

从一次大暴雨过程看大中尺度间的 相互作用

于仁成 阎丽凤

(山东省烟台市气象局, 烟台 264001)

摘 要 应用大尺度物理量场诊断分析和中尺度带通滤波处理技术, 对1994年6月29日发生在山东的一次大暴雨过程机制进行了分析。结果表明, 大尺度 θ_{se} 锋区、水汽强烈输送、大气潜在不稳定等是大暴雨发生的有利环境条件; 而经带通滤波得到的中尺度涡旋、切变线则是直接造成山东此次大暴雨发生的影响系统; 中尺度涡旋、切变线与大尺度物理量场关系密切。

关键词 诊断分析 带通滤波 大暴雨

1 引言

实际大气运动是由不同尺度天气系统组成的, 大降水的产生要有一定的大尺度环境条件, 它可以提供中尺度天气系统形成的条件及环境场, 而中尺度系统才是直接造成暴雨的影响系统^[1]。本文研究1994年6月29日发生在山东省的一次大暴雨过程, 通过对大尺度物理量场诊断及采用带通滤波获取的中尺度场分析, 探讨大暴雨发生的大中尺度场特征以及二者之间的相互作用。以进一步探索暴雨发生的物理成因, 为预报暴雨提供有益的思路。

2 天气过程及环流背景

1994年6月29日山东省出现了一次大范围的强降水过程, 从29日00时~20时(北京时间, 下同), 全省有6个地区的11个县市降雨量超过100 mm, 另有26个县市雨量在50~100 mm之间。最大值出现在莱阳市, 降雨量为188.1 mm。强降水自29日上午山东中部地区东移至山东半岛一带。

大暴雨产生前28日08时, 副高呈东西向带状分布, 主体偏南, 中心位于福建西部, 500 hPa上脊线位于27°N(120°E)。由于东北低涡的东移, 原处于低涡底部的华北地区高空3层均为高压脊控制, 850 hPa上自河套有一切变东伸至115°E。28日20时, 500、700 hPa上华北东部仍为高脊控制, 而850 hPa上开始出现负变高, 切变线位置少变。到了29日08时, 副高西伸北抬, 500 hPa脊线北抬至29°N(120°E), 山东转入副高北侧及东移的华北高压脊后部西南气流控制之下, 高空3层均为负变高。

700、850 hPa 切变线则东伸到 117°E。同时，西南急流也加强北上，29 日 08 时 700 hPa 急流中心风速最大值由 28 日 08 时湖南省怀化地区的 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至江苏省徐州的 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

上述大的环流形势明显地有利于暴雨的发展。

3 暴雨发生的中尺度场特征

目前，中尺度气象信息的获取仍比较困难，有人^[2,3]在不改变 Barnes 滤波原理的基础上，对滤波方法进行了适当改进，即将原来在网格点上进行的滤波计算全部改为在离散点测站上直接进行。我们基于此方案原理，对此次大暴雨过程高空 500、700、850 hPa 3 层的实时常规资料，通过采用带通滤波技术，进行尺度分离，得到原始场中所没有的中尺度信息，以探讨大暴雨发生的中尺度场特征。

取滤波常数 $C_1=10\,000\text{ km}^2$ 、 $G_1=0.3$ 和 $C_2=150\,000\text{ km}^2$ 、 $G_2=0.3$ 两个低通滤波器，构造一中尺度带通滤波器，对 25~50°N、103~130°E 范围内离散测站的风、温度、温度露点差、高度等资料进行带通滤波处理，该滤波器的最大响应波长为 800 km，由这一滤波器可提取水平尺度为 400 km 左右的 β 中尺度至 α 中尺度波动。

3.1 中尺度系统

分析发现，经带通滤波后的中尺度场上存在着原始场中所不明显的中尺度切变线和中尺度涡旋（表 1、图 1）。如 700 hPa 上，中尺度切变线最初（28 日 08 时）位于汉口至南京一带，呈东西向分布，风场上表现为西南风与东北风之间的风向辐合线，山东境内处于反气旋性环流控制之下；28 日 20 时，中尺度切变线东北抬至鲁南至苏北一带，呈西北—东南向，原山东境内的反气旋性环流中心，则东北移至辽东半岛，而代之为处于中尺度切变线北侧偏东风气流中；到了 29 日 08 时，中尺度场特征更为明显。中尺度切变线继续东移北抬至山东境内，强度也进一步发展，在切变线的西端，即山东西部地区形成一中尺度涡旋，其尺度约 400 km，切变线则由涡旋中心向东南伸向青岛西南。29 日 20 时，该中尺度切变线及涡旋均不明显。

表 1 28 日 08 时~29 日 08 时中尺度切变线与大尺度物理场之间的关系

时间	层次	中尺度切变线位置	对应 θ_{se} 场特征	对应水汽通量散度场特征
28 日 08 时	500	黄淮	密集区	
	700	江淮	密集区	通量辐合中心
	850	黄淮	高脊	弱辐合
28 日 20 时	500			
	700	鲁南—苏北	密集区	通量辐合中心
	850			
29 日 08 时	500	鲁西北—苏北	密集区	
	700	鲁西北—鲁东南	密集区	通量辐合中心
	850	鲁南	高值区	通量辐合中心

山东此次大暴雨过程，正是由于这条切变线的东移北抬、加强，在它移近以及移至山东时所造成的。

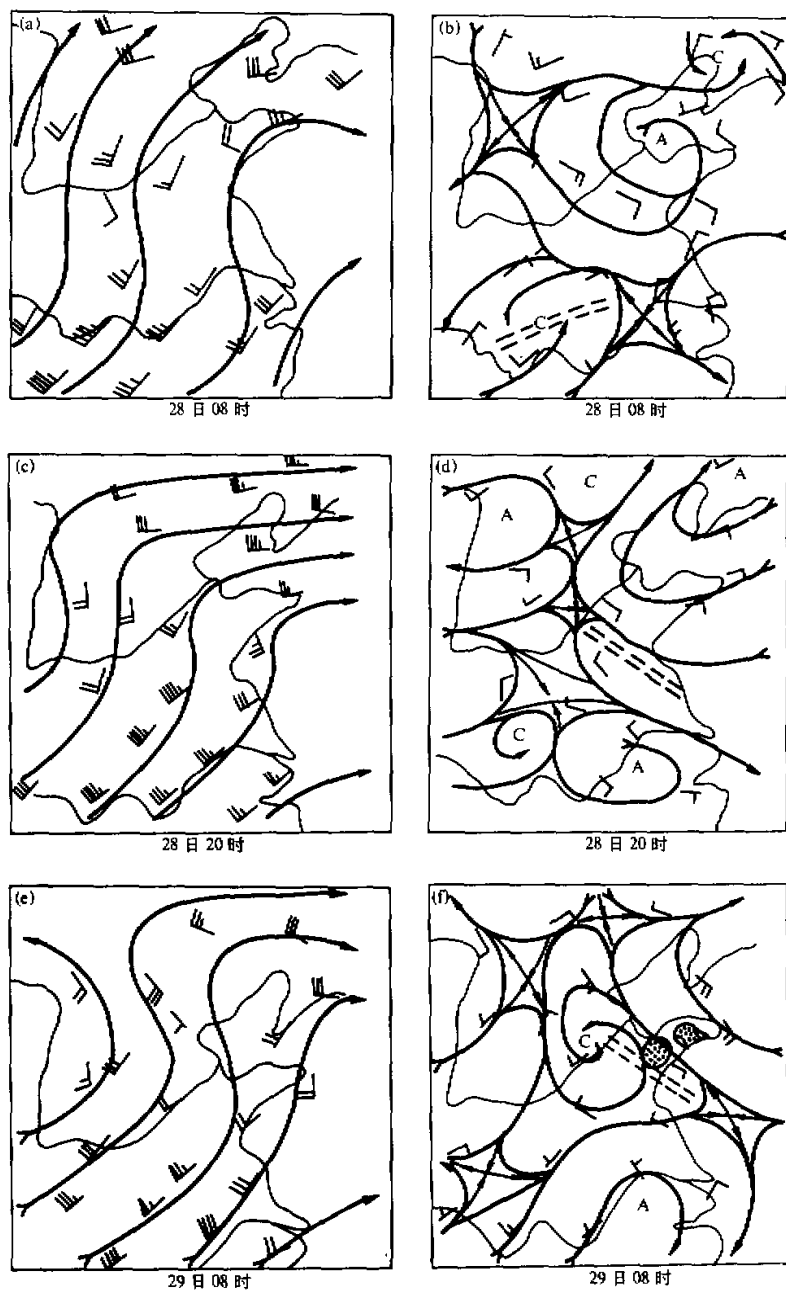


图 1 1994 年 6 月 28 日 08 时~29 日 08 时 700 hPa 实况流场与中尺度流场分布图
 双线: 中尺度切变线; 右侧为中尺度场, 左侧为实况场; 图(f)中阴影区为 29 日 00 时~20 时
 降水量 ≥ 100 mm 的区域

29日凌晨, 当中尺度切变线向山东靠近时, 山东的降水自西南首先开始, 而后向东北方向扩展, 到29日06时, 降水区主要位于山东西南部到中部一带, 强降水出现在山东中部, 6小时降水量最大值为57 mm。随着切变线加强东移北抬, 进入山东境内, 并在切变线西端有中尺度涡旋形成, 山东中西部地区的降水进一步增强, 范围扩大, 12时, 强降水区又向东北移动, 6小时降水量全省有9个站超过50 mm, 其中有2个站超过100 mm。29日下午强降水区则东移山东半岛一带, 烟台、威海两市16个测站中有11个站6小时降水量超过50 mm, 3个站超过100 mm, 其中莱阳市6小时降水量最大, 为132.9 mm。29日夜间全省大暴雨过程逐渐结束。

该中尺度切变线的生命史约24小时, 其水平尺度长约400~500 km, 且时间、空间上均有着较好的对应关系, 垂直方向上也伸展到了500 hPa (表1), 而以低层850 hPa、700 hPa上表现得最为清晰。中尺度涡旋的生命史则较短, 仅在29日08时850 hPa、700 hPa中尺度场上有反映, 它是中尺度切变线进一步发展加强的结果。强降水主要出现在中尺度涡旋的右侧, 中尺度切变线附近。

3.2 中尺度系统特征

由上可知, 山东的此次大暴雨过程与中尺度涡旋的形成、中尺度切变线的东移北抬、加强密切相关。

分析经带通滤波处理后的中尺度温度场、湿度场、高度场特征可发现, 中尺度切变线具有冷性、高湿的特点。

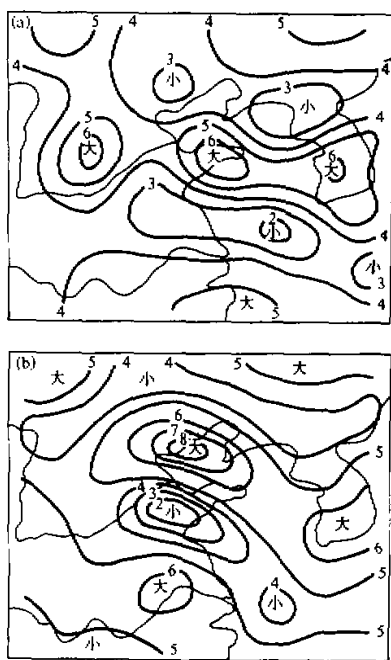


图2 700 hPa 中尺度温度场特征
(a) 28日20时; (b) 29日08时

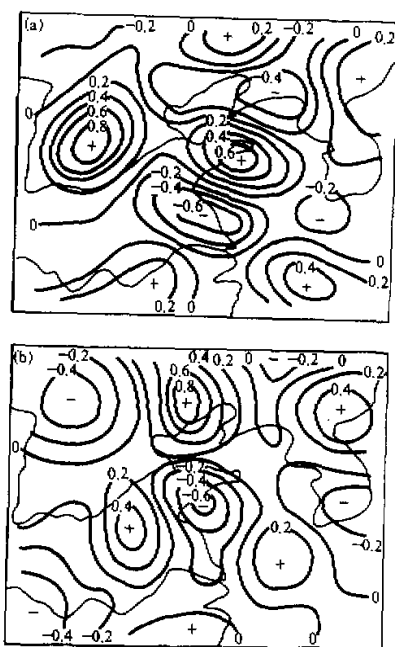


图3 700 hPa 中尺度温度露点差场特征
(a) 28日20时; (b) 29日08时

由图 2 可见, 中尺度温度场数值虽然较小, 但从中仍可发现, 在中尺度切变线附近, 温度较周围略低。700 hPa 上, 28 日 20 时中尺度温度场上低值区位于江淮地区, 与中尺度切变线相对应 (图 2a); 29 日 08 时, 中尺度切变线东移北抬至山东境内, 呈西北—东南向, 其中尺度温度场低值区也东北移至山东境内, 低值中心位于青岛附近, 也与中尺度切变线相对应 (图 2b)。可见, 在中尺度温度场上, 中尺度切变线表现为冷性特征, 低值区轴向也与中尺度切变线的走向基本一致。

中尺度温度露点差场上, 表现为中尺度切变线与低值区相对应, 低值区轴向与切变线的走向也基本一致。说明中尺度切变线附近湿度较周围大, 属高湿区 (图 3)。但在中尺度高度场上, 中尺度涡旋, 切变线附近高度场分布较均匀, 没有明显的高低中心相对应。

4 中尺度系统与大尺度背景场的关系及其相互作用

由以上分析可见, 中尺度系统是此次大暴雨产生的比较直接的影响系统。下面通过分析中尺度系统与大尺度物理量场的关系, 来进一步探讨大中尺度间的相互作用。

4.1 中尺度系统与水汽及其辐合

暴雨的产生要有深厚的湿层, 我们以 850、700、500 hPa 的 $T - T_d$ 之和来表示对流层中下层的潮湿程度。一般 $\sum(T - T_d) \leq 10^\circ\text{C}$, 对流层中下层湿度可以认为达到准饱和程度。当前期处于相对干区, 而未来有准饱和区移入时, 则有利于强降水天气的出现。

图 4 是 28 日 08~29 日 08 时 $\sum(T - T_d)$ 演变情况。从图可见, 28 日 08 时, 山东处于干区内, 湿区位于长江流域附近, 中尺度切变线位于湿区内; 20 时湿区明显北抬, 位于淮河流域; 29 日 08 时湿区北抬至河套到山东一带, 气层也明显变湿, 山东中西部地区 $\sum(T - T_d)$ 由 28 日 08 时的 36°C 减小到 6°C , 气层达到准饱和程度, 与此同时, 位于湿区内的中尺度切变线亦随着湿区的北移而北抬、加强, 其西端发展起来的中尺度涡旋与 $\sum(T - T_d) = 6^\circ\text{C}$ 湿区中心相对应, 中尺度切变线则与向东南方向伸展的湿舌相对应。

山东境内有湿区移入且达到准饱和程度, 说明有水汽不断输送并在此强烈集中, 为此, 我们还进一步分析了水汽通量及其通量散度与中尺度系统的相互作用情况。

暴雨发生前 28 日, 700、850 hPa 上有水汽自西南向山东输送。08 时, 700 hPa 水汽通量辐合中心位于汉口—南京之间, 即相应时刻的中尺度切变线附近, 中心值为 $-18 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20 时中尺度切变线移到江苏北部到山东南部一带, 水汽通量中心也北抬于此, 且辐合明显加强。到了 29 日 08 时, 水汽通量及通量辐合都显著增强。其水汽通量中心轴线不变, 中心值增强到 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 700、850 hPa 上在中尺度涡旋及中尺度切变线附近都有强的水汽通量辐合中心存在, 中心值均达 $-44 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下 (图 5)。由此可见, 大尺度环境场为暴雨的发生提供了有力的水汽来源, 而中尺度系统则在水汽强烈辐合、向上输送, 使对流层中下层达到准饱和状态中扮演了十分重要的角色。

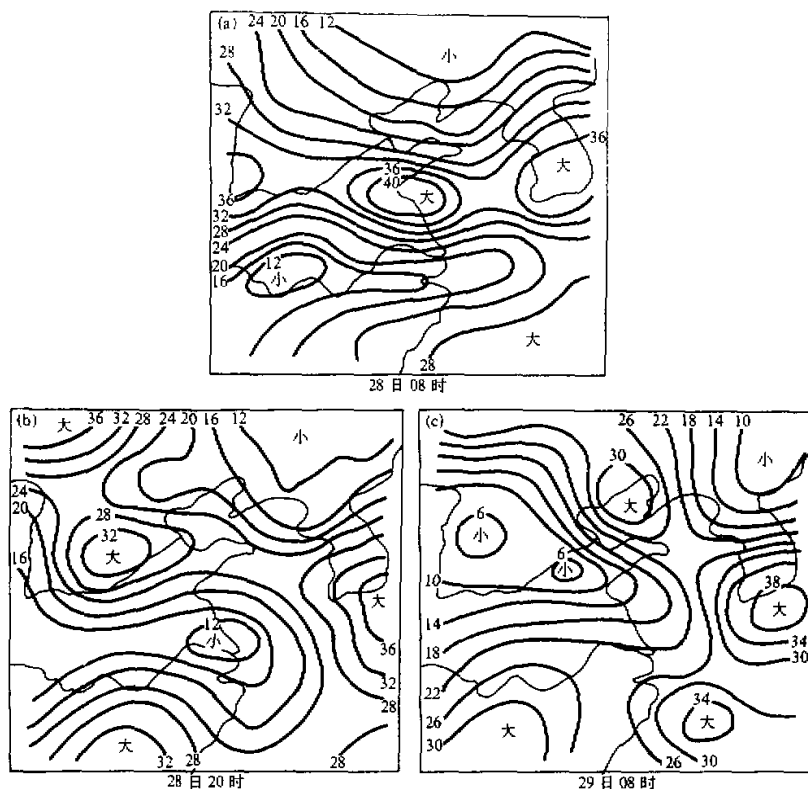


图4 1994年6月28日08~29日08时 $\sum(T - T_d)$ 演变情况

4.2 中尺度系统与低空急流

强烈的低空西南急流是此次大暴雨过程水汽输送的重要纽带(图6),但它对中尺度切变线,涡旋的生成、发展、移动也起到了积极作用。由图7可见,中尺度切变线始终处于700、850 hPa西南急流中心的前方风速辐合处(该风速辐合处也与水汽通量辐合中心相对应)并随着西南急流的加强北上而东移北抬。可见,强的低空西南急流不仅为暴雨输送了充沛的水汽,而且也为中尺度系统的生成、发展、移动提供了能量来源及有利的动力条件。

4.3 中尺度系统与潜在不稳定

强烈的对流天气一般出现在具有潜在不稳定的层结地区。 $\theta_{se}^* - \theta_{se0} < 0$ 大气为潜在不稳定, $\theta_{se}^* - \theta_{se0} > 0$ 则为潜在稳定。其中, θ_{se}^* 表示参考高度(取500 hPa)上的饱和和假相当位温; θ_{se0} 表示起始高度(取850 hPa)上的假相当位温。

暴雨发生前28日08时,山东大部分地区处于潜在不稳定状态,且其不稳定强度和范围继续发展。20时及29日08时,山东地区大气则均处于潜在不稳定状态,有利于中尺度系统触发不稳定能量强烈释放,从而产生对流。

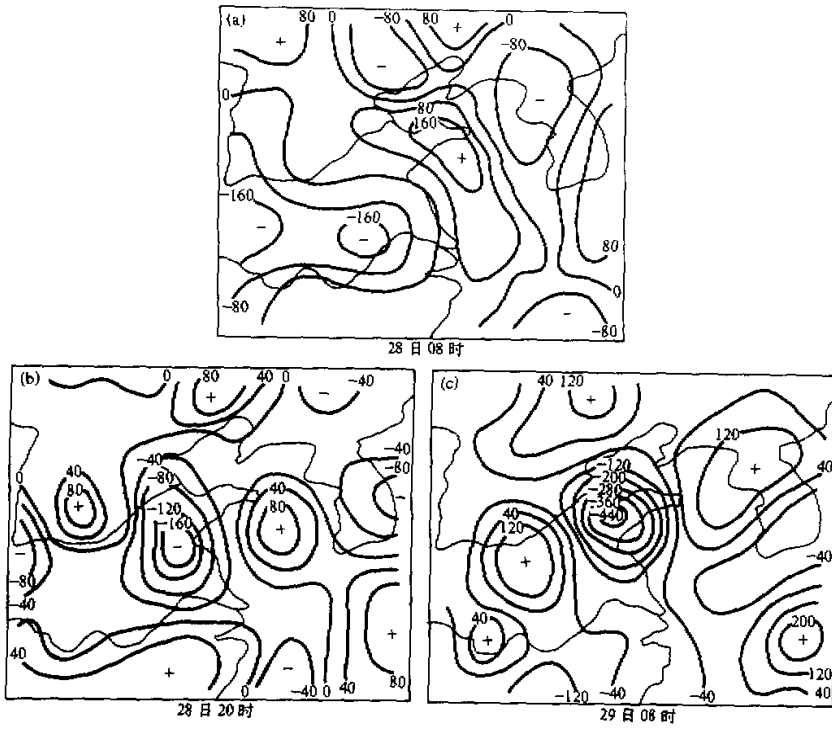


图5 1994年6月28日08时~29日08时水汽通量散度分布情况
单位: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 网格距: 100 km

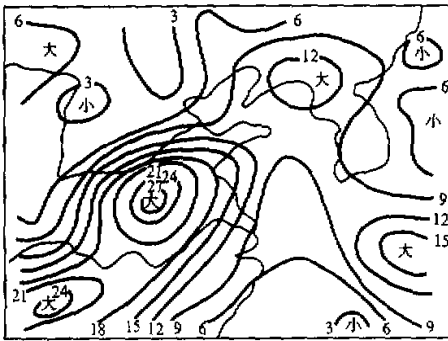


图6 1994年6月29日08时850 hPa水汽通量分布
单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

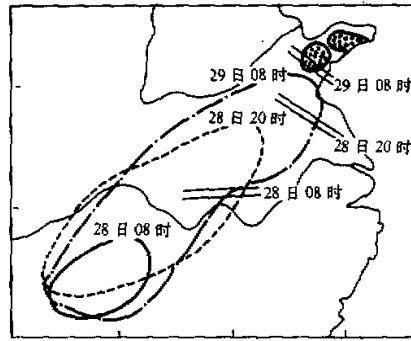


图7 1994年6月28日08时~29日08时
 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等风速线及中尺度切变线动态图
图中阴影区为降水量 $\geq 100 \text{ mm}$ 的区域

4.4 中尺度系统与假相当位温 θ_{se}

低层 θ_{se} 高值区、配合高层 θ_{se} 锋区(等 θ_{se} 线密集区,下同)移入是此次大暴雨过程 θ_{se} 场上的重要特征,而中尺度系统与 θ_{se} 场的关系同样十分密切。

与 $\sum(T - T_d)$ 分布、时间演变特征相类似,500、700 hPa上,原位于长江流域的高值区不断北移,其北侧的 θ_{se} 锋区也随着北抬,中尺度切变线始终处于 θ_{se} 锋区附近,其走向与 θ_{se} 锋区走向基本一致,随着锋区的北抬而北抬。29日08时,500 hPa上 θ_{se} 高值区北抬至黄河流域,原河套到山东一带的低值区转变为高值区所控制,山东中西部地区12小时 θ_{se} 值增加了10 K,同时,有一西北—东南向的 θ_{se} 锋区控制着山东大部分地区,中尺度切变线就位于该锋区上(图8)。而低层850 hPa上,中尺度系统与 θ_{se} 高脊或高值中心相对应。山东的这次大暴雨过程正是出现在低层为 θ_{se} 高值中心,而高层有强的 θ_{se} 锋区移入的情况下的,大暴雨的落区出现在 θ_{se} 锋区附近偏于高值中心一侧,即中尺度涡旋右侧切变线附近,雨区移向垂直于 θ_{se} 锋区走向。

综合以上的讨论,我们给出本次暴雨过程简明的物理图像。它包含了副热带高压和

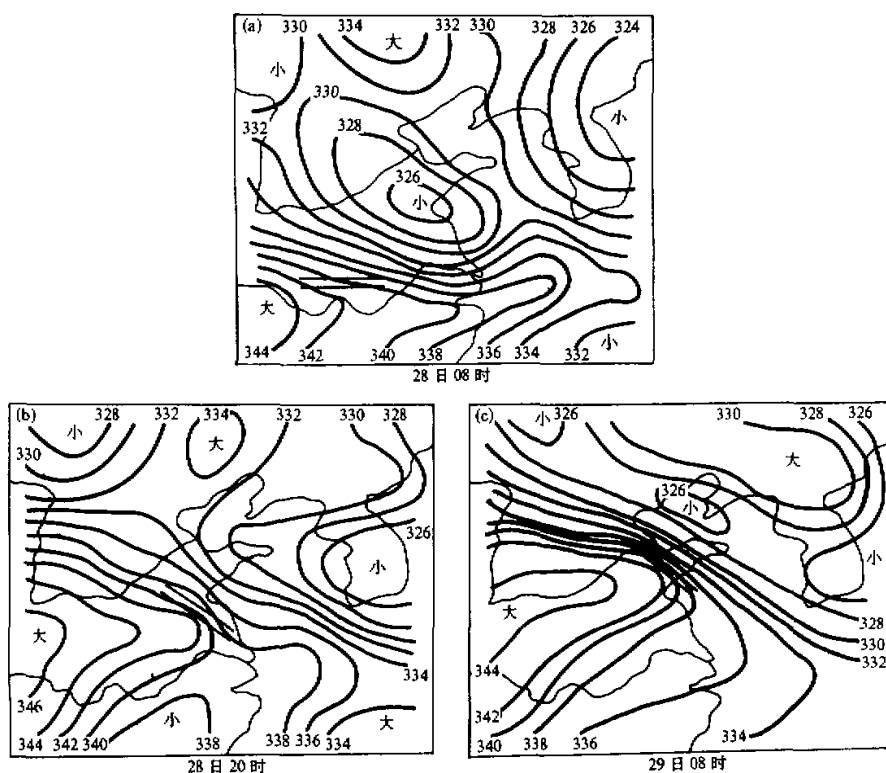


图8 1994年6月28日08时~29日08时700 hPa θ_{se} 分布(单位: K)
与中尺度切变线演变情况(双线)

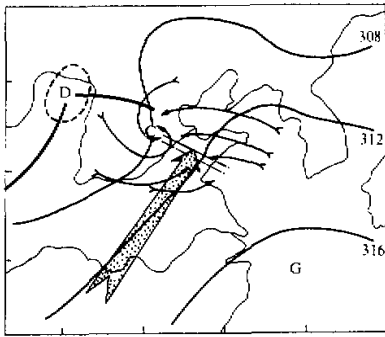


图9 1994年6月29日08时700 hPa上
大、中尺度系统配置图

细实线: 等高线; 矢线: 中尺度流场; 双线: 中尺度切变线; 点箭头: 西南急流; 粗线: 槽线及大尺度切变线

西风带偏移的大致位置, 低空急流的位置以及中尺度流场的配置, 由图9可以看出, 山东暴雨区正处于大、中尺度系统交汇的最有利的地区。

5 小结

通过以上分析, 可以清楚地了解此次大暴雨所发生的机制, 主要是大中尺度系统相互依存、作用的结果。

(1) 经带滤波后获得的原始场中所没有的中尺度涡旋、切变线是此次大暴雨产生的直接的影响系统。该中尺度切变线属冷性、高湿系统。

(2) 水汽强烈输送及辐合、大气潜在不稳定、低层 θ_{se} 高值区、高空 θ_{se} 锋区移入为大暴雨以及中尺度系统的生成提供了有利的环境条件。

(3) 强的低空西南急流既是大暴雨的水汽输送纽带, 又为中尺度系统的生成、发展、移动, 提供了有利的动力条件及能量来源。

(4) 中尺度系统的生成、发展, 则进一步加剧了水汽在其周围强烈辐合上升、低层能量积累增加、对流层中低层达准饱和状态等大尺度物理量场特征。

但由于分析的暴雨过程较少, 以及暴雨成因的复杂性, 因此, 中尺度系统与暴雨的发生、落区、强度等的关系, 与大尺度物理量场间的关系等, 今后还需进一步的分析、验证和完善。

参 考 文 献

- 1 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 25~34.
- 2 陶祖钰, 谢安, 1989, 天气过程诊断分析原理和实践, 北京: 北京大学出版社, 139~140.
- 3 陈忠明, 1994, 常规资料获取中尺度信息的一种简便方案, 气象, 7, 39~42.

Interaction of Large Scale and Mesoscale from a Heavy Rainstorm Process

Yu Rencheng and Yan Lifeng

(Meteorological Bureau of Yantai, Shandong Province, Yantai 264001)

Abstract Diagnostic analysis of large scale physical field and band-pass filter of mesoscale are used to analyze the mechanism of a heavy rainstorm happening in Shangdong Province on June 29, 1994. The result shows that the large scale θ_{se} frontal zone, strong moisture transportation, and potentially unstable atmosphere provided favorably environmental conditions for heavy rainstorm; mesoscale shearline obtained from band-pass filter was a system triggering the heavy rainstorm directly; and mesoscale shear line is closely related to large scale physical field.

Key words diagnostic analysis band-pass filter heavy rainstorm