

2003 年淮河汛期一次中尺度强暴雨过程的 诊断分析和数值模拟研究^{*}

王 欢¹ 倪允琪²

1 南京大学大气科学系, 南京, 210093

2 中国气象科学研究院, 北京, 100081

摘 要

2003 年 7 月 4—5 日淮河流域发生了一次中尺度强暴雨过程, 致使淮河洪水泛滥。这次暴雨过程由中尺度对流系统(MCS)以及因其发展而产生的低涡造成。通过对此次过程的诊断分析和新一代细网格 WRF 中尺度预报模式的数值模拟, 研究了这次过程发生发展的机制。模拟结果较好地描述了本次暴雨及中尺度系统发生、发展的时空演变过程。分析结果表明: 此次移动性暴雨过程的前期由不断向东移动发展的 MCS 造成, 后期降水则由低涡切变线产生的中尺度低涡引起。同时, 副热带高压明显偏西偏北, 并维持较长时间, 造成雨带一直维持在淮河流域。高层辐合中心的加强使低空急流不断增强, 低空急流的增强进而引起低层辐合的加强, 而低层辐合的加强以及上升运动的潜热释放导致低涡的发生, 低涡形成及形成后移动缓慢, 造成了淮河流域的大暴雨。高层中尺度辐散区的抽吸对低层中尺度涡旋的发生发展起到了促进和加强的作用。低层的中尺度辐合场和高层的中尺度辐散场的发展与耦合对中尺度系统的发展有很好的预示作用。低层中尺度辐合区的减弱预示着系统的衰减, 西南偏西的中层相对干冷空气侵入并在梅雨锋前缘下沉促进了系统的衰减。

关键词: 梅雨锋低涡, 中尺度对流系统(MCS), WRF 模式, 高层中尺度辐散区。

1 引 言

2003 年 6 月下旬至 7 月上旬, 淮河流域发生了继 1991 年以来又一次持续性的强暴雨, 致使淮河洪水泛滥。淮河流域总降水量普遍有 400—600 mm, 比常年同期偏多 1—2 倍。险情不断发生, 不得不先后紧急动用 9 个行蓄洪区分洪, 以致沿淮地区发生特大洪涝灾害, 直接经济损失 350 多亿元^[1]。因此, 深入分析这种梅雨锋上中尺度对流系统造成的特大暴雨过程, 并进行中尺度数值模拟研究十分必要。

2003 年淮河流域梅雨期出现了 3 次强降水过程, 其中第 2 次降水过程(7 月 4—5 日)是导致淮河流域洪涝的主要降水过程。此次降水是由梅雨锋中尺度对流系统(MCS)和低涡造成。对梅雨锋上发生的 MCS 和低涡国内外已经有很多的研究成果,

陶诗言^[2]曾对中国和长江中下游梅雨期暴雨作过系统的天气分析研究; 徐亚梅^[3]等对 1998 年 7 月特大洪水期暴雨进行了研究, 指出其是由梅雨锋上突发的中 β 低涡引起的; 王建捷^[4]等对 1998 年 6 月的一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统进行了研究, 提出了低层中尺度辐合线上强烈发展的梅雨锋暴雨中 β 尺度对流系统的气流运动图像; 孙建华^[5]等对 2002 年 6 月下旬发生梅雨锋上的低涡和 MCS 进行了研究。梅雨锋面的性质随季节、所在地理位置的不同而不同^[6], 对梅雨锋中尺度对流系统的研究也需要细致化。2003 年 7 月 4—5 日的这次暴雨过程, 造成滁州和南京 24 h 降水分别为 380 和 195 mm。为什么会在如此短的时间造成强度如此大的暴雨? 造成大暴雨的中尺度对流系统和低涡的结构及演变特征如何? 这些问题都是值得进一步思考的。本文采

^{*} 初稿时间: 2005 年 5 月 10 日; 修改稿日期: 2005 年 7 月 12 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”(2004CB418300)

作者简介: 王欢, 1979 年生, 硕士, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟的研究。E-mail: wangh@nju.edu.cn

用常规资料和 2003 年“973”中国暴雨实验的外场观测资料、 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料,以及每小时一次的 TBB 资料和降水资料,对此次暴雨过程的大尺度背景场和中尺度系统进行诊断分析,并利用新一代细网格中尺度 WRF 模式对其进行数值模拟,以揭示梅雨锋暴雨发生发展的物理机制。

2 暴雨过程的实际天气形势分析

2.1 大尺度环流形势分析

从高低空环流形势来看,此次过程是在有利大暴雨发展的大尺度背景条件下产生的。500 hPa 高空图(图略)上看,东亚中高纬度呈现两脊一槽的环流形势。在这种中高纬形势下亚洲中纬地区不断有短波槽东移,造成小股冷空气不断东移南侵。由于乌拉尔山阻高的稳定存在,使得来自极地的冷空气沿高压脊前的西北气流东移南下。副热带高压(5880 gpm)的北缘正好位于中国的淮河流域,这恰好是冷暖空气交汇的地区,这对中国江淮地区维持冷暖空气的对峙形势十分有利。在副热带高压(副高)和西亚高压之间为一低压带,这种环流形势使其

中纬度宽阔槽区底部的西风扰动,有利于在淮河流域上空生成短波小槽。地面有梅雨锋低压和梅雨锋系生成和发展,与该短波槽的生成、转向和发展相对应,在低空有中尺度低涡切变线发生发展。在此次大暴雨过程中,副高明显偏西偏北,西伸至 105°E ,北跳至 30°N ,并维持较长时间,造成雨带一直维持在淮河流域,而不是以往的长江流域。

图 1 是 MCS 发展时的天气合成图。可以看到在中国淮河流域有一西南—东北走向的 θ_{se} 的高值区,具有高温高湿的空气。MCS 活跃在 θ_{se} 高值区的轴线附近,正好是西风带南部边界与西太平洋副热带高压脊线的西北侧接壤处。梅雨锋位于等 θ_{se} 密集带,其南部就是 θ_{se} 的高值区,正是暴雨发生的地区。低空急流的水汽输送主要在 MCS 的西南方,使得新的对流单体在 MCS 后部不断产生。同时,雨带位于高空急流入口处的右侧,这里有很强的高空辐散气流,起到了抽吸和通风的作用,有利于对流系统的发展。上述结果表明大尺度背景场和中尺度环境场都非常有利于淮河地区持续性强降水的发生。

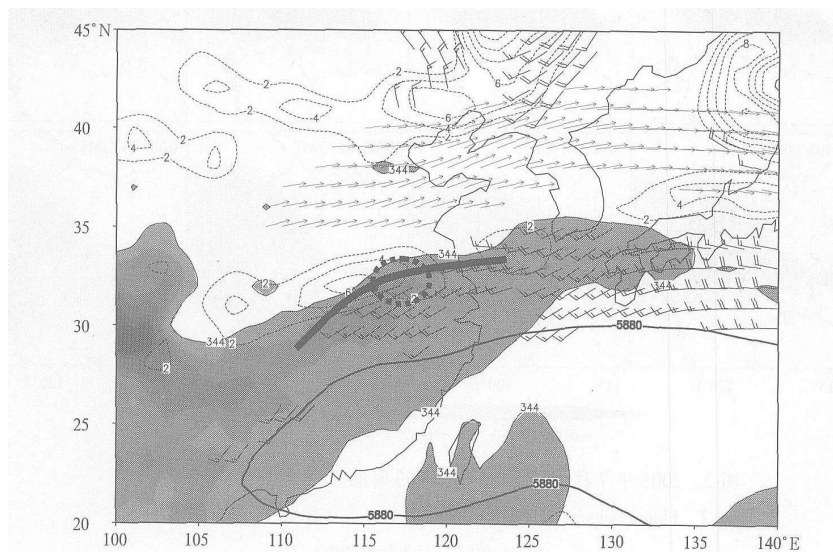


图 1 2003 年 7 月 4 日 18 时 MCS 发展时的天气形势合成图
(粗实线表示梅雨锋;粗虚线表示 MCS 活动位置,阴影区为 850 hPa 上 $\theta_{se} \geq 344$ K;
箭头表示 200 hPa 风速 ≥ 40 m/s;风标表示 850 hPa 风速 ≥ 12 m/s;实线表示
500 hPa 上 5880 gpm 线;短虚线表示 500 hPa 上等涡度线 $\geq 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 1 Conceptual synoptic plot for MCS at 18:00 UTC 4 July 2003
(The thick solid line represents the meiuyu front. The thick dashed line delineates the position of MCS and shaded areas are $\theta_{se} \geq 344$ K at 850 hPa. Arrows are velocities greater than 40 m/s at 200 hPa and barbs winds exceeding 12 m/s at 850 hPa. The solid line is the 5880 gpm contour of the geopotential height at 500 hPa, and dot lines are the vorticity contours ($\geq 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) at 500 hPa)

2.2 MCS 和低涡的发生发展

造成 4—5 日强暴雨过程最主要的中尺度对流系统有两个(分别命名为 MCS-A 和 MCS-B), 均与后面发生发展的低涡有关。4 日 16 时(世界时,下同)MCS-A 形成于安徽与江苏交界的中部(图 2), 该地区降水开始, 滁州站为 45 mm(图 3a)。17 时 MCS-A 发展成直径为 100 km 左右的中尺度系统, 并向东移动到南京上空, 江苏中部出现降水, 其后部形成了 MCS-B, 并开始发展。至 20 时两者在东移过程中逐渐发展至强盛为两个直径 300 km 的圆形

对流体, 云顶温度低于 -70 , 雨区范围扩大, 到达江苏中南部, 南京站 20 时降水为 50 mm(图 3b)。22 时 MCS-A 在东移过程中减弱消失, MCS-B 继续向东发展。至 00 时, 南京迎来第 2 次降水高峰, MCS-B 后部开始出现空白区, 之后很快转为低涡云系, 低涡云系随时间推移逐渐向东移动出海并于 5 日 06 时消失, 降水随之结束。通过以上分析可以看出, 此次移动性暴雨过程的前期由不断向东移动发展的 MCS 造成, 后期降水则由低涡切变线产生的中尺度低涡引起。

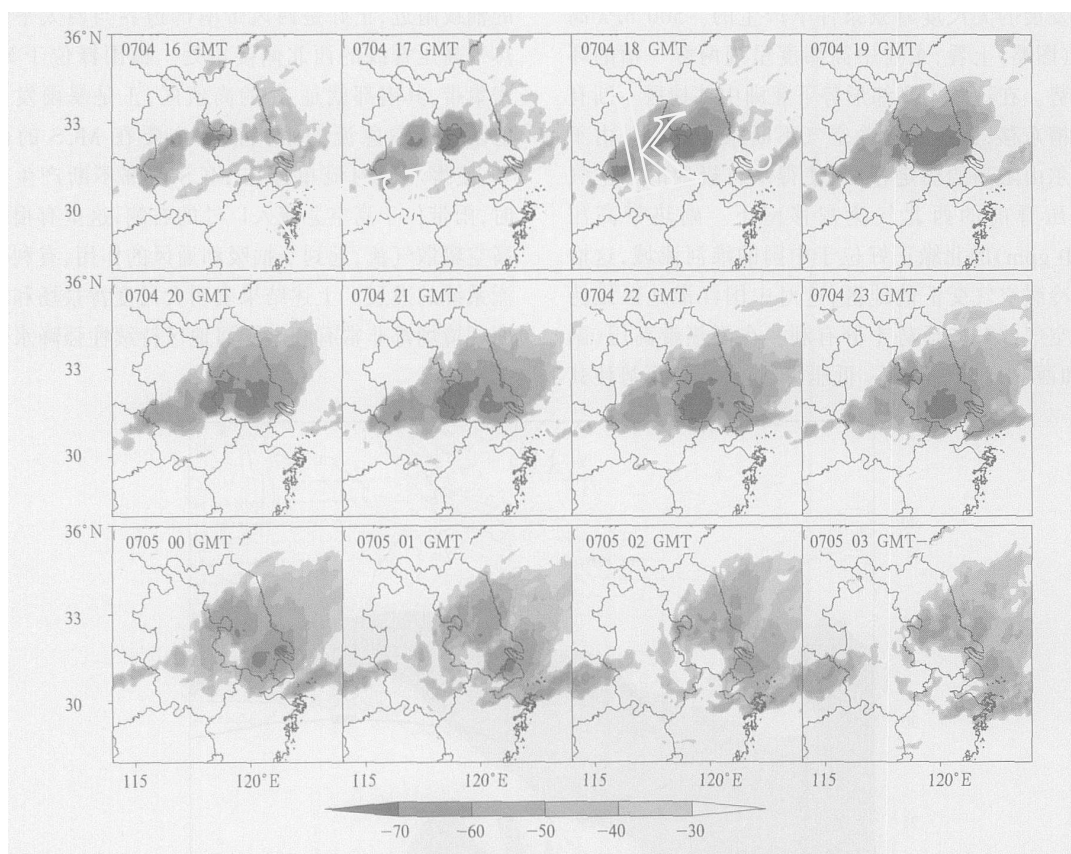


图 2 2003 年 7 月 4 日 16 时—5 日 03 时的 TBB 分布(阴影 ≤ -30)

Fig. 2 Hourly observed TBB (≤ -30 , shaded) from 16:00 UTC 4 July to 03:00 UTC 5 July 2003

3 数值模拟

3.1 数值模式与模拟方案

WRF(the Weather Research and Forecast)模式是由 NCAR、NOAA 和俄克拉荷马大学的暴雨分析预报中心(CAPS)等多单位共同合作发展起来的一代非静力平衡、高分辨率、科研和业务预报统一的

中尺度预报和资料同化模式。该模式采用全新的程序设计,最重要的目标就是发展一个侧重于 1—10 km 网格尺度,能同时从事业务预报、区域气候预报、以及理想的动力研究的统一模式。WRF 模式的最终目标将取代现有的业务模式,目前已初步应用于业务预报试验,在北美地区取得了较好的预报效果。该模式目前为显式分离的欧拉模式,采用质量

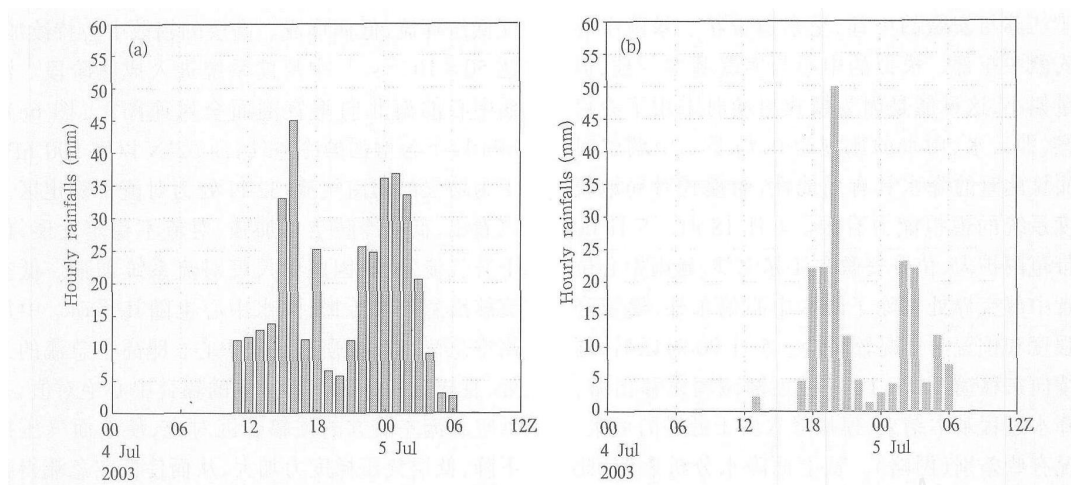


图3 2003年7月4日00时—5日12时(世界时)滁州站(a. 32.13°N, 118.18°E)、
南京站(b. 32.00°N, 118.80°E)单站逐时降水演变(单位:mm)

Fig. 3 Hourly rainfalls (mm) at (a) Chuzhou (32.13°N, 118.18°E)
and (b) Nanjing (32.00°N, 118.80°E) station from 00:00 UTC 4 July to 12:00 UTC 5 July 2003

地形追随坐标。

本文用中尺度模式 WRF 2.0 对 2003 年夏季淮河流域梅雨期 7 月 4 日 12 时—5 日 12 时一次降水过程进行数值模拟。WRF 模式采用全可压、非静力学方程,本次模拟实验选用欧拉质量坐标和 Runge-Kutta 3 阶时间积分方案,微物理过程采用 Ferrier (new Eta) 方案^[7],积云对流参数化方案采用浅对流 Eta Kain-Fritsch 方案^[8],同时采用 RRTM 长波辐射方案^[9]、Dudhia 短波辐射方案^[10]和 MRF 边界层方案^[11]等。模式的初始条件和侧边界条件均采用

NCEP 每 6 h 一次的全球再分析资料,积分区域中心为 32°N, 118°E,网格点数为 181×161,网格距为 9 km,垂直方向为 31 个不等距的 σ 层,模式顶气压 50 hPa。模式结果每小时输出一次。

3.2 模拟概况

首先,将模拟的每 6 h 降水与实况进行对比。此次降水过程是由于 6 月 30 日副热带高压突然增强北抬,导致主要的雨带转入淮河流域。主要集中在 7 月 4 日 12 时—7 月 5 日 12 时。从这一时段的每 6 h 降水量图(图 4)可以看出,4 日 12—18 时的雨

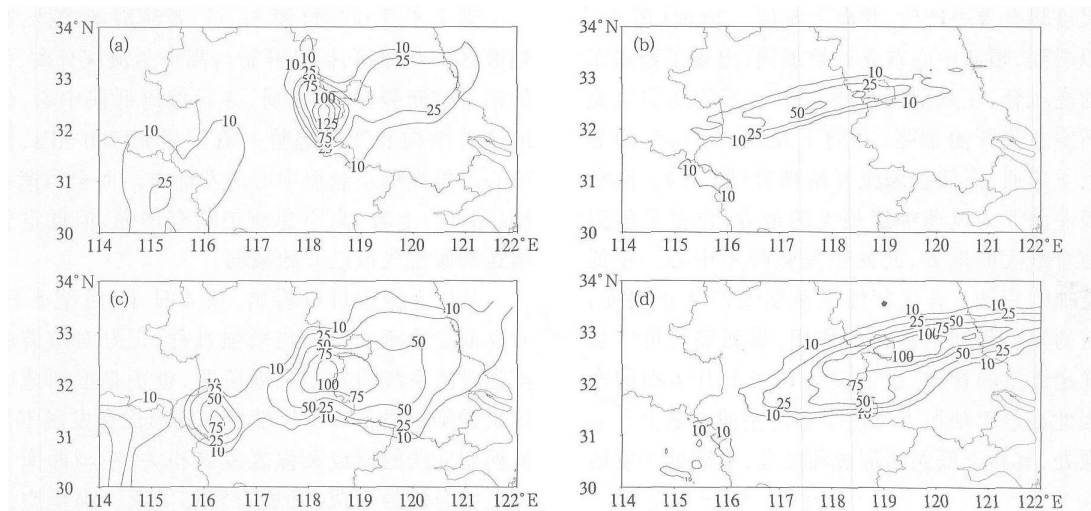


图4 7月4日12时—5日00时实况(a,c)降水量与模拟(b,d)降水量
(a,b. 4日12—18时;c,d. 4日18时—5日0时,单位:mm)

Fig. 4 Observed (a,c) and simulated (b,d) 6 h rainfalls (mm)
from 12:00 to 18:00 (a,b) and 18:00 UTC 4 July to 00:00 UTC (c,d) 5 July 2003

带位于江苏与安徽的中部,呈东西带状。暴雨中心位于安徽中东部。模拟的中心与实况基本一致,但降水量偏小,这可能是由于模式启动时采用了冷启动方案,即云水、雨水的比湿为 0,需要一个调整时间。而且此时的降水具有局地性,而模式对局地较小尺度系统的模拟能力有限。4 日 18 时—5 日 00 时雨带范围扩大,位于安徽和江苏中部,暴雨中心位于两省中部交界处。除了降水中心偏东外,模拟降水的强度和位置与实况较吻合。5 日 00 时以后,雨带继续向东移动,并于 12 时后逐渐减弱东移出海,整个降水过程基本结束,模拟降水由于低涡的偏东,与实况有些差别(图略)。从上面降水分析表明,此次大暴雨过程从淮河上游逐渐向下游发展,引发了淮河流域的洪水泛滥,总体上看,模式还是较好地模拟了暴雨发展和强盛期过程以及雨带走向,模拟结果是可以用于分析此次强暴雨过程的发生发展机制的。

3.3 高低层中尺度辐散、辐合区的发展及其耦合对系统生成与发展的作用

图 5 为模拟出的系统发展成熟阶段的高低层高度场、风场和散度场合成图。模拟开始后,在安徽、江苏上空西南与西北气流强烈辐合,形成一条中尺度切变线,切变线上有气旋性扰动,但并未出现气旋性环流。从沿系统中心南北向垂直剖面的全风速等值图(图 6a)上可以看到,在 800 hPa 产生强度为 20 m/s 的中尺度急流,并向上发展。低空中尺度急流与中尺度辐合首先产生,并向上发展。20 时(图 5a, b)可以看到,辐散中心首先开始加强,出现了西南东北向的高压脊,在其前缘出现了中尺度的高空急流区。高空急流开始加强,并向下发展,20 m/s 的等值线上下连通,高低空急流开始耦合(图 6b)。低空急流核左前方为风速梯度最大的地方,也就是暖湿气流辐合最大的地方,此处正是强降水中心。在低空急流轴的左侧,有气旋性风速切变产生正涡度,为低空的辐合起到了加速的作用,强烈辐合可以触发不稳定能量的释放,进而又有利于上升运动的产生。因此在急流轴最大风速中心的左前方是上升运动最强处,有利于低涡的形成和发展,系统处于发展阶段。

到了 22 时(图 5c, d),低层辐合带上形成了强烈发展的中尺度辐合中心,并伴有中尺度低压进一步加深,中心值达 1430 gpm,辐合中心处形成中尺

度低压环流,低涡形成。高层的辐散中心持续加强,达 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,中尺度系统进入成熟阶段。沿低涡中心的南北向垂直剖面全风速图上(图 6c) 550 hPa 以下为增强的冷空气,而 32°N 以南 500 hPa 以下为增强的偏南气流,32°N 处为对流不稳定区。可以看出,低层冷暖空气加强,对流不稳定发展,促使上升气流发展,因此中尺度对流系统加强。低空急流核沿急流轴传播,降水中心也随其移动。中尺度高空急流后部为强的辐散中心,即高空急流的入口处,且辐散中心值大于低层的辐合中心绝对值,并与低空急流左前方的强辐合区对应,使地面气压持续下降,低层气压梯度力加大,从而使低空急流得到维持和加强。高空强辐散使上升运动加强,加强的上升运动又可进一步促进低空辐合。高层辐散的加强引起了低层辐合的加强,从而使低涡加强,说明高层辐散中心的抽吸对低层中尺度涡旋的发生发展起到了促进和加强的作用。而低层的水汽辐合引起上升运动,导致水汽凝结释放潜热,而潜热的释放又为低涡的发展提供了能量,从而使低涡迅速得到发展,而低涡的发展又进一步加强了低层的水汽辐合。因而在低空急流输送充足水汽时,上升运动与低涡形成正反馈。因此可以认为,高层辐合中心的加强使低空急流不断增强,低空急流的增强进而引起低层辐合的加强,而低层辐合的加强以及上升运动的潜热释放导致低涡的发生,低涡形成及形成后移动缓慢,造成了淮河流域的大暴雨。

到了 5 日 00 时(图 5e, f),系统继续维持,高层辐散区仍然加强,但已开始与高空急流区分离,低层的辐合带断裂,开始减弱,并且偏离低涡中心,低层的这种结构和变化趋势一直伸展到 700 hPa,低涡中心已偏离低空急流中心的左前方。而全风速垂直图(图 6d)上看,高空急流仍略有增强,但低空急流输送的暖湿气流已开始减弱。

从以上分析可以看出,从 4 日 12 时至 5 日 00 时高低空急流的发展与增强过程,正好对应着中尺度强对流系统的发生发展阶段,也正是淮河地区的这次强降水过程。中尺度低涡的形成和发展不仅与低涡切变线的形成和强烈发展相关,还与西南方向的低空急流的形成、发展有密切关系。高低空急流耦合时,有高层辐散中心和低层辐合中心的对应,高层中尺度辐散区的加强要早于低层中尺度辐合区的加强,且中心高于低层中心绝对值,为低层中尺度涡

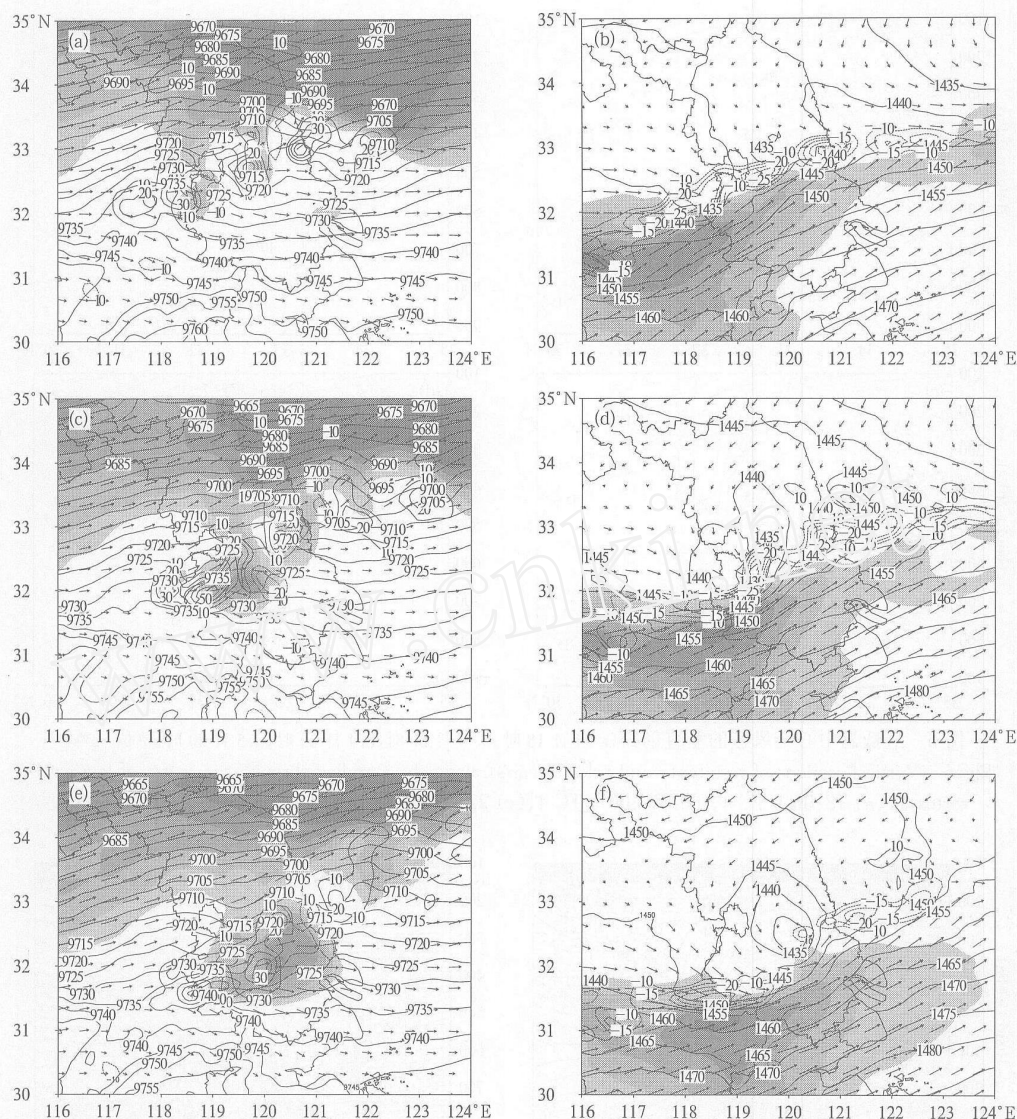


图 5 模拟的 300 hPa (a, c, e) 和 850 hPa (b, d, f) 风场(箭头)、高度场(粗线,单位: gpm)

和散度场(实线和虚线,单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)合成

(a, b. 4 日 20 时; c, d. 4 日 22 时; e, f. 5 日 00 时; a, c, e 中阴影风速 $\geq 20 \text{ m/s}$; b, d, f 中阴影风速 $\geq 14 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Simulated 300 hPa (a, c, e) and 850 hPa (b, d, f) wind (arrows), geopotential height (solid line, gpm) and divergence (dot line, $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) at (a, b) 20:00 UTC 4, (c, d) 22:00 UTC 4, and (e, f) 00:00 UTC

5 July 2003 (Wind speeds $\geq 20 \text{ m/s}$ in (a, c, e) and $\geq 14 \text{ m/s}$ in (b, d, f) are shaded)

旋的发展提供了动力条件。同时,二者的发展加强要早于系统的发展增强,因此可以说低层的中尺度辐合场和高层的中尺度辐散场的发展与耦合对中尺度系统的发展有很好的预示作用。由此可以看出, WRF 模式模拟的高低空急流的演变与实况较为吻合,模拟低涡生成的时间地点与实况一致,但并未停滞而是向东移动,这可能是由于实况中低空急流核向东移动造成的。

3.4 西南中层相对干冷空气的侵入对系统衰减的作用

5 日 02 时以后,中尺度对流系统在中层相对干冷空气的影响下开始减弱。从模拟系统衰减期的流场和假相当位温场(图 7)可以看到,在 5 日 02 时梅雨锋前缘的 32°N 附近上空 600—800 hPa 处,一方面由于西南偏西的中层相对干冷空气的侵入,另一方面,云团内下落雨水的蒸发使下落雨云区温度比其周

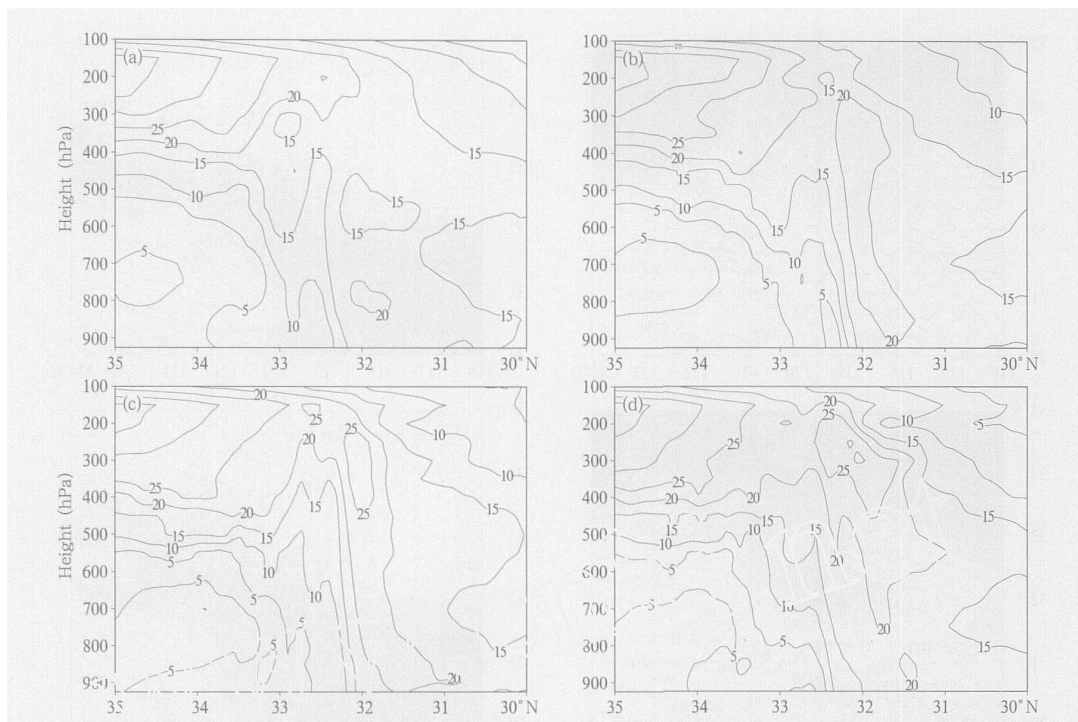


图6 沿低涡中心全风速的垂直剖面(a. 4日18时,b. 4日20时,c. 4日22时,d. 5日00时;单位:m/s)
Fig. 6 Vertical sections of resultant wind velocity (m/s) along the meridian through the center of low-level vortex at (a) 18:00 UTC 4, (b) 20:00 UTC 4, (c) 22:00 UTC 4 and (d) 00:00 UTC 5 July 2003

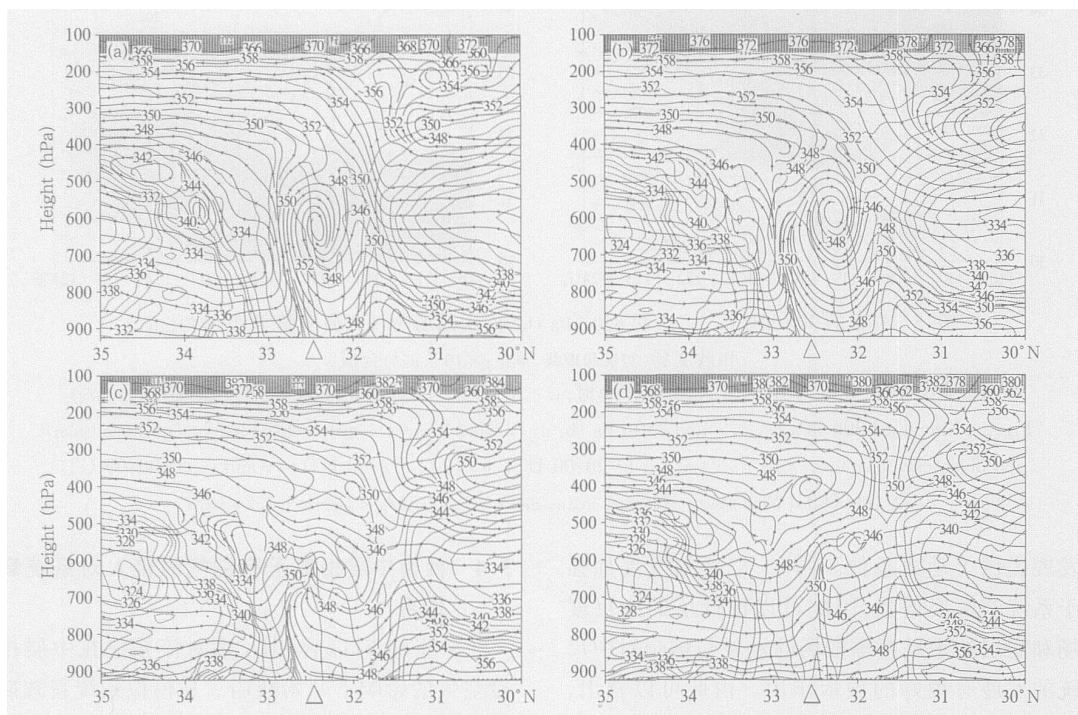


图7 模拟的沿低涡中心假相当位温 θ_{se} (虚线, 单位: K) 和 $v-w$ 经向剖面 ($w \times 10$)
(a. 7月5日02时, b. 7月5日03时, c. 7月5日04时, d. 7月5日05时; 表示低涡的位置)
Fig. 7 Vertical sections of the simulated pseudo-equivalent potential temperature θ_{se} (dot line, K) and streamlines along the meridian through the center of low-level vortex at (a) 02:00 UTC, (b) 03:00 UTC, (c) 04:00 UTC and (d) 05:00 UTC 5 July 2003 (indicates the position of the low-level vortex)

围温度要低,影响了云内的层结稳定性,从而使云团中部开始出现下沉气流(图 7a),此处同时形成 θ_{se} 的低值中心,阻断了西南暖湿气流,并进一步减弱低层辐合。锋前的上升气流也由于下沉气流的抵消作用,只伸展到对流层中层,便与锋前的下沉气流合并下沉,在对流云团内形成锋前的次级垂直环流。这种次级环流不同于发展时期的次级环流,它不仅抵消部分上升气流向高层的水汽输送,也抑制对流系统的发展,而它带来的相对干冷空气有利于中高层层结稳定,抑制对流向上发展,促进系统的衰减。03 时下沉气流逐渐加强(图 7b),垂直的次级环流更为明显,锋前上升气流无法向对流层高层继续输送,潜热释放因此也减少,从而加速了对流系统的衰亡。这种情况在随后的流场上更为清晰,到了 05 时(图 7d),在低涡上空,上升气流由于锋前下沉气流的影响而减弱消失,水汽无法向上输送。同时,由于低层辐合高层辐散的减弱,使低空急流也减弱(图略),导致低层水汽输送减少,降水也因此减弱停止。低涡中心低层辐合区消失,高层也已无明显的辐散中心,说明中尺度系统已经衰减。

因此可以认为,低层辐合中心的减弱预示着系统的衰减,西南偏西的中层相对干冷空气侵入并在梅雨锋前缘下沉促进了系统的衰减。另外从高层流场变化来看,在系统发展阶段,中尺度辐散区在高空急流的辐散区形成,中尺度系统一直在辐散区内发展。但在系统衰减时期,高层的辐散气流南压,造成系统的减弱。在发展时期低层中尺度低压前部出现的中尺度高压,其辐散场加强了低压的辐合。但在系统衰减时期,中尺度高压减弱并入中尺度低压,从而加速了系统的衰减。

综上所述,在此次中尺度强暴雨过程中,高层辐散场的加强、高低空急流的耦合以及强烈的上升运动,促进了中尺度系统的发展。而中层相对干冷空气的侵入以及高层辐散气流的南压和低层中高压的减弱并入,加速了中尺度系统的衰减。

4 结论与讨论

(1) 此次灾害性暴雨过程是在有利的大尺度背景场下发生的,前期是由 MCS 造成,后期与低涡的发生发展有关;对流发生前,冷暖空气在淮河流域交汇对峙,出现层结不稳定,对流有效位能大量积聚。

当 MCS 经过时,触发了不稳定机制,导致不稳定能量的大量释放。

(2) 高层的中尺度辐散区和低层中尺度辐合区的形成和发展对低层中尺度涡旋的发生发展起到促进和加强的作用。高层中尺度辐散区的加强要早与低层中尺度辐合区的形成和系统的增强,其发展对系统的发展有很好的预示作用。

(3) 低层辐合中心的减弱预示着系统的衰减,西南偏西的中层相对干冷空气侵入并在梅雨锋前缘下沉促进了系统的衰减。

(4) 采用 9 km 网格距的 WRF 模式能较好地模拟出未来 24 h 内的暴雨过程和物理场的结构,为江淮地区梅雨锋大暴雨的预报和分析提供了新的思路和方法。

本文分析的梅雨锋低涡的发生发展主要依赖于尚在开发研究阶段的 WRF 模式,其模拟结果与实况尚有一定差距,另外下沉气流增强以及地形影响的原因等问题还有待更进一步的研究。

参考文献

- [1] 徐良炎. 淮河流域暴雨频繁洪涝严重 江南华南酷热少雨伏旱发展. 气象, 2003, 29(10): 62-63
Xu Liangyan. Frequent heavy rain and severe floods in the Huaihe River, hot weather and drought in South China. Meteor Mon (in Chinese), 2003, 29(10): 62-63
- [2] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyuan, et al. Heavy Rain in China. Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [3] 徐亚梅, 高坤. 1998 年 7 月 22 日长江中游中 β 低涡的数值模拟及分析. 气象学报, 2002, 60(1): 85-90
Xu Yamei, Gao Kun. Simulation and analysis of meso- β vortex over the middle reach of the Yangtze River on 22 July 1998. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2002, 60(1): 85-90
- [4] 王建捷, 李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析. 气象学报, 2002, 60(2): 146-155
Wang Jianjie, Li Zechun. Numerical simulation and diagnostic analysis on mesoscale convective systems of a torrential rain case in the Meiyu period of 1998. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2002, 60(2): 146-155
- [5] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. 大气科学, 2004, 28(5): 675-691
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. A study of vortex and its mesoscale convective system during china heavy rainfall

- experiment and study in 2002. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 2004, 28(5): 675-691
- [6] 陶诗言,倪允琪等. 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京:气象出版社, 2001. 184pp
- Tao Shiyan, Ni Yunqi, et al. The Study of Mechanism and Prediction of Heavy Rain in China in 1998 Summer. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 184pp
- [7] Ryan B F. On the global variation of precipitating layer clouds. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(1): 53-70
- [8] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. J Atmos Sci, 1990, 47(23): 2784-2802
- [9] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. J Geophys Res, 1997, 102(D14): 16663-16682
- [10] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci, 1989, 46(20): 3077-3107
- [11] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. Mon Wea Rev, 1996, 124(10): 2322-2339

DIAGNOSTIC ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF A MESOSCALE TORRENTIAL RAIN SYSTEM IN THE HUAIHE VALLEY DURING THE RAINY SEASON IN 2003

Wang Huan¹ Ni Yunqi²

¹ Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract

A mesoscale torrential rain was observed in the Huaihe River valley from 4 to 5 July in 2003 that induced the flooding of the Huaihe River. The rainfall process was caused by a mesoscale convective system (MCS) and a vortex associated with its development. In order to study their mechanism of evolution, the diagnostic analysis of the rainfall process was performed, and the fine-meshed WRF mesoscale numerical model employed for the simulation analysis. The simulation results show that the rainfall and the genesis and development of the mesoscale system are well described. The analyses demonstrate that the precipitation in the early stage was brought about by an eastward moving and developing MCS, and in the later stage by a mesoscale vortex developed on the vortex-shear line. Meantime, the subtropical high laid significantly west and north of normal, and stayed there for a long time of period, causing the rain belt maintained over the Huaihe River valley. The strengthening of the upper-level convergence center led to the continuously intensifying of the low level jet stream, which in turn enhanced the lower-level convergence. The enhanced lower-level convergence and the release of the latent heat in the ascending motion resulted in the genesis of a vortex. Its genesis and afterwards slow movement brought about the torrential rain in the Huaihe River valley. The pumping of the upper-level mesoscale divergence area facilitated the genesis and development of the lower-level vortex. The development and coupling of the lower-level mesoscale convergence field and upper-level mesoscale divergence field is a good precursor of the development of the mesoscale system. The weakening of the lower-level mesoscale convergence indicated the decay of the MCS. Besides, the relatively dry and cold air in the middle troposphere entered the system from the west-southwest direction and then sank in the front of the meiyu front, which accelerated the weakening process of the MCS.

Key words: Vortex on meiyu front, Mesoscale convective system (MCS), WRF model, Upper-level mesoscale divergence area.