

阎丽凤,孙兴池,周雪松. 2014. 影响山东的黄淮气旋暴雨落区分析. 气象,40(12):1439-1445.

影响山东的黄淮气旋暴雨落区分析<sup>\*</sup>

阎丽凤 孙兴池 周雪松

山东省气象局, 济南 250031

**提 要:** 应用常规观测资料、NCEP 再分析资料,对比分析了山东两次春季黄淮气旋暴雨落区异同点。发现春季影响山东的黄淮气旋暴雨区集中出现在气旋中心北侧的偏东风中,且主要位于东北气流中。暴雨区偏北的程度,与影响系统的后倾程度及我国东北地区是否存在高压有关。当系统明显后倾时,锋面坡度小,暖湿气流沿锋面向北爬升的更远,暴雨区更偏北;当我国东北地区存在高压时,其南侧东北气流经渤海侵入 850 hPa 低涡后部,与低涡前东南气流在风向上渐近辐合,在低涡北侧产生辐合中心,从而产生暴雨区。此外,地面东北风形成的冷垫,有利于南方暖湿气流向北爬升。实际暴雨落区预报中,需综合分析系统的空间结构、周围系统的影响及温度场的配置等。

**关键词:** 黄淮气旋, 暴雨落区, 850 hPa 低涡, 东北高压, 系统空间结构

**中图分类号:** P458      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.002

Analysis on the Areas of Torrential Rains Affected by  
Huang-Huai Cyclone in Shandong Peninsula

YAN Lifeng SUN Xingchi ZHOU Xuesong

Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031

**Abstract:** Using the conventional observation data, NCEP reanalysis data, two cases of spring torrential rains in Shandong Peninsula are studied. The results show that the rainfall caused by spring Huang-Huai cyclone in Shandong Peninsula is concentrated in the northern part of the cyclone and mainly located in the northeast air stream. The northerly extent of rainfall areas are related with synoptic backward extent and the existence of the high pressure in Northeast China. When the synoptic system is obviously backward and the frontal slope is small, warm air stream along the front climbs north further and the rainfall moves northerly. If there is a high pressure in Northeast China, northeasterly wind at the southern side of the high invades the vortex at 850 hPa joined by the southeasterly wind. The asymptotic convergence in the northern part of the vortex generates the rainfall. Furthermore, the formation of cold northeasterly air stream is favorable for the climbing of warm air northward. In operation, it is necessary to analyze the spatial structure of the system and the impact of the surrounding temperature field comprehensively.

**Key words:** Huang-Huai cyclone, area of torrential rain, vortex at 850 hPa, the Northeast high, synoptic spatial structure

<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  
2014 年 6 月 26 日收稿; 2014 年 9 月 12 日收修定稿  
第一作者: 阎丽凤,主要从事灾害性天气分析与预报研究. Email: ytylf@126.com

## 引言

温带气旋是造成山东大范围暴雨的重要天气系统。平均每年有 5 个温带气旋影响山东,最早出现在 2 月下旬,最晚于 11 月中旬结束。影响山东的温带气旋主要有江淮气旋、黄淮气旋和黄河气旋。春、秋两季,以黄淮或江淮气旋为主,平均每年有 2~3 个影响山东(周雪松等,2014)。影响山东的温带气旋 90% 以上会造成全省大范围暴雨。因此,对温带气旋影响过程,暴雨有、无并不是预报的难点,而暴雨的精细落区则是预报中的难点和重点。

温带气旋高低空配置形式一般为:500 hPa 高空槽(涡),700、850 hPa 低涡及地面温带气旋。周宏伟等(2011)对苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的分析中,指出高空槽、西南涡、低空急流和地面气旋为大暴雨提供了强劲的动力水汽条件。在实际预报中,往往认为:暴雨落区位于低层低涡东南象限,有低空急流时倾向于在低空急流的左前侧;或暴雨区往往围绕气旋中心分布。但大量的个例分析表明,仅根据地面气旋及低层低涡的位置来预报暴雨落区会出现很大偏差,远不能满足精细化落区预报服务需求。

在强烈发展的温带气旋中,往往有大尺度斜压不稳定和水汽凝结潜热释放两种不同尺度的相互作用(陶诗言,1980;曹钢锋等,1988;李修芳,1997;黄彬等,2013)。黄彬等(2011)、尹尽勇等(2011)对 2007 年 3 月温带气旋强烈发展的分析,也证明了斜压性起重要作用。梁丰等(2006)对华北一次黄河气旋过程的分析表明,较强的高空辐散与正涡度平流共同作用形成了黄河气旋,对流层低层的暖平流促进了黄河气旋的进一步发展并对其移动方向有引导作用。

我国北方春、秋季的大范围暴雨过程大都由温带气旋造成,甚至伴有特大风暴潮(阎丽凤等,2008)。信欣等(2008)对 2007 年 3 月山东、辽宁等地出现了冬末初春突破历史纪录的强降水过程进行了分析,表明强盛的低空急流和地面温带气旋的强烈发展,带来了类似夏季暴雨的充沛水汽;同时整个对流层都出现了上升运动,而且对流层中层的最大上升速度和夏季出现暴雨的条件相当。

以往的分析大都着眼于气旋的形成和暴雨的诊断分析,而对同一类温带气旋暴雨落区的精细分析

则较为欠缺。

对相关个例分析发现,典型的温带气旋各个部位都可能出现暴雨,但各部位暴雨出现的时间却因气旋发展的时段不同而有先有后。有的温带气旋,暴雨区完全位于冷区中,气旋生成时,暴雨即告结束。这一类气旋,冷空气较强,锋面抬升作用显著,暴雨出现在冷锋影响阶段,气旋生成较晚,按惯例也划归温带气旋类。还有的温带气旋,暴雨区则位于气旋前部暖区中,这一类气旋,冷空气较弱,地面上可能没有发展强盛的低压,但存在持续 24 h 以上的低压环流,潜热释放对这类暴雨形成起重要作用。可见,即使地面气旋和低层低涡位置相似,由于气旋的发展阶段、冷暖空气强弱及相互作用、影响系统的空间结构、周围系统的作用等不同,其暴雨落区也不尽相同,也就是说,以往根据地面气旋中心的位置来预报暴雨落区的做法并不可靠。目前还没有温带气旋暴雨落区精细的概念模型,孙兴池等(2006)对气旋的冷暖区暴雨进行了对比分析,认为暴雨区相对于气旋中心的位置与高、低空系统的配置、冷暖空气的相互作用密切相关。

2013 年 5 月 26—27 日(简称 20130526 过程),受强烈发展的黄淮气旋影响,山东出现了较为罕见的强降水过程,全省平均降水量达 60.4 mm,暴雨区位于鲁南、鲁中南部和山东半岛南部。其中,鲁中南部、鲁南地区多地 24 h 降水量突破历史同期极值,大暴雨区集中出现在鲁南地区,日照降水量最大,为 204.1 mm(图 1a)。

本次黄淮气旋影响过程中,850 hPa 上低涡强烈发展,并伴随低空急流,是一次典型的暴雨过程。预报的难点依然是暴雨和大暴雨落区问题,尤其是大暴雨的落区,目前的常规资料和既有的概念模型很难做出准确预报。虽然该类温带气旋的暴雨落区一般出现在鲁南、鲁中地区,但暴雨的精细落区及大暴雨中心却因影响系统的空间结构、温度场配置、周围系统的作用等有所不同,并非地面气旋、低层低涡和低空急流位置相似暴雨落区就一致。例如,2002 年 5 月 14—15 日(简称 20020515 过程),同样受黄淮气旋影响,山东出现大范围暴雨,平均降雨量为 54.5 mm,青州最大为 135.2 mm。本次过程,850 hPa 低涡和地面气旋位置比 20130526 过程明显偏南,但暴雨落区却更偏北,大暴雨落区则位于山东半岛西部(图 1b)。可见,仅根据地面气旋和低涡的位置来预报暴雨落区会出现很大偏差。因此,有必要

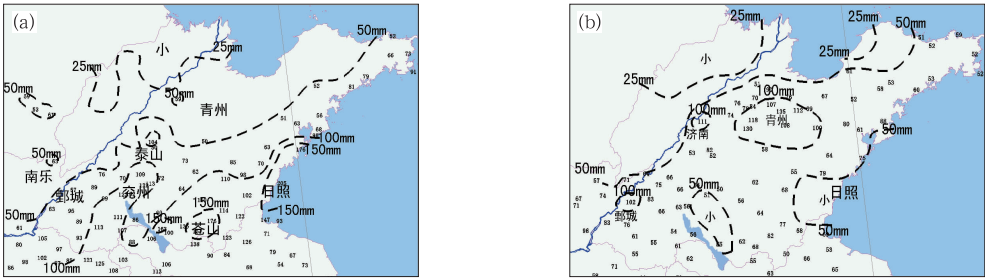


图 1 两次暴雨过程降水量分布(单位: mm)

(a)2013 年 5 月 25 日 08 时至 28 日 08 时,(b)2002 年 5 月 13 日 08 时至 17 日 08 时

Fig. 1 Total precipitation of the two torrential rain events (unit: mm)

(a) from 08:00 BT 25 to 08:00 BT 28 May 2013, (b) from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 17 May 2002

对该类气旋暴雨过程进行细致的对比分析,以提高暴雨落区的精细化预报水平。

1 地面气旋中心与暴雨落区的关系

20130526 过程,山东降水持续时间为 24 h,雨强更强;而 20020515 过程,降水持续时间达 3 d,雨

强相对较弱。图 2 给出了两次暴雨过程地面气旋与强降水落区的关系。其中,20130526 过程,为相应时刻 6 h 降雨量 $\geq 25$  mm 雨区与气旋中心的关系(图 2a~2c),20020515 过程为 6 h 降雨量 $\geq 10$  mm 雨区与气旋中心的关系(图 2d~2f)。可见,两次过程强降水并不围绕气旋中心分布,都出现在气旋中心的北侧,即位于倒槽顶端的偏东风中,气旋中心及

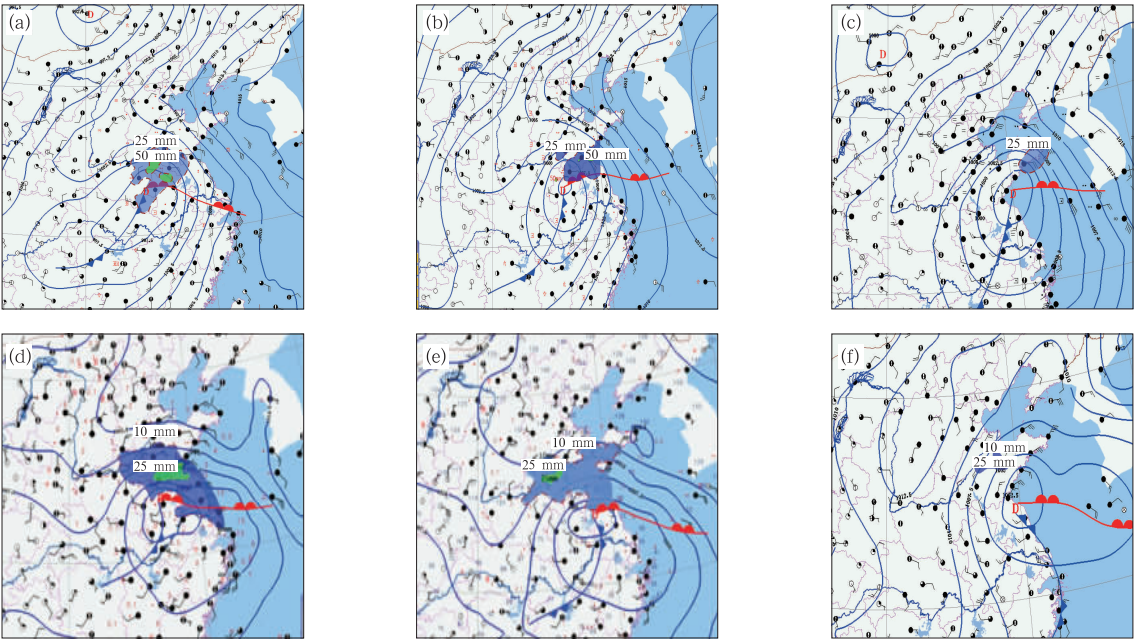


图 2 两次暴雨过程地面气旋与强降水落区分布图

(图中阴影区为 6 h 雨量 $\geq 25$  mm 或 $\geq 10$  mm 落区)

(a)2013 年 5 月 26 日 14 时,(b)2013 年 5 月 26 日 20 时,(c)2013 年 5 月 27 日 08 时,

(d)2002 年 5 月 14 日 14 时,(e)2002 年 5 月 14 日 20 时,(f)2002 年 5 月 15 日 14 时

Fig. 2 Extra tropical cyclones and distribution of severe precipitation areas during the two torrential rains

(Shadow areas are rainfall areas of 6 h precipitation  $\geq 25$  mm or  $\geq 10$  mm)

(a) 14:00 BT 26 May 2013, (b) 20:00 BT 26 May 2013, (c) 08:00 BT 27 May 2013,

(d) 14:00 BT 14 May 2002, (e) 20:00 BT 14 May 2002, (f) 14:00 BT 15 May 2002

以南地区雨量则较小。

2 暴雨区位于黄淮气旋中心北侧的机制分析

2.1 地面锋区位于气旋中心北侧

春秋季温带气旋发生、发展的天气形势是 850 hPa 西南涡和 500 hPa 南支槽加强北上,高空正涡度平流对气旋发展有重要作用。该类暴雨由冷暖空气的剧烈交汇引起,动力辐合作用强,与锋面相关的上升运动对暴雨落区有重要指示作用。

在这种环流形势下,垂直方向上,通常有明显的后倾结构,即低层低涡位于高空槽东南方向,而地面气旋中心又位于低涡东南方,这样的高低空配置,在

经过地面气旋中心的剖面图上,往往表现为气旋中心北侧存在自下而上向北倾斜的锋区。20130526 过程,26 日 20 时地面气旋中心位于 33.7°N、116.7°E;20020515 过程,14 日 14 时地面气旋中心位于 33°N、117°E。制作两次过程地面气旋中心的经向(117°E)剖面图(图 3a 和 3b),可见,地面气旋中心的北侧均为自下而上向北倾斜的冷锋,锋面抬升造成的较强上升运动均位于锋后。

从两次暴雨过程地面流场和温度场的分布可见(图 3c 和 3d),地面气旋中心均偏于暖区一侧,气旋中心北侧具有大的温度梯度,也说明地面锋区位于气旋中心北侧。

可见,由于锋区位于地面气旋中心的北侧,而与锋面相关的上升运动区也出现在气旋中心的北侧,从而造成暴雨区位于气旋中心的北侧。

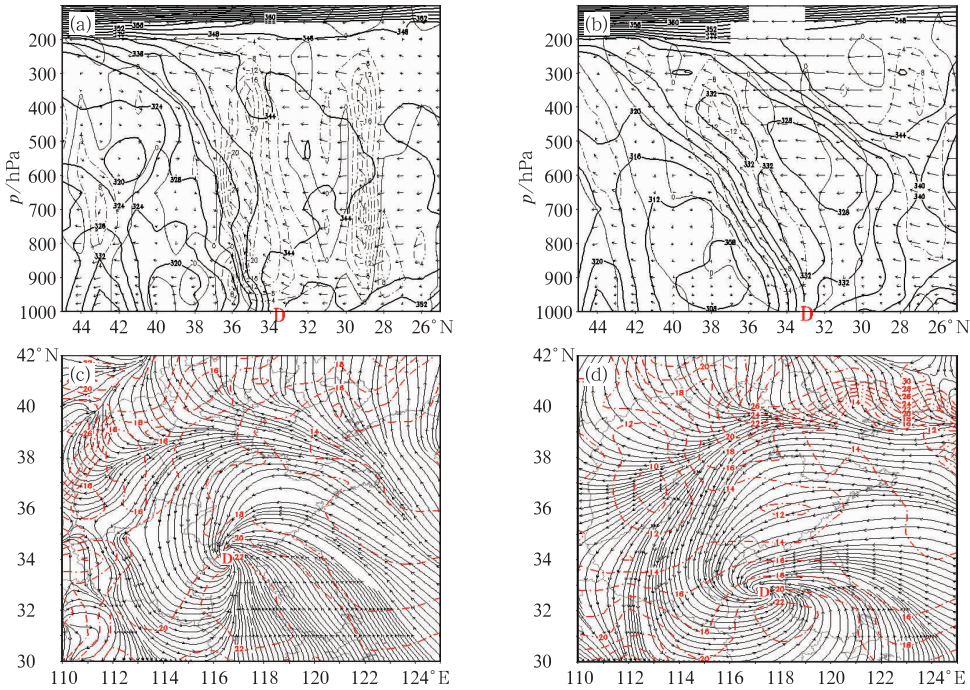


图 3 (a)2013 年 5 月 26 日 20 时和(b)2002 年 5 月 14 日 14 时地面气旋中心  $\theta_e$ (实线,单位: K)、垂直速度(点线,单位: $10^{-3}$  hPa  $\cdot$  s $^{-1}$ )经向剖面图,(c)2013 年 5 月 26 日 20 时和(d)2002 年 5 月 14 日 14 时地面流场和温度场(点划线,单位: °C)

Fig. 3 Meridional cross-section of  $\theta_e$ (solid line, unit: K), vertical velocity (dotted line, unit:  $10^{-3}$  hPa  $\cdot$  s $^{-1}$ ) (a, b) along the cyclone centers of the two torrential rains, distribution of surface wind stream (vector line) and temperature (dotted line, unit: °C) (c, d) (a, c) 20:00 BT 26 May 2013, (b, d) 14:00 BT 14 May 2002

2.2 锋区空间结构与暴雨落区

从图 3a 和 3b 经过地面气旋中心的经向剖面图

中可见,两次暴雨过程锋区空间结构有明显差异。20130526 过程冷锋更为陡峭,强上升运动位于气旋中心北侧 1.5 个纬距附近;而 20020515 过程锋面坡



度稍缓,强上升运动位于气旋中心北侧 2 个纬距附近。因此,尽管 20020515 过程气旋中心位置较 20130526 过程更偏南(图 3c),但因锋面坡度小,强上升运动更远离气旋中心,使得暴雨区更偏北(图 5d)。

可见,暴雨区偏北的程度,与系统在垂直方向上的后倾程度有关,后倾幅度越大,锋面坡度越小,强上升运动就越远离气旋中心,暴雨区就越偏北。反之,锋面较为陡峭时,暴雨区距离气旋中心则相对近些。

图 4 为两次过程暴雨中心潍坊青州(36.7°N、

118.5°E)和日照(35.4°N、119.5°E)相当位温、风、垂直速度经向垂直剖图。可见,20020515 过程,暴雨中心附近 800 hPa 以下为东北风,系统后倾明显,锋面坡度小,暖湿气流向北爬升的更远,最大上升运动位于 37°N、暴雨中心上空 700 hPa 附近。而 20130526 过程,暴雨中心附近 900 hPa 以下为东南风,900~700 hPa 为偏南风,也即 700 hPa 以下系统基本重合,锋面陡立,最大上升运动区较 20020515 过程偏南,位于在 35°N 附近。再次表明,锋面的空间结构,决定了最大上升运动区相对于地面气旋中心的位置,也决定了暴雨区偏北的程度。

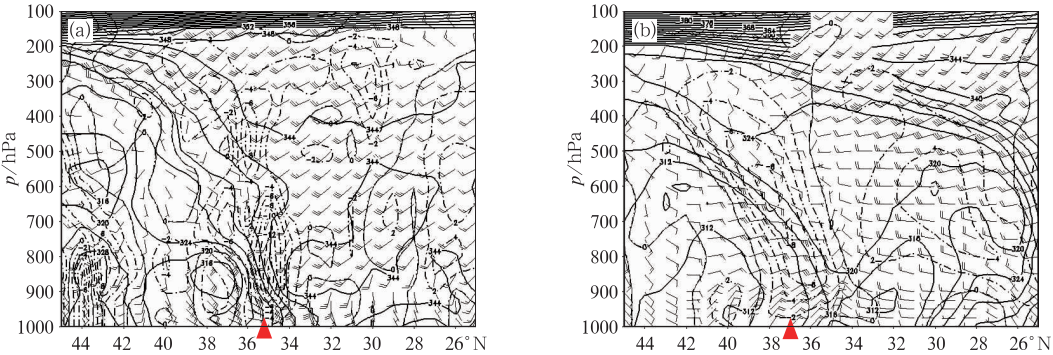


图 4 两次过程暴雨中心  $\theta_e$ (实线,单位: K)、垂直速度(点划线,单位:  $10^{-3}$  hPa  $\cdot$  s $^{-1}$ )经向垂直剖面图  
(a)2013 年 5 月 26 日 20 时,(b)2002 年 5 月 15 日 08 时

Fig. 4 Meridional cross-section of  $\theta_e$ (solid line, unit: K) and vertical velocity (dotted line, unit:  $10^{-3}$  hPa  $\cdot$  s $^{-1}$ ) along the centers of the two torrential rains  
(a) 20:00 BT 26 May 2013, (b) 08:00 BT 15 May 2002

2.3 850 hPa 低涡、暖切变与暴雨落区

850 hPa 低涡在所有类型的暴雨过程中都扮演着重要角色。春季黄(江)淮气旋过程中,西南涡东移北上并伴随低空急流往往产生大范围暴雨。在实际预报中,大多数预报员往往倾向于在低涡东南象限及低空急流的左前侧寻找暴雨落区,而实况并非如此。从图 5a 和 5b 可见,两次暴雨过程都伴有较强的低空急流。20130526 过程中,850 hPa 西南涡自西南向东北方向移动穿过山东;而 20020515 过程中,850 hPa 西南涡从苏皖北部进入黄海,并未进入山东。可见,20130526 过程中低涡路径较 20020515 过程路径偏北,而暴雨和大暴雨落区却较 20020515 过程的偏南。

图 5c 和 5d 给出了强降水落区与 850 hPa 低涡的关系。20130526 过程暴雨落区与暖切变对应,而 20020515 过程强降水则位于 850 hPa 低涡的西北

侧,暖切变附近雨量较小。  
对比分析两次暴雨过程 850 hPa 低涡、周围影响系统、温度场结构(图 5a 和 5b)等特征发现,两者重大区别在于我国东北地区是否有冷空气经渤海侵入低涡后部。20130526 过程中(图 5a),蒙古东部为庞大低涡,我国东北地区受低涡前西南急流影响,温度场为 16℃暖脊控制;而 20020515 过程,我国东北地区为高压,高压南部较强的东北风经渤海侵入低涡后部,温度场则为<12℃均匀的冷气团控制。从温度场分布情况看,20130526 过程暖切变即是冷暖空气的分界面,其北侧山东北部为冷中心,暖切变上存在南北向水平温度梯度在 2℃  $\cdot$  (100 km) $^{-1}$ 左右的纬向锋区;而 20020515 过程冷中心位于低涡中心后部,涡前暖切变上温度分布均匀,并不是干冷和暖湿空气的交界面,辐合较弱。孙兴池等(2012)在对纬向切变线暴雨落区的精细分析中,也有同样的结论。可见,只有在干冷和暖湿空气交汇在暖切变上

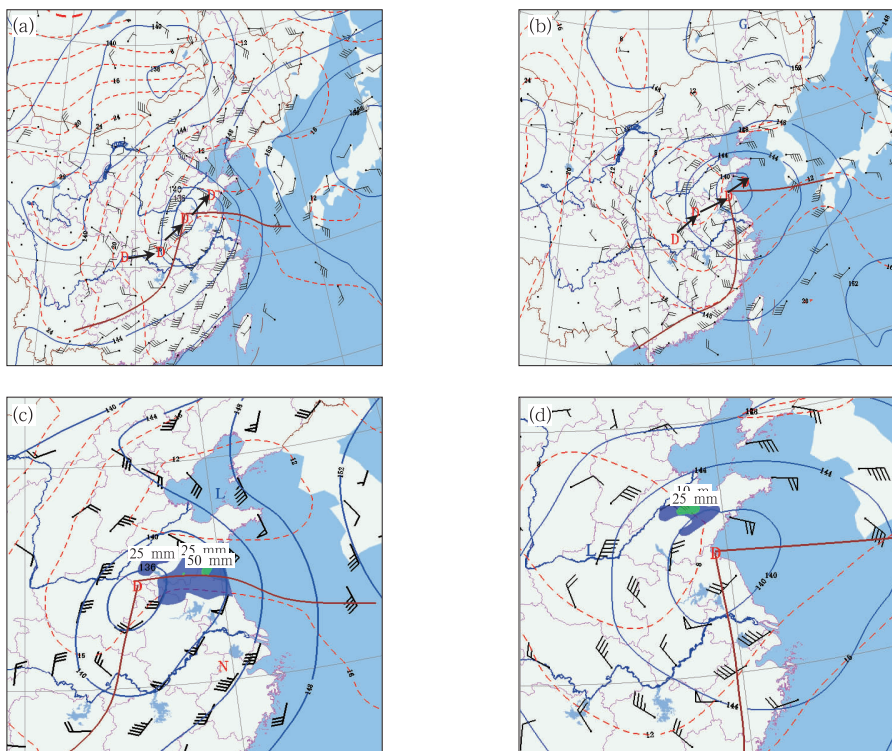


图 5 两次暴雨过程 850 hPa 形势场、低涡移向及强降水落区

(a)2013 年 5 月 26 日 20 时和(b)2002 年 5 月 15 日 08 时 850 hPa 形势场、低涡移向；

(c)2013 年 5 月 26 日 20 时 850 hPa 低涡与 6 h 雨量 $\geq 25$  mm 落区关系；

(d)2002 年 5 月 15 日 08 时 850 hPa 低涡与 6 h 雨量 $\geq 10$  mm 落区关系

(图中阴影区为 6 h 降雨量 $\geq 25$  mm 或 $\geq 10$  mm 落区)

Fig. 5 Synoptic charts and vortex path at 20:00 BT 26 May 2013 (a) and 08:00 BT 15 May 2002 (b); vortex at 850 hPa and 6 h precipitation  $\geq 25$  mm at 20:00 BT 26 May 2013 (c) and vortex at 850 hPa and 6 h precipitation  $\geq 10$  mm at 08:00 BT 15 May 2002 (d) (Shadow areas are rainfall areas of 6 h precipitation  $\geq 25$  mm or  $\geq 10$  mm)

时,暴雨区才与暖切变相对应。而当东北路径冷空气侵入低涡后部时,暖切变附近并不出现暴雨,暴雨区易出现在低涡的偏北象限。

## 2.4 东北路径冷空气与暴雨落区

上面分析提到,暴雨落区与我国东北地区是否有冷空气经渤海侵入低涡后部密切相关。在该类过程中,东北高压对暴雨落区预报具有重要指示作用。当东北高压南侧东北气流侵入低涡后部时,与低涡北侧的东南气流在风向上渐近辐合,特别当两者风速都较大时,其交汇处易出现暴雨区。从图 6a 可见,20020515 过程从渤海入侵的东北风与低涡东北象限的东南气流汇合,在山东半岛西部形成了一 $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量辐合中心,对应以潍坊青州市为中心的大暴雨落区。而低涡前暖切变上,为弱的水汽通量辐散,降水不明显。在

20130526 过程中(图 6b),我国东北地区为西南气流,低涡自身的动力辐合作用为主,涡前暖切变上具有较大的水汽通量辐合,对应山东南部大范围的大暴雨。

从 850 hPa 比湿场分布可见,雨量中心并不在高湿舌内部,而是在比湿舌前梯度较大的地方,与高湿舌前部的水汽通量辐合中心相对应。这是因为在春季影响北方的温带气旋暴雨过程中,冷暖空气辐合造成的动力作用是重要因素。这与夏季经常出现的暖区暴雨有所区别,暖区暴雨出现在高湿舌内部,由潜在对流不稳定释放引起,仅需要弱的辐合(孙兴池等,2013)。

此外,地面有东北路径的弱冷空气侵入,形成冷垫,使锋面具有更小的坡度,有利于暖湿空气向北爬升,使暴雨区偏北。

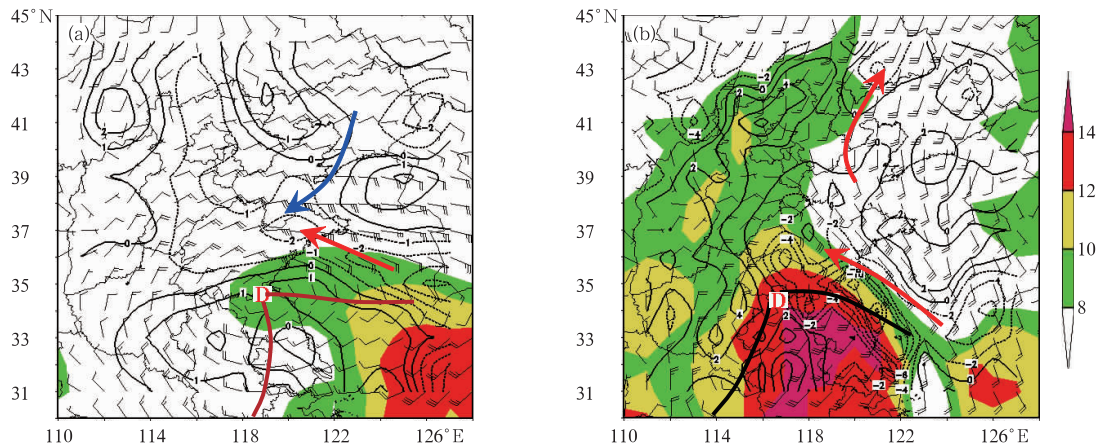


图 6 两次暴雨过程 850 hPa 风场、比湿(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和  
水汽通量散度(等值线, 单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )分布  
(a)2002 年 5 月 15 日 08 时,(b)2013 年 5 月 26 日 20 时  
Fig. 6 Wind, specific humidity (shaded, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence  
at 850 hPa (contour, unit:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) 08:00 BT 15 May 2002, (b) 20:00 BT 26 May 2013

3 结 论

通过以上分析,对春季影响山东的黄淮气旋类暴雨落区得出如下预报着眼点:

(1) 暴雨区集中出现在气旋中心北侧的偏东风中,且主要位于东北气流中。主要原因在于气旋中心北侧存在随高度向北倾斜的冷锋锋区。

(2) 暴雨区偏北的程度,与影响系统垂直方向上的后倾程度有关。当影响系统明显后倾时,锋面坡度变小,有利于暖湿气流沿锋面向北爬升的更远,造成暴雨区更偏北。此外,地面东北风形成冷垫,也往往使锋面坡度减小,有利于南方暖湿气流向北爬升,暴雨区位置偏北。

(3) 850 hPa 上,当我国东北地区存在高压时,其南侧东北风经渤海侵入 850 hPa 低涡后部,与低涡北侧的东南气流在风向上渐近辐合,在低涡北侧产生辐合中心,从而使暴雨区位于低涡的北侧。

(4) 实际预报中,仅在 850 hPa 低涡东南象限预报暴雨落区是不够的,必须综合分析系统的空间结构、温度场的配置及周围系统等的影

响,只有当冷暖空气交汇在低涡前的暖切变线上时,暴雨区才与其对应。

出版社。

黄彬,代刊,钱奇峰,等. 2013. 引发黄渤海大风的黄河气旋诊断研究. 气象,39(3):302-312.

黄彬,钱传海,聂高臻,等. 2011. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的应用. 气象,37(12):1534-1543.

李修芳. 1997. 影响华北地区的黄河气旋过程分析. 气象,23(1):17-22.

梁丰,陶诗言,张小玲. 2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析. 应用气象学报,17(3):257-265.

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

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

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.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:气象出版社.

信欣,李宁,毛奇浩. 2008. 2007 年 3 月山东、辽宁罕见强降水成因分析. 气象,34(T1):249-254.

阎丽凤,江文胜,周淑玲,等. 2008. 0703 温带气旋特大风暴潮数值模拟对比分析. 应用气象学报,19(5):595-601.

尹尽勇,曹越南,赵伟,等. 2011. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析. 气象,37(12):1526-1533.

周宏伟,裴道好,盛也,等. 2011. 苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的多尺度特征. 气象,37(4):432-438.

周雪松,吴炜,孙兴池. 2014. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析. 气象,40(6):744-753.

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.