, 112: 677- 691
- 4 Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme, Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. *Quart J Roy Meteor Soc.* 1986, 112: 693- 709
- 5 Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci.* 1965, 22: 40- 63
- 6 Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *J Atmos Sci.* 1974, 31: 1232- 1240
- 7 Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon Wea Rev.* 1977, 105: 270- 286
- 8 Geleyn J F. On a simple, parameter-free partition between moistening and precipitation in the Kuo scheme. *Mon Wea Rev.* 1985, 113: 405- 408
- 9 Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment, Part I. *J Atmos Sci.* 1974, 31: 674- 701
- 10 Arakawa A, Chen J M. Closure assumptions in the cumulus parameterization problem. Short and Medium-Range Numerical Weather Prediction. In: T Matsuno, Ed. *J Meteor Soc Japan, Special Volume*, 1987, 107- 131
- 11 Kreitzberg C W, Perkey D J. Release of potential instability, Part II: The mechanism of convective/mesoscale interaction. *J Atmos Sci.* 1977, 34: 1569- 1595
- 12 Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J Atmos Sci.* 1980, 37: 1722- 1733
- 13 Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part II: Mesoscale model. *J Atmos Sci.* 1980, 37: 1734- 1762
- 14 Frank W M. A cumulus parameterization scheme incorporating subgrid scale convective forcing. 15th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (A. M. S). 1984, 183- 190
- 15 刘一鸣. 中国关于积云参数化方案的应用. *气象学报*, 1998, 56(2): 247~255
- 16 Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale schemes. *Mon Wea Rev.* 1989, 117: 1779- 1800
- 17 陈伯民. 修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案对中国暴雨的初步预报试验. 见: 85- 906 课题组编, 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 23~31

- 18 陈伯民等. 修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案的预报试验. 高原气象, 1996, 15(1): 37 ~ 47
- 19 Giorgi F, et al. Development of a Second-Generation Regional Climate Model ( RegCM2 ). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes, Mon Wea Rev, 1993, 121: 2794- 2813
- 20 Giorgi F, et al. Development of a Second-Generation Regional Climate Model ( RegCM2 ). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2814- 2832
- 21 刘永强, 丁一汇. 区域气候模拟研究. 应用气象学报, 1995, 6(2): 228 ~ 239
- 22 刘永强, 丁一汇. 1991 年江淮特大异常降水的区域气候模拟, 见: 赵宗慈主编. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996. 106 ~ 120
- 23 赵宗慈, 罗勇等. 东亚夏季风的模拟研究——3 个区域气候模式的对比. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 116 ~ 123
- 24 罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM 2 对东亚区域气候的模拟试验. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 124 ~ 133
- 25 Liu Yongqiang, Filippo Giorgi, Warren M, et al. Simulation of summer monsoon climate over East Asia with an NCAR regional climate model. Mon Wea Rev, 1994, 122: 2331- 2348
- 26 Giorgi F. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations. Mon Wea Rev, 1991, 119, 2870- 2888
- 27 Giorgi F, Marinucci M R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions, Quart J Roy Meteor Soc, 1991, 117: 1171- 1206
- 28 丁一汇, 张晶, 赵宗慈. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究, 第二部分: 陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟试验. 气象学报, 1998, 56(1): 385 ~ 400
- 29 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 255pp

# MODIFIED MASS FLUX CUMULUS PARAMETERIZATION SCHEME AND ITS SIMULATION EXPERIMENT PART I: MASS FLUX SCHEME AND ITS SIMULATION OF THE FLOODING IN 1991

Liu Yiming Ding Yihui

(*National Climate Center, Beijing, 100081*)

## Abstract

Based on the existing cumulus parameterization schemes, a Mass Flux Scheme for cumulus convective parameterization, i. e. MFS, has been successfully developed by referenced the work of Chen Bomin. MFS is a comprehensive scheme. In MFS, not only the importance of the large-scale moisture convergence is taken into account, but also it includes the cumulus updrafts, cumulus downdrafts, cumulus induced subsidence in the environmental air, entrainment, detrainment and evaporation. The interaction between the cumulus and the environment is described by using a one-dimensional bulk model. At the same time the scheme includes the penetrative and shallow convection.

The MFS has been successfully imported into the regional climate model RegCM2 developed by NCAR. The new model has been applied to simulate summer monsoon characteristics and their variations of heavy rainfall process in the Changjiang-Huaihe River Basin for three months from May to July 1991. The results show that the new model can successfully simulate this rainfall process. By comparison the model outputs of RegCM2 using the Kuo scheme and the MFS, it is found that the MFS is better in the surface temperature, rainfall area, rainfall period of time and the intermission simulation.

**Key words:** Cumulus convection, Mass flux scheme, Regional climate model.