

赵海军,李柏,潘玲,等.暴雨过程中逆风区特征及应用判据研究[J].海洋气象学报,2019,39(2):126-133.
ZHAO Haijun, LI Bai, PAN Ling, et al. Characteristics and application criteria of adverse wind area during torrential rain[J].
Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(2): 126-133. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.013. (in Chinese)

暴雨过程中逆风区特征及应用判据研究

赵海军¹,李柏²,潘玲³,吴志彦⁴,王庆华¹

(1. 临沂市气象局,山东 临沂 276004;2. 中国气象局气象探测中心,北京 100081;3. 日照市气象局,山东 日照 276800;4. 海南省气象台,海南 海口 570203)

摘要:为研究暴雨过程中逆风区特征及应用判据,统计分析2010—2017年山东临沂地区暴雨过程中的多普勒雷达观测资料,结果表明:暴雨过程中,风暴内的垂直环流是造成逆风区发生发展的直接原因;逆风区表现为 β 中尺度和 γ 中尺度,其形态在不同天气类型下有明显差异;逆风区持续阶段降水强度增大,持续时间与过程累积雨量呈正相关;当雷达最低仰角识别到逆风区,其厚度 ≥ 4.0 km、强度 ≥ 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、径向速度绝对值最大值 ≥ 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且持续30 min以上时,风暴常明显发展,相关特征可用于预报风暴和暴雨的发展。

关键词:暴雨;中尺度;逆风区;切变;垂直伸展

中图分类号: P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0126-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.013

Characteristics and application criteria of adverse wind area during torrential rain

ZHAO Haijun¹, LI Bai², PAN Ling³, WU Zhiyan⁴, WANG Qinghua¹

(1. Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004, China; 2. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China; 3. Rizhao Meteorological Bureau, Rizhao 276800, China; 4. Hainan Meteorological observatory, Haikou 570203, China)

Abstract The Doppler radar data of torrential rainfall processes in Linyi, Shandong from 2010 to 2017 are statistically analyzed to study the characteristics and its application criteria of adverse wind areas during these processes. Results reveal that: 1) the occurrence and development of adverse wind areas are direct results of the vertical circulations inside the storms during the torrential rainfall processes; 2) the adverse wind areas present meso- γ and meso- β scales with different shapes in different weather types; 3) the precipitation intensity tends to increase while the adverse wind areas persistently exist, and the duration of the adverse wind is positively correlated to the accumulated precipitation; 4) when the radar identifies the adverse wind area at the lowest elevation angle with the thickness equal to or greater than 4.0 km, the intensity equal to or greater than 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, the absolute value of the maximum radial velocity equal to or greater than 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the duration above 30 minutes, the storm generally significantly develops. Relevant characteristics can be reference in forecasting storms and torrential rainfall processes.

Key words torrential rain; mesoscale; adverse wind area; shear; vertical stretch

收稿日期:2018-11-29; 修订日期:2019-01-14

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2017sdqx09);山东省气象局预报员专项(SDYBY2018-13)

作者简介:赵海军,男,高级工程师,主要从事强对流天气与天气雷达应用研究,weazhj@163.com。

引言

暴雨是我国最重要的灾害性天气之一,通常是在多种尺度系统相互作用下,对流风暴不断生成、移动并影响的结果,在雷达图上表现为较强的反射率因子,较长时间影响某一区域^[1]。多普勒天气雷达在暴雨天气监测中发挥重要作用,不仅能探测降水目标物的回波强度,还可以测量降水目标物沿雷达波束的径向速度^[2],在降水强度变化及风暴内部结构演变等方面具有很好的监测预警效果^[2-4]。

随着我国多普勒雷达网的建设和完善,对逆风区现象的研究有了较多观测事实依据。气象工作者经过多年观测和统计分析,发现中小尺度气旋、逆风区等雷达产品速度特征与短时强降水、雷雨大风等强对流天气有密切联系^[5-21]。段丽等^[5]应用SA雷达产品对京西三次局部暴雨的风场进行分析,指出局地暴雨落区的形成和维持与 γ 中尺度逆风区强辐合带的作用密不可分。徐芬等^[6]对2012年春季南京地区首场暴雨过程进行分析,发现逆风区断裂位置及边缘地带对应强降水落区。冯晋勤等^[7]发现福建西部山区的局地对流暴雨在风场上主要对应逆风区或中小尺度气旋。科研人员利用多普勒径向速度场对暴雨和强对流天气中出现的低空风场特征进行了分析,指出低空逆风区等风场辐合特征对雨团的发生发展有一定的指示性^[8-21]。李军霞等^[9]分析了山西省降水天气和强对流天气中逆风区的特征,指出逆风区辐合风场可提前1~2 h预警强对流天气。从以上研究可知,逆风区与强对流天气紧密相关。目前,针对不同天气形势背景下逆风区的表现形式及其结构特征的研究仍开展较少,逆风区特征与对流性暴雨发展的应用判据还没有系统归纳。为研究暴雨过程中逆风区特征与应用判据,本文统计分析不同天气背景下长时间序列的暴雨过程中逆风区特征及其变化关系,以期探讨可应用于实际业务中的有效判据。

1 逆风区定义与结构特征

1.1 逆风区定义

根据张沛源和陈荣林^[4]提出的逆风区概念,逆风区定义为在低仰角PPI多普勒速度图上,同一方向的速度区中,出现的另一种方向的速度区,即一种方向的速度区被另一种方向的速度区所包围,并有明显零速度圆环将两者隔开,且风区不能跨越测站和零径向速度线,这片被包围的速度区称之为逆

风区。为使与暴雨相关的逆风区意义更为明确,本文讨论的逆风区是能体现大气中低层中小尺度扰动的逆风区,不讨论风暴顶的辐散现象。

逆风区与速度模糊有明显区别。速度模糊在平均径向速度图像上表现为色标的突变,即正最大(负最小)色标转为负最小(正最大)色标^[2];而逆风区通常会由零速度线分割,且不是径向速度的最大值^[4]。中小尺度气旋或反气旋式风场在平均径向速度产品上通常表现为一个正(负)速度中心和一个负(正)速度中心相邻,有时还可以表现为一个大的正(负)速度中心和一个小的正(负)速度中心相邻,当使用相对径向速度图时,常表现为相对对称的一个正速度中心和一个负速度中心。而逆风区是大片正(负)速度区域完全包围着一个负(正)速度区域,且不是明显中尺度速度对结构^[4]。

1.2 逆风区结构特征

从定义可知,逆风区一侧为辐合区,另一侧为辐散区,逆风区就是辐合辐散共轭体风场结构在多普勒雷达PPI速度图上的表现。

暴雨是由于对流风暴不断生成、移动并影响的结果^[1]。对流风暴是由一个或多个单体组成,风暴内具有强烈的垂直运动并激发深对流的产生;风暴单体的演变过程通常包括三个阶段,即塔状积云阶段、成熟阶段和消亡阶段。在塔状积云阶段,风暴内部由上升气流控制,在风暴成熟阶段,即降水开始的阶段,雷达回波接地,风暴内部上升气流与下沉气流共存,而中小尺度斜升气流和下沉气流与风暴中的低层气流水平辐合辐散密切相关^[2]。对于大多数单体而言,上升气流从风暴右前方边界层流入,下沉气流则在中层从风暴的右后方卷入,到近地面层后辐散流出,又加强了近地面层水汽辐合,促进边界层暖湿气流流入风暴,促使新的对流单体发展。大量观测事实证明,风暴中两支中尺度气流倾斜发展过程中,气流间存在与环境水平风向相反方向的矢量,即逆风区。

实际业务中,雷达可清楚地观测到逆风区的辐合辐散共轭体风场结构特征,逆风区尺度通常为 β 中尺度和 γ 中尺度。径向速度垂直剖面产品可较为直观地展示风暴内部气流分布和逆风区的垂直伸展及厚度特征,具体图例见下文。

2 资料与方法

统计2010—2017年山东省临沂市10个国家级气象观测站资料,辖区内有1个或1个以上观测站

08:00(北京时,下同)过去 24 h 降水量 ≥ 50.0 mm 为一个暴雨日。2010—2017 年临沂地区共有 80 个暴雨日,文中描述站点均为临沂辖区内国家级气象观测站,其中 2013 年 8 月 10 日和 8 月 12 日临沂雷达维修,用江苏连云港雷达资料代替。

雷达采用的体扫模式为 VCP21,即 6 min 内完成 9 个仰角 ($0.5^\circ \sim 19.5^\circ$) 的扫描。利用 $0.5^\circ \sim 3.4^\circ$ 仰角的径向速度产品和垂直剖面产品,分析暴雨过程中大气中低层中小尺度扰动与逆风区相关的特征。平均径向速度和回波高度为雷达用户终端(PUP)状态栏显示数值,如 PUP 上一个速度值显示的图标范围为 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,状态栏显示数值为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。状态栏标注的高度是假定标准大气情况下计算得到的高度,与实际回波高度存在差别。

对天气形势分型时,综合分析观测资料,普查天气图,以 500 hPa 影响系统为主,低层影响系统为辅^[21],对暴雨天气过程降水集中时段的天气系统分型归类:当中低层主要影响系统为切变线,未生成气旋且地面无明显冷锋时,定义为切变线类;当高空和地面均有明显冷锋(锋区)时,定义为低槽冷锋

类;当中低层及地面产生温带气旋,且暴雨区无冷锋侵入时,定义为温带气旋类;当受热带气旋主体或倒槽影响造成暴雨天气时,定义为热带气旋类。

通常一个典型风暴的生命史一般为 25 ~ 45 min,在有利的环境条件下,其生命史可维持数小时^[2]。统计分析时把观测到逆风区现象 1 h 内(10 个体扫),与逆风区相关风暴影响区域内站点降水强度增加,且强反射率因子区域和强度没有减弱的情况,认为有利于暴雨发生发展;降水强度减弱或风暴处于消亡阶段则认为与暴雨发生没有直接关联。

3 逆风区特征分析

3.1 不同类型暴雨的逆风区特征

将 80 次暴雨天气过程按照主要影响系统划分为四类:切变线类、低槽冷锋类、温带气旋类和热带气旋类。从逆风区尺度及分布的角度分为四类:单个 γ 中尺度、多个 γ 中尺度、 β 与 γ 中尺度并存和无逆风区,80 次过程共有 73 次雷达观测到逆风区(表 1)。

表 1 不同类型暴雨的逆风区特征

Table 1 Characteristics of adverse wind areas in different torrential rainfall types

天气类型	单个 γ 中尺度	多个 γ 中尺度	β 与 γ 中尺度并存	无逆风区	总计
切变线	1	22	14	1	38
低槽冷锋	6	4	6	4	20
温带气旋	1	11	2	2	16
热带气旋	0	6	0	0	6
总计	8	43	22	7	80

3.1.1 切变线类

38 例切变线暴雨过程仅 1 例未观测到逆风区。逆风区通常位于切变线中心附近及南侧,主要为多个 γ 中尺度和 β 与 γ 中尺度共存,分别为 22 例和 14 例。当切变线移动缓慢或停滞时,对流组织化程度更高,有时能观测到 β 中尺度逆风区。

2017 年 7 月 14—15 日,受停滞少动的纬向切变线影响,临沂中南部兰陵、临沭和莒南站累积雨量超过 100 mm,强降水时段集中在 14 日 23:00—15 日 05:00。23:36,位于切变线南侧的线性多单体风暴东移影响临沂南部(图 1a), 0.5° 仰角雷达站西南部存在 β 中尺度逆风区,其靠近雷达一侧与风暴核位置对应,远离雷达一侧对应出流边界(图 1b), 1.5° 仰角为分散 γ 中尺度逆风区,沿图 1b 中黄色实

线的垂直剖面显示,逆风区远离雷达一侧与低层西南风气流间形成明显风向辐合(图 1c)。风暴东移中向南传播,造成强降水。

2017 年 7 月 6—7 日受经向切变线东移影响,临沂北部出现大暴雨天气,其中 6 日 21:00—23:00 平邑站雨量 40 mm;22:00—23:00 蒙阴站雨量 52 mm。20:37 临沂西部存在长约 120 km 的线性多单体风暴(图 2a),相应区域存在多个 γ 中尺度正速度逆风区,具有明显组织化特征(图 2b)。沿图 2b 中黄色实线做垂直剖面,2 km 内存在多个 γ 中尺度逆风区,与风暴强中心对应(图 2c)。风暴缓慢东移北抬,后侧不断有单体新生,造成大暴雨天气。

3.1.2 低槽冷锋类

20 次低槽冷锋暴雨天气过程中有 16 次观测到

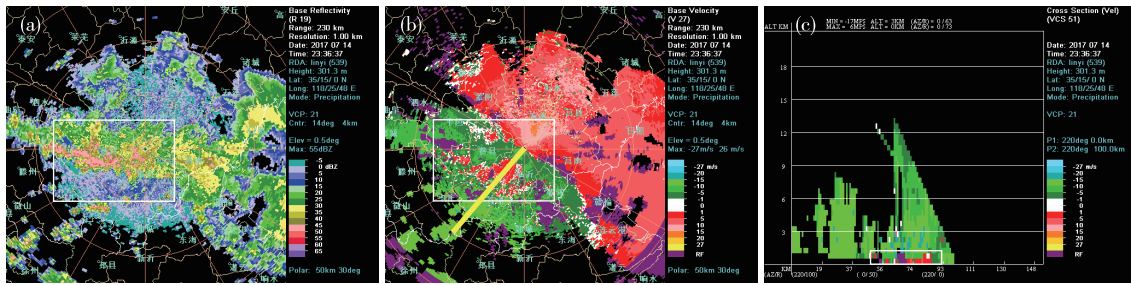


图1 2017年7月14日23:36临沂雷达产品(a.0.5°反射率因子,b.0.5°径向速度,c.径向速度剖面;白色方框内为观测到逆风区的区域,黄线为垂直剖面位置)

Fig.1 Linyi radar product at 23:36 BST on 14 July 2017 (a. reflectivity at 0.5° elevation angle, b. radial velocity at 0.5° elevation angle, c. cross section of radial velocity; white rectangle for the detected adverse wind area, yellow line for the position of the cross section)

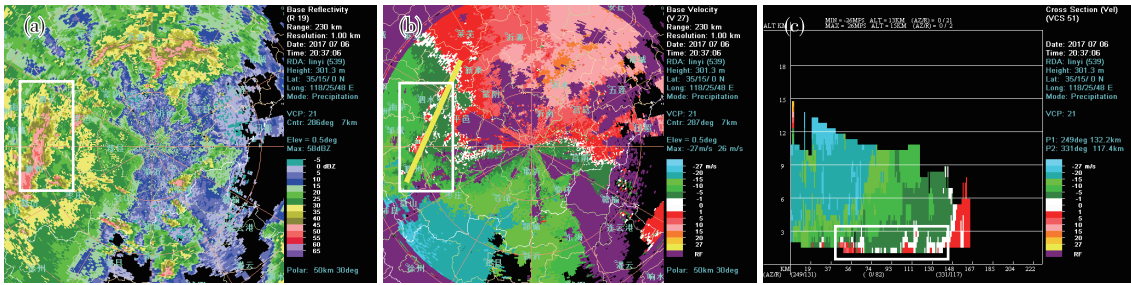


图2 2017年7月6日20:37临沂雷达产品(a.0.5°反射率因子,b.0.5°径向速度,c.径向速度剖面;白色方框内为观测到逆风区的区域,黄线为垂直剖面位置)

Fig.2 The same as Fig.1, but for 20:37 BST on 6 July 2017

逆风区。前倾槽形势下,低空高温高湿,中高空干冷,相当位温垂直递减率增大,对流不稳定度增大,易产生具有明显组织结构的线性对流系统(如飑线和弓形回波),强中心位置可能观测到β中尺度逆风区;后倾槽形势下,低层冷空气先入侵,对流不稳定度降低,风暴相对松散,多为γ中尺度逆风区。

2017年6月22日,前倾槽形势下临沂北部出现暴雨天气,16:00—17:00费县站降水量为31.4 mm。16:25费县北侧存在弓形回波,后侧有明显入流缺口(图3a),径向速度产品显示白色方框内存在一个β中尺度(约40 km)负速度区(图3b)。

沿图3b中黄色实线的垂直剖面显示,0~4 km高度上的速度为5~10 m·s⁻¹的东到东南风,方框区域内0~3 km高度存在负速度区,其靠近雷达一侧与东南风形成明显的低层辐合入流,离开雷达一侧与环境气流形成辐散结构,对应下沉气流到达地面后离开雷达一侧的出流(图3c)。逆风区前侧水平风辐合,利于风暴发展与持续,弓形回波快速南下影响费县,造成强降水。

3.1.3 温带气旋类

温带气旋造成的暴雨天气过程有16次,其中江淮气旋、黄河气旋和黄淮气旋导致的次数分别为12

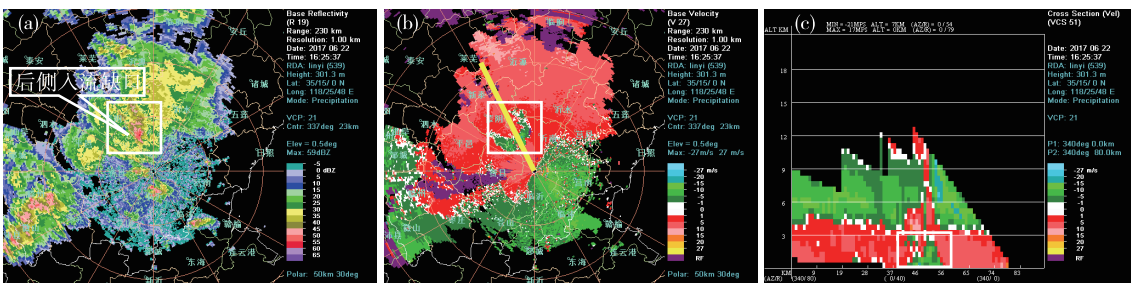


图3 2017年6月22日16:25临沂雷达产品(a.0.5°反射率因子,b.0.5°径向速度,c.径向速度剖面;白色方框内为观测到逆风区的区域,黄线为垂直剖面位置)

Fig.3 The same as Fig.1, but for 16:25 BST on 22 June 2017

次、3次和1次;2次未观测到逆风区的过程均为江淮气旋影响。逆风区主要表现为多个 γ 中尺度,通常位于气旋中心右前侧螺旋雨带中。

2017年8月2日14:00江淮气旋中心位于安徽西北部,受其影响,16:00—20:00临沂站累积雨量53 mm,17:00—18:00莒南站雨量27 mm;17:25临沂受带状回波影响(图4a), 2.4° 径向速度图上雷达站西南方存在线状 γ 中尺度逆风区,与影响临沂市

区的带状回波后边界对应,其东南方与环境气流间形成辐合风场,同时雷达站正东方向存在多个分散 γ 中尺度逆风区,其离开雷达一侧与环境东南气流间形成辐合风场,逆风区持续了5个体扫(图4b),沿图4b黄色实线的剖面显示,逆风区主要存在于1.5~6.0 km高度,其离开雷达一侧与环境气流之间存在深厚的中低层径向辐合(图4c),利于风暴发展。

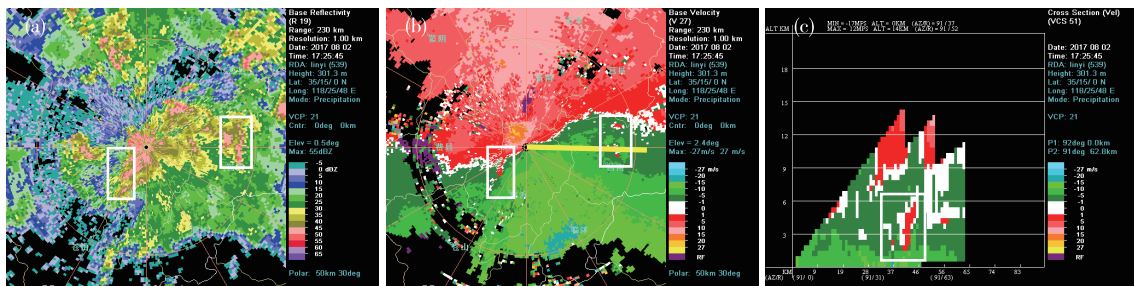


图4 2017年8月2日17:25临沂雷达产品(a.0.5°反射率因子,b.2.4°径向速度,c.径向速度剖面;白色方框内为观测到逆风区的区域,黄线为垂直剖面位置)

Fig.4 Linyi radar product at 17:25 BST on 2 August 2017 (a. reflectivity at 0.5° elevation angle, b. radial velocity at 2.4° elevation angle, c. cross section of radial velocity; white rectangle for the detected adverse wind area, yellow line for the position of the cross section)

3.1.4 热带气旋类

6次热带气旋暴雨天气过程中全部观测到逆风区,均为多个 γ 中尺度逆风区。主体影响阶段,逆风区出现在螺旋雨带中的强回波处和急流顶端;倒槽影响阶段逆风区出现在低空强烈风速性辐合的急流顶端。2012年8月3日受台风“达维”主体影响,临沂出现暴雨,2014年7月24—25日受台风“麦德姆”影响,在倒槽影响阶段和主体影响阶段,临沂均出现区域性暴雨;其余4次热带气旋暴雨均仅受倒槽影响。

2017年7月31日,台风“海棠”的中心于02:50前后在福建省福清市沿海登陆(以热带风暴级),

09:00,“海棠”的中心位于福建省闽侯县境内,09:08,回波呈西南—东北向带状分布(图5a),速度图上可见低空南风急流强盛,切变线附近速度辐合显著,郟城北到东北方向有逆风区存在,郟城上空有明显风速和风向辐合(图5b)。沿图5b黄色实线剖面显示,逆风区离开雷达一侧与低空南风形成辐合区(图5c),回波长时间影响,造成郟城暴雨天气。

3.2 逆风区特征分析

本文主要分析与风暴发展密切相关的大气中低层辐合辐散,不讨论风暴顶辐散造成的逆风现象。以 $0.5^\circ \sim 3.4^\circ$ 仰角径向速度产品中任一仰角识别到逆风区,则认为存在逆风区。利于暴雨发生发

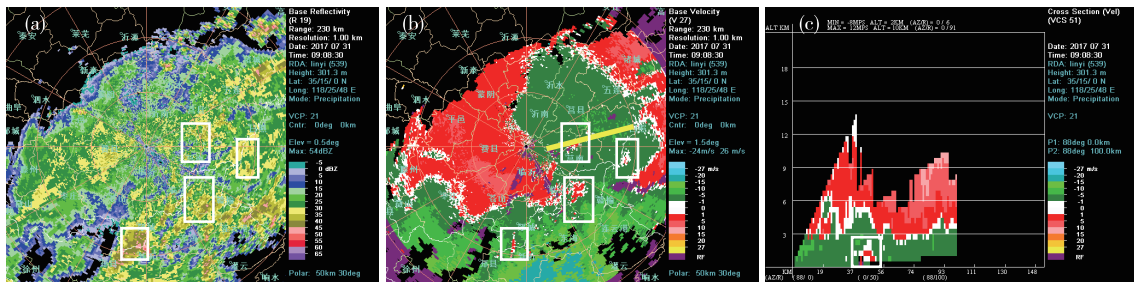


图5 2017年7月31日09:08临沂雷达产品(a.0.5°反射率因子,b.1.5°径向速度,c.径向速度剖面;白色方框内为观测到逆风区的区域,黄线为垂直剖面位置)

Fig.5 Linyi radar products 09:08 BST on 31 July 2017 (a. reflectivity at 0.5° elevation angle, b. radial velocity at 1.5° elevation angle, c. cross section of radial velocity; white rectangle for the detected adverse wind area, yellow line for the position of the cross section)

展的过程有68次,剩余5次过程观测到逆风区时,风暴已处于消亡阶段。

3.2.1 逆风区强度特征

径向速度平面产品上,逆风区与周边环境气流之间的水平风切变可反映低层辐合辐散特征。风切变是风矢量差与距离的比值,需计算确定,直接应用不直观。同一平面上逆风区及外围环境之间的径向风速没有强梯度,这一点区别于中气旋速度对特征。因此,选用整个逆风区厚度内,径向风速中心与外围环境气流之间辐合一侧的径向速度差绝对值来表示逆风区强度。

利于暴雨发生发展的过程有68次,逆风区强度最大值为 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小值为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;其中逆风区强度 $<15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有2次, $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有8次, $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且 $<30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有58次。逆风区内最大径向速度绝对值最大为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;逆风区内最大径向速度绝对值 $<5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有3次, $\geq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且 $<10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有40次, $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有25次。5次观测到逆风区后1h内与其相关的风暴减弱的过程中,逆风区内最大径向速度绝对值 $<5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有4次,逆风区强度 $<15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有3次(表2)。

表2 逆风区强度和厚度特征

Table 2 Characteristics of the intensity and thickness of the adverse wind areas

逆风区强度与厚度	发展/次	减弱/次
逆风区强度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
<15	2	3
≥ 15 且 <20	29	2
≥ 20 且 <25	24	0
≥ 25 且 <30	5	0
≥ 30	8	0
径向速度绝对值		
最大值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
<5	3	4
≥ 5 且 <10	40	1
≥ 10 且 <15	25	0
逆风厚度/km		
<3	2	3
≥ 3 且 <4	10	2
≥ 4 且 <5	16	0
≥ 5 且 <6	24	0
≥ 6	16	0

综上所述,在雷达平均径向速度图上识别到逆风区强度 $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,逆风区内径向速度绝对值最大值 $\geq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,与暴雨相关的风暴将维持或发展。

73次观测到逆风区的暴雨过程中,逆风现象持续时间内的整点小时雨量均为本次过程中逆风区周边整点小时雨量的最大值,其中有5次过程风暴处于消亡阶段。最大小时雨强超过 20 mm 的有57次,超过 30 mm 的有37次,超过 50 mm 的有13次,最大为 92.8 mm ,最小为 9.9 mm 。逆风区强度主要在 $15 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,平均为 $20.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。观测到逆风区现象及逆风区持续阶段内,小时降雨量将增加,与之相关的风暴影响区域可能出现短时强降水或暴雨天气。逆风区强度 $<15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的5次过程,降水强度全部低于 35 mm ;逆风区强度 $<20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的36次过程中,降水强度 $<35 \text{ mm}$ 的达26次;逆风区强度 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的37次过程中,降水强度 $<20 \text{ mm}$ 的仅2次;逆风区强度 $\geq 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的13次过程,降水强度全部高于 25 mm ,不足 30 mm 的仅2次(图6)。上述可知,逆风区强度越强,小时雨强越大。

3.2.2 逆风区垂直伸展特征

雷达波束随距离抬高,最低仰角识别到逆风区时,其底部已伸展到地面。逆风区的垂直伸展高度大致为风暴内辐合层的顶部,将其定义为逆风区厚度,用平均径向速度产品识别。

雷达显示共有71次过程在 0.5° 仰角平均径向速度图上识别出逆风区,可认为逆风区底部伸展到地面,这种现象与逆风区在风暴成熟阶段开始形成相符。发展过程中逆风区厚度 $\geq 3.0 \text{ km}$ 以上的有68例,其中观测到逆风区后1h内与其相关的风暴强反射率因子区域和强度维持或增大的达66例;逆风区厚度 $\geq 4.0 \text{ km}$ 以上的有56例,全部有利于风暴加强;出现逆风区后风暴减弱的5次过程,其逆风厚度 $<4.0 \text{ km}$ (表2)。因此当逆风厚度达 4.0 km 以上时,有利于风暴的加强发展。

3.2.3 逆风区持续性特征

一次过程可有多段逆风区的出现,持续最长达43个体扫,最短仅4个体扫,平均为17个体扫。持续时间 ≥ 5 个体扫的有68例,持续时间 ≥ 30 个体扫的有8例;观测到逆风区后1h内与其相关的风暴强反射率因子区域和强度维持或增大的68次过程中,有67次逆风区持续时间 ≥ 5 个体扫,对暴雨发展不利的5次过程中有4次观测到的逆风区持续体扫 <5 个,另1次为6个体扫。

逆风区持续时间 <20 个体扫的47次过程中,仅1次累积雨量超过 100 mm ;持续时间 ≥ 20 个体扫的26次过程中,累积雨量全部超过 70 mm ,其中有18

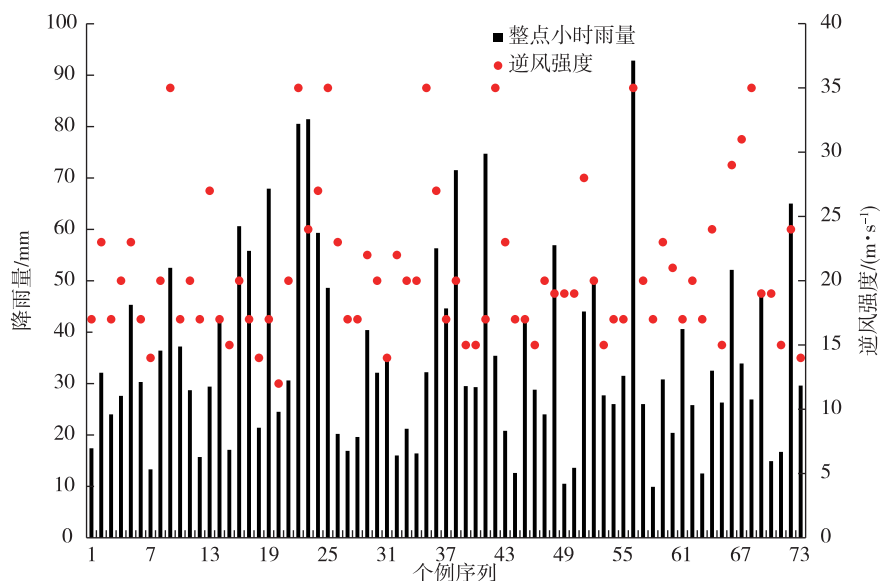


图 6 逆风区强度及影响区域最大整点小时雨量

Fig.6 Intensity of the adverse wind areas and maximum hourly rainfall amount in affected areas

次雨量 ≥ 100 mm; 持续时间 ≥ 30 个体扫的 8 次过程中, 累积雨量全部超过 100 mm (图 7)。逆风区持续

时间与过程累积最大雨量呈正相关, 体现在降水强度相对均匀且持续时间较长。

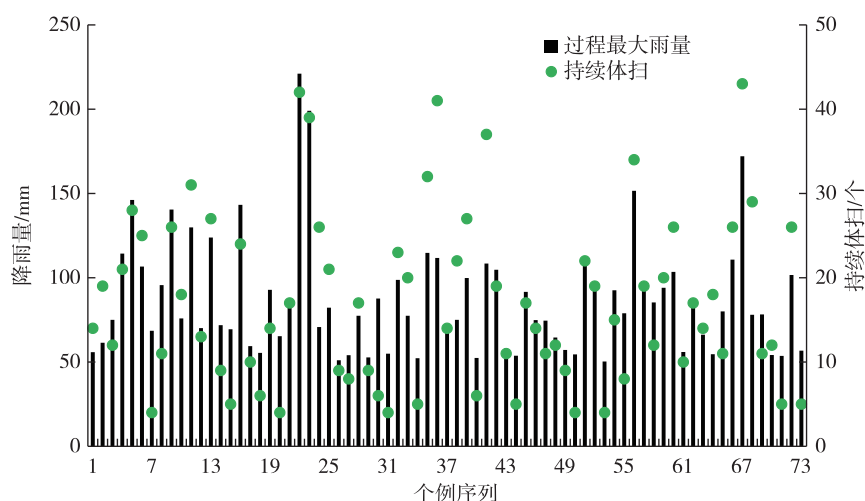


图 7 逆风区持续时间及过程累积雨量

Fig.7 Duration of the adverse wind areas and accumulated rainfall amount

结合上述分析, 从逆风区强度、垂直伸展和持续性等特征来看, 对暴雨发展有利的特征判据为:

1) 逆风区强度。逆风强度 $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 逆风区径向速度绝对值最大值 $\geq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2) 逆风区厚度。最低仰角可识别, 且厚度 $\geq 4.0 \text{ km}$ 。

3) 逆风区持续时间。5 个体扫 (即 30 min) 及以上。

在实际业务中, 当多个个体扫观测到逆风区, 逆

风区最大径向速度较大且切变值较大或有增大的趋势时, 要关注逆风区的垂直伸展情况, 监测回波形态的变化和风场信息, 推测风暴内部风场结构的变化, 以更加准确地发布预警信息。

4 结论与讨论

本文介绍了逆风区的水平和垂直结构, 并与速度图上容易混淆的速度模糊和中小尺度气旋或反气旋风场特征进行了区分。分析了 2010—2017 年

临沂地区暴雨天气过程在不同天气形势背景下逆风区表现类型差异的原因,统计归纳了逆风区最大径向速度、切变、垂直伸展和持续性特征与暴雨发展演变的关系,并给出了实际业务中可参考应用的判据。

1)暴雨过程中,风暴内的垂直环流是造成逆风区发生发展的直接原因;逆风区表现为 β 中尺度和 γ 中尺度,其形态在不同天气类型下有明显差异。

2)受切变线影响时,逆风区出现在切变线中心附近及南侧,常表现为多个 γ 中尺度逆风区,当切变线移动缓慢或停滞时,对流组织化程度高,有时能观测到 β 中尺度逆风区;前倾槽形势下,以 β 中尺度和 γ 中尺度逆风区共存为主,后倾槽形势下多为单个 γ 中尺度逆风区;锋面气旋暴雨过程观测到的逆风区主要出现在气旋中心右前侧螺旋雨带中,表现为多个 γ 中尺度,在暖区对流发展强烈的位置可能观测到 β 中尺度逆风区;热带气旋暴雨过程中观测到的逆风区均为多个 γ 中尺度,主体影响阶段多在螺旋雨带中,倒槽影响阶段出现在低空急流顶端。

3)逆风区强度越强,小时雨强越大,其持续时间与过程累积最大雨量呈一定正相关;当最低仰角识别到逆风区,其厚度 ≥ 4.0 km,强度 ≥ 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、径向速度绝对值最大值 > 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且持续5个体扫(即30 min)以上时,风暴常明显发展,相关特征可用于预报风暴和暴雨的发展。

上述结论基于长时间序列的临沂天气雷达观测资料分析,具有一定代表性的同时也存在局限性。受目标物距离、高度、地形及气象条件等因素影响,可能导致风暴消亡阶段才能(或仍不能)观测到逆风区,如在低空急流强盛且风暴移向与雷达径向接近时,可能观测不到逆风区,主要与雷达探测的速度为径向速度有关。实际业务中需加强多种观测资料的综合应用和快速诊断,注重风暴结构特征分析。研究过程中发现,造成区域性和局地性暴雨之间的逆风区特征有一定差异,将在后续工作中进一步细化研究。

参考文献:

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法[M].4版.北京:气象出版社,2007:328-393.
- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M],北京:气象出版社,2006:82-129.
- [3] 张沛源,余志敏,王慕维,等.多普勒天气雷达资料在强天气短时预报中的应用[C]//第十一届亚运会气象保障研究论文集.北京:气象出版社,1992:68-74.
- [4] 张沛源,陈荣林.多普勒速度图上的暴雨判据研究[J].应用气象学报,1995,6(3):373-378.
- [5] 段丽,卞素芬,俞小鼎,等.用SA雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J].气象,2009,35(3):21-28.
- [6] 徐芬,王博妮,夏文梅,等.长江中下游地区一次春季暴雨过程的多普勒雷达速度特征分析与研究[J].高原气象,2014,33(2):548-556.
- [7] 冯晋勤,汤达章,曹长尧.福建西部山区短时暴雨雷达回波特征及中小尺度系统分析[J].气象,2014,40(3):297-304.
- [8] 胡明宝,高太长,汤达章.多普勒天气雷达资料分析与应用[M].北京:解放军出版社,2000:113-116.
- [9] 李军霞,汤达章,李培仁,等.中小尺度的多普勒径向速度场特征分析[J].气象科学,2007,27(5):557-563.
- [10] 李柏,古庆同,李瑞义,等.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及其未来发展[J].气象,2013,39(3):265-280.
- [11] 王丽荣,胡志群,汤达章,等.多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用[J].气象科学,2007,27(6):695-701.
- [12] STENSRUD D J, BAO J W, WARNER T T. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems [J].Mon Wea Rev,2000,128(7):2077-2107.
- [13] 陶岚.多普勒天气雷达中的中尺度气旋识别[D].南京:南京信息工程大学,2006.
- [14] 胡大海.基于多普勒雷达径向速度图的风暴信息提取[D].天津:天津大学,2010.
- [15] 陈鲍发,魏鸣,柳守煜.逆风区的回波演变与强对流天气的结构分析[J].暴雨灾害,2008,27(2):127-134.
- [16] 赵海军.晴空回波特征与风场信息应用[J].气象科技,2017,45(3):477-484.
- [17] 伍志方,叶爱芬,胡胜,等.中小尺度天气系统的多普勒统计特征[J].热带气象学报,2004,20(4):391-400.
- [18] 王啸华,郑媛媛,徐芬,等.2011年江苏南部两场大暴雨对比分析[J].气象科学,2015,35(4):497-505.
- [19] DAVIS R S. Flash flood forecast and detection methods [J]. Meteor Monogr, 2001,28(50):481-526.
- [20] 王宝鉴,黄玉霞,魏栋,等.TRMM卫星对青藏高原东坡一次大暴雨强降水结构的研究[J].气象学报,2017,75(6):966-980.
- [21] 杨晓霞,高留喜,宋佳嘉,等.山东夏季强降水的影响系统和物理量特征[J].海洋气象学报,2018,38(3):57-66.