

中尺度数值模式中湿过程参数化的 敏感性试验*

俞小鼎

(北京气象学院, 北京 100081)

E. Richard and R. Rosset

(法国图鲁兹第三大学气象实验室)

提 要

本文利用一个三维中尺度模式, 分别采用两种不同的湿过程处理方案 FPA 和 NCA 模拟同一个洋面冷锋个例, 以考察模拟结果对湿过程参数化方案的敏感性。两种方案的区别在于前一种使用了次网格湿对流参数化而后者没有。通过比较分别使用 FPA 和 NCA 方案所进行的模拟 FPS 和 NCS, 发现冷锋结构在两者间出现较大差异。从 850 hPa 等压面 $|\Delta\theta_e|$ 等值线图所显示的结构看, NCS 中冷锋呈现为一长一短两条锋带, 而 FPS 中冷锋仅呈现为一条锋带。在相应的冷锋横向垂直剖面中, NCS 中存在两个相邻的锋面垂直环流, 而 FPS 中只有一个。另外, NCS 中对流不稳定的冷锋区出现垂直运动过分发展的现象, 而 FPS 中不存在这个问题。通过与卫星云图比较, 我们注意到, NCS 中尽管出现了垂直运动过分发展的现象, 但相对于 FPS 而言, 其模拟的冷锋结构与实际较为接近, 成功地模拟出云图上显示的双冷锋结构。NCS 中垂直运动过分发展的一个重要原因是模式中采用的静力平衡近似。FPS 中次网格对流参数化方案的使用, 通过减少甚至消除对流不稳定性, 一方面使垂直运动的过分发展倾向受到约束, 另一方面也可能使在对流不稳定层结下的锋区环境中本应出现的中尺度结构失去了形成的机会。

关键词: 中尺度模式; 湿过程参数化; 冷锋; 静力平衡近似; 次网格对流参数化。

一、引 言

近年来, 随着计算机的普及和其能力的迅速提高, 中尺度数值模式获得了越来越广泛的应用。目前以制作有限区域数值天气预报为目的的中尺度模式大部分都采用了静力平衡假定。在这类静力平衡中尺度模式中, 对湿过程的处理比粗网格大尺度模式中的精细, 具体的方案很多。我们以是否采用对流参数化方案为标准, 将每次具体模拟中可能采用的湿过程参数化方案分为两大类: 第一类方案沿用了大尺度模式中的方法, 认为湿过程由格点可分辨尺度的凝结降水和次网格的深厚积云凝结降水所构成。因此除了要对格点尺度的凝结降水过程做显式处理外, 还需使用适当的对流参数化方案表示次网格深对流的效应。我们参考张大林等^[1]的做法, 将这类处理湿过程的方法称为 FPA (Full Physics Approach), 用该类方案进行的模拟称为 FPS (Full Physics Simulation)。第二

1994年8月17日收到, 1994年11月30日收到修改稿。

* 本研究得到国家教委留学回国人员科研资助金的部分资助。

类方案基于中尺度模式中水平和垂直分辨率较高这个事实,只考虑格点可分辨尺度的凝结降水过程,而忽略次网格湿过程。这类方案简称为 NCA (No Convection Approach, 注意这并不意味着不考虑对流, 仅仅表示不使用次网格对流参数化方案), 相应的模拟称为 NCS (No Convection Simulation)。在本文中我们将针对一次洋面冷锋个例来比较和讨论上述两类方案。

Rosenthal^[2]最早在静力平衡中尺度模式(格距 20 km)中采用 NCA 方案对台风进行模拟。他认为 NCA 允许深厚积云对流和大尺度环境间的相互作用以更加自然的方式进行, 而 FPA 中的积云对流参数化方案含有太多随意(人为)的成分。文献[3]在湿大气的二维锋生模拟中(格距 20 km), 也使用了 NCA 方案。郭英华等^[4]在一系列有关迅速加深的洋面温带气旋的个例研究中, 使用 NCAR/PSU 的 MM4 模式^[5]做过各种湿过程参数化方案的敏感性试验, 发现 NCS 给出的气旋加深速度与观测最接近。应用同样的模式, 张大林等^[1]利用 1977 年造成美国宾州 Johnstown 洪水的天气个例, 将 FPS 和 NCS 结果与主客观分析场进行比较。他们发现, 即使格距小到 12.5 km, NCS 仍未能模拟出与飑线和 MCC 相应的对流降水, 相反却夸大了与中尺度低涡对应的层状降水; 而 FPS 却相当好地模拟出飑线和 MCC。另外他们还发现, NCS 倾向于产生过强的上升速度和降水。类似的 NCS 中系统过分发展的现象在文献[6,7]中也有所提及。因此, 与文献[2—4]的结果相反, 张大林等^[1]的结果明显地倾向于 FPA 方案。

需要指出的是, 张大林等^[1]所研究的中尺度降水系统处于夏季弱温度梯度的大尺度环境中, 潜热释放和显热垂直输送控制着中尺度降水系统的发展。因此, 如张大林等所建议的, FPA 对于 NCA 优劣与否还需在温度梯度较大的强斜压环境下对 FPA 和 NCA 方案进行进一步的比较。这正是我们所做的, 并将在本文中给以简述的工作。我们选取英法等国在 1987—1988 年期间联合进行的中尺度锋试验(FRONT87)中的一次冷锋个例(IOP₂), 将 FPS 和 NCS 的结果进行比较, 并根据卫星云图对每种方案的结果进行评判, 并对造成每个方案, 各自缺陷的可能原因进行初步的探讨。

二、模式简介和试验设计

我们使用的模式为法国图鲁兹第三大学气象实验室的三维中尺度静力平衡模式 SALSA。这个模式是在原 Nickerson 等^[8]提出的模式基础上进一步改进而成的。该模式对物理过程的处理比较精细。在网格可分辨的湿过程的处理中, 将总水含量(水汽+云水)和雨水含量都做为预报参量, 并对暖云的微物理过程进行了参数化。次网格深对流采用了 Bougeault 提出的方案^[3], 其形式类似于 Arakawa-Schubert 方案^[10], 但闭合假定与郭晓岚方案^[11]相似。边界层湍流通量参数化采用了一阶半闭合方法^[12]。近地面层参数化采用 Louis 方案^[13]。

模拟区域及地形, 还有初始时刻锋面的位置如图 1 所示。模拟区域内设有 70×70 个水平格点, 格距为 40 km, 垂直分 30 层, 上边界气压 $p_t = 75$ hPa, 时间步长为 40 s。初始场的获得是先将法国气象中心的有限区模式 Peridot 的客观分析场(其分析方法为多元最优插值)内插到 Salsa 模式的格点上, 然后调整至整层散度为零的状态。侧边界条件是在时间上内插 6 小时间隔的上述客观分析场而得到的, 边界到内部区域的过

渡区(4个格点)用松弛方法处理。分别采用 FPA 和 NCA 湿过程方案的模拟 FPS 和 NCS 都进行了 24 小时, 从格林威治时间 1987 年 11 月 11 日 12 时至 12 日 12 时。

三、结果及讨论

初始时刻(1987 年 11 月 11 日 12:00UTC)的冷暖锋位置如图 1 所示。锋面气旋已开始锢囚, 锢囚点位于爱尔兰以北约 200 km 的洋面上。一条冷锋从锢囚点向西南方向伸展, 暖锋从锢囚点伸向东南, 穿过爱尔兰和英格兰到法达国。相当位温 θ_e 的垂直剖面(图略)显示: 冷锋区的下层为条件不稳定, 中上层为弱条件稳定, 非常有利于对流的发展。模拟结果表明, FPS 和 NCS 间的大尺度特征是非常相似的, 但中尺度特征不尽相同, 尤其在冷锋的中尺度结构方面, 二者间呈现出较大的差异。

首先让我们比较一下 850 hPa 等压面上 $|\Delta\theta_e|$ 场所呈现的冷暖锋结构在 FPS 和 NCS 间的异同(图 2)。先检查初始时刻 6 小时后(1987 年 11 月 11 日 18:00UTC)的情况(图 2a、2b)。我们发现, 无论 FPS 还是 NCS 中, 暖锋都比初始时刻向东偏北方向移动了近 300 km, 其结构在二者间是相似的。但此时冷锋的结构在 FPS 和 NCS 间出现了明显的差异: 前者中冷锋表现为一条波状的狭长强 $|\Delta\theta_e|$ 带外, 在其前面还有一条较短的强 $|\Delta\theta_e|$ 带, 呈现出明显的双锋带结构。换句话说, 在初始时刻 6 小时后, FPS 中只有一条波状的冷锋带; 而 NCS 中, 除了一条波状的主冷锋带外, 在其前方还有一条副冷锋形成。3 小时后(1987 年 11 月 11 日 21:00GMT)系统进一步东移, 但上述特征依然保持(图 2c、2d)。

现在我们来比较一下 FPS 和 NCS 中冷锋附近相当位温 θ_e 的垂直剖面(图 3)。剖面显示, 在初始时刻 6 小时后, 下层(3 km 以下)冷锋区中 θ_e 的垂直结构在 FPS 和 NCS 间有明显的不同: NCS 中(图 3b), 冷锋区的 θ_e 等值线出现明显的折叠, 造成一定范围内的强条件不稳定层结; 而 FPS 中(图 3a), 冷锋区中未出现 θ_e 等值线的折叠, 相应的垂直层结为弱条件不稳定(3 km 以下)。3 小时后(1987 年 11 月 11 日 21:00UTC), 上述冷锋区中 θ_e 的垂直结构在 FPS 和 NCS 间的差异仍十分明显(图略)。NCS 中由于 θ_e 等值线的折叠, 除了产生较强的条件不稳定层结外, 还在折叠

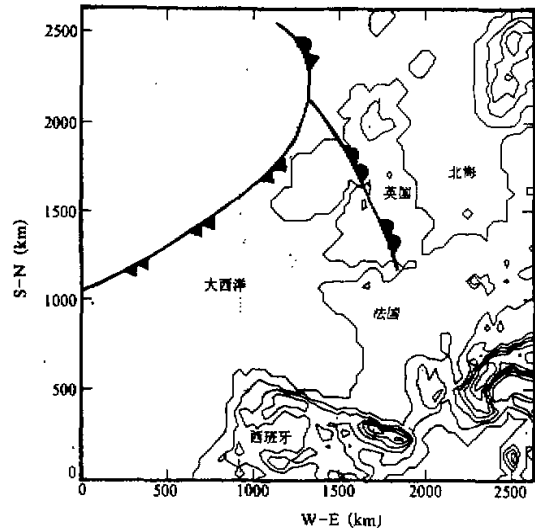


图 1 模式区域及初始时刻锋面位置示意
地形等高线间隔为 500 m, 初始时刻为 1987 年 11 月 11 日 12:00UTC

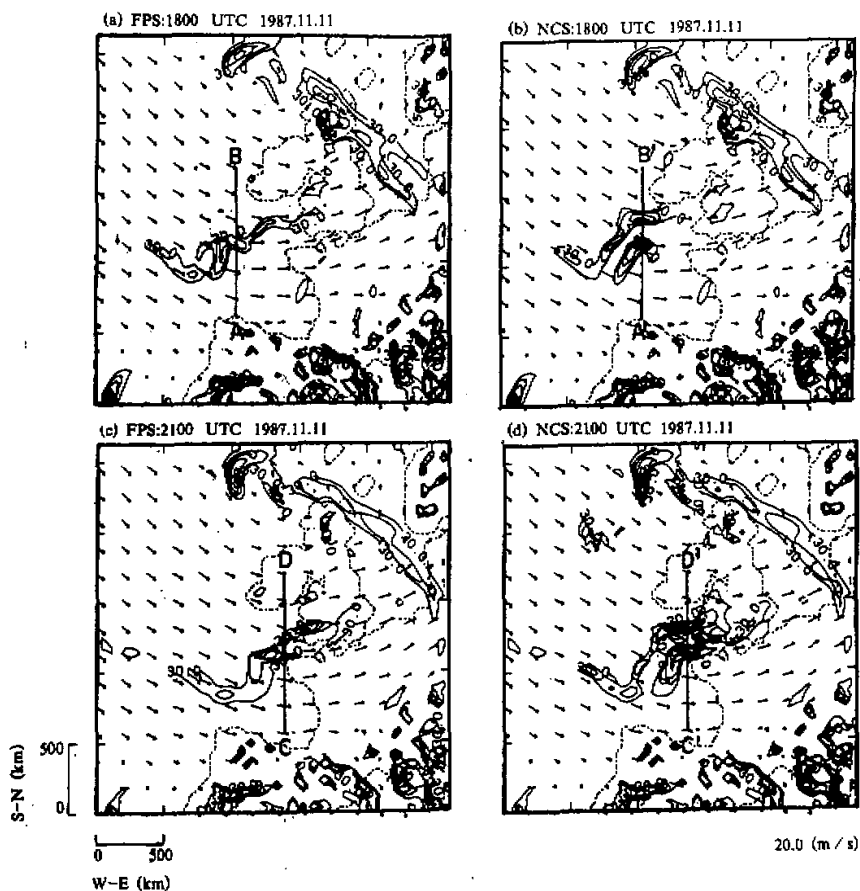


图 2 850 hPa 等压面上 $|\Delta\theta_e|$ 场在 FPS 和 NCS 间的比较

背景为风矢量场, θ_e 为相当位温, $|\Delta\theta_e|$ 单位为 $1\text{ K}/1000\text{ km}$; 等值线间隔 10 单位, 小于 30 单位的等值线未绘出。AB, A'B', CD 和 C'D' 指示垂直剖面位置

区的两边造成了两个 $|\Delta\theta_e|$ 较强的狭区, 对应于 850 hPa 等压面 $|\Delta\theta_e|$ 图上 (图 2b) 的双冷锋结构。

最后, 我们来比较一下 FPS 和 NCS 中冷锋附近的垂直速度剖面 (图 4)。在初始时刻 6 小时后 (图 4a、4b), FPS 中冷锋前沿有一上升速度极大区; 而 NCS 中, 对应于冷锋的双锋带结构, 有两个闭合环流出现, 在垂直速度场上呈现为“正负正负”的形式。我们还注意到, 冷锋区中上升速度在 NCS 中比在 FPS 中要小得多, 其最大值分别为 22 cm/s 和 8 cm/s , 相差近 3 倍。3 小时后 (图 4c、4d), FPS 中, 位于冷锋前沿的上升速度极大区分裂为两个紧邻的极大值中心, 另外在冷锋后有下沉气流发展; NCS 中, 除了冷锋前有另一上升速度区发展外, 其余部分的结构与 3 小时前类似, 只是垂直速度变得更大。锋区上升速度最大值在 FPS 中为 17 cm/s , 而在 NCS 中为 110

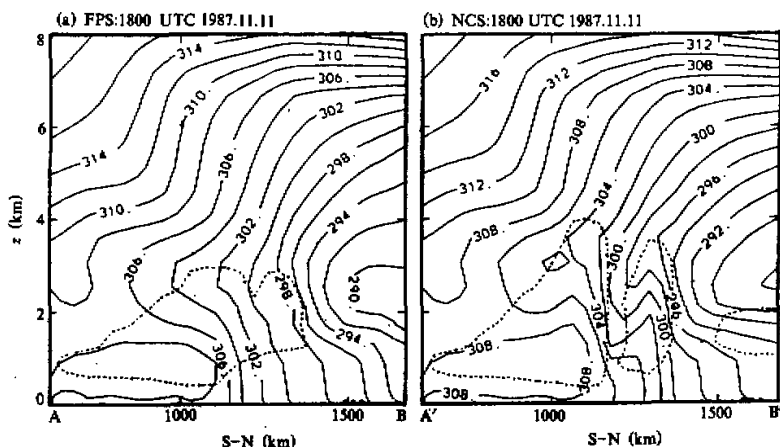


图3 FPS和NCS间冷锋横向剖面内相当位温 θ_e 场的比较
剖面位置如图2中AB, A'B'所示。 θ_e 的单位为K, 虚线内为云区

cm/s, 前者仅为后者的1/6。考虑到模式格距为40 km, NCS中110 cm/s的垂直速度意味着 $40 \times 40 \text{ km}^2$ 区域上空的平均上升速度超过1 m/s, 这显然是过分夸大的。与过分发展的垂直速度相应, NCS中降水强度也夸大了(图略)。

综上所述, 冷锋在FPS和NCS中呈现出不同的中尺度结构, 前者中为单带结构, 后者中为明显的双带结构。此外, NCS中冷锋区出现垂直速度过分发展的现象, 而FPS中锋区垂直速度一直保持在合理的范围内。在抑制垂直速度过分发展方面, FPA方案显然比NCA方案优越。这一点与张大林等^[1]的结果是一致的。但在模拟冷锋结构方面, 又是哪一个更好些呢? 即实际的冷锋是单带还是双带结构? 图5为11日18时(1987年11月11日18:00UTC, 即模拟初始时刻6小时后)静止气象卫星Metersat的红外云图。从图中可清楚地看到与锢囚锋、暖锋和冷锋相应的云系。我们特别注意到冷锋云系的双云带结构是比较明显的, 表明云图上显示的冷锋结构与NCS的结果较为符合。此外, 当冷锋移过爱尔兰时, 根据地面观测结果曾分析出第二个不连续面^[14]。因此, 我们大致认为, 相对于FPS中的单冷锋结构, NCS给出的双冷锋结构较为接近实际。

NCS中垂直运动过分发展的问题, 文献[1,6—7]中都曾论及。特别是张大林等^[1]对此曾进行过较详细的讨论, 并将这一现象的起因归结为一种由数值原因引起的、机制上类似于CISK的不稳定性。我们认为这仅仅是部分的原因。在讨论中他们忽略了重要的一点, 即静力平衡假定在不稳定大气层结下是否仍然有效。本文第一作者^[15]曾针对非静力平衡模式和静力平衡模式两种情况, 用线性正态模方法对静力不稳定环境下大气锋区的对称不稳定性进行过分析(分析中假定大气为绝热无摩擦的)。结果表明: (1) 非静力平衡条件下, 最不稳定模近似垂直取向, 其增长率为一有限值; (2) 若采用静力平衡近似, 则最不稳定模严格地垂直取向, 其增长率为无穷大。换句话说, 当采用静力平衡近似后, 在大气层结不稳定情况下, 发展最快的锋区对称不稳定模的取向与非静力平

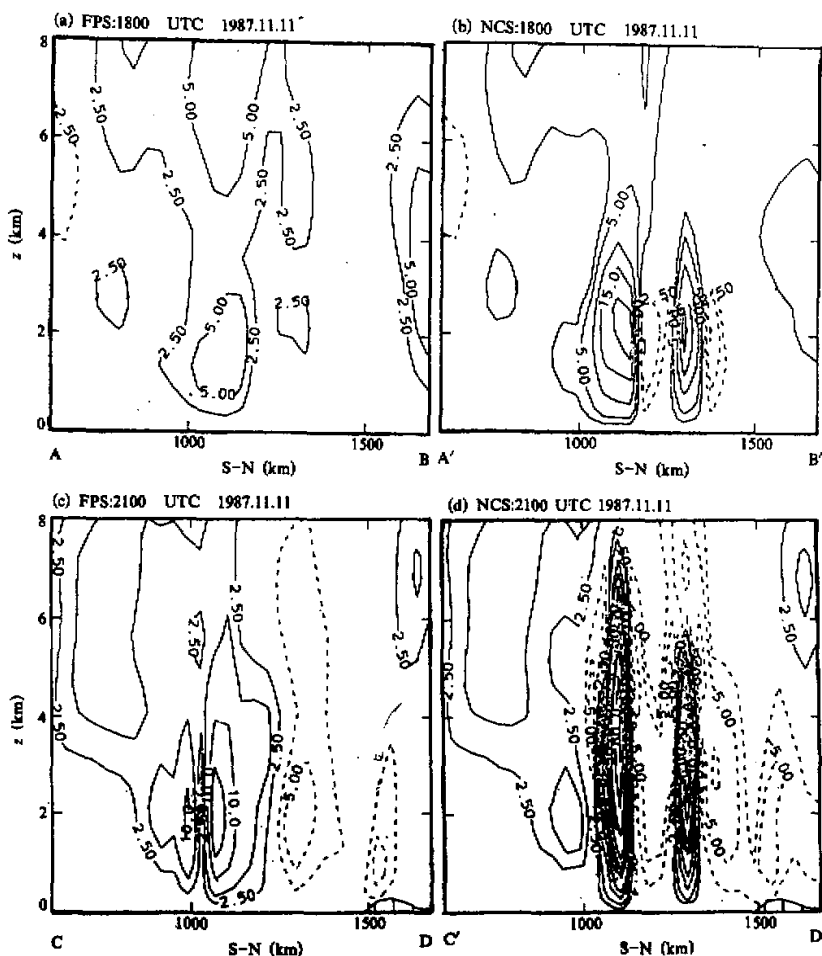


图4 FPS和NCS间冷锋横向剖面内垂直速度场的比较

剖面位置如图2中所示, 垂直速度单位为 cm/s

衡模式中相应模的取向大致相同(垂直方向), 但其增长率大大超过非静力平衡模式中相应模的增长率。NCS中冷锋区3 km以下有较强的对流不稳定层结, 发生凝结后, 这种潜在的不稳定成为实在的, 其最不稳定模由于静力平衡近似而过快增长。我们推测这是导致NCS中垂直运动过分发展的一个重要原因。

FPS中由于使用了对流参数化方案, 没有出现垂直运动过分发展的现象。对流参数化方案给出对流加热率 Q_1 、干燥率 Q_2 , 以及对流降水强度。在垂直分布上, 一般说来, 加热率 Q_1 极大值所在位置相对较高, 干燥率 Q_2 极大值位置相对较低。这种配置倾向于增加高层上的温度和降低较低层上的湿度, 其结果使对流不稳定度趋于减小甚至消除, 从而使垂直运动的发展受到约束。

需要指出的是, 目前比较流行的对流参数化方案最初都是针对大尺度粗网格模式而提出的(如郭氏方案^[11]、Arakawa-Schubert 方案^[10]以及本文模式中采用的 Bougeault 方案^[9]), 并且在决定对流加热率和干燥率的垂直分布以及对流降水率的表达式时, 主要参照了热带对流的观测和诊断结果。本文涉及的是中尺度模式在中纬度强斜压区(冷锋)中的应用, 在这种情况下使用传统的对流参数化方案的合理性是令人怀疑的。首先, 根据热带对流的观测和诊断结果而确定的对流加热率、干燥率及对流降水率的表达式未必适用于锋面对流情况; 其次, 模拟中采用的格距为 40 km, 格点区域中只能容纳有限几个深厚积云单体, 作为传统对流参数化方案基础的准平衡假定^[10]不能成立。在这种情况下, 对流参数化方案不能构筑在合理的物理和逻辑基础之上。因此, 我们不能奢望其对本例中的锋面对流给出正确的描述。我们推测, FPS 没能很好地模拟出云图上显示的冷锋中尺度结构, 一个非常可能的原因是对流参数化方案的使用过于迅速地减少或消除了对流不稳定性。这虽然抑制了对流不稳定区中垂直运动的过快增长, 但同时也使得在对流不稳定的锋区环境中本应出现的中尺度结构失去了发展的机会。而未使用对流参数化方案的 NCS 中, 尽管对流不稳定层结下冷锋区的对称不稳定模由于静力平衡近似等原因而过快增长, 但该不稳定模的结构有可能是大致正确的。文献[16]指出, 条件对称不稳定可能是造成锋面雨区呈中尺度带状分布的主要原因。本文所研究的个例涉及对流不稳定层结下冷锋的结构, 可以看作是条件对称不稳定的一个特例。文献[16]中给出的条件对称不稳定环境中锋面环流的结构与本文 NCS 中相应的结构非常相似。

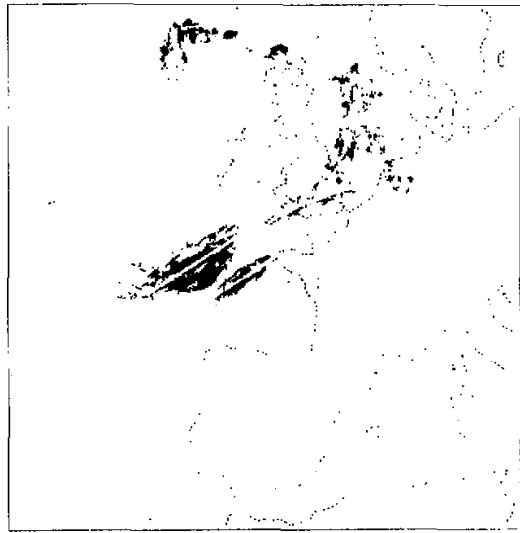


图5 静止气象卫星 Meteosat 红外云图
1987年11月11日 18:00UTC

四、小 结

本文使用两种不同的湿过程处理方案模拟同一洋面冷锋个例, 以考察模拟结果对模式中湿过程参数化方案的敏感性。结论如下:

(1) 采用了不同的湿过程参数化方案的模拟 FPS 和 NCS 给出了非常不同的冷锋中尺度结构。前者中冷锋为单带结构, 后者中为双带结构。云图和地面观测的结果表明 NCS 中的冷锋结构更接近于实际, 但锋区垂直运动有过分发展的现象; 相反, FPS 没

能很好地模拟出云图上显示的冷锋中尺度结构,但在控制垂直运动过分发展方面优于 NCS。

(2) FPS 中次网格对流参数化方案的使用,通过减少甚至消除对流不稳定性,虽然避免了对流不稳定层结下锋区垂直运动的过分发展,但同时也使得在对流不稳定的锋区环境中本应出现的中尺度结构失去了形成的机会。

(3) 造成 NCS 中对流不稳定层结下锋区垂直运动过分发展的一个重要原因是模式中采用的静力平衡近似。

致 谢: Dr. Borgeault 曾给予本项研究以很大的帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhang, Dalin, E.-Y. Hsie and M.W. Moncrief, 1988, A comparison of explicit and implicit predictions of convective and stratification precipitating weather systems with a meso- β -scale numerical model, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **114**, 31-60.
- [2] Rosenthal, S.L., 1978, 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.
- [3] Hsie, E.-Y., R.A. Anthes and D. Keyser, 1984, Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2581-2593.
- [4] Kuo, Y.-H. and S. Low-Nam, 1990, Prediction of nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a regional model, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 3-25.
- [5] Anthes, R.A., Hsie, E.-Y. and Kuo, Y.H., 1987, Description of the Penn state / NCAR Mesoscale Model Version 4 [MM4], NCAR / TN-282+STR, 46pp.
- [6] Molinari, J. and M.Dudek, 1986, Implicit versus explicit convective heating in numerical weather prediction model, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1822-1831.
- [7] Nordeng, T.E., 1987, The effect of vertical and slantwise convection on the simulation of polar lows, *Tellus*, **39A**, 354-375.
- [8] Nickerson, E.C., E. Richard, R. Rosset and D.R. Smith, 1986, The numerical simulation of clouds, rain and airflow over the Vosges and Black Forest mountains: A meso- β model with parameterized microphysics, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 398-414.
- [9] Bougeault, P., 1985, A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection, *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 2108-2121.
- [10] Arakawa, A. and W.H. Schubert, 1974, Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- [11] Kuo, H.L., 1974, Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection of large-scale flow, *J. Atmos. Sci.*, **22**, 40-63.
- [12] Bougeault, P. and P.Lacarrere, 1989, Parameterization of orographic induced turbulence in a mesoscale model, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1872-1890.
- [13] Louis, J.-F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- [14] Thorpe, A.J. and S.A. Clough, 1991, Mesoscale dynamics of cold fronts: structures described by dropsoundings in FRONTS 87, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **117**, 903-941.
- [15] Yu Xiaoding, 1992, Numerical simulation of marine cold frontal systems-impact of the moist processes and sensitivity to their parameterization, Ph. D. thesis, Universite Paul Sabatier, France, 157pp.
- [16] Bennetts, D.A. and B.J. Hoskins, 1979, Conditional symmetric instability- a possible explanation for frontal rainbands, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **105**, 945-962.

Sensitivity Test with Different Schemes for the Moist Processes Parameterization in a Hydrostatic Mesoscale Model

Yu Xiaoding

(*Beijing Institute of Meteorology, Beijing 100081*)

E. Richard and R. Rosset

(*Laboratoire d'Aerologie, Université de Toulouse III, France*)

Abstract

Sensitivities to different schemes of the moist physics in a hydrostatic mesoscale model is studied by applying this model in cold front case (FRONTS87-IOP2), in which large area of moist static unstable stratification is present within the frontal zone. Two kinds of moist simulations, one (called FPS) with a subgrid convection scheme and the other (called NCS) without it, are conducted. The cold front showed quite different structures between FPS and NCS. In FPS, only a single strong cold frontal band is present; but in NCS, two strong cold frontal bands, one long one short, are present. Besides, NCS experienced the dramatic development of vertical velocity in the moist static unstable frontal zone, whereas such problem did not appear in FPS. Having compared with satellite images and the ground-based observations, we found that although the overdevelopment problem is better controlled in FPS than in NCS, NCS gives a more realistic cold frontal structure in which a multiple banded structure is found. We think that the hydrostatic approximation in the model is mainly responsible for the overdevelopment problem in the moist static unstable frontal zone in NCS. The use of the subgrid convection scheme in FPS, at one hand, has the development of vertical velocity get controlled by reducing or even eliminating the moist static unstable stratification, but at another hand, may filter out some significant mesoscale frontal structure which would otherwise have developed in the moist static unstable cold frontal zone.

Key words: mesoscale model; parameterization of moist physics; cold front; hydrostatic approximation; convection parameterization scheme.