

孙兴池,王西磊,周雪松. 纬向切变线暴雨落区的精细化分析[J]. 气象,2012,38(7):779-785.

纬向切变线暴雨落区的精细化分析^{*}

孙兴池 王西磊 周雪松

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,对纬向切变线的暴雨落区进行精细化分析。结果表明: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化预报至关重要。当东北地区有冷空气入侵,山东省为一致东北风时,除了与切变线对应的暴雨区,还有因锋面抬升作用造成的地面东北风中的暴雨区;而当东北地区为暖低压,850 hPa 冷中心盘踞山东省时,切变线南侧西南暖湿气流强盛,此时暴雨区位于切变线南侧和地面静止锋之间的鲁南地区;风场辐合中心往往和高湿舌对应,高湿舌前部和风场辐合中心附近是暴雨落区。

关键词: 纬向切变线,暴雨落区,系统空间结构,冷暖空气相互作用

Fine Analysis on the Rainfall Distribution of Zonal Shear Line Heavy Rain

SUN Xingchi WANG Xilei ZHOU Xuesong

Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Based on the conventional observational data and NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ reanalysis data, the rainfall distribution of zonal shear line heavy rain was refinedly analyzed. The results show that, although the location of low-level shear line is important to the distribution of heavy rain, it is not the unique decisive factor to the distribution. The spatial structure of affecting system and the interaction between cold and warm air are essential to the heavy rain fine forecast. With the cold air invasion from the northeast region of China and northeast wind crossing Shandong Province, there are two rainfall areas. One is related with the shear line, and the other is caused by frontal uplift of the ground northeast of the heavy rain area. When a warm low is located in the northeast region of China and 850 hPa cold center entrenched in Shandong Province and there is a strong southwest warm air flow with shear line, the rainfall area of heavy rain is located between the shear line and the stationary front in South Shandong Province. Wind convergence center is often accompanied with high humidity area, and the rainfall area is usually located in the front of high humidity area and near wind convergence center.

Key words: zonal shear line, rainfall distribution of heavy rain, spatial structure of weather system, interaction of warm and cold air

引 言

切变线是指 700、850 hPa 上气旋性的风向不连

续线,大部分降水过程都有低层切变线存在,考虑到天气系统的空间结构,山东把低层为切变线,地面为静止锋或与地面锋面无关的天气系统划归为切变线过程,而低层为切变线,地面有冷锋或温带气旋时则

^{*} 中国气象局预报员专项“山东暴雨影响系统的空间结构特征与落区研究”和全国暴雨团队北方暴雨项目共同资助
2012 年 1 月 4 日收稿; 2012 年 3 月 16 日收修定稿
第一作者: 孙兴池,主要从事预报业务把关和暴雨落区的精细预报等业务疑难问题研究. Email:sdqxts@163.com

归为低槽冷锋或温带气旋过程。由于切变线影响过程地面形势复杂,尤其当切变线影响与地面锋面无关时,地面可能为高压后部、低压前部,甚至为均压场等,这时地面往往不存在明显的中尺度辐合线,暴雨落区预报难度大,空、漏报几率高,近几年山东多次空、漏报及落区报错的暴雨过程都与切变线有关。因此,切变线暴雨的预报是实际业务的难点。

以往对山东暴雨的研究多集中在气旋、台风造成的区域性暴雨的诊断分析,而对切变线造成的突发暴雨尚缺乏系统的研究。在近10年山东200余次暴雨过程中,发现多次预报失误的过程都与没有地面冷锋或气旋配合的切变线有关,且由于地面系统弱,多造成漏报。文献[1]对济南一次漏报的大暴雨过程进行了研究发现,虽然冷空气不明显,但存在相当位温密集区,暴雨发生时出现垂直涡度的显著增长;边界层内浅薄冷空气从东北方向入侵山东省,虽然垂直方向对流稳定,但对称不稳定造成斜升气流发展;文献[2,3]分别分析了切变线暴雨过程中雷达多普勒速度和中尺度系统时空特征,认为切变线暴雨的发生、发展与湿位涡的时空演变有很好的联系。影响系统的空间结构和冷暖空气的相互作用决定暴雨落区,文献[4]对气旋冷暖区暴雨进行了对比分析,也证明了温带气旋冷、暖区暴雨在系统空间结构和冷暖空气相互作用方面的差异。

山东切变线暴雨的概念模型^[5]为,纬向切变线对鲁南影响较大,经向切变线主要影响鲁西北,但大量个例证明,仅按模型做出的预报往往出现很大偏差,仅仅按切变线位置预报暴雨落区远远不能满足精细化预报的需求,应对既有的模型改进完善,以满足日益增长的精细化预报的需求。

2010年9月7日(简称“0907”过程),受纬向切变线影响,分别在鲁西北西部和鲁南地区出现两片暴雨区。其中,鲁南的雨量中心与切变线位置相对应,而另一片则位于地面静止锋后的鲁西北西部(聊城),雨量更大,过程最大降水量东阿为183.7 mm,而24 h预报仅报出了鲁南暴雨,聊城暴雨漏报。同样受纬向切变线影响,2003年7月12日(简称“0712”过程),鲁南地区降大到暴雨,局部大暴雨,聊城一带雨量较小。对这两次过程对比分析,研究在纬向切变线影响时,由于系统的空间结构、冷暖空气的配置不同,所造成的暴雨落区的差异,从而为切变线暴雨的落区预报提供依据。

1 环流形势分析

1.1 环流形势

两次过程500 hPa形势皆为副高边缘和高空槽前西南气流共同影响(图略),副高呈带状分布,588 dagpm线西伸到110°E以西,588 dagpm线位于长江流域一带且在暴雨过程中缓慢北抬。不同的是,“0907”过程经向度较大,河套以西为深厚低涡,涡前西南气流经向度大,而“0712”过程500 hPa中纬度环流平直,山东上空为偏西风。可见,两次过程500 hPa高空引导气流有显著差异,由于“0907”过程引导气流为西南气流,初生云团向东北方向移动,而“0712”过程引导气流为偏西气流,云团向偏东方向移动。

850 hPa形势是预报暴雨落区的重要因素,850 hPa低涡、切变线的位置及走向、低空急流对暴雨落区有指示意义。但在暴雨的精细化预报中,仅仅讨论这些是远远不够的,因为在实际中遇到很多个例,虽然低涡、切变线位置相似,但暴雨落区却有明显差别。图1a和b为两次过程的850 hPa形势,低涡都位于山东省西南方向的河南境内。涡前都有纬向切变,“0907”过程纬向切变从苏、皖北部穿过,而“0712”过程纬向切变位于鲁南,可见,“0907”过程纬向切变线更偏南,但造成的大暴雨区更偏北。

对比两者温度场、高度场结构,可看出明显差异,“0907”过程我国东北地区为冷高压,高压前部为大于 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强劲东北风,且与等温线垂直,为冷平流,这支强劲东北风经渤海入侵山东省西部,低涡北侧东北、东南气流较强(大于 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),由于冷空气从低涡后部侵入,冷暖空气交汇在低涡顶端并在鲁西辐合。虽然涡前有纬向切变存在,但切变南侧西南气流较弱,动力和热力辐合都不在纬向切变附近。而“0712”过程的纬向切变线是中心位于黄海北部的西风带高压和带状副高之间形成的,东北地区为暖低压,盛行南风,西风带弱冷空气盘踞山东省,冷暖空气交汇在850 hPa纬向切变线上,切变线南侧西南暖湿气流强盛。850 hPa形势的显著差异反映在散度场上(图1c和1d),“0907”过程辐合中心位于聊城附近,中心值为 $-6\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,涡前暖切变附近为弱辐合区;而“0712”过程的辐合区与纬向切变线对应较好, $-4\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的纬向辐合带覆盖鲁南地区。

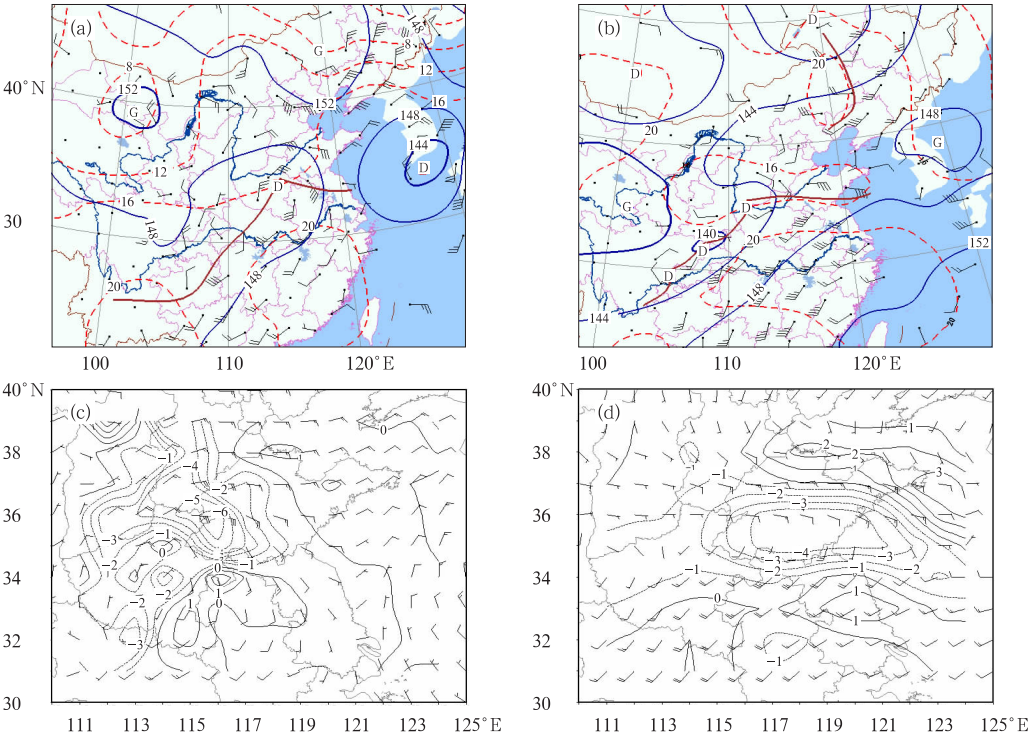


图 1 2010 年 9 月 7 日 08 时(a,c)和 2003 年 7 月 12 日 08 时(b,d)850 hPa 天气图(a,b)及散度场(c,d,单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 1 Weather charts (a,b) and divergence fields (c,d, unit: 10^{-5} s^{-1}) of 850 hPa at 08:00 BT 7 September 2010 (a,c) and 08:00 BT 12 July 2003 (b,d)

1.2 地面形势与暴雨落区

图 2 为暴雨时地面形势,从图中可看出,两者共同点是苏、皖北部有低压存在,鲁南地区都处在地面静止锋之后。但地面冷空气的路径、位置和强度有显著不同,在“0907”过程中,东北为强大高压,其与皖北低压之间等压线密集,山东省为一致东北风,除了地面倒槽顶端的暴雨区外,在相距 200 km 左右的聊城一带出现另一个雨量中心,该雨量中心出现在静止锋后的锋区上。而“0712”过程中,东北地区为低压,盛行南风,并无冷空气从东北入侵山东省,本省为海上高压西伸的高压坝控制,鲁南为倒槽顶部东北风,鲁中及以北地区为东到东南风,两支气流在聊城地区形成辐散场,强降水位于倒槽顶端后部的东北气流中,即鲁东南地区。

2 影响系统的空间结构差异

为了揭示暴雨落区与影响系统空间结构的关系,制作聊城(36°N 、 116°E 附近)有、无暴雨的两次过程沿 116°E 的经向垂直剖面图(图 3),两次过程

均为有地面静止锋配合的纬向切变线影响。从图 3 可见,从地面到 500 hPa 高空都有随高度向冷区倾斜的相当位温密集区,即锋区所在,锋区内等温线下凹,但水平梯度较小,两次过程均为弱冷空气影响。虽然“0907”过程地面等压线较为密集,但从 850 hPa 等温线水平分布可见(图 1a),等温线稀疏,表现在空间剖面上,锋区内等温线平缓下凹,等 θ_e 线也较稀疏,锋区较弱,因而在实际预报中易忽视锋区的存在。但 850 hPa 以下东北风和东南风均较强,说明低层辐合较强。地面锋面到达 35°N 附近,锋区位于 $35^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 之间,在 35°N 以南的暖湿空气沿锋面爬升,在地面锋后 36°N 附近的 700~600 hPa 高度上形成了一 $21 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动中心(图 3b),恰位于聊城上空,根据文献[6]大气低层的水汽有一半是通过 700 hPa 垂直运动向上输送到高层而凝结成雨的,因而 700 hPa 垂直运动对暴雨形成至关重要。在实际业务中,验证了多次 700 hPa 垂直运动与暴雨区有较好的对应关系。

从相当位温(图 3a 和 3c)的分布可见,锋前 345 K θ_e 线沿锋面上凸,代表暖湿空气沿锋面爬升,在锋后 1 个纬距处(110 km 左右)的大气中层上升运动达最

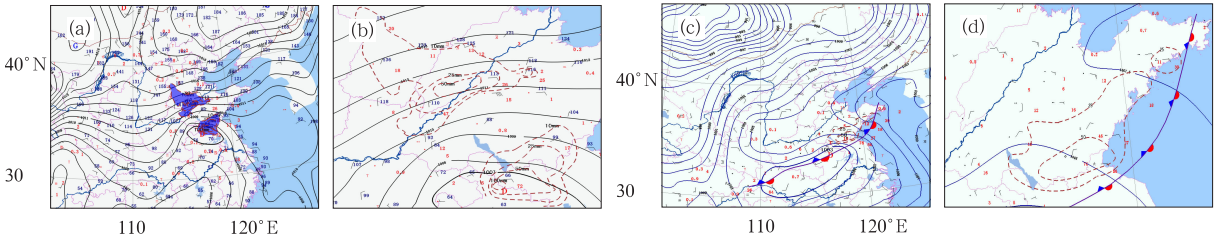


图 2 2010 年 9 月 7 日 20 时(a,b)和 2003 年 7 月 12 日 14 时地面图和对应的 6 h 降雨量(c,d)
(b,d 中虚线为 6 h 等雨量线)

Fig. 2 Surface weather charts (a,c) and 6 h precipitation (b,d) at 20:00 BT 7 September 2010 (a,b) and 14:00 BT 12 July 2003 (c,d)
[Dashed lines for 6 h rainfall contours at (b) and (d)]

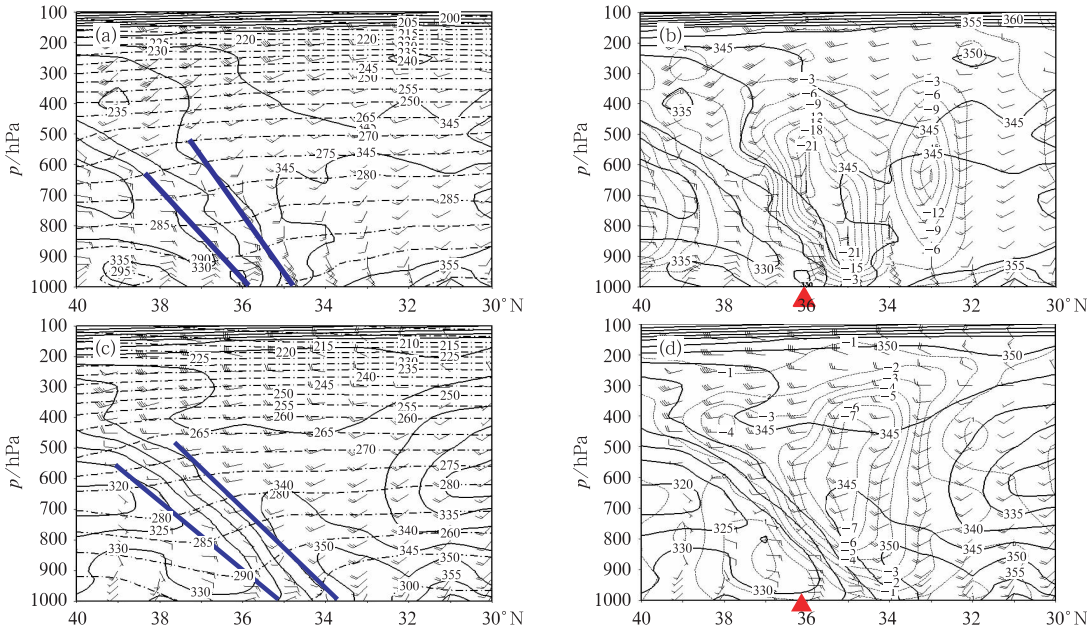


图 3 2010 年 9 月 7 日 08 时(a,b)和 2003 年 7 月 12 日 08 时(c,d)沿 116°E 垂直剖面
[(a)、(c)为相当位温(实线)、温度(点划线),
(b)、(d)为相当位温(实线)、垂直速度(虚线,单位: 10^{-3} hPa \cdot s $^{-1}$)]

Fig. 3 Vertical cross sections along 116°E at 08:00 BT 7 September 2010 (a,b) and 08:00 BT 12 Jul 2003 (c,d)

[(a), (c) for equivalent potential temperature (solid line), temperature (dot-dashed line); (b), (d) for the equivalent potential temperature (solid line), vertical velocity (dashed line, unit: 10^{-3} hPa \cdot s $^{-1}$)]

强,这就是通常所说的在纬向切变线过程中,雨带位于 700 hPa 切变线和地面静止锋之间,暴雨区位于地面静止锋后 150 km 附近^[5]的情况。另一个上升运动中心位于锋前 850 hPa 左右,在纬向切变线附近,是锋前暖湿空气在切变线上辐合抬升形成。

在“0712”过程中,850 hPa 切变线南侧即 35°N 以南存在明显的纬向锋区(图 1b),南北向水平温度梯度在 2℃/100 km 左右,表现在垂直剖面图上(图 3c 和 3d),相当位温线更为密集,锋区位于 34°~

35°N 之间,锋区内等温线下凹更为明显,虽然地面上(图 2c)等压线密集区为西伸的海上高压和位于苏皖的倒槽形成,等压线梯度较“0907”过程弱,但由于“0712”过程切变线南侧西南暖湿气流旺盛,造成了较强的湿度锋区(图 5b),可见由于锋区内温度和湿度梯度都比“0907”过程强,因而锋区内 θ_e 线更密集。

两次过程高空槽都明显偏后,为后倾槽结构,500 hPa 以上为西南气流,锋面坡度均较小,属第一

型冷锋, 锋前暖湿空气均沿锋面爬升, 但“0712”过程锋面明显偏南, 锋区北界在 35°N , 暖湿空气在锋前抬升, 同样在锋后 1 个纬距处上升速度达到最强, 在对流层中低层形成了 $-7 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动中心(图 3d), 只是由于锋区较“0907”过程偏南, 较强上升运动区也随之偏南了 1 个纬距。

两次过程暖湿气流强度有明显差异, “0712”过程切变线南侧有大范围西南气流北上, 低空急流轴上有达 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速中心, 而“0907”过程仅在低涡中心附近有大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风, 华南沿海西南风较小。表现在空间剖面图上, “0712”过程锋前有 $\theta_e \geq 350 \text{ K}$ 的暖湿气流沿锋面向北向上爬升到 850 hPa, 而“0907”过程锋前暖湿舌的相当位温在 345 K, 即“0712”过程暖湿条件更好, 而“0907”过程低层辐合明显偏大(图 1c 和 1d), 垂直速度也大得多, 即动力作用更显著。

总之, 锋面抬升往往在锋面之后 1 个纬距(在锋面坡度小时, 也可能在锋后 2 个纬距)左右的对流层中层达到最强, 也就是锋面以北 1~2 个纬距左右处存在暴雨区, 当东北地区有冷空气入侵山东省时, 干

冷和暖湿空气在山东省交汇, 当温度梯度不明显时, 可能表现为湿度锋区, 即 θ_e 线较密集, 即便锋面到达了鲁南(35°N 附近), 锋面抬升作用恰恰在 $36^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 达到最强, 鲁中、鲁西的多次暴雨过程都与由东北经渤海入侵山东省的冷空气有关。

3 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度

两次过程均发生在副高边缘, 除了大气本身高温高湿外, 由于 500 hPa 高空槽和低层切变线的存在, 大范围西南气流从华南经长江流域伸向鲁南, 对流层中低层(400 hPa)以下建立了明显的水汽通道, 从 850 hPa 水汽通量可见(图 4a 和 4b), “0907”过程西南急流范围小, 仅鲁西、鲁西南出现大于 $12 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的水汽通量大值区, 伴随低涡东移, 水汽通量大值区向鲁东南扩展。而“0712”过程, 纬向切变线南侧为大范围西南急流, 大于 $12 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的水汽通量大值区位于纬向切变线南侧呈带状分布, 水汽通量与急流有很好的对应关系。

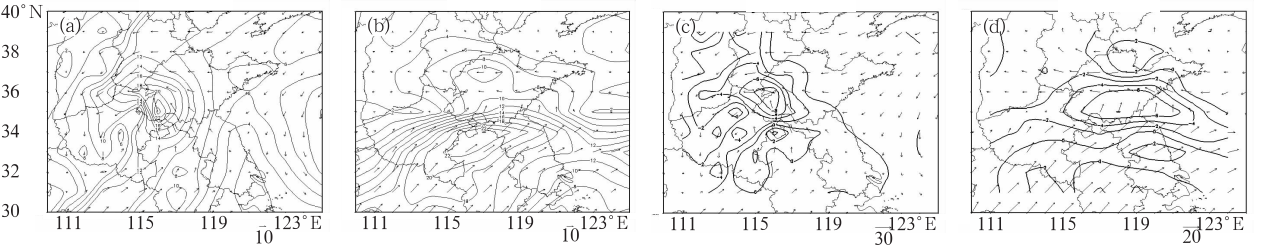


图 4 2010 年 9 月 7 日 08 时(a,c)和 2003 年 7 月 12 日 08 时(b,d)850 hPa 物理量

(a)、(b)为水汽通量 [单位: $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$],

(c)、(d)水汽通量散度 [单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

Fig. 4 The physical fields of 850 hPa at 08:00 BT 7 September 2010 (a,c) and 08:00 BT 12 July 2003 (b,d)

[(a), (b) for the water vapor flux, unit: $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$;

(c), (d) for the water vapor flux divergence, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

从 850 hPa 的水汽通量散度和水平风场(图 4c 和 4d)可见, “0907”过程西南气流较弱, 在低涡前转为东南风与东北路径冷空气在鲁西、鲁西南汇合, 造成了一 $8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量辐合中心。“0712”过程, 由于纬向切变线南侧强盛的西南暖湿气流, 与其北侧弱东南气流之间形成沿切变线分布的带状水汽辐合区, $-6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强水汽通量辐合覆盖鲁南大部, 鲁西北和半岛北部为水汽通量辐散, 根据文献[7]水汽通量散度包括风场造成的质量辐合和水汽的水平平

流两部分, 两次过程水汽辐合中心都比水汽通量中心略偏北, 与水平风场辐合中心一致(图 1c 和 1d), 说明水汽辐合主要由风场的辐合造成。

4 比湿的水平垂直分布

源源不断的水汽输送和较强的上升运动是形成大范围暴雨的基本条件, 图 5 为 850 hPa 散度、比湿的水平分布(图 5a 和 5b)和比湿、上升运动垂直剖面(图 5c 和 5d), 在“0907”过程中, 东北风和东南风

在聊城一带辐合,高湿舌向辐合中心凸起;850 hPa 比湿在 $12 \sim 13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 700 hPa 比湿达 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而我国北方暴雨 700 hPa 比湿多在 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。

在“0712”过程中,切变线南侧西南气流强,西南气流在纬向切变线上辐合,切变线南侧为东西向带状高湿区,高湿区同样向辐合区凸起。处于切变线北侧的聊城 850 和 700 hPa 比湿在 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。

两次过程高湿舌(区)都向辐合中心凸起,说明风场动力辐合对水汽集中起重要作用。暴雨区与高

湿舌前部的湿度梯度区相对应,这里为强辐合区,可见动力作用在暴雨过程中十分重要,而动力作用取决于冷暖空气的相互作用、高低空系统的垂直配置。

从比湿和上升运动的垂直剖面可见,“0907”过程(图 5c),聊城上空垂直速度与高湿舌配合好,出现最强上升运动,其南、北两侧分别有两个次上升运动中心,南侧的上升运动中心对应切变线位置。而“0712”过程(图 5d),聊城位于高湿舌和强上升运动中心的北侧,特别是湿层较为浅薄,水汽和垂直运动条件不利暴雨发生。

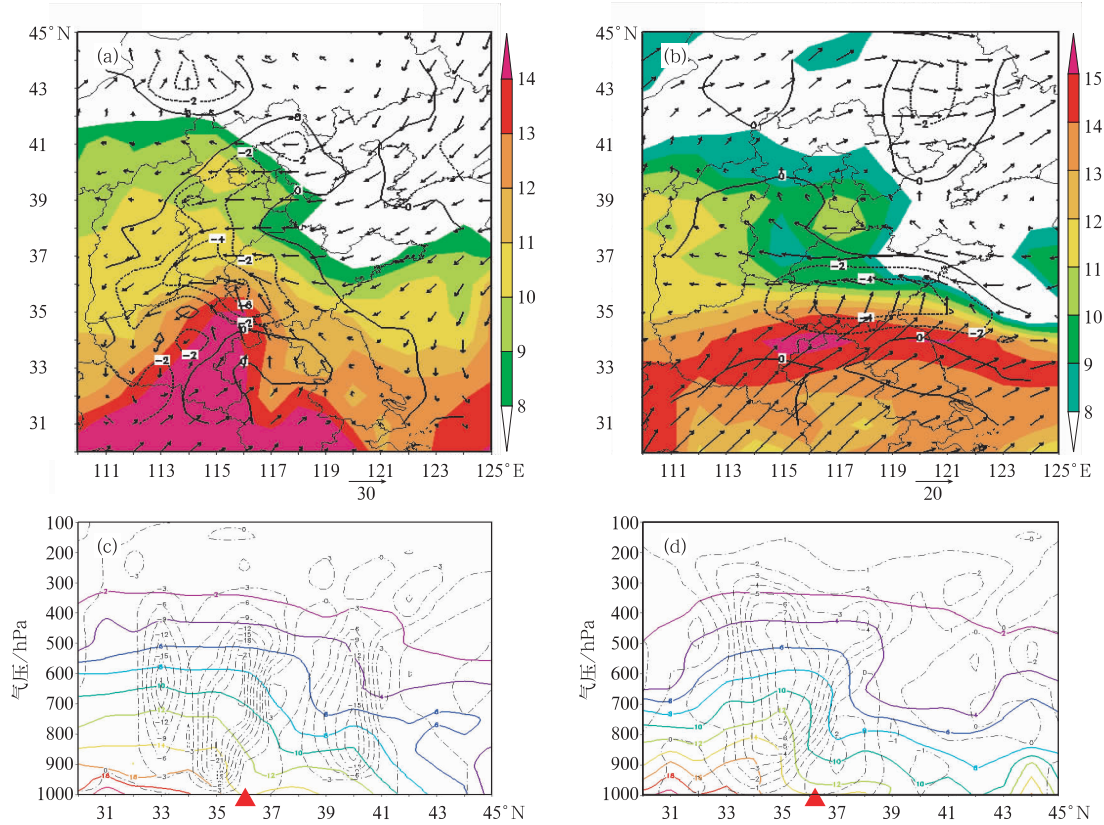


图 5 2010 年 9 月 7 日 08 时(a,c)和 2003 年 7 月 12 日 08 时(b,d)850 hPa 物理量

(a)、(b)为比湿(色斑,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、散度(单位: 10^{-5} s^{-1}),
(c)、(d)为比湿(实线)和垂直速度(虚线,单位: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直剖面(116°E)

Fig. 5 The physical fields of 850 hPa at 08:00 BT 7 September 2010 (a,c)
and 08:00 BT 12 July 2003 (b,d)

[(a), (b) for the specific humidity (shaded areas, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}),
(c), (d) for the specific humidity (solid line) and vertical velocity profiles
along 116°E (dashed line, unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)]

5 高空急流与辐散

两次过程200 hPa高空急流与辐散如图 6 所示,从东北南部到日本海都存在 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流核。

不同的是,“0907”过程在渤海存在 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北—西南向的次大风速带,在次急流核的右后方,鲁西为 $\geq 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐散区,高空抽气作用显著。而“0712”过程,在河套北部还有 $\geq 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流核,鲁西处于该急流核的右前方,为弱辐散区。

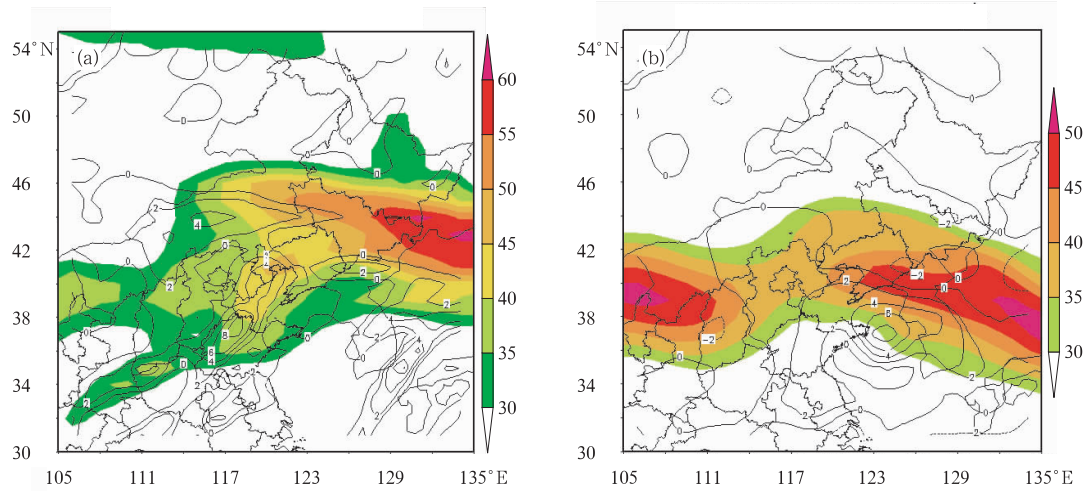


图 6 2010 年 9 月 7 日 08 时(a)和 2003 年 7 月 12 日 08 时(b)200 hPa 急流(色斑)与辐散
Fig. 6 Upper-level jet (shaded areas) and divergence of 200 hPa
at 08:00 7 September 2010 (a) and 08:00 12 July 2003 (b)

6 结 语

(1) 低层切变线是暴雨预报的重要因素,但仅根据切变线位置来判断暴雨落区是不够的,暴雨落区的精细化预报更依赖于对冷暖空气的相互作用、影响系统的空间结构的细致分析。

(2) 在切变线影响时,当东北地区有冷空气入侵时,山东省位于东北高压前部一致东北风中,除了与切变线对应的暴雨区外,应注意锋面抬升作用造成的地面东北风中的暴雨区。

(3) 分析系统空间结构可见,锋面抬升往往在锋面之后 1 个纬距(在锋面坡度小时,也可能在锋后 2 个纬距)左右的对流层中层达到最强,也就是锋面以北 1~2 个纬距左右处存在暴雨区。当东北地区有冷空气入侵山东省时,即便锋面到达了鲁南(35°N 附近),锋面抬升作用恰恰在 36°~37°N 达到最强,鲁中和鲁西北的多次暴雨过程都与由东北经渤海入侵山东省的冷空气有关。要特别注意东北地区冷空气从边界层入侵,这时在常规天气图上温度梯度不明显,容易被忽视,但湿度锋区清楚,即 θ_e 线较密集,东北路径的冷空气具有更强的锋面抬升作

用。

(4) 而当东北地区为暖低压,850 hPa 冷中心位于山东省时,冷暖空气交汇在纬向切变线上,切变线南侧西南暖湿气流强盛,此时暴雨区位于切变线南侧的鲁南地区。

(5) 高湿舌向风场辐合中心凸起,高湿舌前部和风场辐合中心附近是暴雨落区。

参考文献

[1] 孙兴池,王建国,薛德强,等. 2005 年 9 月 18 日山东突发区域性暴雨过程分析[J]. 中国海洋大学学报,2006,36(4):595-600.

[2] 肖艳姣,张家国,万蓉,等. 切变线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2005,31(2):35-38.

[3] 吴君,汤剑平,邵庆国,等. 切变线暴雨过程中湿位涡的中尺度时空特征[J]. 气象,2007,33(10):45-51.

[4] 孙兴池,王业宏,迟竹萍. 气旋冷暖区暴雨对比分析[J]. 气象,2006,32(6):59-65.

[5] 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,1988.

[6] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:349.

[7] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2005.