

一次江淮气旋及其中尺度系统的数值模拟

肖庆农 章震越 尹德昌 魏绍远

(空军气象学院)

提 要

本文在十一层原始方程模式中引入 Fritsch-Chappell 一维云模式,对 1982 年 5 月 12 日江淮气旋上中尺度系统进行了模拟试验,分析表明:Fritsch-Chappell 一维云模式对深厚积云的考虑细致合理,比郭晓岚积云参数化方案优越,它能模拟出中尺度系统的一些特征。通过数值计算发现:中尺度江淮气旋是对流层低层的天气系统,气压场上具有中尺度低压的某些特征;对流天气的出现,使得中尺度江淮气旋得到发展,但这种发展有一个变化过程,在对流发展加强时,对流引起的动量变化以及下沉气流造成的低层冷却作用,使其有一个暂时的减弱过程,当对流运动趋于减弱时,气旋才得以发展。

一、引 言

中尺度系统的发生发展常常伴随着强烈的对流过程,对流引起的凝结潜热释放是中尺度系统发展的重要能量来源,因此,对流过程的参数化是中尺度模式需要处理的基本问题之一。但是,由于许多中尺度模式都是从大尺度模式转化而来的,积云参数化方案一般仍沿用一些适用于大尺度的方案,如郭晓岚方案。尽管这些方案在大尺度模式中使用效果较好,但实践表明,在中小尺度模式中使用就显得比较粗糙,许多中间过程被忽略掉了,有的甚至根本不适用于水平格距较小的中尺度模式。中尺度积云对流作用的处理方法目前主要有两种^[1]:第一种是显式表示法^[2](即不用模式云参数化),这种方法要求网格足够细,细到能够分辨出积云单体(一般 0.1—10km 的尺度),在目前条件下应用受到限制。第二种方法是建立一维云模式进行对流过程的参数化^[3-6]。1980 年 Fritsch-Chappell 建立了一个比较细致的一维云模式^[7],该模式考虑了经验性的卷挟作用,并考虑了水汽凝结(蒸发)、冻结(融化)等水的相变过程对上升、下沉气流的作用,此外,方案中还包括了环境大气垂直运动和垂直风切变对下沉气流的作用,用此方案成功地模拟了中纬度飑线的发生发展过程^[8]。

本文引用并改进了 Fritsch-Chappell 的积云对流参数化方案,纳入水平分辨率为 30km

的十一层原始方程中尺度模式中,对1982年5月12日江淮气旋上的一次对流过程进行了数值模拟。

二、模式简介

模式采用 (x, y, σ, t) 坐标系, $\sigma = p/p_s$, p_s 为地面气压,基本方程组为通量形式。模式中水平方向取以巢县为中心的 30×30 个网格点,格距30km,垂直方向取地表面作为下边界($\sigma = 1$),模式顶 $\sigma = \sigma_r$,其间接等 σ 分成十一层,气象变量在垂直方向取跳点分布, u, v, T, q, φ 在整数 k 层上, σ 在 $k + \frac{1}{2}$ 层上。

用饱和凝结法计算大尺度凝结;采用经典方法计算水平湍流交换;在行星边界层,本模式仅考虑地面摩擦,并用最下面一层的风代替地面风。辐射加热参数化采用朱抱真等的方案^[9]。

积云对流作用是这次试验的主要内容,分别用郭晓岚1965年的方案和Fritsch-Chappell方案进行模拟对比。

三、资料选取、计算方案和初值处理

本文选取1982年5月12日江淮地区倒槽锋生气旋及其造成的对流天气作为这次模拟的对象。5月11日20时的天气形势:500hPa图上整个亚欧大陆为二脊一槽型,低压槽从贝加尔湖一直伸向我国南部,并伴有较强冷空气南下,锋前有一低压倒槽从我国西南地区一直伸向江淮之间。12日08时,北部冷空气前锋进入倒槽,河南固始地区出现气旋,并在其周围造成了阵雨或雷暴天气。气旋形成之后向偏东方向移动,到20时已移到海上,气旋在东移过程中经历了一个减弱(11时)、加强(14时)、再减弱(17时)、入海后维持并加强的过程。在这次过程中,与锋面气旋有关的主要有两片对流天气区,一片随气旋移动;另一片位于武汉南面向东北缓慢移动。卫星云图上可以看出这两片对流云团都是200—250km左右的中尺度云团,14时云团较白亮,对流较强(图略)。

我们用两种方案对这次过程进行了数值模拟。方案一:十一层原始方程模式中考虑Fritsch-Chappell一维云模式;方案二:十一层原始方程模式中考虑郭晓岚积云参数化。模拟时以5月12日08时的气象要素场作为初始场,资料来源是我国东部地区的常规资料以及华东中尺度试验期间得到的这次过程的加密资料,采用53个站200、250、300、400、500、700、850hPa探空记录以及295个地面站记录,用逐步订正法^[10]进行客观分析得到初始场。

四、数值模拟结果及讨论

1. 降水

1982年5月12日降水过程,08时到17时江淮流域出现了五个降水中心(图1),其

中武汉北面、阜阳东面、宿迁地区和盐城南面各有一个9小时降水量超过25mm的中心，武汉东面有一个最大降水量61.5mm的降水中心。

积分9小时之后，方案一模拟出了四个降水量超过25mm的降水中心(图2)，但位置上都有偏离，个别中心偏离实况约100km(例如武汉东南的降水中心)，降水量比实况偏大1—2倍。方案二仅模拟出了实况中的两个降水中心(图略)，武汉北部、宿迁地区和盐城南部的降水中心都未能预报出来，同时还模拟出了南京南边一个虚假中心，模拟出的两个降水中心的位置及降水强度与方案一相差不大。

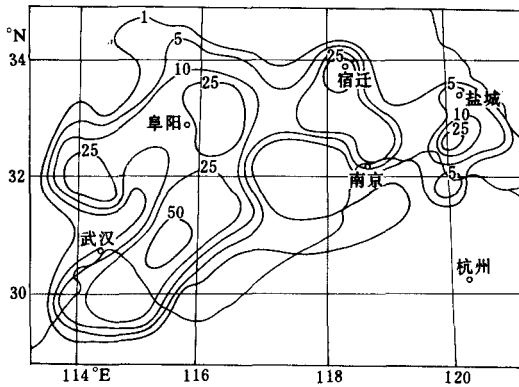


图1 1982年5月12日08时至17时降水实况(mm)

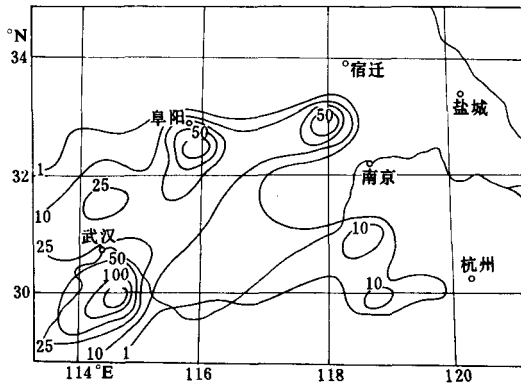


图2 方案一模拟的9小时降水量(mm)

总的看来，方案一模拟的降水分布更接近于实况。分析发现，方案一模拟的对流降水占总降水的40—50%，而方案二的对流降水仅占5—10%。可见，加入Fritsch-Chappell积云模式后增加了对流降水的比重，因此对那些主要由于对流性降水而致的降水中心，该方案一般不会漏报。

2. 冷堆

Fritsch-Chappell一维云模式考虑了下沉气流。这样，下沉气流从中层(5500m)卷入的

干冷空气以及下沉过程中的蒸发冷却使其到达低层时比周围环境大气冷得多,而郭晓岚方案只考虑了凝结潜热增温大气的作用。这使 Fritsch-Chappell 一维云模式在模拟冷堆、雷暴高压等中尺度系统方面比郭晓岚方案优越得多。

通过积分 3 小时、6 小时和 9 小时后下沉气流到达低层($k=11$,即模式底层)时与周围大气的温差,可以看出冷堆的位置和强度。方案一模拟出的云团中对流较强的部位(图 3 中虚线为上升速度),冷堆也比较强。11 时是对流强盛阶段,三个强对流中心的温差最大分别达 -10.4°C , -9.7°C 和 -10.6°C 。

下沉气流到达低层与环境大气有如此大的温差,必然对低层系统产生反馈作用。我们发现,在模拟的对流较强区,低层温度比用郭晓岚方案低 1°C ,而低层气压高 $1-3\text{hPa}$ (图略),这说明 Fritsch-Chappell 一维云模式考虑下沉气流后对冷堆具有一定的模拟能力。

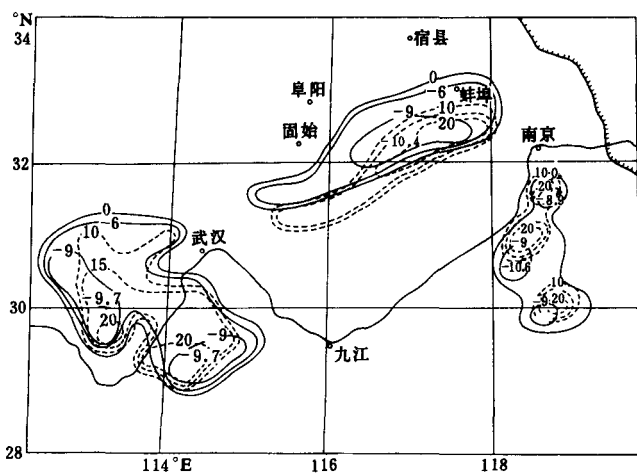


图 3 方案一模拟的 11 时对流区低层($k=11$)下沉气流与环境空气温差($^{\circ}\text{C}$)

3. 中尺度江淮气旋

08 时诊断分析出气压场为一中尺度低压(图 4),位于阜阳以南的固始附近,中心气压 1006hPa ;另外还诊断出武汉南边的另一中尺度低压,该低压在试验区边缘,资料较少,不予详细讨论。

周晓平等^[11]认为:有些中尺度低压的形成要先于降水或雷暴发生,中尺度低压形成之后才组织起积云对流,本次过程的中尺度低压就属于这种情况。我们用方案一积分 3 小时之后,低压组织了试验区东北部的云团,并移到 116°E 以东,3 小时移动 100km ,中心气压 1008hPa ,比 08 时减弱了 2hPa ;14 时,低压得到发展并东移了 100 多公里,尺度增大到中- α 尺度,中心气压为 1007hPa ;积分到 17 时,该低压又减弱了,中心气压升高到 1008hPa ,位置比 14 时略为东移,图 5 给出方案一积分 6 小时的地面气压场。

方案二模拟(图略)的该中尺度低压与方案一相比,在强度上有明显差异。11 时,方案二模拟的低压中心气压是 1006hPa ,比方案一低 2hPa ;14 时,方案二模拟的该低压没有发展,而是相反,低压比 11 时有所减弱;17 时,低压中心气压与 14 时相近。低压移速两种方

案模拟的结果基本一致,与实况相比,9小时移速偏慢 100km 以上。

为了比较对流强度与中尺度低压发展的关系,我们列出了该低压组织起的云团中 $k=5$ 层(相当于 5500m 高度)上的上升气流与低压中心值,以此来分析对流强弱对低压发展的影响(表 1)。表中 $(w_k)_{k=5}$ 是低压中心上空模式第 5 层的最大上升气流速度; p_1 、 p_2 分别是方案一、方案二模拟的中尺度低压, p 是实际低压值。

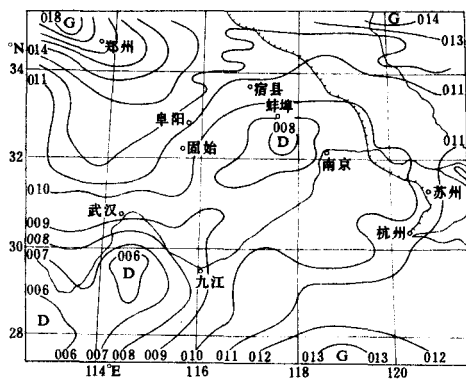
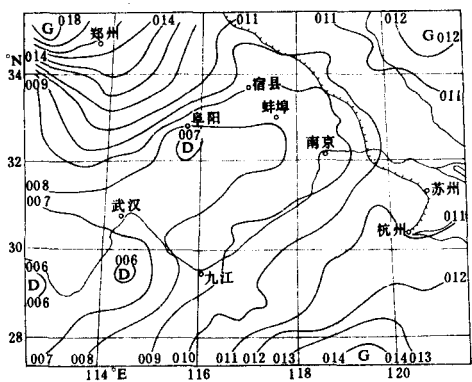


图 4 1982年5月12日08时初始气压场

图 5 方案一模拟的14时地面气压场

表 1 方案一模拟的中尺度低压的上升气流和低压中心值

时 间	08 时	11 时	14 时	17 时
$(w_k)_{k=5}$ (m/s)	7.7	24.4	18.6	8.5
p_1 (hPa)	1006.6	1008	1007	1008
p_2 (hPa)	1006.6	1006	1007	1007
p (hPa)	1006.6	1008	1006.5	1007.4

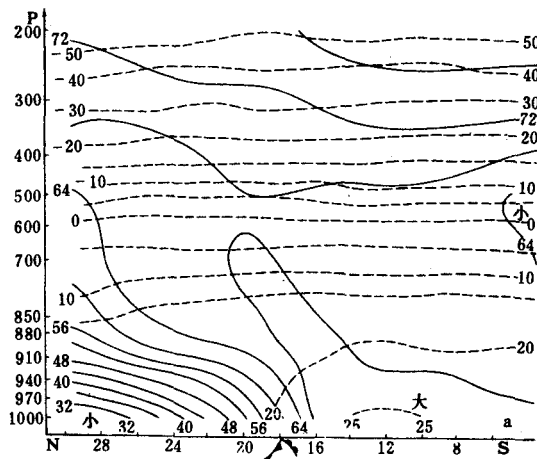
从表 1 可见,方案一模拟的中尺度低压强度及其变化与实况基本一致,它模拟出了中尺度低压的减弱(11时)、加强(14时),又减弱(17时)的变化规律,而且模拟出的中尺度低压中心气压值也与实际场相近;而方案二的模拟效果要差一些。我们注意到:对流的作用并不总使中尺度低压加深,11时,上升气流很强,但此时的中尺度低压反而有一个填塞过程;对流开始减弱时(14时),低压才得以发展;在对流强烈减弱时(17时),低压又一次减弱。

中尺度低压的这种变化过程与两个因子有关：①下沉气流冷却作用。正如前面所述，对流云下沉气流造成的冷却可以造成地面气压的升高(冷堆)，对流越强，这种作用越明显。因此，当对流云正处于中尺度低压上空时，这种冷却作用造成的气压升高会部分地抵消由于对流凝结潜热作用造成的气压下降。Fritsch-Chappell 方案中考虑了下沉气流，因此模拟的气压值比郭晓岚方案(没有考虑下沉气流)要高，对流强时(11 时)这种作用就更明显；②对流引起的动量变化(对流混合作用)。对流作用使上下层风场趋于均匀，低层涡度值变小，也会导致中尺度低压减弱。Fritsch-Chappell 方案中考虑了对流引起的动量变化，用方案一模拟出的中尺度低压对应的涡度值在 11 时是 $37.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ ；而郭晓岚方案中没有考虑对流引起的动量变化，用方案二模拟的中尺度低压对应的涡度值在 11 时是 $43.0 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。可见，考虑对流引起的动量变化，会使气旋减弱，对流越强，减弱也就越明显。因此，上面两个因子的作用，使对流最强时，中尺度低压反而会填塞，而对流趋于减弱时，低压才得以发展。Fritsch-Chappell 方案优点之一就在于正确地模拟了这种变化过程。

4. 中尺度江淮气旋垂直结构

初始时刻，高层 300hPa、500hPa 冷槽已伸到河南固始地区，而在低层该区正处于暖湿舌的控制之下(图略)，这种温湿场配置是固始地区出现斜压扰动的有利条件。

方案一积分 3 小时，从穿越气旋南北向剖面图(图 6a)可以明显看出，锋区(等 θ_e 线密集带)仅在 850hPa 以下有明显反映；在锋区南侧有一暖湿舌倾斜地伸向空中，最高达 600hPa，因而在锋区南侧低层暖湿、高层干冷，大气呈位势不稳定状态；而锋区北侧正好相反。积分 6 小时后，锋区变弱，暖湿舌伸展高度降低，最高仅达 850hPa，但锋区南侧仍是位势不稳定的，北侧仍是位势稳定的(图 6b)。积分 9 小时后，与锋区对应的等 θ_e 线进一步变疏，锋区南侧的暖湿舌消失，但仍为弱位势不稳定(图略)。



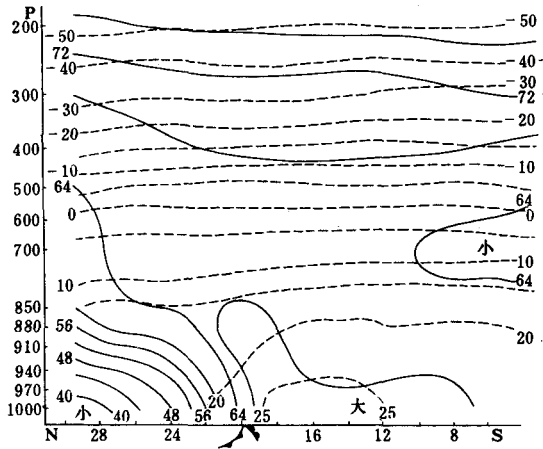


图6 过江淮气旋的经向剖面图

(a)11时(b)14时

(实线为等 θ_e 线,虚线为等温线)

这个模拟结果使 Fritsch-Chappell 一维云模式中认为位势不稳定能量的消耗过程就是对流过程这一理论得到了证明,从 11 时到 17 时,暖湿舌伸展高度逐渐降低至消失,这说明从 11 时到 17 时位势浮力能量是一个逐步消耗的过程,而此时段的实况正是对流的阶段,17 时,是对流趋于消失的阶段,我们模拟出的位势浮力能量也是趋于消失的。

另外,三个时次模拟出的纬向和经向二维流场中,气旋上空都维持了一个深厚的上升运动区,但主要的正环流和逆环流都在 850hPa 以下。在涡度、散度的垂直分布中,气旋上空低层是正涡度,高层是负涡度,低层是辐合的。图 7 是方案一模拟出的气旋上空 11 时涡度、散度和垂直速度的纬向剖面图,可以看出:气旋上空 500hPa 以下为正涡度,最大涡度值出现在低层 1000hPa 上,其值约 $37.4 \times 10^{-5} s^{-1}$,500hPa 以上为负涡度,涡度最大值轴线基本垂直。气旋上空 700hPa 以下为辐合,最大值 $-30.2 \times 10^{-5} s^{-1}$,出现在 1000hPa;700hPa 以上辐散,最大值在 500hPa,其值为 $16.3 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。气旋上空为一致的上升运动。

从上面分析可见,这次江淮气旋有如下特点:(1)水平尺度小,垂直伸展厚度也较低(850hPa 以下);(2)在低层维持了一个很明显的正涡度中心和辐合中心;(3)气旋上空一直维持着一支宽度与气旋尺度相当的上升运动带,上升运动一直伸展到 300hPa,但其周围正反环流主要在 850hPa 以下;(4)气旋上空的上升运动造成了云团及其降水天气。

通过这次试验我们发现:Fritsch-Chappell 方案模拟降水,特别是强对流降水更加合理;该方案能够模拟出冷堆特征,对中尺度低压及其变化规律的模拟较符合实际,模拟的气旋垂直结构也是合理的。但是也发现了不少问题,主要是模式对于地面系统移动的预报速度慢,这有待于今后进一步改进。

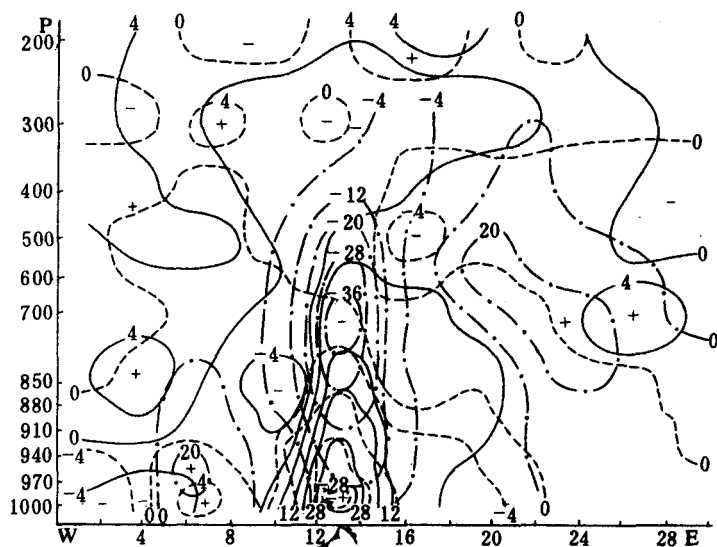


图7 方案一积分3小时通过江淮气旋的纬向剖面图

(实线为等涡度线(10^{-5}s^{-1}),虚线为等散度线(10^{-6}s^{-1}),点划线为上升速度($10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$))

参 考 文 献

- [1] Frank, W. M. ,The cumulus parameterization problem, *Mon. Wea. Rev.* ,111,1859—1871,1983.
- [2] Rosenthal, S. L. ,Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat release by the resolvable scales, I. Model description and preliminary results, *J. Atmos. Sci.* ,35,258—271,1978.
- [3] Anthes, R. A. ,A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.* ,105,270—286,1977.
- [4] Kreitzberg, C. W. ,and D. J. Perkey, Release of potential instability; Part I :A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model, *J. Atmos. Sci.* ,33,456—475,1976.
- [5] Kreitzberg, C. W. ,and D. J. Perkey, Release of potential instability; Part II :The mechanism of convective/mesoscale interaction, *J. Atmos. Sci.* ,34,1569—1595,1977.
- [6] Brown, J. M. ,Mesoscale unsaturated downdrafts driven by rainfall evaporation; A numerical study, *J. Atmos. Sci.* ,36,313—338,1979.
- [7] Fritsch, J. M. ,and C. F. Chappell, Numerical prediction of convectively-driven mesoscale pressure systems; Part I :Convective parameterization, *J. Atmos. Sci.* ,37,1722—1733,1980.
- [8] Fritsch, J. M. ,and C. F. Chappell, Numerical prediction of convectively-driven mesoscale pressure systems; Part II :Mesoscale model, *J. Atmos. Sci.* ,37,1734—1762,1980.
- [9] 朱抱真等,一个用于数值预报模式的辐射加热的计算方案,第二次全国数值天气预报会议文集,45—55,科学出版社,1980年。
- [10] 魏绍远等,数值预报中初始资料输入的中尺度客观分析试验,空军气象学院学报,9,1,1988。
- [11] 周晓平等,梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟实验,大气科学,8,4,1984。

NUMERICAL SIMULATION OF A CYCLONE OVER THE JIANGHUAI AREA AND ITS MESOSCALE SYSTEMS

Xiao Qingnong Zhang Zhenyue

Yin Dechang Wei Shaoyuan

(Airforce Institute of Meteorology)

Abstract

Fritsch-Chappell's one dimensional cloud model is introduced and incorporated into 11-layer primitive equation model. The convective parameterization scheme proposed by Kuo(1965) is also incorporated into the model used in this paper. The difference between the two schemes is compared each other in simulating a mesoscale convective process occurred over the Jianghuai area on 12 May 1982. The two numerical simulations indicate that this one dimensional cloud model is better than Kuo's scheme.

The investigation indicates that the mesoscale cyclone is the weather system occurred in planetary boundary layer. The interaction between mesoscale cyclone and convection makes the cyclone develop. But in the early period of convection, the development of cyclone is limited by influencing of downdraft and cumulus momentum transport and mixing. When convection comes to depress, the mesoscale cyclone develops.