

“99.9.4”突发性局地特大暴雨中尺度分析

沈 武

(浙江省温州市气象局, 325027)

提 要

通过对卫星云图、常规气象要素和 T106 物理诊断产品较为细致的分析, 归纳出 1999 年 9 月 4 日凌晨发生在温州的突发性局地特大暴雨成因及中尺度系统特征, 所得结果可对今后预报提供一些启示和参考。

关键词: 特大暴雨 中尺度系统 突发性

引 言

1999 年 9 月 4 日凌晨温州地区发生突发性局地特大暴雨, 温州市 05~08 时 3 个小时降水量达 347.1mm, 超历史最高纪录, 在全国也属罕见。特大暴雨导致山体滑坡和城市低洼地区受淹, 损失惨重, 据初步统计造成经济损失达 29 亿元。

1 天气尺度系统背景

9 月 3~4 日, 9909 号热带气旋和西北太平洋副热带高压在相互作用中促使台湾岛东侧及以东洋面的东南气流得到加强, 并顺畅北上进入本区, 从而引发这次在东南气流背景下, 在热带风暴倒槽的北端诱生出中尺度系统, 直接造成突发性局地特大暴雨。形势特点是: (1) 副高脊线位置偏北。在 120°E 附近 500hPa 副高脊线在长江口以北, 特别是低层脊线位置在山东半岛附近。(2) 副高主体偏东。代表副高主体的 592 线在 130°E 以东, 其脊线呈东北~西南走向伸向冲绳岛, 588 线位于台湾岛东侧。(3) 东南沿海有较强的东南气流。

暴雨过程中强对流云团的发展加强于下半夜, 凌晨最强, 白天减弱^[1]。反映了低纬天气系统以及沿海地带在对流云发生发展中所具有的某些重要特征。

2 暴雨过程的云图特征

研究和试验^[2]表明, 中尺度系统是暴雨的直接产生者。在日常暴雨的分析和预报中, 卫星云图对中小尺度系统的监测和短时暴雨预报也是一种十分有效的工具。连续每小时一张的卫星云图分析表明, 这次突发性局地特大暴雨是因多个发展强盛的中- β 尺度对流云团形成、发展及合并造成的。

2.1 中尺度对流云团发展演变

根据连续每小时红外 LAMBERT 投影云图 (图 1) 分析看到, 风暴外围云系上有多多个活跃的对流云团, 以温州附近水平尺度约 500km 的中尺度对流云团 (MCSs 之一) 和其西南方向水平尺度约 350km 的中尺度对流云团 (MCSs 之二, 为 9909 热带风暴本体云团) 相呼应, 成为一对中尺度对流系统 (双 MCSs)。造成温州特大暴雨的中尺度对流云团是 3 日 15UCT 在温州以西生成, 后发展强盛, 于 4 日 01UTC 离开温州北上, 其间停滞温州上空达 10 个小时。在整个过程中曾出现两个强对流中心云团, 一个在台州临海附近, 称为北中心; 另一个在温州 ($28^{\circ}\text{N}, 120.8^{\circ}\text{E}$) 以西 (在 $27^{\circ}50'\sim 28^{\circ}10'\text{N}, 120^{\circ}\sim 120.5^{\circ}\text{E}$), 称为南中心 (图 1 中左亮点在南中心附近, 右亮点为温州站附近)。

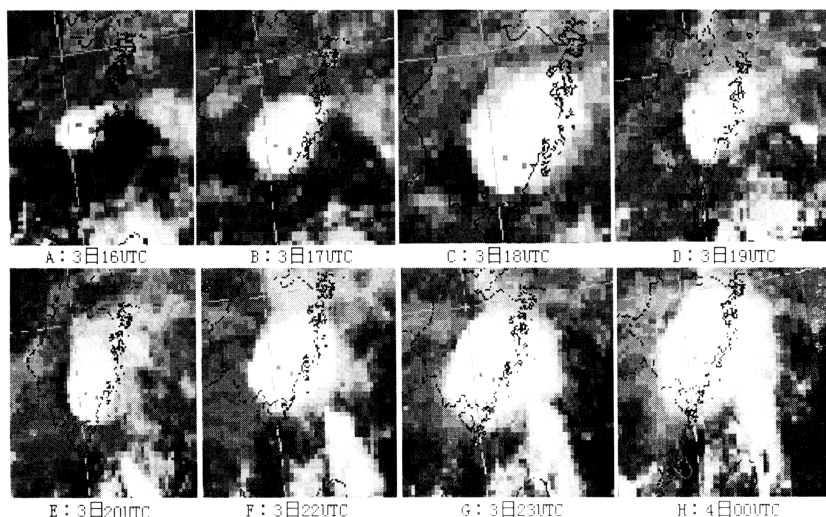


图1 连续每小时红外 LAMBERT 投影云图

3日15~22UTC,南中心停滞少动,最强云顶亮温TBB在逐时加强,由 -69.9°C 下降到 -82.1°C 。期间丽水青田、温州瓯海区西部的五凤祥、泽雅7小时降水量分别为176.4mm、266.2mm和267.6mm。在南对流中心云团的发展过程中,云团的北部中心曾有一次较强的对流发展过程。在整个云团的生成初期,云团北界向北到达 29°N ,从17~18UTC,在台州地区临海局地生成、发展的一个云顶亮温TBB为 -71°C 的中- γ 尺度的对流云团,后向北扩散到达台州地区北部三门县境内,最强云顶亮温TBB达到 -73°C 。19UTC,该对流云团迅速崩溃减弱消失;位于温州以西的南对流中心云团的强度却明显增强,而云团的范围大大缩小,水平尺度(指沿 28°N 取的云顶亮温TBB= -60°C 的水平距离,下同)从上一时次的120km很快缩小到85km。这时南对流中心成为整个云团的强度中心,以后这个云团的活动就是由这个中心的强弱、移动路径而决定的。同时台湾东北部的东南气流云带明显加强北进,在以后强降水出现期间这条云带始终与暴雨云团相连,成为暴雨云团非常重要的水汽输

送带。22UTC的南对流中心云团发展到成熟阶段,云顶亮温TBB= -82.1°C ,水平尺度在253km,云团范围(指云顶亮温TBB= -60°C 等值线)继续向北、东北扩散,北界到达 $29^{\circ}12'$, 122°E 。其中云顶亮温TBB= -75°C 的等值线在 28°N 的水平尺度达到130~140km,此时温州站出现 $136.7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的最大雨强。23UTC,水平尺度252km,南中心开始向东北方向移动,中心云团一分为二,云顶亮温TBB值均在 -75°C 。在移动中造成永嘉站 $112.9\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的本次暴雨过程的次雨强。4日00UTC,水平尺度253km,中心云团继续维持二块,位于永嘉、丽水交界处,移速加快。此时东南气流云带也随着强对流云团向北移动。01UTC,中心云团已经到达仙居境内,后中心云团转向东移动;02UTC在仙居和临海交界处,中心云团的移动速度缓慢;03UTC,在临海市附近减弱,云顶亮温TBB= -77°C 的等值线范围明显缩小;04UTC,整体云团的云顶亮温TBB明显升高,都在 -70°C 以上;至此,这次中尺度强对流天气过程结束。

以上是这个中尺度对流云团中的2个对

流中心单体的生成、发展、演变过程，它们属于中- β 尺度系统。这些中尺度对流系统在生成、发展到消亡过程中，南对流中心前期停滞少动，后期快速移动，北对流中心只是在原地生消。其生命史也不同，南中心有 10 个小时左右，北中心只有 2 个小时；云区的水平尺度最小的只有 85km，强盛时达到 253km，对流中心单体水平尺度（沿 28°N 的 -75℃ 等值线的距离）变化幅度也很大，小的只有 10km 左右，大的有 130~140km，这在天气图上是无法分辨的。但就是这种中尺度系统却可以产生每小时 100mm 以上的强降水。

2.2 强对流云团生成和特殊地形作用

南中心所在区域位于温州以西的山区，该处地形呈马蹄状，开口向东朝向温州，温州一带地势较平坦，北侧又有瓯江向东流向东海，整个地势呈现西高东低的坡形。当海上偏东气流加强西进时，几乎以正交于地形高度线爬上迎风坡，这有利于引起对流云团的突发性局地生成和发展，这一点从对比 3 日 14UTC 和 15UTC 两张云图就可以很明显地看到。

2.3 云顶亮温、水平尺度与雨量的关系

从温州、永嘉、南中心云顶亮温和沿 28°N 云团云顶亮温 $TBB = -60^\circ\text{C}$ 等值线的东西距离作为水平尺度的关系（表 1）得到，这 3 个取值点的云顶亮温 TBB 值升降变化与水平尺度增减变化是一致的。反映了在云团的发展过程中，随着强度的增强云团的面积也会相应增大；反之亦然。

由于降水资料的关系，这里仅以温州、永嘉测站的逐时降水资料为例来说明云团云顶亮温 TBB 值的变化和逐时降水量值（雨强）增幅的对应关系（图 2）。从图 2 和表 1 可以得知，温州、永嘉上空的云顶亮温 TBB 值始终不是最低的，而且云顶亮温 TBB 值和降水量并没有明确的线性关系。但是，我们仍然

可以得到一些有意义的结论：

表 1 温州、永嘉、南对流中心和沿 28°N 云顶亮温 $TBB = -60^\circ\text{C}$

时间/UTC (世界时)	温州上空 TBB/℃	TBB $\leq -60^\circ\text{C}$ 在 28°N 上水平 距离/km	永嘉上空 TBB/℃	南中心上空 TBB/℃
3 日 16	-53.2	60~70	-50.9	-69.9
3 日 17	-65.1	110~120	-66.7	-69.9
3 日 18	-65.1	120	-59.5	-69.9
3 日 19	-59.3	100	-63.4	-77.1
3 日 20	-73.3	142	-73.3	-75.1
3 日 21	-75.1	200	-73.3	-77.1
3 日 22	-75.1	252	-75.1	-81.2
3 日 23	-75.1	252	-77.0	-79.1
4 日 00	-75.1	253	-75.1	-75.1
4 日 01	-73.3	246	-73.3	-73.3
4 日 02	-68.9	185	-71.5	-69.0

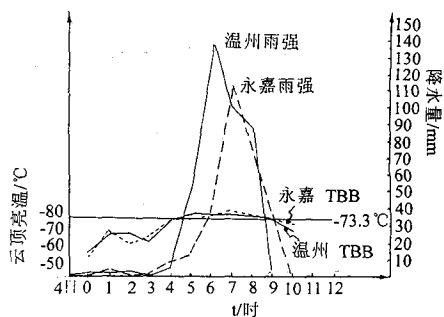


图 2 温州、永嘉站逐时雨强与其上空云团 TBB 值的对应关系

(1) 三地上空云顶亮温 TBB 值的变化是同位相的，可以得出这三个地点同属于一个中- β 尺度对流系统，特别是 3 日 22UTC，当南中心出现最强云顶亮温 TBB 值为 -81.2 时，云团的面积最大，虽然温州上空的云顶亮温 TBB 只有 -75.1℃，但在温州与南中心之间的云顶亮温 TBB 为 -77℃，云顶亮温自西到东升高，形成梯度，这也说明这个中- β 对流云团的中心位于温州以西，以及南中心与温州之间的内在相关关系。从逐时雨强的分布反映了云团强降水中心自西向东移动，在单个测站的强降水时间只有 3~4 个小时^[3]，23UTC，温州周围云顶亮温升为 -73.3℃，而温州上空的云顶亮温仍为 -75.1℃，是一个新发展的中- β 尺度对流系

统,雷达回波显示强度增强到 50dB,强于四周。

(2)云顶亮温 TBB 值的升降趋势与降水量的增减幅度有着直接对应关系。在对流云团处于发展阶段,云顶亮温 TBB 值 1 小时从 -73°C 降至 -75.1°C ,即对流云团所处的云区发展最强盛阶段时,每小时的降水强度也将明显增幅;紧接着的 1 个小时出现该对流云团的最强雨强,当时的云顶亮温 TBB 值继续下降或稳定。随着云顶亮温 TBB 值的升高或平稳,雨强开始减小,但仍能产生每小时的强降雨,雨强减幅不大。当云顶亮温上升到 -73.3°C 或高于 -73.3°C 时,雨强出现明显的陡降。

(3)从温州、永嘉逐时降水量变化曲线,特别是从 3 日 22UTC~4 日 02UTC 的时段可以发现,永嘉站的雨强升降变化曲线比温州站的雨强升降变化曲线落后 1 个小时。这说明温州、永嘉暴雨是同一个中尺度系统造成的,并且是向北移动的,在移动过程中强度逐渐减弱。

3 地面中尺度系统分析

3.1 地面流场与温湿场

从地面逐时流场和温湿场演变过程分析发现,此次特大暴雨过程与地面中尺度辐合线直接相关。强降水中心始终紧靠中尺度辐合线的冷湿区一侧,且随着中尺度辐合线东移、北抬。暴雨强盛时期,雨区东侧是东南暖湿气流,北侧有一股弱偏北气流,西侧有一股偏西气流插入雨区的底层。这三支气流汇合在温州附近,产生较强低空气流辐合,造成暴雨云团的加强。

3.2 地面中高压

通过逐时地面气压场分析可见,特大暴雨雨峰出现后,雨区出现地面中尺度高压,雨区前部为气旋性环流。随着雨强的减弱地面中高压也随之减弱,反映了中尺度对流单体的演变史。

3.3 地面能量场

同时刻总温度场上,南北向风场辐合线东侧为高能区,从永嘉附近、乐清转向瓯江口沿 121°E 向南延伸,为一高能舌,辐合线西侧为暴雨区,与相对冷区重合,故而能量较低。青田至温州为低能轴区,在温州与永强机场之间形成密集的能量锋区,梯度大约 $-10.2^{\circ}\text{C}/10\text{km}$,特大暴雨就发生在高能舌左侧、能量锋区附近偏向低能区一方。

4 环境场特征

4.1 高层辐散和低层辐合配置

散度场(图 3)的演变表明:3 日 12UTC,在未来暴雨区浅层 800hPa 以下出现弱的辐合区,散度为 $-1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1} < \text{div} < 0$,而南北两侧各为一个较强辐散中心。3 日 18UTC,

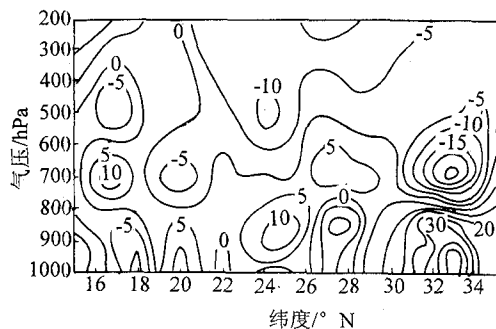


图 3 4 日 02 时散度场沿 120°E 垂直剖面 (单位: 10^{-5}s^{-1})

本区上空的辐合区明显加强,辐合中心向 700hPa 发展,最强到达 850hPa,中心值为 $-10 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$,而在辐合区上方 700hPa 出现增强了的辐散区,辐散中心值达到 $10 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时辐合区在向南北两侧扩展中北侧的辐散区在 925hPa 以下向辐合区北侧侵入。两侧辐散中心继续存在,但各向南北两侧移动 2 个纬距,辐散中心强度加强。4 日 00UTC,在暴雨区低层出现 $10 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 的较强辐散中心,使暴雨的动力结构遭到破坏,暴雨骤然停止。从上述可以看到,暴雨

区强对流云团的产生和强烈发展,是由于在暴雨区南北两侧强辐散区的结合部,引起低层辐合的产生和加强,高层辐散却一直维持,从而形成高层辐散大于低层辐合而导致。这种散度场上高层强辐散大于低层辐合的垂直分布有利于该区上空抽吸作用加强,促进低层辐合发展,使中尺度扰动得以发生和发展,这次特大暴雨的发生就是在这种有利的散度场配置下促发的。

4.2 垂直环流运动

垂直运动(图4~5)分析显示,3日12UTC在未来暴雨区北侧850hPa等压面上出现 $-10 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升气流中心,

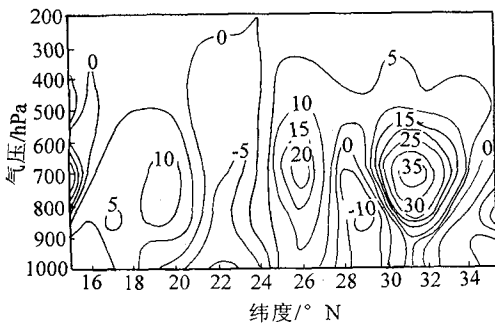


图4 3日20时沿120°E上升运动垂直剖面
(单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

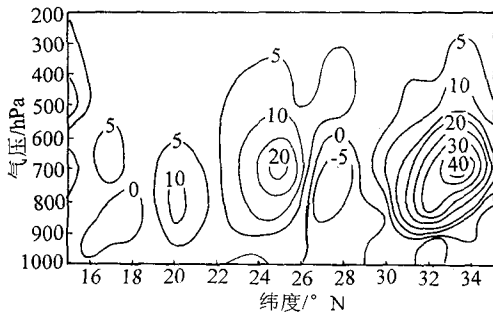


图5 4日02时沿120°E上升运动垂直剖面
(单位: 同上)

700hPa以上上升垂直运动消失被下沉运动取代,但其南北两侧的下沉支流非常强烈,北下沉中心为 $35 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,南中心为 $20 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3日18UTC,上升气流上升到500hPa,最大上升中心抬升到850~700hPa之间,但中心气流速度降到 $-5 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4日00UTC上升气流分为上下支且强度减弱,上支在700hPa,下支只在900hPa附近,但暴雨区却被弱辐散区控制,此时的实况雨强陡减。

4.3 湿能量锋区

3日18UTC,从850、700、500hPa三层等压面上等温度露点差(图6)的分析可以发现,密集地带呈纬向带状,在28°N附近,随高度向上成垂直柱状分布,表现出有利于中-β尺度对流系统发展的湿中性结构特征^[4],反映了副高与台风倒槽之间的不连续过渡区。这次暴雨区域就发生在等压面上等温度露点差密集区偏向低值一侧。

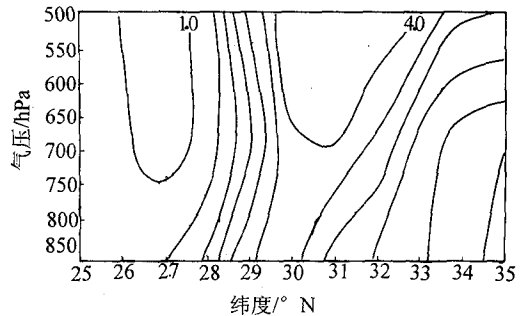


图6 4日02时沿120°E的 $T - T_d$ 垂直剖面
(单位: $^{\circ}\text{C}$)

4.4 水汽条件

分析3日18UTC的水汽通量场发现。台湾以东洋面有一个水汽通量中心,中心轴伸向该区,850hPa等压面上27~28°N之间水汽通量梯度大;沿120°E的垂直剖面图上,28°N附近有一个水汽通量中心 $70 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,并在水平两侧和垂直方向上递减。

分析同时刻的水汽通量散度场(图7)可以发现,在未来暴雨区,850hPa以下存在一个水汽通量散度辐合中心,中心值为 $-8.0 \times$

$10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

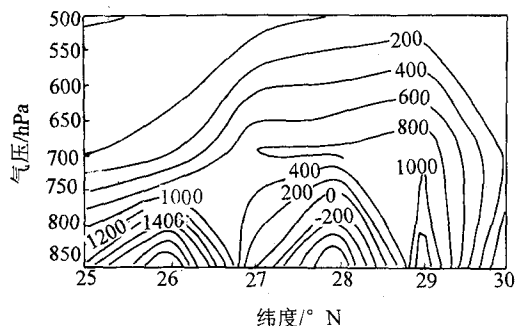


图7 4日02时水汽通量散度沿120°E垂直剖面 (单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

通过水汽通量和水汽通量散度场的分析可以发现,来源于台湾以东洋面的东风气流及其富含的水汽为暴雨产生提供了充足的水汽资源。这一点可从3日19UTC~4日00UTC的红外云图得到直观反映。

5 结语

(1) 东南气流(扰动)为暴雨区输送了丰富水汽,是这次特大暴雨产生的基本条件。

(2) 产生这次暴雨的中尺度上升运动是由周围辐散流场的促发而引起强烈的上升运动,是一支补偿性上升气流。这种高层辐散、低层辐合的配置直接导致这场特大暴雨的产生。

(3) 湿能量锋区和低层辐合线相交的结构,有利于湿潜能的释放,为强对流的发生、发展提供了充足的能量。

(4) 特大暴雨发生在高能舌左侧、强能量锋区附近,偏向低能区一侧。

(5) 在有利条件下,中尺度对流云团活动异常活跃时,可以发生中-β尺度对流云团的相互嵌套、演变。当中尺度对流云团处于发展、旺盛时,导致较强降水的发生。

(6) 云顶亮温 $TBB = -73.3^\circ\text{C}$ 可能是一个本地强对流云团出现雨强增幅的敏感值,同样也是雨强骤减的临界值。

(7) 这场强对流云团生命史10个小时左右,造成的强降雨生命期只有3~4个小时,时间尺度符合中尺度系统的降水特征。

(8) 特殊的地形环境为中尺度强对流云团的生成和发展提供了有利的动力促发条件。

参考文献

- 1 刘爱鸣等. 一次热带低压引发的中尺度特大暴雨分析. 北京: 第十届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 1996, 199~201.
- 2 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3): 274~283.
- 3 沈武等. “99.9.4”突发性局地特大暴雨地面中尺度特征分析. 浙江气象科技, 2000, 21(2): 1~4.
- 4 许焕斌等. 湿中性垂直运动条件下-β系统的形成. 气象学报, 1997, 55(3): 602~604.

An Analysis of Meso-scale system on the Occurrence Cause of a Locally Sudden Torrential Rain in Wenzhou Area on 4 September, 1999

Shen Wu

(Wenzhou Meteorological Office, Zhejiang Province, 325027)

Abstract

On the basis of analysis of the satellite cloud picture, combined with routine meteorological information and the products of T106 numerical forecast, the mechanism of a locally sudden torrential rain in Wenzhou area on 4 September, 1999 and the characters of meso-scale structure about IR cloud atlas and physics field were analyzed. The results about the cause of this locally sudden torrential rain will benefit the operational prediction.

Key Words: sudden torrential rain meso-scale system numerical forecast