

上海 98. 7. 23 大暴雨环境场及多普勒雷达资料的分析

姚祖庆 杨引明

(上海中心气象台, 200030)

提 要

应用天气图、卫星云图、探空资料,并重点应用多普勒雷达资料综合分析了 1998 年 7 月 23 日上海大暴雨过程,指出在有利的大尺度环境条件下 MCC 下风方诱生出 MCS,导致上海产生大暴雨,多普勒雷达基本反射率、径向风场及垂直风廓线(VWP)资料在暴雨发生前数小时就监测到中尺度切变、中尺度涡旋等触发机制的发生、发展,它们与强降水回波的发展、加强、移动和合并息息相关。

关键词: MCC MCS 多普勒雷达 基本反射率 径向风场 垂直风廓线

引 言

对中尺度天气系统的研究表明,中尺度系统与环境条件有着密切的关系,大尺度环境条件不但制约了对流系统的种类、演变过程,而且还可以影响对流系统内部结构、强度、运动和组织的^[1]。1998 年 7 月 23 日上海地区发生的局部大暴雨天气过程,就是一次典型的在有利的大尺度环境下,由 MCC(中尺度对流复合体)下风方诱生出的 MCS(中尺度对流系统)造成的。本文详细分析了 MCC 下风方产生 MCS 的大尺度条件,特别是重点应用这一天的多普勒雷达回波、径向风场及 VWP 演变过程,研究了上海地区在这样的大尺度背景形势下,中尺度涡旋及中尺度切变形成并向深层发展的过程,它们与降水回波发展、移动、合并的关系。7 月 23 日上海地区大于 100mm 降水区集中在市区、闵行、奉贤和南汇,以奉贤 134.6mm 为最大,南汇横沔 128.8mm,南市区 121.0mm,龙华 118.7mm,而青浦仅下 8.1mm,崇明为 10.5mm。上海地区的大暴雨是由中尺度系统造成的。

1 大尺度环境条件

对强对流系统的大量研究表明,强对流系统发生的大尺度天气学条件有:(1)位势不稳定层结,并常有逆温存在。(2)低层有湿舌或强水汽辐合。(3)有使不稳定能量释放的机制。(4)常有低空急流存在。(5)有强垂直风切变。(6)中层有干冷空气等^[2]。7 月 23 日的大尺度背景充分具备了以上条件。

1.1 地面和高空形势

7 月 23 日地面图上,长江中下游在自西向东伸展的较窄长的低压倒槽控制下,在合肥和重庆南侧分别有一个 999hPa 和 997hPa 的低压中心,静止锋穿过两个低压中心,沿 30°N 附近伸到日本以南,锋面附近有大片雨区(见图 1a)。与地面形势相对应,850~700hPa 上海附近均为切变线低涡形势,850hPa 低涡在黄山附近,切变以南为一致的西南急流,风速达 12~18m·s⁻¹,切变附近有大片 $T - T_d < 3^{\circ}\text{C}$ 的湿区,沿切变线南北 5 纬距宽范围内,从地面至 700hPa 为一深厚湿区和气流辐合区(见图 1b、c),上海正处在暖切变线上。500hPa 高空槽刚过上海,在南京~杭州附近有东北风与西南风切变,形势极有利暴雨发生。

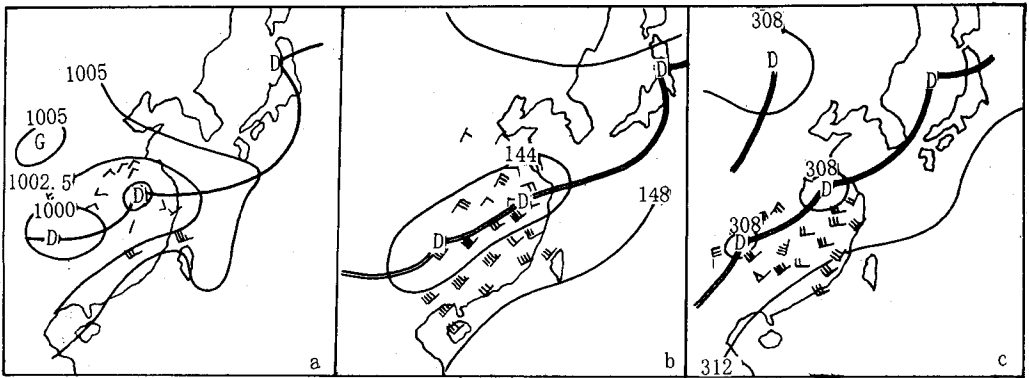


图1 7月23日08时大尺度环境场

a 地面图; b 850hPa; c 700hPa

1.2 对流不稳定层结

7月23日08时上海探空资料显示(图略)上海整层湿度大,中低层湿度明显大于高层,500hPa以下 $T - T_d$ 均小于 3°C ,500hPa以上在 $5 \sim 11^{\circ}\text{C}$ 。应用这一层结曲线,我们分别将4个气层抬升200hPa即地面 $\sim 850\text{hPa}$ 、 $925 \sim 700\text{hPa}$ 、 $850 \sim 700\text{hPa}$ 和 $700 \sim 500\text{hPa}$,抬升后,每一层底至顶部气温差明显增大,其温度递减率 γ 除 $850 \sim 700\text{hPa}$ $\gamma = \gamma_m$ 外,其它层均出现 $\gamma > \gamma_m$,因此大气层结为对流不稳定。用 θ_{se} 随高度变化看525hPa以下是位势不稳定,特别是地面至700hPa $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z}$ 达 -20 之多,500hPa以上,由于湿度随高度无明显下降,因而出现 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} > 0$ 。这天抬升凝结高度为973hPa,CAPE(对流有效位能)是近几月中最大的,达1498J/kg,层结曲线地面 $\sim 1000\text{hPa}$ $\gamma = 0$,虽未出现逆温,对能量积累也能有一定作用。另外探空显示风的垂直切变大,近地面层为E~SE风,940~600hPa为SW风,500hPa以上为NW风,250hPa以上NW风达 $26\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,这有利于较长生命期的雷暴发生,在上述有利的大尺度环境下,强对流的发生是必然的。

1.3 强高能平流

我们常用 K 指数衡量大气中潜在能量,

K 值越高,500~850hPa温度递减率越大,且700和850hPa湿度越大。经验表明,当 $K \geq 34^{\circ}\text{C}$ 时,大气就具备了较高潜能。然而单站 K 值高还不足以使对流发生和维持,必须要有源源不断的能量补充,因此有无高能平流的存在十分重要,据我们对历史资料统计表明,上海地区6~8月强对流过程中75%的个例均有明显高能平流。7月23日08时上海 $K = 35^{\circ}\text{C}$,上海周围及西南方为大片 $K \geq 35^{\circ}\text{C}$ 高能区,综合三层气流,上海处于强高能汇集区,对上海地区强对流发展能量补充、维持起到举足轻重的作用。

1.4 MCC北侧边缘MCS发展

1.4.1 在有利的大尺度环境下,MCC下风方有MCS发展

7月23日上海处在对流不稳定层结及高能平流环境下,09:32的卫星云图上显示,沿长江以南有3个MCC发展,中间一个正位于上海上游200~300km处,其发展最强、生命期最长,维持12小时以上,云顶亮核温度始终达 -73.4°C 。 -52°C 亮温云区面积从09:32的 36000km^2 到17:32达 90000km^2 ,其云区长短轴之比在0.75~0.99之间,是典型的MCC。它的大量凝结潜热通过中低空西南急流向上海输送,大大增加了上海的暖湿平流。7月23日08~20时,700和850hPa 12小时均出现升温,850hPa上海升温 1°C ,700hPa上海升温达 3°C 之多,

为 MCC 下风方产生 MCS 提供了能量, 有利地面降压。

1.4.2 地面降压及中尺度切变线的生成

从每 3 小时一张的地面中尺度图上看到, 08~11 时在溧水附近维持一气流汇合区, 11 时上海金山、松江与青浦之间形成一中尺度切变线(图略), 同时上海各站气压明显下降, 3 小时降压幅度达 $-0.8 \sim -1.6$ hPa, 上海第一阶段的强降雨从这一切变南侧开始, 到 14 时这一切变发展成横穿上海中部更强的切变线, 上海各站气压继续下降 $-1.0 \sim -1.6$ hPa, 到 17 时, 气流汇合区东移至太湖东侧, 上海各站气压又下降 $-0.8 \sim -1.4$ hPa, 9 小时上海各站气压下降 $-2.5 \sim -3.8$ hPa。这时离上海第二阶段最强降水还有一个多小时, 上海地区持续降压是中尺度切变、中尺度涡旋生成、维持的重要因素, 与上海地区相应上午和傍晚产生的两个 MCS 相联系。从以上分析可以看出, MCC 下风方, 在有利的大尺度背景下, 加强的暖湿平流导致地面气压下降^[3], 有利于地面中尺度切变、低涡生成, 成为 MCS 发生发展的触发机制。

1.5 水汽图上下沉干区的逼近

从 $6.7\mu\text{m}$ 的水汽图上可以看到, 上海及以南地区为深厚湿区, 而上海西北 800 多公里处有干涌不断向东南方涌进, 说明这一区域 500hPa 以上有明显冷平流正向上海区域逼近^[4], 与这一地区低层暖湿平流相结合, 对上海地区不稳定性的发展无疑是一个十分有利的因素。

2 多普勒雷达资料分析

上海 WSR-88D 多普勒雷达位于上海南汇县中港, 它每 6 分钟进行一次有 9 个仰角的体扫描, 为我们提供了丰富信息, 揭示了这次大暴雨过程的中尺度涡旋、切变线的发生、发展过程及与强回波发展、移动、合并的关系。

2.1 中尺度切变线的生成与发展

7 月 23 日第一段强降雨发生在 10~13 时, 其中 12~13 时为最强。从 08 时到 14 时 1.5 度仰角基本反射率因子回波动画上可以

清楚地看到, 在大尺度低压环境下, 回波发展和移动的突出特点是以太湖东部为中心的逆时针方向旋转回波带, 强回波带呈 NNE~SSW 排列在旋转中心的东~东南侧。上午 8:20 的回波图上, 在嘉兴附近有两条 NNE~SSW 排列的狭长回波带 A 和 B (图 2a₁), A 强于 B, 回波带在向东北方向移动中 B 南段逐渐减弱, A 明显加强, 到 9:41 A、B 北端合并, 整个回波带加强 (图 2a₂、a₃), 北部和中部出现较大的 45dBz 核心区, 到 11:32 (图 2a₄) 核心强度达 50dBz。回波带移到青浦东面后逐渐转向 NNW 方向移动, 由于回波移动方向与回波带长轴方向一致, 因此尽管回波带较为狭长, 但造成的降水时间较长, 从 10 时后开始到 13 时强降雨才结束, 历时 3 小时。10:00~11:00 松江泗泾 25.2mm, 11:00~12:00 闵行马桥 36.4mm, 12:00~13:00 市区长宁、田林、徐汇及奉贤泰日均出现 20mm 以上降水, 其中田林达 34.3mm。

分析这段时间的径向风场的分布和演变, 清楚地反映出在回波发展区北侧有一中尺度切变线生成并加强, 8:20 的径向风场 (图 2b₁) 上显示, 以雷达站为中心的第三象限大部区域和第四象限中下部为向雷达站方向的风 (以下称负速度区), 表明从宁波~嘉兴为 S~SW 风, 在第二象限中部 4.2~8.4 千英尺 (约 1300~2600m) 高度为离雷达站方向的风 (以下称正速度区), 即以 SE 为主, 在第二与第三象限间有一宽度为 30 哩 (约 60km), 长为 70 哩 (约 140km) 的零速度区, 说明在零速度区两侧存在一个弱的中尺度 SW 风与 SE 风切变 A 区, 到 9:06~9:41 (图 2b₂、b₃) 零速度 A 区明显变窄, 且第二象限正速度区逐渐向下伸展到地面, 同时第二象限正速度区开始从低层向第三象限扩展, 说明切变逐渐加强并向深层发展, 到 10:34 (图 2b₄) 零速度区 A 变得更窄, 仅 10 哩 (约 20km), 长度维持, 第二象限正速度区在 24 英尺 (约 600m) 附近出现 26 哩/时 (约 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的强风速中心, 正速度区在边界层内进一步向第三象限扩展, 说明在嘉兴与

金山、奉贤之间有一中尺度偏西风与偏东风强切变生成，以上分析表明，从 8:20~10:43 的 2 小时 23 分内，在大尺度低压气旋前方，从地面至 2600m 厚层内，一中尺度 SW 风与 SE 风切变加强、加深，回波带与零速度区（即中尺度切变最强处）正交于回波带北端，这与回波带北端不断新生、加强，出现 50dBz 强回波核心相联系，回波高度发展到

13km 左右。中尺度切变开始加强，强回波发展，强降水开始约早 54 分钟，最强切变形成（10:43）比最强降水开始（12:00~13:00）早 1 小时 17 分。10:00~11:00 强降水开始，边界层出现 SE 急流，进一步加强了辐合，对其后强回波进一步发展，出现更强降水也是有贡献的。13:00 后中尺度切变风场开始减弱，降水也随之减弱。

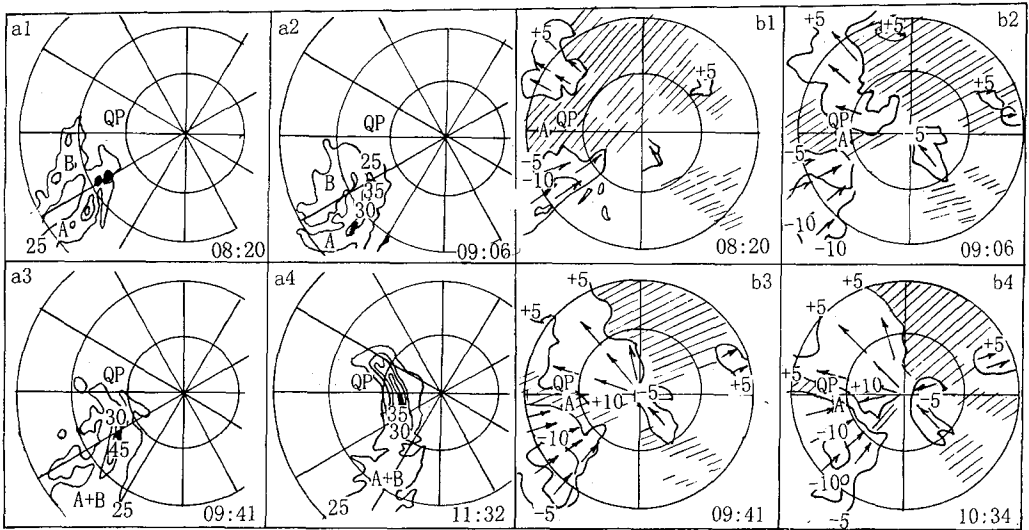


图 2 a. 08~12 时多普勒雷达回波图 单位: dBz b. 08~11 时多普勒雷达 0.5°仰角径向速度图
单位: 厘/小时 斜线区为零速度区 QP 为青浦

2.2 中尺度涡旋加强及“人”字形回波生成过程

7 月 23 日第二阶段强降水发生在 16~22 时，其中 19:30~20:30 为最强，从 1.5° 仰角基本反射率因子回波动画上看到，这一阶段回波演变特征不同于第一阶段，而是上海西部有一中尺度涡旋发生，其内回波在沿反时针方向旋转时不断加强并与前方回波合并，形成南北向回波带，最终与大尺度低压气旋前方的 NW~SE 走向的回波带相交，形成典型的“人”字形回波，从而发生了一天中的最强降水。16 时前后，在大尺度低压的前方开始形成以青浦西为中心旋转的回波带 A，涡旋直径约 70km (图 3a₁)。16 时 47 分在青浦西南约 20km 处有一核心为 45dBz 的小回波 B 生成，它与前方从奉贤、金山到嘉

兴的回波带 A 一起沿逆时针方向，以青浦西为中心旋转，并不断加强 (图 3a₂)。此后，由于 B 旋转速度明显大于 A，因此两回波逐渐靠近，趋于合并。在 A、B 回波带沿中尺度涡旋气流旋转、加强的同时，在大尺度低压切变线东南侧，即宁波东北有大片回波沿逆时针方向向东北方向移动到上海海面后折向西北移动，在南汇、川沙到长江口逐渐形成 NNW~SSE 走向的回波带 C，并不断加强，其核心达 45dBz，A、B 回波带合并为 AB 带位于青浦西为中心的中尺度涡旋东侧，沿 SSW 气流向偏北方向旋转，到 18:32 与 C 相交于市区，形成典型的“人”字形回波 (图 3a₃)，相交后回波不断发展，到 20:11 AB 回波带及相交处出现大范围 50dBz 强回波区，最强中心达 55dBz (图 3a₄)，这时正是一天中

最强降水期。

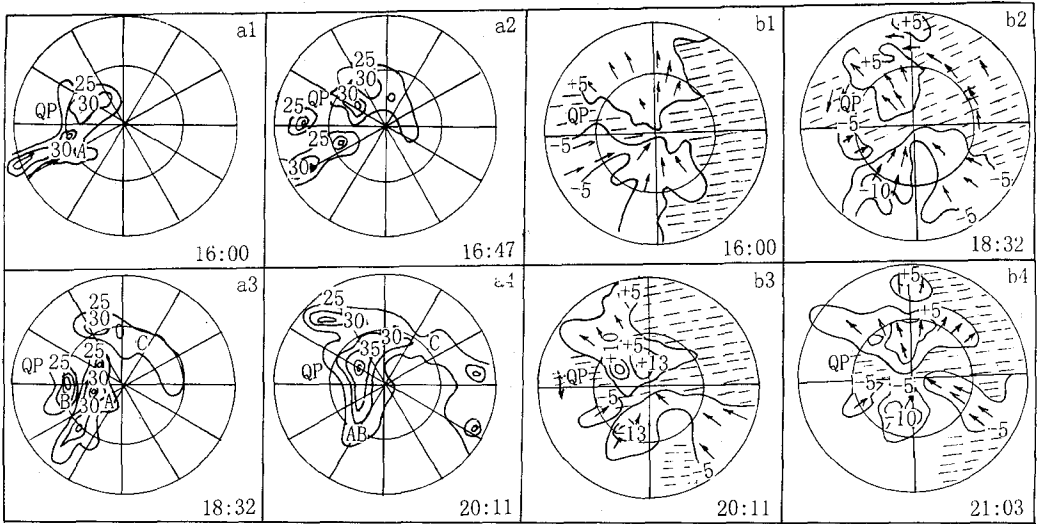


图3 a. 多普勒雷达1.5°仰角基本回波 b. 多普勒雷达0.5°仰角径向速度
说明同图2

分析这段时间的径向风场及演变,可进一步找到这次强降水过程发生、发展的机制。如图3b₁所示,16:00正速度区位于崇明、宝山一带,雷达站以南为负速度区,零速度区分布在雷达站东西两侧,东侧呈扇形,西侧位于闵行青浦之间,较为狭长,说明这一零速度区南北存在较强的SW风到SE风的气旋性气流。此后,这一零速度区同其南、北的负、正速度区呈逆时针方向旋转(图3b₂),表明以青浦西为中心的中尺度涡旋在形成和发展中,青浦西正位于零速度区内。在17时的中尺度天气图上,青浦西面位于零径向速度区的东站点为N风 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,青浦北面的嘉定在正速度区内,为SE风,南面的嘉兴及青浦站本身均为SW风,正好形成以青浦西为中心的中尺度涡旋,其东侧SW气流引导回波向偏北方向移动。在这期间,雷达站东侧的零速度区面积增大。大范围的扇形零速度区表明这里仅有切向风,即为S~SE气流,导致大尺度低压气旋前部位于上海海面的回波折向西北方向移动,同时,径向速度图上还出现了一个重要特征,即第一象限的零速度区向西北扩展到正速度区外侧(图

3b_{2,3}),形成一条S~SW风与SE风的较强辐合区,使这一辐合区南侧的西北~东南向回波带中不断有回波新生、加强,这条西北~东南向回波带与青浦涡旋东侧SSW气流中向偏北方向移动的回波带构成“人”字形回波,并不断发展,到20:11在边界层内上海市区~川沙出现26哩/时($13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的正风速中心(图3b₄),即边界层内出现强S~SE风,厚度达600m。这一SE急流的出现正是最强降水期。到21:32正速度强中心高度逐渐升高,且向第一象限扩展,第一象限零速度区向东、向南收缩,在第一、第四象限间出现中尺度反气旋气流,即SE风到SW风的顺时针方向气流,同时第三象限负速度区缩小,说明SW~S风开始减弱,切变也随之减弱,中尺度涡旋开始瓦解,“人”字形回波也开始散开,这一阶段最强降水结束。

分析这一降水时段内的垂直风廓线(VWP)产品,在中层(4500~7300m)处,出现过两次由SW转为SE风过程,是这一天垂直风廓线的主要特征,16:00以前该层为一致SW风,从17:06开始逐渐转为一致SE风(图略),SE风层次不断加厚、加深,说

明上海地区中空有一暖式切变形成过程。此后 18:14~19:36 又有一个转为 SW 风阶段(图略)。这是因为该时段青浦西的中尺度涡旋生成并加强,导致局地西南风分量增大而影响了雷达站中空的气流。到 19:36 该层风又再次由 SW 风转为 SE 风(图略),而且 SE 风层次愈加深厚,意味着该层内暖切变的加剧是切变向深层次发展的一个特征。19:30 后 1 小时降水量最大达 60mm 以上与这一特征也有着密切联系。这两次转 SE 风过程与强回波出现时间相比约提前 30 分钟,而中尺度涡旋生成及第一象限 S~SW 气流与 SE 气流辐合区形成比强回波出现也提前 1 小时左右。说明多普勒回波动画及风场资料对提高短时预报准确率及预报时效起到了一般雷达所不能起到的重要作用。

3 结 论

(1) 在地面倒槽内,大尺度静止锋低压气旋发展,中低空有强切变和暖湿平流。在低压气旋前方不断有中尺度切变线和低涡产生,成为强对流发生的触发机制及强烈发展的动力。

(2) 将多普勒雷达回波资料与径向风场、VWP 资料相结合,同时考虑大尺度引导气流,能及时监测到中尺度天气系统的发生、发展,回波的发展、合并趋势,对强对流天

气的短时预报十分重要,特别是对定点预报及提高短时预报时效起到十分重要的作用。

(3) 多普勒雷达径向速度场上零速度区位置、范围的变化及与正、负速度相对位置的演变与一些中小尺度天气系统的生成、发展密切相关,必须实时做好细致分析,才能准确、及时抓住这些系统,当中尺度切变与中尺度涡旋同时在一个地区内发生时,可造成很强的降水。

(4) 多普勒雷达 VWP 风廓线随时间的变化,不仅反映出整层平流变化情况,而且各层次风向风速变化还可反映切变层次的变化,对预报回波加强及冷暖平流变化十分重要。

(5) 在地面静止锋南侧及中低层切变南侧有 MCC 发展,当有高能平流和低空急流情况下,在 MCC 下风方向诱发 MCS,导致强对流发生。

参考文献

- 1 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991: 401~402.
- 2 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991: 402~403.
- 3 北京大学地球物理系气象教研室. 天气分析和预报, 北京: 科学出版社, 1926: 91~95.
- 4 Roger B. Weldon and Susan J. Holenes. 水汽图像. 北京: 气象出版社, 1994: 82~86.

Analysis of Environment Field and Doppler Radar Data for a Heavy Rain Gust on 23, July 1998

Yao Zuqing Yang Yinming
(Shanghai Meteorological Center, 200030)

Abstract

By use of synoptic map, cloud image, sounding data and Doppler radar data, the heavy rain gust case which occurred in the 23th of July, 1998 is analyzed. It suggests that MCS can be developed on the downwind of MCC under positive large scale environment, which results in heavy rain gust of Shanghai. Furthermore, according to the Doppler radar base reflectivity, radial velocity and VAD Wind Profile (VWP) data closely related to the developing, strengthening, moving and merging of heavy rain gust echo, the forming and developing of trigger mechanism such as meso scale shear or meso scale eddy was detected several hours ago.

Key Words: MCS MCC Doppler radar base reflectivity field Radial velocity field VAD wind profile