

短时风暴数值预报模式研究

II. 模式的基础试验结果^{*}

王东海 周晓平

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 基础性试验和实测风暴个例的半理想化模拟试验结果表明, 该模式能抓住对流风暴系统的主要特征, 具有一定的模拟能力, 可作为未来发展临近业务数值预报模式的基础。

关键词 风暴数值预报模式 中- β 尺度天气系统 模式的基础试验

1 引言

本文是文献[1]的续篇, 在第一部分里^[1], 我们介绍了模式的理论框架。本文中, 我们主要对该模式进行大量的基础性试验, 阐明了该模式能够用于中- β 尺度天气系统的研究和预报, 是未来临近数值预报模式的一个雏形。

2 模式的主要特征

对流风暴系统受到从天气尺度到微尺度的各种尺度的运动场、温度场和湿度场的制约, 其自身的热力、动力学调节以及与环境间的相互作用对其发展演变具有关键的作用。其影响因素十分复杂, 而且对流风暴系统具有影响范围小, 发展剧烈、变化迅速、偶发性和灾害性强等特点, 这使得对其模拟预报具有较大的困难性。目前各国都没有业务预报的模式, 都正在开始起步研究。为了能够准确地描述中尺度对流系统的特征, 模式必须有较完整的动力学框架和物理过程的参数化, 但是考虑目前计算机条件的限制以及便于将来的业务应用, 我们在模式的设计方面主要侧重于模式动力学的完整性, 而对物理过程只考虑在风暴系统中我们认为是最重要的一些过程^[1]。模式的基本结构特点如下:

(1) 模式的动力学框架为三维、非静力、可压缩的完全弹性模型。

(2) 微物理参数化采用简单的暖云过程, 其水物质只包括水汽和液态水含量, 这样大大简化了模式的微物理过程, 对于处理风暴系统的热力动力学特征已有相当大的准确性, 能减少模式数值求解的计算量, 更加适应未来业务数值预报的要求。

(3) 用无量纲化气压代替气压量, 并且用其扰动量作为模式的预报量。

(4) 大气中的热力学变量用位温表示。

1994-12-25 收到

^{*} 国家自然科学基金 49275240 课题资助

(5) 这样, 模式包含 7 个物理预报量: 三个速度分量 u, v, w , 无量纲化扰动气压量 π' , 位温 θ , 比湿 q_v , 液态水含量 q_l 。模式方程组采用笛卡尔坐标系统表示。

(6) 次网格湍流的参数化方案采用十分简便的完全混合长理论方法, 即对所有的次网格尺度湍流项均采用 K-理论的参数化方法来表示。

(7) 除了具有物理意义的湍流混合项之外, 我们还按照不同需要引入计算湍流混合项, 以进一步抑制非线性不稳定的增长和消除小尺度的计算噪音。

(8) 在声波的计算处理方面, 采用了声波的阻尼方法和压缩技巧, 即引入散度阻尼项和声波的压缩系数, 从而对模式中的平均声速起阻尼作用。

(9) 采用开放侧边界, 为了吸收上传声波和重力内波以及抑制波在上边界的反射, 模式在上边界附近设立一个海绵过渡层。

(10) 模式假设基态大气为静力, 且不随时间而变。

(11) 模式初值可以理想给定, 也可以来自实测探空资料。

(12) 具有不同对流启动方式。

(13) 模式网格采用标准空间交错跳点 C 网格系统, 模式积分方案采用 Klemp 和 Wilhelmson 的“时间分离”方法。

(14) 模式网格距和模拟区域范围可变。

3 模式基本性能的检验

为了检验模式物理模型的可靠性以及模式程序编码的正确性, 我们采用理想的大气层结和风场作为模式的初始环境场进行模式理想化模拟。

取模拟域水平尺度为 $L_x = L_y = 80 \text{ km}$ (物理空间), 垂直高度为 $L_z = 20 \text{ km}$ (计算空间), 水平网格距 $\Delta x = \Delta y = 2 \text{ km}$, 垂直网格距 $\Delta z = 1 \text{ km}$, 由于采用时间分离法, 经过试验取大时间步长 $\Delta t = 20 \text{ s}$, 小时间步长 $\Delta \tau = 4 \text{ s}$ 。

对流风暴的初始扰动采用轴对称正位温扰动, 其中心位置位于模拟域中央 1.5 km 的高度上, 扰动区半径 $x_r = y_r = 10 \text{ km}$, 厚 3 km , 中心最大扰动位温值 $\Delta \theta_0 = 1.5 \text{ K}$ 。图 1 是模式的初始环境温度和相对湿度的高度廓线, 为了更能直观地检验模式的基本性能, 我们假定初始环境为静止大气, 即 $\bar{u} = \bar{v} = 0$ 。

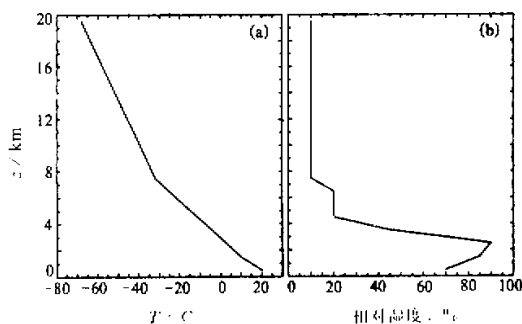


图 1 模式初始环境温湿场廓线
(a) 温度层结; (b) 相对湿度廓线

我们进行 100 min 的积分试验, 模拟结果十分理想, 完全模拟出了一个严格轴对称的孤立对流风暴系统的整个生命史过程, 图 2 是云内最大上升速度, 最大下沉速度以及云内外位温差的时间变化曲线, 从最大上升速度的时变曲线上可看到, 对流风暴内的垂直上升速度发展迅速, 在 30 min 内达到

其峰值 20.7 m/s ，出现在第 28 min ，其后随着降水的出现和蒸发的发生，垂直上升速度慢慢减弱，这时下沉速度慢慢加强。云体发生在第 20 min ，其最大上升速度为 9.7 m/s ，而在第 70 min ，对流云主体消散，这时的最大上升速度为 6.7 m/s ，而最大下沉速度达到 7.7 m/s 的峰值。

图 3 是模式模拟到第 30 min 时风场和液态水含量的 $x-y$ 水平剖面图，可以看出，直至模拟结束 (100 min)，从低层到高层各输出场的这种水平轴对称性都保持得非常好。为了能更进一步地了解模式的模拟性能，让我们来看模式输出场的垂直剖面图，分析模式风暴的内部热力学动力学结构特征。图 4 是模式积分至第 30 min 时沿模式风暴中心 ($y=40 \text{ km}$) 一些模式输出场的 $x-z$ 垂直剖面图，这些输出场包括风矢量场、液态水场 q_l 、 x 方向的水平速度场 u 、垂直速度场 w 和位温偏差 $\theta'(\theta'=\theta-\bar{\theta})$ 。这时云顶高度已经达到 9.5 km ，云体已发展为一个完整的孤立对流单体，与这一

云体相对应的是一个强的垂直上升速度区，其最大值为 19.0 m/s ，位于云体中上层的 6.5 km 处，与这一垂直上升速度量值相比较云边缘下沉气流较弱，最小值只是 -1.5 m/s ，对于位温偏差场，云体中下层是一个负位温偏差区，对于水平速度分量场 u ，其最大的特征是在云体的中下部 (5 km 以下) 是辐合区，而在云体的中上部是辐散区。图 5 是第 60 min 的情形，云体中上部的辐散气流向外扩展，由于降水拖带和蒸发的发生，近地面层 (2 km 以下) 出现较大量值的下沉气流，并产生冷堆，而这时云体内辐散辐合气流的分布也有所改变，除了中上部范围加大的辐散气流之外，地面层 (1.5 km 以下) 也出现了较强的辐散气流，与下沉气流相对应，形成了对流风暴常见的下击暴流，在模式的地面上的第 40 min 就出现了外流，其水平外流值只有 3.0 m/s ，其辐散外流范围较小，大部分区域仍为辐合气流，随着模式风暴的演变，其外流量值慢慢增加，第 60 min 时达到 8.1 m/s ，在第 75 min 达到其最大值 9.3 m/s 。

从上面的模拟分析结果看，虽然我们只用非常理想化的环境初始场对模式进行数值模拟，但是却得到了许多与其他三维数值模拟结果以及观测事实相一致的一些重要的对流风暴单体的基本特征，例如强的垂直上升气流、较弱的云外补偿下沉气流、辐合辐散

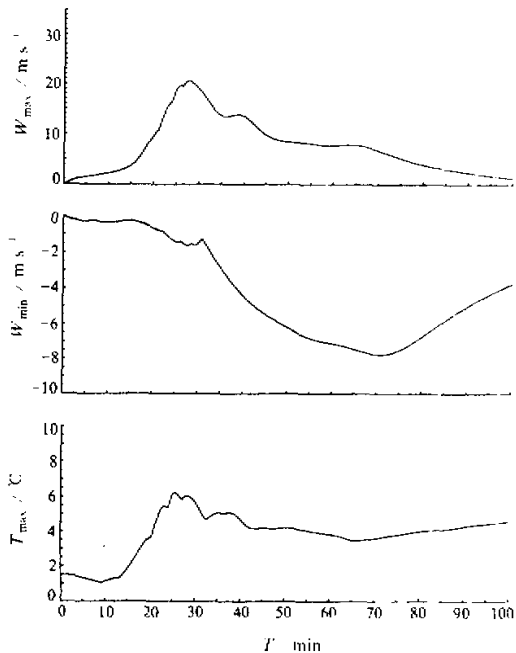


图 2 最大值的时变曲线

(a) 最大上升速度 (m/s); (b) 最大下沉速度 (m/s);
(c) 最大云内外位温差 (K)

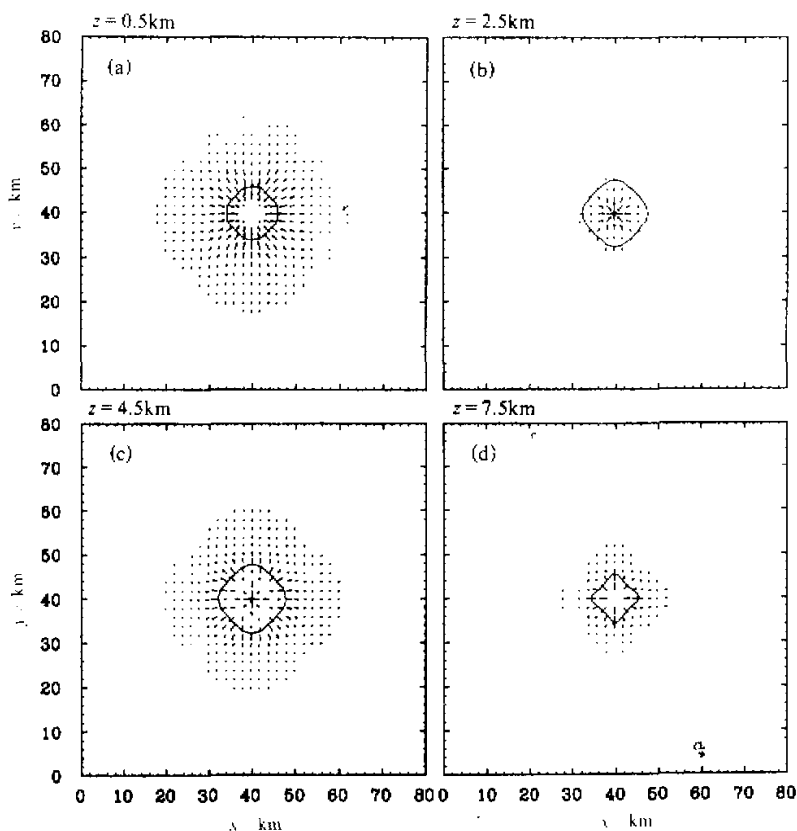


图3 模式第30 min时风矢和液态水量的水平剖面图, 实线是液态水含量的外廓线
(a) $z = 0.5$ km; (b) $z = 2.5$ km; (c) $z = 4.5$ km; (d) $z = 7.5$

流型, 云下冷出流和冷堆等。这些初步表明模式的运行具有较好的稳定性和良好的模拟性能。

另外, 我们还进行了所谓的“空运行”模拟, 即模式的环境初始场同上, 只是不做任何的位温扰动, 正象所希望的结果一样, 模式能够一直稳定运行, 并且没有对流云体的出现。

4 模式一些基本参数的敏感性试验

为了进一步考察模式的基本性能, 我们对模式一些基本参数进行大量的敏感性试验, 主要是对模式的空间网格距、时间步长以及模式的计算空间范围进行各种相互匹配的检验。表1列出了各个试验个例的模式基本参数。模式的初始环境温湿场和扰动场与上节相同, 而且同样假定初始环境为静止大气。

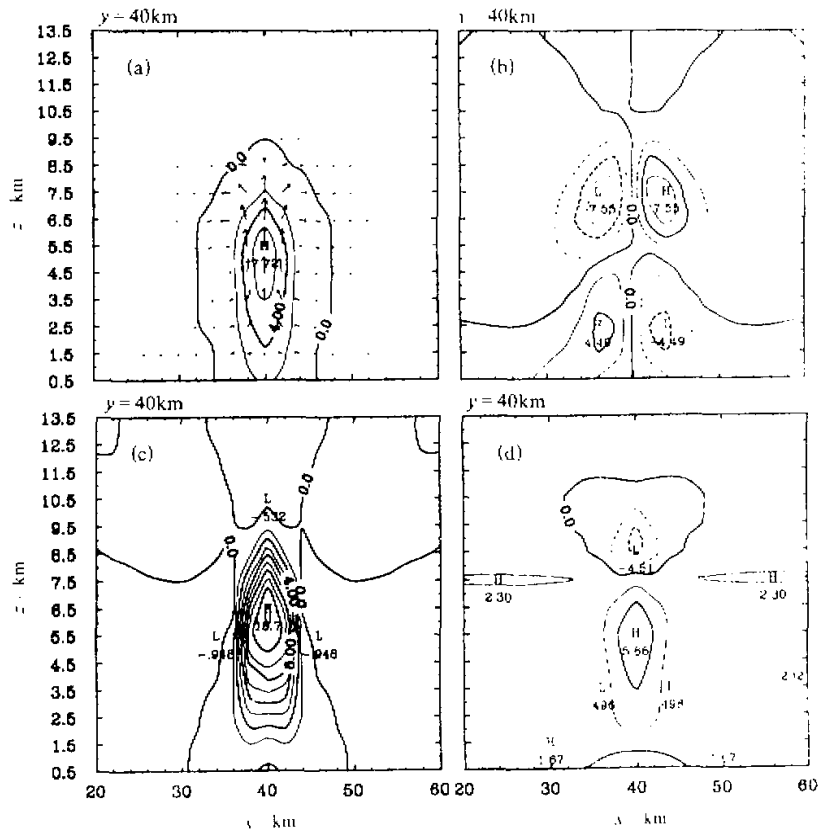


图4 模式第30 min时沿风暴中心的 x - z 垂直剖面图
(a) 风矢和 q_1 场 (g/kg); (b) u 场 (m/s); (c) w 场 (m/s); (d) θ' 场(K)

表1 各算例的模式基本参数

试验个例	空间网格点	空间网格距/km	计算空间范围/km	大时间步长/s	小时间步长/s
G221T204	$43 \times 43 \times 20$	$2 \times 2 \times 1$	$84 \times 84 \times 20$	20	4
G225T153	$43 \times 43 \times 40$	$2 \times 2 \times 0.5$	$84 \times 84 \times 20$	15	3
G225T102	$43 \times 43 \times 40$	$2 \times 2 \times 0.5$	$84 \times 84 \times 20$	10	2
G227T123	$43 \times 43 \times 30$	$2 \times 2 \times 0.7$	$84 \times 84 \times 21$	12	3
G115T102	$43 \times 43 \times 40$	$1 \times 1 \times 0.5$	$42 \times 42 \times 20$	10	2
G441T204	$43 \times 43 \times 20$	$4 \times 4 \times 1$	$168 \times 168 \times 20$	20	4
L221T204	$83 \times 83 \times 20$	$2 \times 2 \times 1$	$164 \times 164 \times 20$	20	4
H221T204	$43 \times 43 \times 30$	$2 \times 2 \times 1$	$84 \times 84 \times 20$	20	4

对所有算例进行100 min的数值试验,部分模拟结果列于表2。表中的最大外流速度是指模式最低层的最大外流速度,如对算例G221T204是指在离地面0.5 km上的水平外流速度峰值;最大云顶高度是指液态水含量为 $2\text{ g}/\text{kg}$ 所能达到的极高值。

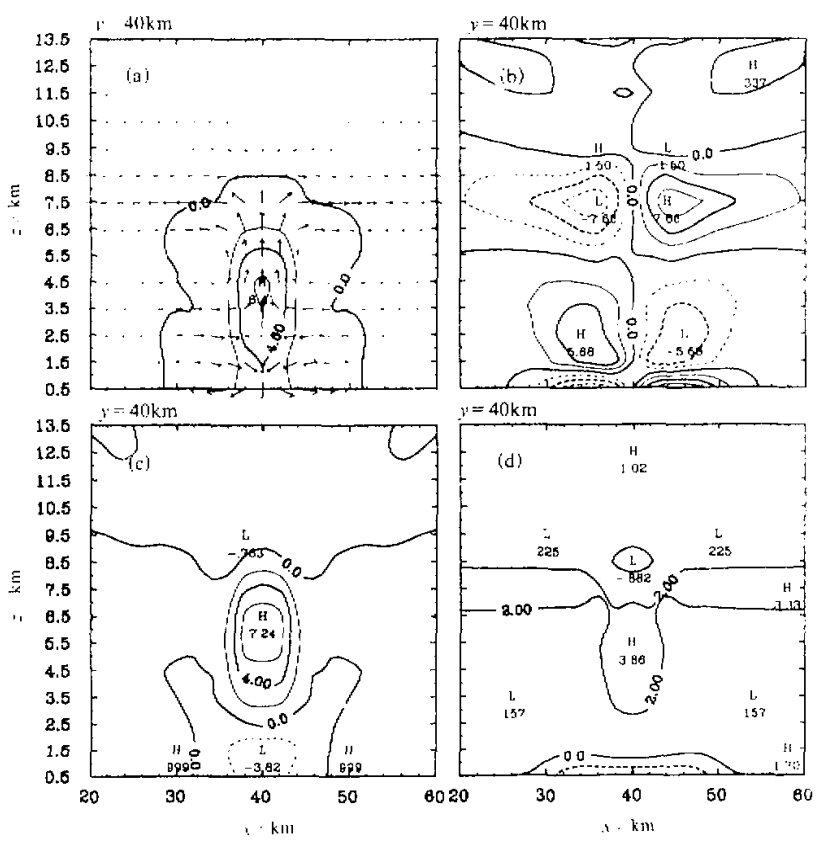


图 5 说明同图 4 只是第 60 min 的情形

表 2 各算例的部分模拟结果

试验个例	最大上升速度		最大外流速度		最大云顶高		云体演变时间 / min		
	值 / m s^{-1}	出现时刻 / min	值 / m s^{-1}	出现时刻 / min	值 / km	出现时刻 / min	出现	消散	维持
G221T204	20.7	28	9.3	75	8.0	35	20	75	55
G225T153	24.3	25	18.0	65	8.75	30	15	70	55
G225T102	22.3	27	16.1	70	8.75	35	15	70	55
G227T123	20.0	24	13.4	65	8.05	30	15	70	55
G115T102	32.1	17	18.0	50	9.0	25	10	55	45
G441T204	10.9	54	-	-	6.0	75	50	>100	-
L221T204	20.6	28	9.2	75	8.0	35	20	75	55
H221T204	20.7	28	9.2	75	8.0	35	20	75	55

首先分析对于不同网格距大小对模式模拟结果的影响。从表中可看出，对于所有水平网格距为 2 km 的算例，模拟结果大体相同，其最大上升速度为 20 m/s 的同一数量级，最大云顶高度在 8 km 左右，而且其云体的维持时间都在 55 min。对于算例

G115T102, 其模拟结果更多地表现为单个积云的特征, 而对于 G441T204 其模拟结果似乎更倾向于一些中- α 尺度对流系统的特征。图 6 为不同网格距大小模拟的最大上升速度时变图, 从图中可以更加直观地看到上述的分析结果。从不同网格距算例在对流强盛发展时的外部形态特征图示说明, 不论对于云体形状、云体流场, 或云中温度场等热力学场和动力场, 其主要的特征结构基本类似, 只是其数值大小或强度有些差别。表明, 该模式具有较强的适应性, 合理性。

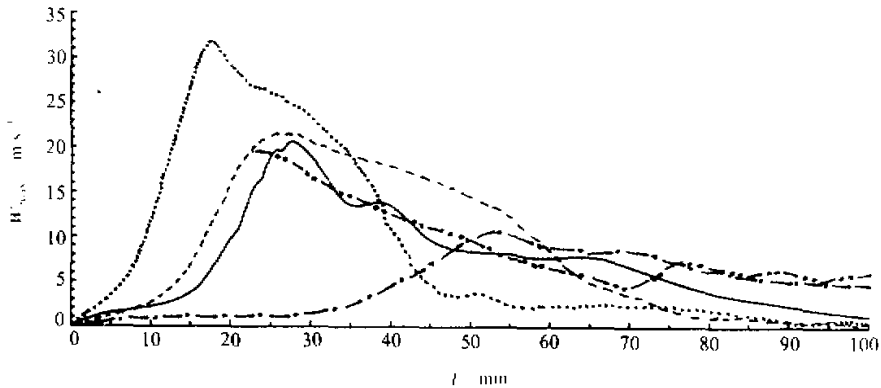


图 6 不同网格距大小对最大上升速度时变曲线的影响

— G221T204; - - - G227T123; ··· G225T102; - · - G115T102; - - - - G441T204

现在看看模式计算结果对时间步长以及模式的空间计算范围的响应。关于时间步长的试验, 考察算例 G225T102 和 G225T153, 即对于水平空间网格距为 2 km 和垂直网格距为 0.5 km 来说, 相应地加长模式积分的大小时间步长, 即分别从原来的 10 s 和 2 s 改变为 15 s 和 3 s。从表 2 的部分模拟结果可知, 两算例的主要模拟结果基本上相类似, 但是从模式最大上升速度的时变曲线可看出, 虽然两算例计算结果在其云体的外部特征和主要结构参数上类似, 但是可以明显地看出, 对于算例 G225T153 来说, 其最大上升速度在积分到 70 min 以后出现小的波动, 而且其波动的峰值达到 11.4 m/s。为了进一步地考察这些小波动对模式后续积分结果的影响。我们加长了积分时间, 积分了 250 min, 其结果表明这些小波动得到了很好的抑制, 这说明我们现在的模式差分格式以及模式整体的方案具有较好的稳定性和收敛性。关于模式计算空间范围的试验, 我们还做了更多的模拟, 算例 L221T204 和 H221T204 就是关于这方面的试验。它们分别加大水平空间范围和垂直空间范围 (见表 1), 正如表 2 所示, 比较算例 G221T204、L221T204 和 H221T204, 其结果十分相似, 从最大上升速度的时变图以及各种剖面图上看 (图略), 几乎完全一样, 没有什么差异。这进一步说明, 虽然各种各样的边界条件都是人为地强加引入的, 它们或多或少地都会产生虚假波, 从而扰乱计算的结果, 导致计算的错误, 但是对于我们的模式现在使用的水平边界条件和垂直边界条件, 在所关心的有效积分时间里是可行的, 它最大限度地抑制了由于边界条件所引起波的反射, 保证了模式基本计算结果的正确性。

以上的模拟试验表明,在现有的计算机条件下(千万次量级计算机),为了能模拟积云群和超级单体风暴等中- β 尺度强对流天气系统在大尺度环境中的发展与移动,以及对其动力学结构特征的研究,采用2 km的水平网格距和与之相匹配的0.5至1.0 km之间的垂直网格距是适当的;现模式具有较强的适应性,在一定的条件之下,不仅能够用于模拟中- β 尺度系统,而且可以用来模拟中- γ 和中- α 尺度系统,改变模式网格距的大小,一定程度上能够模拟出不同尺度下对流系统的特征;模式在差分格式和整体计算方案上,不仅具有较好的稳定性,而且具有较好的收敛性,其计算解具有较好的确定性及合理性;天气模式的计算是关于偏微分方程组初边值问题的求解,而在天气有限区域数值模式中,其边界条件(尤其是水平侧边界条件)完全是人为给定,任意性较大,不可避免地会出现或多或少虚假波的反传,试验表明,现模式边界条件能够最大限度地抑制了波的反射,在我们所关心的有效积分时间里面不至于导致影响模拟研究对象,保证了模拟结果的正确性。

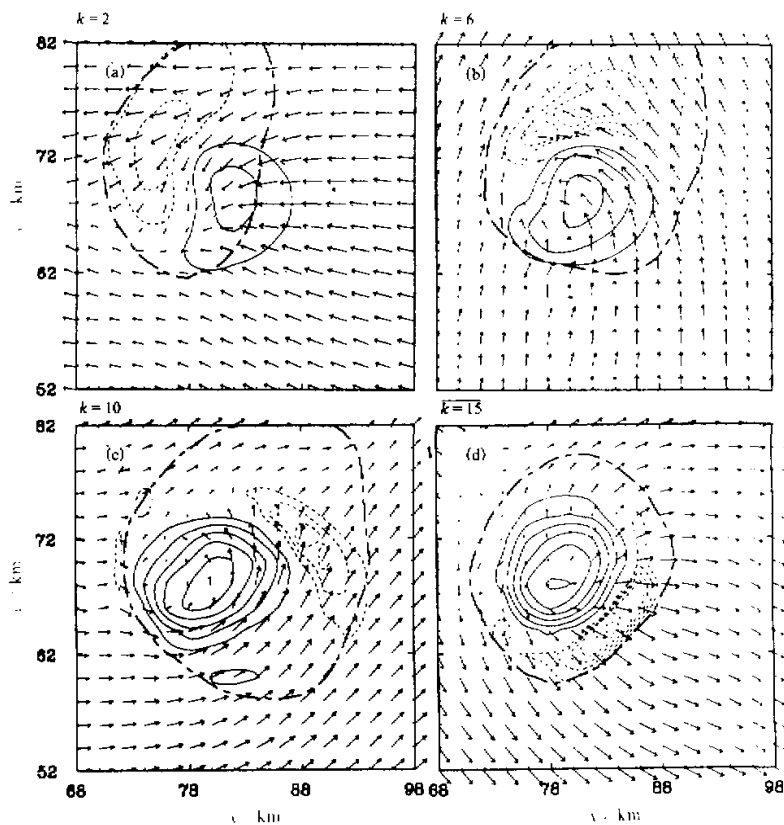


图7 积分2个小时模式风暴在不同高度上的垂直速度场和风矢场的水平分布(本模式结果)

粗点划线为液态水 1.0 g/kg 的廓线,实线为大于等于 5.0 m/s 的垂直速度,间隔为 5.0 m/s 。

虚线为小于等于 -1.0 m/s 的下沉速度,其间隔为 1.0 m/s 。

(a) 1.05 km高度上; (b) 3.85 km高度上; (c) 6.65 km高度上; (d) 10.15 km高度上

5 比较试验

在本节, 利用我们建立的三维对流风暴数值模式对发生在 1977 年 5 月 20 日美国 Oklahoma 的一次超级雷暴单体过程^[2]进行数值模拟, 并与 Klemp 等的模拟结果^[1] (下称 KW 模式) 进行比较, 还进一步与利用 Doppler 雷达观测得到的雷暴风场进行对比

首先, 简单地描述一下 KW 模式和我们的模式的一些特点以及它们的差别。这两个模式的动力学框架都差不多, 都是三维完全弹性的非静力学模式, 只是对某些物理过程在处理上的详细程度不同, 应该说, KW 模式考虑的物理过程比我们的模式复杂些。这是由于我们当前计算机的能力所限制的。KW 模式也只考虑暖雨过程, 但是它把液态水分成云水和雨水两种过程; 另外, 在次网格湍流的计算上, KW 模式采用对次网格的扰动能量方程进行逐时步积分所得, KW 模式有 9 个预报变量, 而我们的模式只有 7 个预报变量。

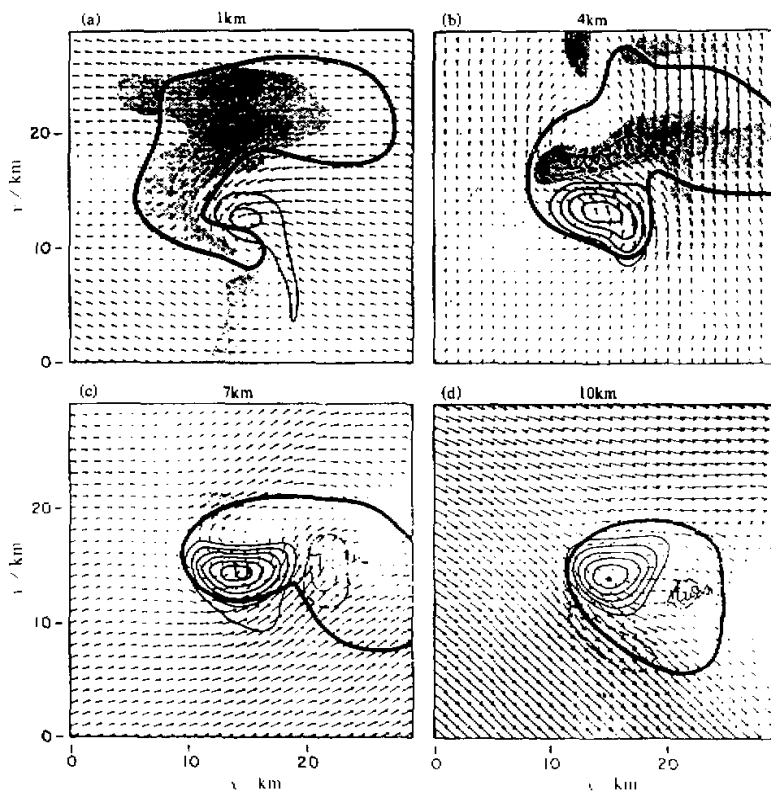


图 8 同图 7 只是 KW 模式结果

粗线为雨水 0.5 g/kg 的廓线, 图中阴影表示小于等于 -1.0 m/s 的下沉区域, 虚线的隔距为 5.0 m/s
(a) 1.0 km 高度; (b) 4.0 km 高度上; (c) 7.0 km 高度上; (d) 10.0 km 高度上 (取自文献[3])

在这个个例模拟中, KW 模式采用两个实测探空 (即 1500 CST 的 Ft. Sill 和 1620 CST 的 Elmore City) 的合成作为模式的初始环境场, 我们采用 1500 CST 的 Ft. Sill 探空作为模式的初始环境场。

模式的空间分辨率有所不同, KW 模式为 $1.0 \times 1.0 \times 0.5 \text{ km}$, 而我们采用 $2.0 \times 2.0 \times 0.7 \text{ km}$ 的空间网格距。模式都采用热泡的方法启动对流, 热泡的中心最大位温扰动为 4 K 、水平半径为 10 km 、垂直半径为 1.5 km 。

图 7 和图 8 分别是我们的模式和 KW 模式模拟的模式风暴在不同高度上的垂直速度场和风矢的水平分布, 比较两图, 可见上升速度和下沉速度以及流场的分布两者的模拟结果十分相似, 而且基本上与利用 Doppler 雷达观测得到的结果 (图 9) 相一致。

通过上面的比较分析表明, 我们的模式确实具有同类模式的同等模拟能力, 虽然由于计算机条件的限制, 我们的模式在某些物理过程上考虑得较为简单些, 这说明我们的确抓住了影响对流风暴过程的主要动力学过程, 从而同样可以对流风暴进行较好的模拟。与实际的 Doppler 雷达观测结果的比较说明, 我们的模式模拟结果具有很高的可信度, 能够真实再现实际风暴的基本结构特征。

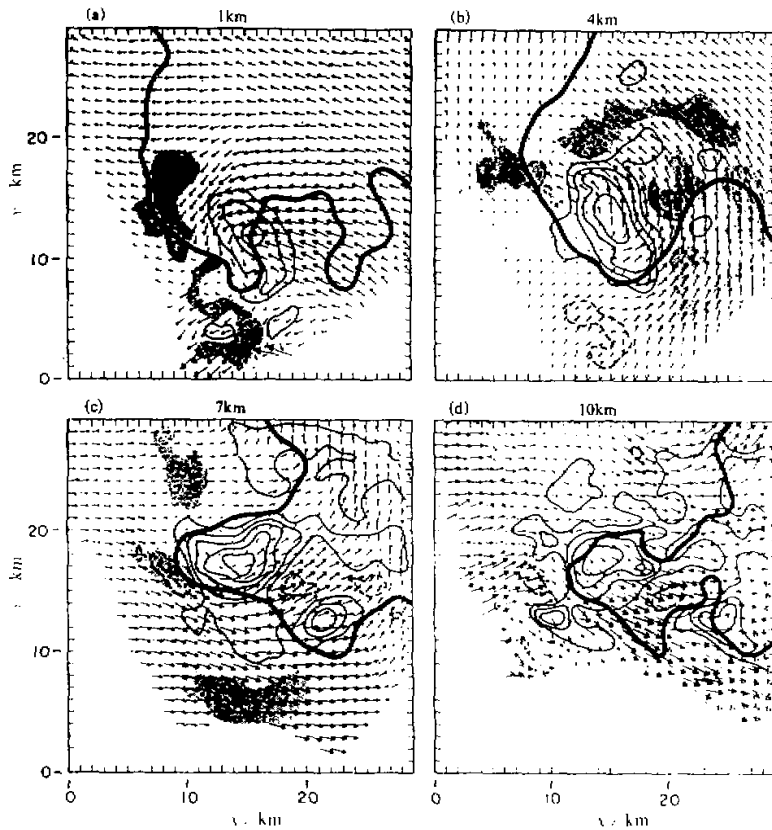


图 9 同图 8 只是实际 Doppler 雷达的观测结果
粗实线为 30 dBZ 廓线 (取自文献[3])

6 结语

本文主要对模式进行一些基础性试验, 以检验模式的基本性能以及实际模拟对流风暴的能力。

大批量的基础性试验表明, 模式具有良好和稳定的运行和可靠性, 对实际对流风暴具有较好的模拟能力。虽然模式只作了理想或半理想环境场中的模拟, 但却成功地模拟出了许多与其它三维风暴云模式模拟结果和实际观测事实相一致的重要对流风暴特征, 例如强烈的垂直斜升气流, 较弱的云外补偿下沉气流、云下冷流出、冷堆、水平涡对以及中层绕流、分裂等风暴的基本结构特征。试验表明, 为了能够模拟中- β 尺度对流风暴系统在大尺度环境中的发生、发展和演变, 以及能描述其内部的结构特征, 采用 2 km 的水平网格距和与之相匹配的 0.5 至 1.0 km 之间的垂直网格距是适当的。我们所要描述的风暴系统是 20~200 km, 因此在物理上这样的网格距大小也是可行的。另外, 模拟还表明, 模式所采用的边界条件能够抑制波的反射, 在有效的模拟时间里, 保证了模拟结果的正确性。

本文还对一个实际观测强对流风暴进行模拟, 并与其他同类数值模式的模拟结果, 以及实测 Doppler 雷达观测结果进行比较分析, 进一步表明我们建立的模式具有一定的实际模拟能力, 能够部分地再现实际风暴的内部结构特征, 从而为研究强对流风暴以及未来进行临近数值预报提供一个基础模式雏形。

参 考 文 献

- 1 王东海、周晓平, 1996, 短时风暴数值预报模式研究 I. 模式的理论框架, 大气科学, 20, No.1, 1~11.
- 2 Ray, P.S. et al., 1981, The morphology of several tornadic storms on 20 May 1977, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1643~1663.
- 3 Klemp, J.B. et al., 1981, Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1558~1580.

Study on the Very Short-Range Storm Numerical Forecasting Model Part II: Results of the Model Basic Experiments

Wang Donghai and Zhou Xiaoping

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The experiments and the simulation of an observed storm show that the model can describe the basic characteristics of convective storm systems, and it is likely to have the ability and possibility to provide a basic model for the nowcasting operational numerical prediction.

Key words storm numerical forecasting model meso- β weather system basic experiments for the model