

MM5 中尺度模式对一次冷锋天气系统 模拟结果的评价*

唐 灵¹, 林嘉仕², 詹杰民^{1,3}, 李毓湘²

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;

2. 香港理工大学土木及结构工程系, 香港;

3. 中山大学近岸海洋工程广东省重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 运用 MM5 模式对 2001 年 3 月 6—9 日华东和华南地区一次冷锋天气系统进行了模拟, 模拟的冷锋向南推移进度比观测的锋面大概滞后 2~4 h。模拟的海平面气压场和观测结果基本吻合。香港 3 个站点的模拟近地风场在积分的第 35~40 h 时间段的值比观测结果稍偏北、偏大, 但总体趋势一致。模拟的相当位温场能较好反映此次冷锋线的位置及南移趋势。500 和 850 hPa 位势高度场及风场的模拟结果反映出这段时期华西北—华北高压带的增强、南移及华西南—华中一带低压区的逐渐减弱过程。低压槽在一定程度上对冷锋的南下提供动力上的支持, 冷锋的南下加速了低压槽的消散进程。

关键词: 中尺度模式; 数值模拟; 冷锋; 低压槽

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 06-0114-06

近年来, 迅速发展的中尺度气象^[1]已经成为现代气象科学中的一个具有重大发展潜力和应用前景的领域。随着计算机科学的发展, 中尺度气象在利用卫星、雷达、探空气球、风廓线仪、自动观测站等获取中尺度观测资料的同时, 大量利用中尺度数值模式对大气运动过程和气象变化进行模拟和预报。这方面的模型主要有美国的 MM5、WRFS^[2], 法国高分辨率考虑城市热岛效应的 MESO-NH, 日本的东亚区域模式 (RSM), 中国国家气象中心的 HIAFS 以及新一代正在业务化实时运行的中尺度模式 GRAPES-MESO (引入了刘奇俊等发展的、考虑简单冰相过程的显式云物理量预报方案)^[3]等。另外国内还有把 MM5 与 ECOM-s 结合而形成的三维海—气耦合数值模式^[4], 把 MM5 与修正的法国陆面过程参数化模式 NR89 结合的耦合模式^[5]等。

MM5^[13] (第五代的 NCAR/Penn State 中尺度模型) 是由 MM4 经过大量的改进发展而来。而 MM4 (1987) 始于 PSU/NCAR 中尺度模拟系统^[14]。MM5 模式已被广泛用于对热带风暴等各种重要天气过程的中尺度模拟以及对环境科学的研究。另外 MM5 对于多种雾 (辐射雾、平流雾等)^[6]、降雪^[7]等也有较强的模拟预报能力。

MM5 由 NCAR/Penn State 中尺度模型经过了大

量的改进和功能上的拓展, 应用范围得到了极大的拓宽。主要表现在: ①多重嵌套的能力, 最多 9 重嵌套且各个子网格可以随时激活或关闭, 并可以移动。②水平分辨率、模拟尺度及地形和高度资料的分辨率等都得到很大的提高。③在原有基础上增加了非静力模式, 加入垂直加速度项。④对各种中尺度天气系统的物理过程模拟更趋逼真, 参数化方案选择增多, 适用性更为加强。⑤四维数据同化 (FDDA) 的能力。

MM5 所用到的基于沿地形的坐标 (x, y, σ) 的非静力模式基本方程主要有:

(1) 压力方程

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma \nabla \cdot \mathbf{V} = - \mathbf{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma}{T} \left(\frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_0 \right) \quad (1)$$

其中 p' 为压力扰动, 在模式中, 实际忽略了右边括号里的最后一项, 它表示由于热膨胀效应而导致气压的增加。

(2) 动量方程

方向分量:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = - \mathbf{V} \cdot \nabla u +$$

* 收稿日期: 2007-01-05

基金项目: 香港理工大学大气与都市空气污染策略研究发展计划和国家自然科学基金资助项目 (40476012)

作者简介: 唐灵 (1979 年生) 男, 博士研究生; 通讯联系人: 詹杰民; E-mail: stjzm@mail.sysu.edu.cn

$$\left\{v\right\} + u\frac{\partial m}{\partial y} - v\frac{\partial m}{\partial x} - ew\cos\alpha - \frac{uw}{r_{\text{earth}}} + D_u \quad (2)$$

y方向分量:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho}\left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p}\frac{\partial p'}{\partial y}\frac{\partial p'}{\partial \sigma}\right) = -V\cdot\nabla v + \left\{u\right\} + u\frac{\partial m}{\partial y} - v\frac{\partial m}{\partial x} + ew\sin\alpha - \frac{vw}{r_{\text{earth}}} + D_v \quad (3)$$

σ 方向分量:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho}\frac{g}{p}\frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma}\frac{p'}{p} = -V\cdot\nabla w + g\frac{\rho}{p}\frac{T'}{T_0} - \frac{gR_d}{c_p}\frac{p'}{p} + q(u\cos\alpha - v\sin\alpha) + \frac{\dot{u} + \dot{v}}{r_{\text{earth}}} + D_w \quad (4)$$

(3) 热力学方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V\cdot\nabla T + \frac{1}{\rho c_p}\left(\frac{\partial p'}{\partial t} + V\cdot\nabla p' - \rho_0 g w\right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T}{\theta_0}D_\theta \quad (5)$$

另外还有水汽守恒方程和针对微物理变量（如云和降雨等）的预报方程，包括平流项和不同的源/汇项。

在空间差分水平方向上 MM5 采用 Arakawa B-Grid 上的跳点格式进行有限差分；在时间差分上采用二阶蛙跳式时间步长方案，对某些项采用时间分裂方式，这样可以提高计算效率。

1 方案与并行计算

1.1 模式设置及方案描述

本次模拟采用最新的 MM5 V3.6 版本，非静力模式。模拟的粗网格范围大致以香港附近为中心（21.21°N 112.40°E），主要覆盖中国东部和南部（面积大约 5130 km×3330 km）地区（图略）。采用双向反馈的三重嵌套，分辨率分别为 45 km、13.5 km 和 4.5 km，水平格点数分别为 115×75、85×35 和 61×35。其中最细的 4.5 km 网格主要覆盖珠江三角洲的大部分地区（包括香港），垂直方向上采用 σ 坐标，从 1 到 0 共分成不等距的 30 层，模拟时间为 2001 年 3 月 6—9 日，最粗的网格积分步长为 60 s，1 h 输出一次预报结果。

本次模拟可分辨尺度降水采用加入了过冷水的混合相方案，而不可分辨尺度的次网格降水则在三个不同尺度网格分别采用了适合较低分辨率的 Betts-Miller 方案、平衡可分辨尺度降水和对流降水的 Grell 方案和基于辐合、倾向于较多对流降水和较少可分辨尺度降水的 Anthes-Kuo 方案^[8,9,13]；边界层参数化方案为高分辨率的 MRF 方案；辐射采

用云辐射方案。粗网格侧边界条件采用松弛流入流出方案，侧边界缓冲区采用了 4 个格点。细网格则采用依赖时间的侧边界条件，最外面的两行（列）上所有预报变量取指定值。地面温度取 5 层土壤模式。

地形高度数据采用 30 s 分辨率的全球地形数据，植被/陆地类型采用 USGS (U.S. Geological Survey) 的 24 类全球资料。气象场采用 NCEP 6 h 间隔的数据作为初估场，经过再分析形成模式初值和侧边界条件。在 MM5 积分过程中，采用中国国家气象的观测数据对粗网格进行 Gressman 和 Mul-tiQuadric 目标分析以改善初估场，并在 MM5 模拟阶段结合目标分析阶段产生的表面数据，进行表面和高空场的牛顿松弛格点数据同化分析。

1.2 并行计算系统

大气的物理特征、独立的水平结构和明显的垂直层结特征使得对大气模拟的计算有较好的并发特征并大大提高并行计算的效率^[19]。本次模拟由于计算量比较庞大，计算由一个拥有主从 8 个节点的 PC (Pentium 4 2.8G) 集群来承担。此集群基于 Linux 9.0 平台和最新的 mm5 V3.6 版本，采用目前国际上流行的 beowulf 分布式内存集群架构。经过优化，此集群系统能够达到较高的运行效率，每个节点的使用率达到 60% 以上的较高水平，相对于单机运行，能提高到大约 5 倍的运行速度。

2 模拟结果及分析

2.1 近地面温度场的模拟

由北京时间 2001 年 6 日 08 时的天气分析可知，北纬 36° 以北的华北地区温度较低，在 8℃ 以下，其中华西北的宁夏、内蒙古、山西大部分地区在 0℃ 以下，低温带一直延伸到青藏高原地区，其中青藏高原北部地区甚至达到零下 20℃ 以下的低温；而从华中到华南地区的温度慢慢升高，范围 0~20℃；菲律宾南部及东南亚西南部等低纬度地区温度达到 28~30℃ 左右。从 σ=0.996 近地面层的模拟温度分布图（图 1）上可以看到，青藏高原及华北地区的低温区及低纬度地区的高温区都较准确地模拟了出来。

2.2 海平面气压和近地面风场的模拟

2001 年 3 月 6 日 00Z（世界时，北京时间为 3 月 6 日 08 时，以下皆同），内蒙古一带有一个冷高压区，台湾东北洋面大概 132°E 附近也存在一个高压区。到 7 日 00Z，从观测和模拟的海平面气压图（图 2a 和图 2c）都可以看到，随着冷高压的南移，在中国南部和东部地区出现了一条东北—西南走向

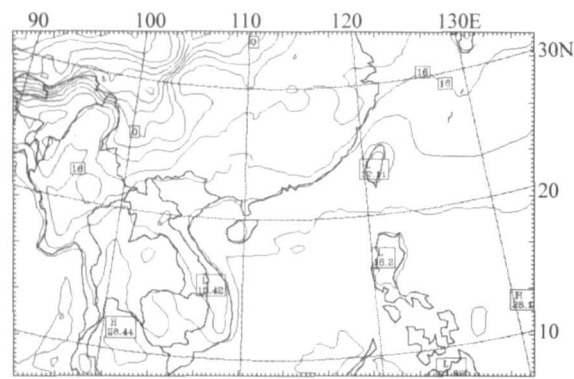


图 1 6 日 00Z 近地面模拟温度场

Fig 1 Simulation near surface temperature contour at 00Z Mar 6

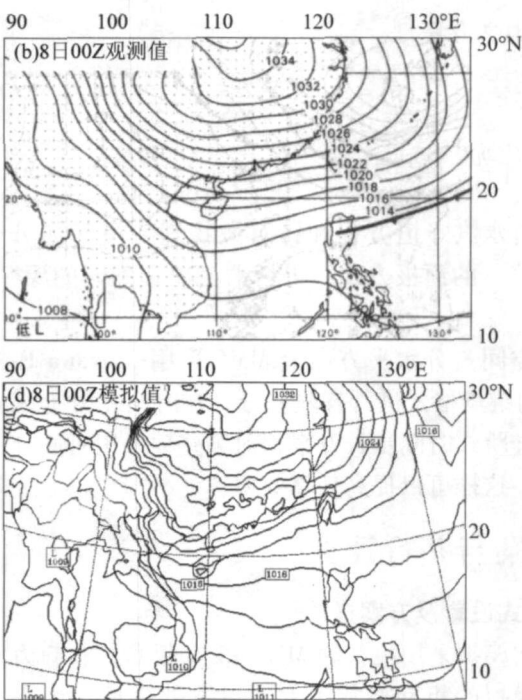
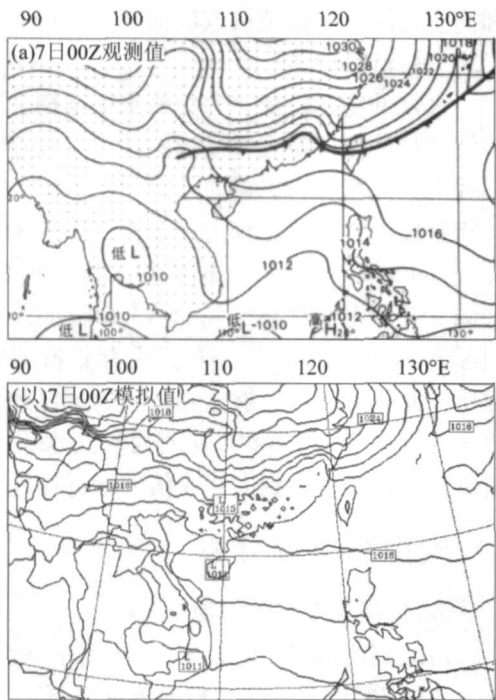


图 2 海平面气压图

Fig 2 Sea level pressure

从模拟的 6 日 00Z 近地风场 (图 3 a) 可以看到, 台湾东北洋面高压周围地区风场大致成顺时针旋转向外, 高压区周围洋面具有反气旋的特征。而大陆上的近地面风场则显得不太规则, 各地的风向变化较大, 不过大致还是受北部高压影响, 华中南部地区整体上吹偏北风。中国南部广西地区及东南亚地区主要吹偏南风。而冷锋过后的 8 日 00Z 中国东部、南部及其附近一带洋面主要吹偏北风 (图 3 b)。这些模拟出来的特征基本符合当时此地区的实际风场情况。

在模拟的 6 日 00Z—9 日 00Z 期间, 香港地区大致吹偏东风和北风。图 4 是根据香港天文台的测站风场数据和模拟数据得到的几个站点风向风速时

的冷锋, 西起广西南部, 向东向北经过广州、厦门、台湾中部并一直延伸到日本东北洋面, 该冷锋跨越海面 and 陆地, 由于阻力的不同, 在海面的部分移动相对较快, 在陆地的部分移动相对较慢, 故在穿越岸线的一段形成了一个 “Z” 形的结构。该冷锋向南推移迅速, 于 8 日 00Z (图 2 b 和图 2 d) 已经到达菲律宾东北洋面, 并迅速减弱, 到 9 日基本消散。模拟的情况跟实测吻合得非常好, 较准确地重现了此一冷锋的演变过程, 但模拟的冷锋的位置比观测的位置大概滞后 2~4 h

间序列 (从 6—9 日共 72 h) 比较图, 由图 4 可以看到, 大帽山 (Tate's Cairn)、长洲 (Cheung Chau) 和香港机场 (Hong Kong Airport) 3 个站模拟 (Mod) 和实测 (Obs) 各个时刻的风向风速基本吻合, 受冷锋过境影响, 风向主要趋势为东南风逐渐逆时针偏转成偏北风。由于香港地形极其复杂, 受城市内部风及地形的影响, 有些地方的实测风出现一些不稳定的变化 (如香港机场), 3 个站在积分的第 35~45 h 之间模拟的风向比实际偏北, 风速偏大, 但总体趋势是一致的。

2.3 相当位温分布

模拟的相当位温 θ_e 图也很清晰地显示出冷锋的位置极其形成和发展过程。由 $\sigma = 0.995$ (近

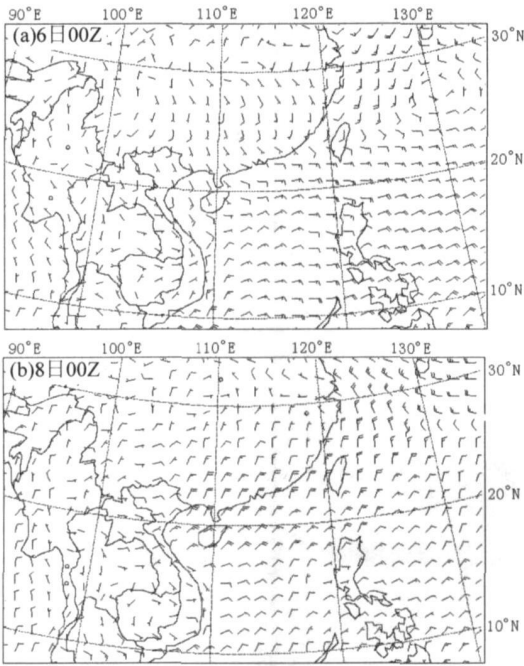


图 3 模拟近地风场 (a) 6 日 00Z (b) 8 日 00Z
Fig. 3 Simulation near-surface wind field at 00Z
Mar. 6 (a) and 00Z Mar. 8 (b)

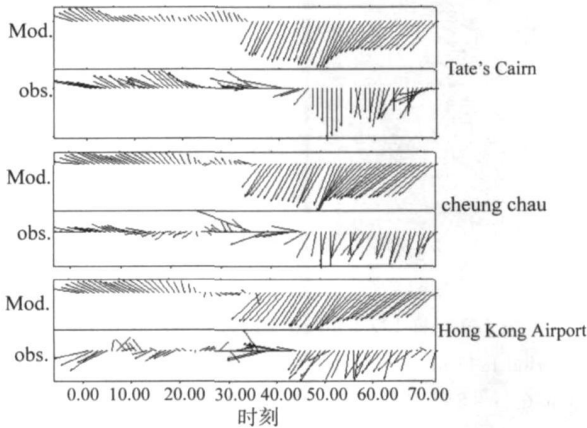


图 4 香港大帽山、长洲、香港机场的模拟近地风速风向与观测值比较图 (72 h)
Fig. 4 The comparison between simulation and observation time series near-surface wind velocity and wind direction in Tate's Cairn, Cheung Chau and Hong Kong Airport station

地面)层的等相当位温模拟图可以看到,在6日大约12Z(图5a)开始,华中南地区有一条狭长的等相当位温密集带开始形成,并随着时间的推移向华东华南地区推进,并且越来越密集,到7日00Z(图5b)已经非常明显且呈东北-西南走向,向东一直延伸到日本以东洋面,并推进到华南沿海一带。表征锋区的相当位温等值线密集区的推移运动跟冷锋的运动吻合得比较好,模拟效果跟实况基本一致,但是模拟结果显示的冷锋位置跟同时的观

测结果相比稍微偏北。

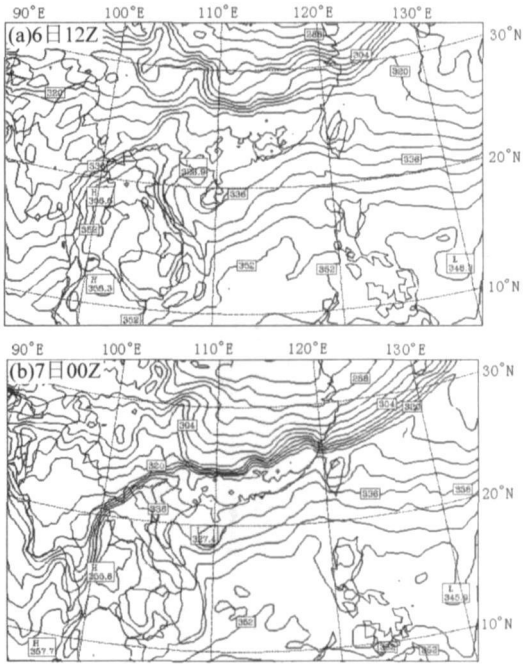


图 5 模拟近地面等相当位温图
Fig. 5 Simulation near-surface equivalent potential temperature at 12Z Mar. 6 (a) and 00Z Mar. 7

2.4 对中空模拟结果的分析

由模拟的6日00Z 500 hPa的高度场和风场(图6a, H代表相对高值, L代表相对低值,下同)可以看到,模拟初期,在菲律宾以东洋面、东南亚西部地区各存在一个高压区,华西北-青藏高原地区则存在一个很弱的相对高压区,而大约在朝鲜半岛-日本海-日本北部一带上空则存在一个较大范围的低压区。在模拟时段内,中国南部500 hPa中空主要吹西风,且风向比较稳定。在6日00Z 850 hPa的低空(如图6b所示,850 hPa等高线以西高海拔地区的风场显示为近地面风场,图6c,下同),菲律宾东北洋面及华北往西直至青藏高原一带也各存在一个相对高压区与500 hPa相对应;日本海附近上空也有一个强的低压区,范围一直延伸到中国东部及东北地区;青藏高原东南及云贵高原一带(大约90°E-110°E, 20°N-30°N)则存在四个小的低压区,在两端相对高压的夹击下,此低压区风场大致呈气旋式。到6日12Z(图6d,日本海低压发展成一个狭长的低压槽,延伸到中国东部长江流域一带上空,并随着华北高压的南移而向东移动,此时云贵4个小低压已经融合且开始减弱,而菲律宾东北洋面高压向西则为一高压脊。6日12Z(图6e,华北高压继续南移,此时云贵低压明显减弱,而日本海低压槽也开始减弱。

而 7 日 00Z (图 6 d), 云贵低压基本消失, 日本海低压槽也被大大削弱且移到日本上空。此低压槽的形成和发展过程跟此时冷锋的发生演变过程非常吻合, 形成一个中低空低压槽、近地面冷锋相配合的大气结构, 也给冷锋的移动提供动力上的支持。事实上, 到 7 日 00Z 日本东北部出现了一个强烈的气旋中心, 风暴的西南侧为从中国南部一直延伸到日本东北的冷锋, 而气旋的东北侧为暖锋和锢囚锋

同时存在。而受中高空 (500 hPa 以上) 西风 and 菲律宾东北洋面高压的影响, 在 6 日到 7 日之间, 华东—华南一带 850 hPa 上空主要吹西南风, 东南亚地区也是主要吹西南风。而随着华北高压南移, 偏北风开始影响这一区域, 我们由 7 日 00Z 的 850 hPa 高度和风场图可以看到, 在低压槽的附近存在很明显的风切变。

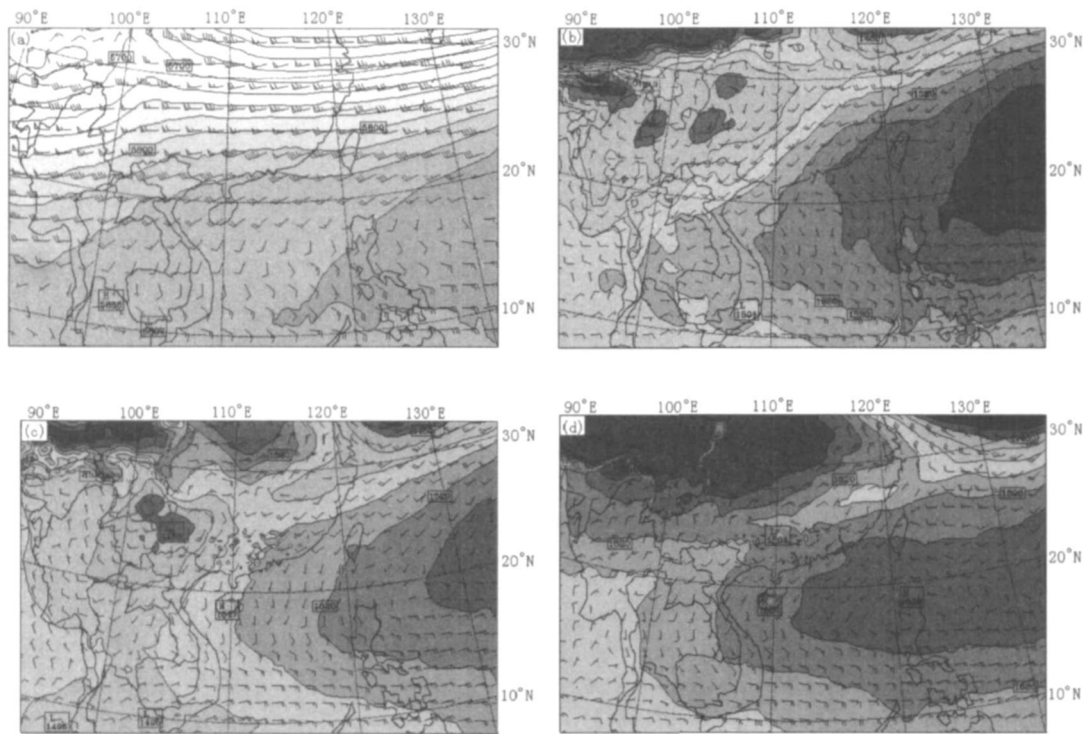


图 6 模拟高度场和风场 (a) 6 日 00Z 500hPa (b) 6 日 00Z 850 hPa (c) 6 日 12Z 850 hPa (d) 7 日 00Z 850 hPa
Fig 6 Simulation geopotential height contour and wind field in 500 hPa at 00Z Mar 6
(a) 850 hPa at 00Z Mar 6 (b) 850 hPa at 12Z Mar 6 (c) 850 hPa at 00Z Mar 7 (d)

由模拟结果知, 锋前华东—华南一线垂直方向 500 hPa 的相当位温比 850 hPa 的要低, 大气热力结构呈对流不稳定的特征, 锋后则呈现较稳定层结。但从锋前等相当位温图 (图 5 a 和 5 b) 可以看到, 锋前大气的高温高湿特征不明显, 且冷锋移动速度快, 冷锋过后华南地区大约降温 4~5℃, 强度不太大, 故此冷锋虽为这一地区带来一定的降水, 但雨量不大。由图 7 a 可以看到, 受冷锋及低空西南风的影响, 7 日 00Z 华南直到日本南部地区 850 hPa 上空出现一条狭长的高湿带 (图 7 a 华中南一带的颜色较深的区域), 而图 7 b 显示的是 7 日 00Z 的累积降水分布, 它们跟此时出现的冷锋位置对应得很好。另外模拟结果显示从 6 日 12Z—9 日 00Z 华南地区累积降水最高不超过 25 mm, 且降水

主要发生在锋前和冷锋过境时的 6 日 12Z—7 日 12Z 之间。这跟在模拟时段内, 华南地区 (包括香港) 普遍降水较少的特征是符合的。

3 结 论

从模拟的风场、高度场、温度场和相当位温场来看, 这次模拟还是比较成功的。在本次冷锋模拟过程中, 低空虽然出现 12 m/s 的风速极大值, 但并没有一般情况下的西南风低空急流, 850 hPa 低空在华北高压和台湾—菲律宾以东洋面高压之间东北部形成一个低压槽。另外, 模拟的冷锋位置在时间上有一定的滞后, 对香港几个站风速的模拟也偏大, 除了需要进一步改进物理参数以适合模拟的实际况外, 模拟所用的地形数据和陆地类型数据也

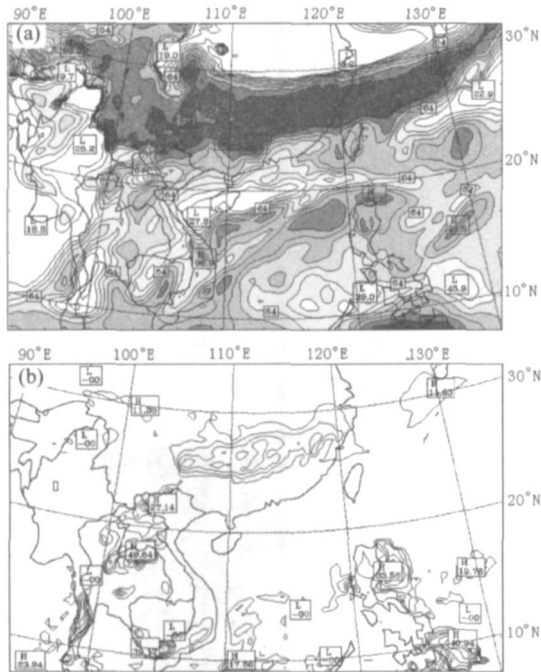


图 7 (a) 7 日 00Z 模拟相对湿度分布图 (b) 7 日 00Z 模拟累积降水分布图
Figure 7 (a) Simulation relative humidity contour at 00Z Mar 7 (b) Simulation accumulative precipitation at 00Z Mar 7

可能因为高速发展导致地形和陆地类型变化较快也需要更新; 模拟的四维数据同化只是在最粗的网格做了高空和地面的网格数据同化, 这些都是可以在以后的工作中做出改进的地方。

参考文献:

[1] 高坤. 中尺度数值预报模式的进展和应用[J]. 浙江气象科技, 1999 20(2): 1—5

[2] 孙健, 赵平. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析[J]. 气象学报, 2003 61(6): 692—701.
[3] 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 2004 62(5): 623—633.
[4] 元春霞, 黄立文, 吴国雄, 等. MM5 V3/ECOM—S 海气耦合模式的数值试验[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2003 27(4): 445—448.
[5] 殷达中, 陈家宜. 陆面过程参数化模式与 MM5 的耦合[J]. 大气科学, 2000 24(2): 177—186.
[6] 樊琦, 吴兑, 范绍佳, 等. 广州地区冬季一次大雾的三维数值模拟研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003 42(1): 83—86.
[7] 王文, 刘建军, 李栋梁, 等. 一次高原强降雪过程三维对称不稳定数值模拟研究[J]. 高原气象, 2002 21(2): 133—138.
[8] 王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验[J]. 应用气象学报, 2001 12(1): 41—53.
[9] 王晨稀. MM5 模式中不同对流参数化方案对降水预报效果影响的对比试验[J]. 气象科学, 2004 24(2): 168—176.
[10] 解以扬, 庞璐, 孟冬梅. 数值天气预报与并行计算[J]. 天津师范大学学报, 2001 21(4): 65—69.
[11] 张瑛, 毛连海. 用 MM5 对“98.6”连续暴雨过程的数值模拟分析[J]. 江西气象科技, 2004 17(1).
[12] 蒋建莹, 倪允琪. 一次梅雨锋暴雨过程多次度特征的诊断分析[J]. 气象学报, 2003 61(6): 673—683.
[13] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description of the fifth—generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5). NCAR/TN—398+STR[R]. NCAR Technical Note 1995.
[14] ANTHES R A, WARNER T T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies[J]. Mon Wea Rev, 1978 106: 1045—1078.

Application of Mesoscale Model MM5 to a Cold Front Weather System

TANG Ling², LAM K S¹, ZHAN J M², LI Y S¹

- (1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;
3. Guangdong Province Key Laboratory of Coastal Ocean Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Using the mesoscale model MM5, the cold front in South China and East China from March 6 to 9, 2001 was modeled. There is 2 to 4 hour lag between the simulation movement of the cold front and the observation result. The simulated result of sea level pressure agrees with the observed data. The time series near surface simulation wind velocity is larger and wind direction is more northerly than the observation result from 35 h to 40 h hour in 3 stations in Hong Kong, but as a whole the two results are accordant. The simulation equivalent potential temperature shows the position of the cold front moved southward. The numerical results of the geopotential height and wind fields in 500 hPa and 850 hPa show that the high pressure in north and northwest China was strengthened and moved south and the low pressure in Southwest China and middle China was weakened. The trough of low pressure provided some power for the movement of the cold front to a certain extent and the front speeded up the disappearance of the trough of the low pressure.

Key words: mesoscale model MM5, numerical simulation, cold front, trough of low pressure