

刁秀广,侯淑梅. 4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析[J]. 海洋气象学报,2017,37(3):46-53.
Diao Xiuguang,Hou Shumei. Analysis on radial velocity and ultra-low-level jet characteristics of four torrential rain processes[J].
Journal of Marine Meteorology,2017,37(3):46-53. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.006.(in Chinese)

4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析

刁秀广,侯淑梅

(山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要:利用多普勒天气雷达 VWP 资料,结合探空资料和降水实况,对4次大暴雨降水过程雷达径向速度和超低空西南急流特征进行了分析。4次强降水过程有3次属于低槽冷锋类,1次属于切变线类,K值较大,850 hPa与500 hPa温差较小,较弱的垂直风切变,中低层具有充沛水汽。低层具有相似的流场结构,径向速度上零速度线表现为“S”型,即暖平流结构。上游超低空风速 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上下游雷达之间出现 $\geq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速差之后,两部雷达之间出现小时雨量30 mm以上的强降水;上游超低空急流达到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,并且上下游超低空风速差超过 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,降水强度进一步加强并维持。超低空急流的建立与维持,同时上下游雷达之间的超低空强辐合,为降水风暴的发展与维持提供了能量、水汽与动力条件,对强降水的形成与持续具有重要作用。

关键词:超低空急流;强降水;暖平流

中图分类号: P458.1211 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2017)03-0046-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.006

Analysis on radial velocity and ultra-low-level jet characteristics of four torrential rain processes

DIAO Xiuguang, HOU Shumei

(Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Using the Doppler weather radar data, combined with the sounding data and precipitation data, the mean radial velocity and ultra-low-level jet characteristics of four torrential rain processes were analyzed. The results show that four torrential rain processes had higher K value, smaller temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, abundant water vapor and weaker vertical wind shear in middle and lower layers. Similar flow field structure in low-level and “S” type zero radial velocity contour of four torrential rain processes indicated that warm air advection was occurring. 30 mm or more hourly rainfall occurred when the ultra-low-level wind speed (from radar VWP products) reached $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ or above and wind speed difference between upstream and downstream radar exceeded $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The ultra-low-level wind speed reached $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ or more and wind speed difference between upstream and downstream radar exceeded $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the precipitation intensity furtherly strengthened and maintained. The establishment and maintenance of the ultra-low-level jet, and the ultra-low-altitude convergence between the upstream and downstream radar provide the energy, water vapor and dynamic conditions for the development and maintenance of the precipitation storm, and play an important role in the formation and persistence of the heavy rainfall.

Key words ultra-low-level jet; heavy rainstorms; warm advection

收稿日期:2017-06-06; 修订日期:2017-08-02

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20);山东省气象局科研项目(2012sdqxz05,2016sdqxz01)

作者简介:刁秀广(1964—),男,研究员级高级工程师,主要从事天气雷达应用研究工作,radardxg@126.com。

引言

暴雨产生的主要物理条件是充足的源源不断的水汽、强盛而持久的气流上升运动和大气层结构的不稳定。低空急流和超低空急流^[1-6]在输送暖湿气流的同时,使大气产生不稳定层结,产生强的上升运动,有利于暴雨形成。张家国等^[7]利用多普勒天气雷达资料对2008年7月22日湖北省襄樊特大暴雨过程中尺度特征分析表明,强降雨与东北风中尺度超低空急流的建立及其南部低涡东侧强偏南暖湿气流的向北发展有密切关系。姚晨等^[8]利用多普勒天气雷达资料对滁州地区不同类型特大暴雨过程对比分析表明,超低空急流的增强对暴雨尤其是夜间暴雨的形成有提示作用。徐珺等^[9]对2012年7月7日黄淮一次典型暖区大暴雨过程分析中指出,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。对山东而言,大范围或区域性的暴雨甚至是极端性的强降雨天气时常发生^[10-16],造成了严重气象灾害,例如2007年7月18日济南大暴雨、2011年7月25日乳山大暴雨等都与大尺度低空急流相关。但有些过程在天气图上分析不出低空或超低空急流,增大了对暴雨预报的难度。

山东暴雨影响系统分为4类:低槽冷锋、温带气旋、低涡与切变线、热带气旋及中低纬度系统相互作用^[17]。所选4次强降水均位于南北(上下游)两部雷达站之间的区域,4次大暴雨过程有3次属于低槽冷锋类,即2015年8月2—3日、2016年8月18—19日和2016年8月24—25日强降雨过程,1次属于低涡与切变线类,即2015年7月30—31日强降雨过程。利用南北两部雷达探测产品资料,结合天气实况,对4次大暴雨过程强降雨期间的超低空急流演变特征进行了分析,希望为今后强降雨短临时临近预报预警业务提供一些有意义的参考。

1 降水实况

受高空槽和切变线共同影响,2015年7月30日15时—31日08时,山东中部和南部地区出现暴雨局部大暴雨(简称0730),24h降水量见图1a。图1a是30日08:00—31日08:00国家级地面气象观测站24h降水量,有24个气象站达到暴雨,6个气象站出现大暴雨,最大降水量149mm出现在平阴气象站;国家级地面气象观测站最大小时降水量为95.8mm,31日00:00—01:00出现在平阴气象

站,区域气象观测站小时最大降水量为112.6mm,31日01:00—02:00出现在汶上县次丘站。最大小时降水量见图3a,30日21:00—31日07:00连续10h最大小时降水量都超过50mm(包括区域气象观测站),对流系统降水强度大,维持时间长。

受低槽冷锋影响,2015年8月2日12时—3日08时,河北南部和山东北部地区出现暴雨局部大暴雨(简称0802),24h降水量见图1b。图1b是2日08:00—3日08:00国家级地面气象观测站24h降水量,有14个站达到暴雨,7个站出现大暴雨,最大降水量223mm出现在惠民站;国家级地面气象观测站最大小时降水量为102.5mm,2日19:00—20:00出现在惠民站,区域气象观测站最大降水量为104.1mm,2日20:00—21:00出现在惠民县皂户李站。最大小时降水量见图3b,2日16:00—22:00连续6h都出现了小时降水量超过50mm的强降水,3日01:00—08:00连续7h都出现了小时降水量超过50mm的强降水(包括区域气象观测站降水量)。

受低槽冷锋影响,2016年8月18日14时—19日08时,河北东南部和山东北部地区出现暴雨局部大暴雨(简称0818),24h降水量见图1c。图1c是18日08:00—19日08:00国家级地面气象观测站24h降水量,有12个站达到暴雨,1个站出现大暴雨,最大降水量112mm出现在庆云站;国家级地面气象观测站最大小时降水量为60.1mm,19日04:00—05:00出现在德州站,区域气象观测站最大小时降水量为77.2mm,19日05:00—06:00出现在河北境内。最大小时降水量见图3c,19日03:00—07:00连续4h都出现了小时降水量超过50mm的强降水(包括区域气象观测站降水量)。

受低槽冷锋影响,2016年8月24日20时—25日08时,河北东南部和山东北部地区出现暴雨局部大暴雨(简称0824),24h降水量见图1d。图1d是24日08:00—25日08:00国家级地面气象观测站24h降水量,有9个站达到暴雨,2个站出现大暴雨,山东德州宁津降水量104mm,最大降水量153mm出现在河北黄骅站;国家级地面气象观测站最大小时降水量为73.5mm,25日05:00—06:00出现在河北东光站,区域气象观测站最大小时降水量为117.7mm,25日05:00—06:00出现在河北盐山县境内。最大小时降水量见图3d,小时降水量 ≥ 50 mm(包括区域气象观测站降水量)的持续时间7h,即24日21:00—25日03:00和25日04:00—07:00。

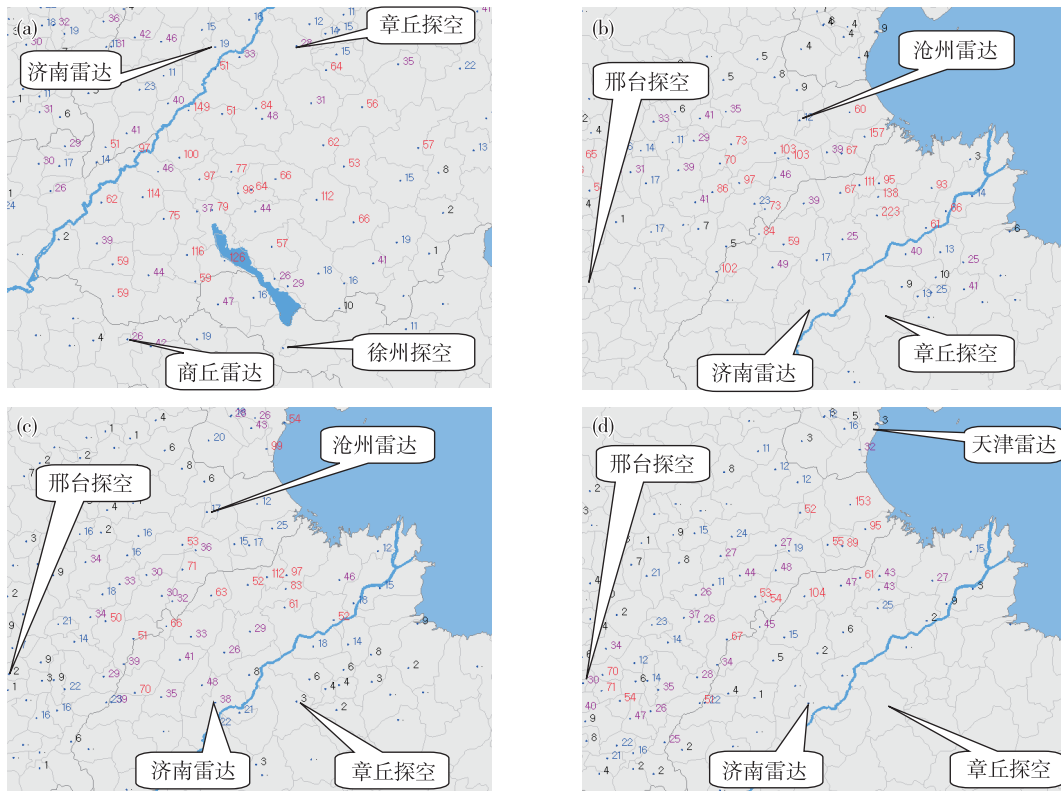


图1 24 h降水量(单位:mm)(a.2015年7月30日08:00—31日08:00,b.2015年8月2日08:00—3日08:00,c.2016年8月18日08:00—19日08:00,d.2016年8月24日08:00—25日08:00)

Fig.1 Accumulated precipitation(unit:mm)(a.from 08:00 BST 30 Jul. to 08:00 BST 31 Jul. 2015, b.from 08:00 BST 2 Aug. to 08:00 BST 3 Aug. 2015, c.from 08:00 BST 18 Aug. to 08:00 BST 19 Aug. 2016, d.from 08:00 BST 24 Aug. to 08:00 BST 25 Aug. 2016)

4次强降雨相比,共同特征是持续时间较长,都在12 h以上,降水强度较大,均连续数小时出现小时降水量超过50 mm的强降水。0730过程影响区域最大,0802过程持续时间最长。0818和0824两次过程持续时间、影响范围和总降水量大致相当。

2 环境物理量

4次强降雨过程对应探空站的环境物理量详见表1,探空站位置见图1。环境物理量主要包括K指数、抬升指数(LI)、850 hPa与500 hPa温差(Δt)、对流有效位能(CAPE)、低层比湿(q)、垂直风切变和低层风向风速等。可以看出,4次强降水过程具有较大的K指数值(34~42 $^{\circ}\text{C}$),较低的 Δt (22~28 $^{\circ}\text{C}$),较小的LI(-8.2~-1.2 $^{\circ}\text{C}$),低层(925~850 hPa)比湿较大,至少有一层比湿 $>15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,水汽充沛,0~6 km高度垂直风切变较弱,这些特征表明利于强降雨的产生。CAPE差别较大,最大4000 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小为0 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2016年8月24日20:00章

丘探空CAPE为0 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对0824强降雨过程没有指示意义。强降雨范围最大、小时雨量也最大的0730强降雨过程,CAPE也并不太高,CAPE对强降雨的指示性并不是太好。

探空资料显示,4次过程中0730和0802两次过程在强降水开始之前就存在低空和超低空急流,其它2次过程探空站均没有低空和超低空急流出现。2015年7月30日08:00自湖南怀化至江苏徐州探空站一线存在低空和超低空急流,徐州探空站850 hPa和925 hPa风速分别为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20:00急流减弱,徐州探空站850 hPa和925 hPa风速分别为 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2015年8月2日08:00自湖南怀化经山东章丘、辽宁沈阳至黑龙江嫩江探空站一线存在天气尺度低空和超低空急流,章丘探空站850 hPa和925 hPa风速分别为 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20:00急流仍维持,但整体略东移,章丘探空站850 hPa和925 hPa风速分别为 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,青岛探空站出现急流,850 hPa和925 hPa风速分别为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表1 4次强降雨过程环境物理量

Table 1 The environmental parameters of four torrential rain processes

时间	探空站	K 指数/ ℃	温差 $\Delta t/$ ℃	抬升指数 LI/℃	对流有效位能 CAPE/ ($J \cdot kg^{-1}$)	低层比湿 $q/$ ($g \cdot kg^{-1}$)			低层风速/ ($m \cdot s^{-1}$) / 风向/(°)			垂直风切变/ ($m \cdot s^{-1}$)	
						700 hPa	850 hPa	925 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	0~ 6 km	0~ 2 km
						20150730T20:00	徐州	34	26	-2.9	830	6.3	16.3
20150730T20:00	章丘	40	23	-1.9	584	10.3	18.4	19.2	4/25	4/5	8/265	14.1	7.1
20150802T20:00	章丘	39	26	-6.3	680	9.0	15.3	19.1	6/285	13/230	11/215	4.0	5.8
20150802T20:00	邢台	39	28	-8.2	4 000	11.8	10.3	18.0	4/260	6/220	8/195	6.1	3.9
20160818T20:00	章丘	34	24	-1.2	200	9.6	12.6	16.9	6/265	7/245	8/190	13.8	6.2
20160818T20:00	邢台	42	24	-2.7	920	11.8	19.6	21.6	8/285	4/250	4/175	12.4	4.0
20160824T20:00	章丘	35	22	1.1	0	10.3	15.3	14.9	2/280	3/240	1/185	6.3	2.0
20160824T20:00	邢台	42	23	-4.5	2 030	11.8	17.3	20.3	4/270	5/185	4/75	6.0	7.6

3 风暴演变与径向速度特征

3.1 0730 强降雨

0730 过程强降水主要出现在商丘雷达站和济南雷达站之间, 两站相距约 280 km。2015 年 7 月 30 日济南雷达反射率因子产品显示, 15:00 前后回波位于潍坊的昌邑至昌乐一带, 之后逐渐向西传播、发展, 20:00 前后影响商河、济南至沂源一带, 同时, 在泰安至聊城一带又有新的对流激发, 21:00 前后形成大范围强降雨回波, 主要回波带在沂源至莘县之间。之后, 回波带逐步南压, 影响鲁中南部和鲁南区域, 造成短时强降雨(图略)。商丘雷达反射率因子产品显示, 31 日 5:00 前后开始影响鲁、豫、皖、苏交界区域, 同时回波强度减弱(图略)。30 日 15:02 商丘雷达 2.4° 仰角 V26 产品显示, 低层(1 km 以下) 基本为南风, 径向速度绝对值在 $10 m \cdot s^{-1}$ 以下(图 2a₁), 21:03 出现 $-19 \sim -15 m \cdot s^{-1}$ 的径向速度中心, 对应高度为 0.4~1.2 km(图 2a₂), 说明低空和超低空出现较强西南急流。径向速度图上零速度线呈“S”型, 为暖平流结构。在回波影响雷达站之前, 基本维持这种结构。

3.2 0802 强降雨

0802 过程强降水主要出现在济南雷达站和沧州雷达站之间, 两站相距约 165 km。济南雷达反射率因子产品显示, 2015 年 8 月 2 日 13:00 前后河北东光至黄骅一带出现对流单体, 回波形成后向东偏北方向移动, 没有影响山东, 16:00 前后, 河北海兴至山东庆云一带又有新的对流风暴生成、发展, 之后逐渐形成带状对流雨带, 缓慢南压, 18:00—22:00 之间处于强盛阶段(图略), 23:00 之后对流雨带减

弱并逐渐消散, 而在德州至沧州之间又有新的对流单体生成。2 日 13:03 济南雷达 2.4° 仰角 V26 产品显示, 低层(1 km 以下) 基本为南偏西风, 径向速度绝对值在 $10 m \cdot s^{-1}$ 以下(图 2b₁), 径向速度图上零速度线呈“S”型, 为暖平流结构。18:59 在 0.6~0.8 km 高度出现 $-19 \sim -15 m \cdot s^{-1}$ 的径向速度中心, 说明超低空出现较强西南急流(图 2b₂)。22:00 之后, 低层径向速度值迅速减小。3 日 05:00—08:00 之间, 武城至沾化一带又有新的对流系统发展成熟, 产生第二阶段强降雨(图略), 同时强降雨阶段 0.6~0.8 km 高度维持 $-19 \sim -15 m \cdot s^{-1}$ 的径向速度中心(图 2b₄), 08:00 之后又迅速减弱。降水期间, 济南雷达径向速度图上零速度线基本呈“S”型, 为暖平流结构。

3.3 0818 强降雨

0818 过程强降水主要出现在济南雷达站和沧州雷达站之间, 两站相距约 165 km。沧州雷达反射率因子产品显示, 2016 年 8 月 18 日 22:00 前后, 石家庄至天津一线有对流单体形成, 由冷锋触发。回波缓慢南移过程中逐渐发展成西南—东北向带状回波, 19 日 02:00—07:00 处于旺盛阶段, 回波长度约 300 km, 07:00 之后逐渐减弱(图略)。回波形成前及回波形成、旺盛阶段, 济南雷达 2.4° 仰角 V26 产品上表现为暖平流结构(图 2c₁、c₂), 回波旺盛阶段 0.3~1.0 km 高度出现 $-19 \sim -15 m \cdot s^{-1}$ 的径向速度中心(图 2c₂)。19 日 01:00 前后影响山东, 06:00 前后回波影响济南雷达站, 同时低层径向速度减小, 在 $-14 \sim -10 m \cdot s^{-1}$ 之间。

3.4 0824 强降雨

0824 过程强降水主要出现在济南雷达站和天

津雷达站之间,两站相距约 265 km。24 日 18:30 前后在河北新海至武强一带出现对流单体,21:00 前后发展成长度约 350 km、西南—东北向对流带,缓慢东移南压。25 日 03:00 前后影响山东,08:00 前后开始减弱。回波形成前及回波形成、旺盛阶段,济南雷达 2.4°仰角 V26 产品上表现为暖平流结构(图 2d₁、d₂),同时低层径向速度值逐渐增大,05:00—07:00 阶段 0.5~1.0 km 高度维持-19~-15 m·s⁻¹的径向速度中心(图 2d₂)。25 日 07:00 之后,低层径向速度减弱,中心值在-14~-10 m·s⁻¹之间,回波影响雷达站时低层径向速度进一步减小。

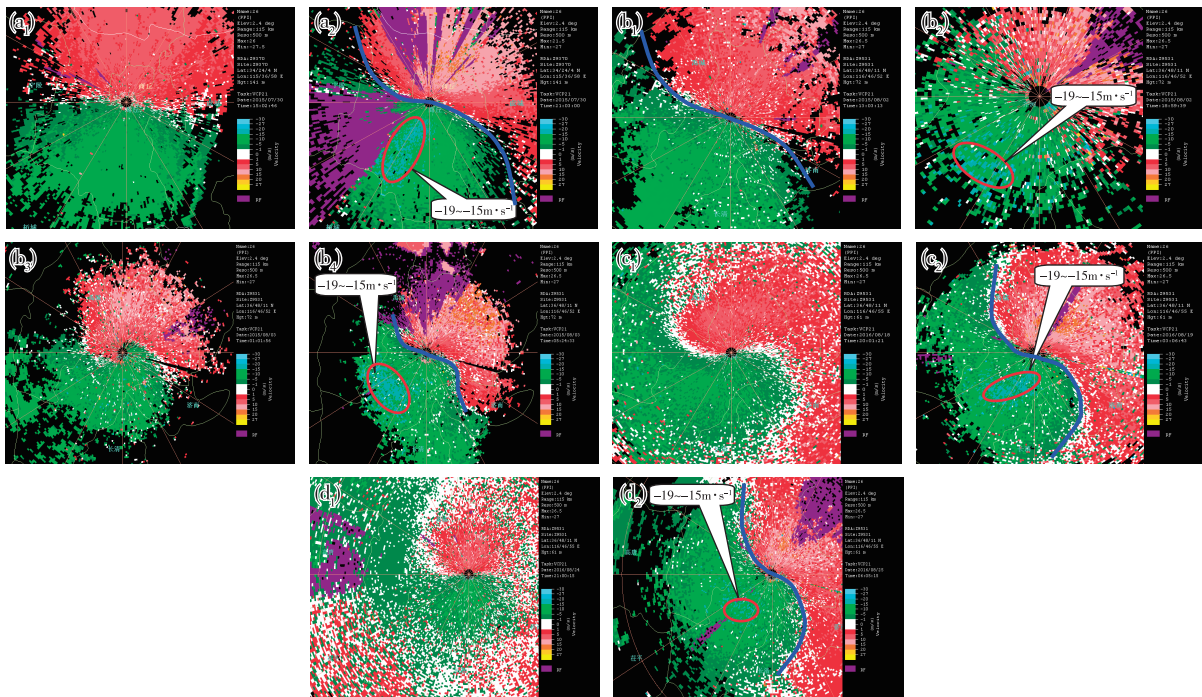


图2 2.4°仰角平均径向速度(V26)(a₁、a₂.2015年7月30日15:02、21:03 商丘雷达,b₁、b₂.2015年8月2日13:03、18:59 济南雷达,b₃、b₄.2015年8月3日01:01、05:24 济南雷达,c₁、c₂.2016年8月18日20:01和8月19日03:06 济南雷达,d₁、d₂.2016年8月24日21:00和8月25日06:05 济南雷达)

Fig.2 Mean radial velocity at 2.4° elevation(V26)(a₁、a₂.15:02 and 21:03 BST 30 Jul. 2015, Shangqiu radar,b₁、b₂.13:03 and 18:59 BST 2 Aug. 2015,Jinan radar, b₃、b₄.01:01 and 05:24 BST 3 Aug. 2015,Jinan radar,c₁、c₂.20:01 BST 18 Aug. and 03:06 BST 19 Aug. 2016, Jinan radar,d₁、d₂.21:00 BST 24 Aug. and 06:05 BST 25 Aug. 2016, Jinan radar)

4 超低空西南急流演变特征

图3是4次强降水过程最大小时降水量与天气雷达VWP显示的超低空(300~600 m)风速对应关系,灰色柱状体为两部雷达之间区域的最大小时降水量,VWP显示的风向如果为偏南风则表示为正值,偏北风则表示为负值。

4.1 0730强降雨雷达VWP特征

2015年7月30日08:00前后,商丘雷达VWP

0730强降水风暴系统移动路径及整体结构与其他3次存在明显差别,0730降水系统前期向西传播发展,后期又南压,先后影响潍坊、淄博、济南、泰安、莱芜、临沂、济宁等地,风暴结构较为零乱,呈现“多点开花”局面,其他3次降水系统基本上南压并缓慢东移,风暴呈带状分布。

4次过程降雨区前方西南气流区,低层具有相似的流场结构,径向速度图上零速度线表现为“S”型,即暖平流结构。风暴形成、发展和旺盛阶段低层径向速度中心值逐渐增大,旺盛阶段均出现-19~-15 m·s⁻¹的径向速度中心。

显示900 m高度西南风12 m·s⁻¹左右(300 m和600 m无数据),1500 m高度西偏南风12 m·s⁻¹左右,而11:00之后900 m高度南偏西风6 m·s⁻¹左右,1500 m高度西南风4 m·s⁻¹左右,说明低空和超低空西南急流迅速减弱;徐州雷达VWP显示12:00前后低空和超低空西南急流也迅速减弱,600 m和1500 m高度由14 m·s⁻¹左右减弱到8 m·s⁻¹左右(徐州和商丘雷达基本为东西分布,相距约140 km)。商丘雷达风廓线产品显示(图3a红色折线),16:00之后,

超低空西南风开始增大,至 20:00,风速由 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后至 31 日 05:00,基本维持在 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;31 日 05:00 之后降水回波逐渐影响雷达站,风向发生转变,由西南风转为东北风。济南雷达 VWP 显示(图 3a 蓝色折线),16:00—20:00 之间风速较小, $4\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为西南风,20:00—22:00 转为偏北风;22:00—次日 04:00,雷达周围一直存在降水风暴,受降水风暴影响,22:00 之后转为东南风,而且风速迅速增大,之后又逐渐减小,04:00 之后又转为西南风(图 3a 绿色折线为东南风时间

段)。

强降水开始前期,上游区域的山东西南部地区超低空西南气流逐渐加强,之后基本维持在 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;强降水开始时济南与商丘雷达之间超低空风速差迅速增大,说明低空辐合迅速加强,上升运动也迅速加强;22:00—次日 04:00 虽然是强劲的东南气流,但与上游的西南急流仍是辐合流场结构。超低空西南急流的建立与维持,近地层辐合的加强,是强降水形成与持续的主要因素之一。

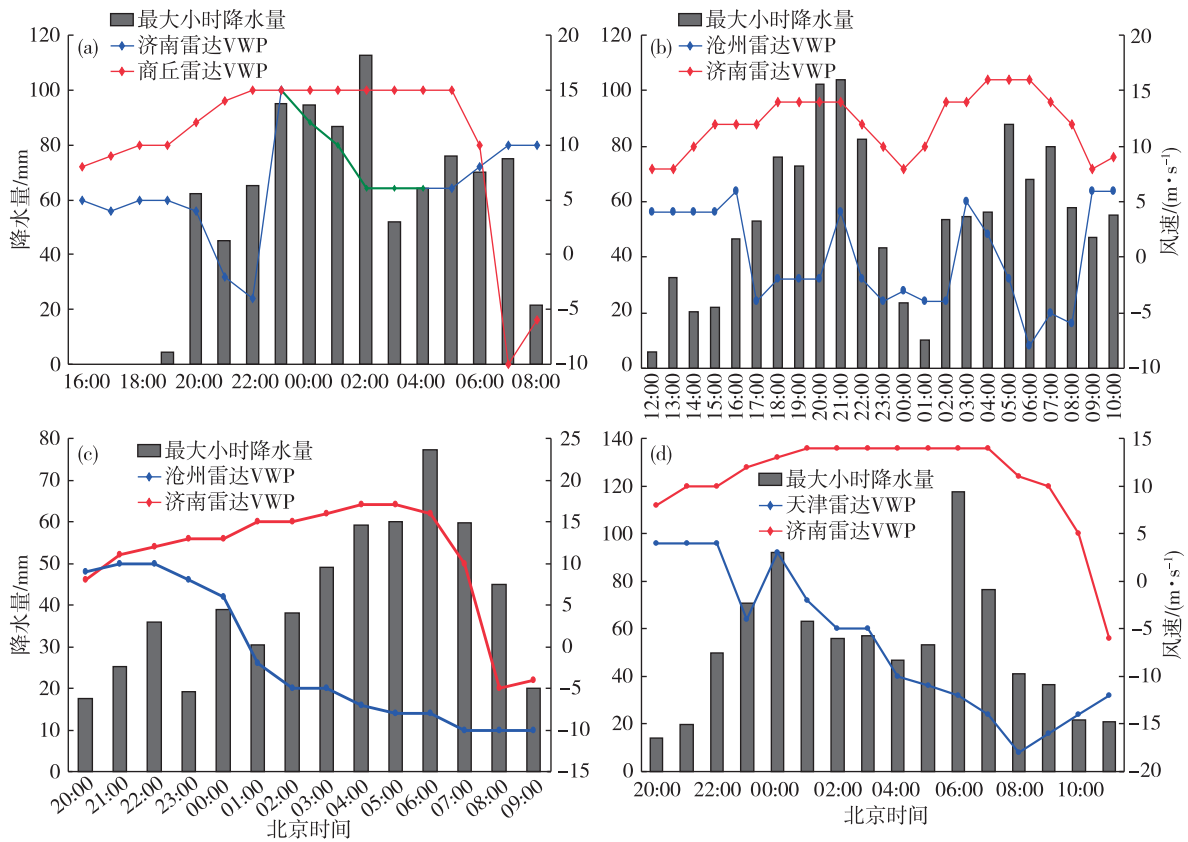


图3 最大小时降水量与天气雷达 VWP 超低空风速(a.2015 年 7 月 30 日 15:00—31 日 08:00,b.2015 年 8 月 2 日 11:00—3 日 10:00,c.2016 年 8 月 18 日 19:00—19 日 09:00,d. 2016 年 8 月 24 日 19:00—25 日 11:00)

Fig.3 Ultra-low-level wind speed from radar VWP product and maximum hourly precipitation (a.from 15:00 BST 30 Jul. to 08:00 BST 31 Jul. 2015, b.from 11:00 BST 2 Aug. to 10:00 BST 3 Aug. 2015, c. from 19:00 BST 18 Aug. to 09:00 BST 19 Aug. 2016, d. from 19:00 BST 24 Aug. to 11:00 BST 25 Aug. 2016)

4.2 0802 强降雨雷达 VWP 特征

强降水分为 2 个阶段,2 日 16:00—23:00 和 3 日 02:00—10:00。济南雷达 VWP 显示,2 日 08:00 前后 600 m 高度西南风 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,1 500 m 高度西南风 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,与章丘 08:00 探空所显示急流大致相当;而 11:00 之后 600 m 高度西南风减弱到 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,而 1 500 m 高度西南急流仍维持在 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。13:00 前后 600 m 高度超低空风速

逐渐增大,由 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右增大到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,15:00 之后增大到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,18:00—21:00 维持在 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(图 3b 红色折线)。16:00 之前沧州雷达所测风速在 $4\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,方向基本为西南风,16:00 之后转为偏北风,风力较小(图 3b 蓝色折线)。济南雷达超低空西南风达到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之后,强降水开始,强降水维持期间济南雷达和沧州雷达之间一直维持较大的风速差($\geq 14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。济南雷达

超低空西南风减小到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下之后,强降水明显减弱。3日 02:00 之后济南雷达超低空西南风又迅速增大,同时沧州雷达仍是偏北风,新一轮强降水又开始并持续 9 h。第二阶段强降水期间济南雷达超低空西南急流大于第一阶段,同时超低空风速差也大于第一阶段,说明第二阶段的强降水具有更强的动力条件。

4.3 0818 强降雨雷达 VWP 特征

济南雷达和沧州雷达 VWP 产品显示,18日白天超低空一直有较大的偏南风,济南雷达 VWP 基本在 $6\sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,沧州雷达 VWP 基本在 $8\sim 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两部雷达之间超低空是辐散结构,没有降雨产生。济南雷达风廓线产品显示(图 3c 红色折线),20:00 前后开始,超低空西南风由 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后逐渐增大,19日 01:00—06:00 之间维持在 $15\sim 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,06:00 之后降水系统逐渐靠近雷达站,超低空西南风迅速减小并转为偏北风。沧州雷达风廓线产品(图 3c 蓝色折线)显示,19日 00:00 之后转为偏北风,而且风速逐渐增大。18日 23:00 之后济南和沧州之间的超低空风速差迅速增大,18日 23:00—19日 01:00 风速差由 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右迅速增大到 $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,02:00—07:00 速度差维持在 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,同时降水系统也逐渐发展,降水强度逐渐增大,02:00—07:00 之间最大小时降水量都在 50 mm 以上。

4.4 0824 强降雨雷达 VWP 特征

济南雷达 VWP 产品显示,24日白天超低空一直为西南风,风速在 $4\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,18:00 之后开始逐渐增大,20:00 之后超低空西南风增大到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(图 3d 红色折线),24日 22:00—25日 07:00 基本维持在 $12\sim 14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,25日 07:00 之后降水系统逐渐靠近济南雷达站,偏南风迅速减弱,并转为偏北风。天津雷达风廓线产品显示,22:00 之前为较弱的偏南风,风速 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,22:00 之后逐渐转为偏北风,而且风速逐渐增大,25日 06:00—10:00 期间达到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,出现北风急流。降水期间,济南雷达和天津雷达之间超低空存在风速辐合,21:00 风速差达到 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时强降水(小时雨量 50 mm 以上)开始出现,之后风速差进一步增大,辐合强度也进一步加强,强降水继续维持。

4次大暴雨过程中都是超低空西南风达到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或以上,同时上下游之间有明显的超低空辐合,以致出现小时雨量 30 mm 以上的降水;上游超低空西南急流达到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,并且上下游超低

空风速差超过 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明风暴低层动力、热力及水汽条件进一步发展或加强,使得降水强度进一步加强并维持。

4次过程强降雨开始前超低空西南风有明显增大现象,强盛阶段达到急流标准。超低空西南急流时间尺度和空间尺度相对较小,属于中尺度超低空急流。超低空中尺度西南急流的建立与维持,同时上下游雷达之间的超低空强辐合,为降水风暴的发展与维持提供了能量与动力条件,对强降水的形成与持续具有重要作用。

5 结论

1)4次大暴雨过程降水系统持续时间长,降水强度大。0730 过程属于切变线类,其他 3 次属于低槽冷锋类。环境物理量表明,K 指数值较大,850 hPa 与 500 hPa 温差较小,中低层水汽充沛,较弱的垂直风切变,利于强降水的产生。

2)演变特征存在不同。0730 降水系统前期具有向西传播发展、后期南压的演变特征,降水风暴分布较为零乱,呈现“多点开花”局面,其他 3 次降水系统呈带状分布,回波带具有南压过程中缓慢东移的演变特征。

3)4次强降雨过程上游区域低层具有相似的流场结构,径向速度图上零速度线表现为“S”型,即暖平流结构。风暴旺盛阶段低层均出现 $-19\sim -15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的径向速度中心。

4)超低空西南急流的建立与维持,同时上下游雷达之间的超低空强辐合,为降水风暴的发展与维持提供了能量与动力条件,对强降水的形成与持续具有重要作用。超低空西南风达到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或以上,同时上下游之间有明显的超低空辐合,是强降雨开始的重要特征。上游超低空急流达到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,并且上下游超低空风速差超过 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,降水强度进一步加强并维持。

参考文献:

- [1] 李建辉. 华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响[J]. 气象学报, 1982, 40(3): 319-326.
- [2] 杜杰, 薛惠娟. 一次暖区特大暴雨强度及落区的探讨[J]. 热带气象学报, 1985, 1(1): 85-92.
- [3] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- [4] 柳林, 李娜, 常平, 等. 一次区域性大暴雨环境特征分析[J]. 山东气象, 2003, 23(4): 12-14.

- [5] 孙俊,邓国卫,张渝杰,等.“13·6·30”遂宁市特大暴雨成因的初探[J]. 气象,2014,40(10):1174-1182.
- [6] 王宁,王秀娟,张硕,等.吉林省一场持续性暴雨成因及MCC特征分析[J]. 气象,2016,42(7):809-818.
- [7] 张家国,岳阳,牛淑贞,等.一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析[J]. 气象,2010,36(4):21-26.
- [8] 姚晨,张雪晨,毛冬艳.滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析[J]. 气象,2010,36(11):18-25.
- [9] 徐珺,杨舒楠,孙军,等.北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J]. 气象,2014,40(12):1455-1463.
- [10] 朱义青,高安春,胡顺起.一次鲁南大暴雨过程成因诊断分析[J]. 山东气象,2013,33(4):24-27.
- [11] 张洪英,李淑玲.一次MCC过程雷达回波特征分析[J]. 山东气象,2014,34(2):13-19.
- [12] 姚超,马嫣.鲁西南至鲁中一次暴雨过程成因分析[J]. 山东气象,2014,34(3):17-21.
- [13] 侯淑梅,盛春岩,万文龙,等.山东省极端强降水天气概念模型研究.[J]. 大气科学学报,2014,37(2):163-174.
- [14] 万明波,刁秀广,杨晓霞,等.“2011.07.25”山东乳山强降水中尺度分析[J]. 山东气象,2015,35(2):21-27.
- [15] 陈善炳,陈叶婷,李红梅.“9.21”山东半岛南部沿海强降水的中尺度分析[J]. 山东气象,2015,35(2):15-20.
- [16] 赵振东,刁秀广.小时雨量100 mm以上强降水单体雷达回波特征分析[J]. 山东气象,2016,36(4):7-12.
- [17] 阎丽凤,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社,2014:32-74.