

“0185”上海特大暴雨成因分析

杨克明 张守锋 张建忠 郭文华

刘 诚

(国家气象中心,北京 100081)

(国家卫星气象中心)

提 要

2001年8月5~6日上海市发生特大暴雨,其中黄浦区和徐家汇区出现了50年以来最大日雨量。利用加密卫星云图资料、上海南汇WSR-88D多普勒雷达资料和加密观测等资料对“0185”特大暴雨过程作了天气动力学诊断分析发现:本次特大暴雨是中- β 尺度系统强烈发展引起的;初步揭示了深厚的湿中性层结和对称不稳定是导致中- β 尺度系统发展的激发机制,是特大暴雨形成的主要因素。

关键词: 中- β 尺度系统 湿中性层结 对称不稳定 云顶亮温

引 言

2001年8月5日傍晚至6日晨,上海市普降大暴雨,市区出现特大暴雨。降雨量普遍在100~170mm,黄浦区 and 徐家汇区5日8时至6日8时24小时雨量分别达294mm和275mm,是50年以来最大的日雨量。这次降雨突发性强、雨势猛、强度大、大暴雨集中,是历史同期罕见的极强暴雨过程。

造成这次强降雨过程的直接影响系统是来自台湾以东洋面上的热带低压。与暴雨直接联系的主要是中、小尺度的天气系统,国内外过去对这种中、小尺度系统的特征研究较少。另外,对于这次强暴雨过程无论是数值

预报,还是主观综合预报均归失效,其原因是疏忽了中纬度长波调整引起西太平洋副高突然减弱南退,促使北上的热带低压折向东移至上海,激发中尺度系统发生发展,酿成这场致洪暴雨。有人已对这次特大暴雨过程的环流特征和天气学条件作了较深入的分析^[1~4],本文利用上海市气象台加密观测资料和WSR-88D多普勒雷达探测资料、GMS-5静止卫星红外云图等资料,着重分析该突发性强暴雨的中尺度天气系统活动及条件性对称不稳定的作用,以探讨中尺度暴雨的生成规律,并从而做好它的预报。

1 环流形势调整和热带低压东折

8月初,东亚中低纬为两脊一槽的经向环流型。大陆高压位于蒙古国东部到我国西北和西南两地区东部,大陆高压以东至我国东部沿海是一个深厚的低槽区,其下游是较强的副高盘踞在 25°N 以北到日本海一带,副高南侧是赤道辐合区,在该区中影响天气系统起源于7月31日关岛附近的热带云团,它以蛇形路径向NNW方向移动,8月3日晚穿过台湾,4日晨在浙闽交界处登陆后向NNW方向移动,5日凌晨在皖南突然折向偏东方向移动,途经上海市,6日晨从长江口转向东北方向移去。

热带低压路径的突变与8月2~5日欧亚环流形势调整密切相关。起初,欧洲槽不断往南加深,致使西西伯利亚高压脊经向发展并东移,替代了原先大陆高压后部位于新疆的长波槽。该槽东移促使我国东部低槽北缩减弱,副高西伸增强。3日500hPa上588线覆盖了我国大部地区,位于日本九洲的副高中心达5990gpm,上海5960gpm。5日,副高突然减弱南退,上海24小时的高度下降80gpm,副高在华东地区发生断裂。副高这一突然变化导致热带低压东折移向上海,并造成上海特大暴雨。为什么如此强大的副高短时之间会减弱南退,导致最初预报失误呢?初步分析其原因如下。

1.1 300hPa华北强西风槽东移

8月3~4日,当东部低槽北缩到达华北时,在300hPa上,该槽较为强盛并发生明显变化,槽后强东北风转成西北风,并导致原先自华北至云南狭长的槽区在豫西发生断裂,而且华北西风槽已具有辐散槽的特征,有利于此槽向东南方向移动,5日此槽加速移到黄海,使槽前强副高迅速减弱南退(图略)。值得注意的是该华北西风槽在500hPa及以下层反映却很弱,仅是个很不起眼的短波小槽,单从500hPa以下层看难以作出正确判断。因此,有关西风槽与副高的相互作用预测,不仅要注意中空流场,而且还要重视高空流场的特征。

1.2 热带低压对副高的减弱作用

“0185”热带低压于4日晨登陆浙闽交界区后,深入内陆,虽然地面气旋性环流较弱,

但中空均显示热带低压闭合的气旋性环流,其气旋性环流较深厚。显然,与热带低压相接触的副高部位,受深厚的气旋性环流影响而减弱。然而,一个庞大的副高主体在5日突然出现减弱和南退,很难全部归结于这个热带低压的冲击。

2 特大暴雨的成因分析

2.1 流场的尺度分离

为了更清晰地显示导致特大暴雨的中- β 尺度影响系统,采用低通滤波。对任何一个气象要素 f 可以看成是由大尺度部分 $\bar{f}$ 和扰动部分 f' 的合成,即:

$$f = \bar{f} + f'$$

在这里采用的是25点低通滤波算子:

$$\begin{aligned} \bar{f}_0 = & \left[(1 - S_1)(1 - S_2) - \frac{S_1 S_2}{2} \right]^2 f_0 + \\ & \frac{1}{2} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)] \\ & \left[(1 - S_1)(1 - S_2) + \frac{S_1 S_2}{2} \right] \sum_{i=1}^4 f_i + \\ & \frac{1}{4} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)]^2 \sum_{i=5}^8 f_i + \\ & \frac{S_1 S_2}{4} \left[(1 - S_1)(1 - S_2) + \frac{S_1 S_2}{2} \right] \sum_{i=9}^{12} f_i \\ & + \frac{S_1 S_2}{8} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)] \sum_{i=13}^{20} f_i \\ & + \left(\frac{S_1 S_2}{4} \right)^2 \sum_{i=21}^{24} f_i \end{aligned}$$

其中, i 为格点坐标。资料采用T213分析场,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。一次同时滤去2倍和3倍格距的两个波动分量,经滤波后保留了原始气象场中- β 尺度波动。

从大尺度环境流场可看出(图略),在对流层低层925hPa到高层300hPa上,长江中下游以南地区主要被上千公里的大陆反气旋控制,其北部到高纬地区有一个深厚的天气尺度冷涡;从冷涡中不断有冷空气向南侵入。在500hPa以下层,尺度约为500km的主要影响系统热带低压位于冷涡的东南方,即大陆反气旋环流的东北侧。经尺度分离后的8月5日20时700hPa和300hPa的中尺度流场特征如图1所示,在700hPa上(图1a),中尺度热带低压水平尺度约为160km,

并且气旋性环流较之未滤波前更清楚一些,对应 300hPa 上(图 1b),中尺度流场则是一个反气旋环流,中尺度热带低压系统正好位于它的东南侧较强的东北辐散气流中,这种

中低层气旋性辐合,高层反气旋辐散的叠置有利于对流层中低层上升运动的发展,从而导致低压下方上海出现强降雨。

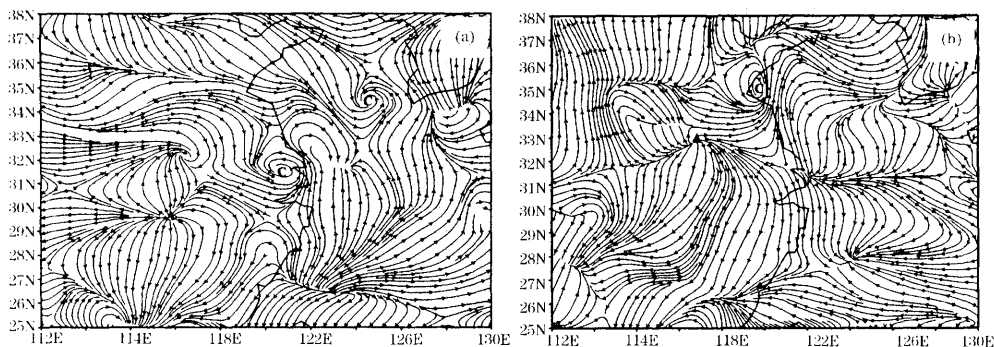


图1 2001年8月5日20时尺度分离后700hPa(a)和300hPa(b)的中尺度流场

2.2 水汽条件的分析

在这次特大暴雨过程中,江南东部出现NE—SW向强的水汽通量,与南海至台湾省东南方大值区相通,并同东环副高西侧和西南侧低空西南急流及东南气流对应,表明水汽主要来源于南海和台湾东南部洋面。强暴雨发生发展过程中,上海整层水汽通量有一个增大过程,尤以500hPa以下层为大,强降雨出现的5日20时,1000hPa的水汽通量是 $9.9\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,850hPa为 $9.1\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,700hPa为 $6.3\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,500hPa为 $2.2\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,各层比值为4.5:4.1:2.8:1。说明水汽主要分布在中低层。从1000hPa水汽通量散度分布图(图2)上可知,这次强降雨过程有两条主要水汽通量辐合通道,一条从南海向东北方经华南东部沿海往北到沪宁杭地区;另一条从台湾东南部洋面向西北方经闽、浙向沪输送。另外,从水汽通量散度时空剖面图上(图略)可以看到,在强降雨产生前10小时左右,上海800hPa以下层水汽开始聚集,到5日20时,水汽通量辐合值明显减小,而后又增大,6日08时辐合值最大的1000hPa处达 $-34\times 10^{-8}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$,随后递减。与降雨集中时段、降雨量大的5日18~20时、22时至6日凌晨1时、6日6~8时相吻合,可能对降雨有预报指示意义。

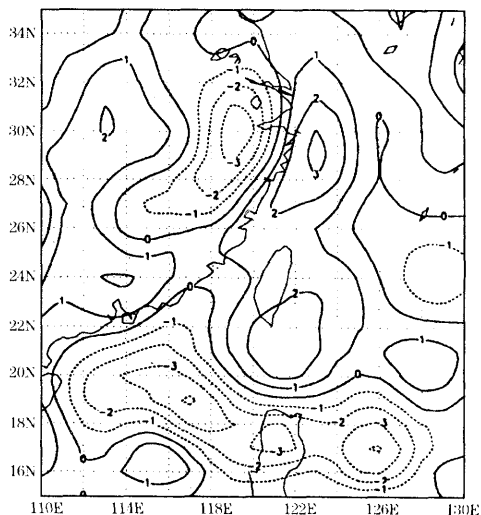


图2 2001年8月5日08时1000hPa水汽通量散度分布图

单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$

2.3 大气层结和中尺度不稳定的分析

在大气层结和中尺度扰动不稳定性的分析中,既直观又易于掌握的是假相当位温 θ_w 和绝对动量($M = v + fx$)的剖面分析,即计算并绘制剖面上全场的 θ_w 和 M 等值线, θ_w 与等 M 线平行处为中尺度对称不稳定区。

如果高空有等 M 线与 θ_w 线大致平行的区域,该区至少是对称中性区,下层有辐合强迫,这样低层的抬升气流当到达平行区后就会毫无阻力(斜)上升,这支高湿的(斜)上升

气流使倾斜对流发生和发展,导致强降水系统的发生和发展。

图 3a 是 8 月 5 日 20 时沿 15°N 、 99°E 至 65°N 、 160°E 通过上海 NE—SW 向的 M 及 θ_w 剖面图。从图中可得出如下结果。

2.3.1 深厚的湿中性层结

由图中 θ_w 分布可知,850hPa 以下层为位势稳定层结,850~700hPa 层为位势不稳定层结,700~400hPa 之间, $\frac{\partial \theta_w}{\partial z} \approx 0$, θ_w 线的走向呈直立状态,为湿中性层结,在上海 ($31^{\circ}14'\text{N}$) 及其附近地区 θ_w 线分布特征形似流体力学鞍形场。暴雨区发生在鞍形场中心部位,离开鞍形场中心,降雨就减弱,说明 θ_w 的鞍形场分布的形成过程,伴随着暴雨过程的发展。鞍形场分布特征构成了一个深厚的 θ_w 等值区,这是一个湿垂直运动的中性运动区。

2.3.2 对称不稳定

对直立湿垂直运动来说,是 θ_w 线的走向

在垂直剖面中呈直立状态,而对于斜升湿空气来说,是气流沿着 θ_w 等值线与绝对动量 M 等值线相平行处运动。图 3b 是 8 月 5 日 20 时与图 3a 相同剖面的流场分析图,在图中一支倾斜上升气流位于上海及其附近地区上空直达 400hPa,与图 3a θ_w 鞍形场相配合。因此,对称不稳定主要出现在 M 线与 θ_w 线交角较小或接近平行处。在 700~400hPa 这一深厚的大气层中具有对称不稳定性,只要空气具有初始上升运动,即可得到对称不稳定性所给予的斜升动力。当低空出现强迫的辐合上升运动,并冲过低空暖盖后,便启动了对称不稳定能量,加速斜升运动。这个低空强迫的外力就是热带低压。

基于 θ_w 和对称不稳定的分析,热带低压穿越上海时,深厚的垂直运动被激发,又有源源不断的水汽供应,再配合其它有利条件,如低空急流、低空辐合高层辐散,导致上海特大暴雨的产生并非偶然。不少地区出现的特大暴雨也都有类似的激发机制^[1]。

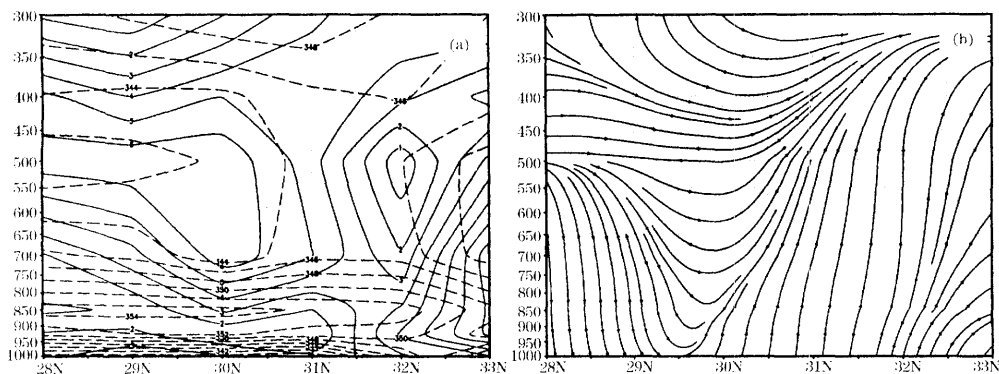


图 3 2001 年 8 月 5 日 20 时沿 15°N 、 99°E 至 65°N 、 160°E M 、 θ_w (a) 和流场 (b) 垂直剖面图

图 a 中实线为 M 线,虚线为 θ_w 线

3 中- β 尺度系统的发生和发展

逐时的云图、雨量、多普勒雷达回波等资料的综合分析表明,上海特大暴雨与中- β 强对流云团和降雨强度在 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 或以上中尺度雨团发生发展密切相关。另外,径向风场资料和 VWP 资料显示了强降雨过程的水平风场结构特征和不同高度上风向风速的逐时变化特征,结合常规观测资料,主要分析结果如下。

3.1 中- β 强对流云团和雨团

分析红外云图资料,以 -63°C 亮温表征对流云区的特征线,并分析了其中 -71°C 、 -75°C 、 -81°C 云顶亮温核的演变(图 4),显然,在 5 日傍晚至 6 日晨的特大暴雨过程中分别包含以下三次中- β 强对流云团和雨团强烈发展过程。

5 日 17 时,在浙江至杭州湾一带生成一个中- β 云团,云顶最低温度为 -71°C 。它生成在减弱的“桃芝”台风低压东侧的螺旋云带中,在强对流云核北侧 TBB 线密集区中相继

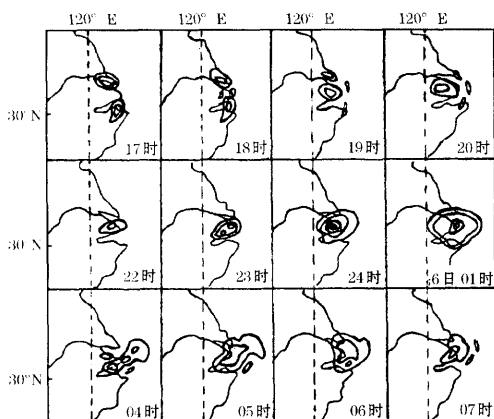


图4 2001年8月5日17时至6日8时GMS云图上上海地区中尺度对流云团TBB $<63^{\circ}\text{C}$ 云区演变特征(等值线由外向内依次为 -63°C 、 -71°C 、 -75°C 、 -81°C)

生成了两个雨团,云团和雨团在环流场西南气流的引导下向偏北方向移动,进入上海市;与之对应在上海市区西北部和西南方各有一块回波强度为50dBZ、45dBZ的对流云回波,起初回波尺度很小,呈细胞状结构,而后迅速发展。19时云团与上海地区弱的云系合并,两块回波也合并,强度增到55~60dBZ。20时强对流云团迅速发展,云团边界光滑整齐, -71°C 的冷云面积增大,对流活动增强。主要影响上海西部和南部,局地强降雨,雨量为 $10\sim 17\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。21时对流云团减弱,生命史仅2小时的两个雨团也消失。

5日22时至6日1时,中- β 强对流云团发展最强、范围最大、持续时间最长。这是热带低压缓慢东移途径上海,由热带低压本体及其螺旋云带所导致的一次最强的降雨过程。22~23时,位于上海地区的中- β 云团突然就地加强,出现两个 -75°C 的亮云核(图4),一个位于上海市,另一个位于上海西南部至浙北交界处。市区的亮云核南缘产生了最强的雨团,亮云核稳定少动,强降雨团也静止少动。24时两个冷云核合并,云区增大,云型变圆,云顶最低温度降至 -80°C 以下。对流得到最强的发展,中- β 对流云团成为一强大的中- β 尺度对流系统。22~23时雷达回波资料显示(图5),热带低压东侧螺旋雨带上的上海市区有对流回波单体发展,22时22

分与其西南方块状回波合并成强度为50dBZ的短带回波;在金山西南方有一条对流回波带向东北方向移动,23时36分与市区短带回波连接,形成强度达50~55dBZ的“人”字型强回波,之后又演变成涡旋状强回波带;6日00时17分又显现出三条回波带汇合在一起,与上述中- α 强对流云团、中- β 尺度强降雨团相对应的是特大暴雨过程。1小时最大降雨量达57mm。6日1时以后,随着热带低压东移入海,位于上海的强对流云团、生命史长达5个小时的雨团明显减弱。

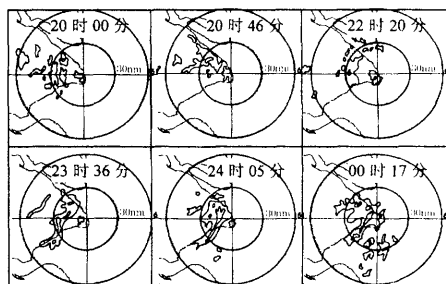


图5 2002年8月5日20时00分至6日00时17分雷达回波强度演变图(等值线由外向内为40dBZ和50dBZ)

6日4~7时,从长江口至杭州湾一带出现中- β 强对流云带,云带中多个 -71°C 的云核相互合并加强,面积扩大,并形成逗点状云团。最后一个雨团产生在该云带西北端云顶温度最低处。云带西部有一中尺度的黑色下沉区,表明有冷空气侵入,对流得到进一步剧烈发展。强降雨主要在上海市区和浦东新区,雨强达 $59\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。浦东孙桥还出现了龙卷风。从雷达回波和径向风场资料分析表明,6日凌晨热带低压入海后,其后部位于昆山至上海一带生成并维持一条近东西向的中尺度辐合线,北侧为偏西风,南侧为偏南风,在辐合线上形成中尺度雨带,源于昆山不断生成的回波单体在东移过程中发展加强,并与移进上海市区的回波合并,强度增到55dBZ,导致第三次强降雨的出现。

3.2 VWP的分析

对流云或雷暴是由低空中尺度切变线或辐合线触发生成的,尤其是当中尺度切变线上的辐合较强或有中尺度气旋性涡旋生成时,对流的发展最快^[6]。由VWP反映的风

场可看出(图略),5日下午到6日0时,近地面层存在一支稳定、风速为 $4\sim 8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南气流;600m以上盛行一支南风,中低层风速较大达 $8\sim 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,高层 $6\sim 8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。5日20时开始中低层偏西风分量加强,风向随高度顺时针旋转,并逐渐转成西南风,风速加大到 $10\sim 14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明上海处在热带低压环流前部或之中,中低层暖平流显著而稳定,热带低压前部暖区中东南风和西南风之间的暖性辐合线和热带低压环流致使西风和南风的产生辐合抬升,有利于对流的发展。但风的垂直切变较弱,产生强降雨。

从19时31分起,12km高层开始出现一支西北气流,该高度以下仍是一致的西南气流,西北气流并逐渐向中低层伸展,使得中低层中尺度辐合线演变成一条明显风的切变线。到6日6时6分,2700m以上层均被西北风所控制,风速达 $8\sim 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,低层为西南风,风速也为 $8\sim 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。垂直风切变比上述时段两次降雨过程显著加强,辐合也加强,并形成上干冷下暖湿不稳定结构,上海处于热带低压后部,西北风和西南风的冷切变线触发上海产生局地强风暴(龙卷风),龙卷风出现在西北和西南气流切变处。

4 结 语

(1)“0185”上海特大暴雨的主要影响天气系统是热带低压;强副高的突然减弱南退是强降雨产生的主要外部条件;中纬度长波

发生调整,位于对流层上部的西风槽及热带低压对副高的减弱起关键作用。

(2)强烈的辐合上升运动,充沛的水汽和大气层结不稳定是特大暴雨形成的基本物理条件,对称不稳定和深厚的湿中性层结是激发这次特大暴雨的主要机制。

(3)经流场滤波分析的中尺度低压尺度更小,强度更强。这次特大暴雨与中- β 尺度强对流云团和雨团生消、合并和强烈发展、不同尺度、不同性质的系统相互作用密切相关。

(4)强降雨是热带低压外围螺旋雨带上的对流回波局地发展和合并加强、中低层有强暖平流、偏西风与偏南风辐合抬升造成的;较强的风垂直切变产生龙卷风,龙卷风发生在西北和西南气流的切变线处。

参考文献

- 1 陈永林.上海“0185”特大暴雨 MCS 形成条件分析.气象,28(1):30~33.
- 2 曹晓岗.“0185”特大暴雨的诊断分析.气象,28(1):21~25.
- 3 姚祖庆.上海特大暴雨过程天气形势分析.气象,28(1):26~29.
- 4 梁漆波.特大暴雨非常规资料的初步分析.气象,28(1):34~38.
- 5 许焕斌,丁正平.湿中性垂直运动条件和中- β 系统的形成.气象学报,1994,55(3):602~610.
- 6 Rodger A. Brown Vincent T. Wood. 王慕维译.作为强风暴预报指标的单体多普勒雷达速度标志.下一代天气雷达.气象科学研究院,1985;6~31;32~40.

Analysis of “0185” Heavy Rain in Shanghai

Yang Keming Zhang shoufeng Zhang Jianzhong Guo Wenhua

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Liu Cheng

(National Satellite Meteorological Center)

Abstract

A process of heavy rain occurred in Shanghai on 5 and 6 August, 2001, the daily rainfall in the Huangpu and Xujiahui broke the record of last 50 years. Based on the densified satellite images, data of Doppler radar from Nanhui, Shanghai, the densified observation, and a dynamic diagnostic analysis of the event is documented. The result shows that it was the development of meso β -scale system that caused the heavy rain. And the deep humid neutral stratification and the symmetric instability, which act as the activator in the development of meso β -scale system, play an important role in the formation of the event.

Key Words: meso β -scale system humid neutral stratification symmetric instability brightness temperature of cloud top