

# 修正的质量通量积云对流方案及其模拟试验研究\* : 三种积云方案的积云对流活动及 MFS 方案相关参数的敏感性试验

刘一鸣 丁汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

作者在“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”论文中提出的质量通量方案成功地植入区域气候模式 RegCM2 的基础上, 对比分析质量通量方案 MFS, Kuo 方案和 Grell 方案对积云对流活动的模拟, 结果表明质量通量方案较好地模拟了积云对流活动过程。针对质量通量方案中的一些参数, 如云水向雨水的转换率、混合卷入率、混合卷出率和下沉气流的强度等进行了一系列的敏感性试验, 试验结果表明积云对流活动对这些参数比较敏感, 因此提高这些参数的准确性是改进积云对流参数化方案的重要内容之一。

关键词: 质量通量方案, 积云对流活动, 敏感性试验。

## 1 引 言

积云对流过程是大气运动的一个基本组成部分, 一系列观测和理论研究表明, 积云对流的潜热释放和云中的热量、水汽和动量垂直输送可以显著地改变大尺度环流。积云对于长、短波辐射的影响, 还可以在大气辐射平衡中产生重要作用。因此积云对流参数化问题是气象学家们长期以来所致力解决的一个复杂而又重要的物理过程。由于积云对流活动直接影响大气能量、质量的输送和分布以及降水过程, 所以这一物理过程描写得是否准确, 直接影响模式的模拟和预报质量。许多研究工作证实积云对流参数化是数值模式中不可缺少的非绝热加热物理过程, 它不但对大尺度环流的模拟和预报起重要作用, 而且直接影响着降水, 尤其是强降水的模拟和预报。

文献[1]较为详细地介绍了各类积云参数化方案。积云对流参数化在近30 a 来已经取得了明显的进展<sup>[2,3]</sup>, 国内外学者提出了很多种方案, 并进行了大量的研究和对比试验, 这说明我们对积云对流活动的认识加深了。

目前, 美国 NCA R 发展起来的第二代区域气候模式 RegCM2<sup>[4,5]</sup>中, 积云对流过程可以有两种选择, 一个是 Kuo 方案<sup>[6,7]</sup>, 另一个是 Grell 方案<sup>[8]</sup>。在文献[1]中, 主要参考陈伯

民等的工作,提出了一个质量通量方案(MFS),将其植入区域气候模式 RegCM 2中,成功地积分了3个月;并与 RegCM 2采用 Kuo 方案运行的结果进行了对比。在此基础上,RegCM 2采用 Grell 方案也对1991年5~7月江淮特大降水过程进行了模拟,文中将对 RegCM 2分别采用 Kuo 方案、Grell 方案和 MFS 方案模拟的积云对流过程有关要素进行对比分析;然后针对质量通量方案 MFS 中的一些参数,如云水向雨水的转换率、混合卷入率和混合卷出率和下沉气流的强度等进行了一系列的敏感性试验,最后给出结论。

## 2 三种积云对流参数化方案描述的积云对流活动

积云是在大、中尺度环境条件的制约下发生发展的,它们发生以后又通过其感热、潜热、水汽和动量的垂直输送等反馈作用影响大尺度环境,并在决定大气温度的湿度场的垂直结构中起着关键的作用。

### 2.1 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的比较分析

从热力学方程和水汽方程出发,可以得出视热源和视水汽汇的方程如下:

$$Q_1 = Q_R + L(\bar{c} - \bar{e}) - \frac{1}{p}(s - \bar{s}) \quad (1)$$

$$Q_2 = L(\bar{c} - \bar{e}) + L \frac{1}{p}(q - \bar{q}) \quad (2)$$

$Q_1$ 和 $Q_2$ 分别称作视热源和视水汽汇。在较强降水的情况下, $Q_R$ 是一个相对的小量,在此略去不计<sup>[9]</sup>。积云参数化的目的就是用模式预报的变量计算出方程(1)和(2)的右边项。

1991年江淮地区的梅雨由3场降雨组成,第1场降雨从5月18日到5月26日,第2场降雨从6月2日到6月19日,第3场降雨从6月30日到7月13日。第1场降水可称为早黄梅,第2、3场降水是典型梅雨。图1、2和3是 RegCM 2分别采用 Kuo 方案、Grell 方案和 MFS 方案模拟的1991年5~7月这3场梅雨过程中平均的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 垂直分布廓线。比较3种方案模拟的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的垂直分布廓线可以发现,Kuo 方案模拟的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的垂直分布廓线在这3场梅雨过程中十分相似;Kuo 方案模拟的 $Q_1$ 呈现为抛物线状,最大加热在300 hPa 附近,在前两场梅雨中量值约为3.4 K/d,在第3场梅雨中量值约为2.5 K/d,最大加热值略有降低;Kuo 方案模拟的 $Q_2$ 使得水汽的分布趋向于在垂直方向上相对湿度近似为常数。需要说明的是 Kuo 方案模拟的 $Q_2$ 包括了大尺度水汽辐合项,而 Grell 方案和 MFS 方案模拟的 $Q_2$ 仅仅是积云对流过程。

Grell 方案模拟的 $Q_1$ 的峰值出现在400 hPa 附近, $Q_2$ 的峰值出现在500 hPa 附近, $Q_1$ 和 $Q_2$ 的峰值在3场梅雨降水过程中高度基本没有变化,在强度上有所变化。 $Q_1$ 在第3场梅雨中量值最大,有20 K/d,其次是第1场梅雨,有15 K/d,在第2场梅雨中有13 K/d; $Q_2$ 在第3场梅雨中量值最大,有12 K/d,其次是第1场梅雨,有9 K/d,在第2场梅雨中有7 K/d。从量值上分析,Grell 方案模拟的3次梅雨过程以第3场梅雨的积云对流活动最强,其次是第1场,第2场的对流活动最弱。Grell 方案模拟的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 垂直分布廓线在850 hPa 以下表现为积云对流加热较小、对流减湿较大。这和诊断分析研究<sup>[10]</sup>不太一致。

MFS 方案模拟的 $Q_1$ 的峰值在前两场梅雨中出现在500 hPa 附近,量值分别为5.5 K/d和6.5 K/d,在第3场梅雨中则上升到400 hPa 附近,并且达到9 K/d。MFS 方案模

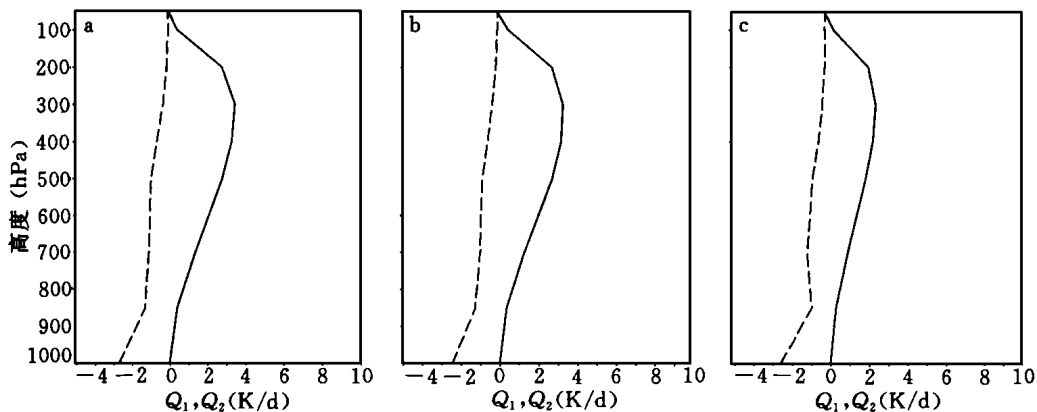


图1 Kuo 方案模拟的3场梅雨降水过程的  $Q_1$ (实线) 和  $Q_2$ (虚线)

(a. 第1场梅雨, b. 第2场梅雨, c. 第3场梅雨; 单位: K/d)

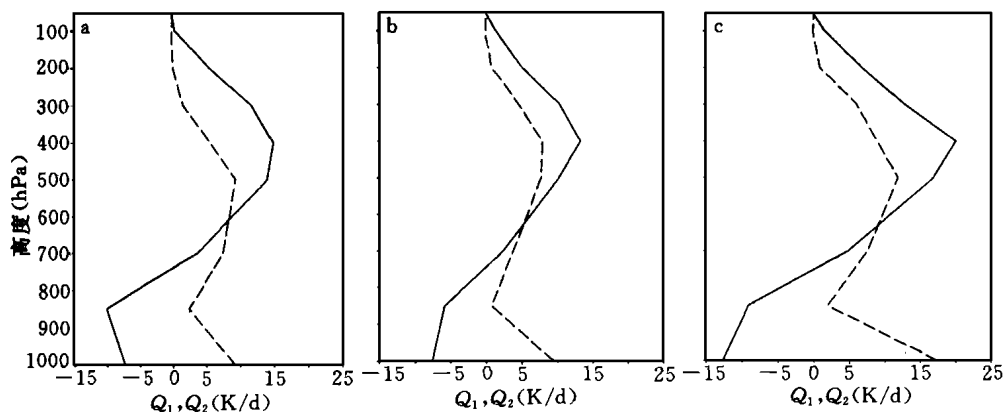


图2 Grell 方案模拟的3场梅雨过程的  $Q_1$ (实线) 和  $Q_2$ (虚线)

(a. 第1场梅雨, b. 第2场梅雨, c. 第3场梅雨; 单位: K/d)

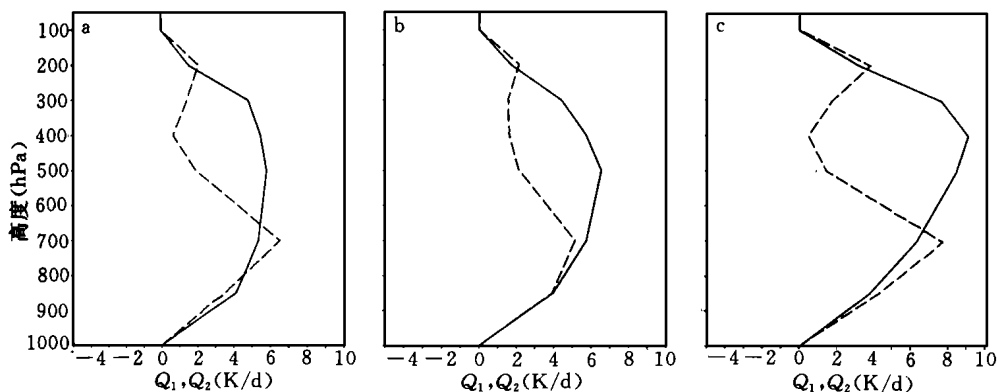


图3 MFS 方案模拟的3场梅雨降水过程的  $Q_1$ (实线) 和  $Q_2$ (虚线)

(a. 第1场梅雨, b. 第2场梅雨, c. 第3场梅雨; 单位: K/d)

拟的  $Q_2$  的主峰值出现在 700 hPa 附近, 在 3 场梅雨降水过程中高度基本没有变化, 但在强度上略有变化。  $Q_2$  的主峰值在第 3 场梅雨中量值最大, 约为 7.5 K/d, 其次是第 1 场梅雨, 约为 6.5 K/d, 在第 2 场梅雨中约为 5 K/d。 对比分析可以看出在第 3 场梅雨过程中, MFS 方案模拟的积云对流活动最强, 这和诊断分析结果<sup>[10]</sup> 较为一致。(出现在 200 hPa 附近的次峰值有待于进一步的分析。)

MFS 方案模拟的大气加热 ( $Q_1$ ) 的峰值主要位于大气高层, 而  $Q_2$  的主峰值位于大气中低层, 并且两者强度和高度的配置表现为 3 次降水的积云对流逐步加强, 这和陆尔等<sup>[10]</sup> 的分析是一致的, 也比 Grell 方案模拟的  $Q_1$  和  $Q_2$  更接近诊断分析。

图 4、5 和 6 分别是 RegCM2 采用 Kuo 方案、Grell 方案和 MFS 方案模拟的 1991 年 5 ~ 7 月江淮地区  $Q_1$  和  $Q_2$  的高度-时间剖面图。从  $Q_1$  的逐日演变看, 3 种方案模拟的大气加热  $Q_1$  清楚地表现出以低频振荡形式出现的 5 个高值时段, 其中第一时段对应于 5 月上旬的江淮春雨, Kuo 方案模拟的加热中心位于 500 hPa 附近 (4.5 K/d), Grell 方案模拟的在 400 ~ 500 hPa 之间有加热中心 (5 K/d), MFS 方案模拟的加热中心在 700 ~ 800 hPa 附近 (4 K/d)。梅雨期的 3 个加热时段分别对应着 3 场暴雨。Kuo 方案模拟的大气加热中心的高度在 300 ~ 400 hPa, 量值分别为 5 K/d, 4.5 K/d 和 4.5 K/d, 以第 1 场暴雨的大气加热为最强。从 Grell 方案模拟的大气加热逐日演变来看, 虽然从 750 hPa 开始就有加热发生, 但主要的加热过程出现在大气中高层, 并且加热量值均较大, 3 场暴雨的最大加热分别达到 20 K/d, 15 K/d 和 20 K/d, 且都位于 400 hPa 附近。在 3 场暴雨期间, 800 hPa 以下为大气减热, 量值达到 10 K/d。从 MFS 方案模拟的大气加热逐日演变来看, 前两场暴雨的加热特点基本相似, 加热中心位于 500 hPa 附近, 最大加热分别为 6 K/d 和 8 K/d。在第 3 场暴雨期间, 加热中心上升到 400 hPa 附近, 最大加热为 8 K/d。3 场暴雨的加热是逐渐加强的。

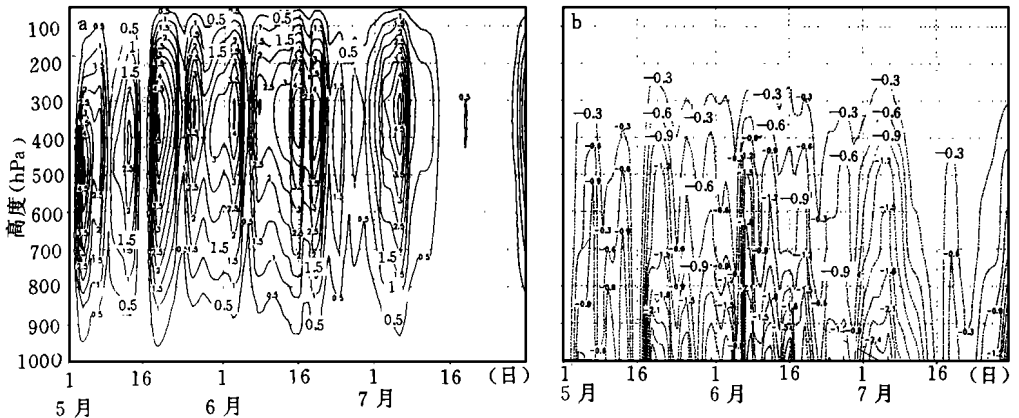


图 4 Kuo 方案模拟的 1991 年 5 ~ 7 月江淮地区 (a)  $Q_1$  和 (b)  $Q_2$  的高度-时间剖面 (单位: K/d)

从  $Q_2$  的逐日演变来看, Kuo 方案模拟的  $Q_2$  在整层都为负值, 因为包括了大尺度水汽辐合项。在梅雨期的 3 场暴雨时段, Grell 方案和 MFS 方案同样相应地模拟出 3 个减湿高值时段, Grell 方案模拟的减湿中心强度分别达 10 K/d, 10 K/d 和 14 K/d, 基本出现在 500 hPa 附近; MFS 方案模拟的减湿中心强度分别达 4 K/d, 6 K/d 和 6 K/d, 并且都出现在 700 hPa 附近。Grell 方案模拟的大气减湿在 800 hPa 以下偏大, 近地面达到 12 ~ 14 K/d,

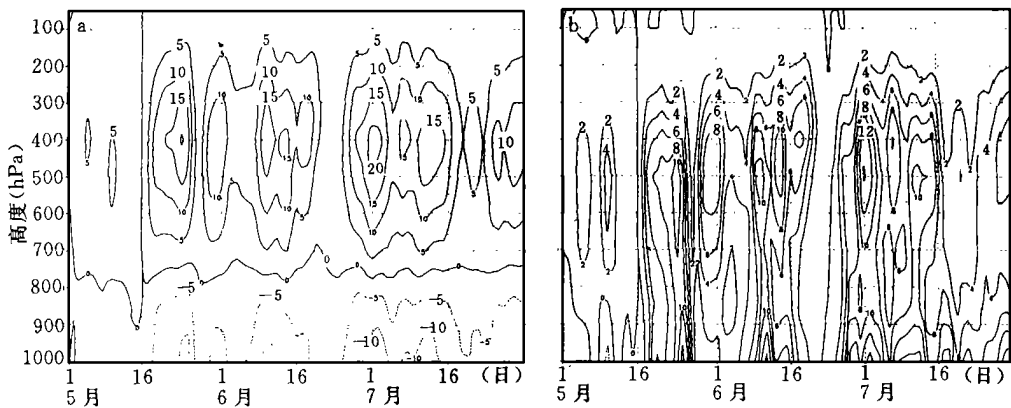


图5 Grell 方案模拟的1991年5~7月江淮地区  $Q_1$ (a) 和  $Q_2$ (b) 的高度-时间剖面(单位: K/d)

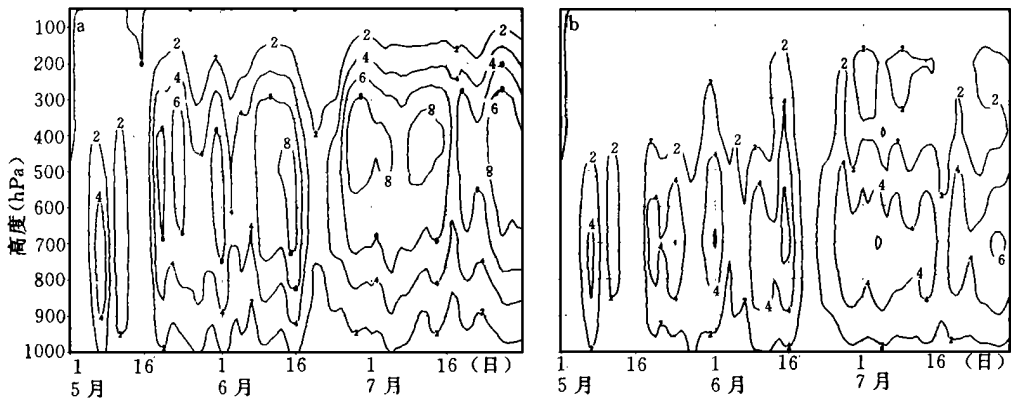


图6 MFS 方案模拟的1991年5~7月江淮地区  $Q_1$ (a) 和  $Q_2$ (b) 的高度-时间剖面(单位: K/d)

这和一些诊断分析<sup>[10]</sup>不太一致。

从上述对比分析来看, 质量通量方案比较好地模拟了积云对流过程。

### 2.2 MFS 方案模拟的对流上升、下沉质量通量

图7是 MFS 方案模拟的1991年5~7月江淮地区对流上升质量通量和对流上升(下沉)质量通量的高度-时间剖面图。从图中可以看出, 对流上升质量通量和对流下沉质量通量随时间均以低频振荡的形式出现, 分别对应于江淮春雨和3场暴雨过程。MFS 方案模拟的对流上升质量通量在春雨时段为2 hPa/h, 中心高度在700 hPa 附近; 在3场暴雨期间, 对流上升质量通量强度分别达到6 hPa/h, 7 hPa/h 和8 hPa/h, 中心高度分别位于500 hPa, 400 hPa 和400 hPa 附近; 由此可见, 积云对流活动是依次逐渐增强的, 从江淮春雨进入到江淮梅雨, 积云活动明显增强, 这表明入梅前后积云活动显著不同。MFS 方案模拟的对流下沉质量通量在江淮春雨时段为0.4 hPa/h, 中心高度在750 hPa 附近; 在3场暴雨期间, 对流下沉质量通量强度分别达到0.5 hPa/h, 0.5 hPa/h 和0.5 hPa/h, 中心高度分别位于700 hPa, 600 hPa 和700 hPa。由此可见, MFS 方案模拟的对流下沉质量通量随时间稍有变化, 从春雨到第2场暴雨, 对流下沉质量通量的中心强度略有增加, 主中心的高度也

依次稍有上升。

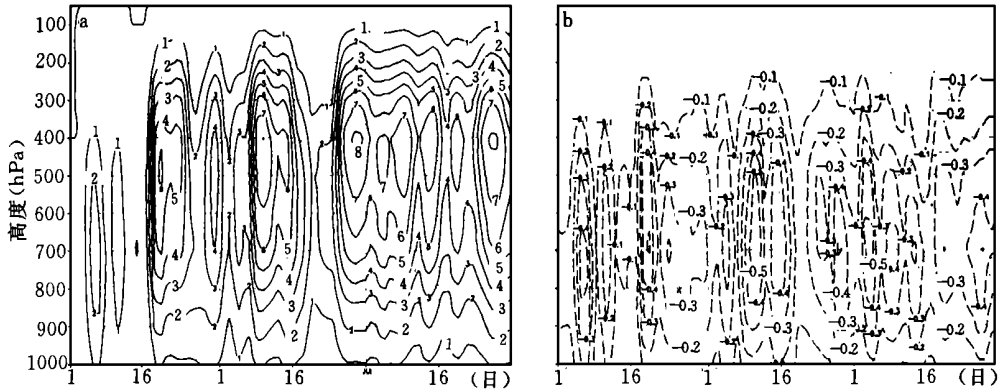


图7 MFS 方案模拟的1991年5~7月江淮地区质量通量的高度-时间剖面  
(a. 对流上升, b. 对流下沉. 单位: hPa/h)

### 3 敏感性试验

在很多物理过程的参数化处理中,经常会有由于引入参数的不确定性而带来一些问题,为此通常会对这些参数进行敏感性试验。在质量通量积云对流参数化方案(MFS 方案)中,也有类似问题,为此对它们做了一系列的敏感性试验。

在 MFS 方案中,考虑了下列参数:云水向雨水的转换系数  $K(z)$ 、上升气流和下沉气流中的混合卷入参数和混合卷出参数( $u_s, u_d, d_s, d_d$ ),下沉气流的强度。这些参数的选定都有一定的不确定性,要对其进行敏感性试验,每次只改动一个参数,积分一个月,即1991年5月1~31日,以文献[1]的模拟作为控制试验,以便比较。表1列出了敏感性试验的内容。下面将对其试验结果作进一步的比较与分析。

表1 控制试验和敏感性试验的参数选择

参数(单位)	控制试验	试验1	试验2	试验3	试验4
$K(z) (s^{-1})$	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$			
$u_s, u_d$ (深) ( $hPa^{-1}$ )	$7.9 \times 10^{-4}$		$15.8 \times 10^{-4}$		
$u_s, u_d$ (浅) ( $hPa^{-1}$ )	$23.7 \times 10^{-4}$		$47.4 \times 10^{-4}$		
$u_s, u_d$ ( $hPa^{-1}$ )	$15.8 \times 10^{-4}$		$31.6 \times 10^{-4}$		
	-0.3			0.0	-0.5

敏感性试验1是考虑云水向雨水的转换系数  $K(z)$ ,它是经验函数,随高度而变。在控制试验中,当  $z > z_{B+1500} m$  时,  $K(z) = 1 \times 10^{-3} s^{-1}$ 。在敏感性试验1中,考虑将其增加到  $2 \times 10^{-3} s^{-1}$ ,以检验其对模拟积云活动的影响。图8给出了增加云水向雨水的转换率对积云对流活动过程的影响。从垂直廓线图中可以看出,积云对流加热在整层都有增加,最大增加在300 hPa 和500 hPa,达到0.62 K/d。积云对流减湿除了在400~550 hPa 之间比控制试验的要小(在500 hPa 高度上,积云减湿作用减小了0.2 K/d)以外,在其它层次比控制试验有不同程度的增加,最大增加为0.76 K/d,位于700 hPa 高度。

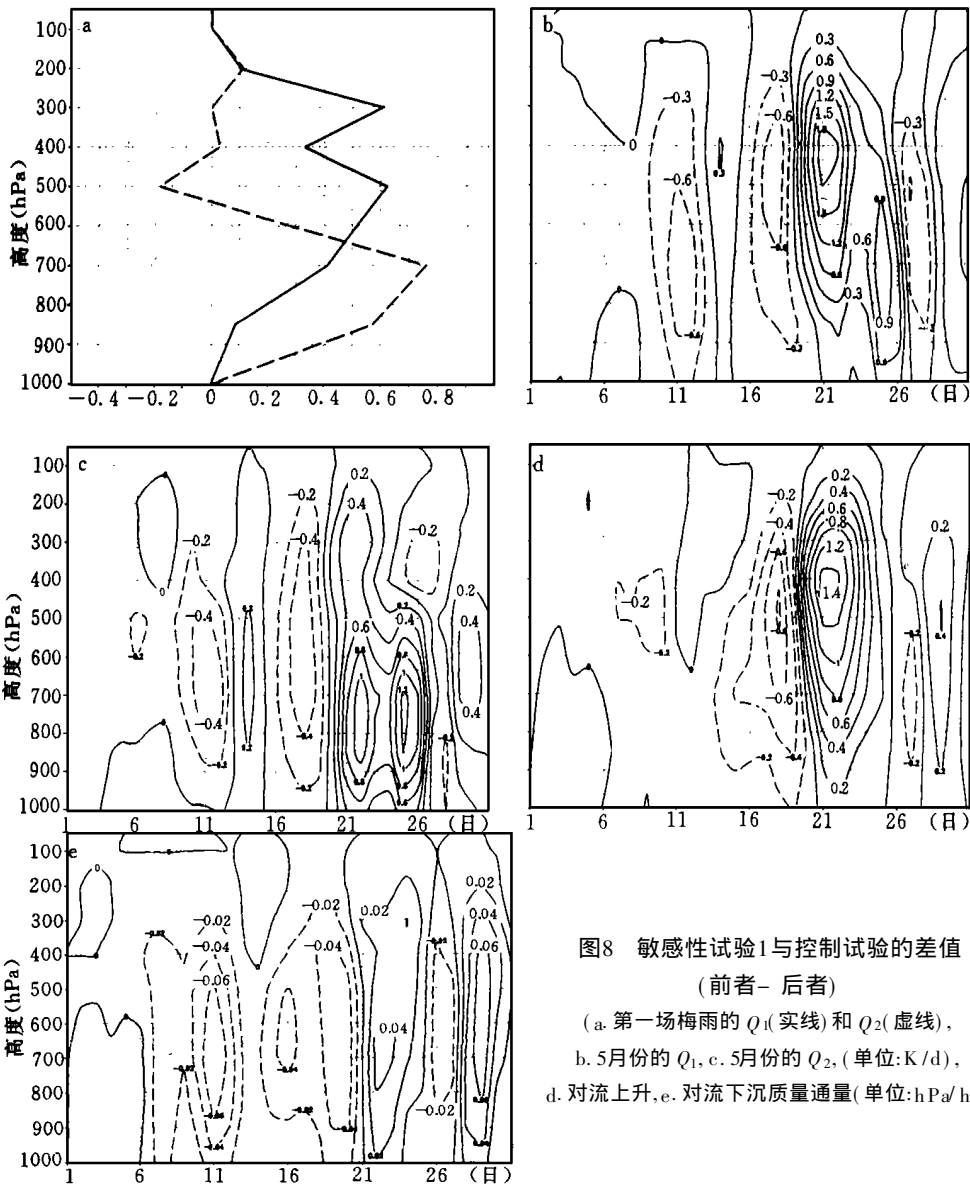


图8 敏感性试验1与控制试验的差值  
(前者-后者)

- (a. 第一场梅雨的  $Q_1$ (实线)和  $Q_2$ (虚线),
- b. 5月份的  $Q_1$ , c. 5月份的  $Q_2$ , (单位:K/d),
- d. 对流上升, e. 对流下沉质量通量(单位:hPa/h)

从时间演变图来看,在第1场暴雨之前,大气加热、减湿作用都比控制试验略小;在第1场暴雨期间,整层大气加热作用比控制试验都大,最大增加值为1.8 K/d,位于400 hPa附近;整层大气减湿作用比控制试验模拟的均有所加强,在700~800 hPa之间增加了1.2 K/d,主要增加集中在500 hPa以下。大气加热、减湿作用随时间的变化同步的。模拟的对流上升质量通量在5月20日之前比控制试验模拟的要小,但在第1场暴雨中,整层大气的积云上升都比控制试验的要大,在400 hPa附近大1.4 hPa/h。模拟的对流下沉质量通量在21日之前比控制试验的弱,在21~25日有所加强。积云上升和下沉质量通量的变化随时间是同步的。该敏感性试验表明,增加云水向雨水的转换系数,使得积云加热作用整层增强,主要在对流层上层加强,积云减湿作用主要在对流层下半部增强;对流上升质量通量和对流下

沉质量通量整层加强, 上升气流加强的更明显。

敏感性试验2是检验上升气流和下沉气流的混合卷入参数和卷出参数对积云活动的影响。在MFS方案中, 假设上升气流中的混合卷入参数等于混合卷出参数, 根据深、浅对流积云半径的不同, 设定为不同的常数。下沉气流中的混合卷入参数等于混合卷出参数, 并且假设随高度不变, 也为一个常数。混合卷入参数和混合卷出参数的变化范围较小, 在敏感性试验中, 调整上述混合卷入参数和混合卷出参数, 使其为控制试验中相应参数的两倍。图9给出了增加上升、下沉气流的混合卷入参数和卷出参数对积云对流活动过程的影响。从垂直廓线图中可以看出, 整层大气的加热作用均减弱, 最大减弱出现在500 hPa, 为 $-0.56 \text{ K/d}$ ; 积云减湿作用在220 hPa以上和360~800 hPa之间均比控制试验模拟的要强, 最大加强出现在700 hPa, 达到 $0.29 \text{ K/d}$ ; 在220~360 hPa之间以及800 hPa以下, 积云减湿作用均比控制试验模拟的偏小, 最明显的减小值( $0.3 \text{ K/d}$ )位于300 hPa高度。

从逐日演变图来看, 在5月17~23日, 积云对流加热作用整层减弱, 在300~400 hPa之间减弱了 $0.8 \text{ K/d}$ , 积云减湿作用整层减弱, 在700 hPa附近减弱了 $0.8 \text{ K/d}$ ; 在23~27日, 积云对流加热和减湿作用均加强, 主要集中在对流层下半部分, 分别在800~900 hPa, 700 hPa附近增加了 $0.6 \text{ K/d}$ ,  $1.4 \text{ K/d}$ 。积云对流加热和减湿作用的偏差随时间的变化是同步的。积云上升质量通量在第1场暴雨期间整层减小, 最大减小位于400 hPa附近, 达到 $1 \text{ hPa/h}$ ; 而积云下沉质量通量总体上在第1场暴雨期间略有减小。该敏感性试验表明, 当积云对流上升气流和下沉气流中的混合卷入参数和混合卷出参数增加时, 对流加热作用在暴雨期间平均效果是减弱了, 积云减湿作用比较复杂, 就平均效益而言, 在对流层下半部以加强为主, 在对流层上半部以减弱为主。对流上升质量通量整层减弱, 对流下沉质量通量整层略有减弱, 这使得模拟的积云活动总体效果是比控制试验模拟的减弱了。

在质量通量方案中,  $\beta$ 是决定积云下沉气流强度的重要参数。在控制试验中, 该参数为 $-0.3$ 。针对该参数, 我们做了两个敏感性试验, 试验3是假设没有下沉气流( $\beta = 0$ ), 试验4是增加下沉气流的强度, 假设 $\beta = -0.5$ 。

当模拟的积云对流中没有下沉气流时(图10), 在350 hPa以下, 对流加热和减湿作用都有所加强, 加热作用增加最明显的是在700 hPa附近, 达到 $0.32 \text{ K/d}$ ; 在350 hPa以上, 对流加热和减湿作用都有所减弱。从5月13到21日, 在对流层中部, 积云加热作用明显加强, 在400~500 hPa附近, 达到 $0.8 \text{ K/d}$ ; 随后3 d中积云加热作用减弱, 主要在500 hPa以上, 减弱程度有 $0.6 \text{ K/d}$ ; 接着的3 d中, 积云加热作用又加强, 主要在对流层下半部, 在700~900 hPa, 达到 $0.8 \text{ K/d}$ 。而对流减湿作用在5月23日之前, 在对流层上半部加强(在400 hPa附近, 达到 $0.6 \text{ K/d}$ ), 在对流层下半部减弱(在850 hPa附近, 达到 $0.4 \text{ K/d}$ ); 在23~28日, 积云减湿作用在对流层下半部增强, 在650~850 hPa, 增强了 $0.6 \text{ K/d}$ 。积云对流加热和减湿作用对控制试验的偏差随时间的变化是同步的。从积云上升质量通量的高度-时间剖面图来看, 在23日之前, 上升气流整层有所减弱, 在650~850 hPa, 减弱了 $0.6 \text{ hPa/h}$ ; 23日之后, 上升气流整层略有加强, 在700 hPa, 加强了 $0.4 \text{ hPa/h}$ 。该敏感性试验表明, 在质量通量积云对流参数化方案中不包括下沉气流时, 积云加热、减湿作用随时间时而加强, 时而减弱, 并且高度有所变化, 但对第1场暴雨的平均效果而言, 在对流层中下层以加强为主, 在对流层上层以减弱为主; 而积云对流上升质量通量先减弱, 后加强。



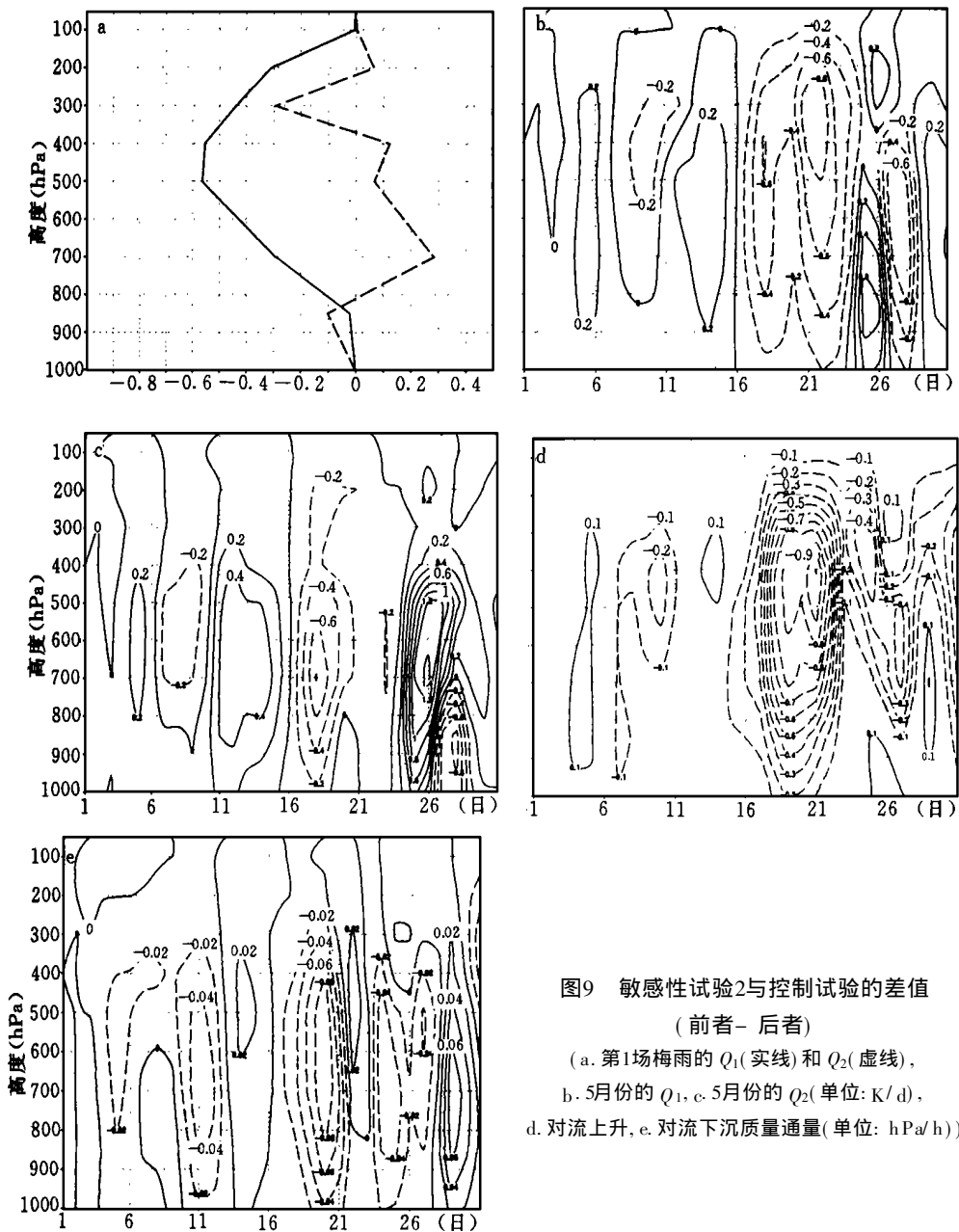


图9 敏感性试验2与控制试验的差值

(前者-后者)

(a. 第1场梅雨的  $Q_1$ (实线)和  $Q_2$ (虚线),

b. 5月份的  $Q_1$ , c. 5月份的  $Q_2$ (单位:  $K/d$ ),

d. 对流上升, e. 对流下沉质量通量(单位:  $hPa/h$ )

当下沉气流强度增强时,从其和控制试验模拟的差值图(图11)来看,在850 hPa以下,对流加热和减湿均略有减弱;在850 hPa以上,对流加热和减湿均加强,分别在300 hPa, 700 hPa附近增加了0.48 K/d, 0.76 K/d。从其高度-时间剖面图来看,在第1场暴雨期间,积云对流加热和减湿作用在整层以加强为主,积云加热作用的加强主要集中在对流层上半部,在300~450 hPa增加了1.5 K/d;积云减湿作用的加强主要在对流层的中下层,在600~750 hPa,增加了1.2 K/d。两者的偏差随时间的变化是同步的。

从积云对流上升质量通量的高度-时间剖面图来看,在13~20日,上升质量通量在对

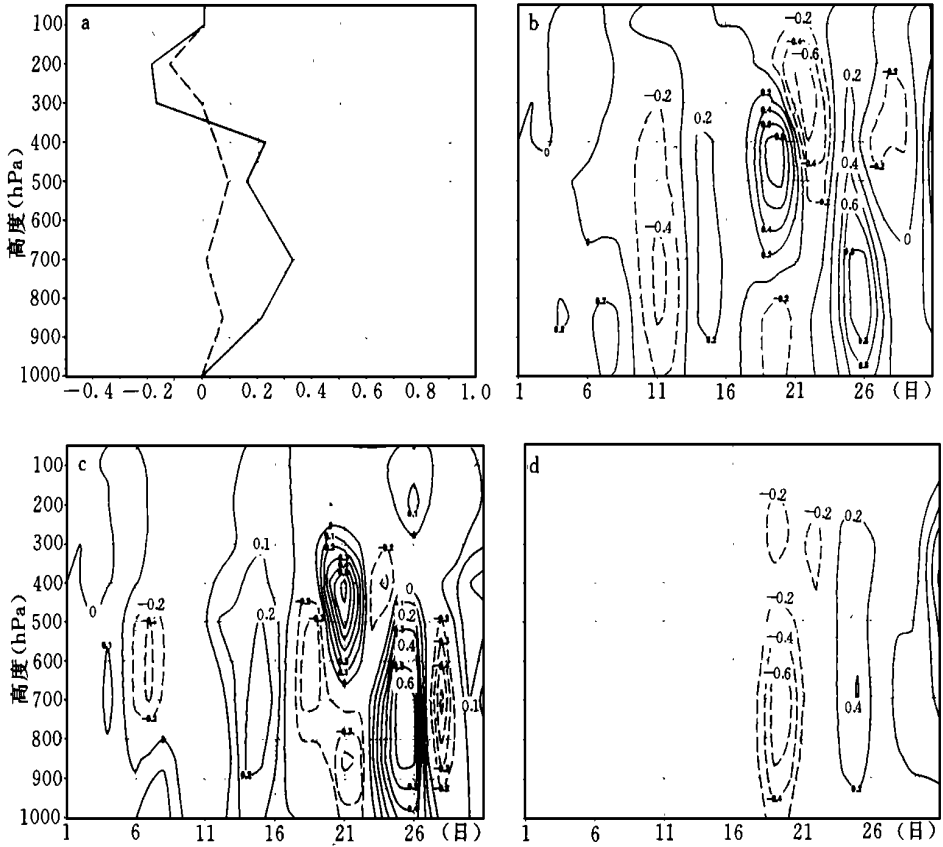


图10 敏感性试验3与控制试验的差值(前者-后者)

(a. 第1场梅雨的  $Q_1$ (实线)和  $Q_2$ (虚线), b. 5月份的  $Q_1$ ,

c. 5月份的  $Q_2$ (单位: K/d), d. 对流上升质量通量(单位: hPa/h)

流层下半层减弱 ( $-0.2$  hPa/h); 20~22日, 上升质量通量整层加强, 最大加强在800~900 hPa; 22~25日, 上升质量通量在对流层上层明显减弱, 在400 hPa附近减弱了0.6 hPa/h。而对流下沉质量通量在5月整层加强, 主要集中在700 hPa附近, 春雨期间加强了0.24 hPa/h, 第1场暴雨期间加强了0.21 hPa/h。该敏感性试验表明, 当积云下沉气流加强时, 积云对流加热和减湿作用总体上是加强的, 加热作用在对流层中上层加强, 减湿作用在对流层中下层加强。积云上升质量通量的加强和减弱呈振荡形式出现, 积云下沉质量通量在5月整层加强。

质量通量方案综合考虑了深对流和浅对流, 为此又做了一个敏感性试验5, 即不包括浅对流, 仅仅考虑深对流。从图12可以看出不考虑浅对流作用, 对流加热的平均效果是整层减弱了, 在400 hPa和700 hPa都减弱了0.55 K/d; 对流减湿作用的平均效果是在780 hPa以下增加了, 最大增加位于850 hPa, 增加幅度达到0.52 K/d; 在780 hPa以上是减弱的, 最大减弱为0.55 K/d, 位于300 hPa和700 hPa。

从逐日演变图来看, 对应于江淮春雨时段, 对流加热和减湿作用同步减弱了, 减弱的幅度达到1.5 K/d和1.2 K/d, 主要位于对流层中下层, 中心高度在500~800 hPa。在第1

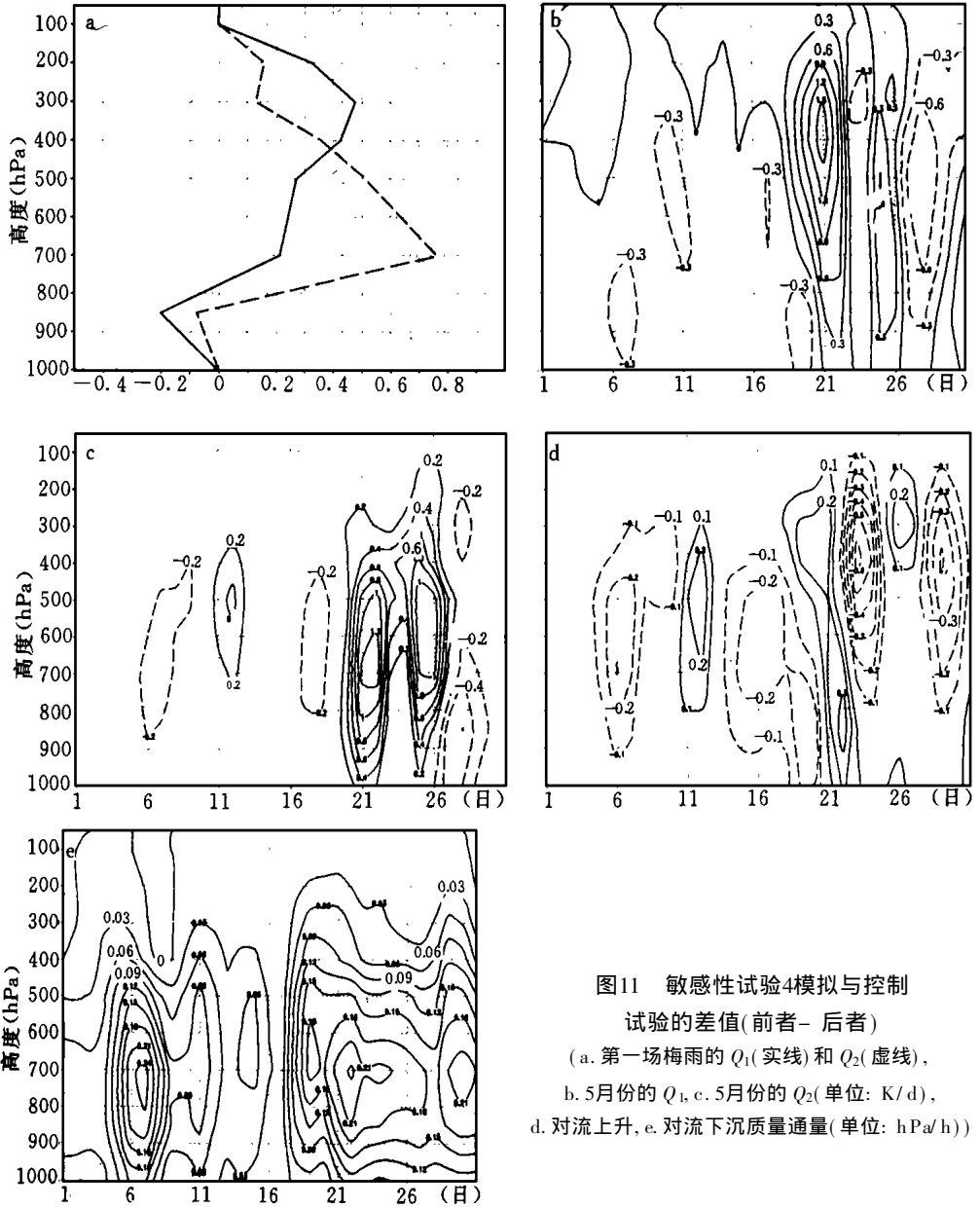


图11 敏感性试验4模拟与控制

试验的差值(前者-后者)

- (a. 第一场梅雨的  $Q_1$ (实线)和  $Q_2$ (虚线),
- b. 5月份的  $Q_1$ , c. 5月份的  $Q_2$ (单位: K/d),
- d. 对流上升, e. 对流下沉质量通量(单位: hPa/h)

梅雨期间, 对流加热作用相对于控制试验的偏差随时间的变化以减弱为主。17~20日, 对流加热作用在中低层减弱, 减弱幅度达到1.0 K/d; 20~24日, 对流加热作用在对流层上层有相同程度的减弱; 25~26日, 整层大气的对流加热作用有小幅度的增强(在对流层下半层达0.5 K/d); 随后是对流层中上层减弱(1.0 K/d)。对流减湿作用在江淮春雨时段有明显的减弱, 在500~800 hPa 减弱了1.2 K/d。对于第1场暴雨过程, 在17~24日, 积云减湿作用在中下层减弱, 最大减弱幅度达到0.9 K/d; 随后在24~27日, 积云减湿作用在中下层有明显的大幅度的加强, 最大加强为1.5 K/d, 主要在700~850 hPa 高度。从其偏差的高度-时间剖面图来看, 对流加热和减湿作用相对于控制试验的强弱变化是同步的。

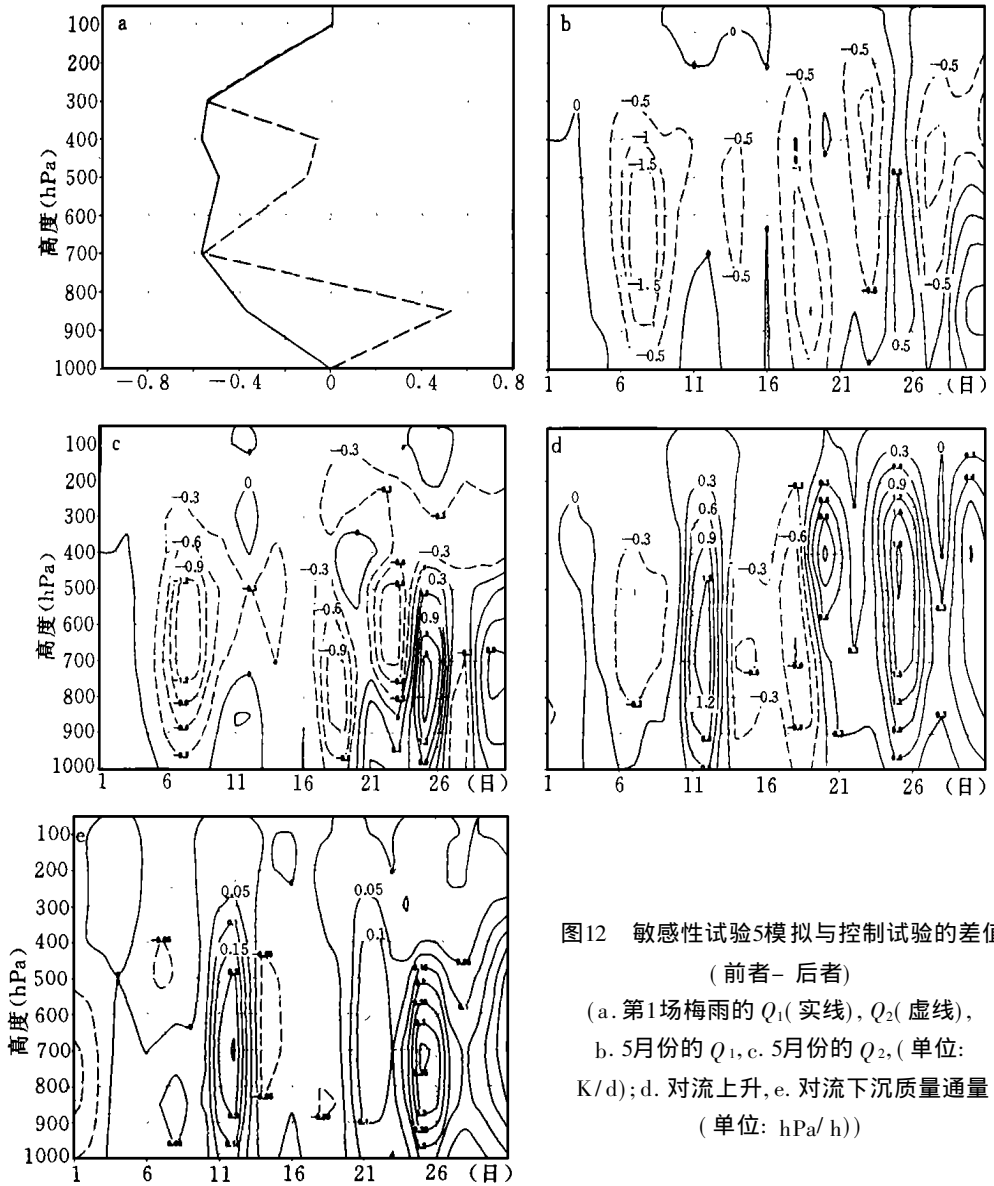


图12 敏感性试验5模拟与控制试验的差值

(前者-后者)

(a. 第1场梅雨的  $Q_1$  (实线),  $Q_2$  (虚线),

b. 5月份的  $Q_1$ , c. 5月份的  $Q_2$ , (单位:

K/d); d. 对流上升, e. 对流下沉质量通量

(单位: hPa/h)

从对流上升质量通量和下沉质量通量的逐日演变图来看, 它们是同时加强和减弱的, 只是上升气流的变化程度远大于下沉气流的变化程度。上升气流在10~13日增强了1.2 hPa/h, 主要位于500~800 hPa, 随后在14~20日又减弱了1.2 hPa/h, 主要在700 hPa; 在5月20日以后, 上升气流主要在对流层中上层加强, 主中心在400 hPa附近, 加强程度达到1.8 hPa/h。对流下沉气流在上升气流减弱的同时也有所减弱, 只是减弱程度很小; 在上升气流加强的同时也加强, 下沉气流的加强主要位于对流层下层(700 hPa), 在春雨和第1场暴雨时段的加强分别达到0.25 hPa/h, 0.35 hPa/h。该敏感性试验表明, 当模式中不考虑浅对流时, 积云活动有很大的改变, 积云对流加热和减湿作用总体上以减弱为主, 而对流上升和下沉质量通量以加强为主, 因为这时的质量通量仅仅是深对流的质量

通量。此外,不考虑浅对流所带来的差值变化的数值大小都大于前面所提到的4个敏感性试验的差值变化,这表明是否考虑浅对流对模拟有较大的影响。

## 4 结 论

文中分别使用 Kuo 方案、Grell 方案和质量通量方案对1991年5~7月中国夏季江淮地区强降水过程进行了模拟,对积云对流活动进行了比较和分析,并针对质量通量方案中的一些参数进行了一系列的敏感性试验,主要结论如下:

1. 质量通量方案模拟的1991年夏季江淮地区5~7月期间3场梅雨降水过程中平均的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 垂直分布廓线较好地反映了3场暴雨过程中积云对流加热和减湿作用,加热作用主要在400~500 hPa 层次上,减湿作用主要集中在700 hPa 附近,并且积云对流活动是依次增强的;模拟的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 在5~7月的逐日演变图也较好地反映了积云对流加热和减湿作用随时间的演变,与3场暴雨过程有很好的对应关系,和已有的诊断分析较为一致。

2. 质量通量方案模拟的对流上升质量通量和对流下沉质量通量随时间均以低频振荡的形式出现,分别对应于江淮春雨和3场暴雨过程,并且对流上升、下沉气流随时间依次增强,与实况的暴雨过程相一致。

3. 增加云水向雨水的转换系数,使得积云加热作用整层增强,主要在对流层上层加强,积云减湿作用主要在对流层下半部增强;对流上升质量通量和对流下沉质量通量整层加强,上升气流加强得更明显。

4. 当积云对流上升气流和下沉气流中的混合卷入参数和混合卷出参数增加时,对流加热作用在暴雨期间平均效果是减弱了,积云减湿作用比较复杂,就平均效果而言,在对流层下半部以加强为主,在对流层上半部以减弱为主。对流上升质量通量整层减弱,对流下沉质量通量整层略有减弱,这使得模拟的积云活动总体效果是比控制试验模拟的减弱了。

5. 在质量通量积云对流参数化方案中不包括下沉气流时,积云加热、减湿作用随时间时而加强,时而减弱,并且高度有所变化,但对第1场暴雨的平均效果而言,在对流层中下层以加强为主,在对流层上层以减弱为主;而积云对流上升质量通量先减弱,后加强。

6. 当积云下沉气流加强时,积云对流加热和减湿作用总体上是加强的,加热作用在对流层中上层加强,减湿作用在对流层中下层加强,这说明积云下沉气流的加强使得由上升、下沉气流组成的积云更有活力。积云上升质量通量的加强和减弱呈振荡形式出现,积云下沉质量通量在5月整层加强。

7. 不考虑浅对流所带来的有关积云对流活动要素的变化都大于前面所提到的4个敏感性试验的变化,这表明是否考虑浅对流对模拟有较大的影响。这表明上述参数对积云对流活动的模拟有一定的影响,在发展模式时需要进一步提高确定这些参数的准确性。

致谢:感谢赵宗慈、徐祥德、董敏研究员,罗勇副研究员和陈伯民博士的精心帮助。美国 NCAR 的 F. Giorgi 同意本研究使用他们的模式 RegCM 2,沈文海为运行模式提供了许多帮助,在此,一并表示感谢。

## 参考文献

1 刘一鸣,丁一汇.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.气象

学报2001, 59(1): 10~22

- 2 陈伯民, 钱正安. 关于积云参数化问题. 高原气象, 1992, 11(2): 213~221
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. Mon Wea Rev, 1977, 105: 270~286
- 7 Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). Tech Note NCAR/TN-282+STR, 1987. 66pp
- 8 Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. Mon Wea Rev, 1993, 121: 764~787
- 9 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京: 科学出版社, 1989, 293pp
- 10 陆尔, 丁一汇. 1991年江淮特大暴雨时期热源和水汽收支的分析, 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. 196~209

## MODIFIED MASS FLUX CUMULUS PARAMETERIZATION SCHEME AND ITS SIMULATION EXPERIMENT PART : CUMULUS CONVECTION OF THE SCHEMES AND THE SENSITIVITY EXPERIMENTS OF MFS

Liu Yiming Ding Yihui

(National Climate Center, Beijing 100081)

### Abstract

By comparison of the simulated cumulus convection process of RegCM2 using the Kuo scheme, the Grell scheme and the MFS, it is found that the MFS can simulate the cumulus heating and moistening very well. A series of sensitivity tests shown that the disposable parameters for specifying the conversion from cloud droplets to raindrops, the turbulent entrainment and detrainment rates in updrafts and downdrafts, and the intensity of the downdrafts have different degrees of influence to the cumulus convection. Therefore it is much important for cumulus parameterization scheme to define these parameters as accurately as possible.

**Key words:** Mass flux scheme, Cumulus convection, Sensitivity experiment.