

2003年7月3日梅雨锋切变线上的 β -中尺度暴雨云团分析*

方宗义¹⁾ 项续康¹⁾ 方翔¹⁾²⁾ 李小龙¹⁾

1) (国家卫星气象中心,北京 100081)

2) (北京大学物理学院,北京 100871)

摘要

利用多种气象卫星遥感资料及加工产品,对2003年7月3日产生在皖北的暴雨过程进行了中尺度分析。分析表明:在切变线云带上共有11个 β -中尺度对流云团发展,水平范围约100 km,生命史约5 h;其背景场是整个对流云区内具有高湿、正涡度和上升运动的特征,它们促使切变线内高湿斜压不稳定能量释放,促使 β -中尺度云团发展,产生很强的降水,云团的水凝物廓线上部的可降水冰和云冰含量很高,最大值达0.8 g/kg,最大高度达18 km,云顶亮温低于-80℃。

关键词: β -中尺度云团 切变线 低涡

引言

2003年7月3日在河南项城到安徽东部的灵璧、泗县一线形成一条东西向的云雨带。大部分地区为大暴雨,其中,太和县雨量为249.3 mm,接近特大暴雨(图略)。其形势特征与丁一汇等对1991年江淮暴雨的分析相类似^[1]:中纬度短波槽沿35°~45°N东移(图略),华北低槽与河南、江苏和安徽交界处的低涡形成北槽南涡形势。切变线南侧的西南风速达22 m/s,有大范围暖湿空气供应,在切变线南侧,700 hPa低涡附近有许多 β -中尺度云团发展。

1 β -中尺度对流云团的活动与演变

对7月3~4日的逐时卫星云图进行动画显示和仔细分析表明,如Fang^[2]和项续康等^[3]所指出的那样,在这段时间内,在准东西向的梅雨锋切变线云系中,在皖北生成了多个比Moddcox所提出的MCC尺度^[4]小的 β -中尺度云团。仅在安徽北部的32.5°~33.5°N范围内就生成了11个 β -中尺度云团,如彩图1中3和4号中尺度云团。表1给出了这11个 β -中尺度云团的一般特征,可以概括为:(1)所有 β -中尺度云团产生的地点均在32.5°~33.5°N,114.8°~116.5°E范围内,其中第7号中尺度云团生成在第6号中尺度云团的东侧,所以,7号云团生成位置最偏东。云团生成区域与大于150 mm的降雨区基本一致;(2)从生命史、云团范围分析,这11个云团基本上均为 β -中尺度云团,只有第5号云团生命史稍长一些;(3)上述云团均产生在700 hPa低涡生成和东移过程中,以相对于低涡的

* 国家基础研究项目基金“我国华南致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”(2004CB418305)资助。

2004-04-02 收到,2005-03-10 收到再改稿。

位置为标准,可以将其分为3类:第1类是低涡生成过程中产生的云团,第1~4号云团属于此类,是标准的 β 中尺度云团,生成地区在 $33.0^{\circ} \sim 33.3^{\circ} \text{N}, 115.3^{\circ} \sim 116.1^{\circ} \text{E}$,正是最大降水区,第2类云团是在低涡的东南侧生成的云团,第5~8号云团属于此类,其中第5号云团最强,此类云团垂直发展较强,第5和6号云团最低亮温小于 -80°C ,生命史也较长,第3类云团是低槽东移后,产生在低涡西南侧的云团。

表1 2003年7月3日00:00~23:00(世界时,下同),江淮地区 β 中尺度云团活动一览表

序号	产生时间	产生地点	最低亮温 / $^{\circ} \text{C}$	消失时间	最后位置	历时/h
1	00:00	$33.0^{\circ} \text{N}, 115.6^{\circ} \text{E}$	-61	04:00	$32.6^{\circ} \text{N}, 117.6^{\circ} \text{E}$	4
2	00:00	$33.0^{\circ} \text{N}, 116.2^{\circ} \text{E}$	-59	04:00	$33.6^{\circ} \text{N}, 117.6^{\circ} \text{E}$	4
3	04:00	$33.2^{\circ} \text{N}, 115.3^{\circ} \text{E}$	-59	08:00	$33.4^{\circ} \text{N}, 117.6^{\circ} \text{E}$	4
4	04:00	$33.3^{\circ} \text{N}, 116.1^{\circ} \text{E}$	-60	08:00	$32.8^{\circ} \text{N}, 117.9^{\circ} \text{E}$	4
5	08:00	$33.0^{\circ} \text{N}, 115.2^{\circ} \text{E}$	-85	16:00	移至江苏	8
6	09:00	$33.4^{\circ} \text{N}, 116.1^{\circ} \text{E}$	-86	14:00	移至江苏	5
7	09:00	$33.3^{\circ} \text{N}, 116.5^{\circ} \text{E}$	-59	12:00	移至江苏	3
8	14:00	$33.4^{\circ} \text{N}, 114.8^{\circ} \text{E}$	-62	18:00	移至江苏	4
9	18:00	$33.4^{\circ} \text{N}, 116.2^{\circ} \text{E}$	-57	21:00	移至江苏	3
10	20:00	$33.5^{\circ} \text{N}, 116.2^{\circ} \text{E}$	-59	23:00	移至江苏	3
11	20:00	$33.3^{\circ} \text{N}, 115.7^{\circ} \text{E}$	-64	23:00	移至江苏	3

2 β 中尺度云团发展过程的诊断分析

2.1 大尺度环流背景

彩图2是2003年7月3日00:00由NCEP/NCAR再分析资料制作的700 hPa和200 hPa相对湿度流场、涡度场及散度场图。彩图2a表明,梅雨锋云带位于两种不同性质气流交汇区的偏西南气流一侧。相对湿度大于80%的高湿带由西南伸向梅雨区,相对湿度在90%以上的饱和带与切变线云带重合。切变线北侧的偏北气流区与相对湿度小于30%的干区一致。梅雨锋云带位于湿度梯度最大区及其南侧。彩图2b则表明,沿切变线是一条正涡度带,与副热带高压和中纬度反气旋相对应的负涡度区分布在它的南北两侧,表1中的 β 中尺度云团均发生于湿度梯度最大的高湿区一侧和涡度值 $(8 \sim 10) \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 正涡度中心的东端,相当于暖性切变线区。彩图2c和2d则是同时刻的200 hPa流场、等风速线图和散度图。在彩图2c上,200 hPa反气旋中心位于两湖地区上空,高空急流位于华北—西北。在图彩2d的200 hPa高空散度图上一个大于 $4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐散带穿过苏北、皖北至豫东南一线。其中,大于 $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐散中心位于皖西北,中尺度云团恰好活动于低空正涡度带与高空辐散中心相叠加的地区。

2.2 环境大气的垂直结构

为了弄清 β 中尺度云团活动的大气的垂直结构,利用NCEP/NCAR再分析资料,制作了2003年7月3日00:00通过 116°E 的经向垂直剖面图(图3)。图3a是相对湿度垂直剖面图, β 中尺度云团强烈发展的地区($33^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E}$)是一个整层相对湿度大于90%的湿区。在对流层中部,在它的南面和北面200 km处均为相对湿度小于10%的干区,300

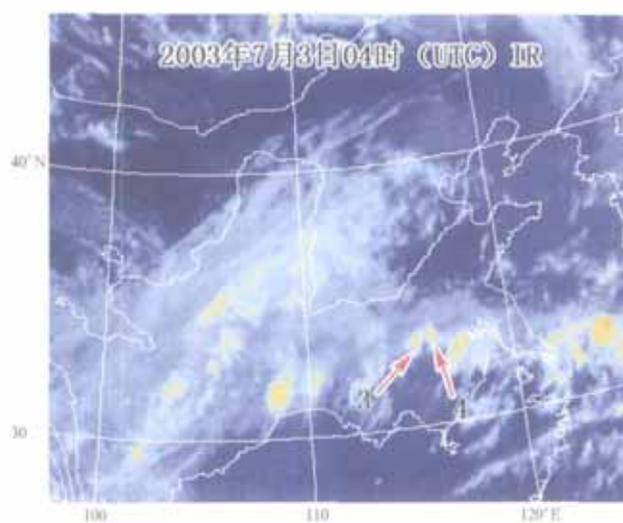


图1 2003年7月3日04:00红外云图

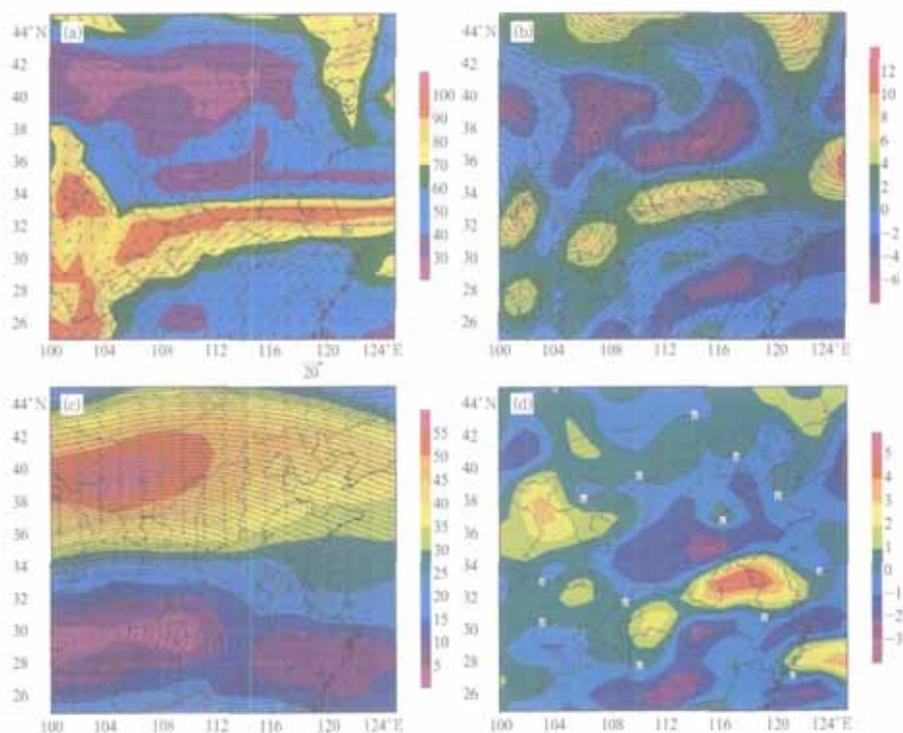


图2 2003年7月3日00:00 700 hPa和200 hPa的分析图

- (a) 700 hPa矢量场(单位, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和相对湿度场(单位, %), (b) 700 hPa流场和散度场(单位, 10^{-5} s^{-1}),
 (c) 200 hPa流场和等风速线(单位, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 200 hPa散度场(单位, 10^{-5} s^{-1})

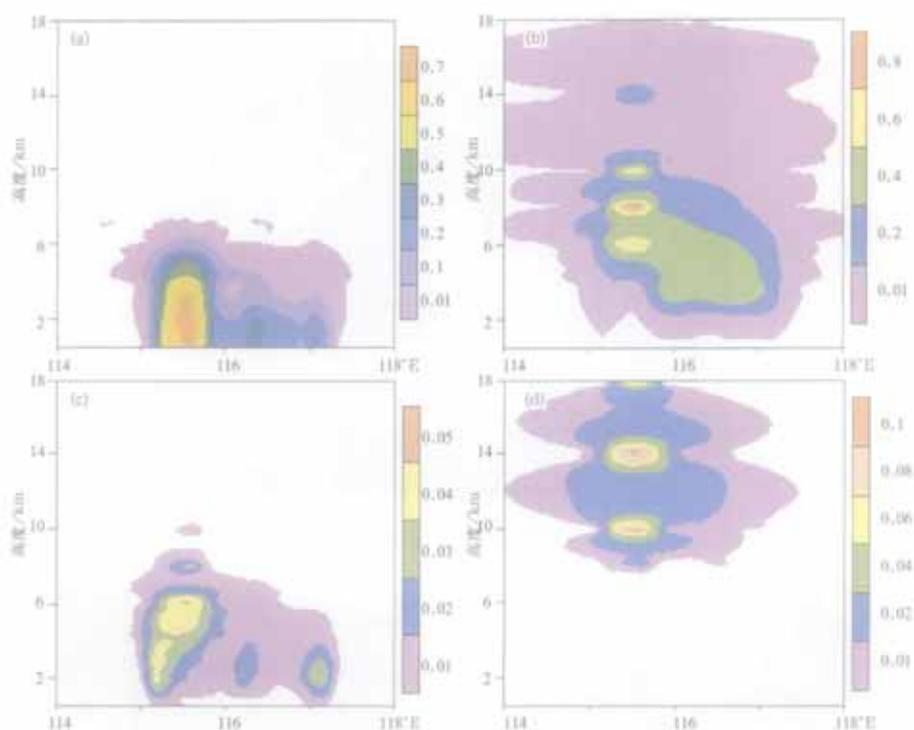


图4 由2003年7月3日01:00的TRMM卫星TMI资料处理得到的沿33.1°N的纬向水凝物垂直剖面图(单位: g/kg)
(a) 可降雨水, (b) 可降水冰, (c) 水云, (d) 冰云

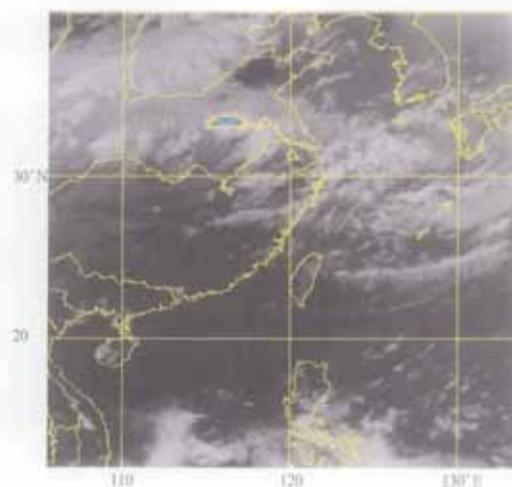


图5 2003年7月3日05:22 AMSU-B 150 GHz 低亮温区与静止气象卫星红外云图的叠加显示图

~ 400 hPa 向北伸出的高湿区 ($> 90\%$) 则与卷云羽相对应。图 3b 是绝对涡度垂直剖面图, 与 β 中尺度云团相对应的是涡度大值中心区, 且随高度向北倾斜, 在 700 hPa 高度处, 在 $34^\circ\text{N}, 116^\circ\text{E}$ 处达到最大值 ($16 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)。图 3c 是垂直速度剖面图, β 中尺度云团区是整层上升运动区, 在对流层中部的 500 ~ 400 hPa 高度, 垂直速度达到最大值, $0.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

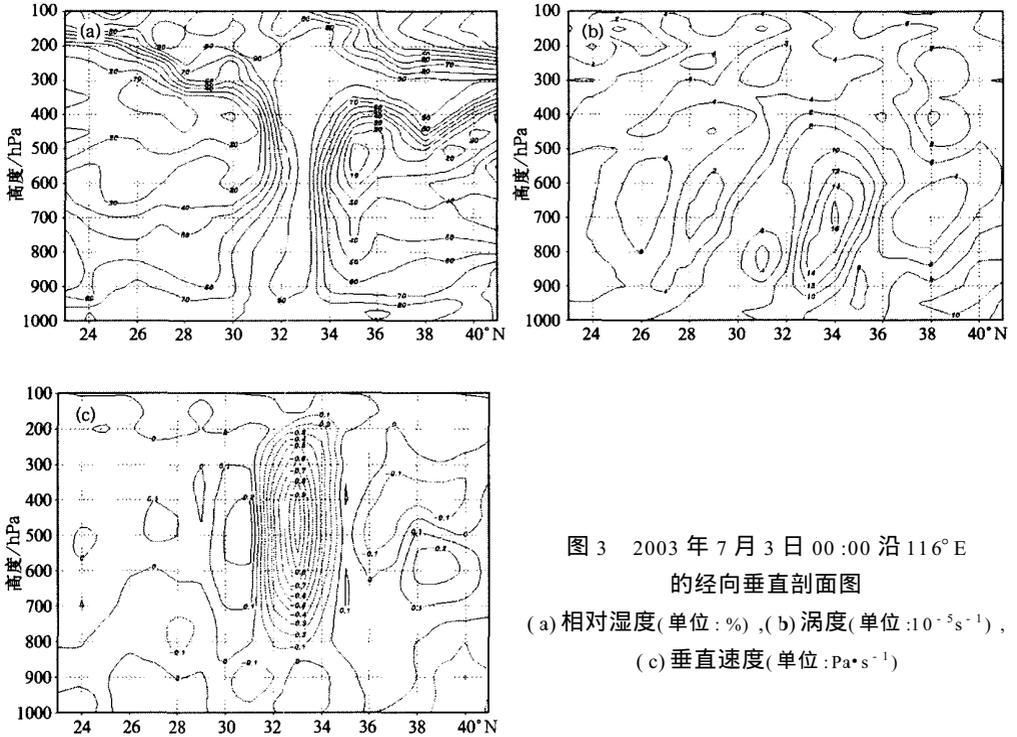


图 3 2003 年 7 月 3 日 00:00 沿 116°E 的经向垂直剖面图
(a) 相对湿度(单位: %), (b) 涡度(单位: 10^{-5}s^{-1}),
(c) 垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.3 云物理特征

为了揭示 β 中尺度云团内部的云物理特征, 选取了 2003 年 7 月 3 日 01:00 和 02:37 的 TRMM 卫星通过云团的微波成像仪 (TMI) 探测资料, 用 GPROF 软件^[5] 处理出这两条轨道云的水凝物垂直分布^[6], 彩图 4 是 01:00 沿 33.1°N 水凝物纬向垂直剖面图。旺盛的对流云区主要分布在 $115^\circ \sim 117^\circ\text{E}$ 范围内, 最旺盛的对流、水凝物中心在 115.5°E 。雨水分布在地面至 6 km 高度范围内, 最大含水量达 0.7 g/kg 以上。可降水冰位于 2 ~ 18 km 范围内, 8 km 处有浓度达 0.8 g/kg 以上的冰水中心。水云分布在地面至 9 km 范围内, 冰云则在 9 ~ 18 km 处。其中水云还表现出多对流柱结构, 在 117.2°E 处有一新的仅由水云组成的中尺度对流系统, 并且还在发展。

使用 2003 年 7 月 3 日 02:37 的 TMI 探测资料, 制作出沿 33.1°N 的纬向水凝物的垂直剖面图(图略)。对比分析可以看到, 原位于 115.5°E 的 β 中尺度对流中心已东移至 116.1°E , 117.2°E 的对流中心东移至 118°E , 没有太大的发展, 仅在低于 6 km 的云水上有所反映。但在 114.2°E , 一个新的 β 中尺度对流中心正在形成, 并在低层的雨水、水云和中高层的可降水冰和冰云上均有所表现, 预示着一个新的 β 中尺度对流云团即将形成。

2.4 AMSU-B微波资料分析

AMSU-B有5个通道,其中,89 GHz和150 GHz资料对云系中的水滴和冰晶粒子非常敏感,利用其可以有效地从对流云区中区分出强降水区。一般而言,150 GHz亮温的降温幅度较89 GHz大,若在红外卫星云图上叠加上AMSU-B 150 GHz通道的亮温,其中低微波亮温区与云顶TBB最低的区域相对应,那里正是降雨率最大的区域。彩图5是7月3日05:22的AMSU-B 150 GHz亮温与静止气象卫星云图叠加的图像。

在图上,淮河中游的低微波亮温区,正是梅雨锋切变线云带上的 β 中尺度云团区,也是在彩图4中用TMI制作的水凝物垂直廓线分布区。云团上部大量的可降水冰和冰云的存在,其对150GHz的强散射效应,导致了这里的低微波亮温。

综合以上分析,这些云团处于高湿、正涡度平流和强上升运动区内,且有强西南暖湿平流不间断的支持,产生了大暴雨。其中,位于 $115^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$ 范围内的所有站降水量均在150 mm以上,最大为249.3 mm,最大1小时降水量:临泉站为34 mm,固镇为33 mm(太和在雨最强的03:00~10:00每小时降水量缺测)。

这11个云团所产生的降水量是不均衡的:①前述第一、二类云团产生降水较大,它们都是产生在低涡的东南侧。②其中,第1、3、5号和6号云团更大些,第1、2号云团和第3、4号云团是同时产生的。但1、3号云团位于西侧,靠近最大辐合点,降水量要大些,而2、4号云团位于东侧,降水量较小。③第5、6号云团产生后17:00~18:00,最低云顶亮温为 $-86 \sim -85^{\circ} \text{C}$,云团维持的时间长,且降水量要多些,1小时最大降水量为34 mm和33 mm。

此次为切变线低涡暴雨过程,形势稳定少变,尤其3日白天的12h(00:00~12:00)低涡在原地加强,位置少变,有多个强 β 中尺度云团经过,使得白天12h降水量占日降水量的2/3以上。例如,太和白天降水量为171 mm,约占总降水量69%;利辛为135 mm,约占83%。

3 小结

通过利用多种资料对2003年淮河流域暴雨天气过程的分析,得到以下结果:

(1) 2003年7月3日的降水属典型的梅雨锋降水,切变线位于 $32^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 之间, 35°N 以北有短波槽东移,使切变线加强,同时副热带高压加强,印度季风和低空急流维持并加强,在 $32^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 纬度的露点锋异常明显。

(2) 在上述天气尺度系统环流条件下,沿切变云带有11个尺度约100 km,生命史约为5 h的 β 中尺度对流云团发展,它们大多生消于 $32^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$, $115^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$ 范围内。

(3) β 中尺度云团是一个对流十分旺盛的中尺度系统,其水凝物廓线上部的可降水冰和云冰含量很高,最大值达 0.8 g/kg ,最大高度达18 km,云顶亮温低于 -80°C 。

(4) AMSU-B 150 GHz通道的低亮温区是红外云图上对流旺盛的低黑体亮温区,也是 β 中尺度对流云团中降水率较大的云区。

(5) β 中尺度云团的背景场是整个对流层内具有高湿、正涡度和上升运动的特征。它们促使切变线内高湿斜压不稳定能量释放,促使 β 中尺度云团发展,产生很强的降水。

(6) 各 β 中尺度云团的降水强度是不均衡的, 其中, 第一类和第二类云团在低涡东南侧生成的云团降水量要大一些, 这里辐合强, 能不间断地供应水汽。

致谢: 感谢安徽省气象局提供了每小时降水量, 感谢李小青提供纬向水凝物垂直剖面图。

参 考 文 献

- 1 丁一汇主编. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 89 ~ 93.
- 2 Fang Zongyi. The preliminary study of medium-scale cloud clusters over the changjiang basin in summer. *Advanced in Atmospheric Sciences*, 1985, 2(3): 122 ~ 128.
- 3 项续康, 江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体. *应用气象学报*, 1996, 6(1): 9 ~ 17.
- 4 Moddax R A. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1980, 61: 1374 ~ 1387.
- 5 Kummerow, Hong C Y, Olson W S, et al. The evolution of the Goddard Profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1801 ~ 1820.
- 6 李小青. 用 TRMM 资料反演降水强度和水凝物垂直结构: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003.

ANALYSIS OF THE MESO β CONVECTIVE CLOUD CLUSTER OVER MEI YU FRONT ON 3 JULY 2003

Fang Zongyi¹⁾ Xiang Xukang¹⁾ Fang Xiang¹⁾²⁾ Li Xiaolong¹⁾

¹⁾ (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

²⁾ (School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

In term of meteorological satellite sensing data and processed products, the mesoscale aspects of a rainstorm system occurred over the north of Anhui province on 3 July 2003 are analyzed. It suggests that there are 11 meso β convective cloud cluster developed with 100 km in spatial scale and 5 h in time scale. High humidity, positive vorticity and upward current, which lead to the energy release of the high humidity baroclinic instability and the development of meso β cloud cluster, help making for the environment for heavy precipitation. The other characters making for heavy precipitation is that the high contents of ice for potential precipitation and ice in cloud on the upper of the water coagulation profile of clouds with the maximum of 0.8 k/kg, the highest height 18 km, and the brightness temperature on the top of these clouds under - 80 °C.

Key words: Meso β convective cloud cluster Shear line Low vortex