

# 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟

刘 峰

(民航中南地区空中交通管理局气象中心,广州 510406)

**提 要:** 利用常规资料和 WRF 模拟结果分析了 2007 年 4 月 17 日发生在广州白云机场附近的强对流天气过程。结果表明,此次天气过程发生于高低层系统有利配置、南海季风涌活跃和低空急流等低层系统加强使得华南地区具备充足水汽和不稳定条件的环境中。热力作用、地形和锋面的抬升作用促使冰雹和飑线等强对流天气生成和发展。数值模式输出的局地强降水和雷达强度回波等产品对保障航空安全有很好的指示作用。

**关键词:** 冰雹 飑线 诊断分析 数值模拟

## Analysis and Simulation of a Severe Convective Weather Process at Baiyun Airport

Liu Feng

(Meteorological Center of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guangzhou 510406)

**Abstract:** Based on meteorological observational data and WRF model products, the severe convective weather process at Baiyun airport on April 17, 2007 was analyzed. The results show that the strengthening of southwest monsoon and the establishment of the low-level jet create the sufficient vapor and unstable condition in South China. The lifts of cold front and terrain promote the formation and development of convective weather. The precipitation of model outputs and Radar echo have a good instruction to the aviation security.

**Key Words:** hail squall line diagnosis analysis numerical simulation

### 引 言

每年 4—6 月是华南的前汛期。其中,4 月份是华南地区冬季风向夏季风过渡时期,

由于冷空气仍不断南下,同时南方暖空气逐渐增强,空气中的水汽增多,使降水陡增,华南前汛期的降水量占全年总降水量的 45%<sup>[1]</sup>。对于航空气象保障来说,降水过程中伴随的雷暴、大风、冰雹、龙卷、低云和低能

能见度天气等恶劣天气对航空安全有很大的影响。

2007 年 4 月 17 日下午,广州白云机场遭受两场强雷雨袭击。其中,14 时左右机场附近的源潭导航站出现冰雹天气;17 时左右飏线过境,造成众多航班返航备降。本文对此次强对流天气过程进行诊断分析和数值模拟,以揭示春夏之交广州地区强对流天气的发生发展机制,进而探讨应用中尺度数值模式<sup>[2-5]</sup>预报强对流天气以及保障航空安全的可能性。

### 1 天气过程分析

#### 1.1 地面形势与强对流天气

从 17 日中午开始,地面冷空气前沿越过南岭后自北向南影响华南和东南沿海地区,锋面附近产生了大范围的降水云系。其中在 14 时(图 1a),还处于锋前低槽暖区中的南岭山区及其偏东地区,局地生成了中-β 尺度的对流云团,14:30 时此块对流云团造成了白云机场附近的冰雹天气。此后,随着锋面的南移,锋前和锋面附近不断有中-β 和中-α 的对流云团生成和发展。17:40 时锋面经过广州白云机场,带状对流云系对机场造成强雷暴天气(图 1b)。由于此次过程影响时间长、局地强度大,对华南地区和东南沿海的航空飞行安全产生了较大的影响。

#### 1.2 有利的动力和不稳定条件

17 日 08 时,850hPa 长江以南大部分是辐合区,辐合中心位于长江流域与南岭之间,辐合值达到  $-40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ;与之对应的 200hPa 辐散中心值达到  $40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。低层辐合与高层辐散造成垂直上升运动。沿  $113^\circ\text{E}$ (广州附近)作垂直剖面(图 2),广州(23°N)以北地区 400hPa 下方为辐合区、上方为辐散区,850~300hPa 之间的垂直速度值达

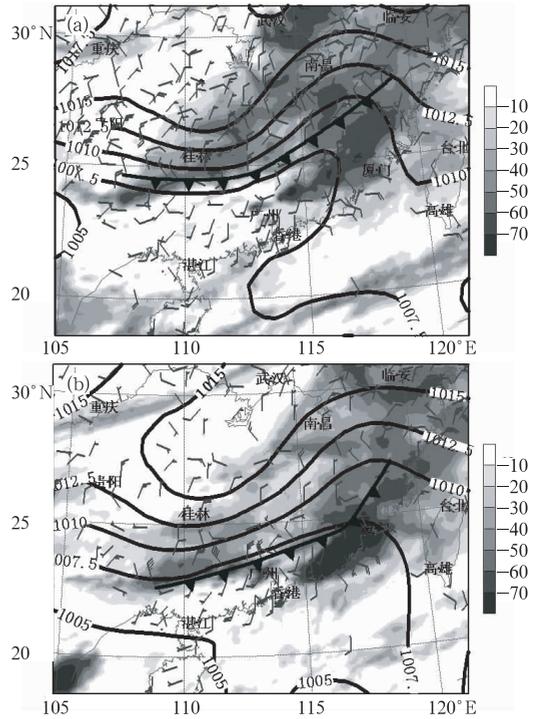


图 1 2007 年 4 月 17 日 14 时(a)和 17 时(b)地面形势和降水云系  
气压(实线:hPa)、TBB(阴影:℃)

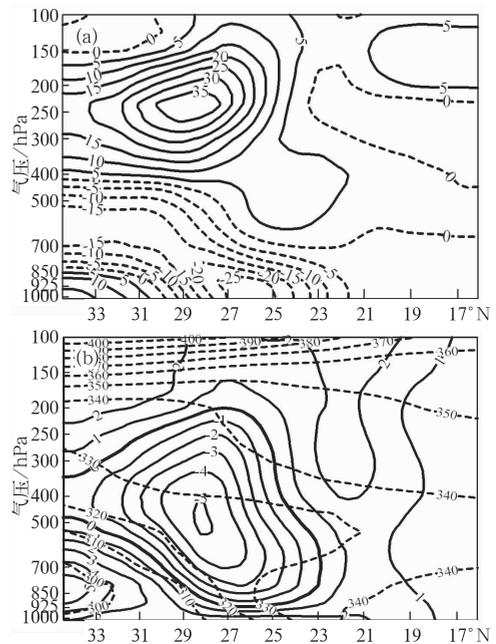


图 2 2007 年 4 月 17 日 08 时沿  $113^\circ\text{E}$  垂直剖面  
(a) 散度( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (b) 垂直速度  
(实线: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )和相当位温(虚线:K)

到  $-3 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着冷空气的南压,低层辐合、高层辐散和垂直上升区也移到华南和东南沿海地区。同时,  $21 \sim 25^\circ \text{ N}$  之间 500hPa 与 850hPa 两层相当位温差值达到  $-8 \sim -10 \text{ K}$ ,说明具备了对流性不稳定条件。

### 1.3 低层系统的建立和加强

周秀骥等<sup>[6]</sup>指出,低层系统对华南前汛期暴雨最具决定性作用。其中,低空急流与华南前汛期雨带相配合。无急流对应的暴雨过程只占 5%。低空急流的生成和发展过程有两类:一类是副高加强及其两侧低值系统发展;另一类是西南季风的加强;还有二个重要系统是低层切变线和低涡,西南涡的东移对华南暴雨的影响主要是促使低空急流的发展。

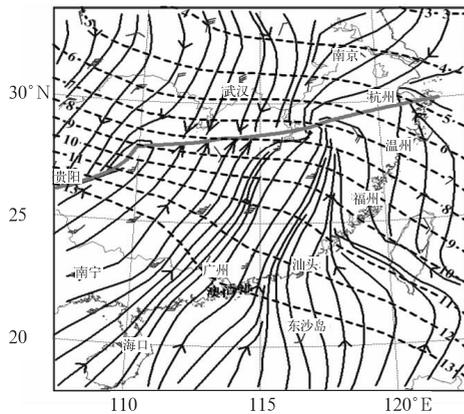


图 3 2007 年 4 月 17 日 08 时 850hPa 流场(带箭头实线)和比湿场(虚线:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

16 日 08 时,850hPa 上贵阳附近还是一个弱低涡,低涡南部是  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的西南偏西风。到了 16 日 20 时,低涡强度加强。低涡南部风向转为西南偏南风,风速加大到  $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,范围也有所东扩。到 17 日 08 时(图 3),  $26^\circ \text{ N}$  以南地区被风速达  $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南偏南低空急流控制。低空急流与北方的偏北气流在长江和南岭之间形成了

此次过程的重要的低层系统,即东西向的“人”字形的切变线和辐合性气旋。随着西南风低空急流的建立和加强,对华南地区的水汽输送也逐步加大。到了 17 日 08 时,华南西部是比湿是  $13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、华南东部是  $11 \sim 13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的高湿区。

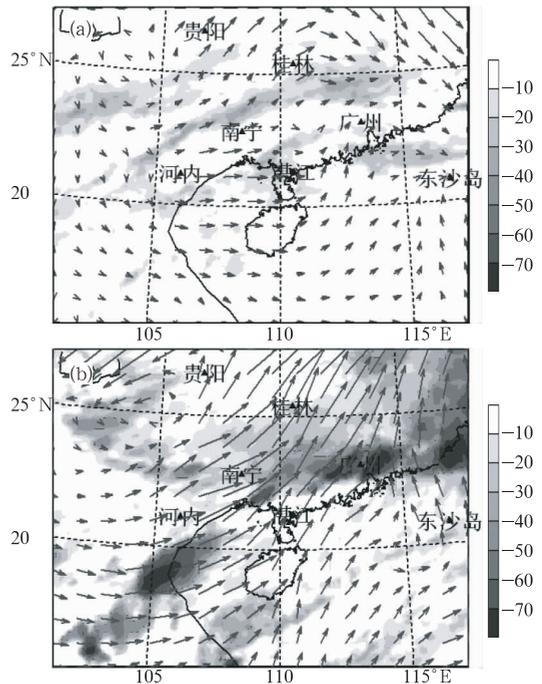


图 4 2007 年 4 月 16 日 08 时(a)和 17 日 08 时(b)850hPa 水汽通量矢量(带箭头短实线)和 TBB(阴影、 $^\circ \text{C}$ )图

南海季风涌是指夏季南海向东亚地区输送的大量水汽。张顺利和陶诗言等<sup>[7]</sup>使用大气整层水汽通量矢量表示南海季风涌。本文对此做了简化,只分析 850hPa 一层的水汽通量矢量。从图 4 可以看到,此次过程中南海季风涌发生从不活跃到活跃的转变。17 日出现的季风涌把大量的水汽输送到了华南以及更北地区,并在北部湾、华南南岭等地区激发起大片对流云系的发展。说明此次低层系统的加强的同时也伴随了南海季风涌的加强。

## 2 数值模拟与分析

### 2.1 数值模拟方案

使用 WRFV2.1.2 模式<sup>[8]</sup>,采用了三重双向嵌套方案。区域 1 的水平分辨率为 27km,格点数为 89×85,覆盖长江流域及其南部区域;区域 2 的水平分辨率为 9km,格点数为 127×106,覆盖华南地区;区域 3 的水平分辨率为 3km,格点数为 196×169,覆盖雷达探测范围。区域 1 和 2 的积云参数化方案选用 Betts-Miller 方案,区域 3 不使用积云参数化方案。区域 1、2 和 3 的其它物理过程方案都采用:Lin 微物理过程方案,Rrtm 长波辐射方案,Dudhia 短波辐射方案,Noah 陆面过程方案,Monin-Obukhov 近地面层方案,YSU 边界层方案。

初始场采用 NCEP 提供的 1°×1°FNL 分析场资料。模式初始时间:2007 年 4 月 16 日 08 时,积分 48 小时,每 6 小时更新侧边界条件。使用 RIP 软件进行模式输出资料后处理以生成降水量、雷达反射率因子等产品。

### 2.2 降水的模拟

模拟的降水与实况总体分布特征基本一致(图 5),并且都有范围广、局地强度大的特点。模拟的强降水区与实况在落区与强度上稍有些偏差。实况的降水强中心主要是在南岭山区、广东与福建交界沿海和江西境内分别出现了日降水量达 95.6mm、97.8mm 和 49.8mm 的中-β 尺度雨团。而模拟结果是在南岭稍南地区出现 108.4mm、江西境内出现 48.6mm 的降水,但广东与福建交界沿海虽也出现 60mm 中心。

模拟出在南岭偏南地区与实况基本相符的强度达到大暴雨左右的中尺度雨团,充分反映了此次天气过程的中尺度对流天气的特征,预示了广州白云机场将遭遇复杂的对流

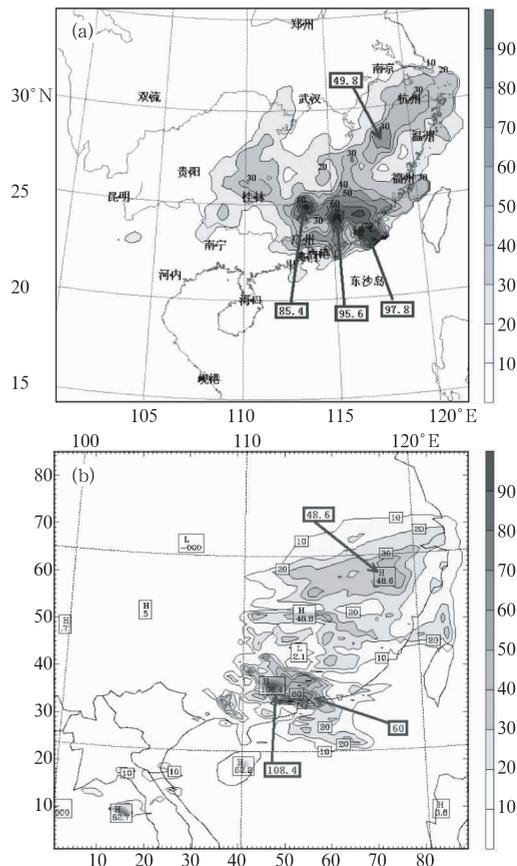


图 5 2007 年 4 月 17 日 08 时至 18 日 08 时 24 小时降水量(>10mm)实况与模拟结果(区域 1)对比 (a) 实况(b) 模拟结果

性天气。

### 2.3 雷达反射率因子的模拟结果

17 日 08 时,模拟结果与实况都是西面有少量的弱积状云。14 时(图 6a),虽然落点有一定的差异,但都表现为北面出现一些对流单体。其中在雷达西北部出现一块最强中心,而此块强中心就是在源潭导航站产生冰雹的超级单体。14 时之前,整个区域 3 中地面都是偏南风控制,说明此时的对流天气都还是处于锋前低槽暖区中。17 时(图 6b)锋面到达,北部地面转为偏北风,南北对峙的气流对对流云起着组织和加强作用。模拟结果与实况都表现出沿着辐合线的正在加强的飢线。模拟的飢线位置与实况相当接近,中心强度也达到 50~55dBz,不足的地方是宽度

偏大。此时的飊线正影响着广州白云机场，给机场带来强对流天气。20时，飊线南压到

达华南沿海，广州白云机场转为飊线后部的减弱的对流云控制。

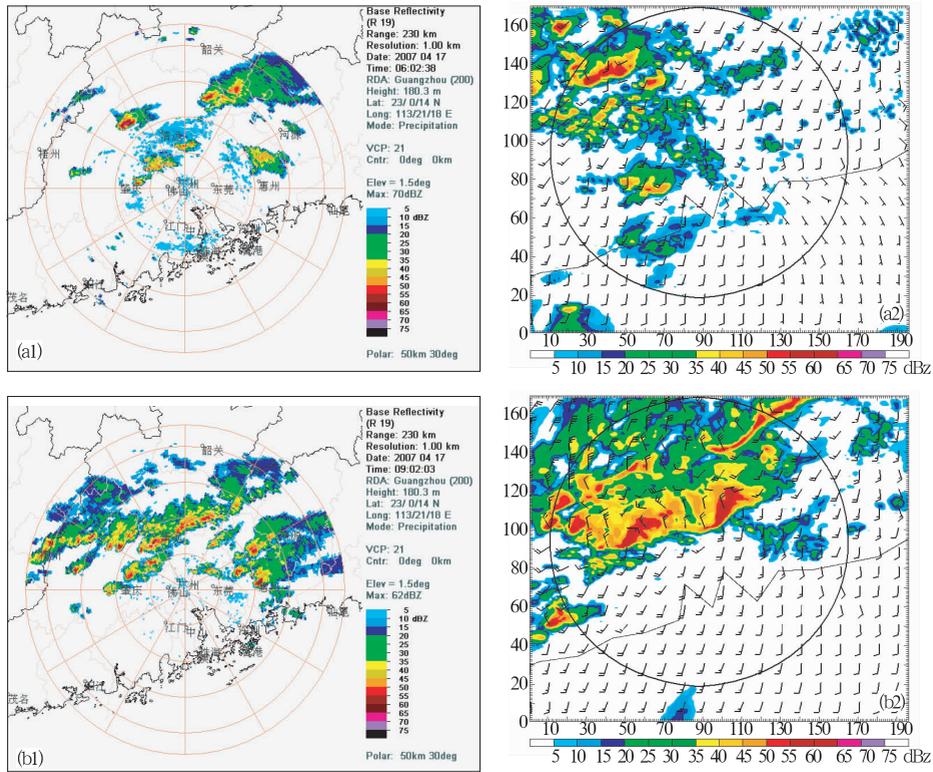


图6 雷达反射率因子(dBz)实况与模拟结果(区域3)对比

(a1) 17日14时实况 (a2) 17日14时模拟结果 (b1) 17日17时实况 (b2) 17日17时模拟结果

综合来看,虽然模拟输出的对流在落点等方面与实况有一定的偏差,但模拟出的强对流单体和飊线在影响形式、影响时间和中心强度等方面与实况接近,因而对航空保障有很好的指示作用。

### 3 强对流天气发生发展机制分析

#### 3.1 低层系统的形成和发展

利用模式输出的高层位势涡度、低层温度场变化说明对西南低涡等低层系统建立和加强的作用。寿绍文等<sup>[9]</sup>编著的《中尺度气象学》指出,围绕高空正、负位涡异常区分别有气旋性环流和反气旋性环流出现;而近地面层的正、负温度异常区也分别有气旋性环流和反气旋性环流相对应。上下层位涡和温

度异常所诱生的风场之和便构成了总风场。

16日08时(图略),在贵阳附近200hPa上是位涡等于4 PVU的正值中心、925hPa上是温度等于26.65℃的正值中心。到16日20时(图7a),位涡正值中心继续东扩,925hPa上正温度中心达到32.36℃。在昆明到贵阳之间,20时与08时的温度差是达到6~9℃的正变温中心(图7b)。高空正位涡与低层的正变温度配置,说明此处的气旋性环流将加强。850hPa的风场模拟结果(图7c)与实况(图3)的表现相当一致。偏西部地区的风场由弱的偏西风,到了16日20日已经自西向东转为西南偏南风,风速也达到10~15m·s<sup>-1</sup>,低空急流已经建立。到了17日08时,整个华南地区转受低空急流控制,并在长江和南岭之间形成了与实况一致的东向西向“人”字形的切变线和辐合性气旋。

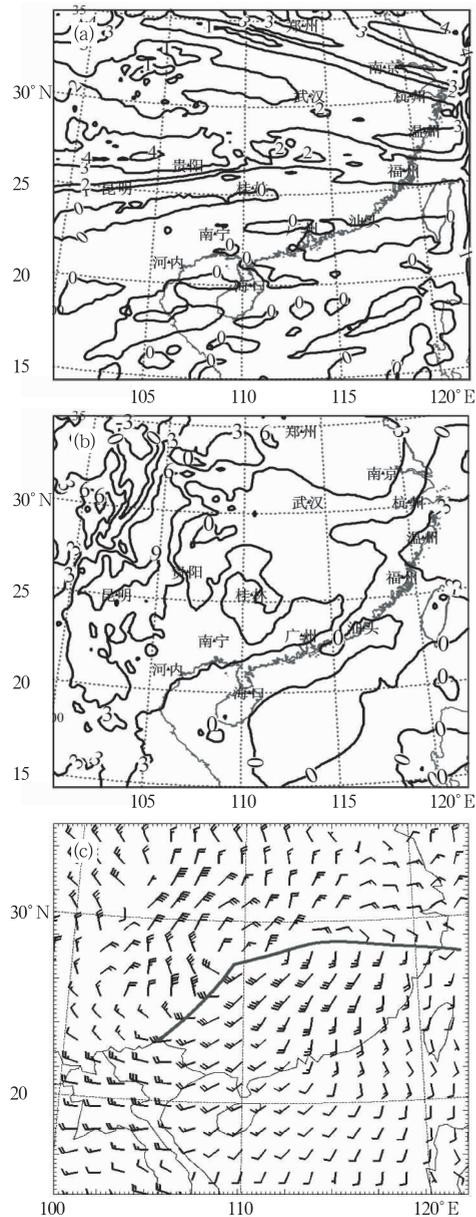


图 7 模拟(区域 1)的 200hPa 位势涡度 PVU 与 925hPa 变温(C)对低层系统的解释  
(a) 16 日 20 时 200hPa 位势涡度 (PVU)  
(b) 16 日 20 时与 08 时 925hPa 温度差(C)  
(c) 17 日 08 时 850hPa 风场

### 3.2 锋前强对流的发生发展机制

#### 3.2.1 热力作用

利用 17 日 08 时清远站(源潭为清远的一个县)实况探空资料制作的温度对数压力图求对流温度。如图 8(a)所示,先找出经过

地面露点 22℃ 的等饱和比湿线与温度层结曲线的交点,再由此交点定出的干绝热线与地面等压线的交点,此时所对应的温度即为对流温度 27℃。如果地面温度预计会大于此温度则有对流形成,且可估计对流形成的时间。图 8(b)显示,数值模式输出的地面温度在 13 时达到 27℃,15 时以后则有大幅度降温。说明清远地区的热力对流能够形成,而且是在 13 时开始形成。而 15 时以后的降温,是冷空气到来的原因。

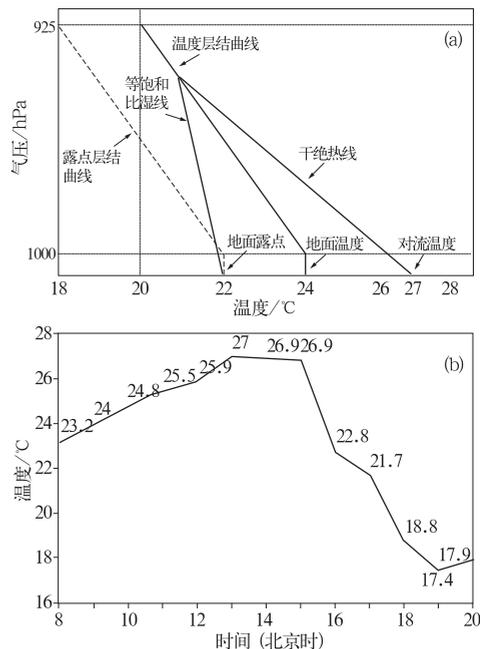


图 8 模式预报清远站的地面温度与对流温度的对应关系  
(a) 17 日 08 时探空求对流温度  
(b) 模式预报的地面温度(区域 3)

#### 3.2.2 地形抬升作用

在图 9 中,根据近地面层的等位温线的密集区来跟踪锋面的移动。在锋面来临之前,对流云与气流的上升运动相联系。而气流上升区的下垫面的地形都是偏南风的迎风坡。说明锋前不稳定的暖湿偏南气流受到了地形的抬升作用,从而产生对流天气。14 时正是在源潭附近的一个迎风坡上产生了强对流。分析地形图(图略)可以知道,这个迎风坡所在地是海拔高度为 1000m 的罗壳山。

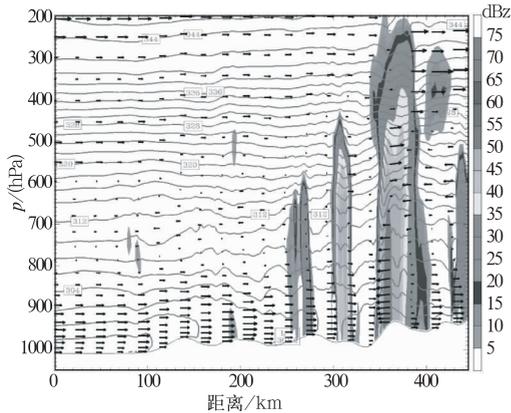


图9 模拟(区域3)的17日14时沿 $112^{\circ}\text{E}$ (源潭附近) $21\sim 25^{\circ}\text{N}$ 垂直剖面图  
等位温线(实线;K)、环流、雷达反射率因子(阴影;dBz)

### 3.3 锋面飚线的发生发展机制

在图10中,17时左右锋面过境广州白

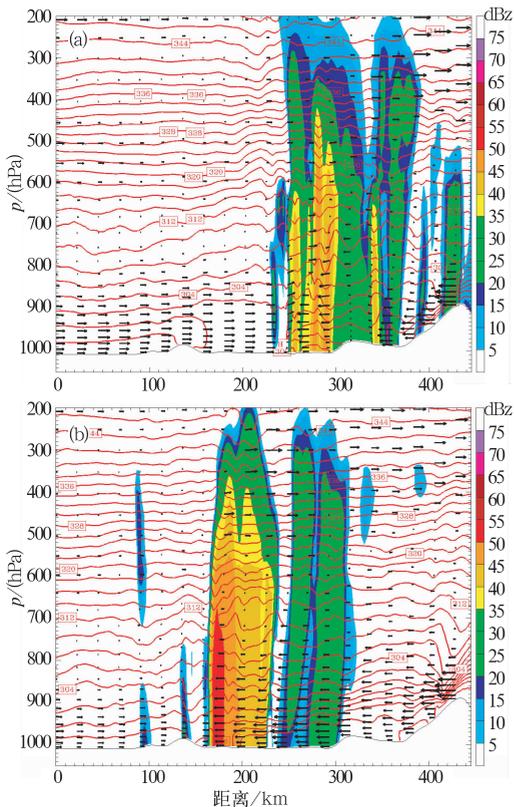


图10 模拟(区域3)的沿 $113^{\circ}\text{E}$ (广州附近) $21\sim 25^{\circ}\text{N}$ 垂直剖面图  
(a)17日17时(b)17日20时  
等位温线(实线;K)、环流、雷达反射率因子(阴影;dBz)

云机场,锋前的偏南风与锋后的偏北风汇合,激发出强烈的对流云系,对流云的顶高到达300hPa以上。随着锋面的南压,对流云系也一同南压。

## 4 总结与讨论

(1) 此次天气过程发生于高低层系统有利配置、南海季风涌活跃和低空急流等低层系统建立和加强,使得华南地区具备充足水汽和不稳定条件的环境中。

(2) 模式能够很好地模拟出此次过程的局地强降水、锋前对流和伴随锋面移动的飚线等强对流天气。数值模式输出的降水和雷达回波等产品对保障航空安全有很好的指示作用。

(3) 锋前暖区中的冰雹等局地强对流天气发生发展与热力作用、地形的抬升作用有关。

(4) 锋面的抬升作用激发出飚线强对流天气。

(5) 高层的正位涡与低层的正变温中心相配合对低涡等低层系统的发生发展有较好的指示作用。

## 参考文献

- [1] 黄增明,梁建茵,吴艳标,等.广州城市气候[M].北京:气象出版社,1994:41-42.
- [2] 慕建利,杜继稳,梁生俊,等.中 $\beta$ 尺度系统造成的大暴雨过程数值模拟与诊断分析[J].气象,2006,32(8):23-29.
- [3] 姜学恭,孙永刚,沈建国.一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验[J].气象,2001,27(1):25-30.
- [4] 李天富.MM5对南海一次特大暴雨过程的模拟[J].气象,2003,29(1):3-6.
- [5] 赵玉春,王叶红.“7·22”长江中游暴雨中尺度系统的数值模拟与分析[J].气象,2005,31(1):13-18.
- [6] 周秀骥,薛纪善,陶祖钰,等.98华南暴雨科学试验研究[M].北京:气象出版社,2003:5-7.
- [7] 张顺利,陶诗言,张庆云,等.长江中下游致洪暴雨的多尺度条件[J].科学通报,2002,47(6):467-473.
- [8] 章国材.美国WRF模式的进展和应用前景[J].气象,2004,30(12):27-31.
- [9] 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003:278-280.