

一种改进的质量通量积云参数化方案及预报试验

薛建军 闫之辉

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

用国家气象中心有限区域业务预报模式(HLAFS),以1998年8月一次热带风暴降水过程为试验个例,对引入了下曳气流的质量通量积云对流参数化方案和模式中的原质量通量积云参数化方案(仅考虑上升气流)进行了对比试验。结果显示:引入下曳气流后,通过提高对流降水量使降雨强度预报得以提高,更接近于实况;改进后的方案对大雨以上预报水平有一定的改善,各项评分结果均有所提高。

关键词: 下曳气流 质量通量 积云参数化方案

引 言

积云对流过程对于降雨尤其是较强降雨的产生起着十分重要的作用。数值预报模式中次网格尺度积云对流参数化方案中对对流过程的描述直接影响到降水预报的水平。但由于积云对流的水平尺度较小,如何正确描述这一过程一直是数值预报中的难点之一。

观测事实表明,在积云对流发生发展的过程中,下曳气流扮演着十分重要的角色,它与上升气流相配合对降水的产生、温湿结构的调整以及积云对流的发展、消亡等都起到了重要作用。处理好积云对流中下曳气流的影响对积云对流参数化方案的成败十分关键。在早期的业务数值预报模式中,由于模式的分辨率较粗,在积云对流参数化方案中多把重点放在对上升气流的描述上,如常在业务数值预报模式中使用的湿对流调整方案、郭晓岚(1974)积云对流参数化方案、Arakawa-Schubert方案、Betts方案等。但近年来随着模式分辨率的不断增加和物理过程的进一步完善,人们逐渐认识到了这一机制的重要性,如Johnson(1976)^[1]在Arakawa-Schubert方案的基础上,考虑了下曳气流

作用,并对其所起的作用进行了讨论;80年代末到90年代初,Tiedtke^[2](1989)等人在质量通量积云对流参数化方案中引入了下曳气流,并成功地用于欧洲中期数值预报中心的业务预报模式;Grell^[3,4](1991,1993)等人也在NCAR的中尺度预报模式(MM5)的积云对流参数化方案中考虑了下曳气流的影响。这一物理机制的引入使得模式对次网格尺度积云对流过程的描述更加合理。

国家气象中心在“八五”期间建立了有限区域同化预报系统(HLAFS),并于1998年对该系统中的预报模式进行了改进,除了增加模式的分辨率外,可分辨尺度的降水过程也作了较大的改进。但在次网格尺度积云对流参数化方案中仍使用了原来的质量通量方案,方案中仅考虑了由向上的质量通量对环境大气所产生的影响。针对这一不足,我们在原质量通量方案的基础上引入了下曳气流,并对原方案中的有关参数和部分计算进行了适应性调整,对改进后的方案进行了实时资料的个例预报试验。本文将对改进后的积云对流参数化方案及个例试验情况作一介绍,并对试验结果作简要分析。

1 预报模式介绍

试验中使用的模式为国家气象中心的有限区域预报模式(HLAFS)。模式基本框架采用了标准经纬度网格,垂直方向采用了经典 σ 坐标。模式的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬度网格,垂直方向分为20层不等距 σ 面。模式中使用的物理过程除积云对流参数化方案外主要包括:①可分辨尺度的降水过程。在可分辨尺度的降水过程中,水物质被分为水汽、云水和雨水三种形式,它们的变化分别由各自的预报方程控制。当模式格点上的空气出现超饱和时,过饱和部分的水汽立即凝结成液体水并使周围的大气增温。凝结的液体水作为云水(体积较小的液体水滴)随大气一起运动;当云水浓度超过某一临界值时,云水就会自动地向雨水(较大的水滴)转换;而雨水由于其质量较大将以一定的速度向地面降落,在下落过程中与云发生碰并而使自身增大;雨滴在下落过程中如遇不饱和层时将产生再蒸发,使气柱增湿降温,落到地面的雨水就成了降水。该过程中未考虑液体水的冰冻过程。②水平扩散方案采用了二阶非线性方案。③地面土壤过程由一简单的三层模式描述。该过程中主要考虑了深层土壤的传导作用,太阳辐射影响以及陆地、海洋、冰雪融化等对地面温度和湿度场的影响。④边界层过程主要考虑了动量、显热和潜热的垂直输送以及地面水分的蒸发和地面摩擦等。⑤辐射过程中仅考虑了长、短波辐射对地面温度的影响,辐射与大气的相互作用方案中未加考虑。详细计算方案请参阅文献[5]。

该模式与中期预报模式单向嵌套,侧边

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial p}[(M_u + M_d)X] + (D_u X_u - E_u X) - (D_d X_d - E_d X) \quad (7)$$

由半隐式方法求解上述方程可得到积云对流过程对大尺度环境场中任一变量的影响。

在积云对流参数化过程中采用了如下假定条件:

①假定上升气流中质量通量 M_u 的垂直分布与大尺度环境水汽耦合有关,

$$-\frac{\partial M_u}{\partial p} = \left(\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial t}\right)_* \quad (8)$$

界处理采用了Davies方案,侧边界条件由中期预报模式T106L19提供,每3小时更新一次侧边界值。模式的初值由 $1^\circ \times 1^\circ$ 同化资料通过水平和垂直插值求得。

2 积云对流参数化方案

在本方案中,积云对流发生的条件为

$$\textcircled{1} \quad h_c > h_e \quad (1)$$

式中, h 为湿静力能量, $h = c_p T + gZ + Lq$,下标 c 表示云中量,下标 e 表示环境量。

$$\textcircled{2} \quad \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_* > 0 \quad (2)$$

‘*’表示大尺度环境量。

对于任一变量 X ,积云对流过程对环境场的影响可表示为:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -M \frac{\partial X}{\partial p} + D_u(X_u - X) - D_d(X_d - X) \quad (3)$$

上式中变量 X 可代表 u, v, q 和 h , D 为云中的卷出率, M 为云中的垂直质量通量,可表示为:

$$M = M_u + M_d \quad (4)$$

其中,下标 u 表示积云中上升气流部分的量,下标 d 表示下沉气流部分的量。

由空气的连续性和不可压缩假定,上升气流中,

$$\frac{\partial M_u}{\partial p} = D_u - E_u \quad (5)$$

式中, E 为环境大气向云中的卷入率。

而下沉气流中则表示为:

$$-\frac{\partial M_d}{\partial p} = D_d - E_d \quad (6)$$

通过方程(5)和(6),方程(3)可变为

②积云对流中上升气流和下沉气流的通量平衡方程分别为:

$$-\frac{\partial M_u X_u}{\partial p} = E_u X - D_u X_u \quad (9)$$

$$\frac{\partial M_d X_d}{\partial p} = E_d X - D_d X_d \quad (10)$$

③云中的卷入卷出,对于上升气流,有:

$$E_u = E_u^{(1)} + E_u^{(2)} \quad (11)$$

$$D_u = D_u^{(1)} + D_u^{(2)} \quad (12)$$

上式中, $E_u^{(1)}$ 和 $D_u^{(1)}$ 分别为湍流混合作用在积云边缘产生的侧向卷入卷出, $E_u^{(2)}$ 和 $D_u^{(2)}$ 为有组织的卷入卷出。对于前者我们假定为:

$$E_u^{(1)} = D_u^{(1)} = kM_u \quad (13)$$

其中, k 为混合系数, 取为 $k = 1.0 \times 10^{-5}$ 。有组织的卷入 $E_u^{(2)}$ 主要出现在低层, 是由低层大尺度水汽辐合产生的,

$$E_u^{(2)} = -\frac{\partial M_u}{\partial p} = \left(\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial t} \right)_* \quad (14)$$

而对于有组织的卷出 $D_u^{(2)}$, 我们假定只出现在云顶层(负浮力层以上)附近, 由下层产生的上升的质量通量在该层中全部卷出云体,

$$D_u^{(2)} = M_u / \Delta p \quad (15)$$

对于下沉气流中的卷入卷出的计算比较困难, 但数值试验结果表明, 对流过程对这一变量的大小并不太敏感, 这里采用与上升气流中的侧向卷入卷出相同的形式,

$$D_d = E_d = \alpha M_d \quad (16)$$

其中, 混合系数为 $\alpha = 2.0 \times 10^{-5}$ 。由方程(6)可知, 采用了这一假定后, 下沉气流中向下的质量通量 M_d 将不随高度变化。

而在云下层, $E_d = 0$, $D_d = M_d / \Delta p$, 即由积云对流产生的质量下沉完全在云下层中卷出。

云中物理量 X_u 和 X_d 由方程(9)和(10)中求出, 通过(5)和(6), 方程(9)和(10)可变为如下形式,

$$-\frac{\partial X_u}{\partial p} = \frac{E_u}{M_u} (X - X_u) \quad (17)$$

$$\frac{\partial X_d}{\partial p} = \frac{E_d}{M_d} (X - X_d) \quad (18)$$

对于上两式, 给出适当的边界条件就可以用有限差分方法求出云中量。

在下沉气流中, 由于液体水的存在, 将产生液体水的蒸发, 使得周围环境空气增湿降温。

3 试验结果

为了检验改进后强降水过程的预报能

力, 我们选择了 9802 号热带风暴在我国福建省登陆后偏西行引起福建部分地区一次大暴雨过程进行个例预报实验。1998 年 8 月 5 日凌晨 2 时(北京时, 下同) 9802 号热带风暴在福建省福清市沿海登陆, 登陆后风暴中心向西偏北方向移动, 并逐渐减弱成低气压。受其影响, 8 月 4 日 08 时至 8 月 7 日 08 时, 福建大部、江西东部和南部以及广东东部出现了大到暴雨, 降水量一般有 40~100mm, 局部地区达 150~210mm^[6]。

我们分别用业务预报模式(方案 1)和改进后的模式(方案 2)对比检验两个方案对这次强降水过程、主要是 8 月 5 日 08 时~6 日 08 时大暴雨的预报性能。

(1) 8 月 4 日 08 时~5 日 08 时, 风暴引起的降水开始出现, 广东东部及福建沿海地区出现中到大雨、局地暴雨。以 8 月 4 日 08 时为初始场作出各自 24 小时预报, 两方案都报出沿海地区出现降水, 但方案 1 所报量级明显偏小, 中心雨量不足 30mm; 而方案 2 则报出沿海地区大范围 25mm 以上, 部分地区 50mm 以上的较强降水。南方地区大雨预报 TS 评分也相应由方案 1 的 0.068 提高到方案 2 的 0.160, 且漏报率、空报率均有明显的降低。

(2) 8 月 5 日 08 时~6 日 08 时, 福建中西部出现大暴雨, 泰宁、永安、九仙的降水量超过 150mm(图略)。以 8 月 4 日 08 时为初始场作出的 48 小时降水预报, 方案 1、方案 2 均不太理想, 降水落区均偏东偏北, 雨强也不够。但方案 2 明显优于方案 1, 方案 1 仅报出中心值 20.9mm 的中雨区, 而方案 2 则报出大片大到暴雨区, 暴雨中心雨量达 79.4mm。

8 月 5 日 08 时 24 小时降水预报(图 1), 两方案都报出较大范围 50mm 以上的强降水, 降水落区也较好, 仅稍偏南一点。仔细比较可以发现, 方案 1 中心闭合线为 100mm, 且几乎为一点, 仅报出局地大暴雨, 中心雨量值为 104.2mm; 方案 2 的 50mm 线范围较方案 1 明显扩大, 且出现较大范围的

100mm 以上降水,中心闭合线为 150mm,中心雨量为 166.3mm,与实况最大降水量

165mm 也相吻合。即方案 2 较准确地报出了这次大暴雨天气过程。

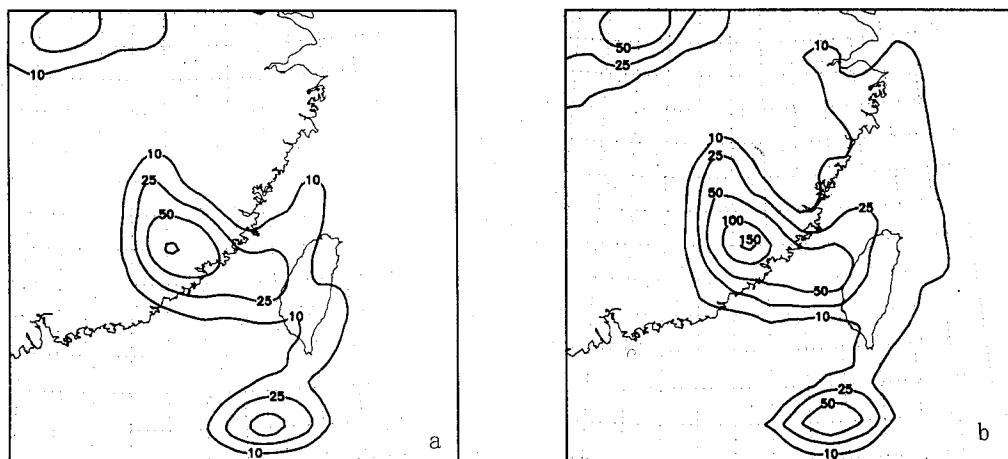


图 1 以 8 月 5 日 08 时为初始场对 8 月 5 日 08 时~6 日 08 时降水过程 24 小时降水预报对比
a. 方案 1 预报结果
b. 方案 2 预报结果

从 8 月 5 日 08 时 24 小时降水预报统计检验结果看,方案 2 在大雨及以上降水预报中明显优于方案 1。其中,大雨、暴雨 TS 评分均有所提高,大暴雨 TS 评分则由 0.000 提高到 0.093,改进较为明显;漏报率则都有大幅度的降低;预报偏差,大雨和暴雨都有所增加,大暴雨预报偏差由 0.147 提高到 0.382,表明改进方案对大暴雨落区预报范围明显扩大。

水量及大尺度降水量随时间变化的情况(表 1)。由表中可以看出,两方案所预报强降水主要出现在 0~12 小时,这与强降水主要出现在 5 日 08~20 时之间相当一致,各时段预报降水量方案 1 基本上都小于方案 2。24 小时总降水量方案 1 为 87.1mm,而方案 2 为 126.1mm。从表 1 还可以明显看出:方案 2 对中心降水量值的提高主要是通过提高对流降水量达到的,两方案所报对流降水量相差明显,方案 2 较方案 1 有成倍的增加,而大尺度降水量两方案相差不大。从对流降水量所占比重看,方案 1 中为 37.8%,方案 2 中为 57.6%。方案 2 的结果更与热带风暴强降水多以对流性降水为主的观测事实一致。

从以上分析可知,下曳气流的引入,对 8 月 5 日 08 时~6 日 08 时的降水,24 小时预报和 48 小时预报中心量值均有明显的提高。我们用暴雨中心附近 4 个格点 3 小时降水量的平均值给出了 8 月 5 日 08 时 24 小时预报两方案暴雨中心 3 小时降水量、对流降

表 1 8 月 5 日 08 时 24 小时预报暴雨中心 3 小时雨量变化

时段/小时	预报降水量/mm		对流降水量/mm		大尺度降水量/mm	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
0~03	16.8	21.3	6.0	10.6	10.8	10.7
03~06	26.1	38.1	10.2	21.9	15.9	16.2
06~09	22.9	31.5	9.1	19.4	13.7	12.1
09~12	16.2	21.9	4.9	11.0	11.3	11.0
12~15	3.7	9.0	1.4	6.0	2.3	3.0
15~18	0.3	0.5	0.3	0.5	0.0	0.0
18~21	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0
21~24	1.0	3.4	0.8	2.9	0.2	0.5
累计	87.1	126.1	32.9	72.6	54.2	53.5

(3) 8月6日08时~7日08时, 9802号热带风暴及其减弱成的低气压造成的强降水基本结束, 仅福建西部、江西东部出现2~8、部分地区10~25mm的降水, 中心雨量有37mm。8月5日08时48小时预报, 方案1仍存在雨区及量级明显偏小的问题, 而方案2则有明显改进。检验评分情况为: 对中雨预报, 方案2 TS评分较方案1由0.240提高到0.308, 漏报率明显降低, 预报偏差由0.446提高到0.764; 大雨预报各项评分均有所改进。

4 结语

将引入了下曳气流的质量通量积云对流参数化方案应用到国家气象中心HLAFS模式中, 并对一次强降水过程进行实时个例对比试验。结果表明:

(1) 24小时及48小时降水量预报, 引入下曳气流后, 对强降水预报能力均有所提高, 克服了业务模式降水量级明显偏低、强降水雨区范围明显偏小的弊病。

(2) 从统计检验结果可以看出, 改进后的模式对大雨以上降水预报水平较业务模式有了一定程度的改进, TS评分提高, 漏报率降低, 预报偏差值有所改善。

(3) 强降水中心降水量值明显提高, 更接近实况, 这主要是由于改进方案使对流降水量增加所致, 大尺度降水量则变化不大。

以上结论仅为一个个例的试验结果, 还不足以说明改进方案的总体预报性能。方案本身也有待于在今后的工作中进一步加以改进完善。

参考文献

- 1 Johnson R H. The role of convective-scale precipitation downdrafts in cumulus and synoptic scale interaction. *J. Atmos. Sci.*, 1976, 33: 1890~1910.
- 2 Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, 117: 1779~1800.
- 3 Grell G A. Y. -H. Kuo, and R. Pasch. Semi-prognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, 119: 5~13.
- 4 Grell G A. Prognostic evaluation of assumption used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121: 764~787
- 5 闫之辉, 郭肖容, 赵俊英, 张玉玲. 一个可用于业务预报的载水预报模式. 国家气象中心科技年报 A 册气象类, 1997: 11~29.
- 6 徐良炎. 长江嫩江洪水滔滔, 江南华南热浪滚滚. 气象, 1998, 24 (11): 62~63.

An Improved Mass-flux Cumulus Parameterization Scheme and Forecasting Experiments

Xue Jianjun Yan Zhihui

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

By using a limited area operational forecasting model and choosing a precipitation weather process caused by a tropical storm in August 1998, comparative forecasting experiments of an improved mass-flux cumulus parameterization scheme taking into account the effects of both updrafts and downdrafts and the original one only includes updrafts used in the model were performed. The results show that downdrafts contribute significantly to the improvement of the model precipitation forecasts for over 25.0mm.

Key Words: downdraft mass-flux cumulus parameterization scheme