

利用非常规资料对城市强暴雨的中尺度分析与模拟研究

齐琳琳 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029. E-mail: niceql@mail.iap.ac.cn)

摘要 利用国家“973”项目获取的特殊加密观测资料, 包括自动气象站雨量资料、风廓线仪资料、多普勒雷达图像资料、GMS5 卫星云图资料和 NCEP 再分析资料, 采用诊断分析与数值模拟相结合的研究方法, 对 2001 年 8 月 5~6 日上海城区出现的 1949 年以来最强一次降雨过程进行了中尺度分析与模拟研究。目的是了解造成此次城市暴雨灾害的热带气旋内中尺度系统的发展演变特征和将较高时空密度的非常规观测资料用于高分辨率 MM5 中尺度数值模式, 对于有效地预报城市灾害性暴雨的可行性、必要性。研究揭示出: (1)此次暴雨是由登陆热带低压内发生发展的一系列中尺度对流云团所致, 具有时空尺度小的特征; (2)热带低压在入海前的重新加强为这场暴雨的发生提供了有利的环境条件; (3)热带低压与其内中尺度云团间可能存在相互作用; (4)及时、准确地充分运用各种观测资料对于有效地监测、预测出此类城市暴雨灾害具有重要意义; (5)局地风速的增强和风向的转变是暴雨中尺度系统的触发机制, 而充沛的水汽输送、聚集的对流有效位能为暴雨中尺度系统发生发展提供了必要的物理机制。

关键词 城市暴雨灾害 中尺度对流云团 非常规观测资料 数值模拟

2001 年 8 月 5~6 日上海地区出现强降雨, 24 h 和 1 h 的降雨量均打破了上海市近 50 年来的降雨纪录。突发的特大暴雨给上海经济和人民生活均造成严重影响。上海繁华街区的十余条道路积水深至 30~60 cm; 全市至少有 3 万多户居家进水; 市郊 1 万多顷农田受淹。分析表明, 此次暴雨是登陆热带低压在上海停滞期间, 发生发展于其内的一系列中尺度对流云团所致^[1]。

多年来, 国内外气象科学工作者对热带气旋及其引发的暴雨做了大量研究^[2~7]。研究主要集中在热带气旋登陆后与中纬度天气系统相互作用, 进而引起气旋的变性和降水上。对于发生发展于热带气旋内的中尺度对流系统引发的暴雨研究相对有限。2001 年 8 月 5~6 日上海特大暴雨是由登陆减弱热带低压在入海前的再次加强所致。降雨区域集中, 具有突发性、强度大等明显中尺度特征。而且, 此次暴雨过程还涉及到气象学的一个新兴研究课题——城市气象灾害学。我们注意到, 随着我国城市化进程的加快, 社会发展和经济活动的显著增多, 城市灾害日趋增长, 其中又以城市暴雨洪涝灾害造成的损失最为突出。由于暴雨灾害发生突然, 且局地性强, 现有的观测条件难以监测, 预报上有相当难度, 因而对其的研究已作为城市可持续发展能力的战略性问题摆在了我们

面前。本文采用了国家“973”项目获取的特殊加密资料对在登陆热带低压内发生发展的中尺度对流系统引发的暴雨过程作了分析研究, 以期完善对热带气旋引发城市突发暴雨的研究。

1 暴雨过程中环流背景及影响系统分析

2001 年 8 月 5 日 00:00UTC 至 6 日 00:00UTC, 上海城区的累计降雨量普遍大于 100 mm, 黄浦、徐汇 24 h 的降雨量更是分别为 328.9 和 251 mm。强暴雨主要出现在 5 日 12:00UTC 至 6 日 00:00UTC 12 h 内, 其中, 5 日 14:00~16:00UTC 和 22:00UTC 至 6 日 00:00UTC 内的局地降雨量大于 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

造成此次上海城市暴雨的主要天气系统是在此停滞并发展的一热带低压。该热带低压 8 月 1 日形成于关岛附近后向偏西北方向移动, 4 日 00:00UTC 左右, 在浙江、福建两省交界处登陆。与此同时, 西太平洋副热带高压发展强盛, 并西伸至 110°E 附近。登陆后的热带低压沿西太平洋副热带高压南侧缓慢向西北偏北方向移动, 强度基本维持。4 日 12:00UTC 左右, 热带低压移到江西、安徽两省交界处附近时, 位于大陆上的西太平洋副热带高压在长江中游 ($110\sim 115^\circ \text{E}$, 30°N) 附近断裂为海上与大陆上的两个闭合体。热带低压在两闭合高压间转向东北偏东方

向移去. 5日12:00UTC移近上海, 850 hPa上闭合低压中心为1480位势米. 而6日00:00UTC, 缓慢东移入海的低压中心强度加深至1455位势米(图1). 由此可知, 位于上海的热带低压在入海前得以重新加强. 在此期间, 强暴雨也出现在上海地区.

为了讨论暴雨影响系统的性质, 我们分析了沿低压中心的涡度、温度经向离差垂直剖面图上. 5日00:00UTC至6日00:00UTC热带低压的空间结构特

征. 可以看到, 300 hPa以下热带低压呈气旋性涡旋结构, 初期涡旋中心略向北倾斜, 随着低压发展, 涡旋中心基本垂直. 5日18:00UTC 700 hPa上, 强涡旋中心约为 $14 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$, 有所加强, 且正位于上海附近狭窄的区域内(图2). 温度经向离差的分布表明, 涡旋内对流层中上层温度离差为正, 约为 $0.3 \sim 0.9^{\circ}C$, 具有相对暖心的结构, 而涡旋内对流层低层温度离差则为负. 因此可以说, 该热带低压垂直结构较为深

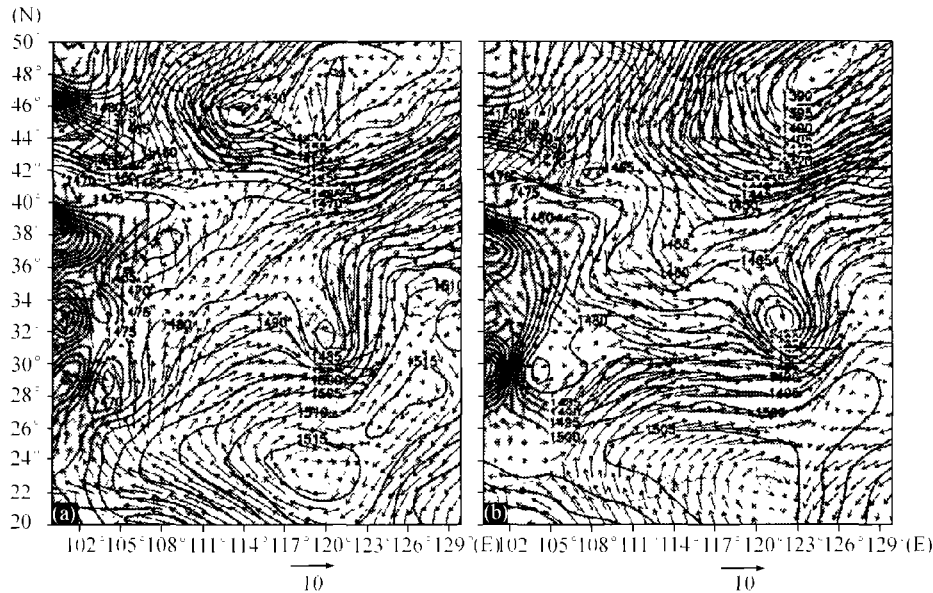


图1 2001年8月5日12:00UTC(a)和6日00:00UTC(b)850 hPa位势高度场与风场分布(单位: gpm, $m \cdot s^{-1}$)

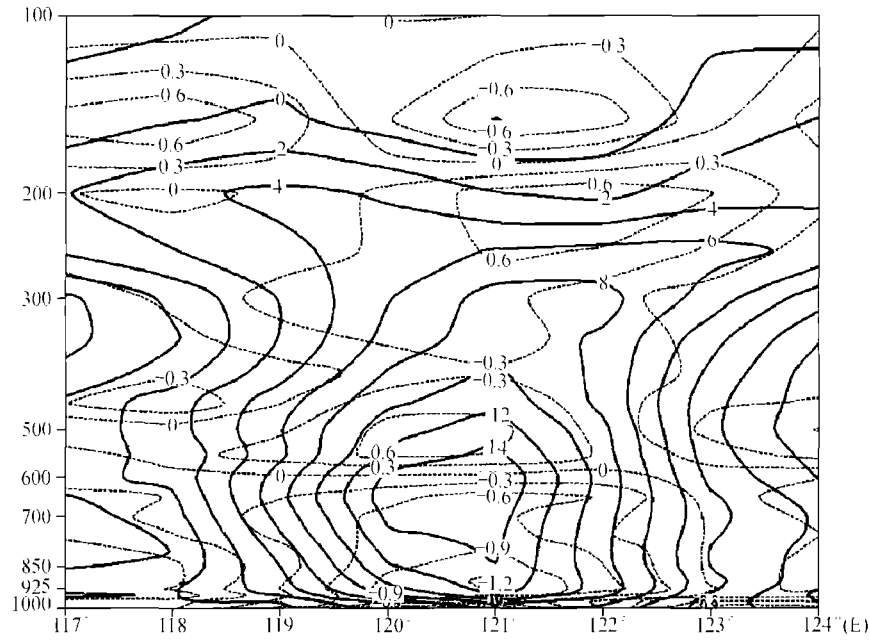


图2 8月5日18:00UTC沿31°N的涡度、温度经向离差垂直分布(实线: 涡度, 虚线: 温度经向离差, 单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}^{\circ}C$)

厚、仍具热带系统的特征。初期,弱冷空气的入侵可激发其内中尺度对流系统发生。低压内对流层中上层的“暖心”可能是中尺度对流系统凝结潜热释放所致,而它的存在又有利于热带低压的维持,从而使积云对流加强。这种反馈机制在某种意义上说是暴雨得以产生的原因之一。

2 非常规资料对城市暴雨中尺度特征的分析

过去由于观测条件有限,暴雨中尺度特征通常难以监测和分析。此次降雨期间,所幸上海市气象局利用其稠密的观测网获取到高时空密度的各类非常规观测资料。这为揭示此次暴雨的中尺度特征及发展演变提供了重要依据。

分析上海自动气象站逐时降雨记录及南市、小东门、五角场、静安、杨浦和徐汇 6 个自动雨量站的降雨随时间演变分布可知(图 3)。这场严重的城市暴雨主要是由 4 个中尺度雨团造成,雨团的平均水平尺度约为数十公里,生命史 1~3 h 不等,属于典型的 β 中尺度对流系统。这些中尺度对流系统(MCSs)在停滞少动的热带低压内交替发生发展、生消频繁,且基本

上重复出现在同一地区。正是这些 β 中尺度、甚至 γ 中尺度对流系统造成了此次上海降雨区域相对集中的强暴雨。

在中尺度对流系统发生发展过程中,风场,尤其是低层风场扰动,往往对其具有预示意义。利用上海青浦每 30 min 一次的风廓线仪资料,分析降雨前后大气低层 2486 m 以下风场的演变,可以看到(图 4),5 日 00:00~17:00UTC,该地区 2486 m 以下一直为持续的偏南风,04:00UTC,1000 m 附近的偏南风可达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后,偏南风持续增强,5 日 12:00~17:00UTC,400 m 以上偏南风可达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,强偏南风不断将大量暖湿空气输送至上海地区,为降雨的发生提供了充足的水汽。而且,低压停滞期间,上海地区对流层低层存在较强的水汽辐合(图略),表明上海地区存在明显的水汽输送和集中。5 日 17:00UTC 后,600 m 以上风速逐渐减弱至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,同时各层风向也逐渐发生顺转,形成边界层内西风,其上西北风的风场分布、风场结构不再利于水汽的输送。另外,尤其应该指出的是,5 日 07:00~08:00 和 13:00~14:00UTC 期间,对流层低层风场上存在自西向东传播的东北(北)风与西南风间的扰动,扰动的发生略先于降雨。

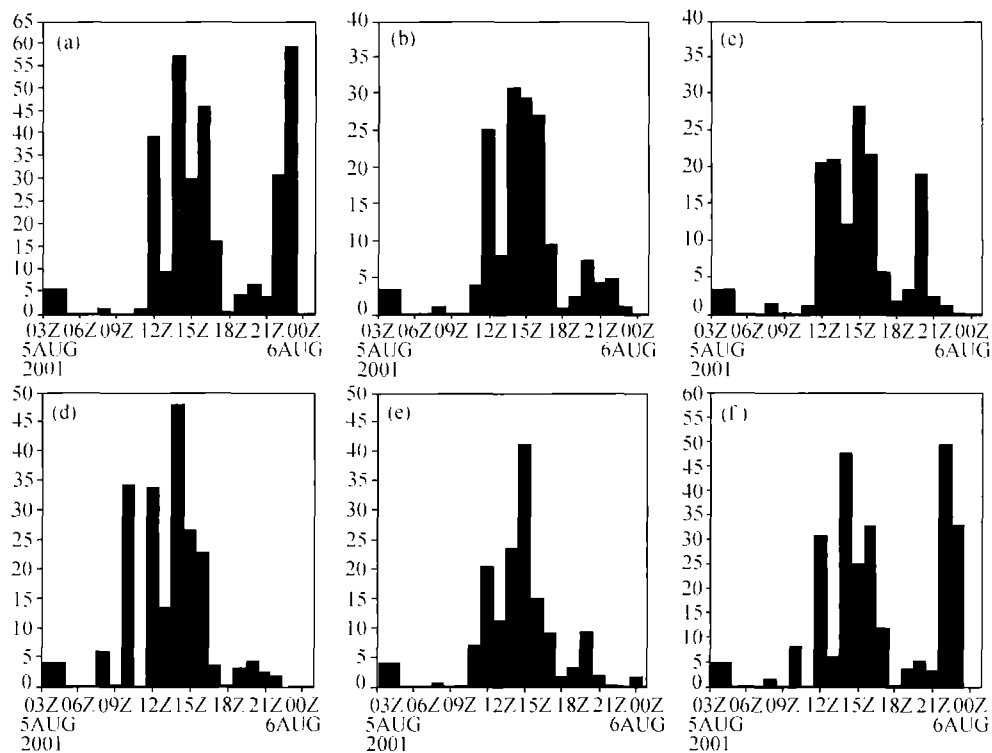


图 3 上海南市(a)、小东门(b)、五角场(c)、静安(d)、杨浦(e)和徐汇自动雨量站(f)降雨随时间演变分布(单位: mm)

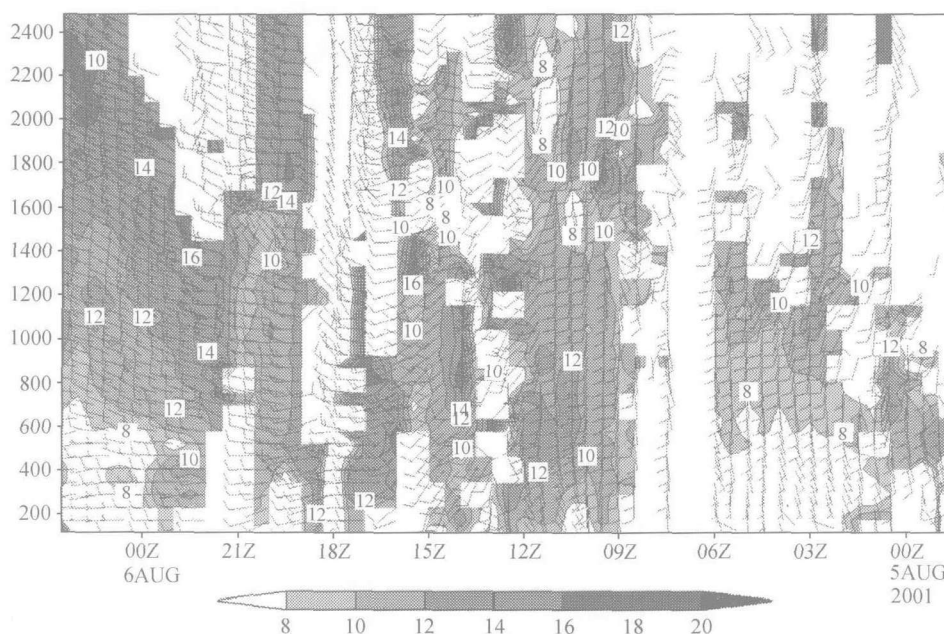


图4 上海青浦风廓线仪观测的2486 m以下水平风场分布(阴影为水平风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

具有一定突变性的风场演变可能是此次暴雨突发加强的触发机制。

在城市暴雨灾害的监测和临近预报中,多普勒雷达和GMS5卫星云图的应用,对于及时发现、准确地跟踪,从而有效地监测出此类局地性强、发生突然的暴雨中尺度系统具有重要意义。4日00:00UTC至6日00:00UTC云顶亮温沿 31°N 的分布显示(图5),造成此次暴雨的对流云系基本是在5日06:00UTC左右开始发生发展,云系自西向东逐渐发展,但云团尺度较小且强度相对弱,中心云顶亮温在 -60°C 左右。5日12:00UTC之后,涡旋云团明显增强且一直稳定维持在上海上空,其内不断有一些小的中尺度对流系统发生发展、合并、消散,正是这些相继发生发展的中尺度对流云团使得热带低压内的对流活动得以迅速发展、旺盛。

结合逐时云顶亮温分布分析可知(图略),5日10:00UTC之后,涡旋云团内开始出现云顶亮温大于 -50°C 的对流单体,并逐渐发展成一尺度相对较大的中尺度对流云团。5日12:00UTC,云顶亮温约 -60°C 的中尺度对流云团正位于上海市区,而此时上海的城市暴雨开始发生(大体相当雨团2)。此后,随着云顶亮温低于 -60°C 的对流单体的合并,涡旋云团内的中尺度对流系统在上海上空迅速发展,5日14:00~17:00UTC,中尺度对流云团发展达到鼎盛,云顶亮温在 $-70 \sim -80^\circ \text{C}$ 间,云团发展深厚,其引发的降雨

也达到最强盛(大体相当雨团3)。随后涡旋云团内的对流活动有所减弱,但22:00UTC左右,云团内又出现一尺度更小、云顶亮温在 $-70 \sim -80^\circ \text{C}$ 间的中尺度对流单体,此对流单体再次使得上海城区出现局地性更强的短时强暴雨天气(大体相当雨团4)。6日00:00UTC后,随着涡旋云团逐渐减弱东移,上海城区的强暴雨也相应结束。

多普勒雷达组合反射率对中尺度对流云团的发展演变有着更清晰的反映,可以为监测这类尺度小且多变的城市暴雨中尺度系统发展演变提供重要信息。图6分别是5日08:11, 10:13, 12:09, 14:41, 16:41, 20:48, 22:44及6日00:52UTC雷达组合反射率分布。可以注意到, (1) 5日08:11UTC, 热带低压内若干对流单体首先出现在上海城区以西(南)的青浦、嘉定、金山附近, 对流单体尺度很小, 这些小对流单体沿着风速辐合带逐渐东移, 发展合并成一中尺度对流云团, 10:13UTC云团移近上海市区中心附近, 该云团即为引发上海地区西部降雨的第1个中尺度对流云团, 其造成的1h最大降雨量达34.4 mm。 (2) 5日12:09UTC, 青浦、嘉定、金山附近再次出现若干新的小对流单体, 对流单体东移过程中, 在宝山与上海市区间形成第2个中尺度对流云团, 上海市区开始出现暴雨, 1h最大降雨量达35.6 mm。 (3) 5日12:09UTC后, 宝山、奉贤间的小对流单体不断地相互作用, 合并发

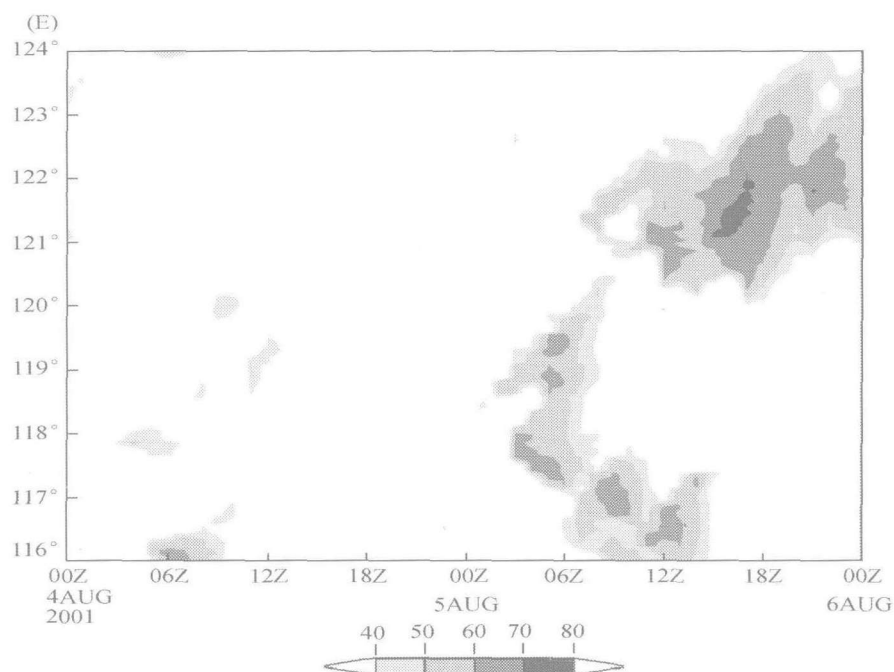


图 5 GMS5 红外云图上 4 日 00:00 至 6 日 00:00UTC 低于 -40°C 的云顶亮温沿 31°N 时空演变分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

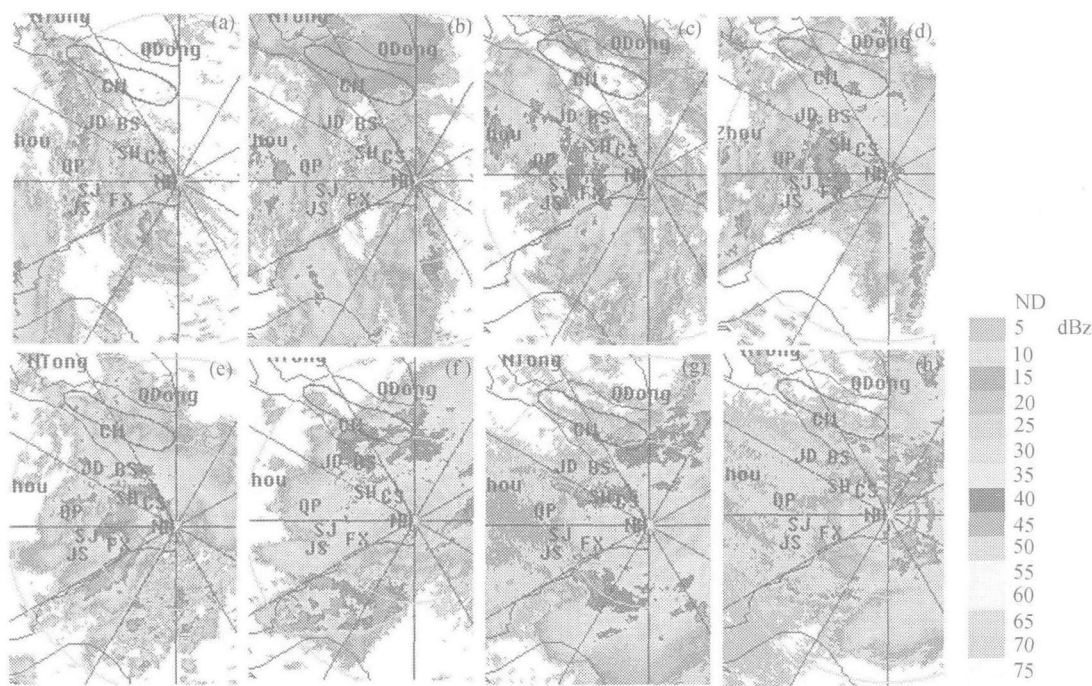


图 6 2001 年 8 月 5 日 08:11UTC(a)、10:13UTC(b)、12:09UTC(c)、14:41UTC(d)、16:41UTC(e)、20:48UTC(f)、22:44UTC(g)及 6 日 00:52UTC(h)雷达组合反射率分布(单位: dBZ)

展, 5 日 14:41UTC 时, 形成中心位于上海城区的第 3 个中尺度对流云团, 该云团无论是尺度、强度均大于

前面两个云团. 云团逐渐发展, 在 16:14UTC 时形成一强度为 65dBz 的螺旋状对流云团, 云团基本覆盖了

整个上海地区。由于此阶段的对流云团的强度、尺度均为整个过程中最强的。因此,此阶段的降雨范围及雨量均达到最强,市区 1 h 最大降雨量达 89.8 mm。而对流云团回波顶高从 5 日 10:13UTC 的 9 km 发展至 16:14UTC 的 17 km,这也许正是强暴雨出现的原因。(4) 5 日 17:00~20:00UTC,螺旋状对流云团东移减弱,逐渐消亡。但 20:48UTC 时,宝山、崇明间有新的对流单体出现。新生的对流单体在向东南方向移动过程中,其后部不断移来的对流单体与前部移动缓慢的单体合并,于 22:44UTC 前后在上海市区北部形成中心强度约为 50 dBz 的对流云团,即第 4 个中尺度对流云团。此次的对流云团尺度较小,且维持时间很短。因此,其造成的降雨更具有局地性。强对流主要发生在浦东附近,1 h 最大降雨量达 59.1 mm。6 日 00:00UTC 后,随着热带低压的移出海,其内不再有中尺度对流云团的发生发展,上海地区的降雨也停止。

通过对上述非常规观测资料的分析不难看出,暴雨具有明显的突发性、强度大、区域集中等中尺度特征,而多普勒雷达组合反射率和 GMS5 红外云图的分析进一步证实了自动气象站降雨资料中揭示的 4 个中尺度雨团是造成此次上海强暴雨的直接原因。由此可以说,非常规资料的充分运用在城市暴雨灾害的监测、预测方面具有重要意义。

3 中尺度气象模式及非常规资料同化对城市暴雨的模拟研究

目前观测条件下获取的资料对于充分了解暴雨中尺度对流系统的发生发展和结构演变还是很不够的,而时空分布连续的高分辨率数值模式模拟结果在一定程度上可反映中尺度系统的特征。为此,利用目前较成熟的非静力中尺度数值模式 MM5V3^[8,9]对此次城市暴雨灾害进行了模拟研究。

模拟采用双向三重嵌套,区域格距分别为 54、18 和 6 km。模拟区域以 31.2° N, 121.5° E 为中心,最内层嵌套区域主要模拟上海城区降雨。模式中采用 Blackadar 边界层参数化方案,云辐射方案, Grell 积云对流参数化方案及新版的 Kain-Fritsch 积云参数化方案,混合相微物理显式方案进行了 8 月 4 日 00:00UTC 至 6 日 00:00UTC 48 h 的模拟。1° × 1° NCEP 格点资料为模式提供了初始场。

从模拟的形势场上看(图 7),模式较好地再现了暴雨发生前后各尺度天气系统的位置、分布,特别是

对热带低压的移动及其在上海停滞发展过程有较好的描述。将其与模拟中未同化任何资料和仅同化常规资料的形势场进行对比分析后发现(图略),模式中四维资料同化的运用对于模拟这种局地天气系统及暴雨是必要的,非常规资料的应用可以更好地揭示出热带低压的发展过程。

对于降雨过程的模拟,较好地反映出上海城区 24 h 降雨普遍大于 100 mm 的暴雨过程。另外,模拟研究中发现,如果把常规观测资料及逐时红外云图云顶亮温资料用于系统的四维同化中,对于降雨的模拟效果会有更进一步的改进。不仅模拟的 24 h 降雨达 200 mm 的强降雨区基本位于 31~31.3° N, 120.8~121.4° E 附近,与上海自动雨量站观测到暴雨集中在上海市区,24 h 累计雨量在 200~300 mm 间基本吻合,而且,模拟雨区内雨量的时序变化上也反映出此次降雨过程的局地性和突发性。模拟的强降雨集中出现在 5 日 15:00~16:00 UTC,最大降雨量可达 50 mm · h⁻¹ 左右(图 8)。对于此次城市暴雨模拟研究可能由于本例中计算的云顶高度与实况较为相近,因此是一较为成功的例子。需要指出,有时对云顶高度的估计会出现较大误差,因而,在应用云顶亮温资料时要非常小心。虽然如此,我们仍可以认为,将各种观测资料充分、合理地同化于模式中,对于模式模拟这类城市暴雨灾害是可行的。这不仅使我们看到了将非常规观测资料同化进中尺度模式的希望,而且也为此后造成暴雨灾害的中尺度系统的深入研究提供了可能。

另外,由于此次暴雨具有很强的局地性,而了解当地大气变量的分布、演变对于弄清造成此次强暴雨的中尺度系统发生发展特点是十分必要的。因此,利用区域 3 的模拟结果,分析了局地 A 点(31.12° N, 121.26° E)附近温、湿、风的分布演变,以了解影响暴雨中尺度系统发生发展的物理过程。

初期风场显示,除边界层低层为东南风和对流层高层为西北风外,上海地区 500 hPa 以下一直为南风控制,有利的风场使得上海地区具备充沛的水汽。之后,随着热带低压的移近,各层风场上均发生变化。除对流层低层风速加强外,各层风向也随时间逐渐顺转,形成对流层中下层西南风,对流层高层西(西北北)风的分布。局地风场的演变表明,中尺度系统发生前,该地区不仅对流层低层存在较强的暖平流,而且对流层中下层还存在较强的水汽输送。风速的

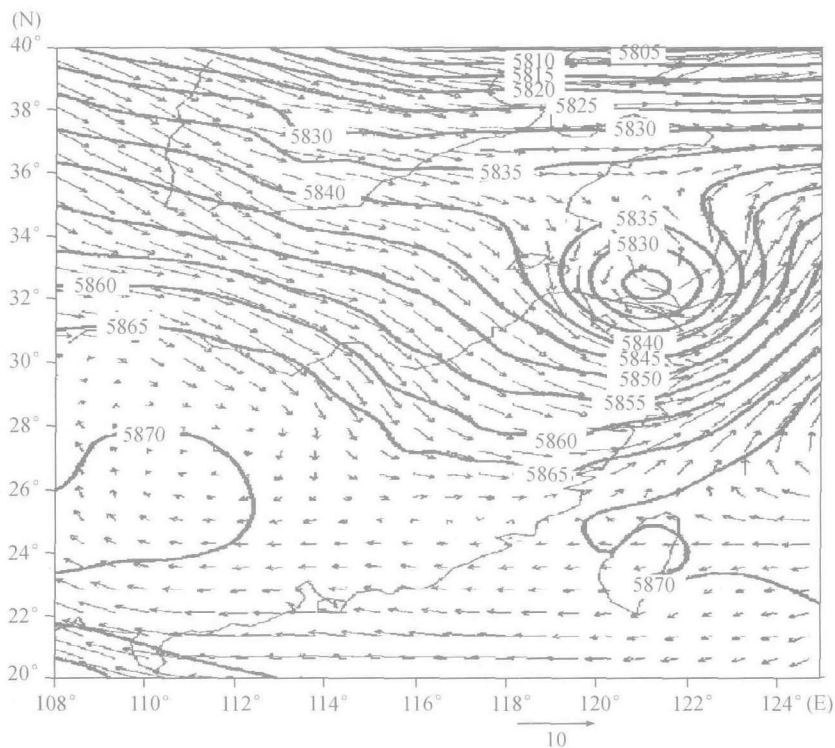


图 7 区域 D01 模拟的 6 日 00:00UTC 500 hPa 位势高度场与流场分布(单位: gpm, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

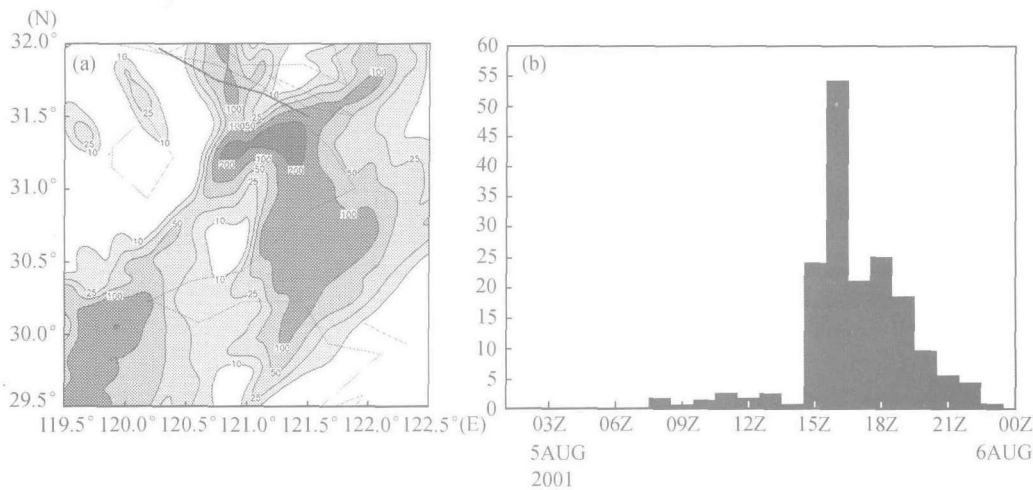


图 8 区域 D03 模拟的 5 日 00:00UTC 至 6 日 00:00UTC 24h 雨量分布(a)和杨浦附近降雨时序演变分布(b)(单位: mm)

增强和风向的转变对于暴雨中尺度系统的触发具有重要意义.

温度、露点、相对湿度曲线的变化显示, 随着热带低压的移入, 该地区对流层中、下层的温度露点差逐渐减小, 相对湿度则逐渐增大, 表明不仅输送至该地区的水汽增加, 而且聚集的水汽还不断地被输送到对流层中上层, 这对于中尺度系统的垂直发展十分有利.

在水汽充足的有利条件下, 中尺度系统内的强

上升运动与局地对流有效位能密切相关. 分析该处状态曲线与层结曲线的分布发现, 5 日 00:00~07:00UTC 中尺度系统发生前的时段内, 该处的湿空气层逐渐增厚, 同时对流有效位能也不断增大. 5 日 07:00UTC, 对流有效位能(CAPE)可达 $2144 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明上海地区已具备暴雨中尺度系统发展所需的水汽、能量条件(图 9). 之后, 随着中尺度系统的发生, 该地聚集的对流有效位能不断得以释

放,从而维持、加强中尺度系统内的强上升运动和强暴雨的发生.5日19:00UTC,趋于结束的强降雨使得该处对流层各层的温度、露点相差无异(图略).此时,对流有效位能约为 $277 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明聚集的对流有效位能绝大部分得以释放,释放的对流有效位能为暴雨中尺度系统的发生发展提供了必要能源.

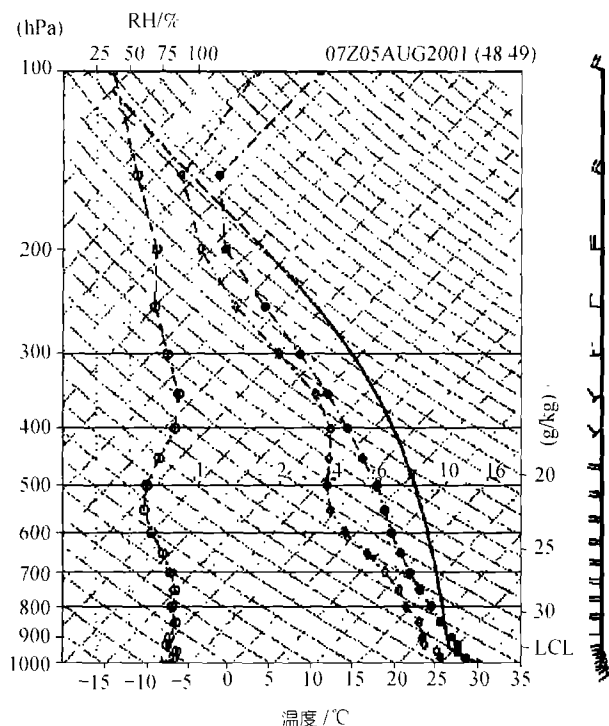


图9 D03模拟的5日07:00UTC A点(31.12°N, 121.26°E)状态曲线与层结曲线分布

4 结论与讨论

本文利用特殊加密观测资料和 NCEP 再分析资料对停滞加强热带低压导致2001年8月5~6日上海突发城市中尺度暴雨灾害进行了中尺度分析与模拟研究,认为:

(i) 登陆后热带低压在转向移至上海地区后,受海上西太平洋副热带高压的阻挡而处于停滞,后发展加强并入海.结构深厚、稳定的热带低压在300 hPa以下呈涡旋状结构,低压内对流层中上层的“暖心”结构利于其维持.热带低压的重新加强,可能与低纬源源不断的充沛暖湿气流输送有关.

(ii) 非常规资料分析揭示,热带低压内不断有中尺度对流系统发生发展,这些中尺度对流云团是造成此次上海暴雨灾害的直接系统.暴雨过程中至

少有4个较大的 β 中尺度对流系统相继发生发展.中尺度对流云团发展达到鼎盛时,云顶亮温在 $-70 \sim -80^\circ\text{C}$ 间,回波强度可达65dBz,回波顶高约为17 km.

(iii) 由热带低压的加深及相对暖心的存在可以认为,此次暴雨过程中低压与其内发生发展的中尺度对流云团间可能存在一定的相互作用,这对于强暴雨的发生是非常有利的.

(iv) 将非常规资料用于高分辨率中尺度数值模式,对于成功地模拟城市暴雨灾害是可行的、必要的.

(v) 局地风场演变、水汽输送、对流有效位能的聚集为中尺度系统的发生发展提供了必要的物理机制.

(vi) 由于对造成城市灾害的各尺度天气系统需要更精细的结构分析和及时准确的预报,这就要求有更高时空分辨率的各类观测资料.除了地面自动气象站、风廓线仪、高时间分辨率的多普勒雷达和静止卫星云图非常规观测外,发展特殊的观测手段势在必行.此外,发展时空分布连续的高分辨率数值模式,也将会为此类暴雨中尺度对流系统的发生发展和结构演变的研究及预报提供重要手段.

致谢 上海市气象局为本文的研究提供了宝贵的特殊加密资料,特此致谢.本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1998040907)和国家自然科学基金资助项目(批准号:49875011)资助.

参 考 文 献

- 1 Qi L L, Zhao S X. A study on heavy rainfall in Shanghai on 5-6 August 2001. The Proceeding of the First China-Japan Workshop on Heavy Rainfall Experiment and study, Hainan, China, 2002. 50~59
- 2 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 1~265
- 3 Dimego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical depression. Part 1: the observed fields and vertical motion computations. Mon Wea Rev, 1982, 110: 385~411
- 4 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学, 1978, 2(4): 276~289
- 5 Palmén E. Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of hurricane Hazel into an extratropical storm. Tellus, 1958, 10: 1~23
- 6 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究. 大气科学, 2000, 24(2): 223~237
- 7 Zhao S X, Mills G A. A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II: synoptic-diagnostic description. Mon Wea Rev, 1991, 119(9): 2074~2094
- 8 王鹏云, 刘春涛. 1996年第8号台风中尺度结构的数值模拟研究. 气象学报, 1998, 56(3): 296~311
- 9 Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Yinghua. Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4(MM4). NACR Technical Note, 1987. NCAR/TN-282+STR. 66pp

(2003-10-10 收稿, 2003-12-20 收修改稿)