

徐珺, 杨舒楠, 孙军, 等. 2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨. 气象, 40(12):1455-1463.

北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨^{* 1}

徐 珺 杨舒楠 孙 军 张芳华 谌 芸

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 2012 年 7 月 7 日黄淮出现一次典型暖区大暴雨过程, 降水持续时间长、强度大和强降水范围集中, 中尺度特征明显。本文通过常规和非常规观测、NCEP 分析资料对该次黄淮暖切变线引发的豫东北、鲁南和苏北等地大暴雨天气过程的成因进行探讨, 结果表明: 整层高湿环境有利于降低暖区暴雨对抬升条件的要求、提高降水效率和局地不断产生中尺度对流系统; 低层垂直风切变和超低空急流在对流触发和维持中可能有重要作用; 次天气及以下尺度的抬升条件, 如地面辐合线、925 和 850 hPa 切变和低空急流出口区的风速辐合等均可导致强降水, 降水落区一般位于低层多层风速辐合的叠置区; 暖区暴雨的雷达回波具有明显的后向传播、列车效应和热带降水型特点。

关键词: 暖区暴雨, 降水效率, 垂直风切变, 中尺度对流系统

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.004

Discussion on the Formation of a Warm Sector Torrential Rain Case in North China

XU Jun YANG Shunan SUN Jun ZHANG Fanghua CHEN Yun

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: A severe typical warm sector torrential rain with the obvious mesoscale characteristics of long lasting and concentrating precipitation area attacked Huanghuai Region on July 7 2012. The formation of the warm sector torrential rain induced by the Huanghuai warm wind shear line is discussed based on conventional and unconventional observation data and NCEP analysis data. The results showed that the whole troposphere with high humidity is beneficial to weaken the lifting condition, enhance precipitation efficiency and formation of quasi-stationary mesoscale convective systems. Vertical wind shear in low troposphere and extra low-altitude jet flow are likely to play an important role in triggering and maintaining the convection. Subsynoptic and mesoscale lift conditions such as surface wind convergence line, shear line at 850 hPa or 925 hPa and wind convergence brought by the low level jet can lead to the torrential rain. Meanwhile, the radar echo represents the backward propagation, train effects and tropical heavy rainfall characteristics.

Key words: warm sector torrential rain, precipitation efficiency, vertical wind shear, mesoscale convective system

* 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2014-085)、国家自然科学基金面上项目 (41175048) 和公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201206004、GYHY201306002) 共同资助

2014 年 2 月 13 日收稿; 2014 年 7 月 14 日收修定稿

第一作者: 徐珺, 主要从事中尺度暴雨分析与研究工作. Email: xujunmic@gmail.com

引言

2012年7月21—22日,北京、河北等地出现一次大范围大暴雨、局地特大暴雨天气过程,此次过程分为暖区降水和锋面降水两阶段,强降雨持续时间之长、降水强度之大,超出预报员预计(湛芸等,2012;孙军等,2012;周宁芳,2012)。目前对北京“7·21”特大暴雨从多尺度特征、中尺度对流系统的环境场特征、暴雨雨团的发生和传播机理、高分辨率模式分析场及预报分析和水汽异常、降水异常成因等方面已有相关研究(陈明轩等2013;孙建华等,2013;姜晓曼等,2014;廖晓农等,2013;俞小鼎,2012;方翀等,2012;金炜昕等,2014)。而同年7月7—8日河南东北部、山东南部、江苏北部也先后出现暖区大暴雨、局地特大暴雨,降水强度和持续时间都比北京“7·21”特大暴雨更甚。暖区暴雨影响系统相对锋面暴雨不明显,预报信号较弱,主客观预报能力差,因而揭示北方暖区暴雨的降水特点和成因对提高预报准确率具有重要意义。

除北京“7·21”特大暴雨外,目前直接针对北方暖区暴雨的研究较少,为何在非强迫背景(锋面、低涡切变等)下会出现强度如此之大的暖区暴雨?Dosswell等(1996)在暴雨预报中将强降水分解为雨强和持续时间两个因子,雨强又可分解为降水效率和垂直水汽通量,并指出降水效率在非高架对流的深厚湿对流造成的强降水中具有重要意义。Sui等(2007)改进了天气尺度和云尺度的降水效率表达式,为暖区暴雨强降水的成因分析也提供了新的依据。Chappell(1986)指出大多数的暴雨是由准静止对流系统造成的,暴雨区即对流系统中对流单体成熟后的降水重叠区,并探讨了对流系统移动和传播的影响因素。Rotunno等(1988)和Weisman(1992)指出由对流产生的基于地面的冷池和低空垂直切变可以产生长生命史的对流系统,这种系统有深厚的斜升和巨大的层云,该机制可以没有大尺度的强迫抬升,对流系统倾向于在最强低层垂直切变的地方生成。这些都为北方暖区暴雨的研究提供了重要思路和理论依据。

本文利用多种常规和非常规观测资料、NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 分析资料通过诊断分析和天气动力学理论相结合的方法,探讨2012年7月7日黄淮暖区暴雨的降水特点及成因,为预报员认识和预报该类北方暖区暴雨提供参考。

1 降水特点

2012年7月7日,豫东北、鲁东南和苏北先后出现大暴雨、局地特大暴雨天气(图1),由于无明显

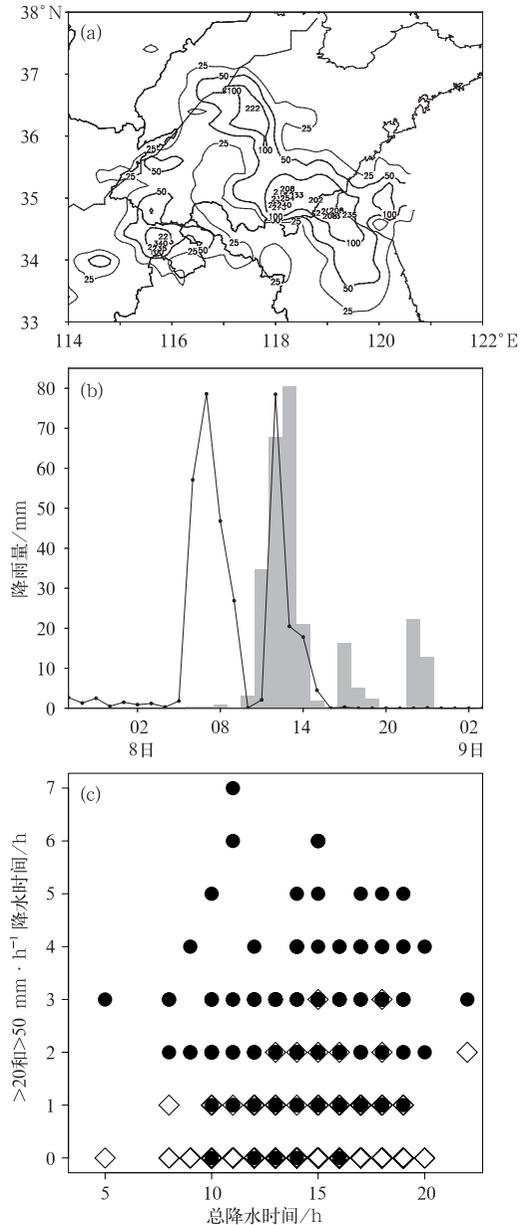


图1 2012年7月7日20时至8日20时降雨量(a)、小时雨量(b,实线:虞城;直方图:苍山)和大暴雨站降水时次(c,圆形 $>20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,菱形 $>50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 1 The observed accumulated precipitation from 20:00 BT 7 July to 20:00 BT 8 July 2012 (a), hourly precipitation (b, solid line: Yucheng, histogram: Cangshan), precipitation time of torrential rain stations (c, circular: $>20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, rhombus: $>50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

表 1 不同的小时雨量占日降雨量百分比(单位:%)

Table 1 Percent of different hourly precipitation in daily precipitation (unit: %)

日降水量 /mm	>20 mm · h ⁻¹	>30 mm · h ⁻¹	>50 mm · h ⁻¹	总站数
50	46.4	25.4	7.3	511
100	57.1	34.1	11.8	172
200	76.4	57.1	31	21

冷空气过程参与,为典型的北方暖区暴雨。统计自动站雨量,该次过程具有雨强大、强降水范围集中的特点:最大 24 h 雨量在河南商丘达 340.2 mm,连云港达 270 mm。强降水分为两个阶段:7 月 7 日 20 时至 8 日 06 时豫东北局地强降水,最大累积雨量达 330.2 mm,最大小时雨量达 79 mm;8 日 02—20 时降水主要集中于鲁东南和苏北,最大累积雨量达 250.3 mm,最大小时雨量达 80 mm。

明显的中尺度对流性降雨和稳定性降雨组成了本次强降雨过程。对 172 个大暴雨站点的时间降雨量统计结果表明:总降雨时间主要集中在 10~20 h,则时间较长;而 >20 mm · h⁻¹ 和 30 mm · h⁻¹ 的小时强降雨发生在 1~5 h,并分别占总降雨量的 57.1% 和 34.1%;对于 200 mm 以上大暴雨站点, >20 mm · h⁻¹、50 mm · h⁻¹ 雨量分别占总雨量的 76.4% 和 31%,这也揭示了本次大暴雨过程中尺度特征十分明显。但在 511 个暴雨站点中 >20 mm ·

h⁻¹ 和 50 mm · h⁻¹ 的小时强降雨量分别占总雨量的 46.4% 和 7.3%,余下的降雨量主要由降雨时间在 10 h 以上的稳定性降雨所酿成,表明稳定性降雨在本次大暴雨过程中也起了至关重要的作用。

2 中尺度对流系统的环境场特点

2.1 环流背景

此次暴雨过程发生在高空急流右侧,7—8 日 500 hPa 高度场呈“西高东低”、经向环流度大,副热带高压和高空槽相持有利于持续性降水的产生。584 dagpm 线西伸至 107°E 附近,江南至黄淮副热带高压边缘为低空急流,风速最大超过 16 m · s⁻¹,对流发生于低空急流最大风速中心前方(图 2)。8 日暖切变线出现于鲁南,降水区位于暖切变线南侧低空急流出口区附近。第二阶段降水基本符合华北暖切变暴雨(陶诗言,1980)的主要特征:主要暴雨区位于暖切变线南侧,暴雨区主要由急流最大风速中心前方的质量和水汽辐合区决定。

中分析结果(图略)表明在充沛的水汽和不稳定能量输送条件下,850 hPa 暴雨区比湿超过 14 g · kg⁻¹,8 日 08 时自地面抬升的自由对流高度均在 850 hPa 以下,降水区与 925 hPa 风速切变和辐合区、地面风速辐合区有较好对应,对流层低层多层风

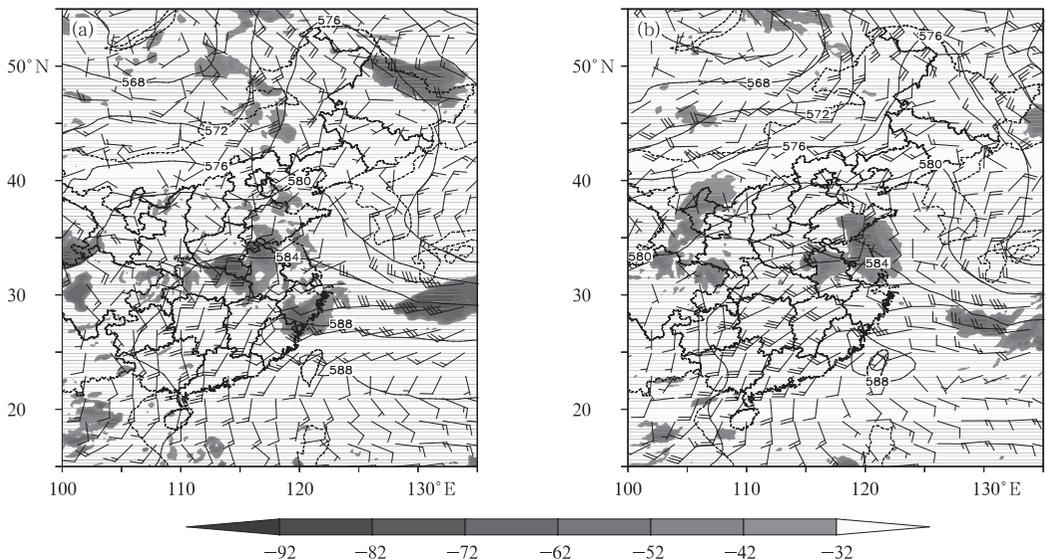


图 2 2012 年 7 月 7 日 20 时(a)和 8 日 08 时(b)850 hPa 风场、500 hPa 高度场(实线,单位:dagpm)和 TBB(填色,单位:℃)

Fig. 2 850 hPa wind field, 500 hPa height (solid line, unit: dagpm) and TBB (shaded, unit: °C) at 20:00 BT 7 July and 08:00 BT 8 July 2012

速辐合有利于形成深厚的上升运动,导致了降水。

2.2 高湿环境与降水效率

在预报业务中发现发现暖区暴雨的影响系统和预报征兆明显弱于锋面暴雨,那为什么弱强迫条件下会产生强度大、持续时间长的暴雨?这与高湿环境和高降雨效率密切相关。

2.2.1 高湿环境特点

该次过程 925 hPa 水汽输送(图 3a 和 3b)强度明显强于 850 和 1000 hPa,8 日 08 时前低层以西南急流水汽输送为主,随黄淮一带气旋性环流的形成和移动,水汽通道变为西南和东南两支。8 日 08 时

前,水汽通量显著辐合区在豫东北的低空急流出口区,以风速辐合为主;08 时后显著水汽辐合在山东和江苏低空急流出口区和低涡切变附近,风速和风向辐合皆有。

低层强水汽输送和辐合使得暴雨区在强降水发生前和发生过程中的地面露点温度维持在 22℃ 以上,温度露点差维持在 3℃ 左右,强降水结束后露点温度仍保持上升趋势;强降水前整层可降水量均超过 60 mm,7 日 08—20 时整层可降水量持续增加,20 时强降水开始后山东东南部和江苏北部仍保持增加的趋势;整层相对湿度随时间演变(图 4)显示强降水发生前和发生过程中整层高湿,相对湿度都

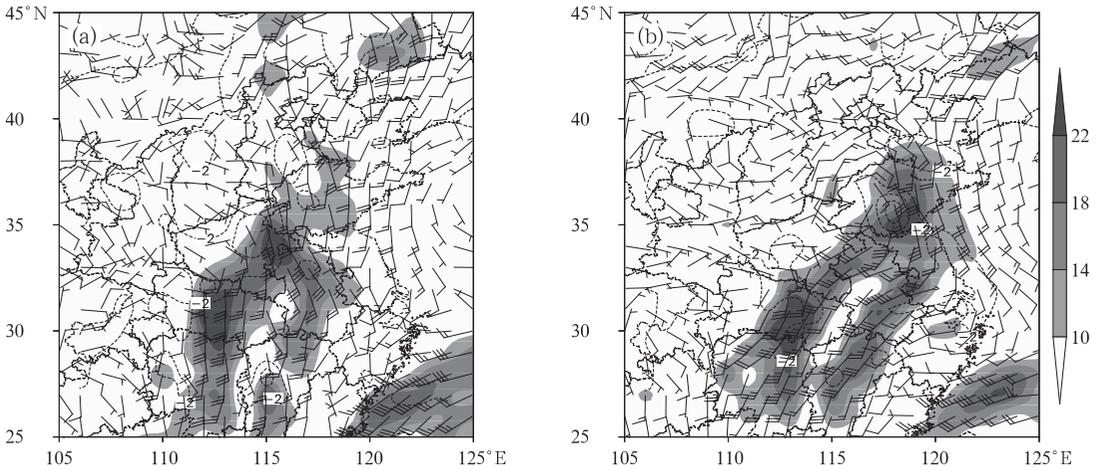


图 3 2012 年 7 月 7 日 20 时(a)和 8 日 14 时(b)925 hPa 水汽通量(填色,单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(虚线,单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场
 Fig. 3 925 hPa water vapor flux (shaded, unit: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (dashed line, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 20:00 BT 7 July and (b) 14:00 BT 8 July 2012

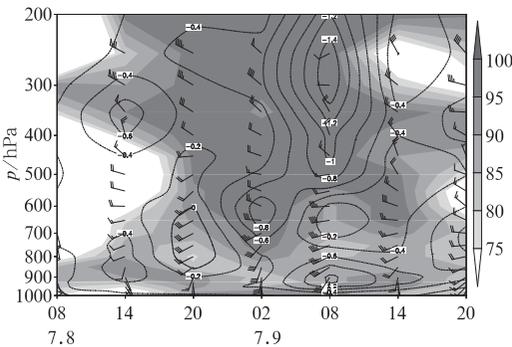


图 4 苍山雨量站相对湿度(填色),垂直速度(虚线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),风场时间演变
 Fig. 4 Relative humidity (shaded), vertical wind speed (dashed line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind sequence chart

在 75% 以上。

2.2.2 暖区暴雨的降水效率

Dosswell 等(1996)将雨强(R)分解为降水效率(E)、垂直速度(w)和上升气流的比湿(q),强降水是 E 、 w 和 q 的共同结果,不单独与任何一个成线性关系, E 在深厚湿对流造成的强降水中具有重要意义,与水汽辐合、地面蒸发率和夹卷效应等有关,一般情况下环境相对湿度越高、雨滴蒸发率越小,降水效率越高,受夹卷效应影响,镶嵌在大的云系背景下的对流系统相对孤立对流系统具有更高的降水效率。此外,暖云层(抬升凝结高度到 0℃ 高度之间)厚度越大降水效率越高,对流有效位能 $CAPE$ 不太大的情况下,如果云底比湿(或露点温度)很高,降水效率也

20时河南强降水开始时,850和925 hPa无明显正涡度,低层为西南风风速辐合和近地面东南风风速辐合。8日08时925 hPa黄淮东南部有曲率涡度发展,强降水区由河南移向山东和江苏,低层风场特点由风速辐合向风速切变加辐合转变,08时后转为风速切变加辐合。

从7日23时至8日11时地面风速辐合线位置、风场和雨团演变(图7),强降水主要位于次天气尺度的地面辐合线附近、东南风风速辐合区。地面辐合线位置相对稳定,伴随相应地区强降水,随低层气旋性环流的生成东移和低空急流的向东推进,8日02—05时地面涡旋中心和地面辐合线明显向东移动,强降水中心也进入山东东南部和江苏北部。至8日08时,强降水区位于850和925 hPa切变、低空急流和925 hPa急流出口区附近(图略)。

可见河南强降水的抬升条件以地面风速辐合、低空急流出口区的风速辐合为主,山东和江苏的强降水则有低层风速切变和辐合的共同作用,后者降水强度更大,持续时间更长。

对中尺度系统的垂直涡度贡献较大是水平涡度的扭转项,即垂直风切变的作用(寿绍文,2003),Rotunno等(1988)和Weisman(1992)也已证实对流系统倾向于在最强低层垂直切变的地方生成。该个例中强降水发生前和发生过程中,地面为偏东风,而风速随高度迅速顺转增强,至850 hPa已成为西南低空急流。强降水前和强降水过程中850~1000 hPa大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强垂直风切变中心均与对流的发生发展区有较好对应(图8),风速随高度的迅速顺转在对流的触发和发生发展中可能有重要作用。

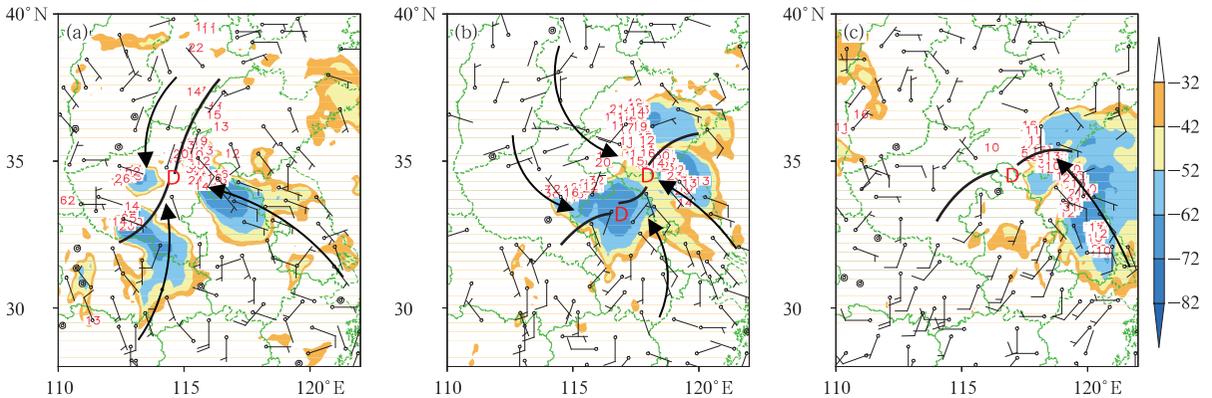


图7 2012年7月7日23时(a),8日05时(b),8日11时(c)间隔6h的地面风场、辐合线(黑线)、显著流线(箭头)和TBB(填色)、小时雨量(标识)

Fig. 7 Every 6-h surface wind field, convergence line (black line), significant streamline (arrow), TBB (shaded) and hourly precipitation (mark) from 23:00 BT 7 July to 11:00 BT 8 July 2012

强降水发生前和发生过程中伴随次天气尺度的925 hPa超低空急流(图9),最大风速超过 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,超低空急流区对应明显的非地转偏差,非地转风达 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,超地转对应低层强风速辐合,在对流触发和维持中也有重要作用。超地转的成因有待于进一步研究,但在预报中应重视风廓线、雷达等多种高精度风场资料的应用。

3 中尺度对流系统的发生发展特点

雷达组合反射率因子和径向速度(图10)表明,在低层多层风速辐合附近局地不断发生发展的对流单体合并为中尺度对流系统造成局地强降水,表现

出明显的后向传播、准静止和“列车效应”的特点。

河南7日20时至8日06时强降水主要由两个明显的中尺度对流过程造成。第一个明显的中尺度对流过程:7日20时至8日01时以积状云回波为主且具有准静止对流系统的特征。最强回波超过55 dBz,近地面东南风和西南风辐合使多个对流单体在商丘附近生成、合并(图10a~10c),雷达中气旋产品显示该阶段有中气旋出现,造成商丘附近局地强降水。对这种局地不断出生的对流系统导致的强降水,成因可能有:虽然雨强大,但中尺度对流出流并不强,这与高湿环境造成的蒸发率小有关,较弱的出流有助于原对流系统附近新生对流,而不像阵风锋触发的对流往往离原对流较远(Doswell et al,

1996);自地面向 5 km 高度处为随高度顺转的垂直风切变,这种垂直风切变有助于新生对流在对流系

统前进方向右侧生成,当低空风速较大和水汽供应强时,有利于准静止对流系统的出现(寿绍文等,

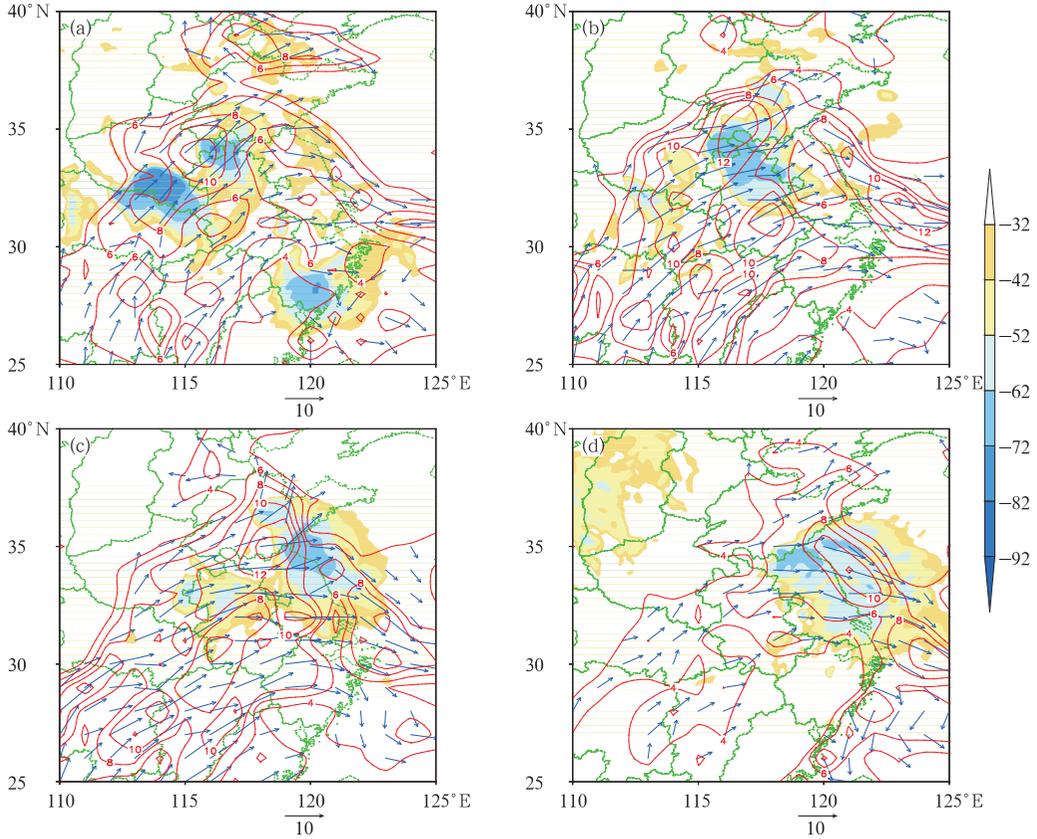


图 8 2012 年 7 月 7 日 20 时(a),8 日 02 时(b),8 日 08 时(c),8 日 14 时(d)850~1000 hPa $>4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直风切变(风矢量)、垂直切变大小(红线)、TBB(填色)

Fig. 8 Vertical wind shear larger than $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ from 850 hPa to 1000 hPa (wind vector), vertical wind shear value (red line), TBB (shaded) at (a) 20:00 BT 7 July, (b) 02:00 BT 8 July, (c) 08:00 BT 8 July and (d) 14:00 BT 8 July 2012

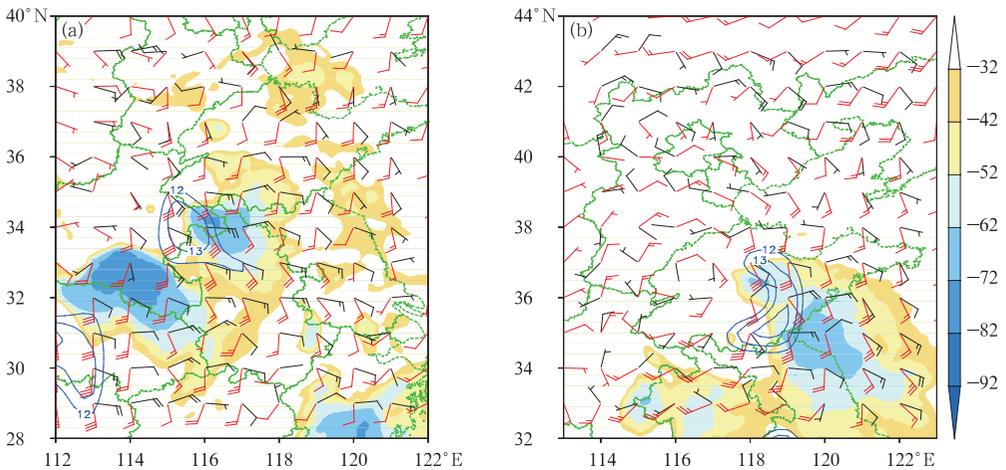


图 9 2012 年 7 日 20 时(a),8 日 08 时(b)925 hPa 超低空急流区(等值线)、风场(红)、超地转风(黑)和 FY2E TBB(填色)

Fig. 9 925 hPa extra low-altitude jet flow (contour), wind field (red), supergeostrophic wind (black) and FY2E TBB (shaded) at (a) 20:00 BT 7 July and (b) 08:00 BT 8 July 2012

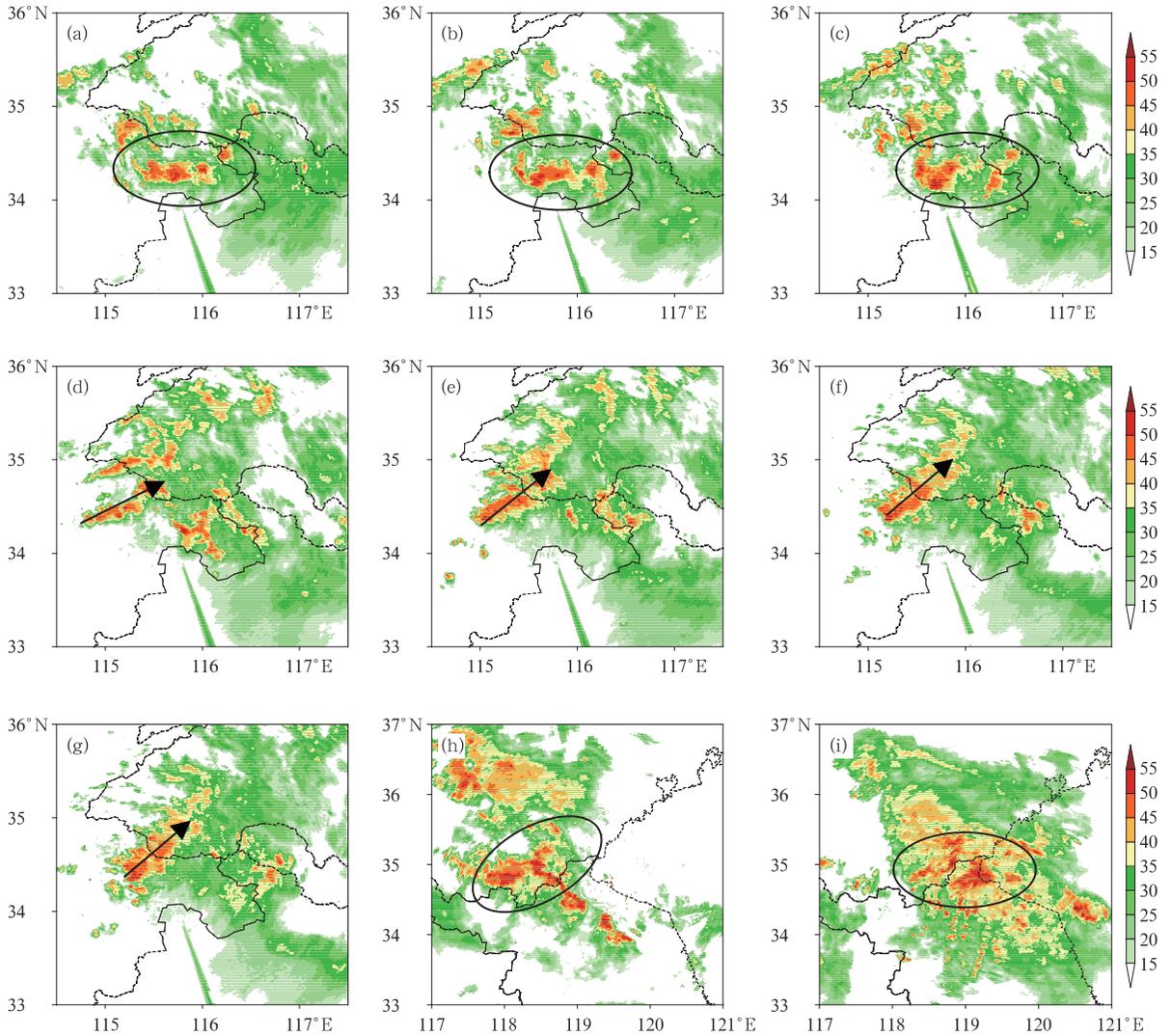


图 10 2012 年 7 月河南商丘站 7 日 21:18(a), 22:00(b), 22:30(c), 8 日 00:12(d), 00:54(e), 01:24(f), 01:36(g) 及江苏连云港站 8 日 04:06(h), 07:06(i) 的雷达组合反射率因子 (箭头: 对流单体移动方向)

Fig. 10 Composite reflectivity and radial velocity at Shangqiu Station at 21:18 (a), 22:00 (b), 22:30 (c) BT 7 July, 00:12 (d), 00:54 (e), 01:24 (f), 01:36 (g) BT 8 July 2012 and at Lianyungang Station at 04:06 (h), 07:06 (i) BT 8 July 2012 (arrow: moving direction of mesoscale convective cells)

2003), 即风暴右移角度较大, 同时近期也有研究表明低空急流和环流的相互作用、对流层动力和热力条件有利于强上升运动的维持和发展, 不断触发新对流从而组织成一个长生命期的准静止中尺度对流系统(王晓芳等, 2014)。第二个明显的中尺度对流过程: 7 日 22 时至 8 日 01 时多个对流单体经过睢县至曹县一带, 对流组织性增强, 表现出明显的后向传播和右移风暴特征, 列车效应明显(图 10d~10g), 8 日 00 时形成带状中尺度对流系统, 并向东南移经商丘一带, 最强回波超过 55 dBz, 02 时后带状对流系统趋于减弱消失。

8 日 04—10 时山东、江苏以积状云为主的混合性回波为主(图 10h~10i), 8 日 04—06 时积状云回波带迅速经鲁中至苏北一带向东北方向扩展, 大于 45 dBz 的回波中心较为零散的分布于混合性回波中。强降水也主要由两个明显的中尺度对流过程造成: 8 日 03—09 时低层东南—西南风切变叠加边界层风速辐合触发和维持连云港附近西北—东南向对流带, 大于 45 dBz 的块状积状云回波在赣榆至连云港一带稳定维持(图 10i); 8 日 00—04 时苍山—临沂一带低层西南—东南风切变附近发展中尺度系统造成强降水(图 10h), 随后经过连云港造成相应地

区强降水。

4 结论与讨论

本文利用多种常规和非常规观测资料以及 NCEP 分析资料,选取一次典型的北方暖区暴雨过程针对其降水时间长、强度大、强降水范围集中的特点进行了成因分析,发现:

(1) 暖区暴雨的高湿环境特点有助于高降水效率和大雨强的出现。整层高湿、地面高露点和低温度露点差有助于降低 LCL 和 LFC、增大暖云层的厚度,减小雨滴蒸发提高降水效率,较低的 LCL 和 LFC 使得暖区暴雨对降水的抬升条件的要求降低,在预报中应特别警惕这种高湿的区域。

(2) 次天气及以下尺度的抬升条件如地面辐合线、925 和 850 hPa 的切变和与低空急流出口区相伴随的风速辐合等均可导致长时间降水,暴雨落区一般位于低层多层风速辐合的叠置区。

(3) 对流系统的发生发展区和强低层垂直风切变区有较好对应,低层垂直风切变可能是暖区暴雨的重要触发条件。与 925 hPa 超低空急流伴随的超地转在对流触发中也可能有重要作用。

(4) 雷达回波表现为在低层多层风速辐合附近局地不断发生发展对流单体合并为中尺度对流系统造成强降水,具有明显的后向传播、准静止和“列车效应”的特点。

结合北京“7·21”特大暴雨中暖区暴雨时段研究结果(湛芸等,2012;孙军等,2012),两次过程在长降水时间、环流背景、高湿环境、抬升条件以及雷达回波的“列车效应”、具有热带降水回波性质等五方面具有共性。在预报中,这两次过程均有强降水开始时间预报偏晚、量级明显偏小的问题。两次暴雨过程从降水特点到成因都具有明显的中尺度特征,较低分辨率的全球模式对降水量级的预报能力有限。预报中应针对共性,从分析潜势入手,关注低层水汽实况演变、探空结构以及整层可降水量等条件是否达到或接近暖区暴雨的指标。判定具有潜势后寻找抬升条件,特别是次天气及其以下尺度的地面辐合线、与低空急流出口区相伴随的风速辐合等。预报员应着重关注暖区暴雨的高降水效率和中尺度对流系统的移动传播特点对降水量级和落区预报的影响。由于风速、湿度等环境条件的微小不同都会对强降水产生决定性影响(Louise et al,2009),目前应更多侧重于短时临近预报,注重对雷达、卫星、风

廓线、自动站等高精度观测资料的分析,以及高分辨率模式的开发、改进和应用。另外,北方暖区暴雨的降水机制、系统的预报方法和指标等有待于通过更多个例进行探讨,其可预报性也有待于深入研究。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,肖现,等.2013.北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理.气象学报,71(4):569-592.
- 湛芸,孙军,徐珺,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考.气象,38(10):1255-1266.
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012.2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析.气象,38(10):1278-1287.
- 姜晓曼,袁慧玲,薛明,等.2014.北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析.气象学报,72(2):207-219.
- 廖晓农,倪允琪,何娜,等.2013.导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究.气象学报,71(6):997-1011.
- 金炜昕,孙丞虎,李维京.2014.2014 年 7 月华北降水异常成因分析.气象,40(5):541-548.
- 寿绍文,等.2003.中尺度气象学.北京:气象出版社,131-136,193-194.
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,等.2013.2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征.大气科学,37(3):705-718.
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考.气象,38(10):1267-1277.
- 陶诗言.1980.中国之暴雨.北京:科学出版社,86-88.
- 王晓芳,赖安伟,王志斌.2014.一个长生命周期准静止中尺度对流系统的观测特征及其持续的环境条件.大气科学,38(3):421-437.
- 俞小鼎.2011.基于构成要素的预报方法——配料法.气象,37(8):913-918.
- 俞小鼎.2012.2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析.气象,38(11):1313-1329.
- 俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法.暴雨灾害,32(3):202-209.
- 周宁芳.2012.2012 年 7 月大气环流和天气分析.气象,38(10):1307-1312.
- Chappell C F.1986. Mesoscale meteorology and forecasting. Amer Meteor Soc,289-310.
- Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A.1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. Wea Forecasting,11:560-581.
- Louise N, Stevens B, Siebesma A P.2009. The environment of precipitating shallow cumulus convection. J Atmos Sci,66:1962-1979.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L.1988. A theory for strong long-lived squall lines. J Atmos Sci,45:463-485.
- Sui Chung-Hsiung, Li Xiaofan, Yang Ming-Jen.2007. On the definition of precipitation efficiency. J Atmos Sci,64:4506-4513.
- Weisman M L.1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems. J Atmos Sci,49:1826-1847.