

洋面冷锋的三维数值模拟 ——潜热释放对冷锋结构的影响*

俞小鼎

(北京气象学院, 北京, 100081)

E Richard R Rosset

(法国图鲁兹第三大学气象实验室)

摘 要

通过比较一次洋面冷锋过程的干、湿三维模拟结果,揭示潜热释放对冷锋结构的影响。结果表明:由于潜热释放的作用,冷锋区的温度梯度和风矢量的气旋性切变大大地加强了;冷锋附近的涡度场和垂直速度场呈现出更多的更加紧密的中尺度结构;锋面非地转直接环流在湿模拟中比在干模拟中发展得更加充分并且具有更高的组织性;潜热加热倾向于增加锋面环流的强度,尤其是其上升支的强度。研究表明,潜热释放过程是形成冷锋前沿上方低层大气中狭窄强上升气流区的关键因素之一。

关键词: 冷锋结构,数值模拟,潜热加热,三维中尺度模式。

1 引 言

大气锋区作为冷暖气团之间狭窄的过渡区是在大气斜压波的生命循环中由变形和切变流场的作用而产生的^[1]。大气锋生过程同时产生抵消其作用的次级环流——锋面环流。锋面环流的上升支构成了锋面附近的上升运动,使得锋区成为云雨最经常出现的区域。与此同时,云雨形成过程中的凝结加热等湿过程又反过来对锋区的演化和结构产生影响。本文所要探讨的就是凝结潜热释放是如何影响冷锋结构的。

Mak 和 Bannon(1984)^[2]利用考虑了湿过程的二维半地转模式研究了湿过程(主要是凝结加热)对锋面结构的影响。Ross 和 Orlanski(1978)^[3], Williams 等(1981)^[4]以及 Hsie 等(1984)^[5]利用二维原始方程模式做了类似的工作。他们所得到的共同结论是凝结潜热释放加强了锋区的温度梯度和横跨锋区的气旋性风切变的强度,增强了冷锋前沿上方上升气流区的强度并减小了其水平尺度。

以上提到的有关湿过程影响锋区结构的工作,利用了二维半地转或二维原始方程模式,初始场都是理想的二维 Eady 波。本文是针对一个现实的冷锋例子,利用三维原始方程数值模式来研究湿过程对冷锋结构的影响。所选个例是 1987 年底至 1988 年初英法联合在大西洋和英吉利海峡地区进行的中尺度锋实验(FRONTS-87 experiment)中第 8 个

* 1993 年 10 月 25 日收到原稿,1994 年 4 月 2 日收到修改稿。

强观测周期(IOP8)中的一次冷锋过程,我们以下简称为 IOP8 冷锋。选择该个例的原因是:(1) IOP8 冷锋是一个非常经典的冷锋,位于海平面气压槽内,锋区有很强的温湿梯度和气旋性风切变;(2) 冷锋位于洋面,离陆地有一定距离,因而地形的影响较小;(3) 冷锋为准二维的,其垂直剖面的结构具有一定的代表性,便于与二维模式的结果比较。我们的目的通过比较这次冷锋过程的湿模拟和干模拟的结果,揭示潜热释放对冷锋结构的影响。

2 模式简介和实验设计

使用的模式是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。这一模式在原 Nickerson 等人的模式^[6]基础上,加进了对物理过程更加细致的处理,其动力框架,差分方案和物理过程参数化的精细程度与美国 NCAR/PSU 的中尺度模式 MM4^[7]大致相当。其中处理的物理过程包括湿过程、边界层湍流输送、辐射及地表热平衡等。湿过程的处理包括考虑了云雨微物理过程的格点尺度凝结降水参数化^[8]和次网格深厚积云降水的参数化^[9]。边界层湍流参数化采用了包括湍流动能方程的一阶半闭合方法^[10]。

为了达到本文的研究目的,分别进行了湿模拟(Moist Simulation)和干模拟(Dry Simulation)。我们也称湿模拟为充分物理模拟(Full Physics Simulation),简写 FPS。干模拟简写 DS。FPS 与 DS 的差别仅在于前者考虑了湿过程而后者没有,其它条件都是一样的。FPS 与 DS 都持续计算 24h,从格林威治时间 1988 年 1 月 12 日 06 时至 13 日 06 时。

模拟区域和地形(地形等高线间隔为 500m),及 24h 模拟期间内每隔 12h IOP8 冷锋的位置,如图 1 所示。24h 内,冷锋从大西洋上向东移动了约 1200km,到达英国、法国、和西班牙。模拟区域内有 70×70 水平格点,格距为 40km;垂直方向分为 30 层,上边界气压 $P_t = 75\text{hPa}$;时间步长为 40s。初始场的获得是先内插法国气象中心的区域模式 PERIDOT 的客观分析场,然后调整至整层散度为零的状态。侧边界条件是由在时间上内插 6h 间隔的上述客观分析场得到。

3 湿过程对冷锋结构的影响

3.1 充分物理模拟(FPS)

为了检验模式的性能,首先将充分物理模拟(FPS)的结果与每隔 6h PERIDOT 客观分析进行了比较:发现在冷锋的移动速度、强度和结构诸方面,两者之间是相当一致的。另外,预报的冷锋位置与卫星云图上显示的冷锋位置也大体一致。

图 2a 显示了 FPS 预报的 1988 年 1 月 12 日 15 时(即在模拟初始时刻 9h 之后)的海平面气压场形势、冷锋位置和降水(阴影区为强度 $\geq 10\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的降水区)。冷锋此时位于欧洲大陆以西几百公里处的大西洋上,呈近似东北—西南南向。冷锋北端有一弱暖锋发展,其交汇处位于一个由主低压中心伸出的次级低压舌中。主要降水区沿着冷暖锋及其相连的暖锋,尤其是集中在冷锋前的狭长暖区(暖区位置见图 3b)。在沿着冷暖锋的狭长降水区中,有一向爱尔兰岛凸出的部分。图 2b 为冷锋附近相当位温 θ_e 的垂直剖面,清楚地显示了冷锋附近的热力结构:冷锋区位于地面冷锋(SCF)之后,从地表向上逐渐向西倾斜,一直到 7km 左右。在冷锋区的前面存在一暖湿舌,其中 θ_e 的分布比较均匀。在这暖湿舌的前面(东面),又是一个相当位温 θ_e 水平变化比较大的区间,这一区间从地面扩展到

4km 左右高度。从地面冷锋(SCF)沿锋面向上以及在暖湿舌区有大片的云区(阴影区域)。另外,在冷锋区后面的对流不稳定的边界层内,也有小片云区出现。

3.2 潜热释放对冷锋结构的影响

FPS 预报与客观分析场两者之间的相当一致,为我们进行 FPS 和 DS 之间的比较提供了可靠的基础。我们选取 1988 年 1 月 12 日 15 时这一时刻(即在模拟初始时刻以后 9h)来比较干、湿模拟的结果。在此时刻冷锋发展到最强并处于相对稳定阶段。另外,它离陆地仍有一段距离,地形影响不大。

首先比较 850hPa 等压面上的温度、风矢量及相对涡度场(图 3)在 DS

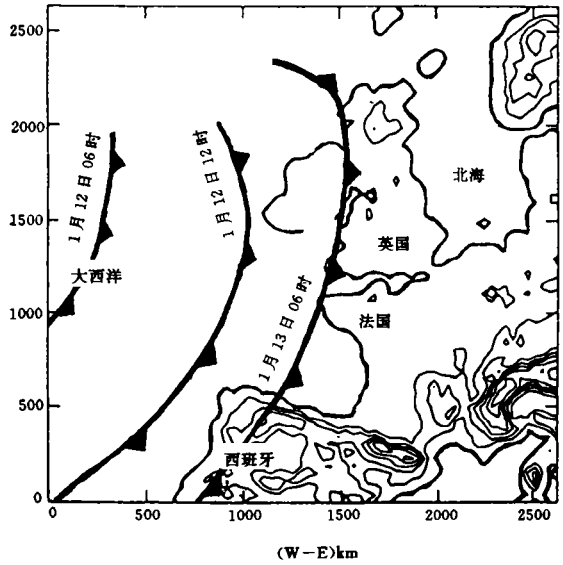


图 1 模拟区域及冷锋移动示意图
(地形等高线间隔为 500m)

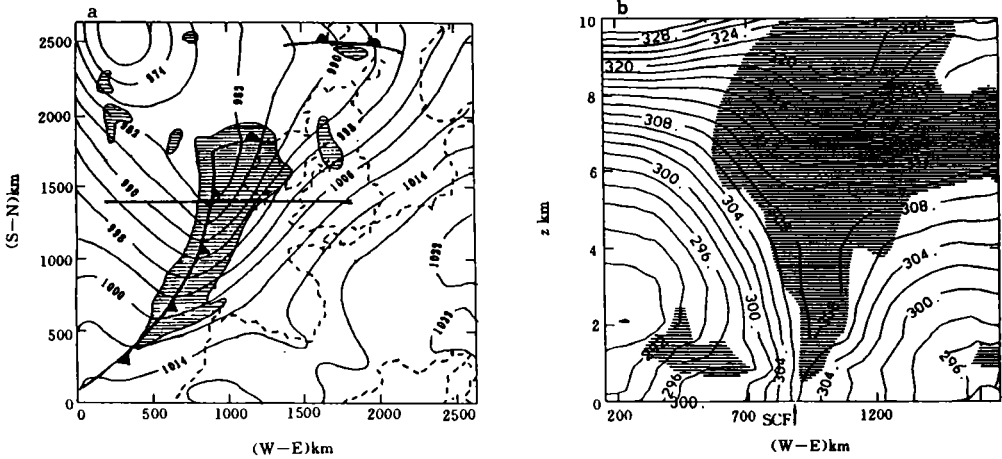


图 2 FPS 中处于充分发展阶段的冷锋

(a, FPS 预报的 1988 年 1 月 12 日 15 时地面气压场、冷锋及降水(阴影区域为强度 $\geq 10\text{mm/d}$ 的降水区,虚线为海岸线); b, 冷锋横向剖面内相当位温分布(剖面位置如 a 中粗实线所示,阴影区为云区))

和 FPS 中的异同。可以看到 850hPa 温度场与风场(图 3a, b; 其中粗黑实线代表后面将要讨论的垂直剖面位置)的主要特征在 DS 和 FPS 中是类似的:冷锋区相当明显,对应于等温线密集的一个东北北—西南南走向的狭长区域;在冷锋区及其后面有很强的冷平流,冷锋前有一明显的暖舌;从冷锋后到冷锋前,风矢量有明显的气旋性切变。DS 和 FPS 之间的差别主要是:冷锋区的等温线密度及冷锋附近风矢量气旋性切变在 FPS 中比在 DS 中

强得多,其水平温度梯度的最大值分别为 $3.7^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ (温度梯度分布图略);另外,冷锋前暖舌在 FPS 中也比在 DS 中强很多,其中心温度分别为 277.5K (4.2°C)和 274.5K (1.2°C),相差 3K 。分析潜热释放过程导致了冷锋强度的显著增强,作用的机制有两点:一是潜热释放直接加热锋前的狭长暖区从而加强了冷锋温度梯度;二是潜热加热使得冷锋所处的海平面气压槽加深,导致更强的低层气流向锋区的辐合,从而加强了锋生过程。图 3c,d 是相对涡度矢量的垂直分量,为清晰起见,只绘制了涡度垂直分量 $\geq 50 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 的等值线。在图 3c,d 中部的狭长高涡度区分别对应 DS 和 FPS 中冷锋附近的风矢量气旋性切变区;区域西北角的高涡度区对应地面低压中心(图 2a)。我们注意到,对应于冷锋的狭长高涡度区的强度在 FPS 中比在 DS 中要大得多,其最大值分别为 $3.85 \times$

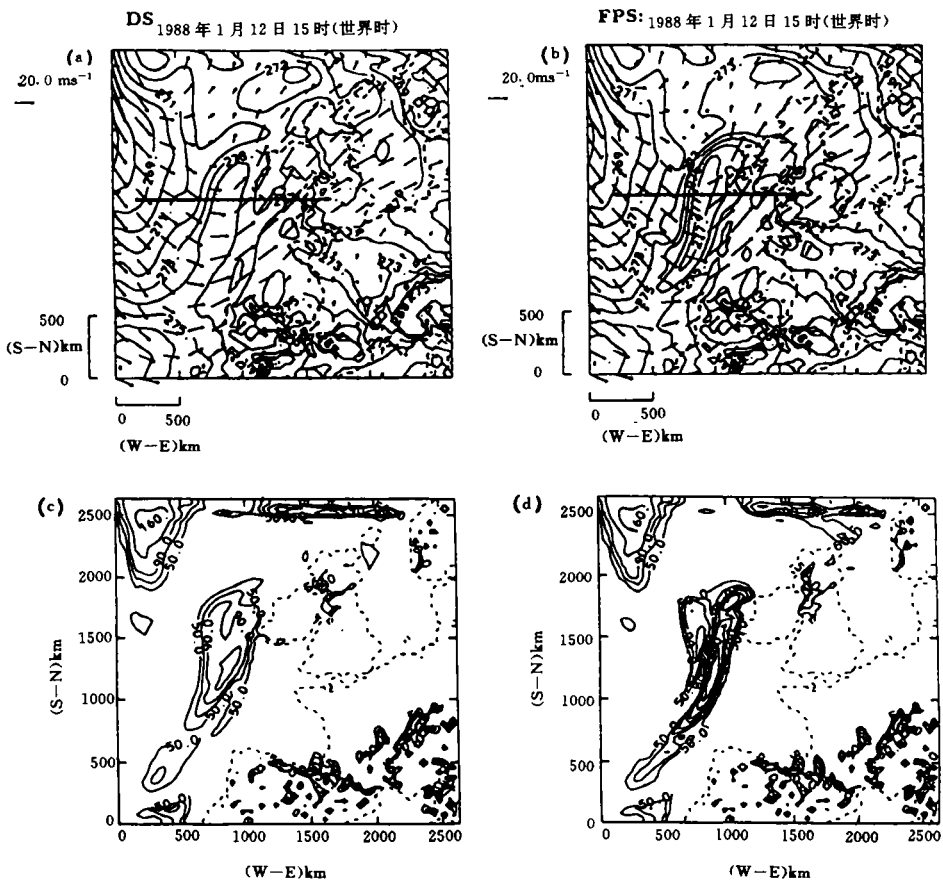


图 3 850hPa 等压面上 DS 和 FPS 温度场、风场和涡度场的比较

(a 和 b 分别为 DS 和 FPS 中 850hPa 等压面上温度场叠加上风场矢量,c 和 d 分别为相应的相对涡度矢量的垂直分量(温度单位为 K,等温线间隔为 1K;涡度单位为 10^{-6}s^{-1} ,只绘制了其值 $\geq 50 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 的等值线;虚线为海岸线;粗实线为随后图中的冷锋横剖面位置))

10^{-4}s^{-1} 和 $1.35 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$, 相差近 2 倍。另外, 相对于 DS 而言, 在 FPS 中, 一个狭长紧密的次极大值区从原来狭长高涡度区的北部分裂出来, 主极大涡度区也比 DS 中更狭长、紧密。表明潜热释放激发出干模拟中不存在的更小尺度的运动, 使得冷锋附近的涡度场呈现出更多的紧密的中尺度结构。

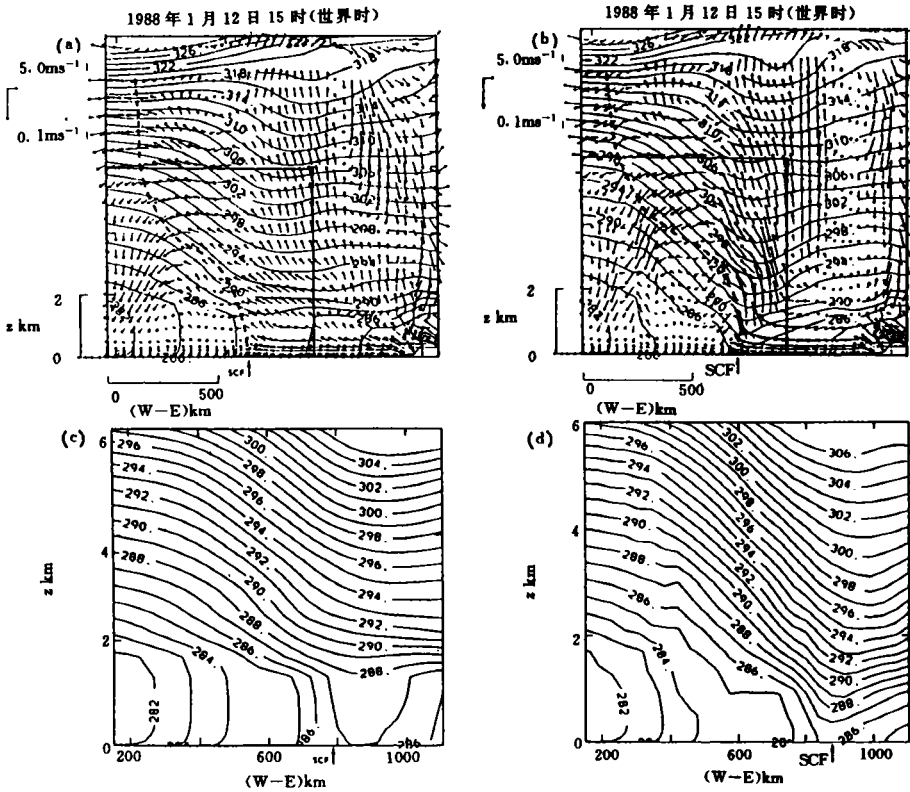


图 4 冷锋横向剖面内 DS 和 FPS 非地转垂直环流以及位温场的比较

(a 和 b 分别为 DS 和 FPS 中非地转垂直环流叠加上等值线间隔为 2K 的位温剖面(剖面位置如图 3a, b 中粗实线所示;粗虚线为连接各层低压槽的连线,黑方框框出了锋面环流区);c 和 d 分别为相应的锋面环流区内的位温场剖面,其等值线间隔为 1K)

为了进一步探讨潜热释放对冷锋结构的影响,下面将检验在冷锋的横向剖面内干、湿模拟结果在热力及动力场方面的差异。剖面的位置如图 3a, b 中的粗黑线所示。DS 和 FPS 中非地转垂直环流叠加上间隔为 2K 的位温等值线剖面图分别在图 4a, b 中给出。为了使冷锋周围的位温场更清晰详尽,在图 4c, d 中分别绘制了锋面环流区(图 4a, b 中黑框所标)内间隔为 1K 的位温等值线。在位温场中,无论在 DS 还是 FPS 中,冷锋区都大致从地面扩展到 7km 左右,但锋区位温的水平梯度在 FPS 中要比在 DS 中强得多,表明潜热释放对冷锋的加强作用。我们注意到 DS 和 FPS 间在锋区位温场垂直结构方面的一个重

要差异是在行星边界层。在 DS 中,位温等值线在边界层顶附近有一个明显的折角,从边界层上的西倾变为边界层内的近于垂直,其锋区边界层呈现出明显的混合层结构。这主要是由于海面温度较高,较大的向上的热通量驱动了边界层内湍流动能的发展,导致了充分混合的锋区边界层。而在 FPS 中,锋区等位温线在边界层内也仍是西倾的,在边界层顶没有太明显的折角,锋区边界层是干稳定的。我们认为 FPS 中锋区边界层等 θ 线较 DS 中西倾的原因可归结为潜热的微差加热效应。计算表明(图略),在冷锋区,从地面冷锋到其上空 1km 左右,潜热加热(FPS 中)的垂直梯度最大,再往上加热率梯度变得较弱。在靠近地表冷锋处,由于雨水蒸发而造成的降冷率达到最大,净加热率为负值;从地表向上,净加热率迅速增加,约在地面冷锋以上 200m 处变为正值,在 1000m 处达到极大值。因此,从 SCF 到其 1km 间强烈的微差潜热加热(下负上正)的作用使 FPS 中锋区边界层内等位温线保持明显的西倾。

考查 DS 和 FPS 中锋面附近的非地转垂直环流的情况(图 4a,b)。DS 和 FPS 的一个共同的特征是在冷锋附近存在一明显的热力直接非地转环流,其上升支位于锋前暖区,下沉支位于锋后的冷区。在图 4a,b 中用黑框框出了这一锋面环流区,其水平尺度约为 800km,垂直尺度从地表扩展到 6km。很明显,这个环绕锋区的非地转环流是由中低对流层中的锋生过程强迫而形成。可以看到,相对于 DS 而言,FPS 中的锋面环流发展得更加充分和更具有组织性;环流的强度,尤其是上升支的强度大大地加强了。还可看到,在 DS 和 FPS 中,锋面非地转环流的上升支只构成冷锋前大片上升区的左下部分,而这大片上升气流区前面紧接着是一片下沉区。至于加入湿过程使锋面环流加强的原因,我们认为主要有两个机制起作用。机制之一是凝结潜热释放加强了锋生过程,而由锋生过程强迫的锋面非地转直接环流自然得到了加强;机制之二在于饱和上升支中的凝结潜热释放减少了饱和区(图 2b)中的有效静力稳定度,进而导致锋面环流上升支的加强。对于下沉支,第二个机制不起作用。这也说明了为什么上升支比下沉支得到了更大的加强。

最后比较一下 DS 和 FPS 中冷锋周围的垂直速度场剖面。许多观测事实表明(Sanders, 1955^[11]; Ogura 和 Portis, 1982^[12]),典型冷锋附近垂直速度分布的主要特征之一是地面冷锋前沿上方的低层大气中存在一狭窄的强上升气流区。这一事实不能被 Hoskins 和 Bretherton(1972)^[13]提出的,考虑了非地转风平流过程的、绝热无摩擦二维半地转锋生模式所解释(Ogura 和 Portis, 1982^[12]),尽管这模式相当成功地解释了现实大气中的锋生过程^[13]并且用该模式计算的冷锋附近的风场及位温场特征与观测结果在定性方面是相当符合的^[12]。因此,要解释冷锋前沿上方低层大气中的狭窄强上升气流区的形成,还需要考虑边界层湍流摩擦和凝结加热等非绝热过程。在我们的 DS 中,考虑了较现实和详细的边界层湍流过程而未考虑凝结加热;而在 FPS 中,两者都给予了较合理的考虑。检验一下图 5a,b 不难发现,上述冷锋前沿上方低层大气中狭窄上升速度极大值区这一特征相当明显地存在于湿模拟 FPS 中;而在干模拟 DS 中,这一特征没有明显地呈现。我们由此可推知凝结潜热释放过程对于上述狭窄上升速度区的形成起了相当关键的作用。上述特征的形成涉及到大气斜压性、潜热释放和边界层摩擦之间的一系列相互作用。就潜热加热的作用而言,除了上面已提到过的使锋生过程加强和减少饱和上升区的有效静力稳定度,导致锋面环流尤其是上升支的加强外,潜热释放还加深了地面冷锋所处的海平面气压槽,加强

了向着 SCF 的边界层辐合,导致冷锋前沿上方上升气流的加强。文献[12]所分析的观测冷锋中,除了紧贴于冷锋前沿之上的狭窄上升气流极大区外,在冷锋前几百公里的对流层中层还存在一个很强的上升气流区。这个特征在我们的 DS 和 FPS 中都存在,只是由于凝结潜热的作用,其在 FPS 中的强度比在 DS 中明显地加强了。

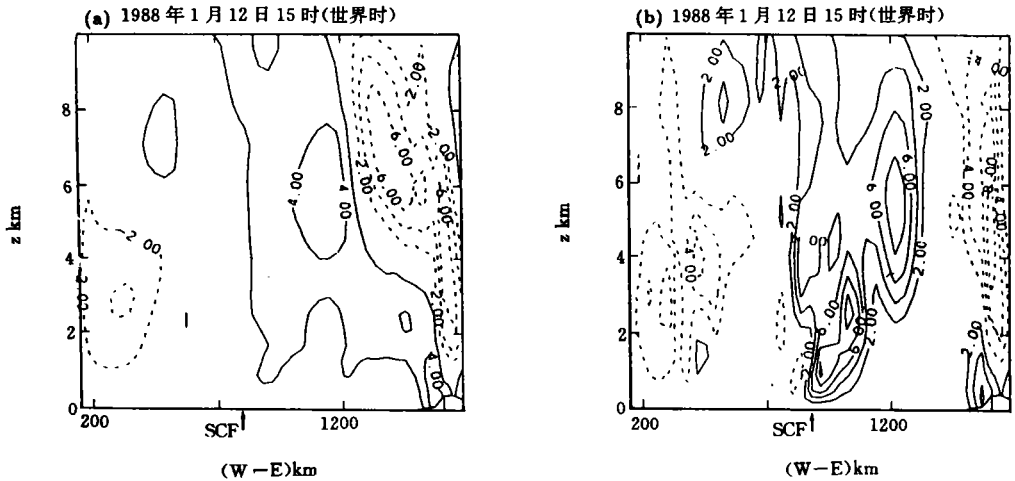


图5 冷锋横向剖面内 DS(a)和 FPS(b)垂直速度场的比较
(剖面位置如图 3a,b 中粗实线所示;垂直速度单位为 cm s^{-1})

我们还注意到,由于湿过程的加入,锋面附近垂直速度场呈现出更多的紧密的中尺度结构。在 FPS 中,锋面环流的上升支由大小不一的几个上升速度较大的中心构成,而这些中心在 DS 中或不存在,或不明显。环流的下沉支在 FPS 中有两个较强的下沉气流中心,而在 DS 中只有一个下沉中心。湿过程对于冷锋附近的涡度场也有类似的作用。除了我们前面已讨论过的 850hPa 涡度场情况(图 3c,d)外,在相对涡度(垂直分量)场的垂直剖面(图略)中,与冷锋对应的高涡度中心区由 DS 中的一个变为 FPS 中的三个。另外,我们的结果还表明潜热加热不仅使得冷锋前低空急流显著加强,而且导致其横向水平尺度大大缩小,呈现出更加紧密的中尺度结构(图略)。以上这些事实说明湿过程的加入不但使干模拟中存在的一些中尺度结构得到加强,而且还会激发出新的中尺度运动,形成干模拟中不存在的中尺度结构。

4 结 论

通过上面的讨论,我们得到以下结论:

(1) 由于潜热释放的作用,冷锋区的温度梯度和风矢量的气旋性切变,显著地加强了。

(2) 在干、湿模拟中,都有一明显的锋面非地转直接环流出现。但在湿模拟中这一锋面环流发展得更加充分并具有更高的组织性。凝结潜热释放倾向于增加锋面非地转环流的强度,尤其是其上升支的强度。

(3) 有关冷锋附近垂直速度分布的一个重要观测事实是冷锋前沿上方低层大气中存在一狭窄的强上升气流区。这一特征非常明显地存在于湿模拟中,但在干模拟中此特征并没有明显地呈现。这说明潜热释放是使得冷锋前沿上方狭窄强上升气流区形成的关键因素之一。

(4) 潜热加热使得冷锋附近的垂直速度场和涡度场呈现出更加丰富和紧密的中尺度结构。

致谢:本文中所用的客观分析场由法国国家气象中心提供。另外,在本文写作过程中,第一作者得到国家教委留学回国人员科研资助费的资助。

参考文献

- [1] Hoskins B J and West N V. Baroclinic waves and frontogenesis. Part I: Uniform potential vorticity jets flows—cold and warm fronts. *J Atmos Sci* 1970, 36: 1663—1680.
- [2] Mak M and Bannon P R. Frontogenesis in a moist semi-geostrophic model. *J Atmos Sci*. 1984, 41: 3485—3500.
- [3] Ross B B and Orlanski I. The circulation associated with a cold front. Part I: Moist case. *J Atmos Sci*. 1984, 35: 445—465.
- [4] Williams R T, Chou L C and Comelius C J. Effects of condensation and surface motion on the structure of steady-state fronts. *J Atmos Sci*. 1981, 38: 2365—2376.
- [5] Hsie E Y, Anthes R A and Keyer D. Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere. *J Atmos Sci*. 1984, 41: 2581—2594.
- [6] Nickerson E C, Richard E, Rosset R and Smith D R. 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*. 1986, 114: 398—414.
- [7] Anthes R A, Hsie E Y and Kuo Y H. Description of the Penn State/NCAR mesoscale Model Version 4. NCAR Tech Note NCAR/TN—282+STR. 1987, 66.
- [8] Richard E and Chaumerliac N. Effects of different rain parameterization on the simulation of mesoscale orographic precipitation. *J Appl Meteor*. 1989, 28: 1197—1212.
- [9] Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon Wea Rev*. 1985, 113: 2108—2121.
- [10] Bougeault P and Lacarrere P. Parameterization of orographic induced turbulence in a mesobeta scale model. *Mon Wea Rev*. 1989, 117: 1872—1890.
- [11] Sanders F. An investigation of the structure and dynamics of an intense surface frontal zone. *J Meteor*. 1955, 12: 542—552.
- [12] Ogura Y and Portis D. Structure of the cold front observed in SESAME-AVE III and its comparison with the Hoskins-Bretherton frontogenesis model. *J Atmos Sci*. 1982, 39: 2773—2792.
- [13] Hoskins B J and Bretherton F P. Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and Solution. *J Atmos Sci*. 1972, 29: 11—37.

A NUMERICAL INVESTIGATION OF THE IMPACT OF LATENT HEATING UPON THE STRUCTURE OF ACTIVE COLD FRONTS

Yu Xiaoding

(*Beijing Institute of Meteorology, Beijing, 100081*)

E Richard R Rosset

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

Abstract

A 3D mesoscale model is applied in a marine cold front case in order to investigate the impact of latent heating upon the structure of active cold fronts. Results of the moist and dry simulations are compared to stress the effects of moist processes. It is found that both the temperature gradient and the cyclonic vorticity across the frontal zone are considerably increased due to the latent heating, especially in the lower troposphere. It is also noted that the cross-front ageostrophic direct circulation is more fully-developed and better organized in the moist case than in the dry case. The latent heating tends to enhance the intensity of the cross-front circulation, especially its ascending branch. Most importantly, our results indicate the important contribution by the latent heating to the formation of the intense narrow rising cell just above the leading edge of the cold front.

Key words: Structure of cold front, Numerical simulation, Latent heating, 3D mesoscale model.