

文章编号: 1000-2022(2003) 04-0489-07

低空急流的单多普勒速度特征

夏文梅¹, 王凌震¹, 张亚萍²,
王卫芳¹, 顾松山³

(1. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008; 2. 重庆市气象局, 重庆 400039;
3. 南京气象学院 电子工程系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 对低空急流的单多普勒天气雷达径向速度图像进行数值模拟, 并利用合肥多普勒天气雷达的观测资料, 对 2000 年 6 月 24—27 日安徽省境内发生的暴雨过程进行了分析。结果表明: 不论风向如何变化, 低空急流的多普勒正负速度区关于显示中心成对称分布, 从多普勒速度的零速度线分布可以得到实际风场的风向廓线。在多普勒速度图上, 安徽淮北地区暴雨过程主要发生在正负速度中心的中心轴的左侧 200 km 范围内。低空西南急流的维持, 为暴雨的产生和维持提供了充足的水汽。

关键词: 低空急流; 多普勒速度; 零速度线; 暴雨

中图分类号: P406 **文献标识码:** A

低空急流被认为是对中纬度暴雨和强对流提供热力条件和动力条件的重要气流特征。低空急流的活动区域也常常是暴雨和强对流天气经常发生的地区。两者相关率很高, 据统计, 在江淮梅雨期有 70 % 以上的天数出现低空急流, 其中 79 % 的低空急流伴有暴雨, 反之 83 % 的暴雨伴有低空急流^[1-2]。低空急流提供暖湿空气输送。多普勒天气雷达是一种非常有用的探测工具, 它吸收了能给预报员提供有关环境风、雷暴结构和灾害性天气特征的新信息的重要技术, 它把多普勒速度测定与带有自动气象分析的实时信号处理结合起来, 为预报员提供了观察雷暴的运动过程和降水的分布及移动与中尺度及次天气尺度气流模式关系的新机会。本文对低空急流的多普勒速度图像进行了数值模拟, 并结合实例对其径向速度场进行分析, 以期直观地帮助用户在多普勒速度图像上识别、判断和分析低空急流。

1 基本原理

多普勒天气雷达通常采用体积扫描方式收集资料, 即在一系列固定的仰角上分别扫描 360° (即 PPI 扫描) 进行采样。因此, 体积扫描收集的资料, 实际上是由这些仰角的 PPI 资料组成的。为了准确描述低空急流的模拟风场, 以雷达为坐标原点建立坐标系, x 轴指向东, y 轴指向北, z 轴指向天顶 (图 1 所示)。图中 R_s 为雷达探测距离, H 为 R_s 处对应的高度。图 1b 相当

收稿日期: 2002-12-03; 改回日期: 2003-04-10

基金项目: 中国气象局 淮河黄河流域暴雨洪水监测预报系统 重点试验项目

作者简介: 夏文梅 (1961-), 女, 江苏常州人, 工程师, 硕士, 研究方向: 多普勒雷达资料分析与应用。

于从上往下看图 1a, 即为 PPI 图像显示方式。降水粒子的运动速度可分解为垂直下落分量 V_r 和水平分量 V_h , θ 为水平风向与 x 轴的夹角, ϕ 为方位角, α 为天线仰角。雷达测出的多普勒径向速度不但和所在高度上的水平速度 V_h 和垂直速度 V_r 有关, 还和雷达的方位角和仰角有关^[3], 雷达探测的降水粒子的多普勒径向速度 $V_r(\theta)$ 可表示为

$$V_r(\theta) = V_h(\theta) \cos \alpha \cos(\theta - \phi) - V_r(\theta) \sin \alpha \quad (1)$$

假定雷达天线作固定的低仰角探测, 则粒子下落速度对多普勒径向速度无多大贡献, 即 V_r 可以略去不计, 水平速度 V_h 在水平面上是均匀的, 但随着高度的增加, 大小、方向可以有变化, 即 V_h 、 V_r 、风向 θ 均是向径 r 的函数^[4-5]。这时, 雷达探测降水粒子的多普勒径向速度 V_r 可写成

$$V_r(r) = V_h(r) \cos \alpha \cos[\theta - \phi(r)] \quad (2)$$

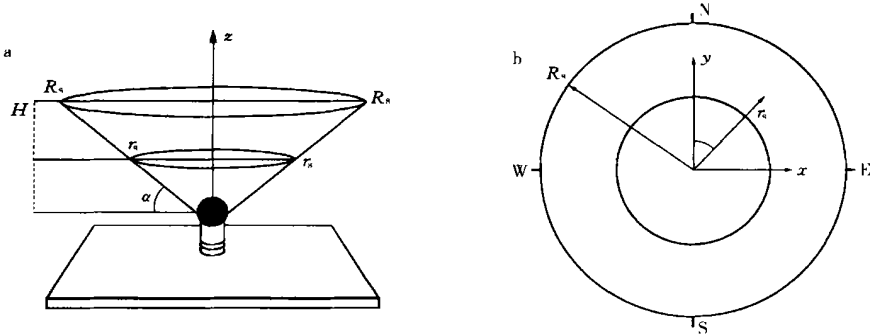


图 1 固定仰角的多普勒观测(a)和显示示意(b)

Fig. 1 A schematic diagram of obsevation(a) and display(b) for a Doppler radar with a fixed vertical angle

2 低空急流的单多普勒速度场模型

当在雷达显示高度范围内, 存在一低空急流, 或有强风速切变时, 则在此急流层以下风速随高度增加而增加, 而在此急流层以上, 风速随高度增加而减少, 有时也存在随高度增加而增加。这时多普勒径向速度廓线分布有两种可能^[6]。一种是风向随高度增加不变化, 而另一种是风向随高度增加顺转。而风速分别也有两种可能, 一种是风速随高度线性地增加, 而另一种是风速随高度增加先增后减。

2.1 风向不变时, 风速随高度线性增加

由于风向不变, 因此在相应某一高度的距离圈上的最大(最小)多普勒速度的方位角是恒定的。但是, 由于风速随高度增加, 根据雷达测高公式, 它的最大(最小)多普勒速度值随距离而增加, 所以图像中的多普勒速度的极大值(极小值)分别位于下风向(上风向)方位的边缘部分。这时有 $V_r = 0$, $V_h(r) = V_0 + C_1 r$, C_1 为大于零的常数。则多普勒速度廓线方程为

$$V_r = (V_0 + C_1 r) \cos \alpha \cos(\theta - \phi_0) \quad (3)$$

当 $V_r = 0$ 时, 等值线方程为 $\theta = \pm \frac{\pi}{2} + \phi_0$ 。

因为 ϕ_0 不变, 所以零速度线也是一条直线, 其方位仍垂直于实际风向, 即 $\theta - \phi_0 = \pm \frac{\pi}{2}$ 。相应的多普勒径向速度图像见图 2。图 2 所讨论的风向为西南风, 地面风速为 5 m/s。由

图可见,那些相应于较大多普勒速度值的等值线相对于零速度线呈对称分布,而相应的小于或等于地面风速值的多普勒速度值的等值线则向图像的中心会聚。图中正负速度区的极值达到 18 m/s 以上。

2.2 风向不变时,风速随高度先增后减

风向不变时,风速随高度先增后减时有 $(r) = 0$, 而

$$V_h(r) = \begin{cases} V_0 + C_1 r, & 0 < r \leq r_0; \\ V_0 + (C_1 + C_2) r_0 - C_2 r, & r > r_0. \end{cases}$$

式中 C_1 、 C_2 均为大于零的常数。上式可见: 在 r_0 (r_0 正负速度最大值所在处对应的距离) 处 V_h 最大。则多普勒速度廓线方程为

$$V_r = \begin{cases} (V_0 + C_1 r) \cos \cos(\quad - \quad 0), & 0 < r \leq r_0; \\ [V_0 + (C_1 + C_2) r_0 - C_2 r] \cos \cos(\quad - \quad 0), & r > r_0. \end{cases} \quad (4)$$

当 $V_r = 0$ 时,等值线仍与 0 互相垂直。

由于风向不变,零速度线仍是一条直线,由与风向垂直的两条方位角相差 180 的径线组成。即 $= \pm \frac{1}{2} + 0$ 。

风速随高度先增后减,在某个高度处的风速值达到最大,所以在风的下风向(上风向),不同距离圈上的最大(最小)的多普勒速度值是不同的,由近及远到相应最大风速高度的距离内,多普勒速度逐渐增加(减少)到极大值(极小值),而后再随距离增加而逐渐减少(增加)。

其他不为零的等值线形状见图 3。由图可见,部分曲线闭合,另一部分曲线不闭合,以零速度线为轴,两边对称排列。相应的多普勒速度图像中会出现一对中心对称的近似椭圆的牛眼,牛眼中心位于雷达的上风向(负值)和下风向(正值),它们距雷达的距离对应着风速极大值的高度,风速极大值的高度可根据雷达测高公式算出,图中风速极大值达到了 18 m/s 以上。正速度中心和负速度中心分别在零速度线的右侧和左侧(即雷达显示中心的右上方和左下方)。

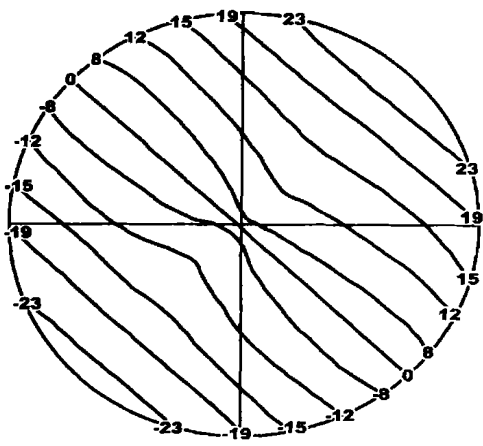


图 2 风向不变,风速随高度增加
Fig. 2 Wind speed increases with height while wind direction does not change

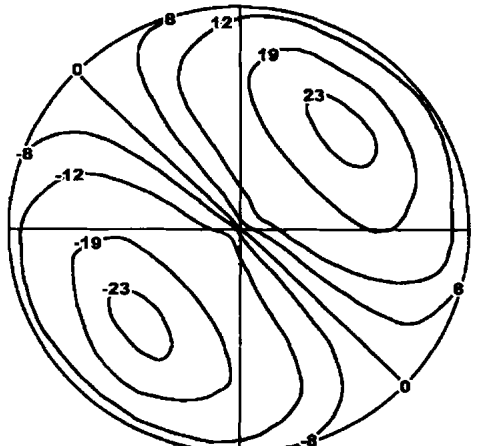


图 3 风向不变,风速随高度先增后减
Fig. 3 Wind speed increases first and then decreases with height while wind direction does not change

2.3 风向随高度顺转时, 风速随高度增加

这时有 $(r) = 0 + C_3r$, $V_h(r) = V_0 + C_1r$, C_1 和 C_3 均为大于零的常数。则多普勒速度廓线方程为

$$V_r = (V_0 + C_1r) \cos \cos[- (0 + C_3r)]。 \tag{5}$$

当 $V_r = 0$ 时, $= \pm \frac{1}{2} + 0 + C_3r$ 。(5)式说明,在某距离处, 与 $0 + C_3r$ 互相正交, 随距离增加而顺转。相应的多普勒速度图像如图 4 所示。从图中可见, 小于或等于地面风速表示不同多普勒速度的等值线都收敛于显示中心, 由于风向随高度增加顺转, 相应的零速度线呈 S 型但不穿过雷达所在处的显示中心。高度较高处为风速很大的偏西风, 最高处为西风。在图中, 地面为南风, 风向随高度增加逐渐顺转为西风。在相应的多普勒速度图像上中心点邻近区域的零速度线东西向, 而后分别自近而远地顺转, 在最远处的边缘上的零速度点分别位于 0 和 180 方位处, 都与相应最高处的西风垂直, 正速度区和负速度区分别在零速度线的右侧和左侧。同样, 正负速度区的速度值达到 18 m/s 以上。

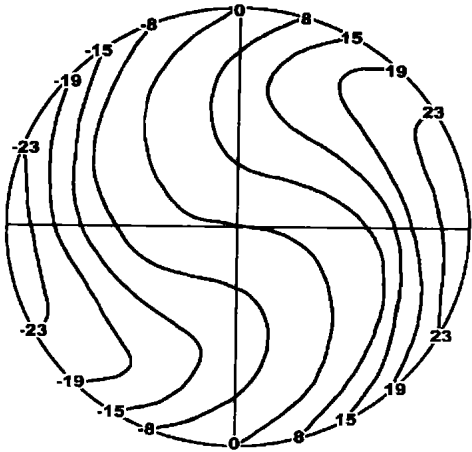


图 4 风向随高度顺转, 风速随高度增加

Fig. 4 Wind speed increases with height while wind direction changes clockwise

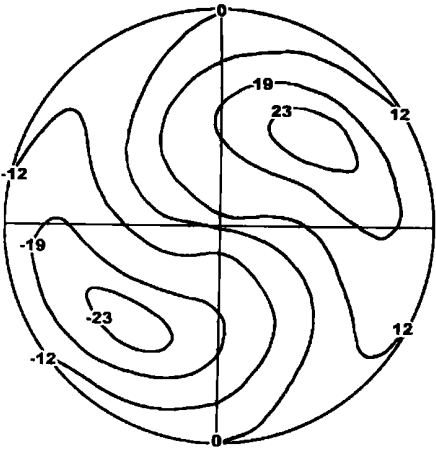


图 5 风向随高度顺转, 风速随高度先增后减

Fig. 5 Wind speed increases first and then decreases with height while wind direction changes clockwise

2.4 风向随高度顺转时, 风速随高度先增后减

这时可设 $(r) = 0 + C_3r$

$$V_h(r) = \begin{cases} V_0 + C_1r, & 0 < r \leq r_0; \\ V_0 + (C_1 + C_2)r_0 - C_2r, & r > r_0 \end{cases}$$

这里的 C_1 、 C_2 和 C_3 都是大于零的常数。则多普勒速度廓线方程为

$$V_r = \begin{cases} (V_0 + C_1r) \cos \cos[- (0 + C_3r)], & 0 < r \leq r_0; \\ [V_0 + (C_1 + C_2)r_0 - C_2r] \cos \cos[- (0 + C_3r)], & r > r_0 \end{cases} \tag{6}$$

特别地, 当 $V_r = 0$ 时, $= \pm \frac{1}{2} + 0 + C_3r$ 。(6)式说明,在某距离处, 与 $0 + C_3r$ 互相正交。此时的多普勒速度图像如图 5 所示。在弯曲的零速度廓线两侧分布着闭合的等值线, 其中心的极值所在距离对应于风速的转折高度。从图中可见, 风向随高度增加顺转的零速度线仍呈 S 型, 但由于风速随高度先增后减, 所以非零的各种正负速度带分别位于零速度线的两

侧,其类似牛眼的正负速度中心区所对应的高度为风速最大的高度,牛眼中心位于雷达的上风向(负值)和下风向(正值)。图中类似一对牛眼的正负多普勒速度中心区分别位于显示中心的东北和西南的中间距离区域,风速最大的高度可根据雷达测高公式算出,这里风速极大值达到了 18 m/s 以上。在图中,地面为南风,风向随高度增加逐渐向西偏转,最高处为西风。在相应的多普勒速度图像上中心点邻近区域的零速度线东西向,而后分别自近而远地顺转,在最远处的边缘上的零速度点分别位于 0 和 180 方位处,都与相应最高处的西风垂直,正速度区和负速度区分别在零速度线的右侧和左侧。

3 实例分析

3.1 概 述

2000 年 6 月 24—27 日,在安徽省的淮北地区产生了暴雨。这次暴雨过程为梅雨期降水过程。6 月 24 日两站暴雨,6 月 25 日五站暴雨,6 月 26 日四站暴雨,砀山 02:00—07:00 5 h 降水量达 193.8 mm,一小时最大降水量达 105.1 mm;6 月 27 日八站暴雨。利用合肥多普勒天气雷达的观测资料对这次过程进行分析。

3.2 雷达回波的演变

从 6 月 24 日 16 时—28 日 20 时雷达回波的主体分布在沿淮及淮北地区,降水回波范围很大,范围最大时从河南省的东部到安徽省的北部和江苏北部,南北宽度超过 200 km。降水回波为混合性降水。在 6 月 24 日 16 时—28 日 20 时降水回波强度一般在 40 dBZ,回波强中心处达 50~55 dBZ,回波顶高一般为 7~8 km,降水回波移动缓慢,一度在淮北地区一带停滞,因而造成了淮北地区暴雨的发生。28 日以后降水回波带整体北抬,淮北地区降水停止。

3.3 多普勒速度分布特征

在这次降水过程多普勒速度图上,西南低空急流特征明显。图 6 为 6 月 25 日 07 时 54 分实测多普勒速度 PPI 图像,图中零速度线的 S 型特征虽然不典型,但是还比较明显。负速度区

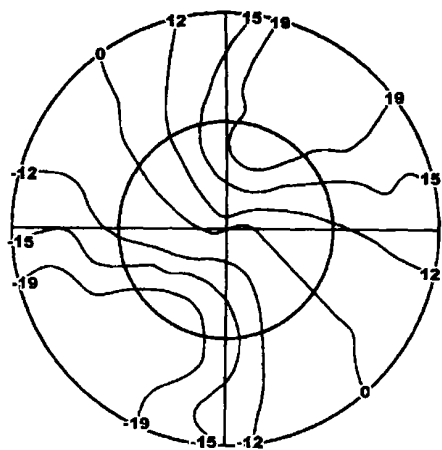
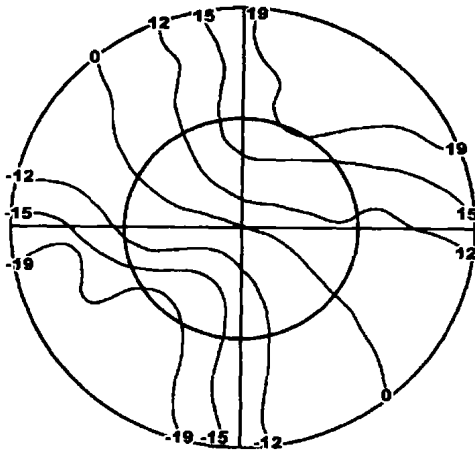


图 6 6 月 25 日 07 时 54 分多普勒速度图
(仰角 1.5°;半径 150 km)
Fig. 6 Doppler velocity at 0754 BST
on 25 June 2000
(vertical angle: 1.5°;radius: 150 km)

图 7 6 月 25 日 09 时 21 分多普勒速度图
(仰角 1.5°;半径 150 km)
Fig. 7 Doppler velocity at 0921 BST
on 25 June 2000
(vertical angle: 1.5°;radius: 150 km)

在零速度线的左侧,正速度区在零速度线的右侧,近距离范围内(20 km 以内)的零速度线比较平直,呈东南偏东和西北偏西走向,然后分别顺转,在接近 150 km 时已经分别顺转到接近 135 和 315 方位,这就说明在近低层为比较均匀的西南偏南风,然后随高度的增加,风向逐渐顺转为西南风。正速度中心和负速度中心分别位于显示中心的东北方向和西南方向,速度随着距离的增加而增加,正负速度中心的最大风速值达 22.9 m/s ,由标准大气折射下的测高公式计算得到最大风速的高度为 4 km 左右。从图中可以看到在距离测站西北方向 30 km 左右处存在一西南至东北向的西低空南急流,其轴线位于正负速度中心的连线上。随着时间的推移,多普勒速度图上零速度带的特征有所变化,图 7 为 6 月 25 日 09 时 21 分的实测多普勒径向速度 PPI 图像。从图中可以看到,在近距离范围内(15 km 以内)的零速度线由原来比较平直变为顺转的 S 型,随着距离的增加,零速度线又变得比较平直,但总体上零速度线随着高度的增加仍呈 S 型,正负速度中心的最大风速值达 22.9 m/s ,正速度中心和负速度中心分别位于显示中心的东北方向和西南方向,速度随着距离增加,但正速度中心区和负速度中心区略向显示中心移动,此时最大风速的高度为 3 km 左右。而这时西南低空急流的轴线在距离测站西北方向 20 km 左右处。到了 25 日 15 时 44 分,速度随着距离先增加,在半径为 110~120 km 左右(方向呈东北西南向)处开始减小。图 8 为 6 月 25 日 15 时 44 分的实测多普勒速度 PPI 图像,图中可见,零速度线随着高度的增加仍呈 S 型,正速度中心和负速度中心仍分别位于显示中心的东北方向和西南方向,速度随着距离先增后减,正速度中心和负速度中心向显示中心移动,此时的最大风速的高度为 2.5 km 左右,最大风速为 22.9 m/s 。在 6 月 25—27 日的多普勒速度图中,这一特征基本上一直维持,并且正负速度中心的位置相对比较稳定,只是正负速度中心的数值有时略有减小,最大风速一般在 19.1 m/s 以上。这时低空西南急流的轴线已移至距离测站东南方向 15 km 左右处。而在这一期间,淮北地区产生了暴雨,在强度回波图上(半径 230 km)出现了 40 dBZ 以上的降水回波带,且回波带在这一带移动缓慢(强度回波图略)。暴雨发生区在距离正负速度中心的中心轴的左侧大约 200 km 范围内,这与绝大多暴雨发生在离急流中心的左前方^[4]相一致。

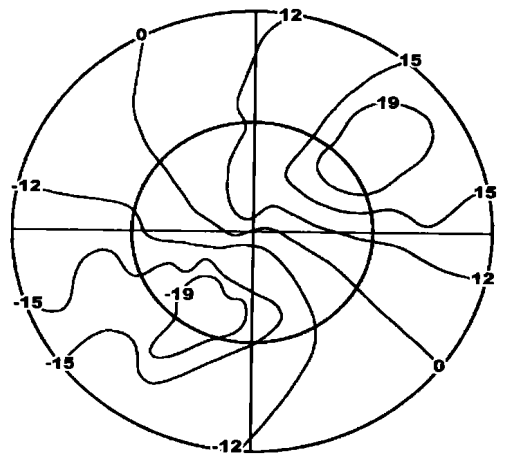


图 8 6 月 25 日 15 时 44 分多普勒速度图
(仰角 1.5° ; 半径 150 km)

Fig. 8 Doppler velocity at 1544 BST
on 25 June 2000
(vertical angle: 1.5° ; radius: 150 km)

4 结 论

通过对低空急流的多普勒速度图像的数值模拟以及安徽淮北地区梅雨期暴雨的多普勒天气雷达资料分析,可以知道:

(1) 不论多普勒速度廓线怎样变化,从多普勒速度的零速度线分布可以得到实际风场的风向廓线。不论风向如何变化,低空急流的多普勒正负速度区关于显示中心成对称分布。

(2) 在多普勒速度图上,安徽淮北地区这次暴雨过程主要发生在正负速度中心的中心轴的左侧 200 km 范围内。

(3) 低空西南急流的维持, 为暴雨的产生和维持提供了充足的水汽。

(4) 在多普勒速度图上, 正负速度中心的位置相对比较稳定, 因而其暴雨发生区也相对比较稳定, 即主要发生在淮北地区。

(5) 在多普勒速度图上, 西南低空急流的零速度线随高度仍顺转。

参考文献:

- [1] 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, 1992.
- [2] 孙淑清. 低空急流及其暴雨关系[C]. 大连暴雨会议文集. 长春: 吉林人民出版社, 1980: 40-46.
- [3] Wood V T, Brown R A. Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1986, 3(1): 114-128.
- [4] 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: 90-119.
- [5] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 196-205.
- [6] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.

Single Doppler Velocity Signatures of Low-level Jets

XIA Wen-mei¹, WANG Ling-zhen¹, ZHANG Ya-ping²,
WANG Wei-fang¹, GU Song-shan³

(1. Jiangsu Province Meteorological Observatory, Nanjing 210008, china;

2. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 400039, china;

3. Department of Electronic Engineering, NIM, Nanjing 210044, china)

Abstract: A set of single Doppler velocity models are presented for low-level jets, and a rainstorm case in Anhui province is analyzed based on the 24th to 27th July 2000 observations of Doppler weather radar of Hefei. Results show that: 1) no matter how wind direction changes, the positive/negative Doppler speed areas of low-level jets are always symmetric about the radar site, and the real wind speed profile can be inferred from the zero velocity contour distribution of Doppler velocity; 2) the rainstorm occurs in sites on the left side within 200 km from the connecting line between positive and negative speed centers; 3) the sustained of low-level jet supplies plentiful vapor for the formation and maintenance of the rain gush.

Key words: low-level jets; Doppler velocity; zero Doppler velocity contour; rainstorm