

龙柯吉,康岚,罗辉,等,2020. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象,46(2):212-222. Long K J, Kang L, Luo H, et al, 2020. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 46(2):212-222(in Chinese).

## 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析\*

龙柯吉<sup>1,2</sup> 康 岚<sup>1</sup> 罗 辉<sup>1</sup> 郭 旭<sup>3</sup> 周秋雪<sup>1</sup>  
费海燕<sup>4</sup> 吴 薇<sup>3</sup> 张 琪<sup>1</sup>

1 四川省气象台,成都 610072

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

3 四川省气象探测数据中心,成都 610072

4 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

**提 要:** 采用 2009—2018 年地面、高空、闪电定位、多普勒雷达资料统计出四川盆地的 34 次雷暴大风过程,并根据冷空气参与情况及 500 hPa 影响系统将其分为五种类型:混合性大风类(I 类)、深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风(II-1)、低槽(切变)东移类雷暴大风(II-2)、副热带高压西侧切变类雷暴大风(II-3)和东风扰动类雷暴大风(II-4)。统计分析了五类过程中发生雷暴大风站点对应的雷达回波特征,包括:对流组织类型、雷达回波强度、回波顶高、垂直液态水含量、中层径向辐合、风暴移动速度、回波质心下降、低仰角风速大值区和辐散。结果表明,82% 的雷暴大风站点具有风速大值区,不同类型的雷暴大风过程还有其他不同的雷达回波特征,这些特征大多可提前 10 min 以上。另外,当站点出现中层径向辐合、辐散、回波强度大且伴有强梯度或回波类型为飚线时,也要考虑大风是否出现。

**关键词:** 雷暴大风,雷达回波特征,预报关键点,对流组织类型,非线性对流,飚线

**中图分类号:** P457, P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.007

## Statistical Analysis of Radar Echo Characteristics of Thunderstorm Gales in Sichuan Basin

LONG Keji<sup>1,2</sup> KANG Lan<sup>1</sup> LUO Hui<sup>1</sup> GUO Xu<sup>3</sup> ZHOU Qiuxue<sup>1</sup>  
FEI Haiyan<sup>4</sup> WU Wei<sup>3</sup> ZHANG Qi<sup>1</sup>

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 Sichuan Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072

4 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

**Abstract:** By using data of surface, upper air, lightning location and Doppler weather radar from in Sichuan Basin during 2009—2018, 34 cases of thunderstorm gale processes are counted out. And on the basis of cold air participation and 500 hPa impact system, these thunderstorm gale processes can be divided in to five types: mixed gale (I), thunderstorm gale behind deep trough (vortex) (II-1), trough (shear) moving eastward thunderstorm gale (II-2), shear thunderstorm gale on west side of subtropical high pressure belt (II-3), and east wind disturbance thunderstorm gale (II-4). Besides, the radar echo characteristics of

\* 国家自然科学基金面上项目(41875058)、中国气象局“全国强对流预报专家团队建设”项目、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室青年专项项目(SCQXKJQN2019018)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-064、CMAYBY2019-097)、四川强对流预报创新团队[川气函(2017)313号]、国家重点研发计划(2018YFC1506104)和四川省科技厅应用基础研究项目(2019YJ0316)共同资助

2019 年 2 月 1 日收稿; 2019 年 12 月 11 日收修定稿

第一作者:龙柯吉,主要从事天气学与数值预报研究. Email:longkeji945@163.com

通讯作者:康岚,主要从事天气预报及相关研究. Email:812700656@qq.com

thunderstorm gale stations in the five kinds of processes are analyzed statistically, including convective organization type, radar echo intensity, echo tops, vertical integrated liquid, mid-altitude radial convergence, storm moving speed, echo centroid decline, high value area of wind speed at low elevation and divergence. The results show that 82% thunderstorm gale stations have high value areas of wind speed, different types of thunderstorm gale have other different warning indicators, and all these warning indicators can be advanced by more than 10 minutes. Furthermore, when there is mid-altitude radial convergence, divergence, high echo intensity with strong gradient or echo type being squall line at station, we should also consider the possibility of strong wind.

**Key words:** thunderstorm gale, radar echo characteristics, forecast key point, convective organization type, nonlinear convective, squall line

## 引言

雷暴大风是瞬时风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 并伴有雷暴的大风天气,它是一种强风灾害,空间尺度小,预报难度大。费海燕等(2016)发现 2004—2013 年四川盆地累计出现强雷暴大风( $> 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )5 站次,属于小概率事件,但一旦发生,往往造成严重灾害。近年,四川盆地雷暴大风事件频发,造成了严重的人员财产损失,如:2015 年“4·4”广安武胜大风造成农作物大量受损,房屋垮塌,8 人死亡,2 人重伤,直接经济损失达 2 亿元;2016 年“6·4”广元市轮船公司“双龙”号在返航途经三堆镇飞凤村三组水域时遭遇大风,发生翻沉事故,造成 15 人死亡;2017 年“7·28”南充大风造成 2 人死亡,4 人受伤,5 334 人受伤,房屋损坏 87 间。

国内外学者对雷暴大风已经有大量研究,包括雷暴大风的时空分布、识别及雷达回波特征等。研究发现,当对流层中层有干空气侵入时,下沉气流具有较大的不稳定性,同时对流层低层环境大气的温度直减率较大有利于雷暴大风的出现(廖晓农等,2009;杨新林等,2017)。低层逆温、下湿上干,有不稳定能量存在;中低层垂直风切变较强,层结不稳定,这些都为强对流天气的发生发展提供了有利条件(阎访等,2013)。而对于雷暴大风的雷达识别指标主要有六种:风暴最大反射率因子、风暴最大垂直积分液态水含量、垂直积分液态水含量随时间变率、风暴最大反射率因子下降高度、风暴体移动速度和垂直积分液态水含量密度(李国翠等,2013;陈翔等,2011)。其中,当垂直积分液态水含量(VIL)达到或超过  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,随后 VIL 值的快速减小对于预警雷暴大风天气有指示意义(王彦等,2009)。另

外,反射率因子及径向速度图能有效监测雷暴大风,反射率因子回波为带状或线状,在径向速度图上有大风区和中层径向速度辐合等指标,对大风预报也有较好的指示意义(杨雪艳等,2013)。当雷暴大风的主要雷达回波出现弓形回波、阵风锋和径向速度大值区中一个或多个特征均可发布雷暴大风预警(王福侠等,2016)。依据径向速度大值区能对 77.8% 的带状回波造成的雷暴大风天气提前发布预警,能对 100% 的弓形回波造成的雷暴大风天气提前发布预警(杨璐等,2018)。

长期对模式检验的结果表明,模式对梯度大风有一定预报能力,但对雷暴大风基本没有预报能力,雷暴大风的预报是业务工作中的一个重点和难点。目前,四川灾害性天气方面的研究大都是针对短时强降水开展的,研究雷暴大风大多基于个例,不够全面深入,雷暴大风的预报以预报员主观分析为主,对有利雷暴大风出现的环流形势尚待归纳总结。多普勒天气雷达是揭示中小尺度强对流天气系统特征的最好手段之一,深入、全面的分析造成雷暴大风的雷达特征对于预报雷暴大风至关重要。对于四川盆地,有利于雷暴大风出现的环流形势有哪些?不同类型的雷暴大风具有怎样的雷达回波特征?可识别的雷达回波特征在雷暴大风中所占比例有多少?应用多普勒天气雷达对雷暴大风临近预报能力如何?本文将针对以上问题展开研究,以期对雷暴大风的短时临近预警提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

本文所用资料包括:2009—2018 年地面观测资

料、高空观测资料、闪电定位资料、四川盆地 7 部 CINRAD-SC 雷达资料及 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料。

## 1.2 个例选取

雷暴大风是瞬时风力达到 8 级及以上并伴有雷暴的大风天气。2009—2018 年 10 年间,四川省累计出现雷暴大风 1 279 站次,通过风速箱线图(图 1)可以看到,最大风速达到  $33.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,第 90% 分位为  $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大风风速平均值为  $19.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中第 95%、99% 分位数对应的风速值分别为 23.7、 $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于四川盆地,大风过程主要有三种类型:单纯由气压梯度差造成的梯度大风,由热力不稳定造成的雷暴大风,两者都有的混合性大风。本文研究对象为雷暴大风,需剔除单纯的梯度大风过程。筛选步骤为:(1)24 h 内四川盆地 109 个国家级地面观测站(图 2)中有 3 站以上瞬时风速  $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,若大风站点较分散且自动站站数较少,不计入研究过程;(2)大风时伴有闪电;(3)判断大风过程性质。混合性大风判别标准:地面图上,过程前盆地以北有冷高压,过程中冷空气进入,盆地增压,大部以偏北风为主,过程前或过程中部分地方出现大风的同时伴随有闪电,过程中既有梯度风又有雷暴大风。雷暴大风判别标准:过程前盆地降压增温,盆地以北无冷高压或冷高压与盆地压差小于 5 hPa,冷空气以扩散方式进入。

## 1.3 雷达回波特征分析方法

研究通过反射率因子、径向速度及一些特征量

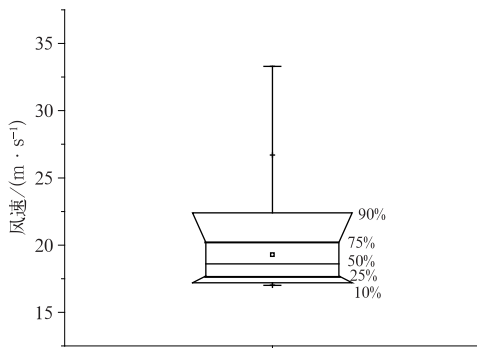


图 1 2009—2018 年四川省雷暴大风风速箱线图

Fig. 1 Wind speed boxplot of thunderstorm gale in Sichuan Province from 2009 to 2018

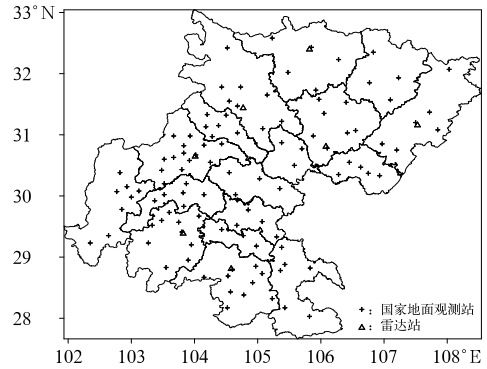


图 2 四川盆地国家级地面观测站与雷达站分布示意图

Fig. 2 Distribution of national ground stations and Doppler weather radar stations in Sichuan Basin

来统计不同类型下雷暴大风站点的雷达回波特征,并关注是否具有预报提前量。参考相关研究(吴翠红等,2012;方翀等,2017;王福侠,2016;王彦等,2009;章国材,2011;东高红和吴涛,2007;程月星等,2018;梁爱民等,2006):对于反射率因子,关注对流组织类型、最大回波强度、回波移动速度及是否具有强回波梯度和回波质心下降;径向速度图上,关注中层径向辐合及低仰角( $0.5^\circ$ 或 $1.5^\circ$ )是否伴有超过  $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速大值区;另外,对回波顶高、垂直液态水含量及其是否下降进行统计。回波质心下降等不便自动识别,研究中所有回波特征都基于人工识别,对于某大风站点,选取大风前一小时距离其最近的单站雷达数据进行分析,盆地内雷达站点分布见图 2。根据业务需求,为了更早地对大风进行预报,统计发生大风站点 30 km 范围内的回波特征。

各类回波特征的具体识别流程如下:通过组合反射率判断其对流组织类型、最大回波强度及强回波梯度;回波质心下降是通过组合反射率上的强回波中心( $>45 \text{ dBz}$ )绘制剖面图,根据几个体扫剖面图中质心高度是否随时间降低来判别(图 3);中层径向辐合(MARC)(王萍和牛智勇,2014)是在对流风暴中层(一般为 3~9 km)的径向辐合区(Przybylinski,1995),反映了强上升气流与后侧入流急流间的过渡区,当 3~7 km 径向速度差达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,认为 MARC 特征是显著的(章国材,2011),文中首先通过组合反射率找到强回波位置,再通过该强回波位置附近在各仰角(距地面 3~9 km)的径向速度图查看是否具有径向辐合,并结合径向速度剖

面图确定,当正负速度差最大值达到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,认为有 MARC;回波移动速度(王俊等,2013)是根据组合反射率,结合低仰角反射率因子,以两个时间点较稳定回波中心、前沿或后沿的位置估算出来,有两类回波不分析,一类是强度较弱( $<50 \text{ dBz}$ )且快速生消,常发生于混合性大风过程中,另一类则是回波周围不断有新生单体生成并与其合并,这两类回波移动速度很难判断。

对流组织类型分为六种(Yang and Sun,2018; Gallus et al,2008):孤立单体、簇状多单体、线性多单体、非线性对流系统、飢线及弓状回波,以下分别

简称为 IC、CC、BL、NL、SL、BE。四川盆地各对流组织类型示例见图 4。

由于雷达回波是不断演变的,本文将样本发生前一小时内最强的回波类型作为其对流组织类型。分类流程(图 5):(1)判断单体间是否有弱回波( $\leq 10 \text{ dBz}$ )相连;若无,则根据单体是否排列成线性,把对流组织归类为 BL 或 IC。(2)若单体间有弱回波连接,那么判断强回波( $\geq 35 \text{ dBz}$ )是否连续且是否强回波的面积 $\geq 30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ,如果对流组织回波形态不满足以上两个条件,那么再判断单体是否呈线性排列,来决定对流组织属于 CC 或 BL。(3)若

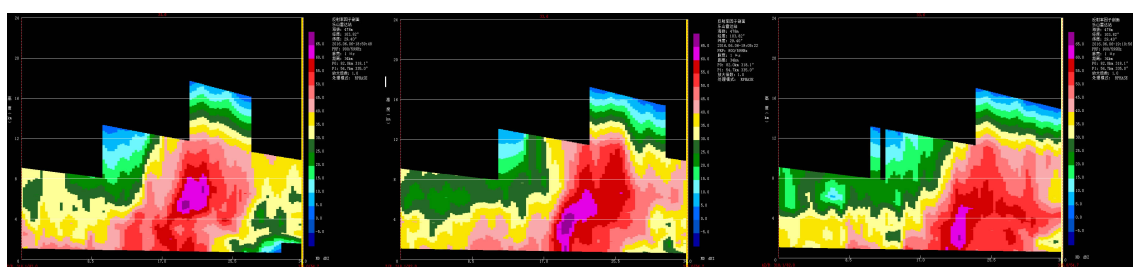


图3 回波质心下降示例

Fig. 3 Example of echo centroid decline

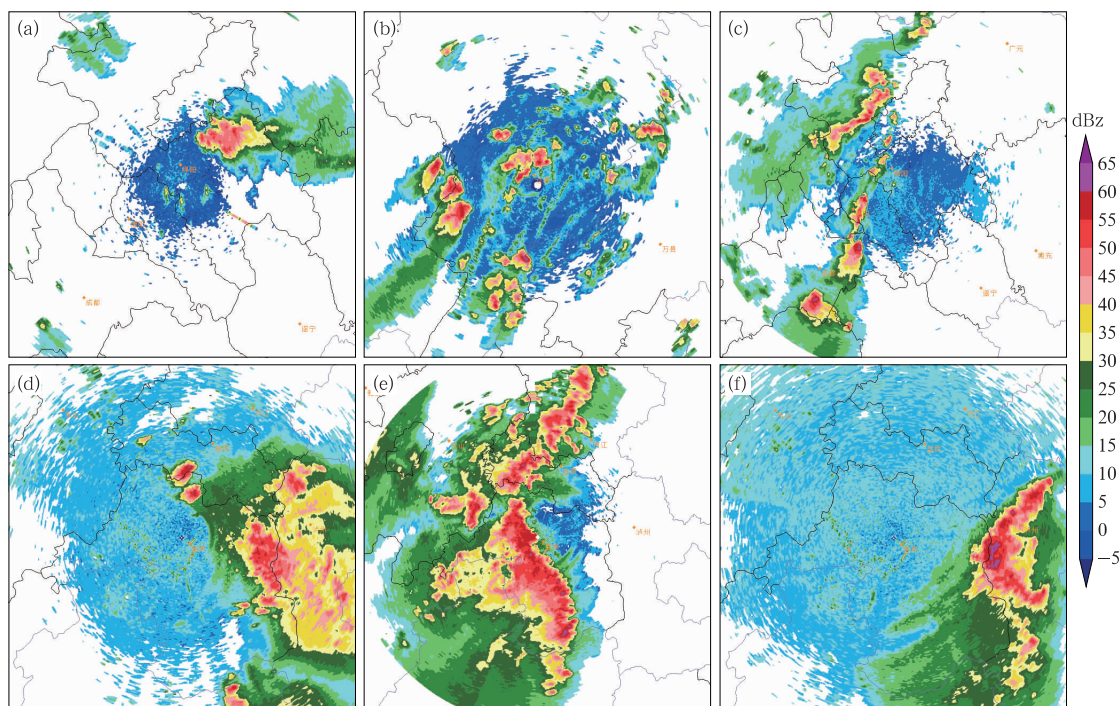


图4 对流组织类型示例图

(a) IC, (b) CC, (c) BL, (d) NL, (e) SL, (f) BE

Fig. 4 Example diagram of convective organization type

(a) IC, (b) CC, (c) BL, (d) NL, (e) SL, (f) BE

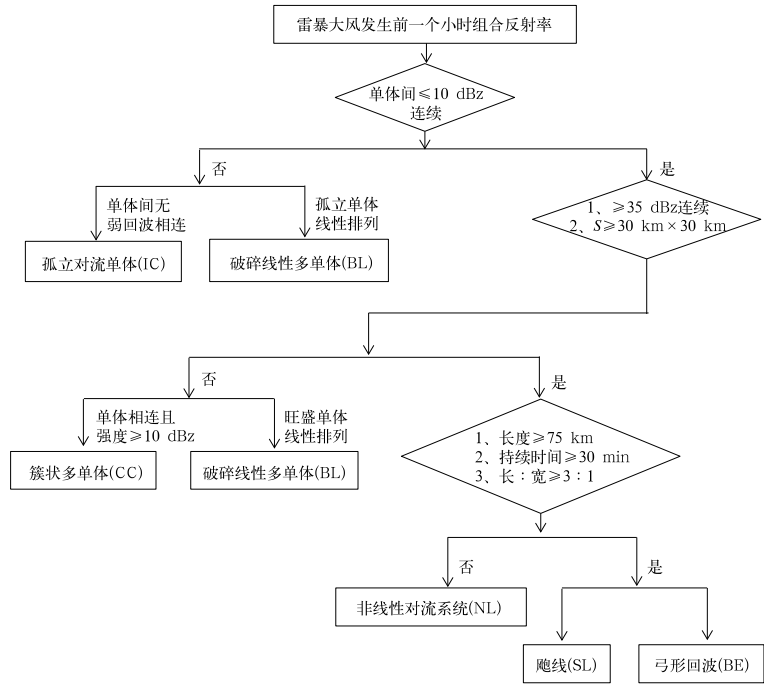


图 5 雷暴大风对流组织类型分类操作流程

Fig. 5 Classification operation flow chart of thunderstorm gale convective organization type

对流组织的强回波满足第二步的条件,则判断对流组织是否满足线性对流系统的条件;若不满足,则对流组织类型归类为 NL;若满足,再判断对流组织是 BE 或 SL。

## 2 雷暴大风过程及分型

2009—2018 年共筛选出 34 次雷暴大风过程,

混合性大风和雷暴大风过程各 17 次(表 1),涉及雷暴大风站点共计 128 个。自 2009 年以来,每年都有大风过程,且有逐年增加的趋势,其中 2013、2015、2016、2018 年次数均达到 5 次以上,主要发生在 4—8 月,其中 8 月大风过程最多,达到 12 次。

将混合性大风和雷暴大风过程简称为 I 型和 II 型,由于天气系统的演变和环境大气基本要素的配置结构制约中尺度强对流系统的发生、发展与消亡

表 1 2009—2018 年四川盆地雷暴大风过程及分类

Table 1 Process and classification of thunderstorm gale in Sichuan Basin from 2009 to 2018

序号	日期/年.月.日	过程类型
1	2009.5.22	混合性大风
2	2010.8.5	副高西侧切变类雷暴大风
3	2011.8.24	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
4	2012.6.15	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
5	2012.8.18	东风扰动类雷暴大风
6	2013.5.29	混合性大风
7	2013.8.1	低槽(切变)东移类雷暴大风
8	2013.8.7	混合性大风
9	2013.8.16	东风扰动类雷暴大风
10	2013.8.18	东风扰动类雷暴大风
11	2014.4.19	混合性大风
12	2015.4.2	低槽(切变)东移类雷暴大风
13	2015.4.5	混合性大风
14	2015.5.1	混合性大风

(续表 1)

序号	日期/年.月.日	过程类型
15	2015.5.8	混合性大风
16	2015.7.27	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
17	2015.10.26	混合性大风
18	2016.6.4	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
19	2016.6.7	混合性大风
20	2016.7.27	低槽(切变)东移类雷暴大风
21	2016.8.7	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
22	2016.8.8	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
23	2016.8.15	东风扰动类雷暴大风
24	2017.4.16	混合性大风
25	2017.5.3	混合性大风
26	2017.7.16	深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风
27	2017.7.28	副高西侧切变类雷暴大风
28	2018.4.4	混合性大风
29	2018.5.16	混合性大风
30	2018.5.21	混合性大风
31	2018.5.25	混合性大风
32	2018.6.7	混合性大风
33	2018.8.6	东风扰动类雷暴大风
34	2018.8.21	混合性大风

(孙继松等,2014),于是从天气系统和大气基本要素情况对两类过程进行研究。结果表明,两类过程都发生在日均气温较历史同期偏高的背景下,过程前低层通常有暖脊或暖中心。而雷暴大风过程中 500 hPa 影响系统主要有四种:(1)四川盆地位于深厚的冷槽(图 6a)或冷涡(图 6b)后部,槽后偏北气流或涡后东北风较为强盛,高空冷平流起主导作用,类似章国材(2011)“高空冷平流强迫”类;(2)四川上空有经向度较大的低槽东移(图 6c),温度槽落后于高度场,在移动过程中可能形成前倾槽;(3)副热带高压较强盛,控制全省或盆地,且过程期间比较稳定,西侧常存在切变线或低槽(图 6d);(4)副高脊线通常偏北,台风登陆后减弱为台风低压,并西行形成东风扰动进入盆地(图 6e)。

因此可通过 500 hPa 影响系统将雷暴大风过程细分为四种:深厚低槽(涡)后部型、低槽(切变)东移型、副高西侧切变型和东风扰动型,分别定义为Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅱ-3 和Ⅱ-4。其中Ⅱ-1 最多,达 7 次,约占 41%,Ⅱ-2、Ⅱ-3、Ⅱ-4 型分别为 3、2、5 次。

3 分类雷暴大风雷达回波特征及预报关键点

3.1 混合性大风

对于混合性大风过程,仅关注大风时刻伴有闪

电的站点(图 7),并剔除以梯度大风为主的站点,即回波顶高较低、回波强度在 50 dBz 以下的站点。此类大风站点有 23 个,对流组织类型有三类:NL、SL 和 CC,以 NL 和 SL 为主,站点个数分别为 10、9 个,合计占 82.6%。从图 7a 可以看到,最大回波强度为 55~72 dBz,均伴有强回波梯度,平均约 63 dBz,65%以上站点强度在 60 dBz 以上。回波移速较快,平均为 46 km·h<sup>-1</sup>,最大可达 75 km·h<sup>-1</sup>。回波顶高基本在 11 km 以上,仅个别站点由于距离雷达站较近,导致回波顶高在 10 km 以下。11 个站具有较大的 VIL 值,达到 30 kg·m<sup>-2</sup> 以上,最大为 76 kg·m<sup>-2</sup>。

这类大风的雷达回波主要特征(图 7b 和 7c)为风速大值区、回波质心下降和 VIL 减少,具有以上特征的站次比例分别为 78.3%、56.5%、43.5%,所有站点至少满足两个特征,近半数站点伴有 3 个及以上的特征,从提前量来看,基本都能达到 20 min 以上,85%的站能达到 30 min 以上。17.4%的站点还具有中层径向辐合,提前量都在 50 min 以上。

3.2 深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风

此类大风(图 8)站点有 33 个,对流组织类型有三种:NL、BL、SL,以 NL 和 BL 为主,站点个数分别为 21、10 个,合计占 93.9%,有 2 个站伴有阵风锋。根据图 8a,最大回波强度在 50~67 dBz,平均为 58.3 dBz,有 10 个站在 60 dBz 以上,其中 25 个站



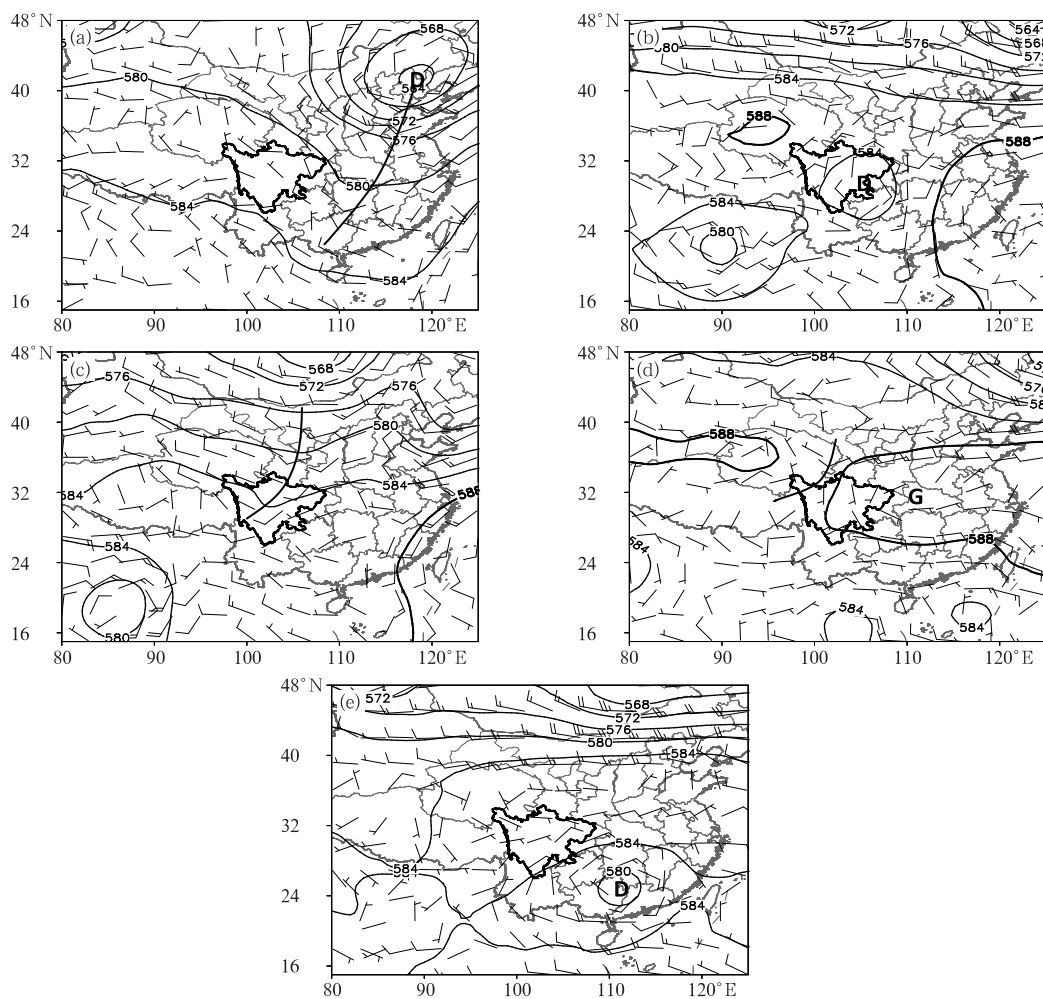


图 6 雷暴大风过程 500 hPa 典型环流形势图(单位: dagpm)

(a)2012 年 6 月 14 日 20 时, (b)2015 年 7 月 27 日 08 时, (c)2007 年 6 月 28 日 20 时,

(d)2017 年 7 月 27 日 20 时, (e)2013 年 8 月 16 日 20 时

Fig. 6 500 hPa typical circulation pattern of thunderstorm gale (unit: dagpm)

(a) 20:00 BT 14 June 2012, (b) 08:00 BT 27 July 2015, (c) 20:00 BT 28 June 2007,

(d) 20:00 BT 27 July 2017, (e) 20:00 BT 16 August 2013

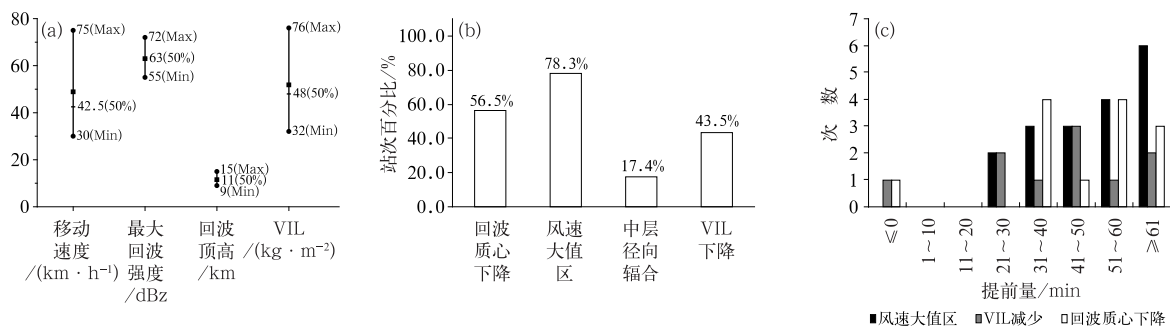


图 7 混合性大风中以雷暴大风为主型的回波特征箱线图(a)、站次百分比(b)及提前量(c)

Fig. 7 Boxplot (a), station frequency percentage (b) of echo characteristics and

lead time (c) of mixed gale dominated by thunderstorm gale

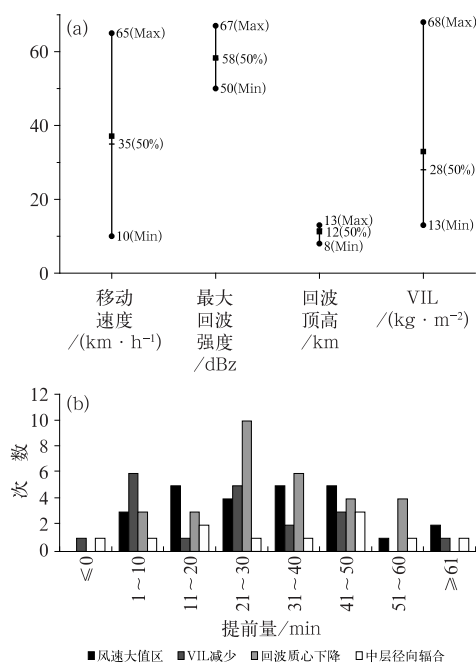


图8 深厚低槽(低涡)后部类雷暴大风的回波特征箱线图(a)及提前量(b)

Fig. 8 Boxplot of echo characteristics (a) and lead time (b) of thunderstorm gale behind deep trough (vortex)

伴有强回波梯度,占比约 75.8%。回波移动速度为 10~65 km · h<sup>-1</sup>,普遍在 30~50 km · h<sup>-1</sup>,平均为 37 km · h<sup>-1</sup>。回波顶高在 8~13 km,平均为 11.2 km。19 个站 VIL 在 23 kg · m<sup>-2</sup> 以上,最大为 68 kg · m<sup>-2</sup>,因此大的 VIL 值对大风有一定指示意义,但是否所有大的 VIL 值都伴有大风需要做进一步研究。

此类大风的主要回波特征(图 8b)有回波质心下降、风速大值区和 VIL 下降,具有以上特征的站点所占比例分别为 90.9%、75.8%、54.5%,这些特征的提前量大多在 20 min 以上。另外,33.3%的站点伴有中层径向辐合,提前量从 0~60 min 不等,4 个站在 0.5°或 1.5°仰角伴有辐散,提前时间分别为 29、30、43 和 43 min。有 88% 站点在以上 5 个特征中至少满足 2 个,近 70% 站点满足 3 个及以上,其中有 1 个站不具备以上 5 个特征,但其回波强度达到 61 dBz,且伴有强的回波梯度,因此在做大风预报时该特征同样不能忽略。

### 3.3 低槽(切变)东移类雷暴大风

此类大风(图 9)站点有 17 个,对流组织类型有

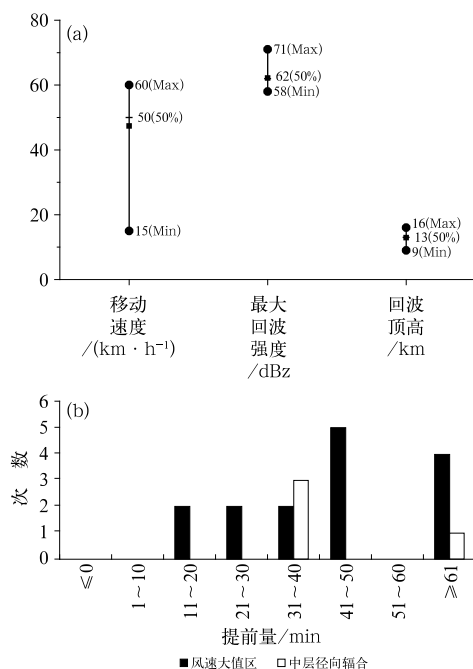


图9 同图8,但为低槽(切变)东移类

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for trough (shear) moving eastward thunderstorm gale

四种:SL、NL、BE 和 CC,以 SL 和 NL 为主,站点个数分别为 9、6 个,约占 88.2%。从图 9a 可以看出,最大回波强度在 58~71 dBz,强度较强,普遍在 60 dBz 以上,平均达到 62.2 dBz,其中 15 站回波梯度较大。回波移动速度为 15~60 km · h<sup>-1</sup>,平均达到 47.4 km · h<sup>-1</sup>。回波顶高较高,在 9~16 km,平均为 12.9 km。仅 1 个站 VIL 值较大,为 33 kg · m<sup>-2</sup>。

风速大值区是这类大风的主要回波特征(图 9b),88.2% 的站都有此特征,且提前量在 10 min 以上,11 个站达到 30 min 以上。另外,4 个站具有中层径向辐合,提前量均在 30 min 以上,仅 2 个站伴有回波质心下降,提前量分别为 9、45 min,因此当出现回波质心下降、中层径向辐合时,也应引起注意。其中,有 1 个站不具以上 3 个特征,其对流组织类型为 SL,最大回波强度为 61 dBz,并伴有强回波梯度。

### 3.4 副高西侧切变类雷暴大风

副高西侧切变型下产生的大风(图 10)站点有 15 个,对流组织类型有:NL、CC 和 IC,站点数分别为 11、2、2 个,均为团状回波,其中以 NL 为主,约占 73.3%。根据图 10a,最大回波强度在 52~64 dBz,



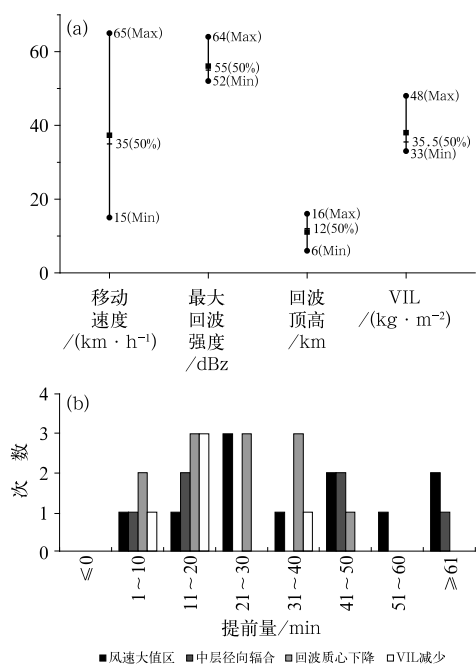


图 10 同图 8, 但为副高西侧切变类  
Fig. 10 Same as Fig. 8, but for shear  
thunderstorm gale on west side of  
subtropical high pressure

平均值为 56.1 dBz, 仅半数具有强回波梯度。回波移动速度为 15~65  $km \cdot h^{-1}$ , 平均为 37  $km \cdot h^{-1}$ 。回波顶高跨度较大, 在 6~16 km, 平均为 11.1 km。5 站 VIL 值达到 30  $kg \cdot m^{-2}$  以上。

对于此类大风, 主要回波特征为回波质心下降和风速大值区(图 10b), 具有以上特征的站点占比分别为 80%、73.3%, 其中回波质心下降的提前量在 3~48 min, 10 站能提前 10 min 以上, 风速大值区能提前 7~81 min 预示大风的出现, 9 个站提前 20 min 以上。另外, 6 个站出现中层径向辐合, 5 个站提前量在 10 min 以上, 5 个站伴有 VIL 下降, 当出现该特征时, 提前量为 3~33 min, 其中 4 个站在 10 min 以上, 2 个站在 0.5°或 1.5°仰角伴有辐散, 提前量分别为 12、18 min。所有大风站点至少具有一项以上 5 个特征, 其中 93.3% 以上站点具有 2 个及以上特征。

### 3.5 东风扰动类雷暴大风

东风扰动型下产生的大风(图 11)站点为 21 个, 对流组织类型较多, 包括: SL、NL、BE、CC 和 IC, 站点数分别为 8、7、2、2、2 个, 以 SL 和 NL 为主, 二者合计占 71.41%。如图 11a 所示, 最大回波强度

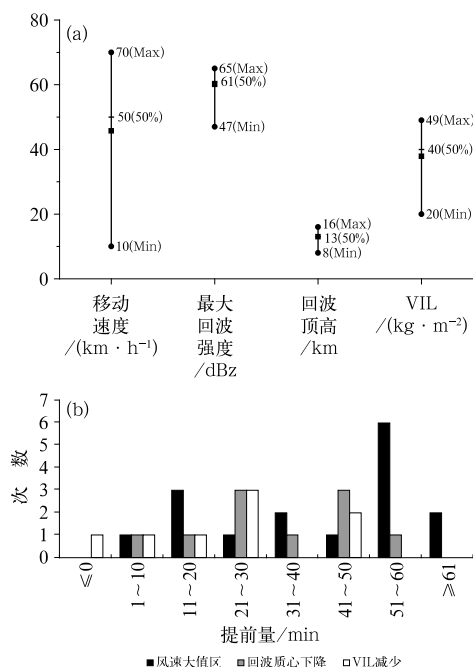


图 11 同图 8, 但为东风扰动类  
Fig. 11 Same as Fig. 8, but for east wind  
disturbance thunderstorm gale

在 47~65 dBz, 平均为 60.1 dBz, 18 个站伴有强的回波梯度。回波移动速度为 10~70  $km \cdot h^{-1}$ , 平均为 46  $km \cdot h^{-1}$ 。云团发展高度较高, 回波顶高在 8~16 km, 平均为 13 km。8 个站 VIL 值达到 20  $kg \cdot m^{-2}$  以上。

此类大风的回波特征(图 11b)主要有风速大值区、回波质心下降和 VIL 下降, 具有以上特征的站点比例分别为 76.2%、52.4%、38.1%, 其中回波质心下降的提前量为 5~56 min 预警大风, 9 个站能提前 20 min 以上, 风速大值区提前量在 4~66 min, 11 个站能提前半个小时以上, VIL 下降的提前量在 0~46 min, 5 个站能达到 20 min 以上。另外, 5 个站伴有中层径向辐合, 提前时间分别为 20、20、30、46 和 46 min。几乎所有站点都有至少 1 个以上特征, 10 个站具有 3 个以上特征, 其中有 1 个站不具备以上 4 个特征, 但其对流组织类型为 SL, 最大回波强度为 58 dBz, 且伴有强回波梯度。

## 4 结论和讨论

利用常规探空资料、地面加密观测资料及闪电定位仪资料统计出 2009—2018 年发生在四川盆地的 34 次雷暴大风过程, 所有过程分为混合性大风和

四类雷暴大风。在统计雷达回波特征时,将混合性大风过程中站点细分为以雷暴大风为主和以梯度大风为主两种类型进行分析。统计结果表明,不同类型下的主要雷达回波特征各有差异。

(1) 从对流组织类型来看,Ⅰ型以 NL 和 SL 为主,Ⅱ-1 型以 NL 和 BL 为主,Ⅱ-2 型大风的对流组织类型则 SL 和 NL 最多,Ⅱ-3 型大风则主要由 NL 造成,Ⅱ-4 型以 SL 和 NL 为主。可以看出 NL(约占 50%)、SL(约占 23%)和 BL(约占 11%)是产生大风的主要对流组织类型,CC(约占 8%)次之,个别 IC 能造成雷暴大风,占比为 3%左右,且仅出现在Ⅱ-1、Ⅱ-3 和Ⅱ-4 型中,仅两个站点的大风由 BE 造成,且只造成Ⅱ-2、Ⅱ-4 型,这应该是由四川本身弓形回波较少,且后期会逐渐演变为飑线。

(2) 六种大风对应的平均最大回波强度、平均回波移动速度和平均云顶高度也存在区别,最大回波强度都在 56 dBz 以上,其中Ⅰ型回波强度最大,Ⅱ-2 型次之,Ⅱ-4 型排第三,Ⅱ-3 型最小;平均移速都在  $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以上,Ⅱ-1 型风暴移动速度最快,平均移速为  $47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,Ⅰ型和Ⅱ-4 型次之,总体而言,四川盆地产生雷暴大风的风暴移动速度较快,平均约为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;从回波顶高来看,Ⅱ-4 型的云团发展高度最高,Ⅱ-2 型次之,其余都在 11 km 左右,可见,当回波强度越大,回波顶高发展高度也相对较高,当回波强度在 60 dBz 以上时,回波顶高平均在 12 km 左右。

(3) 从 VIL 值来看,40%以上的站点具有较大的 VIL 值,其中Ⅰ型 55%的站在  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上,平均值达到  $52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,Ⅱ-1 型有约 58%的站 VIL 值较大,平均值为  $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,Ⅱ-4 型则有 37%的站 VIL 值较大,平均值为  $36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相对而言,Ⅱ-2 和Ⅱ-3 型普遍 VIL 值较小,分别仅 6%和 27%站在  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上。Ⅱ-3 为副高外围雷暴,其回波发展高度较低,VIL 值较小,而Ⅱ-2 型 VIL 值低是因为个别站点距雷达较近,雷达存在盲区,雷暴的垂直结构探测不完整。

(4) 各型大风的主要回波特征也有差异,风速大值区几乎是所有型大风最优的判断标准,而Ⅰ型、Ⅱ-1 型、Ⅱ-4 型除了风速大值区,回波质心下降和 VIL 下降也可作为大风预报的有利标准,Ⅱ-3 型的主要回波特征则是回波质心下降和风速大值区,这些特征大都具有一定的提前量,能为大风的预报提供参考,另外,当站点出现中层径向辐合和辐散时也

有利大风的出现。在统计站点中,个别站点不具备以上特征,但其最大回波强度大,且伴有强梯度,尤其当回波类型为飑线时,也要考虑大风是否出现。

本文统计获得的雷暴大风环流形势及雷达回波特征能为业务上预报和服务提供一定参考,但出现这些雷达回波特征是否一定会出现雷暴大风,雷暴大风的强度又取决于什么因素,今后还需要进一步深入研究。

**致谢:**本研究得到杨新林博士的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- 陈翔,彭丽霞,高文亮,等,2011. 洪泽湖地区强雷暴天气气候特征与雷达回波分析[J]. 气象,37(9):1118-1125. Chen X, Peng L X, Gao W L, et al, 2011. Analysis of climate characteristics and radar echo of strong thunderstorm in Hongze Lake Region[J]. Meteor Mon, 37(9):1118-1125(in Chinese).
- 程月星,孙继松,戴高菊,等,2018. 2016 年北京地区一次雷暴大风的观测研究[J]. 气象,44(12):1529-1541. Cheng Y X, Sun J S, Dai G J, et al, 2018. Study on a thunderstorm event over Beijing in 2016[J]. Meteor Mon, 44(12):1529-1541(in Chinese).
- 东高红,吴涛,2007. 垂直积分液态水含量在地面大风预报中的应用[J]. 气象科技,35(6):877-881. Dong G H, Wu T, 2007. Application of vertically integrated liquid (VIL) water in disastrous wind nowcasting[J]. Meteor Sci Technol, 35(6):877-881(in Chinese).
- 方翀,王西贵,盛杰,等,2017. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象,36(5):1368-1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al, 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5):1368-1385(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象,42(12):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12):1513-1521(in Chinese).
- 李国翠,刘黎平,张秉祥,等,2013. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别[J]. 气象学报,71(6):1160-1171. Li G C, Liu L P, Zhang B X, et al, 2013. Automatic identification of ground thunderstorm gale based on the radar mosaic 3D data[J]. Acta Meteor Sin, 71(6):1160-1171(in Chinese).
- 梁爱民,张庆红,申红喜,等,2006. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象,32(11):73-80. Liang A M, Zhang Q H, Shen H X, et al, 2006. Application of NCEP data and Doppler weather radar data to thunderstorm prediction in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 32(11):73-80(in Chinese).
- 廖晓农,于波,卢丽华,2009. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象,35(9):18-28. Liao X N, Yu B, Lu L H, 2009. Cli-

- matology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing[J]. Meteor Mon, 35(9):18-28(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Strong Convection Weather Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等,2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报, 27(3):342-351. Wang F X, Yu X D, Pei Y J, et al, 2016. Radar echo characteristics of thunderstorm gales and forecast key points in Hebei Province[J]. J Appl Meteor Sci, 27(3):342-351(in Chinese).
- 王俊,龚佃利,周黎明,等,2013. 山东降水回波移动特征分析[J]. 气象, 39(10):1344-1349. Wang J, Gong D L, Zhou L M, et al, 2013. Analysis on the moving characteristics of precipitation echoes in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 39(10):1344-1349(in Chinese).
- 王萍,牛智勇,2014. 基于多普勒天气雷达数据的中层径向辐合自动识别及其与强对流天气的相关性研究[J]. 物理学报, 63(1):019201. Wang P, Niu Z Y, 2014. Automatic recognition of mid-altitude radial convergence and study on the relationship between the convergence and strong convective weather based on Doppler weather radar data[J]. Acta Phys Sin, 63(1):019201 (in Chinese).
- 王彦,唐熠,赵金霞,等,2009. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 35(5):91-96, 135. Wang Y, Tang Y, Zhao J X, et al, 2009. Statistical characters of Doppler weather radar data on thunderstorms[J]. Meteor Mon, 35(5):91-96, 135(in Chinese).
- 吴翠红,韦惠红,牛奔,2012. 湖北东部雷暴大风雷达回波特征分析[J]. 大气科学学报, 35(1):64-72. Wu C H, Wei H H, Niu B, 2012. Radar echo characteristics analysis for thunderstorm gale in eastern Hubei Province[J]. Trans Atmos Sci, 35(1):64-72(in Chinese).
- 阎访,陈静,卞韬,等,2013. 一次雷暴大风的物理环境场和多普勒雷达回波特征[J]. 气象与环境学报, 29(1):33-39. Yan F, Chen J, Bian T, et al, 2013. Analysis of physical parameter field and echo characteristics of Doppler radar in a thunderstorm process[J]. J Meteor Environ, 29(1):33-39(in Chinese).
- 杨璐,陈明轩,孟金平,等,2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 44(6):802-813. Yang L, Chen M X, Meng J P, et al, 2018. Radar statistical characteristics and warning lead analysis of thunderstorm gales in different life periods in Beijing[J]. Meteor Mon, 44(6):802-813 (in Chinese).
- 杨新林,孙建华,鲁蓉,等,2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7):769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 杨雪艳,张梦远,姚瑶,等,2013. 吉林省盛夏最强的一次雷暴大风天气分析[J]. 安徽农业科学, 41(25):10402-10404, 10428. Yang X Y, Zhang M Y, Yao Y, et al, 2013. Analysis of the strongest thunderstorm gale of Jilin Province in midsummer[J]. J Anhui Agric Sci, 41(25):10402-10404, 10428(in Chinese).
- 章国材,2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:120-169. Zhang G C, 2011. Strong Convection Weather Analysis and Forecasting[M]. Beijing: China Meteorological Press: 120-169 (in Chinese).
- Gallus Jr W A, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the midwest as a function of convective mode: a preliminary study[J]. Wea Forecasting, 23(1):101-113.
- Przybylinski R W, 1995. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods[J]. Wea Forecasting, 10(2):203-218.
- Yang X L, Sun J H, 2018. Organizational modes of severe wind-producing convective systems over North China[J]. Adv Atmos Sci, 35(5):540-549.