# 一次热带低压引发上海特大暴雨 过程的中尺度系统分析\*

### 齐琳琳 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

**摘 要** 作者利用每日 4 个时次的 1°×1° NCEP 资料、逐时的 GMS 5 卫星红外云图资料、雷达组合反射率及雷达回波顶高图像资料和上海雨量自动站观测资料,对 2001 年 8 月 5 至 6 日上海特大暴雨过程进行了分析,认为:(1)停滞在上海地区的热带低压为此次特大暴雨的发生提供了有利的背景,而低压内部不断更替出现的中尺度对流云团是暴雨的直接制造者;(2)5 日夜至 6 日晨,热带低压内至少有四个中尺度雨团发生发展,雨团的水平长度小于 100 km,宽度约 50 km,生命史 1~3 h 不等,属于典型的β中尺度系统;(3)来自西太平洋和南海的暖湿气流向上海地区输送了充足的水汽;(4)热带低压内对流层低层的辐合、高层的辐散有利于强上升运动的维持,强上升气流携带充足的水汽、能量有利于对流云团的发生发展,产生降雨。

关键词: 热带低压; 特大暴雨; 中尺度特征; 城市气象灾害

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0254-15 中图分类号 P445 文献标识码 A

# 1 引言

2001 年 8 月 1 日生成于关岛以北洋面上的热带低压初期沿着西太平洋副热带高压 南侧的东南气流以西北偏北路径移动,4 日 0000UTC 左右在我国闽北地区登陆后,热 带低压继续向西北偏北方向移动,当其移到江西、安徽两省交界处附近时突然转向, 之后向东北偏东方向移动,于 5 日午后移到上海地区。由于受东面海上稳定的西太平 洋副热带高压的阻挡,热带低压在上海停滞至 6 日 0000UTC 后才从长江口进入黄海南 部。低压在上海滞留期间,上海市区普降大到暴雨,市区最大降雨强度在 60 mm h<sup>-1</sup>至 80 mm h<sup>-1</sup>间,15 小时内平均降雨量约为 150 mm 至 200 mm,黄浦、徐家汇地区 12 小 时的降雨量更是分别达到 294 mm、248 mm,为特大暴雨。此次暴雨过程不仅给人民生 活带来诸多的不便,而且使得上海的经济受到很大影响。根据上海百年雨量对比分析, 这场特大暴雨的 24 小时降雨强度和 1 小时降雨强度均为上海市区 50 年来所未遇。

历史上对台风(或热带低压)登陆引发的暴雨过程已有不少研究,它们包括台风 主体降水、台风倒槽降水、台风螺旋云带降水或中低纬系统相互作用引发降水等<sup>[1~7]</sup>, 但本例似乎难于归入上述各类。分析表明,此次局地强暴雨是由一个减弱的登陆热带 气旋在断裂后的大陆副热带高压与西太平洋副热带高压间,沿向北偏东方向移动,在

<sup>2002-07-19</sup> 收到, 2002-09-17 收到修改稿

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040908 和国家自然科学基金资助项目 49875011 共同资助

上海地区相对停滞所引发的,具有范围虽小,但降雨的时空分布却非常集中的特点, 是典型的城市灾害。由于城市灾害通常发生突然,且局地性强,现有的观测条件难以 监测,预报上有相当难度,因而值得深入研究。所幸在此次热带气旋暴雨发生期间, 上海市气象局利用其稠密的观测网获取了高时空密度的自动站观测资料、雷达图像资 料以及卫星资料等。本文就利用上海雨量自动站的逐时降雨资料并结合卫星、雷达图 像资料对此次暴雨过程进行分析,以了解暴雨过程中中尺度系统的演变特征,从而为 今后这类暴雨过程的研究和预报提供一些帮助。初步分析判定这次过程可能主要与热 带低压内部的中尺度系统有关,本文主要对这次过程热带低压内的中尺度系统作了分 析,而有关该暴雨系统的数值模拟研究,将另文发表。

### 2 8月5日夜至6日晨上海特大暴雨过程环流背景分析

图1是2001年8月4至6日的雨量分布及登陆后热带低压移动路径示意图。可以

看到, 8月4日0000UTC~5日 1200UTC,登陆后的热带低压先是向 西北偏北方向移动,而后向东北偏东 方向移动,5日午后热带低压移到上 海上空,并在此停滞的一夜之间,上 海地区普降暴雨。我们现利用每日4 个时次的1°×1°NCEP资料对此次暴 雨过程的环流背景进行了分析。表1 给出了 8 月 4 日 0000UTC~6 日 0000UTC期间 850 hPa 热带低压的中 心位置及强度。从表1中可以知道, 对流层低层 850hPa 上, 4 日 0000UTC 热带低压在福建、浙江两省交界处登 陆时,中心强度约为1525位势米,强 度较登陆前有所减弱。登陆后的热带 低压向西北偏北方向移动,强度基本

#### 表 1 2001 年 8 月 4 日 0000UTC~6 日 0000UTC 850 hPa 热带低压中心位置及强度

时间	850 hPa 中心位	中心位置	
	势高度/位势米		
4 日 0000UTC	1525	(27°N, 119.5°E)	
4 日 0600UTC	1520	(28°N, 118.5°E)	
4 日 1200UTC	1520	(29°N, 118°E)	
4 日 1800UTC	1510	(30°N, 118°E)	
5 日 0000UTC	1505	(30.7°N, 118.5°E)	
5 日 0600UTC	1487	(31.1°N, 119°E)	
5 日 1200UTC	1480	(31.1°N, 120°E)	
5 日 1800UTC	1460	(32°N, 120.6°E)	
6 日 0000UTC	1455	(32°N, 122°E)	



图 1 2001 年 8 月 4~6 日实况降雨及热带 低压移动路径示意图(单位: mm)

维持。4 日午夜至 5 日晨,当热带低 压移至江西、安徽交界处附近时突 然转向,随后向东北偏东方向移动, 并于 5 日午后移入上海地区。对流 层低层 850 hPa 上,5 日 1200UTC, 一个完整的低压环流已位于上海地 区,闭合低压中心为 1480 位势米。 6 日 0000UTC,缓慢东移入海的低 压,中心强度为 1455 位势米。位势 高度场的变化表明,5 日 1200UTC





(c) 5 目 1200UTC, 200 hPa; (d) 6 目 0000UTC, 200 hPa

至 6 日 0000UTC 期间,位于上海且移动缓慢的热带低压在入海前得以重新加强,这可能与降水引起的凝结潜热释放有关。

对流层中层 500hPa上,此次上海特大暴雨的环流形势并未出现台风登陆后常见的 鞍型场结构,位于 60~70°N 附近地区贝加尔湖以西东移发展中的低槽对此次上海特大 暴雨影响似乎也不很明显。中纬度地区,西太平洋副热带高压主体虽位于日本,但其 已西伸进入大陆,且强度高达 5890 位势米。8 月 4 日 0000UTC,热带低压在我国闽北 登陆时,西伸进入大陆上的西太平洋副热带高压正处于强盛期,热带低压位于其南侧。 4 日 1200UTC 后,西太平洋副热带高压在长江中游(30°N,110~115°E)附近断裂, 分别在海上与大陆上形成两个闭合高压,可以注意到,大陆上副热带高压的西北侧有 偏西气流进入热带低压,而此后热带低压就沿西太平洋副热带高压的西侧向东北偏东 方向移动,入侵热带低压的偏西气流对于热带低压的转向及发展可能也有一定影响。 东移至上海地区的热带低压与稳定在海上的西太平洋副热带高压相互作用为暴雨的发 生提供了有利的背景场。5 日 1200UTC,移至上海的热带低压,闭合中心为 5880 位势 米(图 2a),而6日 0000UTC,该闭合环流东移出长江口,中心强度可达 5850 位势米(图 2b)。500 hPa 位势高度场的变化再次表明,在此 12 小时内位于上海地区的热带低压的确有所加强。

另外,我们注意到对流层高层 200 hPa上,处于大陆高压东南侧的上海本应为辐散 区控制,但是在这一地区仍有明显的偏东北流与偏西气流形成气旋性环流切变区存在, 5日 1200UTC 与 6日 0000UTC 均如此(图 2c、d)。这表明热带气旋的水平尺度虽然 较小,但在垂直方向上它的确是一个比较深厚的系统。当然,高层的辐散虽未出现在 200 hPa上,它在对流层上层的更高层还是有所反映的(图略)。

#### 3 热带低压的中尺度结构特征

利用 1°×1° NCEP 资料,我们对热带低压的结构特征进行了分析。图 3 是 2001 年 8 月 5 日 0600UTC~6 日 0000UTC 涡度、温度经向偏差沿 31°N 的垂直分布。其中温 度的经向偏差是以热带低压为中心,将温度沿经向取 9 点平均,再用格点上的值减去 平均值而得出。分析中发现,该低压是一个维持较长时间的热带系统,其在 300 hPa 以 下为一气旋性涡柱,涡柱中心基本垂直,系统结构较为深厚。温度场经向偏差的分布



图 3 8月5日~6日涡度、温度经向偏差沿 31°N 垂直分布
(a)5日0600UTC;
(b)5日1200UTC;
(c)5日1800UTC;
(d)6日0000UTC
实线:涡度,单位:10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>; 虚线:温度经向偏差,单位:<sup>℃</sup>

表明,低压内对流层中上层温度偏差值为正,低层为负,且对流层中上层的温度偏差 平均比周围高出约0.3~0.6℃,具有相对暖心的结构,利于涡旋的维持。由此,我们 认为登陆后的热带低压仍维持热带天气系统的某些特性而与温带系统有所区别。另外, 通过分析低压内相对湿度场的分布(图略)可知,热带低压本身为一高湿区,湿区厚 度可达500 hPa,而其两侧则为相对干区,5日0600UTC至6日0000UTC,在湿区西 侧500~300 hPa间有一明显的干区入侵,这股干冷空气反映了中纬度系统对这次暴雨 过程有一定影响,它的卷入可导致热带低压内云系分布的不对称及降雨的发生。

暴雨的发生与中尺度对流系统密切相关,因此有必要分析热带低压的中尺度热力、 动力学结构特征。由于大气环流系统中有多种尺度系统存在,不同尺度的系统有着不 同的物理特性,同时它们之间又存在着复杂的相互作用,因此对大气系统相互作用的 多尺度特征进行研究比较困难,而且已超出了本文的范畴。为简化问题起见,分析中 我们采用了 25 点平滑算子的尺度分离法来对热带低压系统进行尺度分离<sup>[8]</sup>,首先滤掉 2~5 倍格距波得到低通滤波场,然后由原场减去低通滤波场得到中尺度场,以此来研 究造成暴雨的中尺度系统特征。

25 点平滑算子计算公式:



图 4 8月 5~6 日经 25 点滤波后的 500 hPa 流场 (a) 5日 0600UTC; (b) 5日 1200UTC; (c) 5日 1800UTC; (d) 6日 0000UTC

$$\overline{f}_{0} = \left[ (1-s_{1})(1-s_{2}) + \frac{s_{1}s_{2}}{2} \right]^{2} f_{0} + \frac{1}{2} \left[ s_{1}(1-s_{2}) + s_{2}(1-s_{1}) \right] \left[ (1-s_{1})(1-s_{2}) + \frac{s_{1}s_{2}}{2} \right] \sum_{i=1}^{4} f_{i}$$

$$+ \frac{1}{4} \left[ s_{1}(1-s_{2}) + s_{2}(1-s_{1}) \right]^{2} \sum_{i=5}^{8} f_{i} + \frac{s_{1}s_{2}}{4} \left[ (1-s_{1})(1-s_{2}) + \frac{s_{1}s_{2}}{2} \right] \sum_{i=9}^{12} f_{i}$$

$$+ \frac{s_{1}s_{2}}{8} \left[ s_{1}(1-s_{2}) + s_{2}(1-s_{1}) \right] \sum_{i=13}^{20} f_{i} + \left( \frac{s_{1}s_{2}}{4} \right)^{2} \sum_{i=21}^{24} f_{i}.$$

图 4 是经 25 点平滑后得到的 500 hPa 流场分布。可以看到造成此次上海特大暴雨 的系统水平尺度约为 300~400 km,是典型的 α 中尺度系统。系统自西向东逐渐移进上 海地区,5 日 1200UTC~6 日 0000UTC,α 中尺度涡旋正位于上海,且气旋性中尺度 环流中心的位置与暴雨中心更为接近。

图 5 是 8 月 5 日 0600UTC~6 日 0000UTC 系统经 25 点滤波后的涡度场沿 31°N 垂 直分布图。可以看出,暴雨时刻柱状的正涡度区正位于上海地区,强度达到最大,而 其两侧对应的为负涡度区,涡度场的正涡度区集中在上海附近的较窄区域内,这就从 动力场上解释了特大暴雨仅发生在上海的可能原因。另外,分析该时段内中尺度垂直 环流与温度平流沿 31°N 的垂直分布(图 6),发现暴雨系统是在低层层结不稳定的环境 中发生、发展起来的,α中尺度涡旋在 600~300 hPa 间具有相对的暖心结构(图略)。 暴雨开始前一阶段环流场上一直是以偏东风为主,层次可达 500 hPa,该气流携带大量



图 5 8月 5~6 日经 25 点滤波后涡度场沿 31°N 垂直分布(单位: 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>) (a) 5日 0600UTC;(b) 5日 1200UTC;(c) 5日 1800UTC;(d) 6日 0000UTC



图 6 8月 5~6日温度平流、垂直环流沿 31°N 分布图 (单位: 10<sup>-4</sup>℃ m<sup>-1</sup>) (a) 5日 0600UTC; (b) 5日 1200UTC; (c) 5日 1800UTC; (d) 6日 0000UTC

水汽输送到上海。5日 0000UTC~0600UTC,在 117°E 以西 1000~500 hPa 有弱干冷 空气下沉入侵,同时上海地区以西风为主。5日 0600UTC 偏西风向东推至 118°E 以东, 且在低层已扩展至 120°E 附近,低层浅薄的冷空气抬升其上暖湿空气,触发云团的发 展。5日 1200UTC 后,涡旋两侧的偏东风和偏西风在上海附近相遇,对流层低层出现 强烈辐合,继而引发强上升运动。5日 1800UTC 上升运动区可伸展到 200 hPa 附近。 该上升运动区与其两侧的下沉运动区分别构成顺时针与逆时针环流圈,垂直环流圈的 存在又维持了系统内的强上升运动,最强上升运动区位于 500 hPa。强上升气流为系统 提供了持续充足的水汽、热量,从而造成强对流的发生发展。因此,我们认为热带低 压内暖湿空气在低层以气旋式环流向暴雨中心辐合后上升,至高空后向周围辐散,强 上升气流携带充足的水汽、能量,有利于对流云团的发生发展,产生降雨。

#### 4 暴雨过程水汽输送特征

通常,中国东部地区的水汽主要来自孟加拉湾,由印度西南季风输送而至。此次 上海地区的强降雨过程中水汽是否也来自该地区?为找出水汽的来源,我们分析了8 月4日1200UTC~6日0000UTC对流层中下层水汽通量的分布状况(图7)。不难看 出,此次暴雨过程水汽主要来自西太平洋和南海地区。暴雨发生前西太平洋和南海地 区的偏东暖湿气流输送大量水汽到上海地区,强水汽输送中心就位于上海附近。热带 低压登陆后,在其南部始终存在一明显水汽通量大值区,5日0000UTC后,随着热带 低压逐渐向东移入上海,西南、偏东南暖湿气流将水汽输送到上海,充足的水汽不仅 有利于低压停滞在上海期间得以重新活跃,而且还在上海城区附近边界层及对流层低 层内明显聚集,使得上海地区具有明显的水汽输送和辐合。强水汽输送集中在850hPa 以下,中心强度约为16g cm<sup>-1</sup> hPa s<sup>-1</sup>。至此,可以认为此次暴雨过程中有两条水汽输 送带,一条是从海上延伸到长江下游附近的偏东南气流,一条是与热带低压相伴的西 南气流,两条水汽带将来至南海和西太平洋的源源不断的水汽输送到上海,为上海特 大暴雨提供了丰富水汽。



图 7 8月4日1200 UTC~6日0000 UTC 925 hPa 水汽通量分布(单位:g cm<sup>-1</sup> hPa s<sup>-1</sup>) (a)4日1200 UTC;(b)5日0000 UTC;(c)5日1200 UTC;(d)6日0000 UTC

上海 58362 站探空纪录的垂直剖面图分析也表明(图 8),暴雨发生前,上海地区 不仅近地面边界层的水汽含量十分充沛,而且地面到对流层低层大气明显增温,积聚 了大量能量,这为暴雨的发生提供了水汽和能量。随着暴雨的发生,对流层中下层的 湿度增大,水汽增加,强烈的对流将大量水汽向上输送,等比湿线明显上凸。



图 8 2001 年 8 月上海 58362 站探空纪录的垂直剖面图 实线:温度露点差,单位:℃;虚线:比湿,单位:g kg<sup>-1</sup>

## 5 地面降水中尺度特征分析

对于此次降雨过程,上海市局提供了 14 个自动站雨量逐时降水资料及 28 个上海 雨量自动站逐时降水资料,这对我们了解暴雨阶段降雨的分布特征具有重要意义。图 9 是 2001 年 8 月 5 日 1000UTC~2300UTC 自动站的逐时雨量分布,从图上可以看出,



图 9 2001 年 8 月 5 日上海自动站逐时降雨分布(单位: mm) (a) 1000UTC; (b) 1200UTC; (c) 1400UTC; (d) 1600UTC; (e) 2200UTC; (f) 2300UTC 在上海市区 (31.08~31.26°N、121.12~121.36°E) 20 km 左右见方的区域内有多达 24 个雨量自动站,这样密集的资料不但国内而且国际上在台风降水分布研究方面也是不 多见的。若定义1h降水量大于10 mm、生命史≥2h且范围达到或超过几十公里的雨 区为中尺度雨团,其中每小时降雨量≥50 mm,≥25 mm 的雨区为特强雨团、强雨 团<sup>[9,10]</sup>,则可以清楚地看出上海特大暴雨过程中降水分布的中尺度特征。5 日 1000UTC~6日 0000UTC上海地区的暴雨主要是由4个中尺度雨团造成,其中5日 1400UTC~1600UTC及5日 2200UTC~2300UTC雨团强度达到特强。表2给出降雨 过程中雨团的分布特征,由此可以知道暴雨过程中雨团的水平尺度小于100 km,宽度 约50 km,生命史1~3h不等,属于典型的β中尺度系统。中尺度雨团在停滞的热带低 压内交替发生发展,生消频繁,且基本上重复出现在相同的地区,因而造成了短时间 内的强降水,降雨尤以上海市区雨量最大。

序列号	出现区域	生消时间	生命史/h	中心雨强/mm $h^{-1}$
1	(31.11~31.15°N,121.24~121.27°E)	5 日 1000UTC~1100UTC	1	25
2	(31.02~31.17°N,121.18~121.32°E)	5 日 1200UTC~1300UTC	1	39
3	(31.02~31.18°N,121.13~121.31°E)	5 日 1400UTC~1700UTC	3	80
4	(31.02~31.12°N,121.2~121.32°E)	5 日 2100UTC~2300UTC	2	59

表 2 8月5~6日上海市暴雨期间中尺度雨团的分布概况

为了揭示上述雨团如何随时间变化,我们仔细分析了2001 年 8 月 5 日 1000UTC~ 6日 0000UTC 逐时雨量分布。可以看到上海地区的降雨基本上是从 5 日 1000UTC 开 始,初期雨团范围较小,强度较弱,最大降雨强度约为25mmh<sup>-1</sup>,1200UTC开始雨 团范围有所扩大,降雨强度也有所加强,观测到的最大降雨强度约为  $39 \text{ mm h}^{-1}$ 。但该 雨团强中心仅维持1小时就减弱,因而只造成短时局地降雨。5日1400UTC几乎在原 地又有新的雨团发生发展,此次雨团不仅范围大,而且强度也明显加强,各雨量站一小 时的降雨量均超过 20 mm,其中最大降雨强度为80 mm h<sup>-1</sup>。由此,可以认为此次暴雨 过程中暴雨中心就为该雨团所致。雨团一直持续到 1700UTC 才减弱消亡。之后,上海 地区降雨出现间歇,部分地区零星降雨。5日2100UTC~2300UTC上海浦东附近又有 一尺度相对很小的雨团生成,其造成的短时强降雨过程更是具有明显的局地性,降雨 持续2个小时左右,强中心位于浦东附近,最大降雨强度为59mmh<sup>-1</sup>。6日0000UTC 后随着热带低压的移出,中尺度对流雨团的消亡,上海地区降雨结束。综上所述,5~ 6日的上海暴雨过程中有强度不等的四个中尺度雨团依次出现,雨团的位置基本一致, 但雨团的尺度、强度却明显不同。最强雨团出现在5日1400UTC~1600UTC、 2100UTC~2300UTC。由此,可以认为中尺度对流雨团是在热带低压内部交替发生发 展的,当同一位置处的前一个对流雨团减弱或东移后,几乎在原处又有新的对流体生 成,接连出现的中尺度雨团造成了上海此次特大暴雨。

为了进一步了解这场暴雨过程的时空分布特点,我们还分析了南市、小东门、五角场、静安、杨浦、徐汇6个雨量站在5日0300UTC~6日0000UTC内降雨随时间的 演变(图 10)。可以发现,雨量站的降雨记录均表明上海的降雨主要发生在5日 1200UTC~6日0000UTC,是一场突发性的暴雨。降雨大致可分为4个阶段,5日 1100UTC,5日1700UTC~2000UTC期间降雨出现过间歇。而5日1400UTC~ 1600UTC 及 5 日 2100UTC~2300UTC 的强降雨时段,南市和徐汇站的降雨均大于 50



图 10 2001 年 8 月上海自动雨量站降雨随时间演变分布 (a) 南市; (b) 小东门; (c) 五角场; (d) 静安; (e) 杨浦; (f) 徐汇

### 6 利用卫星、雷达资料对强降水系统 β 中尺度特征的分析

为了进一步证实这场暴雨是大尺度环流背景影响下中小尺度天气系统发生发展的 结果,应充分利用卫星、雷达观测资料进行分析。近年来随着大气探测手段的改进提 高,高时空分辨率卫星、雷达资料的运用已成为揭示中尺度系统发生发展机制及物理 图像,探讨特大暴雨的形成机制,进而提高特大暴雨预报能力中必不可少的一项工作。 下面将尽可能利用收集到的卫星、雷达资料,对引发此次局地强暴雨过程的中尺度系 统做一初步分析。

#### 6.1 中尺度对流云团活动特征

红外云图上云顶亮温沿 31°N 的时空演变分布可清晰地显示此次上海特大暴雨过程 中,中尺度对流云团的时空分布特征(图 11)。若定义云顶亮温≪-30℃且面积≪ 45000 km<sup>2</sup>、生命史大于等于 3 h 的对流云团为β中尺度对流云团,则发现当热带低压 云系从西向东移至上海,上海在 8 月 5 日夜至 6 日晨时段内的确曾出现过旺盛的对流活 动。5 日 1200UTC 前云团的强度相对较弱,但在移到上海上空后β中尺度对流云团强 度增大,且出现云顶亮温度低于-70℃的强中心。云团一直持续到 6 日 0000UTC 后才 减弱东移出上海。对于云团的演变在 5 日 1000UTC~6 日 0000UTC 的间隔 2 h 的红外 云图上可更清楚地反映出(图 12)。从 5 日 1000UTC 开始,一个中尺度对流云团一直



图 11 2001 年 8 月 5~6 日卫星红外云图上低于-30℃的云顶亮温沿 31°N 时空演变分布(单位:℃)

稳定维持在上海(及长江口)上空,云区一直呈圆形,与热带低压区域类似,其尺度 不大,小则100余公里,大则约200km左右,与其他台风(或热带低压)的较庞大的 云区有很大的不同。这片对流云区移动缓慢,直到6日0000UTC移出上海地区。尤其 是在5日1000UTC~1600UTC及2100UTC~2300UTC,上海地区存在尺度较小但发 展强烈的β中尺度对流云团发生发展过程。以上分析表明此次降雨过程具有明显的突 发性和局地性,β中尺度对流云团是造成暴雨的直接影响系统。

#### 6.2 中尺度对流云团发展演变特征

红外云图中的云顶亮温及雷达资料中的雷达组合反射率、回波顶高均能反映对流 云团降水强弱、发展演变等特征量。通常,云顶亮温越低、雷达组合反射率越强、回 波顶高越高,表明云顶越高、对流越旺盛、降水越强。下面,我们就利用逐时的 GMS 5 红外云图云顶亮温和多普勒雷达组合反射率、回波顶高图像资料来分析此次暴雨过程 中中尺度对流云团的发展演变特征。

雷达组合反射率图上,若干对流单体首先出现在上海城区以西(南)的青浦 (31.09°N,121.07°E)、嘉定(31.26°N,121.15°E)、金山(30.48°N,121.08°E)附近,对流单体尺度很小。5日1013UTC,逐渐合并东移的对流云单体内存在一尺度较小的亮云核(强回波区),此时上海地区的降雨已开始。同时刻卫星红外云图上存在若干分布较为零散的对流云单体,云体内云顶亮温约为-30~-40℃,值得注意的是云区内(31°N,121°E)存在一尺度很小的云顶亮温低于-50℃的云体,说明其处于初生阶段(图 12a)。1200UTC零星的对流云单体已逐渐合并发展成一云顶亮温约为-60℃、尺度相对较大的中尺度对流云图(图 12b),其中青浦以西地区出现的亮云核中甚至有更小尺度的强回波存在,它们的合并和增长给上海带来短时局地降雨。1400UTC对流云团中又有新的对流云团出现(图 12c),虽然新生的对流单体空间尺度较小,但随着中尺度对流云团的逐渐发展,云团内冷云顶面积迅速增大,1600UTC发展深厚的对流云团达到鼎盛,云团的云顶亮温低于-70℃(图 12d),这表明中尺度对流云团的云顶可伸展至对流层高层 200 hPa附近,云团发展进入成熟阶段。中尺度对流云团维持至 1700UTC 后逐渐减弱消亡,该时段内上海地区的降雨为此次降雨过程中





图 12 卫星红外云图上 5~6 日低于-30℃的云顶亮温分布(单位:℃) (a) 5 日 1000UTC; (b) 5 日 1200UTC; (c) 5 日 1400UTC; (d) 5 日 1600UTC; (e) 5 日 1800UTC; (f) 5 日 2000UTC; (g) 5 日 2200UTC; (h) 6 日 0000UTC

最强的。对于中尺度对流云团在这一过程中的发展演变, 雷达组合反射率图上也有清 楚体现「图 13 a、b(见图版)]。5日 1209UTC 后,宝山、奉贤间的小对流单体不断地 相互作用,合并发展,5日1441UTC时,形成中心位于上海城区的一中尺度对流云 团,该云团逐渐发展至1614UTC达到最强。此时发展成熟的螺旋状对流云团基本覆盖 了整个上海地区,回波强度大于 45 dBZ,强中心可达 65 dBZ。由于对流云团的强度、 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也均达到最强。上述阶 段内对流云团的演变在雷达回波顶高图上也可清晰地反映出「图 14 (见图版)]。对流 云团的回波顶高从5日1013UTC的9km发展至1614UTC的17km,这也正解释了出 现强暴雨的原因。5日1800UTC~2000UTC强对流云团减弱东移,降雨也相应出现减 弱。但5日 2000UTC,在涡旋云团北部、南部再次分别出现一尺度相对很小的对流单 体,对流单体在东移过程中逐渐合并,2200UTC时形成一向西开口、云顶亮温低于一 60℃的凹形对流云区,此对流云团造成上海城区再次出现短时强暴雨(图 12e~h)。对 于此次短时强降雨,雷达组合反射率图上显示,2048UTC出现在宝山、崇明间的新对 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的移动缓慢的单 体合并,于 2244UTC 前后在上海市区北部形成中心强度约为 50 dBZ 的中尺度对流云 团。对流云团尺度较小, 目维持时间很短, 因此, 造成的降雨更具有局地性(图 13c)。 这种使云团内对流单体再度发展并出现第二个峰值的动力因素是否与凝结潜热有关还 有待进一步研究。6 日 0000UTC 后随着热带低压的逐渐东移入海,上海上空对流云团 减弱消失,上海地区的降雨停止。结合上海宝山站的温压纪录分析认为,对流云团的 发展造成降雨,降雨释放出大量凝结潜热使得温度升高,地面气压下降可能是导致热 带低压内中尺度对流云团的不断生消发展的一主要原因。

## 7 小结与讨论

以上我们利用了每日4个时次的1°×1°NCEP资料、逐时的GMS5卫星红外云图 资料、雷达组合反射率及回波顶高图像资料、上海雨量自动站观测资料对2001年8月 5至6日上海特大暴雨过程进行了初步分析,在明确暴雨系统结构特征的同时,揭示出 暴雨过程中的若干中尺度特征,初步得出以下几点结论。

(1)登陆并转向东移的热带低压于 8 月 5 日午后移近上海,并受稳定在海上的副 热带高压"顶托"而在上海停滞,这样的背景场对上海暴雨的发生十分有利。一般情 况下,台风(或热带低压)登陆后总的趋势是减弱的。但是,本文中涉及的个例向东 移至上海时又重新活跃加强,这可能是热带低压在上海获得了较多的水汽供应的缘故。

(2) 8 月以来上海地区充足的水汽为暴雨的发生孕育了有利条件。结构深厚及几乎 静止稳定的热带低压在上海附近有所发展,整个对流层从低层到高层为一细长的涡柱 状体,且在 850 hPa、500 hPa 上均有明显加深迹象。其内低层的暖湿空气以气旋式环 流向暴雨中心辐合后上升,至高空后向周围辐散,从而造成对流云的强烈发展和暴雨 的发生。

(3) 来自西北方向的对流层中低层的弱干冷空气对于抬升来自海洋的暖湿空气有 其特殊的作用。 (4)热带低压内不断出现的中尺度对流云团是此次上海特大暴雨的直接制造者。5 日 1000UTC~6 日 0000UTC 上海的暴雨主要由 4 个中尺度雨团造成,属于典型的β中 尺度系统。卫星每小时图像揭示,涡旋云团非常稳定地停滞在上海地区,降雨重复发 生在同一区域。雷达资料的分析更具体地揭示出此次暴雨过程的突发性、局地性且发 展强烈的特征,强降雨时刻雷达回波顶高最高约达 17 km。

以上主要是就暴雨过程中观测到的一些事实作了分析,这些对于了解暴雨过程的 中尺度特征是有意义的。对于这次上海特大暴雨形成机理的进一步分析,今后尚需做 更深入的研究。

#### 参考文献

- 1 仇永炎,夏季西太平洋及东亚热带波动的运行及结构,气象学报,1952,23 (2),85~98.
- 2 Palmen, E., Vertical circulatuion and release of kinetic enrgy during the development of hurricane hazel into an extratropical storm, *Tellus*, 1958, 10, 1~23
- 3 Chien, H. H., and P. J. Smith, Synoptic and kinetic energy analysis of hurricane Camile(1969) during Transition across the southeastern United States, Mon. Wea. Rev., 1977, 105, 67~77.
- 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 陈联寿、丁一汇,西太平洋台风概论,北京:科学出版社,1979,490pp.
- 6 Zhao Sixiong, and G. A. Mills, A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II: synoptic-diagnostic description, Mon. Wea. Rev., 1991, 119, 2074~2094.
- 7 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.
- 8 夏大庆、郑良杰、董双林等,气象场的几种中尺度分离算子及其比较,大气科学,1983,7(3),303~311.
- 9 李玉兰、杜长萱,中一β尺度云团造成不同降水强度的对比分析,大气科学,1994,18,492~497.
- 10 陶祖钰、黄伟、顾雷,常规资料揭示的中尺度对流复合体的环流结构,热带气象学报,1996,**12**(4),372~379.

# An Analysis of Mesoscale Features of Heavy Rainfall in Shanghai on 5-6 August 2001

Qi Linlin, and Zhao Sixiong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A strong heavy rainfall occurred in Shanghai during 5-6 August 2001. The above-mentioned case has been analyzed using the special observational data, including automatic meteorological stations data, radar images and satellite images. The results show that the heavy rainfall was mainly associated with the mesoscale convective systems developing in landing tropical depression (TD). Four main rain clusters, at least, have been found in Shanghai from 16 BLT (Beijing Local Time) 5 August to 08 BLT 6 August 2001. The horizontal size of them was about tens kilometers and the life cycle was around 1-3 hours which belonged to the typical meso- $\beta$  systems. There were moisture convergence zones in middle and lower troposphere in Shanghai. It was emphasized that the TD provided the favorable environmental conditions for occurrence of heavy rainfall. In addition, it is noticed that the South China Sea and the West Pacific may be the important moisture source place.

Key words: tropical depression; heavy rainfall; meso-scale system; meteorological disaster in city