

一次华南强飑线过程的数值模拟分析

陈业国¹ 农孟松¹ 黄海洪¹ 沈桐立²

(1. 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2. 南京信息工程大学)

提 要: 采用高分辨率中尺度数值模式 WRF 对 2007 年 4 月 17 日华南强飑线过程进行数值模拟, 并利用数值模拟结果对强飑线过程进行诊断分析, 探讨其触发和维持机制。结果表明, 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低空辐合高空辐散对飑线的发展和维持有着重要的作用。此外, WRF 模式能成功地模拟出本次飑线过程的 β 中尺度结构特征, 表明该模式对强对流天气系统有一定的模拟能力。

关键词: 飑线 β 中尺度 数值模拟 诊断分析

Numerical Simulation and Analysis on a Strong Squall Line in South China

Chen Yeguo¹ Nong Mengsong¹ Huang Haihong¹ Shen Tongli²

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

Abstract: Using the high-resolution mesoscale model WRF, a strong squall line process on April 17, 2007 in South China was simulated. The numerical simulation results were used to make the diagnostic analysis on the strong squall line process, and to explore its trigger and maintenance mechanism. The results show that low level mesoscale convergence line and shear line are one of the main trigger systems of this squall line process and one of the important maintenance mechanisms. And also the dry invasion and convective instability, and convergence and divergence from bottom to top play an important role in the development and maintenance of the squall line. In addition, meso- β scale structure characteristics of the strong squall line process are successfully simulated, indicating that the WRF model has a certain simulation capability of strong convective weather systems.

Key Words: squall line meso- β scale numerical simulation diagnostic analysis

资助项目: 广西自然科学基金项目“桂科攻 0632006-1D”、“桂科攻 0816006-9”和广西气象局气象科学研究项目“桂气科 200709”联合资助

收稿日期: 2008 年 4 月 22 日; 修定稿日期: 2009 年 6 月 1 日

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^[1]。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。冯晋勤等^[2]研究发现,飊线系统是由高空槽前型的上干下湿引起的不稳定强对流天气,雷达资料分析揭示了飊线的典型的弓状特征。刘娟等^[3]分析发现, β 中尺度的弓形飊线回波带是由弧形的阵风锋触发而成的。杨晓霞等^[4]认为飊线是由 500hPa 西风槽影响产生的,850hPa 切变线和地面低压槽中的辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流云团,在热力不稳定和风垂直切变的环境条件下对流云团不断发展,形成飊线。

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^[5-7],国内在这方面也做了一些有益的探索和研究。慕熙昱等^[8]对 2003 年一次飊线过程进行雷达回波分析与数值模拟,结果表明在系统发生的带状区域内有多个中尺度涡旋存在,在飊线内有中尺度涡旋簇和弓形回波。刘峰^[9]对发生在广州白云机场附近的一次强对流天气过程进行诊断分析和数值模拟,结果表明模式输出的雷达反射率因子强度与实况相当接近,模拟的飊线位置与实况基本一致。余清平等^[10]利用 ARPS 模式对 1995 年发生在美国的一次飊线过程进行数值模拟研究,发现地面中尺度汇合线或切变线是飊线过程主要的触发系统和重要的维持机制之一,对流凝结潜热加热和高低空急流耦合在飊线的发展和维持有重要作用。

本文利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料和常规高空、地面实况资料,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研究,并利用数值模拟结果对强飊线过程进行诊断分析,以进一步认识飊线的结构特征、飊线的触发和维持机理,力求加强对飊线天气过程的认识,提高其预报准确率。

1 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 8 时(北京时,下同)至下午 6 时一条东北—西南向的飊线自北向南袭击了华南地区,飊线经过的地方都出现了不同程度的强对流天气。据统计,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($23\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),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 $52\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,资源等 5 个县还出现了冰雹,冰雹最大直径为 14mm。广东省北部、东部和珠江三角洲等地出现了 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 $33.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。肇庆市广宁县等地下了冰雹,其中博罗县冰雹直径最大达 40~50mm,降雹时间长达 20 分钟。广东省北部和东部的韶关等 21 个县(市)出现了 50mm 以上暴雨,普宁降水量最大,达 113.8mm,1 小时最大雨量出现在韶关曲江小坑水库 71.1mm。这是 1960 年以来广西遭遇的范围最广、受灾最严重的一次由飊线引起的强对流天气。据统计,这次飊线过程造成广西 16 个县(区)受灾,房屋倒塌 151 间,因灾死亡 9 人,受伤 18 人,转移安置 828 人,农作物受灾面积 4368hm^2 ,其中 203hm^2 绝收,直接经济损失高达 2585 万元。广东全省 7646 人受灾,2 人死亡,损坏和倒塌房屋 3542 间,受灾农田、

果树共 852hm², 供电通讯设施严重毁坏, 直接经济损失 2226 万元。

这次飚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 500hPa 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, 鄂霍兹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; 700hPa 南支西风槽东移, 850hPa 切变线位于上海、长沙和贵阳之间; 贝加尔湖以西有 1026hPa 的冷高压中心, 高压前部有一条东北—西南向冷锋。17 日 08 时, 冷锋东南移, 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, 华南大部地区出现明显增温减压。

17 日 08 时, 500hPa 高原槽已压到贵阳南部, 并且温度槽落后于高度槽, 两者交角较大, 这样槽后较强的冷平流有利于槽加深。700hPa 槽后也有较强的冷平流配合, 槽前西南气流强盛, 平均风速超过 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。850hPa 切变线位于贵州南部, 同时在广西东部、广东至湖南、江西南部存在一支较强的西南低空急流, 最大风速达 $18\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。华南大部处于高空槽前、切变线南部、急流的辐合区。在高空气流引导下, 850hPa 切变线和地面冷空气快速南下。17 日上午, 华南北部出现了一条狭长的对流云带, 在其南移过程中造成了华南地区的强对流天气过程。

2 数值模拟方案

采用中尺度数值模式 WRF^[11], 对 2007 年 4 月 17 日华南强飚线过程进行了数值模拟。模式使用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 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。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 121×121 , 格距为 45km; 细网格格点数为 121×121 , 格距为 15km。模式垂直方向为 31 层, 模式顶气压为 50hPa。模式的两重区域物理过程方案采用: LIN 微物理过程方案, RRTM 长波辐射方案, Dudhi 短波辐射方案, Kain-Fritsch 积云对流方案。

模式从 2007 年 4 月 16 日 20 时积分到 17 日 20 时, 共 24 小时, 每 1h 输出一次结果。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。

3 结果分析

3.1 温压场结构分析

在 $t=13\text{h}$ (4 月 17 日 08 时), 从地面气压场分析, 在 28°N 、 $108^\circ \sim 118^\circ\text{E}$ 附近, 出现了一个东北—西南向的等压线密集区, 其北侧是 1014hPa 以上的高压脊区, 而其南侧 27°N 、 $109^\circ \sim 110^\circ\text{E}$ 附近有一个 1004hPa 的闭合低压中心。数值模拟试验发现, 在闭合的低压中心或低压槽处不断有新的强对流生成和发展, 飚线强对流带随时间沿着低压伸展出来的槽发展传播。在 $t=16\text{h}$ (4 月 17 日 11 时), 东北—西南向的密集等压线继续向南移动 (图 1a), 在其东南侧又有新的闭合低压中心生成, 卫星云图分析表明, 在闭合低压附近, 不断有对流云团发展, 形成新的对流系统。此时飚线开始影响华南区域, 这一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。在同一时刻 ($t=16\text{h}$), 与飚线强对流带相对应的是低层 850hPa 低位温区, 中心值为 290K, 飚线对应着等位温线密集区, 温度梯度大, 飚线南北侧温差也非常明显。沿飚线主对流区传播方向有一个高位温区, 其中心值为 304K (图 1b)。

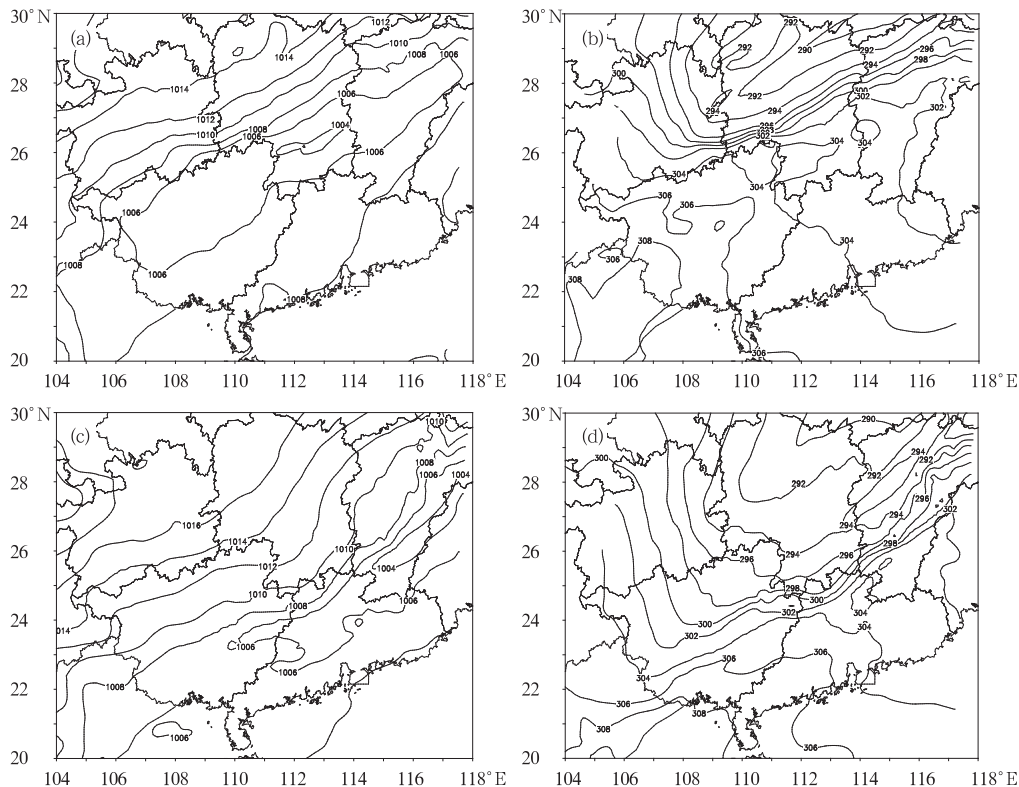


图1 模拟的第 $t=16\text{h}$ (4月17日11时)时刻(a,b)和 $t=22\text{h}$ (4月17日17时)时刻(c,d)的温压场
(a,c) 海平面气压场(单位:hPa);(b,d) 850 hPa 位温场(单位:K)

在 $t=22\text{h}$ (4月17日17时)时刻,飊线移到了华南区域的中南部,此时飊线发展最为旺盛,已经到达飊线的成熟期。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1c),低压闭合中心为1004hPa,低压的范围也明显扩大。分析低层850hPa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292K,且存在与飊线强对流走向一致的范围较大的294K低位温带(图1d),此时飊线强对流带位于低位温带与高温区之间。

在 $t=25\text{h}$ (4月17日20时),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850hPa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 β 中尺度温压结构特征。

3.2 垂直速度场模拟分析

图2为850hPa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 $t=16\text{h}$ (4月17日11时), 26°N 、 $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$ 附近出现了一条东北—西南向、最大垂直上升速度为 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的飊线强对流带(图2a)。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 $t=20\text{h}$ (4月17日15时)和

$t=22\text{h}$ (4月17日17时),飑线强对流带仍然呈东北—西南走向,飑线已经移动到华南中南部地区,此时飑线强对流带最大垂直速度达 $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,飑线的 β 中尺度结构特征最为明显,表明飑线发展到了成熟阶段。到了 $t=25\text{h}$ (4月17日20时),

飑线强对流带最大垂直速度减弱至 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,位于广西境内的西段飑线强对流带已经减弱消失。观测事实表明,4月17日20时后,强飑线对广西的影响已经结束。由于能量已经基本释放完毕,东段飑线强对流带也逐渐减弱消亡。

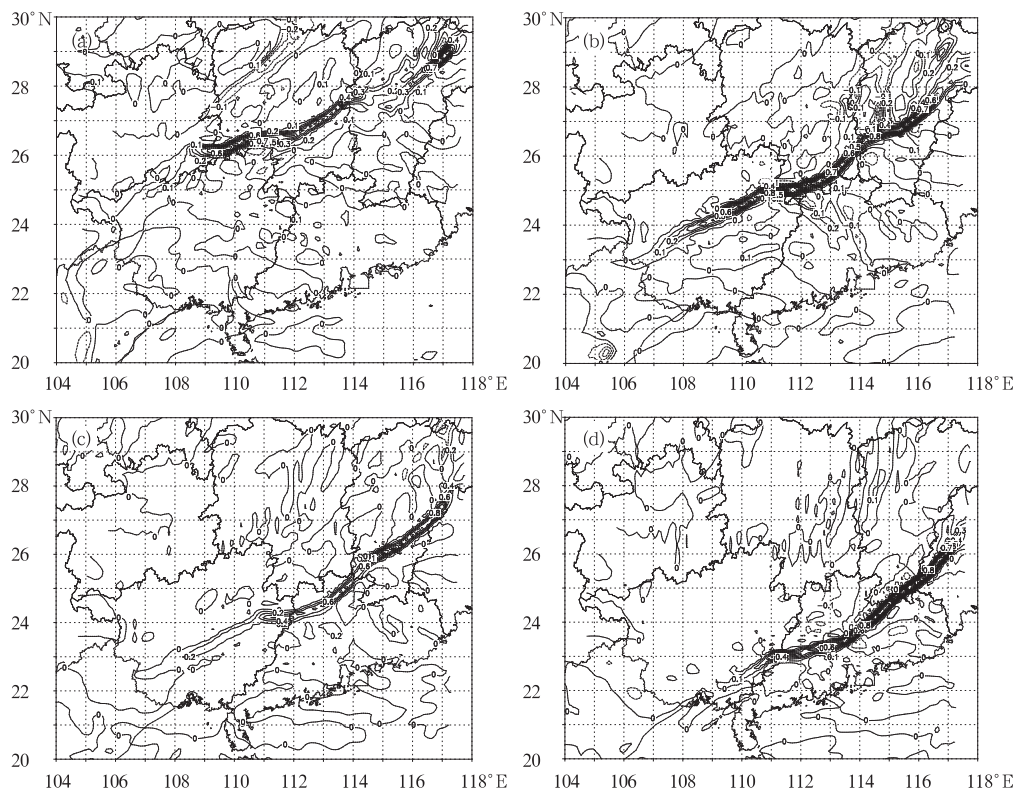


图2 模拟850hPa不同时刻的垂直速度场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a) $t=16\text{h}$; (b) $t=20\text{h}$; (c) $t=22\text{h}$; (d) $t=25\text{h}$

3.3 动力结构模拟分析

这是一次发生在非常有利的天气形势背景下的强飑线过程,从地面到高层500hPa的形势配置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,低层一直处于辐合上升运动,而高层则处于明显的辐散区。数值模拟结果表明,飑线

附近各时刻和层次的涡度值非常有利强对流的发展。表1为各时刻飑线对应的850hPa和500hPa涡度值,图3为模拟的不同时刻850hPa的涡度场。在飑线初始发生阶段, $t=13\text{h}$ (4月17日08时),850hPa的涡度场在湖南和贵州中部出现一条整体结构比较松散的辐合带(图3a),在该辐合带的中心有一值为 $90\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正涡度中心,与此时刻对应的500hPa涡度场上,对应位置的涡度

值为 $-10\times10^{-5}\text{s}^{-1}$,这种高层辐散和低层辐合上升运动有利于对流系统的不断发展,逐渐形成飑线结构。在 $t=16\text{h}$ (4月17日11时),飑线不断发展南移,影响华南地区北部,此时低层850hPa飑线对应的是正涡度密集区,最大中心值为 $100\times10^{-5}\text{s}^{-1}$ (图3b),而对应高层500hPa是大范围的负涡度区,中心值为 $-30\times10^{-5}\text{s}^{-1}$,说明辐合辐散运动进一步加强,此时飑线结构已经形成并不断发展。在 $t=19\text{h}$ (4月17日14时)和在 $t=22\text{h}$ (4月17日17时),飑线处于发展和成熟阶段,在低层850hPa飑线对应的是明显的东北—西南向的正涡度密集区,各时刻对应的飑线结构非常清晰(图3c和图3d)。到 $t=$

25h(4月17日20时),从涡度场分析原来的飑线结构已经明显变得松散,华南地区高层500hPa大部涡度值转为正值,已经无明显辐散运动。与此同时850hPa辐合上升区减弱,仅在福建南部剩余小段弱的飑线系统,华南地区的飑线结构减弱消亡。

表 1 各时刻飑线对应的 850hPa 和 500hPa 涡度值(单位: 10^{-5}s^{-1})

模拟时刻	对应时间	850hPa 涡度值	500hPa 涡度值
$t=13$	17 日 08 时	90	-10
$t=16$	17 日 11 时	100	-30
$t=19$	17 日 14 时	110	-20
$t=22$	17 日 17 时	110	-50
$t=25$	17 日 20 时	90	-10

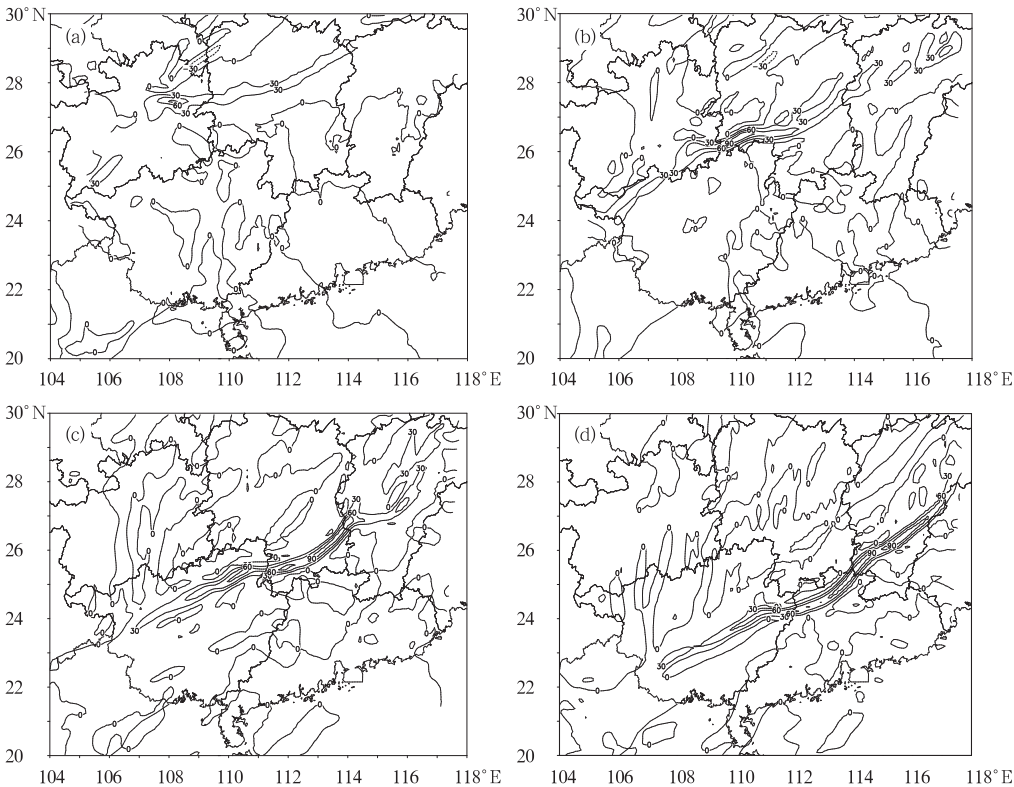


图 3 模拟各时刻 850hPa 涡度场(单位: 10^{-5}s^{-1})
(a) $t=13\text{h}$ (4月17日08时); (b) $t=16\text{h}$ (4月17日11时);
(c) $t=19\text{h}$ (4月17日14时); (d) $t=22\text{h}$ (4月17日17时)

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^[12]。图4a为相对湿度沿广州(113.33°E)的

高度—纬度剖面,在700hPa以上的中高层,空气相对湿度大部小于80%,特别在23°~24.5°N,700hPa以上均为干区,在500hPa附近有干中心,相对湿度小于40%,而低层700hPa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。

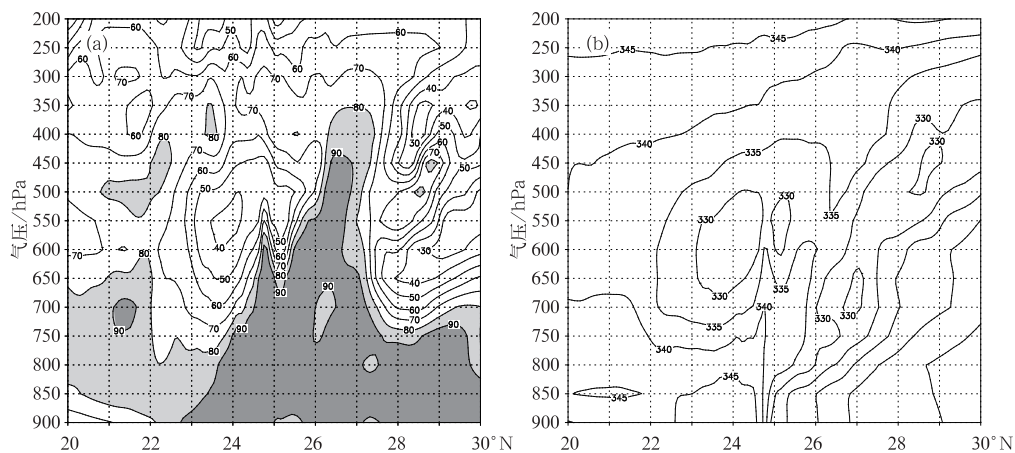


图4 模拟 $t=22\text{h}$ (4月17日17时)时刻相对湿度和 θ_w 高度—纬度剖面

(a) 相对湿度(单位:%,阴影区为大于80%区域); (b) θ_w (单位:K)

假相当位温 θ_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, θ_w 垂直分布可以反映大气的对流性不稳定^[13]。图4b为 θ_w 沿广州(113.33°E)的高度—纬度剖面,中低层500~700hPa是 θ_w 低值区, θ_w 大部小于335K,特别是23°~25°N,在600hPa附近存在一个 θ_w 为330K的低值中心,表明中低层大气存在对流性不稳定,而500hPa以上的高层为 θ_w 高值区,大气相对稳定。

大尺度天气分析表明,2007年4月17日08时,500hPa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,使得华南地区出现对流不稳定性增大。在500hPa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。

图5为模拟低层850hPa不同时刻的流场和散度场。对比各个时刻的低层850hPa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,有强对流带的地方,总有低层气流汇合线或切变线与之对应。在 $t=16\text{h}$ (4月17日11时),与此同时在26°N、108°~118°E附近存在与飊线强对流带对应的是呈东北—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,两种不同性质的气流汇合在一起(见图5a)。汇合线附近有强的辐合,辐合中心强度达 $-0.8 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ (见图5c)。试验结果表明,飊线前沿的强对流带总是与低层中尺度汇合线或切变线相伴,在 $t=22\text{h}$ (4月

17 日 17 时), 同样低层 850hPa 有一切变线与之相伴, 与之相应的是辐合带, 最大辐合强

度达 $-0.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (见图 5d)。

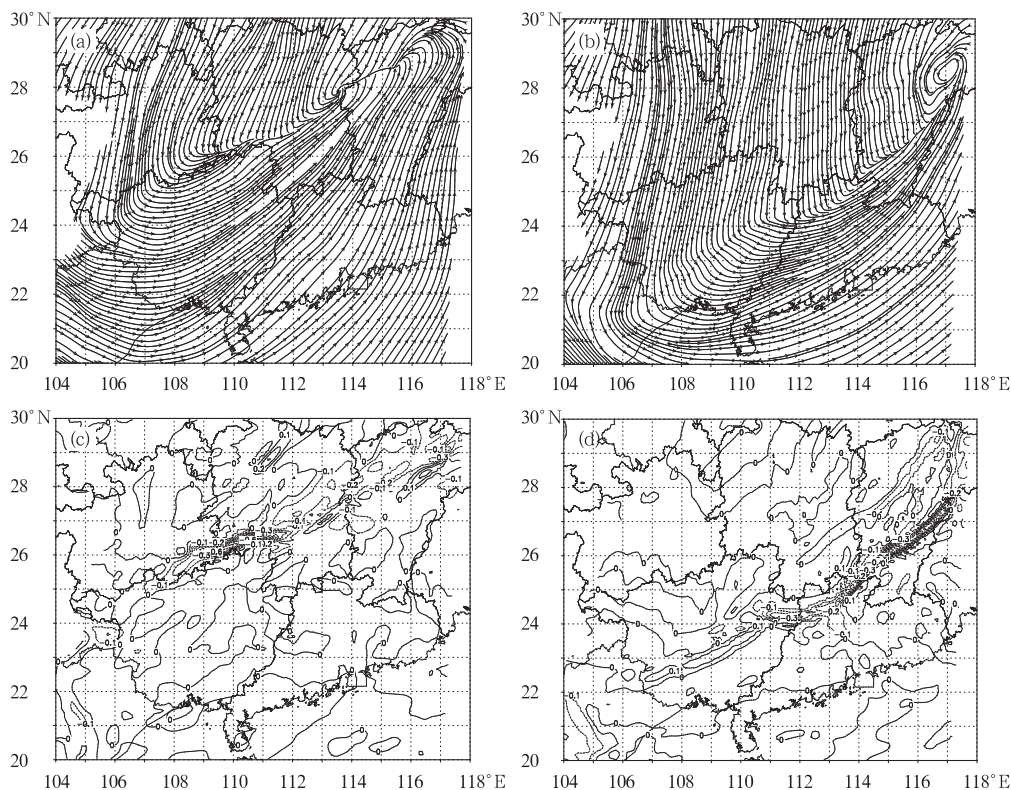


图 5 模拟低层 850hPa 不同时刻的流场(a,b)和散度场(c,d)

(a,c) $t=16\text{h}$; (b,d) $t=22\text{h}$

3.4 雷达回波模拟分析

这次过程飑线经过的地方雷达回波比较明显, 强回波带对应的强对流带结构也很清晰, WRF 模式能较好地模拟出对流带的结构特征, 图 6(见彩页)为桂林多普勒天气雷达回波实况与模拟结果对比。图 6a(见彩页)为 4 月 17 日 12 时 54 分的雷达回波, 由图可见桂林北部附近的回波带呈现弓形, 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接近 200km, 南北宽度接近 50km, 回波中心强度达到 65dBz, 这说明对流系统非常强大。

图 6b(见彩页)为 4 月 17 日 13 时($t=18\text{h}$) 850hPa 雷达回波模拟结果, 由图可见, 桂林(图中 Δ)北部附近是强的回波带, 回波中心在桂林东北方 50km 左右, 强度达到 80dBz, 位置与实况基本一致, 中心强度比实况稍强。从图中的位势高度场和风场分析, 在强回波带中对应的是强的辐合中心。图 6c(见彩页)为 4 月 17 日 15 时 04 分的雷达回波, 由图可见, 此时的强回波带已经移至桂林南部约 120km 的地方, 回波中心强度仍有 55~60dBz, 强对流带仍然处于旺盛时期。图 6d(见彩页)为 4 月 17 日 15 时($t=20\text{h}$) 850hPa 雷达回波模拟结果, 由图可见长回波带已经

移动到桂林(图中 Δ)南面,强回波带离桂林约50km,回波中心在桂林东北方约80km的地方,强度达到80dBz,位置与实况相当接近,只是中心强度比实况稍强。总体而言,模式对雷达回波的模拟是成功的,事实上强飚线经过之处,华南地区很多地方出现冰雹、雷雨天和暴雨等强对流天气。

4 结语

(1) 这是一次典型的飚线天气过程,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、地面冷锋是天气尺度的主要影响系统。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飚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低空辐合高空辐散在飚线的发展和维持有着重要的作用。

(3) 高分辨率中尺度数值模式WRF能成功地模拟出本次飚线过程的 β 中尺度结构特征,从热力结构、动力结构和雷达回波分析结果表明,该模式对本次飚线过程的结构特征模拟是成功的,说明WRF模式对强对流天气系统有一定的模拟能力。

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] 冯晋勤,童以长,林河富,等. 一次强飚线过程的中小尺度特征分析[J]. 气象,2006,32(12):72-75.
- [3] 刘娟,宋子忠,项阳,等. 淮北地区一次强风暴的弓形回波分析[J]. 气象,2007,33(5):62-68.
- [4] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 山东省2006年4月28日飚线天气过程分析[J]. 气象,2007,33(1):74-80.
- [5] Fovell R G, Ogura Y. Numerical simulation of a mid-latitude 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] 慕熙昱,党人庆,陈秋萍,等. 一次飚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.
- [9] 刘峰. 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟[J]. 气象,2008,34(2):18-24.
- [10] 余清平,王兴宝,陈中一. 一次飚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.
- [11] 章国材. 美国WRF模式的进展和应用前景[J]. 气象,2004,30(12):27-31.
- [12] 于玉斌,姚秀萍. 干侵入的研究及其进展[J]. 气象学报,2003,61(6):769-778.
- [13] 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.

陈业国等:一次华南强飑线过程的数值模拟分析

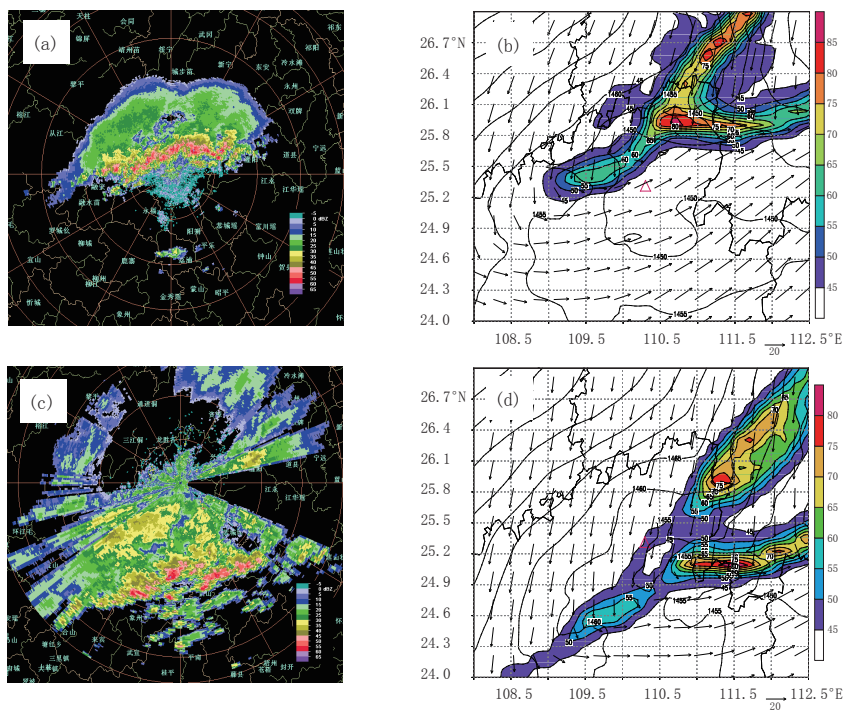


图 6 雷达回波实况与模拟结果对比

(a) 4月17日12时54分雷达回波; (b) 4月17日13时 ($t=18h$) 850hPa模拟结果: 雷达回波位势高度(实线), 风矢量;
(c) 4月17日15时04分雷达回波; (d) 4月17日15时 ($t=20h$) 850hPa模拟结果: 雷达回波, 位势高度(实线), 风矢量