

山东省春季大暴雨天气的形成机制个例分析

杨晓霞 赵宇 高留喜

(山东省气象台, 济南 250031)

摘要 应用 T213 数值预报产品的分析场和 6 h 预报场资料对山东省春季一次暴雨天气的成因进行了分析, 结果表明: 这次春季暴雨主要是受 850 hPa 低涡和地面气旋影响产生的, 低涡中心和气旋中心北部的辐合上升运动触发对流不稳定能量释放, 产生暴雨。低空西南风急流为暴雨提供了充足的水汽和不稳定能量。暴雨区低层有较大的正螺旋度和非地转 Q^* 矢量辐合, 说明暴雨区有中尺度和大尺度上升运动相叠加。与夏季暴雨的不同在于副热带系统较弱而西风带系统起主导作用, 暴雨前后冷暖空气活动剧烈。

关键词 西南急流 低涡 气旋 螺旋度 Q^* 矢量 暴雨

引言

2003 年 4 月 17 日中午开始至夜间, 山东省出现春季罕见的大范围暴雨天气。暴雨区主要在山东的西部地区, 有 48 个县降水量在 50 mm 以上, 其中 7 个县雨量超过 100 mm, 泰山雨量最大 145 mm, 禹城次之 120 mm。同时出现了雷暴、大风和强降温。全省大部地区 24 h 降温 15 ~ 20 °C。暴雨范围和雨量之大, 降温之剧烈, 实属历史同期所罕见。本文应用天气图资料和 T213 数值预报产品中的分析资料和 6 h 预报资料对这次暴雨过程进行了诊断分析, 以探讨暴雨天气的形成机制, 为春季暴雨预报提供依据。

1 产生暴雨的环流系统

这次春季罕见的暴雨天气主要是受 850 hPa 低涡和地面气旋波影响产生的。暴雨之前和暴雨期间 16 日 08:00 至 18 日 08:00(北京时, 下同) 高空 500 hPa 上, 中高纬度贝加尔湖地区为稳定的东—西向低压区, 40° ~ 50° N, 80° ~ 130° E 的区域为风速大于 20 m·s⁻¹ 的西风带急流区。40° N 以南的东亚地区为东高西低的一槽一脊型经向环流, 17 日 08:00 中支槽与南支槽在 108° E 附近同位相叠加, 环流经向度加大, 东亚沿海高压脊也加强, 在 30° N, 130° E 附近出现 588 dagpm 的高压中心。在槽前脊后 23° ~

31° N, 110° ~ 115° E 的区域出现了风速大于 20 m·s⁻¹ 的偏南风急流, 南方暖湿气流活跃。

低层 850 ~ 700 hPa 华东地区也盛行偏南风。16 日 08:00 850 hPa 在河套地区生成低涡中心, 其东部在 38° ~ 41° N, 105° ~ 115° E 东北—西南向的切变线与 40° N 以北, 120° E 附近的低槽槽底相衔接, 切变线以北的蒙古区域在温度场上有一较强的锋区。锋区中的冷空气在北支槽后偏北气流的引导下从东北回流南下。由于我国大陆盛行偏南风, 加之地面辐射增温, 华北低层大气强烈升温增湿。在华东地区形成一支风速大于 12 m·s⁻¹ 的西南风低空急流, 一直北伸到渤海湾地区, 风速大于 20 m·s⁻¹ 的急流中心位于湖南西部。这支西南风急流把南方暖湿气流向华北输送, 华北地区迅速增温增湿。16 日 20:00 850 hPa 在秦岭地区出现 20 °C 的宽广的暖中心, 河套低涡范围也随之增大, 中心强度加强。其北部锋区强度增强到 3.7 °C·纬度⁻¹, 锋区前沿逼近 40° N。17 日 08:00 850 hPa 在四川东部生成低涡中心, 地面上气压异常降低, 高原以东地区形成了庞大而深厚的低压, 中心位于四川, 中心值为 999.5 hPa, 山东位于低压倒槽区。由于 850 hPa 以下低层深厚低压的发展, 气旋性环流加强, 其北部锋区中的偏北风分量也加强, 此时地面冷锋到达 38° N。17 日 20:00 850 hPa 山东位于低压倒槽的顶

部,黄河以南为西南风,黄河以北为东北风,地面上在低压倒槽内的鲁西南地区生成了气旋性环流中心。18日02:00,在鲁东南地区生成1005.0 hPa的闭合低压,地面冷锋进入低压中心形成地面气旋(图1a),之后向东北方向移动。暴雨产生在气旋波的北部冷暖空气汇合的低压槽内。

从850 hPa流场上可以清楚地看出,17日08:00在河套南部 36°N 、 109°E 附近生成一涡旋中心,发展东移,17日20:00到达 36°N 、 116°E ,18日02:00中心移到鲁西(图1b),18日08:00移到渤海湾地区。山东暴雨就是受此涡旋中心和地面气旋波的影响产生的。

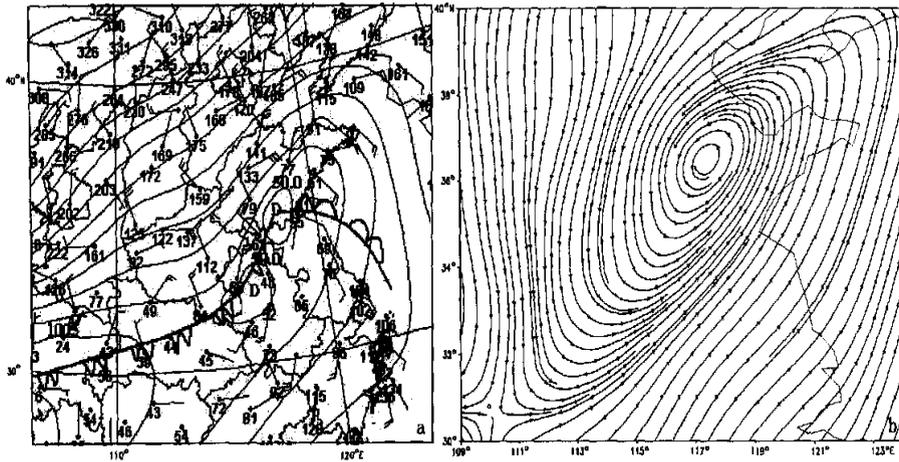


图1 2003年4月18日02:00(a)地面气压场、风场、气旋波位置和(b)850 hPa流场

2 热力条件分析

2.1 低层冷暖空气活动剧烈

在这次暴雨过程中,高层500 hPa温度变化不大,一直在 $-10 \sim -11^{\circ}\text{C}$ 之间,500 hPa以下低层温度变化剧烈,850 hPa上暴雨之前16日山东至河套地区为大于 16°C 的暖区控制,河套地区南部的暖中心温度达到 25°C ,16日20:00济南探空站850 hPa温度增至 19°C ;17日随着西北冷空气的影响,温度开始降低,到18日08:00,冷锋后部华北地区850 hPa的温度下降了 $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$,济南850 hPa温度降了 18°C 。地面上降温更明显,4月16日鲁西大部分地区的最高温度达到了 30°C ,从17日08:00到18日08:00鲁西和鲁中地区24 h降温 $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,冷空气影响之前,由于低层增温大气中储存了较高的能量,当较强冷空气影响时,冷暖空气交汇,促使能量释放产生强烈的辐合上升运动,产生暴雨天气。

2.2 大气中有较高的能量储存和能量释放

分析代表大气能量特征的 θ_{se} 和 K 指数的变化和分布特征可见,暴雨之前暴雨区的能量迅速升高,

17日20:00山东上空850~500 hPa平均 $\theta_{se} > 56^{\circ}\text{C}$,850 hPa上山东为 $\theta_{se} > 60^{\circ}\text{C}$ 的高能舌区,850~700 hPa之间的对流不稳定加大, $\Delta\theta_{se}$ (700~850 hPa)增强到了 -8°C 。北部能量锋区加强且明显南压,在 114°E 附近低层850 hPa的能量锋区到达 $36^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间,锋区强度达到了 $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{纬度}^{-1}$,锋区上出现明显的向南伸的低能舌。鲁西暴雨位于能量锋区的前沿。17日傍晚前后在能量锋区的前部不断有对流云团生成,沿黄河自西南向东北方向移动,造成暴雨和大暴雨天气。

从 K 指数的变化和分布特征可以看出,暴雨前后大气中的能量发生了急剧变化,暴雨之前16日20:00山东为 $K < 16^{\circ}\text{C}$ 的低能区,16日夜间至17日能量迅速升高,到17日14:00,鲁西和鲁中地区为 $K > 36^{\circ}\text{C}$ 的高能舌区;在高能舌的北部 $38^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$ 有很强东西向的能量锋区,在 115°E 附近锋区强度达到了 $9^{\circ}\text{C}\cdot\text{纬度}^{-1}$,且在锋区上有一个较弱的低能舌从东北向西南方向伸展,说明北部已有冷空气南下。17日20:00低能舌继续南伸,锋区前沿向南移了2个纬度,在 114°E 附近低能舌的前沿到达 36°N ,暴雨区位于能量锋区的前部,为 $K > 36^{\circ}\text{C}$

的高能中心。 K 指数与低层 θ_{se} 的分布和变化相一致,说明在暴雨之前,中低层高温、高湿、有较高的能量储存,暴雨区与高能中心相吻合。18 日 02:00 能量锋区移到鲁西北暴雨区上空, K 指数和低层 θ_{se} 都明显降低,18 日 08:00,高能舌区东移到山东东部的海区,山东被 $K < 30$ °C 和 850 hPa 上 $\theta_{se} < 50$ °C 的能量锋区控制。鲁西暴雨区的 K 指数降到了 12 °C,山东暴雨结束,说明暴雨期间大气中有较高的能量释放。

3 水汽条件分析

从暴雨前后水汽通量和水汽通量散度的分布和变化可以看出,暴雨区有较强的水汽输送和水汽辐合。从水汽通量的分布上可以看出,暴雨区的水汽主要来源于南海和孟加拉湾,由 850 ~ 700 hPa 的西南风和偏南风向暴雨区输送。16 日 20:00 至 18 日 02:00,暴雨前和暴雨期间 850 hPa 和 700 hPa 水汽通量的高值中心轴线近似于西南—东北向,从广西、湖南、湖北、河南直到山东西部,水汽通量中心在湖南,17 日 08:00 850 hPa 水汽通量的中心值达到 $300 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})^{-1}$,山东西部位于水汽通量的高值舌区(图略)。分析暴雨区的水汽通量散度可见,在暴雨期间暴雨区低层有强烈的水汽辐合,17 日 20:00 在鲁西暴雨区的西部 850 hPa 为 $-900 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})^{-1}$ 的强辐合中心(图 2),辐合中心沿黄河向东北方向移动,18 日 02:00 到达黄河口地区,之后移出山东。17 日 20:00 至 18 日 02:00 在辐合中心经过的鲁西和鲁北地区产生了暴雨天气。从大气

中的相对湿度变化可以看出,16 日 20:00 850 hPa 华南沿海相对湿度为 90% 的湿区随时间向北伸展,17 日 14:00 影响到鲁西暴雨区,700 hPa 的湿度也增大到 80% 以上。17 日 20:00 至 18 日 02:00 暴雨期间暴雨区上空 300 hPa 以下的大气相对湿度都达到 90% 以上,近于饱和状态。暴雨之后,18 日 08:00 500 hPa 以上的湿度明显降低,转为相对湿度小于 50% 的干区。

4 动力条件和暴雨的触发机制

4.1 散度、涡度、垂直速度和螺旋度特征

分析暴雨前后散度场的分布和变化可见,暴雨期间 500 hPa 以下为辐合,以上为辐散。低层 925 hPa 辐合最强,中心值达到 $-90 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,850 hPa 的辐合中心与暴雨区相一致。17 日 08:00 850 hPa 位于 $37^\circ \text{N}, 110^\circ \text{E}$ 附近的 $-50 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的辐合中心,17 日 20:00 东移到鲁西暴雨区上空,18 日 02:00 移到渤海上空。在暴雨区上空 400 ~ 150 hPa 之间有强烈的辐散与低层辐合相配合,250 hPa 辐散最强,17 日 20:00 在 $37^\circ \text{N}, 116^\circ \text{E}$ 附近形成了 $100 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的辐散中心。

从涡度的变化和分布可以看出,暴雨区与低层 850 hPa 正涡度中心相一致,暴雨出现在低层正涡度中心加强期间。17 日 08:00 700 hPa 以下在 $33^\circ \text{N}, 112^\circ \text{E}$ 附近生成正涡度中心,850 hPa 涡度中心值为 $50 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,涡度中心加强,向东北方向移动,17 日 20:00 到达 $36^\circ \text{N}, 115^\circ \text{E}$ 附近,中心强度增强到 $140 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,中心长轴走向为东北—西南向,山东西部暴雨区位于正涡度中心东部的强梯度区,正涡度中心范围扩大且向东移,18 日 02:00 中心位于山东西部,与图 1b 中的涡旋中心相一致,大于 $100 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的涡度中心与暴雨区相吻合。从穿越暴雨区东—西向的剖面图上(图略)可以看出,正涡度中心在 850 hPa 最强且随高度向西倾斜,暴雨区上空 300 hPa 以上为弱的负涡度区。

分析垂直速度的特征可以看出,暴雨期间暴雨区上空整层都为上升运动,500 hPa 附近上升运动最强,上升运动中心与低层 850 hPa 辐合中心和正涡度中心非常一致,与暴雨区相吻合。17 日 20:00 暴雨区 500 hPa 上升运动中心值达到 $-16 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3)。从南—北向和东—西向穿过暴雨区的速度合成垂直剖面上可以看出,暴雨区的强上

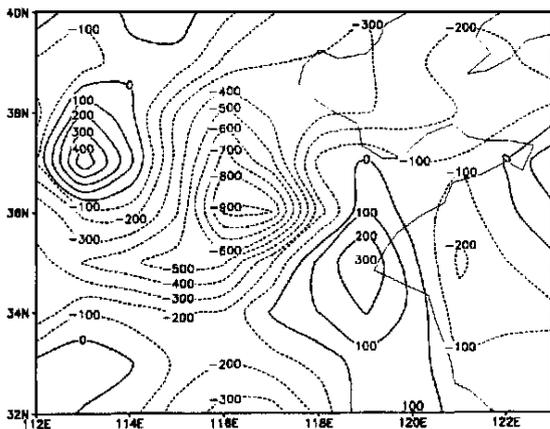


图 2 2003 年 4 月 17 日 20:00 850 hPa 水汽通量散度
(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})^{-1}$)

升运动产生在 700 hPa 以下东北风与偏南风汇合的区域。

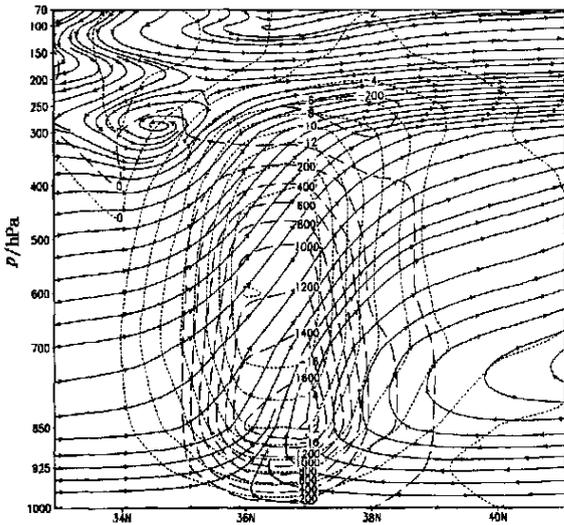


图3 2003年4月17日20:00沿116°E穿过暴雨区的垂直剖面图

(短虚线为垂直速度等值线,单位: $10^{-3} \text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$,长虚线为螺旋度等值线,单位: $10^{-9} \text{hPa}\cdot\text{s}^{-2}$,流线为 $v-\omega$)

垂直螺旋度代表大气螺旋式上升的特征^[1-3],为了使在有正涡度、上升运动的情况下有正的螺旋度,在 p 坐标下把螺旋度的表达式写为: $h_{cl} = -\omega \cdot \xi$ 。为了突出大气上升运动的特征,在计算时,令有下沉运动时螺旋度为零,只计算有上升运动时的螺旋度。当有正涡度($\xi > 0$)上升运动($\omega < 0$)时, $h_{cl} > 0$;反之,若有负涡度、上升运动时, $h_{cl} < 0$ 。分析发现,暴雨区上空 300 hPa 以下有较强的正螺旋度,中心在低层 850 hPa 附近,17日20:00暴雨区上空 850 hPa 的螺旋度达到 $1800 \times 10^{-9} \text{hPa}\cdot\text{s}^{-2}$,螺旋度中心与 850 hPa 上西南风与东北风汇合形成的涡旋中心非常一致。从穿过暴雨区的垂直剖面图(图3)上可以看出,暴雨区上空的正螺旋度区与上升运动区相一致,正螺旋度中心位于上升运动中心的下层,与低层正涡度中心和辐合中心相一致。说明低层西南暖湿气流与东北干冷空气在鲁西地区汇合,形成气旋性环流,在地面产生气旋波,气旋中心的正涡度辐合产生上升运动,低层暖湿空气螺旋式上升,促使对流不稳定能量释放,产生强烈的上升运动,产生暴雨天气。暴雨产生在地面气旋波的北部、偏南风与东北风之间的汇合区。

4.2 Q^* 矢量特征

Q^* 矢量反映大气中非地转速度的特征,与次级环流有较好的对应关系, Q^* 矢量指向次级环流的上升支,用 Q^* 矢量表示的湿锋生函数反映了气团的锋生、锋消状况^[4-5]。分析 Q^* 矢量的分布可见,只有在暴雨期间 17日14:00至18日02:00低层 925 ~ 850 hPa 之间 Q^* 矢量才有较大值,17日20:00 925 hPa 的 Q^* 矢量最大, $37^\circ \text{N}, 116^\circ \text{E}$ 中心值达到 $1100 \times 10^{-12} \text{m}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$ 。 Q^* 矢量高值中心位于暴雨区的西北部, Q^* 矢量从西北方向的冷锋区指向暴雨区(图4)。分析 Q^* 矢量散度可见,在暴雨期间暴雨区低层 925 ~ 850 hPa 为 Q^* 矢量辐合区,17日20:00 925 hPa 辐合最强,在 $36^\circ \text{N}, 116^\circ \text{E}$ 中心值达到 $-5 \times 10^{-15} \text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$ 。说明在暴雨区低层有较强的中尺度非地转风辐合,增强了暴雨区的低层辐合,产生次级环流。次级环流的上升支与大尺度上升运动相叠加,加强了暴雨区的上升运动,产生强降水,造成暴雨。

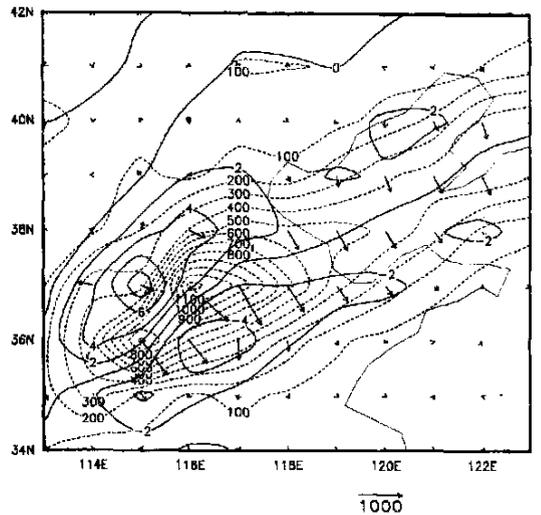


图4 2003年4月17日20:00 925 hPa Q^* 矢量(箭头)、 Q^* 矢量绝对值(虚线,单位: $10^{-12} \text{m}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)和 Q^* 矢量散度(实线,单位: $10^{-15} \text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)

分析用 Q^* 矢量计算的湿锋生函数分布可见,16日20:00在 $39^\circ \sim 44^\circ \text{N}, 105^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 有一东北—西南向的强湿锋生带与冷锋锋区相配合,自西北向东南有规律地移动,18日02:00移到鲁西北地区,暴雨产生在湿锋生带的前部暖区中。由此可见在冷锋南下的过程中有强烈的湿锋锋生,锋区不断加强,

冷空气影响山东时造成暴雨、剧烈降温和大风天气。

5 讨论

从以上分析可以看出,这次春季暴雨的物理量场特征与夏季暴雨相同^[3,5],暴雨产生在高温高湿和对流不稳定的大气中,暴雨前低层大气急剧升温增湿,地面温度达到了 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 850 hPa 的 θ_{se} 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, K 指数也达到了 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$;在暴雨区有强烈的水汽辐合和上升运动,低层较强的水汽辐合中心和较大的正螺旋度中心及中层较强的上升运动中心都与暴雨区相对应,且在暴雨区有非地转风辐合产生的中尺度上升运动与大尺度上升运动相叠加。在影响系统上也与夏季暴雨有相似之处,西南风低空急流对暴雨的形成起了关键性作用,它一方面向暴雨区输送暖湿空气,造成暴雨区的对流不稳定,另一方面在暴雨区产生辐合,触发对流不稳定能量释放产生暴雨。

这次春季暴雨与夏季暴雨的不同在于西风带系统起主导作用,暴雨之前强烈升温增湿,暴雨之后剧烈降温,冷暖空气活动都较剧烈。春季副热带高压还较弱, 110°E 以东 $850\sim 500\text{ hPa}$ 深厚而强盛的西南气流形成于西风槽前和华东沿海高压脊之后, $700\sim 500\text{ hPa}$ 上的西风带中支槽和南支槽在 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间同位相叠加,环流经向度加大,槽前西风带高压脊与海上副热带高压相叠加在华东沿海形成了较强的高压坝。低层由于青藏高原的辐射加热和西风槽的动力减压作用,近地面层形成了深厚而宽广的低压系统,低压中心位于四川,其倒槽北伸到 40°N 附近。在高原以东地区形成了东高西低的气压场分布。 500 hPa 以下这种东高西低的气压场分布使得西南气流异常强盛,西南暖湿气流在华东直达 40°N 以北。强盛的西南气流把孟加拉湾和南海的水汽源源不断地向华北输送,为暴雨的形成提供了充足的水汽条件。

在春季,北方冷空气势力还较强,在 40°N 以北堆积的冷空气在北支西风槽的引导下南下,低层槽后偏北风携带的较强冷空气与西南暖湿气流在 36°N 附近相遇,形成气旋性环流,环流东移发展成较深的低涡,地面上强冷锋进入低压倒槽生成气旋。低涡中心和地面气旋中心北部(图1)的强烈辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生暴雨和大暴雨天气。低层低涡和地面气旋在高空西南气流引导下移向东北,山东暴雨结束。

6 结论

(1) 850 hPa 低涡和地面气旋是造成暴雨的主要天气系统。

(2) 暴雨产生在高温高湿和对流不稳定大气中,暴雨区有较强的水汽辐合,西南风低空急流为暴雨提供了充足的水汽条件。

(3) 低层较强的正螺旋度中心和中层较强的上升运动中心与暴雨区相对应,暴雨区低层有非地转 Q^* 矢量辐合。

(4) 中尺度上升运动与大尺度上升运动相叠加触发对流不稳定能量释放产生暴雨。

(5) 与夏季暴雨的不同在于西风带系统起主导作用,暴雨前后冷暖空气活动剧烈。

参考文献

- 1 伍荣升.大气动力学.北京:气象出版社,1990.96-101
- 2 吴宝俊,许晨海,刘延英,等.螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用.应用气象学报,1996,7(1):108-111
- 3 杨晓霞,华岩,黎清才,等.螺旋度在暴雨天气分析与预报中的应用.南京气象学院学报,1997,20(4):499-504
- 4 张兴旺.修改的 Q^* 矢量表达式及其应用.热带气象学报,1999,15(2):162-167
- 5 杨晓霞,谭志华,华岩.一次特大暴雨天气的 Q^* 矢量分析.气象,2001,27(2):44-47

(下转第67页)

Formation Mechanism Analysis of a Heavy Rain in Shandong Province in Spring

Yang Xiaoxia Zhao Yu Gao Liuxi

(Shandong Meteorological Office, Jinan 250031)

Abstract: By using the analyzed and 6-hour prediction data provided by the T213 model, the causes of a heavy rain and the energy and moisture conditions were analyzed. The dynamic trigger mechanism was studied through analyzing the features of helicity and Q^* vectors. The result shows that the heavy rain was influenced mainly by the low vortex at 850 hPa and the surface cyclone; the convergence and ascending motion in the center of the vortex and north of the cyclone center triggered convective instability energy release, resulting in the heavy rain. The low-level Southwest Jet provided sufficient moisture and instability energy. The strong positive helicity and the intensive convergence of Q^* vectors at the low level in the raining area indicate that there was superposition of mesoscale and synoptic-scale ascending motions. Differing from summer heavy rains, the systems in the westerly belt played a dominant role in spring heavy rain formation, but the subtropical systems are weaker and cool and warm air motions were very active before and after the heavy rain.

Key words: southwest jet, low vortex, cyclone, helicity, Q^* vector, heavy rain