

长江下游一次大暴雨的中尺度模拟分析

谢义明^{1,2} 周国华² 徐双柱³

(1. 南京大学大气科学系, 210093; 2. 江苏省扬州市气象局;
3. 湖北省武汉中心气象台)

提 要

运用中尺度数值模式(MM5V3.6)对2004年6月25日长江下游地区一次大暴雨天气过程进行了数值模拟,结合天气形势和卫星云图对此次过程进行了分析。结果表明:在东北冷涡和西太平洋副热带高压两大天气尺度系统的作用下,西南低空急流的再次加强和中低层切变线共同作用是此次大暴雨过程的主要原因。螺旋度分析表明,在不均匀的强上升气流的作用下,涡旋的水平分量向垂直分量转化是此次强降水的可能机制之一。

关键词: 中尺度模拟 大暴雨 螺旋度

引 言

梅雨锋暴雨是长江中下游地区的主要的灾害性天气之一,对其的研究也做了很多工作,张丙辰^[1]曾对长江中下游梅雨期暴雨做过系统的天气学分析。张小玲等^[2]将梅雨锋暴雨分为三类,并对各类的特点进行了分析。王建捷等^[3]等对引发大暴雨的 β 中尺度对流系统进行了数值模拟研究,得到了一些有意义的结果,但暴雨的中尺度系统的发生发展的物理图像及其物理机制还不十分清楚。

2004年6月24日20时到25日08时(北京时,下同)江苏沿江及南部地区出现了大暴雨,12小时降水量普遍在50mm以上,降水量最大的为江阴市135.9mm。此次过程降水强度大,1小时降水量大于25mm的测站有6个,最大的达到63.7mm,主要降水集中在4个小时内。本文通过对天气形势、卫星云图和数值模拟结果的分析,对此次大暴雨天气的成因特别是动力触发机制进行了探讨。

1 天气形势和卫星云图分析

在500hPa上,24日20时西太平洋120°

E副热带高压脊线位置在23.5°N,东北冷涡位于43°N,低槽在118°E,槽后冷平流比较明显。在850hPa上,24日08时,在33°N有冷式切变线,急流在安庆、上海一线,最大风速为 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。20时,急流有所减弱,且急流核偏东,安庆为 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,上海为 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;切变线位置少动,但切变线北侧由原来东北偏东气流转为偏北气流,风向切变明显加大。25日08时,切变线南压到长江以南;急流位于南昌、杭州一线,风速最大的为安庆,达 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。地面天气图上,24日20时在31°N附近有一暖式切变线,25日02时,在南京附近有一中 β 低压环流生成东移,大暴雨就发生在此低压环流的左前方。

以上分析表明:此次大暴雨过程是因为副热带高压脊线处于有利位置,北方有冷空气南下,西南低空急流再次加强,配合地面诱发低压所造成的。但是在天气图上无法提前判断出西南低空急流再次加强和预报出如此强度的降水发生。

从卫星云图演变(图1)可以看到,24日23时,从黄河下游的低槽云系中分裂出一条

云带向南移动到淮河流域,在安徽南部有一对流云团发展东移,在长江下游仅有一条发展并不旺盛的云带。到25日02时,淮河流域的低槽云系与长江下游的云带合并,在南京附近有一对流云团(2)开始发展,此云团与安徽南部的对流云团(1)相对独立;到03时,此云团北边界非常清楚,说明云团以北存在明显下沉气流;05时该对流云团南压,正是

该云团南压造成了江苏镇江地区的强降水。此后该云团一直向偏东方向移动,在江阴、南通等地先后造成了强降水;07时后入海,江苏强降水过程基本结束。而原处于安徽南部的对流云团一直在31°N以南向东移动。因此,此次大暴雨明显是由一个中小尺度对流云团活动造成的。

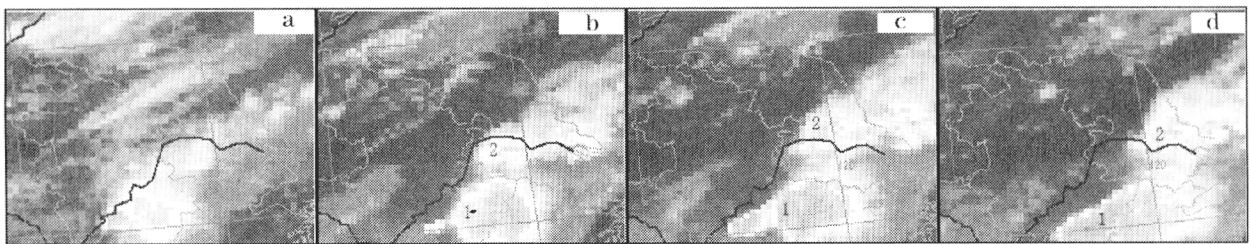


图1 2004年6月25日00~05时卫星云图
a. 00时; b. 03时; c. 04时; d. 05时

2 中尺度数值模拟分析

2.1 模式及资料说明

我们利用中尺度模式MM5V3.6对此次过程进行了模拟。模式初始边界取自NCEP1°×1°、时间间隔为6h的全球再分析资料和地面、探空资料。采用双向二重嵌套网格技术,粗、细网格距分别为45km和15km,细网格格点数为79×97,模式输出间隔为1小时。

2.2 模拟结果说明

从模拟降水量图(图2a)中可以看出,主降水带与实况(图2b)基本一致,只是中心位置偏南50km。从模拟形势场可以看出,25日08时的500hPa(图略)有一低槽移过120°E,700hPa和850hPa有一切变线东移南压过31°N,这与实况基本一致。因此,此次模拟抓住了暴雨过程的本质,暴雨系统被很好地模拟出来了。

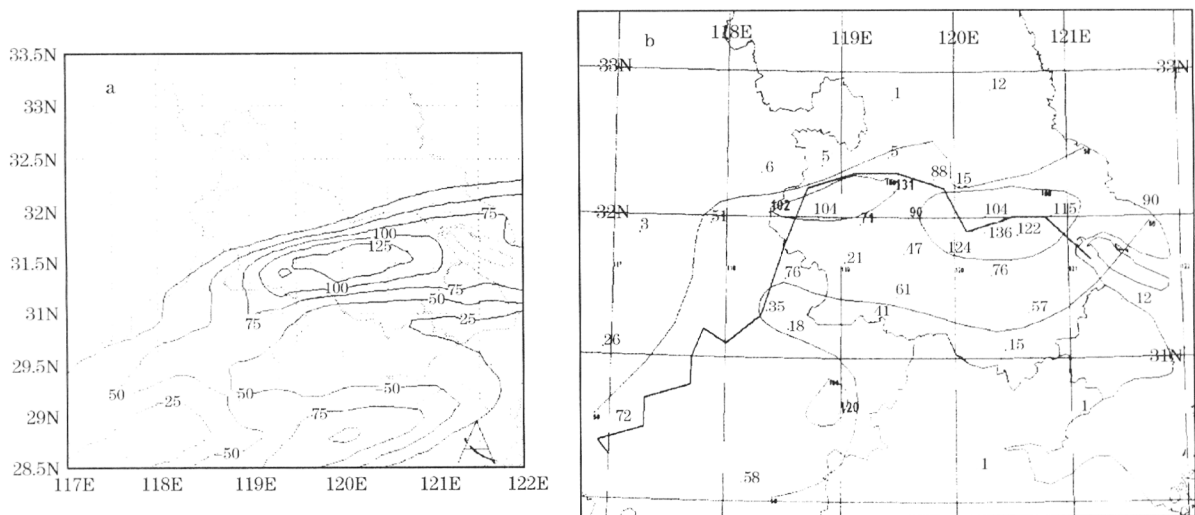


图2 2004年6月25日降水实况和模拟降水
a. 模拟; b. 实况

2.3 模拟形势分析

由前述的分析得知,低空急流在24日20时相对于08时已明显减弱,而且急流核

也比较偏东,长江下游一带已处于相对辐散区域,而在25日08时又有所加强。模拟结果再现了低空急流的加强过程,而且急流最

强阶段与强降水发生时间一致。从24日21时~25日12时过强降水中心全风速经向变化(图3a)可以看出,850hPa西南低空急流在25日01时开始加强,04时达到最强,最大风速达 $22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,05时后逐渐减弱。从850hPa流场及全风速图(图略)还可以看出,急流出

口区左侧切变辐合非常明显,而且在急流左侧有一个低风速区,致使该地区风向、风速辐合都非常大。从空间上看,500hPa、700hPa(图略)急流位置与850hPa基本一致,而且急流的左侧辐合区也处于垂直排列。

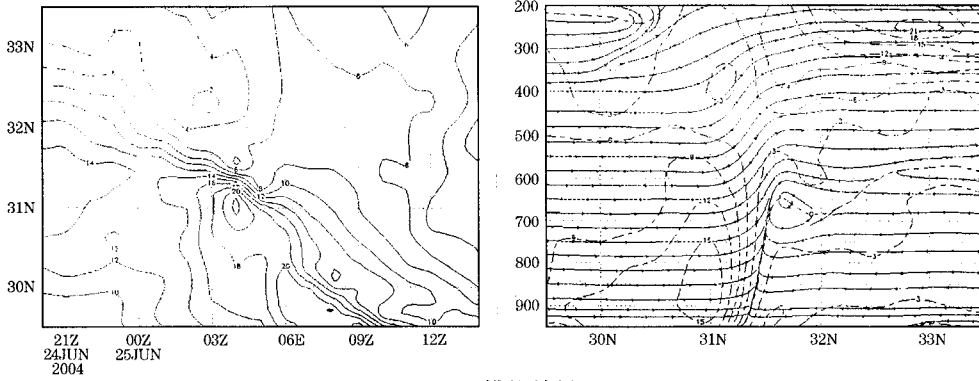


图3 模拟结果

a. 2004年6月24日21时~25日12时850hPa沿119.8°E全风速变化

b. 2004年6月25日04时119.8°E垂直经向环流,虚线为经向风等风速线,风速单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

从模拟结果可以看到,中低层切变线在此次暴雨过程中起到了至关重要的作用。在强降水发生时,700hPa、850hPa(图略)流场均未出现气旋性环流,仅存在一条中尺度强辐合线。从 120°E 850hPa经向风速随时间变化(图略)可以看出,切变线25日04时前基本少动,4~6时有一个快速南压过程,移动速度达到 $50\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。从过强降水中心的经向垂直环流图(图3b)可以看出,在强降水发生时,切变线基本处于垂直排列,一直伸展到600hPa高空,而且在600hPa附近降水区北侧还有一次级环流存在。图中还显示,低层经向风速梯度非常大,在不到50km的距离内风速差最大达到 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且切变线随时间向南移动速度与强降水区的移动速度一致。从模拟结果还可以看到,在边界层中下部950hPa(图略)以下在暴雨发生时出现了闭合气旋性环流,而且气旋性环流出现的时间、地点与强降水发生的时间、地点一致,这可能与Ekman抽吸作用有关。

以上分析表明:西南低空急流旺盛,中低层切变线南压,使得低层暖湿气流沿切变线向上爬升,从而产生强烈的上升运动。而对

流层中低层切变线近乎垂直排列,西南低空急流的辐合区重叠,致使辐合上升运动得到更加强烈的发展。

2.4 动力条件分析

从700hPa的涡度、散度的时间演变(图略)来看,随着西南低空急流的增强,正涡度和辐合同时增大,在25日4~5时达到最大,涡度达 $9.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$,散度达 $-3.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。从经过强降水中心的散度经向垂直剖面图(图4a)可知,低层有一个辐合柱,随高度略向北倾斜,而对应高层相应有一强辐散区域,其中心在350hPa附近,强度达 $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。另外,其北侧还存在一辐合区域。在涡度的纬向垂直剖面图(图略)上,正涡度柱一直伸展到200hPa,中心在700hPa到850hPa之间,并且在其两侧有一负涡度区域,负涡度中心在300hPa附近。这说明此次强降水发生时,低层强辐合,高层强辐散,而且在对流层中部存在明显的次级环流。从垂直速度的垂直剖面(图4b)可以看到,最大上升速度在500hPa附近,达 $2.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在最大上升速度区的西部有一个负速度区,最大达 $-0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,位于600hPa附近。

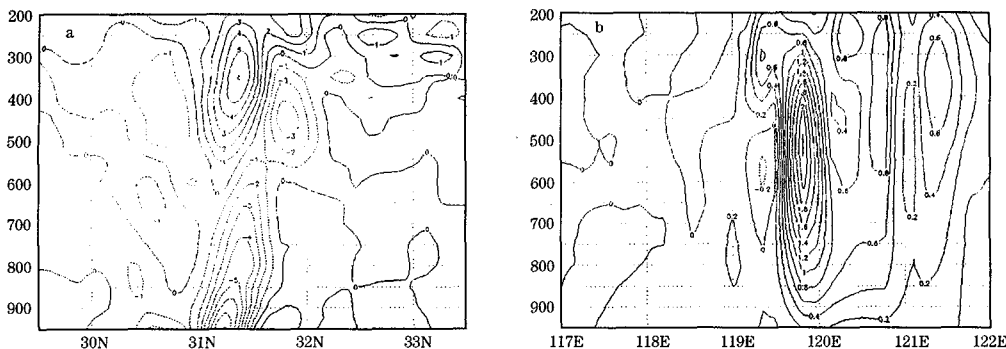


图4 25日04时物理量场垂直剖面
a. 散度 10^{-4}s^{-1} ; b. 垂直速度 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

2.5 大气稳定性和水汽条件分析

从强降水中心的 θ_e 的时间序列图(图5a)中可以看出,在暴雨发生前,随着西南低空急流的加强,850hPa以下暖湿空气不断堆积,形成了很强湿对流不稳定层。到24日23时,在低空形成两个极值中心,最大值中心位于900hPa,最小值中心位于700hPa,两者相差达13K。随着上升气流的出现,高 θ_e 的暖湿空气向高层发展,在25日04时达到最强,此时850hPa以下仍呈湿对流不稳定,850~600hPa之间呈现为湿中性,整个气柱

的 θ_e 都在354K以上,具有很强的湿对流不稳定性。随着切变线的南压,中低层干冷空气侵入,气柱的高温高湿性质减弱,强降水也随之结束。

从比湿演变图(图略)也可以看到,在强降水发生前,随着西南暖湿气流的加强,空气湿度不断增加,水汽含量增加基本与低空西南急流增强同步。从水汽通量散度图(图5b)也可以看到,对应暴雨区有很强的水汽辐合,其中心强度达 $8.0 \times 10^{-3} \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,其辐合区走向也与急流位置一致。

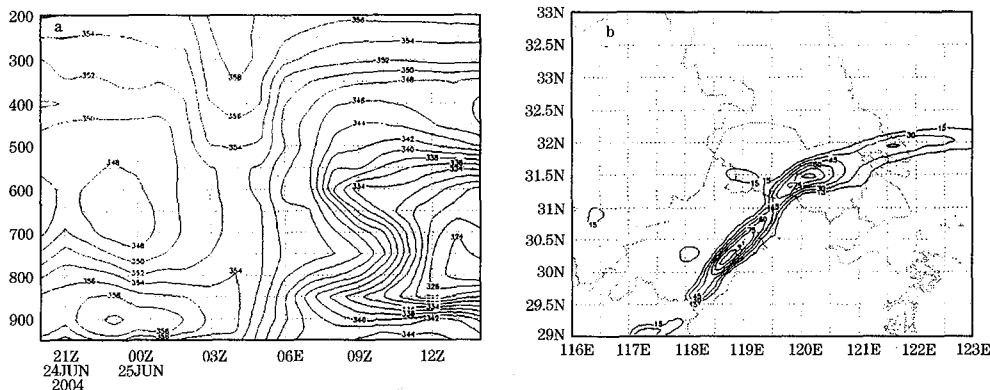


图5 2004年6月24日20时~25日12时31.3°N、119.8°E θ_e (K)时间序列(a)和25日04时850hPa水汽通量散度(b)($\times 10^{-4}$)

2.6 螺旋度分析

近十几年来,螺旋度常用于强对流和中尺度暴雨系统结构特征的研究^[4]。螺旋度是表明空气粒子在前进方向的旋转情况,它是涡度矢与速度矢的点乘,严格地说是螺旋度密度^[5]。公式如下:

$$H = \mathbf{V} \cdot (\nabla \wedge \mathbf{V}) = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w$$

公式右端三项分别代表纬向、经向和垂直方向的螺旋度。从模拟结果可以看出,

700hPa垂直螺旋度(图略)正值中心与强降水发生地基本一致,而且其移动方向、速度也相当,25日04时700hPa上最大值达 $10 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。从过强降水中心的垂直螺旋度的经向垂直剖面图(图6a)可以看到,正螺旋度区域一直伸展到200hPa,中心在700hPa~500hPa之间,最大达 $1.5 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。同

时模拟结果还显示,水平螺旋度的分布(图6b)也与强降水落区有一定的联系。与强降水区相对应,其后部水平螺旋度为负值区,前部为正值区。从过强降水中心的纬向垂直剖面图(图略)也可以看到,这种前正后负形势一直发展到400hPa附近,而强降水就是发生在正负螺旋度的强梯度区域。

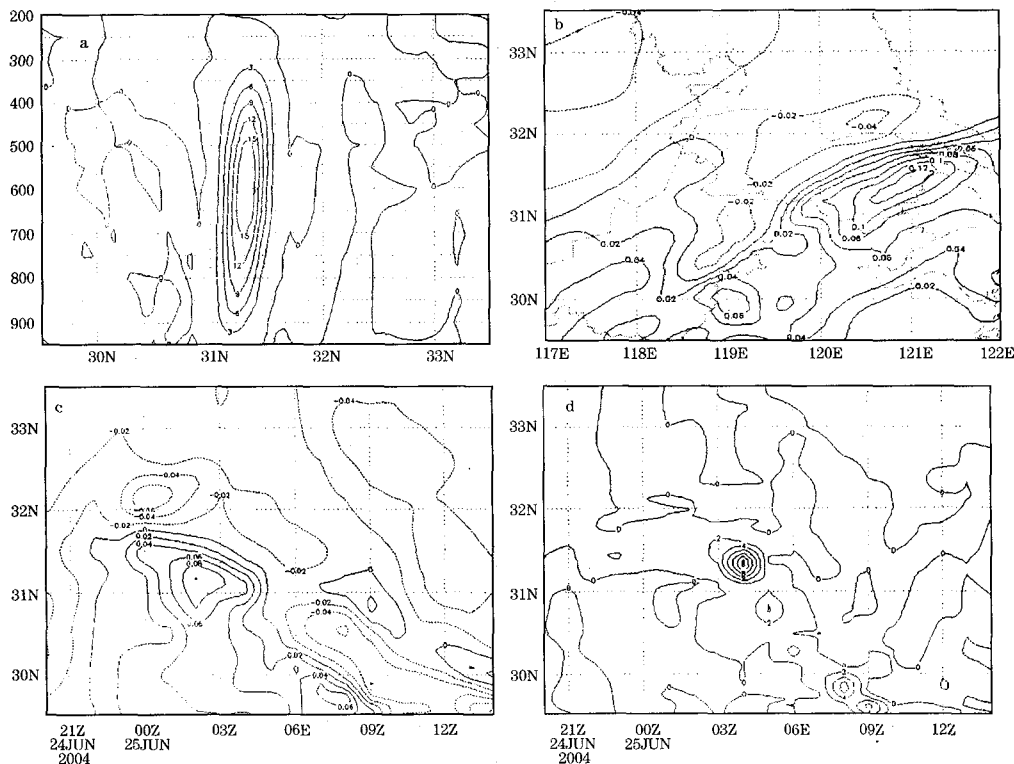


图6 螺旋度

- a. 2004年6月25日04时垂直螺旋度沿119.8°E剖面,单位: $10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- b. 2004年6月25日04时700hPa水平螺旋度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- c. 700hPa沿119.8E水平螺旋度时间序列,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- d. 700hPa沿119.8E垂直螺旋度时间序列,单位: $10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

有关研究表明^[6],在一定条件下,水平螺旋度能为垂直螺旋度的形成或增长提供有利条件。模拟结果表明,本次强降水过程中水平螺旋度比垂直螺旋度大2~3个量级,故水平涡管如有扭曲将对垂直螺旋度的增长起到极大的作用。从过强降水中心的水平、垂直螺旋度经向时序图(图6c、d)可以看到:700hPa上水平螺旋度在24日23时就开始加强,25日02时达到最大,04时后开始迅速

减小;而垂直螺旋度在25日03~05时得到急剧增长,其中04时达到最大;另外,垂直螺旋度增长区域4~5时垂直上升运动最强,700hPa最大上升速度达 $1.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明,此次过程中,垂直螺旋度的增长与水平螺旋度存在一定的关系。这一点也可以从涡度方程得到解释,涡度方程可表示为:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \omega_H \cdot \nabla_H \omega + \zeta \frac{\partial \omega}{\partial z}$$

式中 ζ 为垂直涡度, ω_H 为水平涡度, w 为垂直速度。很明显,在非均匀的垂直运动作用下,水平涡度分量可以转变为垂直涡度,模拟结果也说明了这一点。从 119.8°E 的 700hPa 经向时间序列图(图略)也可以看出:强降水区域的水平涡度在 25 日 1 时看是增大,2~3 时达到最大。从随时间变化来看,水平涡度的变化快于急流核和垂直涡度的变化。可以认为:低空急流的加强,水平涡度随之增大,同时由于上升运动不均匀性,水平涡度一部分转化成了垂直涡度,从而使垂直涡度得到加强。

3 结论

(1) 500hPa 高空冷涡和西太平洋副热带高压是造成此次大暴雨过程的两大天气尺度系统,他们的有利配置是这类暴雨预报的着眼点。卫星云图显示,低槽云系与副热带高压北侧切变线云系的结合而生成的中尺度对流云团对强降水的临近预报服务有很好的指示作用。

(2) 模拟结果表明:低空西南急流的再次加强是此次大暴雨过程的主要动力、热力来源,不仅在低层造成了很强的风向、风速的辐合,而且带来了大量暖湿空气,加大了湿对流不稳定性。

(3) 中低层切变线的南压是此次大暴雨过程的触发机制,模拟结果显示,从低层到 600hPa 的切变线近乎垂直排列,这种强辐合为大暴雨过程的强烈上升运动提供了触发、维持条件。

(4) 螺旋度分析表明:强降水中心落区与中低层垂直螺旋度中心一致,同时也是发生在水平螺旋度的强梯度区域。另外,由于此次暴雨过程的强烈上升运动呈中小尺度性质,涡旋的水平分量向垂直分量转换是出现如此强降水的可能物理机制之一。

参考文献

- 1 张丙辰. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究. 北京:气象出版社,1990:109~139.
- 2 张小玲,陶诗言,张顺利. 梅雨锋上的三类暴雨. 大气科学,2004,28(2):187~204.
- 3 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和诊断分析. 气象学报,2002,60(2):146~155.
- 4 侯瑞钦,程麟生,冯伍虎. "98.7"特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析. 高原气象,2003,22(2):202~208.
- 5 伍荣生. 大气动力学. 北京:高等教育出版社,2000:77~83.
- 6 陆惠娟,高守亭. 螺旋度和螺旋度方程的讨论. 气象学报,2003,61(6):684~691.

Simulation to Mesoscale Heavy Rain in the Lower Valley of Changjiang River

Xie Yiming^{1,2} Zhou Guohua² Xu Shuangzhu³

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, 210044;

2. Yangzhou Meteorological Office, Jiangsu Province;

3. Wuhan Central Meteorological Observatory)

Abstract

A heavy rainfall event in the lower valley of Changjiang river on 25 June 2004 is simulated by the mesoscale numerical model MM5 and is analyzed with the synoptic charts and satellite image. The results indicate that under the favorable weather background, it is caused by the strengthening again of the southwest low level jet and the movement of the low level shear line. The analysis of helicity also revealed that under the updraft, the conversion from the horizontal whirlpool into the vertical whirlpool is one of the possible mechanisms of the event.

Key Words: mesoscale numerical simulation heavy rain helicity