

孙兴池, 吴炜, 周雪松, 等. 2013. 经向切变线暴雨落区分析. 气象, 39(7): 832-841.

# 经向切变线暴雨落区分析<sup>\*</sup>

孙兴池 吴 炜 周雪松 郭俊建 姜 鹏

山东省气象台, 济南 250031

**提 要:** 应用常规观测资料、NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料, 对有静止锋和无锋面的两类经向切变线的暴雨落区从地面形势、高低空系统配置及冷暖空气的相互作用等方面进行精细分析, 补充完善低涡、切变线类天气系统暴雨落区位于低涡东南象限的一般概念模型, 以满足精细化预报的需求。结果表明: 有地面静止锋配合和无锋面的两类经向切变线, 在空间结构上有显著差异。由于有静止锋配合的切变线系统具有锋面结构, 锋面抬升作用显著, 暴雨的第一落区位于地面倒槽顶端; 其次, 由于冷暖空气相互作用阶段不同, 在地面中尺度气旋发展成熟阶段, 由于干空气侵入暖湿输送带上空, 在静止锋前暖区中, 出现暴雨第二落区。在无锋面配合的经向切变线过程中, 地面不存在南北风交替的锋面系统, 除了低涡东南象限较强的水汽辐合造成的暴雨区, 850 hPa  $\theta_e$  高值区、高比湿舌和弱水汽辐合重合的区域, 由于潜在对流不稳定造成另一个暴雨区, 且不需低空急流存在。

**关键词:** 经向切变线, 暴雨落区, 系统空间结构, 冷暖空气相互作用

**中图分类号:** P458      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 07. 004

## Fine Analysis on the Rainfall Distribution of Meridional Shear Line Heavy Rain

SUN Xingchi WU Wei ZHOU Xuesong GUO Junjian JIANG Peng

Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

**Abstract:** Based on the conventional observational data and NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data, two types of heavy rains in relation to the surrounding longitudinal shear lines with or without concomitant stationary front are investigated. The surface, high and low level synoptic configuration and interaction between cold and warm airs are carefully analyzed to supply the general conceptual model for the torrential rains in the southeast quadrant of the low vortex and to meet the requirement for refined forecasting. The results indicate that these types of shear lines with or without concomitant front are obviously different in the spatial structure. Because of the existing frontal structure in the shear line system that is accompanied by stationary front, the effect of front lifting is significant. And then, one of the favorable heavy rainfall zones is located in the surface inverted trough or the northerly airflow behind the surface low; another one is in the warm zone of the stationary front, resulting from the dry incursion above the warm conveyor belt during the phase of the interaction between cold and warm air, especially during the mature phase of the extratropical cyclone. On the other hand, during the meridional shear line heavy rain process without the accompanying of the stationary front, there is not the frontal system jointly affected by south winds and north winds so the extremely heavy rainfall appears in the southeast quadrant of the low level vortex. Another likely zone of so heavy rainfall is the overlap zone of the high  $\theta_e$  tongue at 850 hPa, high specific humidity tongue and weak water vapor convergence that produce potential convective instability, without the inful-

<sup>\*</sup> 全国暴雨团队北方暴雨项目和山东重点项目(2012sdqxz04)共同资助  
2013 年 1 月 18 日收稿; 2013 年 5 月 6 日收修定稿  
第一作者: 孙兴池, 主要从事天气预报和相关技术研究. Email: sdqxts@163. com

ence of the low-level jet.

**Key words:** meridional shear line, torrential rain location, spatial structure of synoptic system, interaction between cold and warm airs

## 引言

切变线是指 700 和 850 hPa 上气旋性的风向不连续线,多数降水过程都由 500 hPa 高空槽和 700、850 hPa 切变线共同影响产生。由于低涡总是沿切变线活动,低涡和切变线相互依存,有时低涡减弱演变为切变线,有时切变线上出现闭合环流,生成低涡,低涡和切变线密不可分,因此,在划分降水影响系统时,山东省气象台把低涡和切变线划为一类,我们对影响系统的划分原则是以地面系统为主,兼顾高空影响系统。比如,把低层为低涡、切变线,地面为静止锋或无锋面的天气系统划归为低涡、切变线类,而低层为低涡、切变线,地面有冷锋或温带气旋时则归为低槽冷锋或温带气旋过程。又根据地面有无静止锋,划分为有静止锋和无锋面两类切变线过程。低涡、切变线是产生暴雨的重要天气系统,有地面静止锋配合的切变线过程,暴雨落区往往位于地面静止锋后 150 km 左右(孙兴池等,2012);而地面无锋面系统配合的切变线过程,地面形势可能为高压后部低压前部、鞍型场及均压场等,暴雨落区预报难度大,空、漏报概率高。因此,切变线暴雨的预报是实际业务的难点。

暴雨落区的精细预报一直是天气研究的重点,苗爱梅等(2012)应用 GPS/MET 监测资料尝试改进暴雨预报模型取得了良好效果;杨成芳等(2012)则应用风廓线雷达等加密探测资料揭示了冷式切变线暴雨的动力结构特征。

孙兴池等(2012)对纬向切变线的暴雨落区进行了精细分析,认为虽然低层切变线的位置对暴雨落区很重要,但不是判断暴雨落区的唯一依据,影响系统的空间结构及冷暖空气的相互作用对暴雨落区的精细预报至关重要。在与低涡相联系的切变线过程中,一般认为,暴雨落区位于低涡东南象限,这是基于该位置较为暖湿、高空为正涡度平流、可能具有更强的低层辐合等诸多有利因素的考虑,但低涡的东南象限较为宽泛,在低涡东南象限和切变线前预报暴雨落区,远远不能满足定点预报的精细化需求。

本文通过对有静止锋配合和无锋面的两类经向

切变线暴雨个例研究,分析两次过程暴雨落区及形成机制,以期对该类暴雨的精细预报提供参考。

2010 年 7 月 19 日和 2000 年 8 月 9 日,同样在 850 hPa 经向切变线上存在低涡的形势下,一次低涡位于鲁西北,而另一次低涡位于内蒙古东部,都造成了山东较大范围的暴雨。

## 1 有静止锋配合的经向切变线暴雨落区

根据文献(曹钢锋等,1988),经向切变线主要产生在盛夏季节,500 hPa 副热带高压(以下简称副高)强大而稳定,中心位于日本海附近,西风槽东移时受副高阻挡停滞加深,在 700 和 850 hPa 往往表现为经向切变线。

### 1.1 暴雨概况

2010 年 7 月 19—21 日,华北、东北、黄淮出现大范围暴雨。暴雨落区呈东北—西南向,与切变线上的低涡移向一致,华北东部、东北南部、山东半岛西部出现大暴雨,铁岭过程雨量为 387 mm,华北南部最大雨量为山东乐陵 206 mm,次大雨量为河北抚宁 134 mm(图 1a)。

经向切变线影响华北的时段主要在 19 日白天到夜间,此阶段地面有静止锋配合,乐陵雨量 204 mm、抚宁 133 mm(图 1b)。以下重点分析该时段暴雨的形成机制。

由 19 日 20 时(图 2)天气图可见,在 500 hPa(图 2a)西风槽东移过程中,由于副高阻挡,加深为低涡,涡后冷温度槽明显。在 500 hPa 低涡东南侧,850 hPa 低涡沿切变线移至华北南部(图 2b 和 2c),且低涡后部冷中心、前部低空急流清楚,地面伴随倒槽和低压中心,通过低压中心的地面锋面在 19 日下午至夜间 10 多个小时停滞在鲁西北,可分析出与 850 hPa 冷暖平流相对应的静止锋(图 2d)。虽然 850 hPa 锋区明显,但静止锋后无强大冷高压尾随,切变线过程有别于冷锋或温带气旋的特点有二:一是近地面层没有强大的冷空气堆;二是虽然存在地面锋区或低压、倒槽,但持续 6 h 以上稳定少动,从

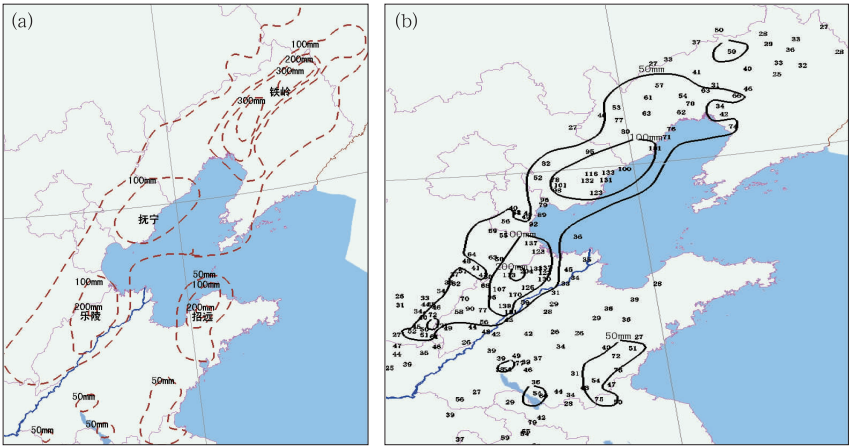


图 1 2010 年 7 月 19 日 08 时至 22 日 08 时过程雨量(a)和 24 h 雨量(b)(单位:mm)  
Fig. 1 Observed accumulated rainfall from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 22 July 2010 (a) and observed 24-h accumulated rainfall (b)(unit: mm)

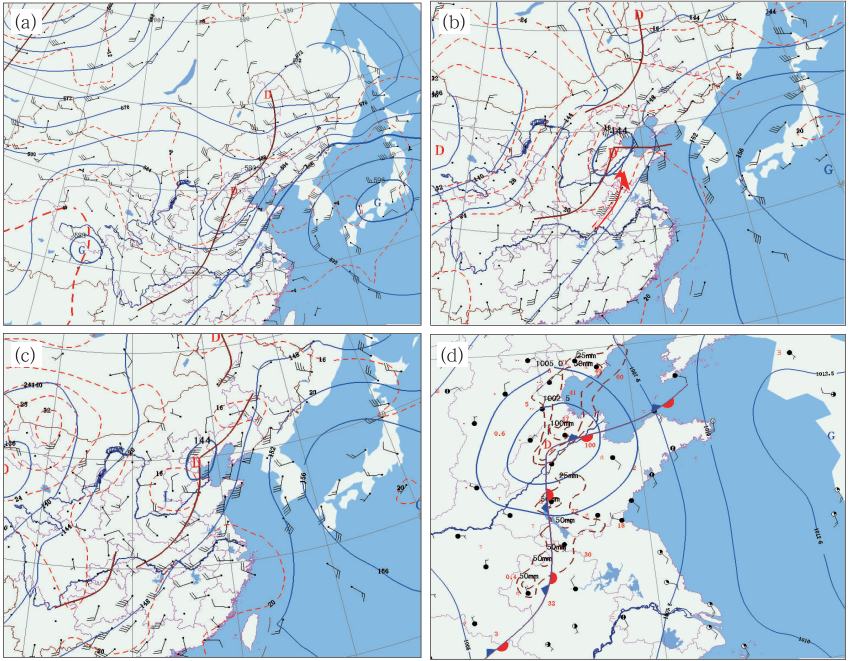


图 2 2010 年 7 月 19—20 日天气图  
(a)19 日 20 时:500 hPa,(b)19 日 20 时:850 hPa,(c)20 日 08 时:850 hPa,(d)19 日 20 时:地面  
(虚线为 6 h $\geq$ 25 mm 雨区)

Fig. 2 Synoptic charts from 19 to 20 July 2010

(a) 500 hPa at 20:00 BT 19, (b) 850 hPa at 20:00 BT 19, (c) 850 hPa at 08:00 BT 20, (d) surface at 20:00 BT 19  
(dashed line for 6 h rainfall  $\geq$  25 mm)

垂直剖面图上(图 3a),也可见本次过程为有静止锋配合的经向切变线过程。

19 日白天,沿经向切变线出现了南北向暴雨区(图 2d),最大降水位于地面倒槽北端的乐陵,08—14 时 6 h 雨量 68 mm,14—20 时 6 h 雨量 135 mm,次雨量中心位于兖州,14—20 时 6 h 雨量为 77 mm。

1.2 产生于倒槽顶部的暴雨中心成因分析

雨量中心轴线位于 117°E,因此制作 117°E 垂直剖面图。7 月 19 日 14 时穿过雨量中心的(乐陵)剖面图(图 3a)可见,暴雨区存在锋区结构( $\theta_e$  密集区),等温线在锋区内下凹,与一般冷锋或温带气旋

过程不同的是近地面无强大冷空气堆,干冷空气主体位于 800~700 hPa 高度上( $\theta_e$  低值区);第一层锋区在 800 hPa 以下,锋区由陡立转为向冷区倾斜,切变线位于锋区内;第二层锋区在 800~600 hPa 之间,是干冷空气主体与暖湿气流之间向暖区的湿斜压锋区,该层不稳定能量释放促进上升运动发展加强,第三层锋区为 600 hPa 以上与西风槽相伴随的向冷区倾斜的高空锋区。

第二层锋区在弱冷空气和强暖湿气流相互作用的环流形势下较为常见(游景炎等,1992),对暴雨的形成起重要作用。在此次过程中,由地面倒槽北端辐合上升的暖湿空气到达该层后能够继续上升,有利于深对流发展,由图 3b 可见暴雨区上空(乐陵:38°N)整层为上升运动,900~500 hPa 高度层维持  $-20 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的较强上升运动,此阶段暴雨区宽度为 1 个纬距左右,集中在 37°~38°N,位于地面低压中心和倒槽北端之间,即该类暴雨落区与地面静止锋位置密切相关,系统本身具有明显后倾结构,上升运动中心位于锋后,地面静止锋的锋面

抬升作用和冷暖空气交汇触发了初始上升运动,中、低层遇上了向暖区倾斜的不稳定层结获得继续向上的动力,后倾槽结构使得暖湿空气沿锋面爬升,雨量中心在锋后,暴雨带位于地面锋后 1 个纬距左右。

暴雨首先出现在地面倒槽北端,除了如上所述的 3 层锋区结构,即低层向冷区倾斜的锋区抬升暖湿空气,中层向暖区倾斜的湿斜压锋区形成不稳定层结能够使上升运动发展,对流层中高层又转为具有高空冷锋结构的向冷区倾斜的  $\theta_e$  密集区。还因为地面低压中心并不是辐合中心,图 4 所示,19 日 14 时,低压中心位于济南附近,地面辐合中心位于其西北方向的德州,19 日 20 时,低压中心向北移至商河附近,地面辐合中心则移至渤海,地面辐合中心始终偏于低压中心的北侧,和地面倒槽北端对应更好。

总之,暴雨首先产生于倒槽顶部偏北风中,位于地面低压中心以北到倒槽之间的区域。

该处在垂直方向具有锋区的 3 层空间结构;在水平方向具有强辐合,因而产生强降水。这可以解

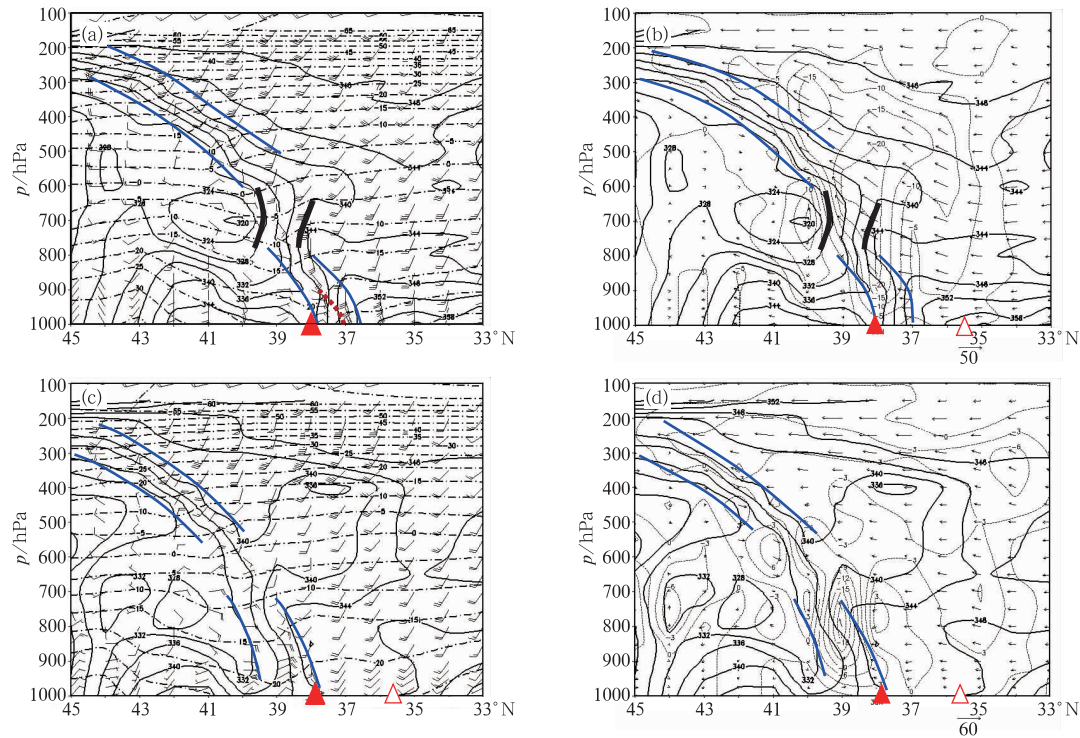


图 3 2010 年 7 月 19 日 14(a, b)和 20 时(c, d)暴雨区经向剖面图

(a, c)  $\theta_e$ (单位:K)和温度(虚线,单位:℃), (b, d)  $\theta_e$ (单位:K)和垂直速度(单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(“▲”为暴雨中心,“△”为次暴雨中心)

Fig. 3 Meridional cross sections in rainstorm area at 14:00 (a, b) and 20:00 (c, d) BT 19 July 2010

(a, c)  $\theta_e$ (unit:K) and temperature (dashed line, ℃), (b, d)  $\theta_e$ (unit: K) and vertical velocity (unit:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(▲ is rainstorm center, △ is second rainstorm center)



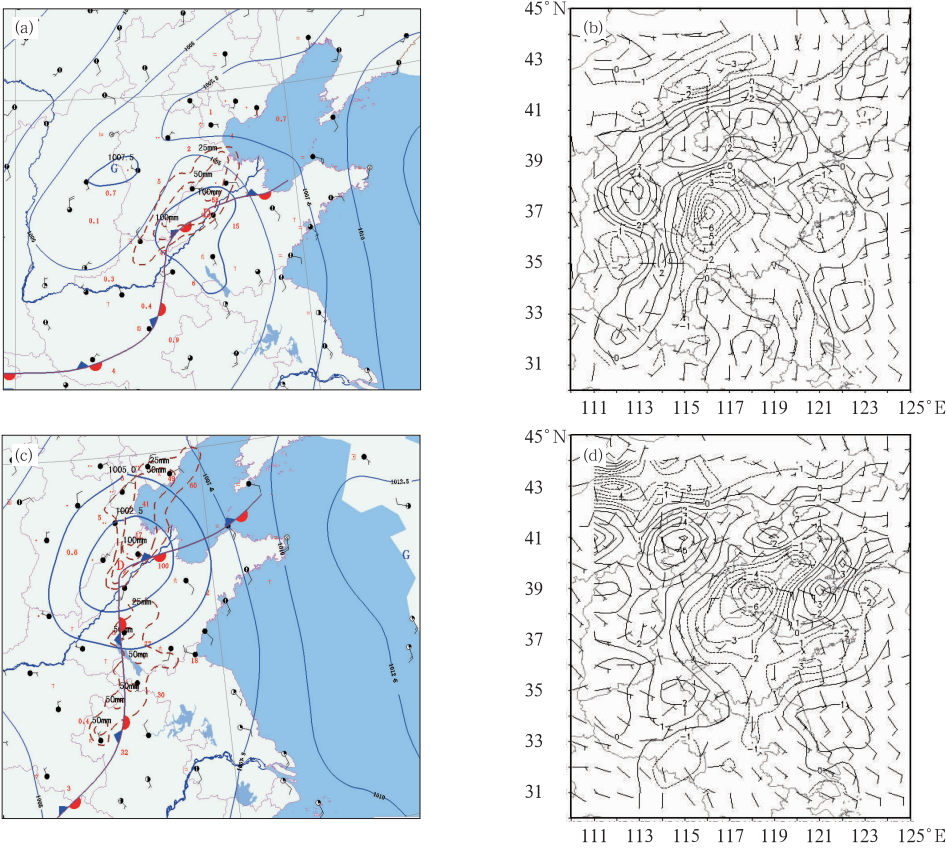


图 4 2010 年 7 月 19 日 14(a, b)和 20 时(c, d)地面形势 (a, c; 虚线为 6 h $\geq$ 25 mm 雨区) 与散度场(b, d; 单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 4 Surface synoptic charts (a, c; dashed line for 6 h rainfall  $\geq$  25 mm) and divergence fields (b, d; unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 14:00 (a, b) and 20:00 (c, d) BT 19 July 2010

释为什么倒槽降水总是比正槽降水大的原因。

1.3 次暴雨中心成因分析

次暴雨中心兖州 19 日上午仅有微量降水,下午才出现暴雨,而位于倒槽北端的乐陵上午雨量已达 68 mm,可见次雨量中心落后于倒槽北端暴雨出现时间。由于次暴雨中心出现在静止锋前部暖区中,说明对流不稳定是其形成的原因,为什么次雨量中心落后出现呢?

锋前出现的次雨量中心位于低空急流轴上,其形成暖输送带使得静止锋前低层空气极为暖湿(达 356 K),当中空有干空气侵入时,不稳定能量释放产生暴雨,从 14—20 时剖面图(图 3)的演变来看,中空的确有干空气侵入(20 时  $\theta_e=336 \text{ K}$  处),这与地面中尺度气旋形成有关,来自低涡后部的干空气叠加到了低涡前部的暖湿空气之上。

从图 5a 可见,19 日 14 时乐陵附近存在风场辐合中心但气旋性流场并不明显,山西、河北交界处

20℃冷中心清楚。20 时,伴随冷空气进一步东移南下,乐陵附近出现气旋性流场(图 5b),气旋后部干冷空气南下至皖北一带。在地面气旋性流场形成过程中,高空干侵入叠加到了低层暖输送带上,对流发展,暖区出现次雨量中心,由于次雨量中心在气旋性流场形成阶段产生,因而较倒槽顶端最先出现的暴雨区时间偏晚。当然,由于本次过程中冷空气较暖空气势力弱,低压后部未出现强大高压,并没有出现典型的温带气旋。但地面低压 19 日 05 时在河南生成,20 日 05 时移至河北唐山附近,期间移动缓慢,可分析出静止锋,从地面风场、温度场来看,19 日 20 时具有气旋特征。

从 850 hPa 比湿和水汽通量散度场来看(图 5c 和 5d),19 日 14 时,  $-12 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽通量辐合中心出现在比湿舌前方,经向切变线前比湿 $\geq 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的暖湿输送带上为辐散区,此阶段暴雨出现在低空急流的左前方;至 20 时,低涡移至鲁西北,经向切变线西侧的干冷空气向东南方向

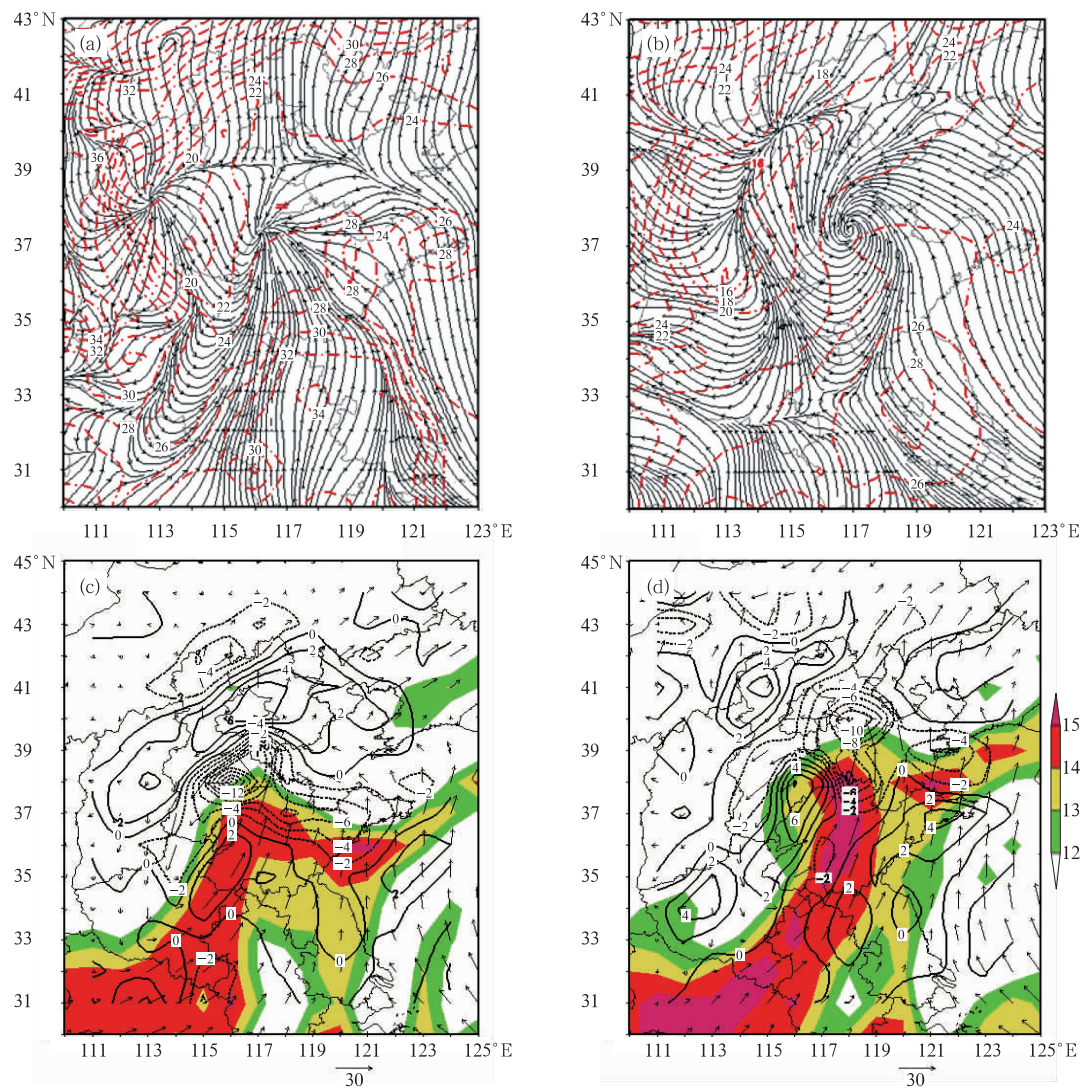


图 5 2010 年 7 月 19 日 14(a, c)和 20 时(b, d)地面流场、等温线(a, b; 点化线为等温线)及 850 hPa 比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和水汽通量散度(c, d; 单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Surface stream fields and isotherm fields (dotted line) at 14:00 (a) and 20:00 BT (b), 850 hPa specific humidity (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence (unit:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 14:00 (c) and 20:00 (d) BT 19 July 2010

入侵,比湿场出现了向东南凸起的 $\leq 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 穹窿状干区,暖湿舌上出现了一 $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱水汽辐合,该辐合区比湿达 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,刚好位于兖州附近。可见,由于干冷空气的向东南方向入侵,除了在垂直方向上中空干侵入到暖湿输送带上外,水平方向上由于冷暖空气交汇形成了水汽辐合。

一般认为,850 hPa 的 $\theta_e \geq 340 \text{ K}$ 高温高湿舌与暴雨落区相关密切。从 19 日 08、14 和 20 时 3 个时次的 $\theta_e$ 、比湿 $\geq 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及风场水平分布可见(图 6a、6b 和 6c),与经向切变线和低涡前暖切变相

对应,有经向和纬向两个 $\theta_e$ 密集区,是干冷和暖湿空气的交界面,低涡东南象限为暖湿气流控制下的 $\theta_e \geq 340 \text{ K}$ 高值区。19 日 08—20 时,经向切变线西侧 $\theta_e$ 低值区向东南方向扩展,而其东侧西南风急流加强北上,比湿 $\geq 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高湿舌向北发展。至 19 日 20 时,低空西南急流形成的暖输送带配合 $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高湿舌,同时, $\theta_e$ 低值区向东南侵入高湿区,也出现了类似水汽图上的“穹窿”形态,正是在干空气侵入暖湿舌的过程中,低涡前部暖区出现暴雨。

从垂直流场和相对湿度的经向剖面图演变分析



(图 6d、6e 和 6f), 19 日 08 时, 36°N 以南整层相对湿度大于 90%, 但上升运动较弱, 并无强降水; 36°N 以北低层相对湿度较小, 但高层  $\geq 90\%$ , 意味着 36°N 以北云量增厚, 降雨来临。14 时, 整层相对湿度大于 90% 区向北扩展, 并伴随较强上升运动, 36°N (兖州附近) 上空 400~200 hPa 出现相对湿度小于 70% 的相对干区, 下湿上干对流不稳定加强, 19 日 15 时 1 h 雨量 57.9 mm; 20 时, 36°N 上空相

对湿度  $\leq 60\%$  干侵入 300~500 hPa 之间, 兖州降水结束, 可见次雨量中心正是出现在中高层干侵入到暖输送带过程中。

总之, 从 19 日 20 时 117°E 经向剖面图上相当位温、相对湿度的垂直分布可见, 次暴雨中心出现时中层发生了干侵入, 次雨量中心出现在暖区, 落后于倒槽(或低压)冷区暴雨出现时间, 持续时间也相对较短, 在干侵入到达对流层低层时即结束。

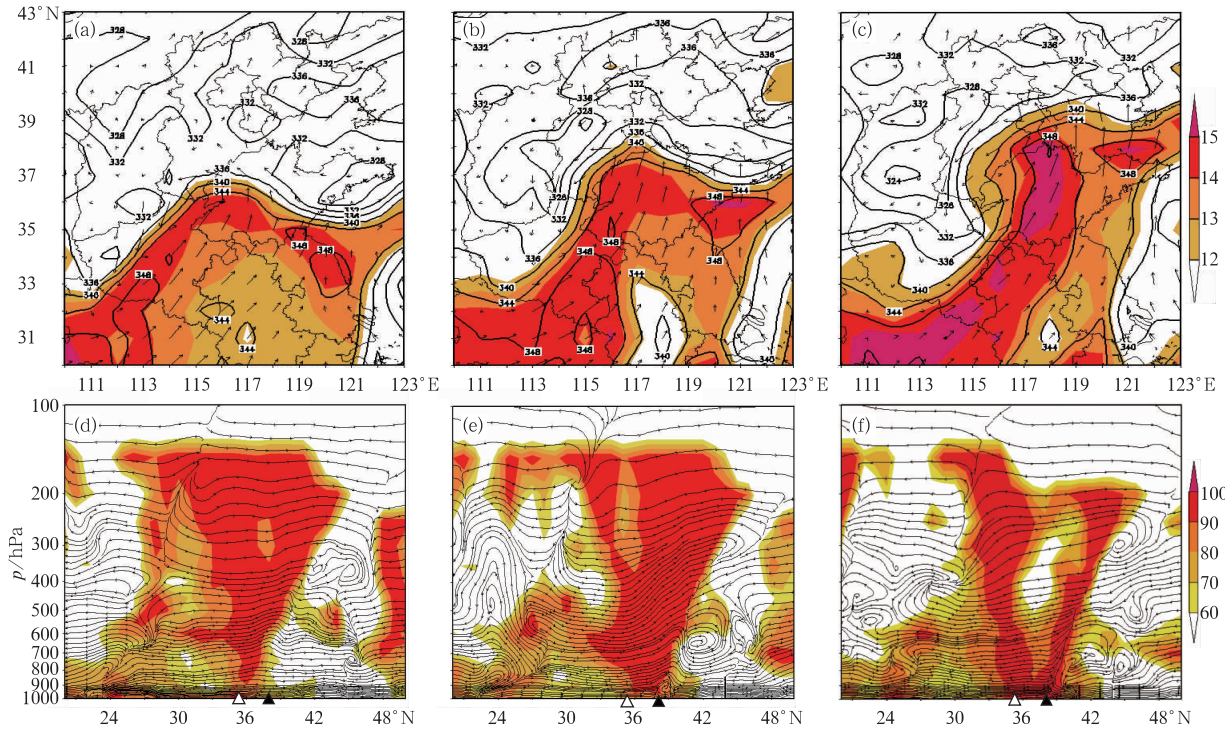


图 6 2010 年 7 月 19 日 (a, b, c) 暴雨不同时段 850 hPa 比湿(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和  $\theta_e$ (单位: K)分布  
及 (d, e, f) 垂直流场和相对湿度的经向剖面图  
(a, d) 08 时, (b, e) 14 时, (c, f) 20 时  
(“▲”暴雨中心, “△”次暴雨中心)

Fig. 6 850 hPa specific humidity (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and  $\theta_e$  (unit: K) distribution (a, b, c), and meridional cross sections of vertical stream fields and relative humidity (d, e, f) on 19 July 2010  
(a, d) 08:00 BT, (b, e) 14:00 BT, (c, f) 20:00 BT  
(▲ is rainstorm center, △ is the second rainstorm center)

2 无静止锋配合的经向切变线过程

有些切变线暴雨过程, 在地面上无明显的锋面系统, 降水完全出现在地面南风中。此时, 地面形势较为复杂, 可能为东高西低、鞍型场和均压场等。

如 2000 年 8 月 8—10 日, 受经向切变线影响, 华北及东北西南部出现大范围暴雨(图 7), 局部出现特大暴雨, 山东莱芜降水量最大, 为 284.6 mm,

河北景县次之为 278.9 mm。

图 8 所示, 本次过程发生在 8 月上旬副高强盛时期, 副高西伸和大陆高压合并, 588 dagpm 线在 30°N 以北, 亚洲高纬度地区为两槽一脊型, 贝加尔湖为暖脊控制, 内蒙古中部出现切断低涡, 低涡处于贝加尔湖暖脊南侧, 与冷空气完全切断, 低涡后部甚至出现了暖中心, 致使我国新疆以东无冷空气影响。地面图上, 华北、东北地区处于海上高压后部和暖低压前部偏南气流中; 在对流层低层, 从东北伸向江汉

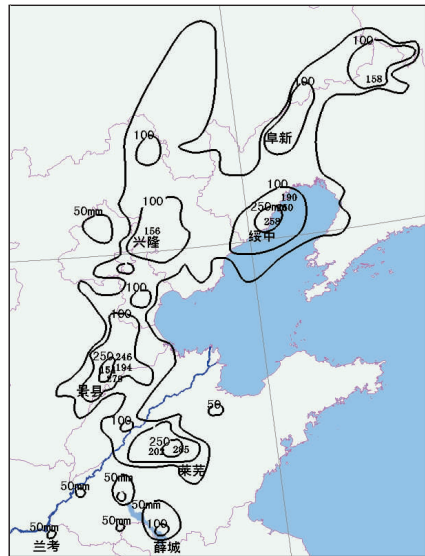


图 7 2000 年 8 月 8 日 08 时至 11 日 08 时  $\geq 50$  mm 雨区(单位:mm)  
Fig. 7 The area of rainfall  $\geq 50$  mm from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 11 August 2000 (unit: mm)

西部的经向切变线南北向跨度达 15 个纬距以上,且由于低层副高和东北高压的同位相叠加,导致经向切变线前部的西南暖湿气流加强北上,位于切变线和海上高压之间我国东北地区西南部出现了  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  低空急流。

9 日 08—14 时,位于低涡东南象限的我国东北地区西南部出现暴雨,这里是低空急流的左前方,具有较强的动力辐合。而低涡南部经向切变线前,在远离低涡中心的鲁西北地区也出现暴雨区,6 h 雨量乐陵最大为 99 mm,禹城次之为 91 mm,暴雨区纬度在  $36.7^{\circ}\sim 37.7^{\circ}\text{N}$ 、 $116.5^{\circ}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$  之间,暴雨带宽度在 100 km 左右。因此分别制作 9 日 08 时沿  $37^{\circ}\text{N}$  和  $117^{\circ}\text{E}$  的纬向和经向垂直剖面图,以分析影响系统的垂直结构和暴雨的形成机制,寻找该类影响系统暴雨落区的预报线索。

从纬向剖面(图 9a)可见,700 hPa 以下切变线位置重合,700~500 hPa 之间呈后倾结构,这是 500 hPa 低涡落后于低层切变线的缘故。切变线在

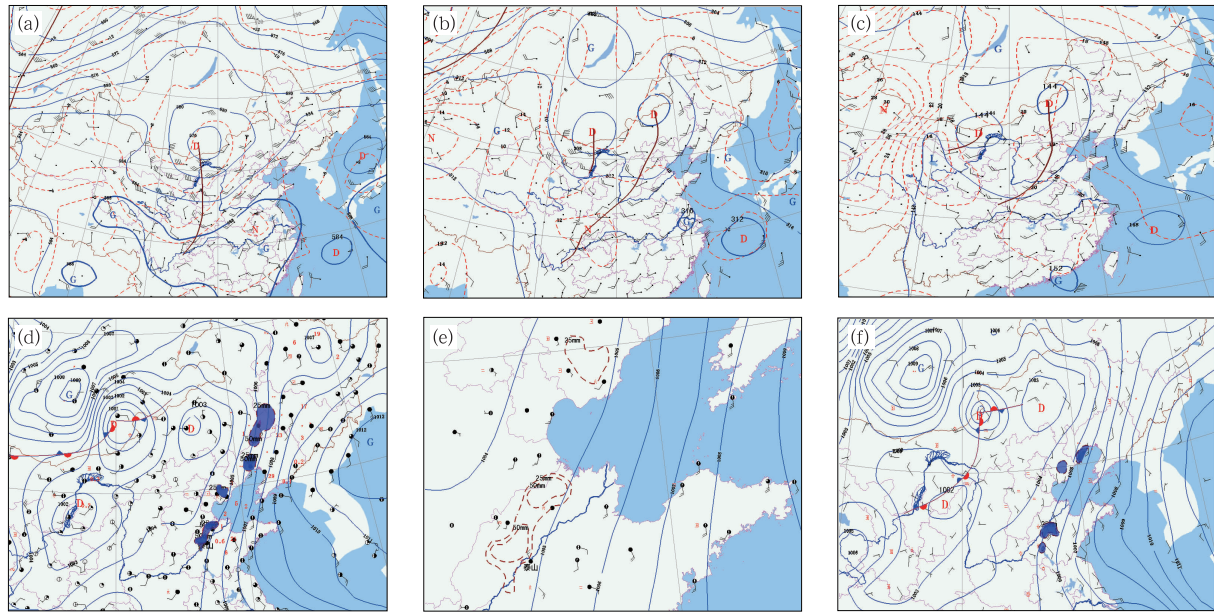


图 8 2000 年 8 月 9 日 08 时高空天气图  
(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa,(d)14 时地面(阴影区为 6 h 降水量 $\geq 25$  mm),  
(e)14 时 6 h 雨量放大图,(f)20 时地面(阴影区为 6 h 降水量 $\geq 25$  mm)

Fig. 8 Synoptic charts at 08:00 BT 9 August 2000

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) surface chart at 14:00 BT 9 August (shadow area for 6 h rainfall  $\geq 25$  mm),  
(e) 6 h rainfall at 14:00 BT 9 August, (f) surface chart at 20:00 BT 9 August (shadow area for 6 h rainfall  $\geq 25$  mm)

950~550 hPa 之间,并未到达地面,地面为暖湿气团形成的高  $\theta_e$  区控制,344 K 的高温高湿舌向上伸展到 500 hPa,850 hPa 的相当位温达 350 K。即切

变线前部低层高温高湿,形成了潜在对流不稳定层结,从低层上升的暖湿空气,由于不稳定能量的释放,在 200 hPa 高层,仍出现了较强的上升运动中心



(图 9b)。从垂直速度与相当位温的配置看(图 9b),整层上升运动正好位于  $\theta_e$  高温高湿舌上方,虽然整层上升运动位于  $115^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$  之间,但 08—14 时暴雨区在  $116^{\circ}\text{E}$  以东,暴雨带宽度仅有 100 km 左右,这是因为  $116^{\circ}\text{E}$  以西对流层中层为  $\theta_e$  低值区控制,可见,无锋面系统的切变线暖区降水,暴雨区强调整层高温高湿,由潜在对流不稳定引起。

经向剖面图可见(图 9c 和 9d),暴雨区整层为西南气流影响, $\theta_e$  高温高湿舌上方同样为整层上升运动, $36^{\circ}\text{N}$  以南虽然低层也高温高湿,但对流层中层为  $\theta_e$  低值区,且为 588 dagpm 线控制下的弱下沉

气流,因此 14 时以前暴雨区位于  $36^{\circ}\text{N}$  以北地区。至 9 日 20 时,副高减弱, $117^{\circ}\text{E}$  处 588 dagpm 线撤到  $35^{\circ}\text{N}$  以南,处于 588 dagpm 线边缘的济宁、莱芜 6 h 雨量分别为 96 和 97 mm。

$117^{\circ}\text{E}$  经向剖面图上另一个整层上升运动区位于  $42^{\circ}\text{N}$  附近(图 9d),该处位于 850 hPa 低涡的东南象限,由于伴有低空急流,动力辐合强,同时又处于高湿舌前方,水汽输送旺盛,从 9 日 08 时水汽通量散度可见(图 10d),该处为  $-5\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  水汽通量辐合中心,08—14 时,出现 6 h 降水  $\geq 25\text{ mm}$  雨区,最大库伦为 67 mm。

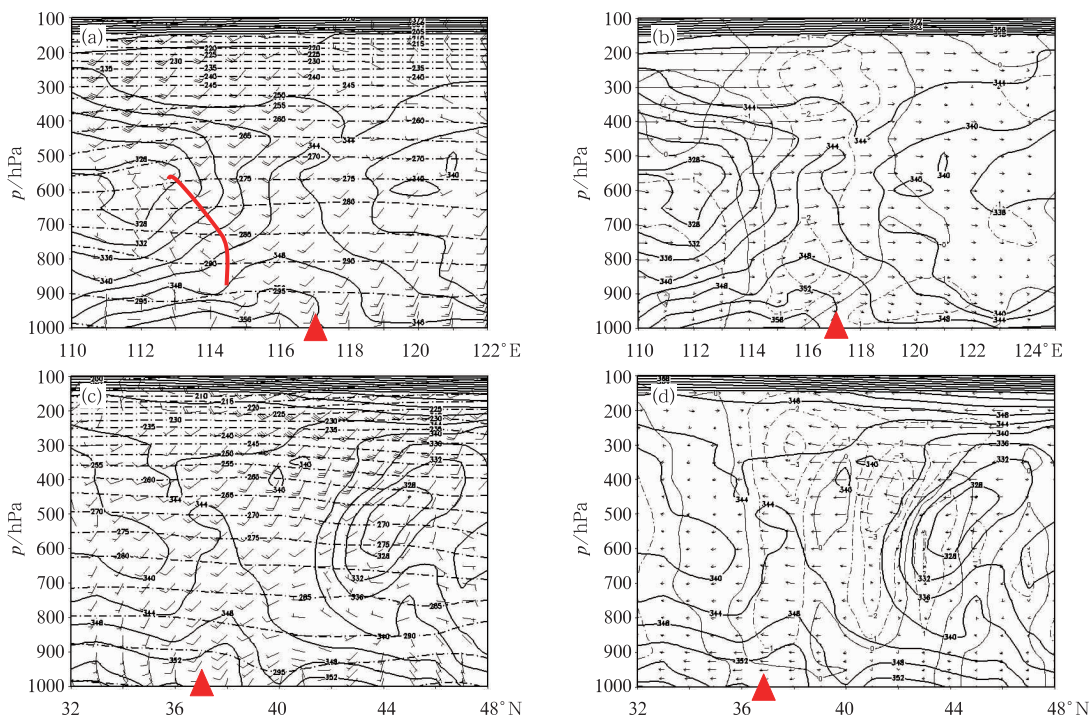


图 9 2000 年 8 月 9 日 08 时暴雨区纬向(a, b)和经向(c, d)剖面图

(a, c)相当位温(单位:K), (b, d)相当位温和垂直速度(单位: $10^{-3}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 9 Zonal (a, b) and meridional (c, d) cross sections at 08:00 BT 9 August 2000

(a, c) potential temperature (unit: K), (b, d) potential temperature and vertical velocity (unit:  $10^{-3}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )

当大气本身具备高温高湿条件时,即使没有低空急流,也能产生暴雨。因此,副高边缘的暴雨过程往往不伴随低空急流。此次过程低空急流位于东北西南部,而处于副高边缘的鲁西北地区并无低空急流影响,因而动力辐合较弱,但比湿达  $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上,且处于  $\theta_e\geq 348\text{ K}$  的高温高湿舌内,这里位于 588~584 dagpm 线之间。可见,副高边缘的暴雨并不强调低空急流,而与高温湿舌有较好的对应关系。

从 850 hPa 风场、相当位温和比湿分布可见

(图 10b),经向切变线前为大范围西南气流形成高温高湿的暖湿输送带,比湿  $\geq 14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的高湿舌逐时向东北方向推进,  $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上的高湿舌、 $\theta_e\geq 344\text{ K}$  的高值区与次水汽辐合中心重合的区域,与鲁西北暴雨区对应。

3 结 语

(1) 一般认为低涡、切变线的暴雨落区位于低

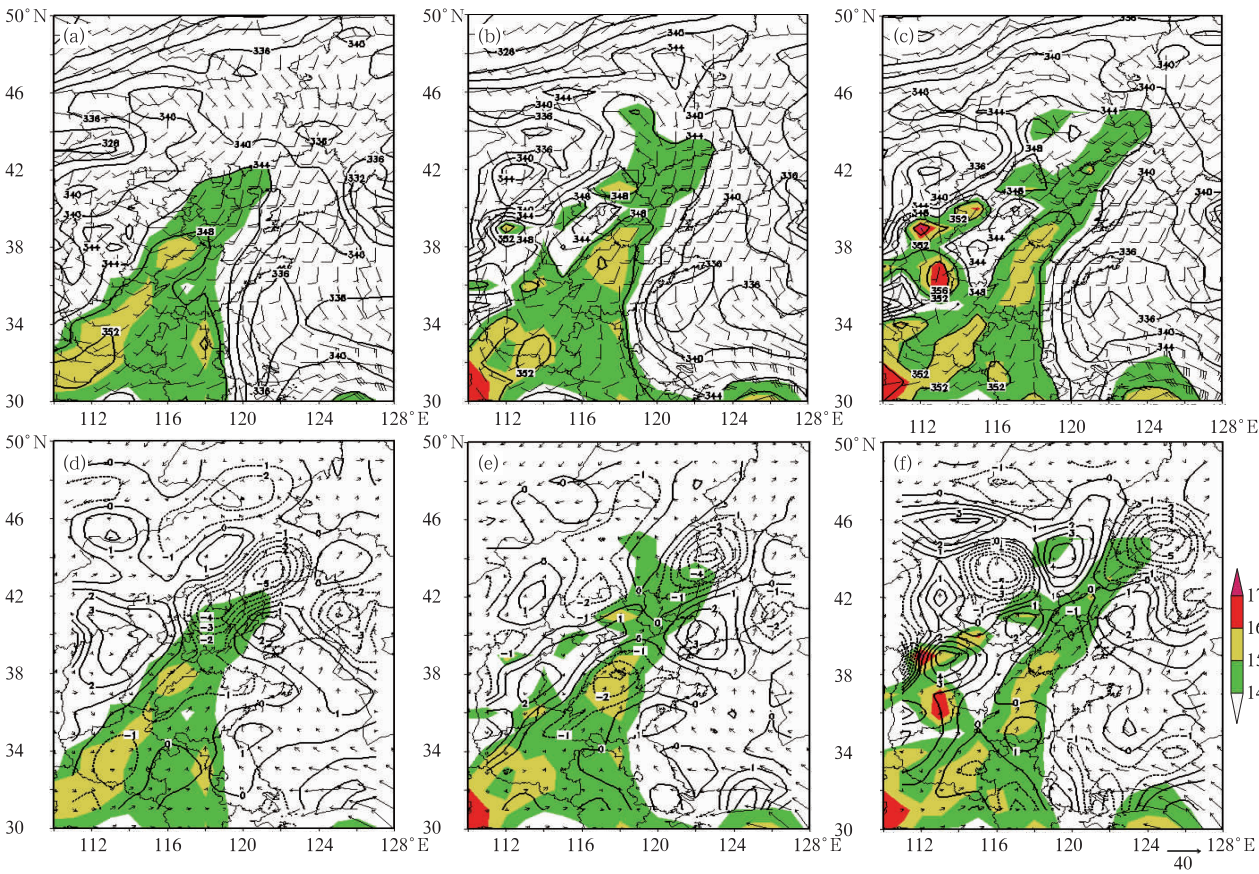


图 10 2000 年 8 月 9 日(a, b, c)850 hPa 相当位温(单位:K)和比湿(色斑,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
(d, e, f)水汽通量散度(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
(a, d)08 时,(b, e)14 时,(c, f)20 时

Fig. 10 (a, b, c) 850 hPa equivalent potential temperature (unit: K) and specific humidity (shaded, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
(d, e, f) water vapor flux divergence (unit:  $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and specific humidity  
(shaded, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) on 9 August 2000  
(a, d) 08:00 BT, (b, e) 14:00 BT, (c, f) 20:00 BT

涡东南象限,但不能满足精细化预报的需求,应根据地面形势、高低空系统的配置及冷暖空气的相互作用进行细致分析。

(2) 有地面静止锋和无锋面的两类经向切变线,在空间结构上有显著差异。

有静止锋配合切变线具有向冷区倾斜的锋面结构,锋面抬升作用显著,暴雨的第一落区位于地面倒槽北端偏北风中,该处在垂直方向具有锋区的三层空间结构,在水平方向具有强辐合,因而产生强降水。

其次,由于冷暖空气相互作用阶段不同,在地面中尺度气旋发展成熟阶段,水平方向干冷空气向东南方向的入侵,冷暖空气交汇形成的水汽辐合;垂直方向上干空气侵入暖湿输送带上空,在静止锋前暖区中,出现暴雨第二落区。

(3) 在地面无静止锋的经向切变线过程中,地

面不存在南北风交替的锋面系统。除了低涡东南象限较强的水汽辐合造成的暴雨区,相当位温高值区、高比湿舌和弱的水汽辐合重合的区域,为另一个暴雨区。该暴雨区为潜在对流不稳定释放造成,且不需低空急流存在。

参考文献

曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 1988. 山东天气分析与预报. 北京:气象出版社.  
苗爱梅,郝振荣,贾利冬,等. 2012. 精细化检测资料在山西暴雨预报模型改进中的应用. 气象,38(7):786-794.  
孙兴池,王西磊,周雪松. 2012. 纬向切变线暴雨落区的精细化预报. 气象,38(7):779-785.  
杨成芳,阎丽凤,周雪松. 2012. 利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构. 气象,38(7): 819-827.  
游景炎,蒋尚城,陶祖钰,等. 1992. 华北暴雨. 北京:气象出版社,45-46.