

文章编号:1004-9045(2008)02-0135-06

# 2007 年华南一次强飊线过程的雷达回波分析及数值模拟

陈业国<sup>1,2</sup>, 沈桐立<sup>2</sup>, 唐文<sup>1</sup>

(1.广西气象台, 南宁 530022; 2.南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘要:**2007 年 4 月 17 日华南发生了一次强飊线天气过程。利用常规气象资料、多普勒雷达资料分析了这次强飊线过程的成因,并用高分辨率中尺度数值模式 WRF 对该过程进行数值模拟。结果表明:这次强飊线过程发生在欧亚中高纬地区两槽一脊的经向环流形势下,西风槽、地面冷锋为其主要的影响系统。雷达回波显示,这次强飊线过程的雷达回波具有典型的三体散射和弓形回波特征。此外,WRF 模式能成功地模拟出本次飊线过程的中尺度结构特征。数值模拟结果显示,飊线发生的带状区域内有明显的低层气流汇合和切变以及中低层的大气对流性不稳定结构,强对流带内有东北-西南走向的气流汇合线,汇合线附近有强的辐合,辐合中心强度达 $-0.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,表明 WRF 模式对强对流天气系统有一定的模拟能力。

**关键词:** 飊线; 中尺度; 数值模拟

**中图分类号:** P458.2 **文献标识码:** A

## 1 引言

飊线是能产生强烈天气的中小尺度天气系统,它具有历时短、天气变化剧烈和破坏性强的特点,常常带来灾害性的大风和局地暴雨及冰雹等强对流天气<sup>[1]</sup>。多年来,利用常规气象资料、多普勒雷达资料和卫星云图资料对飊线的激发机制和所导致的强对流天气特征开展了不少研究<sup>[2-4]</sup>,随着计算机技术的飞速发展,数值模拟试验已成为研究飊线的重要手段。近年来,国外已广泛地开展了飊线的数值模拟试验<sup>[5-7]</sup>,国内在这方面也做了一些有益的探索和研究<sup>[8-10]</sup>。本文采用高分辨率中尺度模式 WRF 对 2007 年 4 月 17 日华南强飊线过程进行数值模拟,并利用数值模拟结果对强飊线过程进行诊断分析,探讨其触发和维持机制。

## 2 过程概述及环流背景

2007 年 4 月 17 日,受高空槽东移、低层切变南压及地面锋区南压影响,从上午 08 时(北京时,下同)至下午 18 时一条东西向的飊线自北向南袭击了华南地区,飊线经过的地方均出现了不同程度的强对流天气。经统计,广西的三江等 18 个县市出现了 8 级以上的短时雷雨大风,最大风速为 9 级(23 m/s),出现在全州和都安县,合山市合山自动气象站观测到的瞬间风速达 52 m/s,资源等 5 个县还出现了冰雹,冰雹最大直径为 14 mm。广东省北部、东部和珠江三角洲出现

8-12 级的局地短时雷雨大风,广州从化龙潭镇府站瞬间最大风速达 33.8 m/s。肇庆市广宁县等地下了冰雹,其中博罗县冰雹直径最大达 40-50 mm。广东省北部和东部的韶关等 21 个市县出现了 50 mm 以上的暴雨,普宁最大降水量达 113.8 mm,1 h 最大雨量出现在韶关曲江小坑水库(71.1 mm)。

这次飊线过程发生的大尺度环流背景是,2007 年 4 月 16 日 20 时欧亚地区 500 hPa 维持两槽一脊形势。从巴尔喀什湖到我国新疆地区为高压脊,鄂霍茨克海到我国东北地区为低压槽,槽后西北气流引导冷空气东移南下;700 hPa 南支西风槽东移,850 hPa 切变线位于上海、长沙和贵阳之间;地面天气图上贝加尔湖以西有 1 026 hPa 的冷高压中心,高压前部有一条东北-西南向冷锋。17 日 08 时,冷锋向东南方向移动,锋后高压中心分裂出的小高压快速南下,促成江淮气旋产生,并推动位于贵州至湖南一带的静止锋变为冷锋南移,广西大部地区出现明显增温减压。

## 3 飊线天气过程的雷达回波特征

这次飊线过程的雷达回波有明显的三体散射特征和弓形回波特征。4 月 17 日 08 时 34 分,桂林雷达探测到在湖南、贵州地区的洪江、天柱等地有回波出现,09 时 11 分,湖南、贵州地区的回波发展,回波面积明显增大,回波强度也增加到 40 dBz。10 时 00 分,回波区迅速南移发展,初现带状回波,回波强度增加到 50 dBz,

收稿日期:2007-09-18;定稿日期:2008-01-12

基金项目:广西自然科学基金项目(桂科攻 0632006—1D)资助

作者简介:陈业国,男,1974 年生,硕士,工程师,主要从事天气预报和数值模拟研究工作。E-mail:chenyeguo@tom.com

回波发展到 10 km 以上, 最高回波顶高达 14 km。11 时 03 分, 湖南永州- 广西桂林- 贵州从江为很强的回波带, 系统发展为飢线, 最强回波强度达 63 dBz, 广西北部的三江等县先后出现 20 m/s 的大风, 资源出现 3 mm 的冰雹。13 时 11 分, 飢线到达桂林, 强回波继续维持, 最强回波达 69 dBz, 回波顶高为 12~14 km。

这次飢线过程, 广西有 6 个县市站点出现冰雹。对冰雹预报的最好的指示特征是雷达回波的三体散射(TBSS), 这次过程中雷达回波也有三体散射特征。图 1a 为桂林天气雷达 4 月 17 日 10 时 19 分的雷达回波, 仰角是 4.3°; 由图可见在桂林的东北方资源县有一很强的风暴单体, 回波中心强度达到 73 dBz, 并且有明显的三体散射回波, 即沿东北方向雷达径向的长钉状突出物, 表明风暴中存在大冰雹。Lemon 等(1998)<sup>[9]</sup>指出, 三体散射的出现是大冰雹存在的充分条件和非必要条件, 且三体散射出现后 10 到 30 分钟往往会产

生最大的地面降雹和大风。实际情况为在 10 时 22 分, 资源出现了冰雹, 冰雹直径为 3 mm, 自动气象站显示, 资源在 10 时 27 分观测到 15.2 m/s 的大风, 位于资源西南方 29 km 处的猫儿山自动气象站也在 11 时 44 分观测到 23.1 m/s 的大风。

图 1b 为桂林天气雷达 4 月 17 日 11 时 28 分的雷达回波, 仰角为 2.4°; 可以看到飢线的线状回波带呈现弓形, 回波带中的回波单体也呈明显的弓形, 具有明显的弓形回波特征。此时弓形回波东西长度超过 200 km, 南北宽度超过 40 km, 这说明对流系统非常强大。此后这一系统不断往南移动和发展, 对流系统低层沿入流的一侧(南侧)反射率因子具有很大的梯度, 低层有弱回波区, 中高层有回波悬垂, 这些都显示了明显的强对流天气结构。事实上如前所述, 强飢线经过之处, 华南地区很多地方出现冰雹、雷雨大风和暴雨等强对流天气。

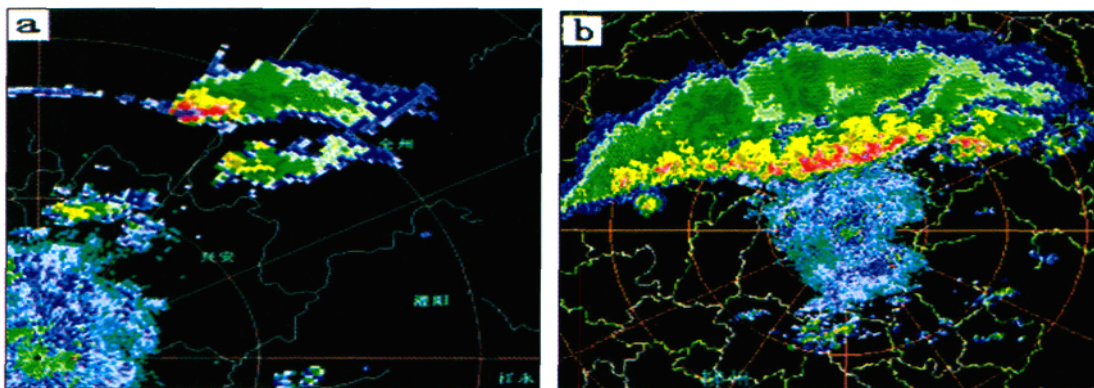


图 1 桂林 4 月 17 日不同时刻雷达回波  
(a)10 时 19 分的三体散射特征回波;(b)11 时 28 分的弓形回波

#### 4 数值模式及试验方案

文中采用中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecast), 对 2007 年 4 月 17 日华南强飢线过程进行了数值模拟。该模式是由 NCAR、NCEP 等多个部门共同研发的新一代中尺度预报模式, 它集 MM5、RAMS、ETA 等模式优势为一体, 提供了一个研究和业务数值天气预报的通用框架, 既可用于分辨率在 1~10 km 的系统模拟, 又可用于分辨率较低的业务预报。本文主要是检验该模式对本次华南强飢线过程的模拟情况, 并进行诊断分析。

模式使用 NCEP 提供的水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料作为模式的初始场, 并加入模式范围内的高空和地面实况资料, 经 Cressman 方法客观分析, 最终形成初始场。在模式中采用了双重嵌套方案, (25 N, 110 E) 为模拟区域的中心位置。粗网格格点数为  $121 \times 121$ , 格距为 45 km; 细网格格点数为  $121 \times 121$ , 格距为

15 km; 积分步长均为 120 s。模式垂直方向为 31 层, 模式顶气压为 50 hPa; 从 2007 年 4 月 16 日 20 时积分到 17 日 20 时, 共 24 h, 模式每 1 h 输出一次结果。本文分析的是细网格区域 domain2。

在模式物理过程的参数选择上, 两重区域都采用的云微物理过程选用 LIN 方案; 长波辐射选用 RRTM 方案, 短波辐射采用 Dudhi 方案, 每 10 min 调用一次辐射过程; 积云对流采用 Kain-Fritsch 方案, 每 5 min 调用一次。

#### 5 结果分析

本文中约定  $t=1$  为模式的初始积分时间, 即 2007 年 4 月 16 日 20 时。

##### 5.1 温压场结构分析

在  $t=16$  h (4 月 17 日 11 时) 时刻, 从模拟的地面气压场(图 2a) 可看出, 在  $108^\circ \sim 118^\circ \text{E}$ ,  $26^\circ \text{N}$  附近, 出现一个东北-西南向的等压线密集区, 其北侧是 1 014 hPa

以上的高压脊区, 而其南侧有一个值为 1 004 hPa 的闭合低压中心。此时飊线开始影响华南区域, 这一东北-西南向的等压线密集区气压梯度非常大, 有明显的冷空气随地面锋面移动影响华南地区。数值模拟发现,  $t=16$  h(4 月 17 日 11 时)时刻, 在闭合低压中心和低压槽处有新的强对流生成和发展, 飊线强对流带随

时间沿着低压伸展出来的槽发展传播。在同一时刻( $t=16$  h), 与飊线强对流带相对应的是低层 850 hPa 低位温区, 中心值为 290 K, 飊线对应着等位温线密集区, 温度梯度大, 飊线南北侧温差也非常明显。沿飊线主对流区传播方向有一个高位温区, 其中心值为 304 K (图 2b)。

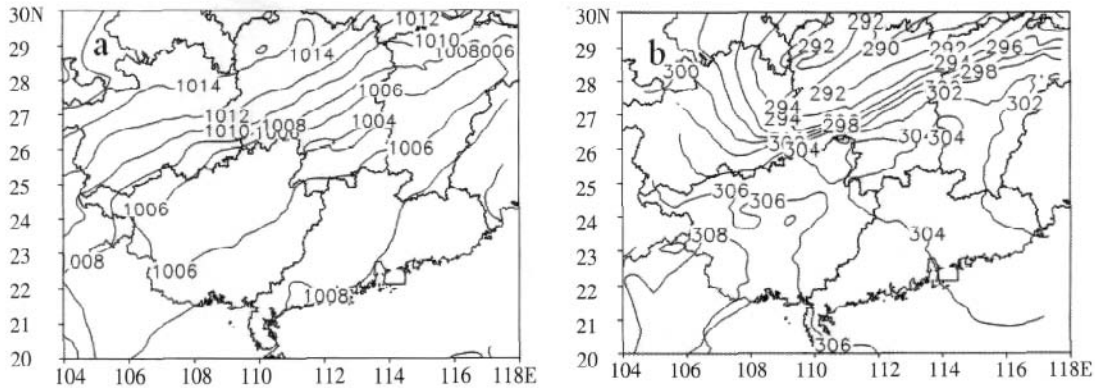


图 2  $t=16$  h(4 月 17 日 11 时)温压模拟场

(a)海平面气压场(单位:hPa);(b)850 hPa 位温场(单位:K)

在  $t=22$  h(4 月 17 日 17 时)时刻, 飊线移动到了华南区域的中南部, 此时飊线发展最为旺盛, 已达飊线的成熟期。飊线强对流带附近的气压场结构发生明显的变化, 强对流带处于地面气压低值带区域 (图 3a), 低压闭合中心强度为 1 004 hPa, 低压的范围也明显扩大。分析低层 850 hPa 位温场, 飊线强

对流带南侧对应的是高位温区, 说明该区域能量充足。对流带后部的低位温区也进一步发展成为低值中心(292 K), 与此同时低位温区也发展为与飊线强对流带走向一致的范围较大的 294 K 低位温带 (图 3b), 飊线强对流带就位于低位温带与高位温区之间。

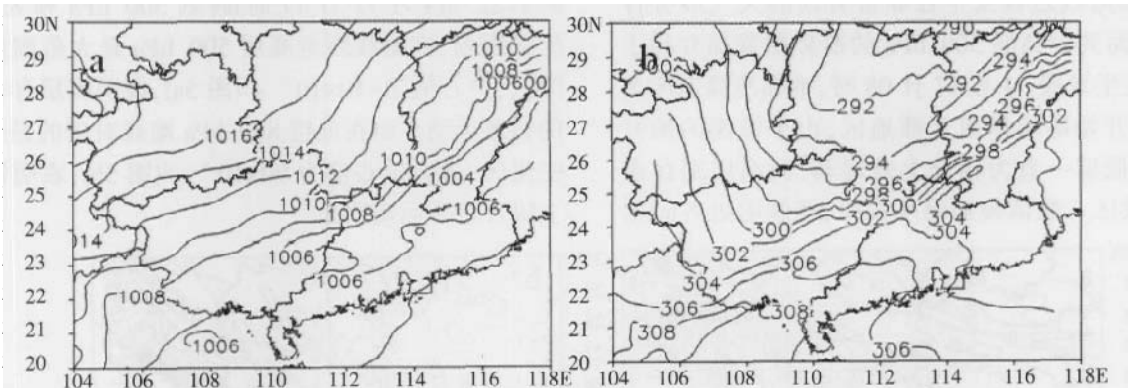


图 3  $t=22$  h(4 月 17 日 17 时)时刻温压模拟场

(a)海平面气压场(单位:hPa);(b)850 hPa 位温场(单位:K)

在  $t=25$  h(4 月 17 日 20 时)时刻, 飊线逐渐衰减, 此时温压场中的闭合低压结构和低位温闭合区(图略)已明显减弱消失, 地面气压场的气压梯度和 850 hPa 位温场的位温梯度已大为减弱。在飊线的发展、强盛成熟期, 飊线方向上均有较大的温压梯度。以上模拟结果表明, 高分辨率中尺度数值模式 WRF 能够较好地模拟出飊线系统中 尺度温压结构特征。

5.2 垂直速度场模拟分析

图 4 为 850 hPa 不同时刻的垂直速度场, 从图中可以清晰地看出飊线自北向南移动的位置和强度。在

$t=16$  h(4 月 17 日 11 时)时刻,  $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$ ,  $26^{\circ}\text{N}$  附近出现了一条东北-西南向、最大垂直上升速度为 1.0 m/s 的飊线强对流带(图 4a)。分析表明, 这就是飊线前沿的强对流带, 此后该强对流带不断向南移动和发展。在  $t=20$  h(4 月 17 日 15 时)和  $t=22$  h(4 月 17 日 17 时)时刻, 飊线强对流带仍然呈东北-西南走向, 飊线已经移动到华南中南部地区, 此时飊线强对流带最大垂直速度达 1.2 m/s 和 1.4 m/s, 飊线的中 尺度结构特征最为明显, 表明飊线发展到了成熟阶段(图 4b、4c)。到了  $t=25$  h(4 月 17 日 20 时)时刻, 飊线强对流带最大垂

直速度减弱至 1.0 m/s(图 4d), 位于广西境内的西段飊线强对流带已经减弱消失, 观测事实表明, 4 月 17 日

20 时后, 强飊线对广西的影响已经结束。由于能量已经基本释放完毕, 东段飊线强对流带也逐渐减弱消亡。

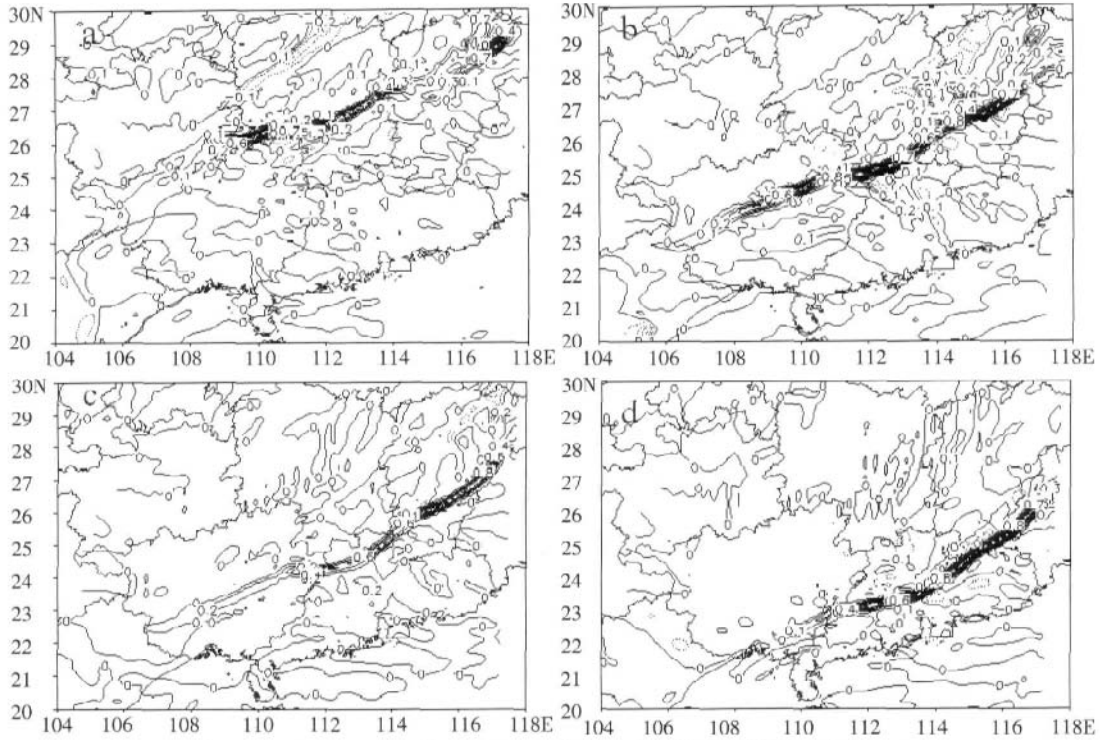


图 4 4 月 17 日 11~20 时 850 hPa 不同时刻的垂直速度模拟场(单位:m/s)  
(a)t=16 h;(b)t=20 h;(c)t=22 h;(d)t=25 h

### 5.3 动力结构模拟分析

这次强飊线过程发生在非常有利的天气形势背景下, 从地面到中高层 500 hPa 的形势配置都有利于强对流的发生发展。4 月 17 日 08 时, 地面冷锋南压至南岭一带, 开始影响华南北部地区, 由于锋面的抬升作用明显, 低层一直为辐合上升运动, 而高层则存在明显的辐散区。数值模拟结果表明, 飊线附近各时刻

和层次的涡度值非常有利强对流的发展。图 5 为模拟的 t=22 h(4 月 17 日 17 时)时刻 500 hPa 和 850 hPa 的涡度场, 在飊线附近高层 500 hPa 是大范围的负涡度区, 中心值为  $-10 \times 10^{-5} s^{-1}$ (图 5a), 说明高层存在明显的辐散运动。而在低层 850 hPa 飊线对应的是正涡度密集区, 最大中心值为  $90 \times 10^{-5} s^{-1}$ (图 5b), 表明该地区上辐合上升运动明显。

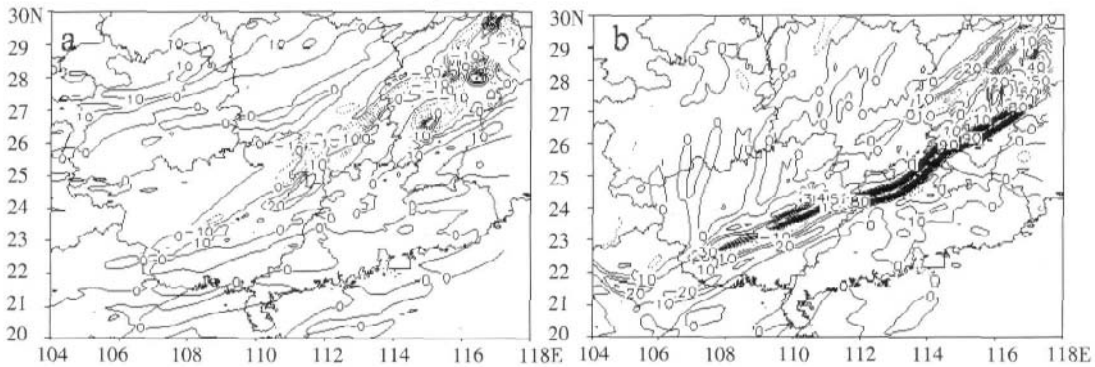
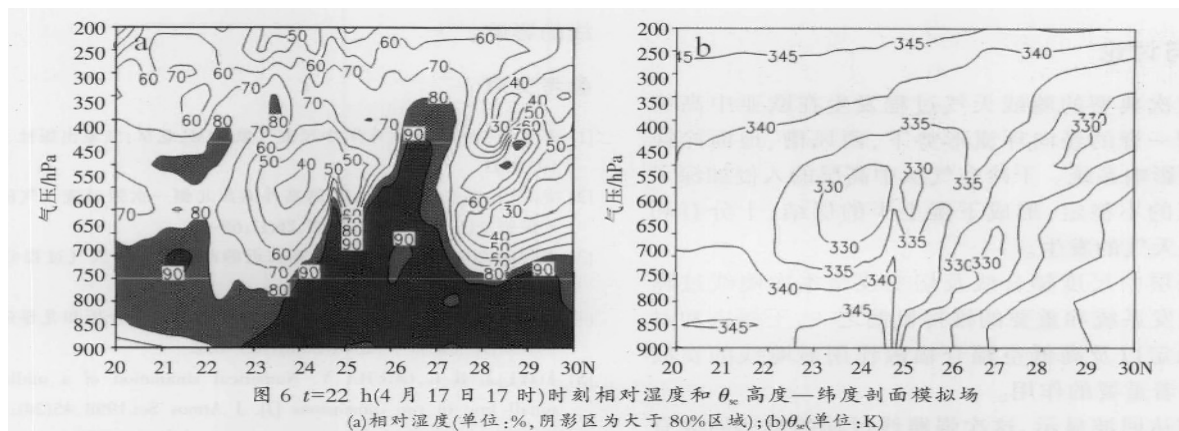


图 5 t=22 h(4 月 17 日 17 时)时刻涡度模拟场(单位: $10^{-5} s^{-1}$ ) (a)500 hPa;(b)850 hPa

以往的研究指出, 影响对流风暴发展最重要的是中层干空气和强垂直风切变。干侵入是源于对流层高层下沉至低层的高位涡低湿空气, 它在气旋爆发性发展、暴雨增幅、位势不稳定增强、中气旋的发生发展等方面起重要的促进作用, 有利于龙卷、飊线等的形成发展<sup>[1]</sup>。图 6a 为相对湿度沿广州(113.33 E)的高度-纬

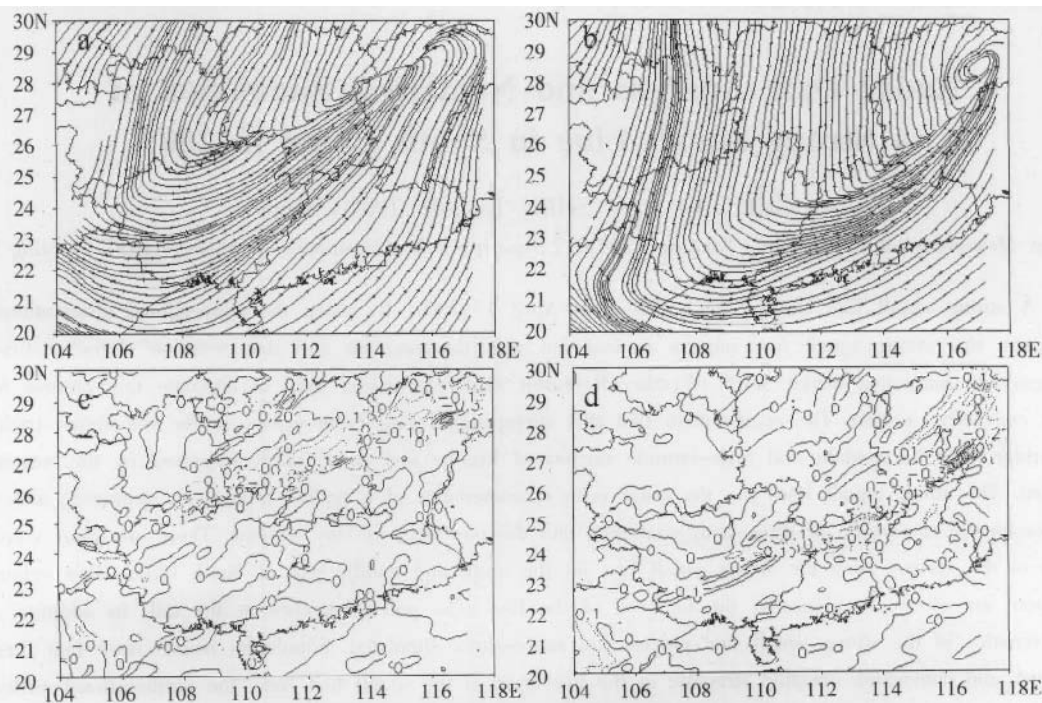
度剖面, 在 700 hPa 以上的中高层, 空气相对湿度大部小于 80%, 特别在  $23^{\circ} \sim 24.5^{\circ} N$ , 700 hPa 以上均为干区, 在 500 hPa 附近有干中心, 相对湿度小于 40%, 而低层 700 hPa 以下区域, 水汽条件充足, 相对湿度大于 90%。这种上干下湿的配置, 有利于冰雹、雷雨大风等强对流天气的发生发展。



假相当位温  $\theta_w$  是在大气的干、湿绝热过程中都守恒的一个重要特征参数,  $\theta_w$  垂直分布可以反映大气的对流性不稳定<sup>[12]</sup>。图 6b 为  $\theta_w$  沿广州(113.33 E)的高度-纬度剖面, 中低层 500~700 hPa 是  $\theta_w$  低值区,  $\theta_w$  大部小于 335 K, 尤其是 23°~25 N, 在 600 hPa 附近存在一个  $\theta_w$  为 330 K 的低值中心, 表明中低层大气存在对流性不稳定, 而 500 hPa 以上的高层为  $\theta_w$  高值区, 大气相对稳定。

天气系统分析表明, 2007 年 4 月 17 日 08 时, 500 hPa 华南地区受高空槽后偏北气流带下来的冷空气控制, 盛行明显的冷平流, 形成上冷、下暖的不稳定层结, 使得华南地区对流不稳定度增大。在 500 hPa 干侵入作用以及中低层的大气对流性不稳定条件下, 低空暖湿空气区受到高层冷平流冲击, 它激发了中尺度对流系统的形成, 最终导致强对流天气发生。

对比各个时刻的低层 850 hPa 流线分布特征, 发现强对流带与低层气流汇合线或切变线有很好的对应关系。在  $t=16$  h(4月 17 日 11 时)时刻, 在 108°~118 E, 26 N 附近存在与飊线强对流带对应的呈东北-西南走向的气流汇合线, 汇合线的偏北侧为东北气流, 偏南侧为西南气流(图 7a)。汇合线附近有强的辐合, 辐合中心强度达  $-0.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (图 7c)。飊线前沿的强对流带总是与低层中尺度气流汇合线或切变线相伴, 在  $t=22$  h(4月 17 日 17 时)时刻, 同样低层 850 hPa 有一切变线与之相伴, 与之相应的是辐合带(图 7b), 最大辐合强度达  $-0.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (图 7d)。模拟结果显示了明显的中尺度结构特征, 飊线发生的带状区域内有明显的低层气流汇合和切变以及中低层的大气对流性不稳定结构, 强对流带内有东北-西南走向的气流汇合线, 汇合线附近有强的辐合。这一结果与文献[9]中的结论是一致的。



## 6 结论与讨论

(1)这次典型的飑线天气过程发生在欧亚中高纬地区两槽一脊的经向环流形势下,西风槽、地面冷锋为主要的影晌系统。干冷空气从中高层的入侵加深了华南地区的不稳定,形成下湿上干的层结,十分有利于强对流天气的发生。

(2)低层中尺度辐合线及切变线是本次飑线过程主要的触发系统和重要的维持机制之一,干侵入和对流性不稳定以及高低空辐合辐散作用对飑线的发展和维持有着重要的作用。

(3)雷达回波显示,这次强飑线过程的雷达回波有典型的三体散射和弓形回波特征。

(4)高分辨率中尺度数值模式 WRF 能成功地模拟出本次飑线过程的中尺度结构特征。数值模拟结果显示,飑线发生的带状区域内有明显的低层气流汇合和切变以及中低层的大气对流性不稳定结构,强对流带内有东北-西南走向的气流汇合线,汇合线附近有强的辐合,辐合中心强度达 $-0.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,表明 WRF 模式对强对流天气系统有一定的模拟能力。

本试验虽然较好地模拟了飑线的中尺度结构特征,但模拟中未考虑地形强迫和地表物理过程对飑线的影响;另外,对于飑线这样的中尺度强对流天气系统,显然取 15 km 的水平分辨率并不能细致地反映其内部结构特征,下一步有待于利用 WRF 进一步提高模拟的水平分辨率,并通过敏感试验的方式把地形和地表物理过程的强迫作用考虑进去,以研究其对飑

线的影响。

### 参考文献:

- [1] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 195-203.
- [2] 龙利民, 陈亮, 江航东, 等. 副高外围西北侧一次强对流天气的雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(1): 68-72.
- [3] 黄艳芳. 2004 年初春武汉机场临近的两次强雷暴天气过程分析[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(1): 73-77.
- [4] 纪玲玲, 黄宁立, 邬锐, 等. 一次强飑线天气过程分析和龙卷强度级别判定[J]. 气象科学, 2006, 26(6): 627-632.
- [5] FOVELL R G, OGURA Y. Numerical simulation of a midlatitude squall line in two dimensions [J]. J Atmos Sci. 1998, 45(24): 3846-3879.
- [6] ZHANG D L, GAO K, PARSONS D B, et al. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM, part I: model verification [J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(5): 980-994.
- [7] ZHANG D L, GAO K. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM, part I: rear inflow, surface pressure perturbations and stratiform region [J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(9): 2067-2094.
- [8] 何宏让, 魏绍远, 曾文华. 江淮副高后强对流分析和数值模拟研究[J]. 气象科学, 1999, 19(2): 142-148.
- [9] 余清平, 王兴宝, 陈中一. 一次飑线过程的数值模拟和动力分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(1): 79-85.
- [10] 慕熙昱, 党人庆, 陈秋萍, 等. 一次飑线过程的雷达回波分析与数值模拟[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 42-49.
- [11] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769-778.
- [12] 赵世发, 周军元, 王俊, 等. 一次罕见的特大暴雨物理量场的特征分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 271-276.

## Radar Data Analysis and Numerical Simulation of a Strong Squall Line in South China in 2007

CHEN Ye-guo<sup>1,2</sup>, SHEN Tong-li<sup>2</sup>, TANG Wen<sup>1</sup>

(1. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022; 2. Department of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044)

Abstract: A strong squall line attacks South China on April 17, 2007. By using the conventional observations and Doppler weather radar data, this strong squall line process is analyzed with the situation and the evolution characteristics of the radar echoes. The mesoscale numerical model WRF (Weather Research and Forecast) is used to simulate this process for the interior structure of the convective system. The results show that this strong squall line event occurs in the circulation background of two troughs and a ridge over the middle and high-latitude regions of Europe and Asia mainly impacted by the westerly trough and surface cold front. The strong squall lines are the radar echo characteristics of a typical three-body scattering and the bow echo. The strong convection in the region of three-body scattering and the bow echo is very obvious. There are many convective vortices and super cells in the system when the strong squall line hit the north and middle part of South China. Bow echoes appear near the vortices. There are obvious cyclones at the forehead of the line echo and divergence at the tail. In addition, meso-scale structure characteristics of the strong squall line process are successfully simulated. Simulation results show that there are obvious convergence, shear and convection unstable structure at the low layer in the squall line zone, the northeastward airflow convergence line in the strong convection zone is closed by the strong convergence region with the center intensity of  $0.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Key words: Squall line; Meso-scale; Numerical simulation