

2005年初夏湖南致洪大暴雨中尺度分析

毛冬艳¹ 周雨华² 张芳华¹ 郭文华¹ 杨克明¹

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 湖南省气象台)

提 要: 利用地面加密观测资料、湖南自动站雨量资料、FY-2C 卫星 TBB 资料和多普勒雷达探测等资料, 对 2005 年初夏湖南致洪大暴雨过程进行了中尺度分析。结果表明: 大暴雨是中尺度辐合线、中尺度低压和中 α 尺度对流云团共同作用引发的, 高层辐散先于中低层辐合的抽吸机制, θ_e 廓线呈弓形分布的上干冷、下暖湿不稳定层结, 南海丰沛的水汽输送是大暴雨形成的物理条件。尺度分离的流场能清晰地分辨中尺度天气系统, 中尺度系统对应着雨团活动, 积云对流发展早于中尺度系统和雨团的发展; 强降水与深对流云团及雷达回波强度高、回波顶高、VIL 大的强对流单体有密切的关系。

关键词: 致洪大暴雨 中尺度分析 雷达反射率因子

Mesoscale Analysis of Flash Flood in Early Summer of 2005 in Hunan

Mao Dongyan¹ Zhou Yuhua² Zhang Fanghua¹ Guo Wenhua¹ Yang Keming¹

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081; 2. Hunan Meteorological Observatory)

Abstract: A mesoscale analysis for the flash flood process in early summer of 2005 in Hunan Province is performed with the surface densified observation, rainfall data of automatic precipitation stations, FY-2C satellite TBB, Doppler-Radar data etc. The results indicate that the heavy rain occurred under the effect of mesoscale convergence line, mesoscale low and meso- α convective cloud clusters together. Suction effect with the divergence in the high level emerging earlier than that of convergence in the mid- and low-level, unstable stratification of the dry and cold air in the high and warm and humid air in the low in accompany with the

bow pattern of θ_e profile and rich water vapor transport from South China Sea are the environmental conditions for the occurrence of heavy rain. Mesoscale systems which are corresponding with the activity of rain clusters can be clearly seen from the stream field after filtering. The development of cumulus and convection is earlier than that of mesoscale systems and rain clusters. Heavy rain is closely connected with the deep convective cloud clusters and convective cells with the strong radar reflectivity, high echo top and big VIL.

Key Words: flash flood mesoscale analysis radar reflectivity

引 言

2005 年 5 月 31 日 20 时至 6 月 2 日 02 时(北京时,下同),湖南中西部和贵州中北部出现了初夏最强一次暴雨过程。降水集中在 5 月 31 日 20 时至 6 月 1 日 20 时,湖南有 38 站出现暴雨,其中沅陵等 6 站及黔中出现大暴雨,降雨量为 100~130mm,湖南溆浦县檀家湾日雨量最大达 201mm,6 小时最大 110mm。这场降雨强度强、历时短和范围广,导致湖南遭受严重洪涝灾害,受灾人口 473 万,直接经济损失 22.9 亿元,属特大型气象灾害。湖南初夏出现如此强的暴雨灾害历史上极为少见。

本文利用地面加密观测资料、湖南自动站加密雨量资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 小时分析资料及 FY-2C 卫星 TBB 资料, CIN-RAD/SA 雷达探测资料对该过程的中尺度天气系统活动特征及规律进行综合分析,以探讨大暴雨的成因。

1 大尺度环流形势演变特征

这次大暴雨发生在欧亚中高纬一槽两脊转化为两槽一脊型的环流形势下。暴雨发生 4 天前,两长波脊分别位于欧洲到乌拉尔山和东西伯利亚东部到鄂霍茨克海,西西伯利亚平原到东西伯利亚西部为一长波槽,槽中两低压中心分别在西西伯利亚平原东南部和

勒拿河沿岸高原上空。5 月 27 日,挪威海低槽南移加深,使欧洲脊 29 日移至西西伯利亚平原发展成阻塞高压,脊前气流分为两支,勒拿河沿岸低压沿北支向东南方向移动并加强,西西伯利亚平原东南部低压沿南支向西偏南移至蒙古国西部被切断。30 日,当挪威海低槽抵达乌拉尔山时,槽中冷空气使阻高减弱,蒙古国西部切断低压减弱为低槽移至蒙古国中部到我国河套一带(图略)。

在 700hPa 和 850hPa 上,低槽移速北快南慢。31 日 08 时,在华北东部到长江中上游建立了低涡切变形势。500hPa 低槽、700hPa 和 850hPa 上低涡切变线是大暴雨主要影响系统。西太平洋副热带高压(以下简称副高)呈带状分布在南海到菲律宾以东洋面上。其西北侧从云贵高原到长江以南建立一支低空西南气流,把低纬海洋上的水汽运送到暴雨区。31 日 20 时至 6 月 1 日 20 时,当 850hPa 低空急流北界到达湘南、200hPa 高空急流南界位于湘北相距 2 个纬距时,强降雨区分布在高空急流入口区右前方的强辐散、低空急流出口区左前方的强辐合区中(图 1)。

2 大暴雨的物理量场特征分析

2.1 流场的尺度分离

采用 25 点平滑算子的尺度分离法,滤去低通滤波场得到中尺度流场。计算方案

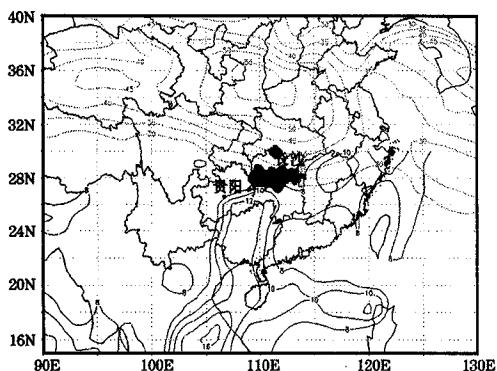


图1 2005年6月1日02时高低空急流的配置
虚线为200hPa急流风速等值线,实线为850hPa急流风速等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 阴影区表示02~08时降水量 $R_6 \geq 10\text{mm}$

为^[1,2]:

$$\begin{aligned} \bar{f}_0 = & \left[(1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right]^2 f_0 + \\ & \frac{1}{2} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)] \cdot \\ & \left[(1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right] \sum_{i=1}^4 f_i + \\ & \frac{1}{4} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)]^2 \sum_{i=5}^8 f_i + \\ & \frac{s_1 s_2}{4} \left[(1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right] \sum_{i=9}^{12} f_i + \\ & \frac{s_1 s_2}{8} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)] \sum_{i=13}^{20} f_i + \\ & \left(\frac{s_1 s_2}{4} \right)^2 \sum_{i=21}^{24} f_i \end{aligned}$$

滤波前200hPa流场上(图略),在湖南及周边均受西北气流控制。5月31日20时滤波后在湘西北出现一直径约100km的中尺度反气旋环流(图2a)。6月1日02时,反气旋环流增大并东移,在湘中形成中心。然后,开始减弱,出现东北气流向南、西南气流向北流的辐散流场。当该流场移至湘东南时,强降水结束。

就未滤波850hPa流场(图略)来看,湘西北至黔东北是一条NE—SW向切变线。

滤波后该地是一中尺度涡旋(图2b),位于200hPa反环流左下方。6月1日02时,中尺度涡旋东移减弱,在湘中偏北地区变成一尺度约300~400km中尺度辐合线。08时又加强成中尺度涡旋,产生强降雨。14时涡旋略南压,20时消失,强降雨减弱。经滤波,高层中尺度反气旋、中低层中尺度辐合线、中低压极易辨认。中低层气旋性辐合、高层反气旋辐散,导致涡旋下方湖南产生强降雨。

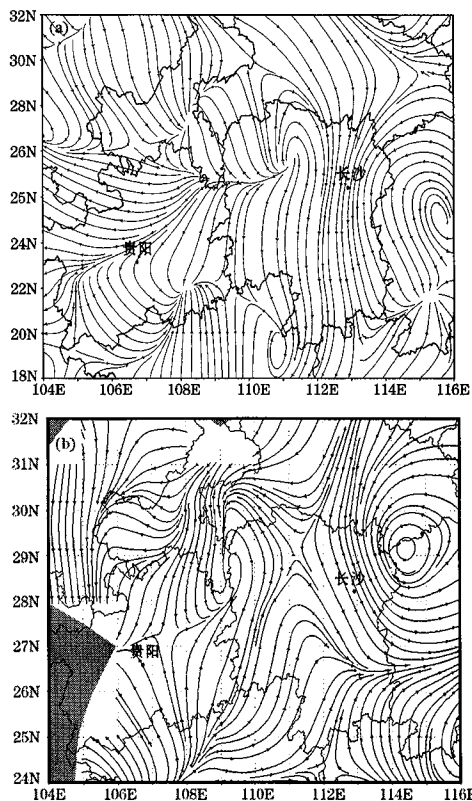


图2 2005年5月31日20时滤波后200hPa (a) 和850hPa (b) 流场

阴影区为地形高度大于1500m的区域

2.2 中尺度动力学诊断分析

从穿过湘中大暴雨区(28°N 、 112°E)经25点滤波后涡度和垂直速度时间-高度剖

面图(图 3a)可见,5月31日20时至6月1日20时,大暴雨区上空400~100hPa有一小于 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 负涡度区;正涡度区位于850hPa以下层,1日02时至2日08时,正涡度加强向中层伸展至600hPa,800hPa上中心值大于 $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。散度分布与涡度较吻合,400~100hPa层为辐散区(图略),最大值在200hPa上,700hPa以下为辐合区,高层辐散明显强于中低层辐合,表明高层辐散形成的抽吸效应,有利于加强低层辐合和对流上升运动^[3],暴雨区上空的对流上升运动区强烈发展并上移到200hPa,最大中心在500hPa上,极值小于 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3b),它们共同作用触发中尺度扰动产生和发展。

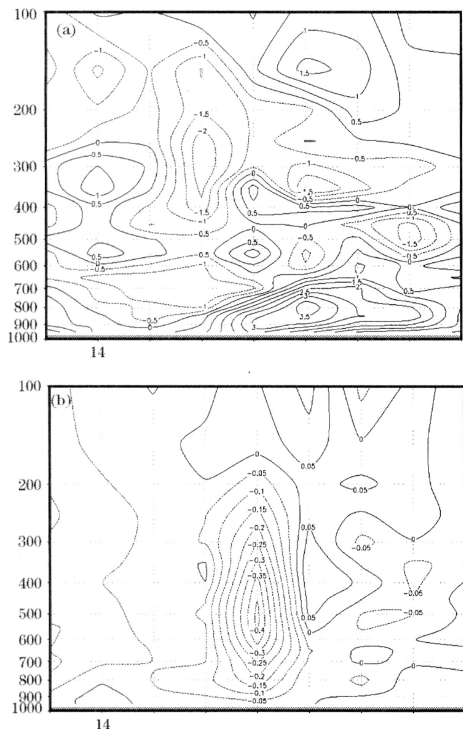


图3 2005年5月31日08时至6月2日08时滤波后沿大暴雨区(28°N 、 112°E)涡度(a,单位: 10^{-5} s^{-1}),垂直速度(b,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)时间-高度剖面图
阴影区为地形高度

2.3 水汽条件分析

水汽来源和输送与雨强密切相关。从1日02时850hPa水汽通量图可知,从中南半岛东部到南海西部经桂、黔到湘西有一条NE—SW向带状水汽通道(图4a)。其中3个中心分别位于中南半岛东北部、桂西和黔东南,中心值依次大于 $24 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 、 $20 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,揭示了南海是主要水汽源地。

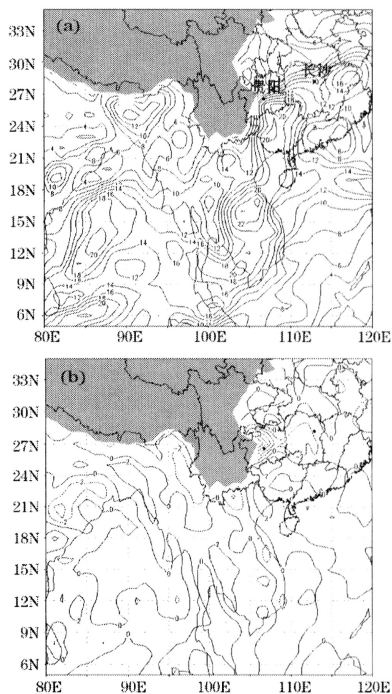


图4 2005年6月1日02时850hPa水汽通量(a,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)和水汽通量散度(b,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

阴影区为地形高度大于1500m的区域

1日02时水汽通量散度如图4b所示,大暴雨过程主要有一条水汽输送带。水汽从南海西部、中南半岛东部向东北方向经桂、

黔向湖南暴雨区上空聚集; 强辐合中心在黔, 极值小于 $-10 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$; 1 日 08 时, 水汽辐合达最强, 有两个中心分别在黔、湘, 湖南辐合中心值小于 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。表明水汽从南海西部绕副高南部和西部输至长江以南, 也反映了夏季风特征。值得一提的, 在大暴雨前一天, 湘中西部有 24 个县(市)普降暴雨, 使低层空气比湿和湿层厚度非常大。可能对大暴雨起一定的作用, 可用以解释本次大暴雨过程中低空急流不足够强却出现了特强降雨之原因。

2.4 稳定度条件分析

这次大暴雨强度大、历时短, 还伴有雷电, 属强对流性暴雨。表明大气层结极不稳定。

从暴雨区上空 θ_{e} 垂直廓线(图略)可看出, 5 月 31 日 08 时 θ_{e} 廓线呈弓形分布, 最小值 333K, 在 500hPa 上, 向上 θ_{e} 增大, 层结稳定; 向下 θ_{e} 也增大, 850hPa 为 347K, 近地层达 354K。大气中低层处于上干冷、下暖湿的不稳定层结, 且暴雨区 $\Delta\theta_{\text{e}(500 \sim 850)} < 0$, 有利于强对流的发生。14 时和 20 时, θ_{e} 廓线仍保持弓形结构^[4], 最小值下移到 550~600hPa, 与近地层的差值增大, 说明不稳定度在增大。强对流天气过后, θ_{e} 垂直分布趋于稳定。

从 CAPE 分布(图略)可见, 31 日 08 时暴雨前, 湘中 CAPE 为 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在后 12 小时内达最大, 为 $1800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此后, 大范围雷雨发生, 不稳定能量释放, CAPE 迅速减小。 θ_{e} 差值变化和 CAPE 增大变化均超前强降雨 12 小时, 对强对流性暴雨预报有指示意义。

3 大暴雨的中尺度降水系统分析

3.1 中尺度云团的特征

这次大暴雨过程共出现两个中 α 尺度和一个中 β 尺度云团。5 月 31 日 15 时在冷锋云系尾部的渝南和黔东分别生成一直径仅 10km 对流云团(以下简称 A 和 B), 渝南 A 云团移进湘西北, B 云团少动。19~22 时, 两云团迅速发展, -32°C 的冷云区水平尺度均超过 200km, 其中, A 云团最低亮温从 19 时 -60°C 降至 21 时 -80°C , B 云团则低于 -80°C , 并在湘北及黔东各发展成中 α 尺度深对流云团。23 时以后, 两云团东南行, 强度继续增强并逐渐合并(以上图略); 6 月 1 日 03 时, 在湘中北到黔中南合并成一条 NE—SW 向强对流云带。云带中有 4 个亮云核, 最低亮温自西向东依次为 -82.9°C 、 -86.5°C 、 -91.3°C 和 -87.2°C , 达最强盛阶段(图 5), 也是湘、黔强降水发生阶段。05~10 时(以下图略), 由于冷锋中段移速快, 导致对流云带在湘黔交界处断裂, 东端云带东移加强, 造成湘中大暴雨; 西端云带在黔南移减弱。12 时, 减弱云带的北端新生一约 200km 的中 β 尺度云团移进湘西南, 湘西出现大到暴雨。20 时移出湖南, 强降水过程结束。A 云团从初生、发展、强盛到消亡历经了 29 个小时, 是湖南强降雨主要影响云团。

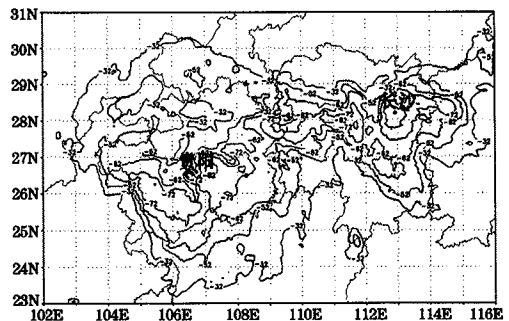


图 5 2005 年 6 月 1 日 03 时 TBB 云图(单位: $^\circ\text{C}$)

3.2 雨团活动的规律

将 1 小时降水量不小于 10mm、生命史不小于 2 小时、水平尺度在 100km 以上的雨区定义为雨团。据此得到此次大暴雨过程共 8 个雨团,集中出现在 5 月 31 日 20 时至 6 月 1 日 13 时(表 1)的 18 小时内。有 4 个相对集中,源自湘西北武陵山西侧,其它 4 个分别生成在澧水上游、雪峰山西南侧、洞庭湖西南部山区及湘东南山区,均发生在

迎风坡地形和湖谷地带。旺盛期雨团分布在麻阳盆地、洞庭湖西南部山区东侧和湘东南山区西侧。与初生源地相近,可见这些区域利于雨团发生和发展。雨团生成后在 2~4 小时达旺盛期,有 5 个雨团 1 小时最大降水量超过 30mm。它们受 500hPa 高空槽前后偏西或偏北气流引导向偏东或东南方向移动。当移至东部和南部山区减弱消亡。雨团最长生命史 15 小时,最短 3 小时,平均 7 小时。

表 1 2005 年 5 月 31 日 20 时至 6 月 1 日 20 时雨团活动特征

编号	编号		1h 最大降水量/mm			停编		移动方向	生命史/h
	时间	地点	时间	地点	强度	时间	地点		
1	3121	龙山	0100	沅陵	38.4	0106	东北部	偏东	10
2	0100	花垣	0104	溆浦	35.1	0114	东北部	东南	15
3	0101	冷水江	0106	冷水江	20.4	0108	东北部	偏东	3
4	0103	凤凰	0105	怀化	32.2	0114	中部偏东	东南	12
5	0105	新化	0107	娄底	48.8	0112	西南部	东南	8
6	0110	武冈	0112	祁阳	21.1	0113	东部	东南	4
7	0111	新晃	0113	黔阳	20.3	0114	西部	偏东	4
8	0113	宜章	0114	郴州	41.8	0115	东南部	东南	3

3.3 地面中尺度天气系统特征

经对地面加密观测资料和自动站雨量分析可知,5 月 31 日 21 时至 6 月 1 日 14 时和 6 月 1 日 03~12 时分别由 1 号、2 号以及 4 号、5 号雨团造成主要两次中尺度降雨过程雨强大,范围集中(表 1)。主要影响系统是在移行缓慢冷锋上生成发展的一条长约 300km、生命史约 15 小时的风辐合线(由沿澧水河谷南下的冷空气与雪峰山东侧的偏南气流形成)和一个直径为 200~300km、生命史约 12 小时的中尺度低压。其它 3 次中尺度降雨过程较弱。对比分析中尺度天气系统和雨团发现,大暴雨过程 8 个雨团有 6 个产生在中尺度辐合线及周围辐合区中,2 个在中低压中心附近。雨团的生成比中尺度系统滞后,无一反例。揭示了中尺度天气系

统是雨团产生的原因。

3.4 中尺度降水系统发生和发展

在中低层切变线和地面冷锋天气系统背景下,5 月 31 日 20 时,移进湘西北冷锋的前方约 150km 处生成上述中尺度辐合线。在约 300km 处湘西南生成一暖性中低压,中低压东移后逐渐减弱,相伴出现 6 号、8 号两弱雨团。以下以两次中尺度强降雨为例,分析中尺度辐合线与强对流云团、雨团发生和发展的关系。

5 月 31 日 19 时,移至湘西北的中 β 尺度 A 云团在雷达反射率因子图上(图略)表现为小块对流回波缓慢东移,21 时范围明显变大,强度增强,表明积云对流在发展。在中尺度辐合线西北侧的武陵山西北部上空,即强对流云核西北侧 TBB 线密集区

中相继产生1号、2号雨团,湘西北1小时雨量为10~15mm。6月1日00~04时,冷锋后部的冷空气沿武陵山东麓南下,东北气流加强为 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,当冷锋逼近,雪峰山东侧西南气流风速增至 $4\sim 6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,两支气流加强致使中尺度辐合线在资、沅水中下游河谷、溆浦盆地至麻阳盆地一带发展。相应A云团强烈发展成中 α 尺度深对流云团,与中 α 尺度B云团合并为一条强对流云带。在雷达回波图上显示A云团与其西南方零散对流回波合并为层积混合型块状回波,强度35~40dBz、回波顶高6~8km、垂直累积液态水含量VIL为 $5\sim 10\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,其中嵌有多个强度超过50dBz小的强回波。06:45发展成一条水平尺度达 $600\text{km}\times 200\text{km}$ NE—SW向的带状回波(图6)。

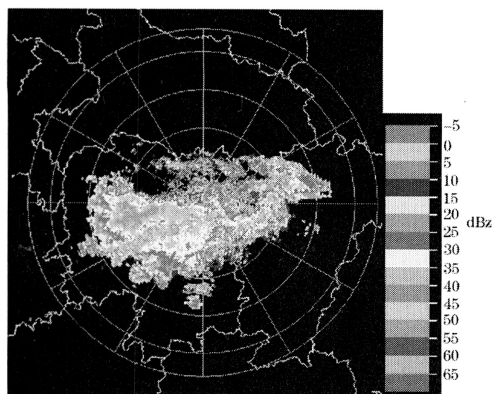


图6 2005年6月1日06:45雷达基本反射率(单位: dBz)

在径向速度图上(图略),6月1日2:28零速度线呈“S”形,表明风随高度顺转(暖平流);在雷达站以西约100km出现逆风区,对应强对流区。反映局部整层抬升或强对流区内上升气流引起水平动量交换,造成中尺度垂直环流的形成,有利于低层水汽向上输送,也有利于雨滴降落^[5]。1日01时,雷达站上空风随高度从无序变为地面南

风向上顺转到12km上为西北风,在3km以上风速随高度增大。风的垂直切变有利于强对流发展,本次过程即成强对流性暴雨过程。

伴随辐合线向偏东和东南方向移动,1号、2号雨团此时为旺盛期,造成上述区域1小时雨量有15~30mm,其中沅陵38.4mm、溆浦35.1mm。此后,这两个雨团移进东部山区后消失。03时和05时,在辐合线尾部和辐合线上,在对流云带第2个云核中心西北侧和第3个北侧产生4号、5号雨团。4号向东南方移动慢,使湘中12个小时内每小时雨量都在20~32mm。源地偏东的5号雨团东移使湘中偏南地区1小时雨量在15~25mm,但娄底出现了过程最大1小时雨量(48.8mm),是雷达回波带中一个强度55dBz、回波顶高14km、VIL 34 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的强对流单体所造成的。

随着中低层切变线和冷锋东移,中尺度辐合线亦东移减弱。从风廓线图上(图略)可看出,06:45,5km以下的风随高度仍顺转,以上逆转,表明中高层出现了冷平流,11时整层都为偏北风。湘中北降雨趋于结束。

至此,中尺度辐合线和中尺度低压对应着雨团活动,积云对流发展早于中尺度系统和雨团发展,可能是中尺度系统和雨团发展的原因之一。

4 结 论

(1) 湖南大暴雨过程是在欧亚中高纬度一槽两脊型向两槽一脊型调整中产生的,低涡切变线和冷锋是天气尺度主要影响系统,主要中尺度影响系统是中尺度辐合线、中尺度低压和中 α 尺度云团。它们共同作用造成大暴雨。

(2) 大暴雨发生在高层辐散先于中低层

辐合的抽吸效应和有利的中低层气旋性辐合、高层反气旋辐散的配置下以及 θ_e 廓线呈“弓”形分布的上干冷、下暖湿不稳定层结中。南海是水汽源地,水汽经中南半岛东部、广西、贵州输进湖南。暴雨区在高空急流入口区以南、低空急流出口区以北。

(3) 尺度分离的流场能清晰地分辨出中尺度天气系统,中尺度系统对应着雨团活动,雨团产生在中尺度辐合线上及北侧辐合区中和中低压中心附近;在强对流云核西北侧和北侧 TBB 线密集区中,积云对流发展早于中尺度系统和雨团的发展,可能是它们发展的原因之一;强降水与深对流云团和雷达回波强度强、回波顶高、VIL 大的强对流

单体密切相关。

参考文献

- 1 杨克明,张守锋,张建忠等. “0185”上海特大暴雨成因分析. 气象, 2004, 30 (3): 25~30.
- 2 齐琳琳,赵思雄. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析. 大气科学, 2004, 28 (2): 254~268.
- 3 李红莉,沈桐立,谢有才. 一次梅雨锋暴雨的模拟与诊断分析. 气象, 2005, 31 (3): 22~27.
- 4 毛冬艳,乔林,陈涛等. 2004 年 7 月 10 日北京暴雨的中尺度分析. 气象, 2005, 31 (5): 44~48.
- 5 张沛源,陈荣林. 多普勒速度图上的暴雨判据研究. 应用气象学报, 1995, 6 (3): 371~374.