

罗爱文,朱科锋,方茸,等. 2015. 江淮地区弓状回波的分布和环境特征分析. 气象, 41(5):588-597.

江淮地区弓状回波的分布和环境特征分析^{*}

罗爱文¹ 朱科锋² 方茸³ 金龙² 赵坤²

1 安徽省气象局,合肥 230031

2 南京大学大气科学学院,南京 210093

3 合肥市气象局,合肥 230041

提 要: 本文结合探空、地面、再分析资料和强对流重要天气报文资料,分析江淮地区(30°~36°N,115°~122°E)弓状回波发生的主要环境条件和灾害性雷暴大风特征,重点利用我国 2009—2012 年新一代多普勒天气雷达资料,分析弓状回波时空分布和三维结构及其成灾机制。统计结果表明:弓状回波常发生在傍晚(17—20 时),分布在安徽西北部到江苏东南部、山东东南部到江苏的西南部,以及安徽南部的两山地间的平原地区。其产生的极端大风(≥ 10 级)占该地区极端大风的 30%。产生弓状回波的天气背景主要是东北冷涡和高空槽,中等的对流不稳定度[平均对流有效位能(CAPE)为 $1780 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$]和垂直风切变(平均 1000~700 hPa 风切变为 $11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),中层存在明显的干层。东北冷涡环境下的弓状回波系统具有较大的下沉对流有效位能(DCAPE)和地面的强冷池。根据雷达观测的结构,江淮地区弓状回波可分为三类:典型弓状回波(BE)类型、弓状回波复合体(BEC)类型和飚线型弓状回波(SLBE)类型,所占比例分别为 28.6%、14.3%和 57.1%。

关键词: 弓状回波,雷暴大风,强对流

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.007

Distribution and Environmental Characteristics of Bow Echoes over Jianghuai Region

LUO Aiwen¹ ZHU Kefeng² FANG Rong³ JIN Long² ZHAO Kun²

1 Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230031

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

3 Hefei Meteorological Bureau of Anhui, Hefei 230041

Abstract: This study examines the environmental conditions of bow echoes and the related damaging thunderstorm characteristics in Jianghuai Region (30°—36°N, 115°—122°E) by using the sounding data, surface observations, reanalysis data as well as the severe weather reports in 2009—2012. The Doppler weather radar data are also used to investigate the spatial and temporal distribution of bow echoes, as well as their three-dimensional structures and possible mechanisms in causing damaging gales. Statistical results show that bow echoes in Jianghuai Region preferentially occur in northwestern Anhui, southeastern Jiangsu, southeastern Shandong to southwestern Jiangsu, and the plain between two mountains in southern Anhui with the frequency maximum in the late afternoon. The extreme damaging gales ($>24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) induced by bow echoes account for 30% of all the extreme damaging wind events. The typical synoptic systems associated with the bow echo are the northeast cold vortex (NECV) and upper-level trough, the moderate convective available potential energy (CAPE, $1780 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and vertical wind shear ($11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB430101)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006007 和 GYHY200906004)及国家自然科学基金项目(40975011)共同资助

2014 年 9 月 9 日收稿; 2015 年 4 月 6 日收修定稿

第一作者:罗爱文,主要从事天气预报研究. Email:13956006121@qq.com

通信作者:朱科锋,主要从事数值预报研究. Email:kefeng@nju.edu.cn

between 1000 and 700 hPa), as well as a remarkable dry layer in the middle level. Compared with the environmental conditions affected by the upper-level trough systems, NECV is usually accompanied with a larger DCAPE and stronger cold pool on the surface. According to the structure of radar observations, bow echoes in Jianghuai Region are divided into three categories, including classic bow echo (BE), bow echo complex (BEC), and squall line bow echo (SLBE), which account for 28.6%, 14.3%, and 57.1%, respectively.

Key words: bow echo, thunderstorm gales, severe convection

引 言

弓状回波是指快速运动的、向前凸起的、形如弓的强对流回波。它通常伴随下击暴流、冰雹、暴雨或龙卷等强烈天气现象,极易形成地面线性灾害性雷暴大风(Fujita, 1978)。我国地处东亚季风区,地跨高中低纬度,地形起伏,自然条件复杂,发生的气象灾害种类较多、发生频次高、分布地域广、持续时间长,是世界上遭受气象灾害影响严重的少数国家之一。据 1990—2006 年统计,我国大陆每年因气象灾害造成的直接经济损失达 1859 亿元,占国内生产总值的比例平均为 2.8%(秦大河, 2008)。江淮区域($30^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$)一般为海拔较低的丘陵和平原,地势平坦、范围广阔,是我国气象灾害最易发生的地区之一。2009—2012 年,江淮地区发生了多起灾害性天气,例如,2009 年 6 月 3—4 日,一次罕见的弓状回波过程袭击了我国黄淮地区,先后影响了河南、山东、安徽和江苏,造成了非常严重的人员伤亡和经济损失,河南有 22 人死亡,其中商丘市受灾人口达到 241.92 万人,引起了广泛关注。

弓状回波是造成地面灾害性大风主要系统之一。Gallus 等(2008)将 2002 和 2007 年发生在美国中北部地区的对流系统分为 9 类:孤立单体、对流单体群、断裂线状对流系统、前部层状云的线状系统、后部层状云的线状系统、平行层状云线状系统、弓状回波(bow echo, BE)、没有层云降水的线状对流系统和非线性对流系统,分析这几类线状对流的发生频率及造成气象灾害的概率,统计分析表明引起地面大风的对流形态特征中 BE 形最易产生地面大风($\geq 25.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。弓状回波内的中尺度涡旋同龙卷风和地面的直线风有紧密的联系,雷达观测显示 γ 中尺度(2~20 km)的涡旋常在弓状回波的前沿生成,这些低层的涡旋加强有利于龙卷的生成(Atkins et al, 2004)。Klimowski 等(2004)通过分

析美国 273 个弓状回波发展过程,将弓状回波分为 BE(classic bow echo)、BEC(bow-echo complex)、CBE(cell bow echo)、SLBE(squall line bow echo)四大类。为深入了解弓状回波中地面灾害性雷暴大风的形成机制,美国于 2003 年专门举行了弓状回波与中尺度涡旋试验(bow echoes and mesoscale convective vortex experiment BAMEX; Davis et al, 2004)。通过分析试验中的弓状回波雷达观测,发现地面最大风出现在中层后向入流急流的下沉和低层弓状回波顶点北侧的气旋式涡旋共同作用区域(Atkins et al, 2005; Wakimoto et al, 2006)。Xu (2015a; 2015b)等进一步研究表明,急流的下降直接加强了地面风速,也极大增强了底层现有正涡度中心前部的水平辐合和相应的对垂直涡管的拉伸作用,使得环流快速增强形成中涡旋。基于追随空气质点的环流和涡度的细致分析,发现中涡旋近地面的垂直涡度主要源于地表摩擦产生的水平涡度的垂直倾斜。

我国学者对于地面灾害性雷暴大风和弓状回波的环境特征也开展了一系列研究。秦丽等(2006)依据北京近郊区 3 个测站的资料研究得出最有利于雷暴大风产生的探空结构:低层暖湿,中高层有干冷空气,环境大气的不稳定度较大并且风的垂直切变也较大。曲晓波等(2010)对淮河中下游地区连续出现三次弓状回波天气过程分析也得到类似的结论。廖晓农(2009)探讨了北京地区 2000—2007 年干、湿两种类型的雷暴大风热力稳定度条件、环境风垂直分布及演变等特征,结果表明绝大多数干型雷暴大风产生在对流有效位能较小但对流层中低层环境风垂直切变却比较大的环境中,而湿型雷暴大风则多发生在热力不稳定的条件下。余蓉等(2011)通过 1971—2000 年的地面观测资料得到了我国东部地区雷暴大风发生的地域分布、年际变化等情况。杨晓霞等(2014)对 1971—2008 年山东雷暴大风进行了天气模型分类研究,指出了不同季节雷暴大风发

生的天气尺度模型。廖晓农等(2009),王彦等(2009),钟利华等(2011),何志强等(2014)对北京、天津、广西以及首都机场雷暴大风气候特征、天气雷达产品、环流特征等做了分析研究。

以上的研究多基于雷达观测统计分析,而深入地理解弓状回波的形成机制和机理需要借助高分辨雷达观测以及高分辨数值模拟。王秀明等(2012)利用雷达以及高密度地面的资料分析指出,冷池合并是商丘一次极端地面大风形成的原因之一。梁建宇等(2012)通过一次飏线过程高分辨模拟表明,中层入流是地面大风形成的原因之一。水汽试验表明,增加水汽含量,有利于对流增强,冷池和雷暴高压增强导致地面大风增强(孙建华等,2014)。陈明轩等(2012)借助雷达资料快速循环更新分析与预报系统,研究了华北地区的一次飏线过程的低层动力和热动力影响机制,指出低层垂直风切变和冷池的相互作用是飏线发展和传播的关键机制。王秀明等(2013)通过数值模拟研究了低层湿度对风暴组织结构的影响,指出中-高湿度环境下,有利于飏线的高度组织化。

随着我国以新一代天气雷达网为代表的现代化监测网络的建立,为弓状回波发生环境和精细结构等的研究提供了新的可能。江淮区域夏季易出现强对流天气,该区域经济发展迅速,人口密集,灾害性天气易造成重大的人员伤亡、经济损失和巨大的社会影响。然而国内目前针对该区域弓状回波统计分析尚少。本研究旨在揭示我国江淮地区弓状回波发生的环境及其与瞬时灾害性风之间的关系,为预报提供参考。

1 资料和方法

本文采用2009—2012年中国气象局国家气象中心发布的强对流天气重要天气报文、常规地面观测资料、探空资料、10 min一次地面自动站加密观测资料、FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率再分析资料(Kalnay et al,1996; Saha et al,2010)以及江淮区域14部新一代多普勒天气雷达基数据(Level-II)资料(包括青岛、临沂、商丘、阜阳、蚌埠、合肥、马鞍山、徐州、连云港、盐城、南通、南京、青浦和上海)。雷达基数据利用美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的SOLOII软件对雷达资料进行预处理,包括去除噪声点、地物回波

和二次回波处理等。

雷暴发生前的环境特征主要通过FNL再分析资料结合地面、探空资料获取。其中FNL再分析资料主要用于500 hPa雷暴发生的天气尺度形势场分析以及区域平均的对流指数计算。文中站点对流指数则用探空资料计算得到,考虑到06和18时没有探空资料,而文中统计的灾害性天气有一定比例发生在下午甚至傍晚,我们对这两个时刻的探空资料进行了修正。采用Johnson等(1991)方法,即利用14时的地面观测资料对08时的探空进行修正以获取雷暴发生前的热力环境。从修正以后的探空资料计算对流发生的环境参数,包括:对流有效位能(CAPE)、下沉对流有效位能(DCAPE)以及0~3和0~6 km垂直风切变等参数。其中DCAPE计算依据Emanuel(1994)的算法。在风暴体内,当未饱和空气中有液态水蒸发或者冻结层以下有固态水融化时,会产生下沉气流。DCAPE定义为气块受到负浮力从某起始高度下沉到地面时该气块增加的动能之最大值,它是一个用来综合考察负浮力对下沉运动气块作用的参数,其表达式为:

$$DCAPE = \int_{p_i}^{p_n} R_d (T_{\rho e} - T_{\rho p}) d \ln p \quad (1)$$

式中, T_{ρ} 是密度温度,下标 e 和 p 分别表示与环境 and 气块有关的物理量, p_i 为起始下沉处的气压, p_n 为地面或中性浮力层处的气压。另外,为了排除山地大风、台风和龙卷等非弓形回波引起的大风对统计结果的影响,重要天气报资料处理时结合灾害性雷暴大风和雷暴信息的记录,在同一时刻有大风记录的50 km半径范围内如果有雷暴信息记录则认定此次的大风由雷暴引起,即为我们所研究的灾害性雷暴大风。用这种方法选出江淮区域里2009—2012年6—8月发生的灾害性雷暴大风的个数。同时对地面资料进行质量控制,去除资料中的异常值。

2 灾害性大风的时空分布统计特征分析

通过2009—2012年强天气报中有关大风和雷暴的记录,结合第一节雷暴大风判别方法,得到6—8月江淮地区在有雷暴影响下的灾害大风总次数为676次。由图1a可见,4年中灾害性雷暴大风分布布满整个区域。从发生的频次看,江苏西北部、江苏东北部、安徽中部、江苏中东部、南通、上海部分地

区、江苏南部与浙江交界处、安徽南部与浙江交界处发生灾害性雷暴大风的频率较高(图 1c)。日变化分析表明,灾害性雷暴大风主要发生在 17—20 时(图 1b)。4 年中灾害性雷暴大风 6 月最多,7、8 月个数相当。6 月大风在江淮区域分布范围较广,7 月大风

主要集中在中部及北部,8 月又集中在江淮区域的东南部(图 2)。灾害性雷暴大风发生的日变化较为明显,发生频次最多是 17—20 时,其次为 14—17 时,这与 Kelly 等(1985)得到的发生在美国的灾害性雷暴大风峰值出现在日落左右的研究结果相一致。

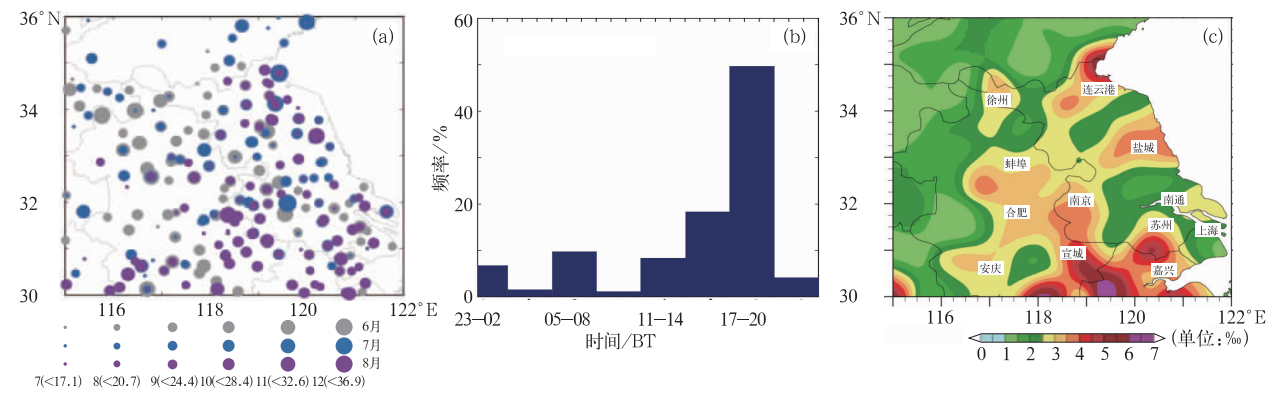


图 1 (a)2009—2012 年总灾害性雷暴大风分布(圈的大小表示风的等级),(b)灾害性雷暴大风的日变化,(c)灾害性雷暴大风发生的空间频率分布

Fig. 1 (a) Distribution of severe thunderstorms during 2009—2012 (the greater the radius, the higher wind speed), (b) daily change of the thunderstorm and (c) spatial frequency distribution of the thunderstorm

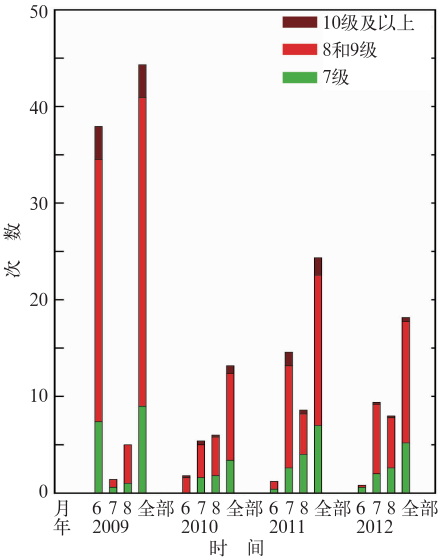


图 2 2009—2012 年 6—8 月灾害性雷暴大风不同等级发生次数分布

Fig. 2 Distributions of severe thunderstorms in different wind scales from June to August during 2009—2012

将灾害性雷暴大风中风力在 10 级($24.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)及以上的风定义为极端大风。相比 Kelly 等(1985)针对美国大陆极端大风的统计分析

研究,我国极端大风(风速在 10 级以上)发生的次数比较少,出现的比率约为 7%。图 3 给出了 4 年中极端大风的分布。从图 3 中可以看出极端大风发生的区域可分为两个路径和一个地域:第一条为从安徽西北部到江苏东南部;第二条为从山东东南部到江苏的西南部;第三就是安徽南部的两个山地之间的平原地区。4 年间发生极端灾害性雷暴大风的频率不高,基本每个站只测得 1 次记录,只有河南

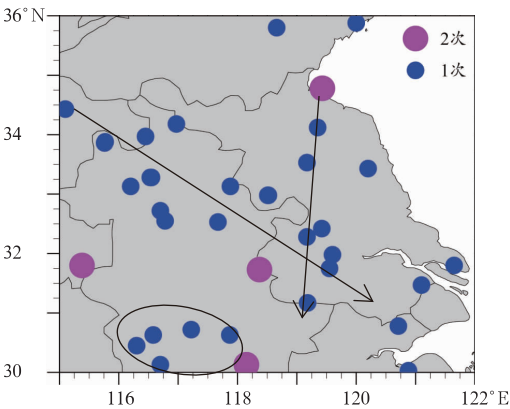


图 3 2009—2012 年 6—8 月极端大风(10 级及以上)频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution of extreme gales from June to August in 2009—2012

与安徽交界处、江苏与安徽交界南部、安徽东南部和江苏东北角有 2 次记录。

3 引起灾害性大风的弓状回波的统计分析

为了进一步研究产生灾害性雷暴大风的系统，

参考 Gallus 等(2008)的分类,将引起江淮地区极端大风的系统从回波形态上分为 3 类:线状对流系统、弓状对流系统和其他类型对流系统,其中线状对流系统中不包含弓状系统,其他类型中包含雷暴单体、超级单体及非线状对流复合体。图 4 展示了各类系统雷达回波形态典型特征。

2009—2012 年 6—8 月共有 12 d 出现极端大风

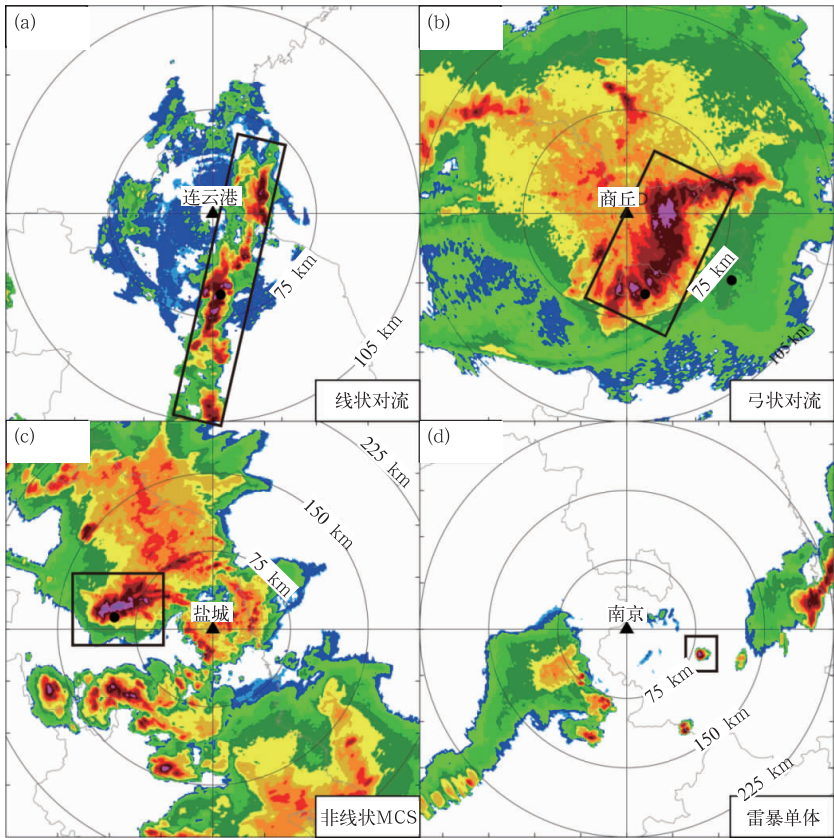


图 4 江淮区域引起极端大风的对流系统成熟期雷达反射率特征
(黑色方框内为引起大风的系统)

(a)线状对流系统,(b)弓状回波系统,(c,d)其他类型对流系统

Fig. 4 Radar reflectivity features of mature convective system inducing extreme gale
(The black rectangle is where the convective system is located)

(a) linear convective system, (b) bow echo, (c) and (d) other convective systems like super cell and individual thunderstorm

的记录,引起极端大风的系统有 17 个。按照上面的分类,得到线状对流共 6 次,占 35.3%;弓状回波有 5 次,占 29.4%;其他类型系统有 6 次,占 35.3%。

对 4 年中发生在江淮区域的所有的弓状回波进行统计分析。该区域的弓状回波中有 2 次过程没有产生极端大风,加上 5 次产生极端大风的过程,共有 7 次弓状回波记录。7 次过程成熟期的结构如图 5 所示,其中图 5c 和 5e 两次过程没有出现极端大风。

参照 Klimowski 等(2004)的分类,从回波形态上看,发生在江淮区域的弓状回波有典型弓状回波 BE 型(图 5a 和 5c)、弓状回波复合体 BEC 型(图 5b)以及飚线弓状 SLBE 型(图 5d~5g),典型的弓状回波类型的尺寸在 100 km 左右,和美国的统计结果类似。弓状回波复合体类型中可以看到有多个对流胞镶嵌在弓状回波中,其中有对流胞的回波强度超过了 65 dBz,SLBE 类型的弓状回波尺寸在 150~250

km,比美国的统计结果尺寸略小,一条飚线中可能带有一个(图 5d 和 5e)或多个弓状回波(图 5f 和 5g)。

图 6 为各类型所占百分比,可以看出江淮区域发生的弓状回波有 57.1%为 SLBE 型,有 28.6%为 BE 型,其他为 BEC 型,弓状回波发生时均伴有 7 级

以上的灾害性雷暴大风出现,出现极端大风的概率为 71.4%,一次 SLBE 型和一次 BE 型没有产生极端大风。图 7 为 7 次弓状回波过程移动路径,可以看到弓状回波的发展路径与前面分析得到的极端大风出现的路径有很好的对应关系,间接证实了弓状回波是产生极端大风的主要系统之一。

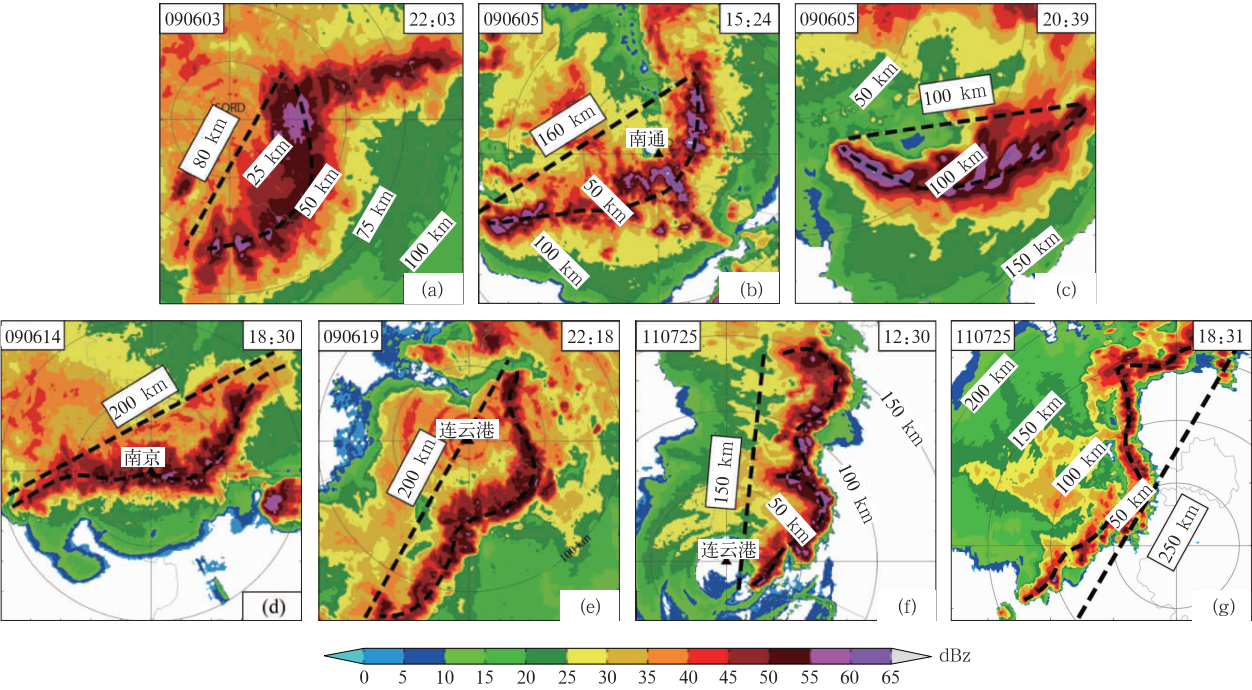


图 5 2009—2012 年 6—8 月江淮区域弓状回波成熟期个例回波特征图

(a)2009 年 6 月 3 日(个例 1),(b)2009 年 6 月 5 日(个例 2),(c)2009 年 6 月 5 日(个例 3),(d)2009 年 6 月 14 日(个例 4),(e)2009 年 6 月 19 日(个例 5),(f)2011 年 7 月 25 日(个例 6),(g)2011 年 7 月 25 日(个例 7)

Fig. 5 Reflectivity feature of mature bow echoes from June to August 2009—2012
(a) 3 June 2009 (case 1), (b) 5 June 2009 (case 2), (c) case 3 is same as case 2, but for different period, (d) 14 June 2009 (case 4), (e) 19 June 2009 (case 5), (f) 25 July 2011 (case 6) and (g) case 7 is same as case 6, but for different period

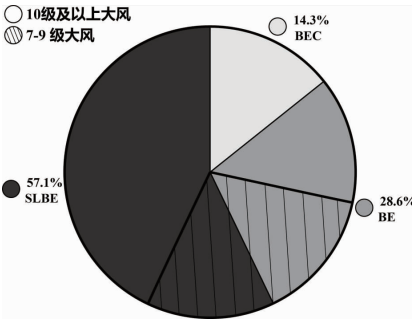


图 6 弓状回波类型比例
(无斜线区域出现极端大风,斜线区域出现 7~9 级灾害性雷暴大风)

Fig. 6 Pie proportion of different bow echoes
(The area with oblique line is winds within wind scale 7—9 while the rest area represents extreme winds)

4 弓状回波的发生环境分析

为了更清楚地了解弓状回波发生的环境场特征,从再分析资料中提取了弓状回波发生前500 hPa的环流场进行分析(图 8),并结合探空资料得到了弓状回波发生前环境特定参数的信息(表 1)。

7 次弓状回波过程发生在 5 天中,2009 年 6 月 5 日有两次过程,2011 年 7 月 25 日有两次过程,5 天中 4 天存在东北冷涡(图 8a~8c 和 8e),只有 2009 年 6 月 19 日没有东北冷涡特征,仅存在短波槽(图 8d)。在有东北冷涡的 4 天中,2011 年 7 月 25 日的形势(图 8e)与其他 3 天(图 8a~8c)略有不

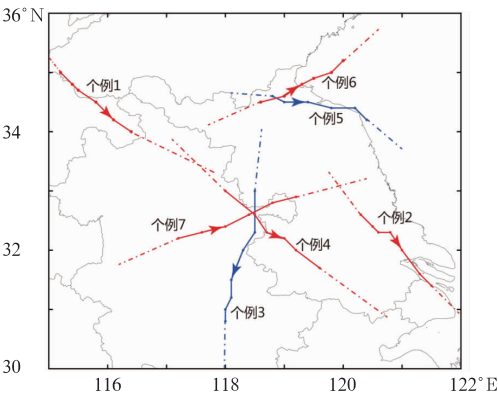


图 7 江淮区域 7 次弓状回波路径图
(实线部分为有弓状出现过程,虚线部分为其发展和消散阶段,红色为有极端大风出现的个例,蓝色为只有 7 级以上大风出现的个例,箭头方向代表系统移动方向)

Fig. 7 The moving paths of 7 bow echoes in the Jianghuai Region

(The solid line is the mature period while the dashed line means the forming and dissipating stage. The red represents extreme wind while the blue one indicates winds above 7 levels of gales. The arrow is the moving direction of the rainstorm)

同,冷涡强度较弱,且影响江淮区域的系统为槽前的西南气流,与其他 3 天的强西北气流有差异。再结合 7 次弓状回波过程的环境参数表可以看出 7 次弓状回波过程发生时 $CAPE$ 值基本都超过 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,有 3 次过程达到了 $2000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上。6 次过程的 $DCAPE$ 值超过 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 5 次过程都有极端大风出现,低于 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 2 次过程只有 7 级以上的大风出现。 $1000\sim700\text{ hPa}$ 的存在较强风切变,其值约为 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1)。6 月发生的过程整层可降水量基本都较低,属于较干的环境,7 月则为较湿的环境。总的来说,东北冷涡对弓状回波的形成有一定的影响, $DCAPE$ 值的大小对弓状回波产生的灾害性雷暴大风的等级有一定的判断作用。

图 9 展示了弓状回波经过温度变化曲线。可以看出除了发生在 2009 年 6 月 19 日的个例 5(图 9d),温度变化只有 2°C ,其他个例温度的变化都超过了 10°C ,这表明多数情形下,弓状回波会在地面形成强冷池。

表 1 弓状回波过程发生前环境参数值
Table 1 Values of environment parameters before bow echoes

个例	成熟时间	$CAPE$ $/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$DCAPE$ $/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	1000~700 hPa 风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	可降水量/mm
1	2009 年 6 月 3 日 22 时	1179	1217	10.9	22.7
2	2009 年 6 月 5 日 15 时	1315	1131	15.5	25.4
3	2009 年 6 月 5 日 20 时	1005	1065.1	10.7	27.1
4	2009 年 6 月 14 日 18 时	3260	1397	10.5	28.1
5	2009 年 6 月 19 日 22 时	1132	720	11.6	57.4
6	2011 年 7 月 25 日 12 时	2503	1242	10.8	54.5
7	2011 年 7 月 25 日 18 时	2100	1233	11.3	55.1
平均		1780	1087	11.6	38.6

为了进一步了解弓状回波发生时的环境特征,将其发生时的主要环境参数与其他之前定义的两类系统进行对比分析。图 10 是引起极端大风 3 种形态的 500 hPa 环流,表 2 分别为区域内不同形态的对流参数平均值。

表 2 中平均 $CAPE$ 值为其他类型系统最大,属于强对流不稳定、线状对流和弓状系统则在中等对流不稳定条件下形成,即形成引起极端大风的其他类型系统的热力条件要强于引起极端大风的线状对流系统和弓状系统。弓状系统的 $DCAPE$ 平均值最大,平均垂直风切变也最大。图 11 为从 FNL 资

料中提取的系统发生前离探空站最近的点的各参数信息,分布情况与区域平均结果类似,其他类型的系统 $CAPE$ 值都较大。引起极端灾害性雷暴大风的弓状系统发生在较干的环境中,从 500 hPa 平均场中可以看到发生线状和弓状系统时江淮区域都处于槽后西北气流控制,但弓状系统有冷涡存在,全风速大,温度低,表明产生弓状的天气强迫要比线状的更强,即在干环境、强天气强迫(如东北冷涡存在,500 hPa 温度场低,风场全风速大),槽后西北气流控制下易产生弓状系统(图 10)。

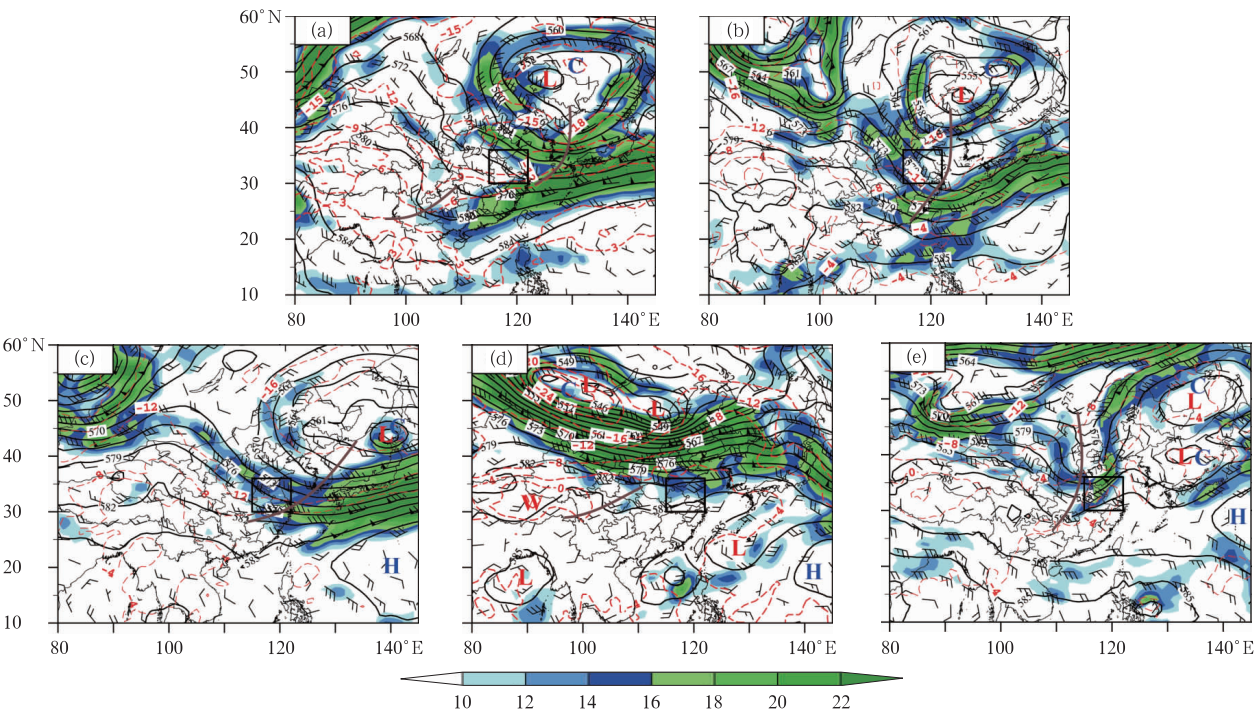


图 8 弓状回波发生前 500 hPa 位势高度场和温度场特征
(填色为 500 hPa 全风速)

(a)2009 年 6 月 3 日 14 时,(b)2009 年 6 月 5 日 08 时,(c)2009 年 6 月 14 日 08 时,
(d)2009 年 6 月 19 日 14 时,(e)2011 年 7 月 25 日 08 时

Fig. 8 The geopotential height and temperature at 500 hPa before bow echoes
(The shadow is the wind speed at 500 hPa)

(a) 14:00 BT 3 June 2009, (b) 08:00 BT 5 June 2009, (c) 08:00 BT 14 June 2009,
(d) 14:00 BT 19 June 2009 and (e) 08:00 BT 25 July 2011

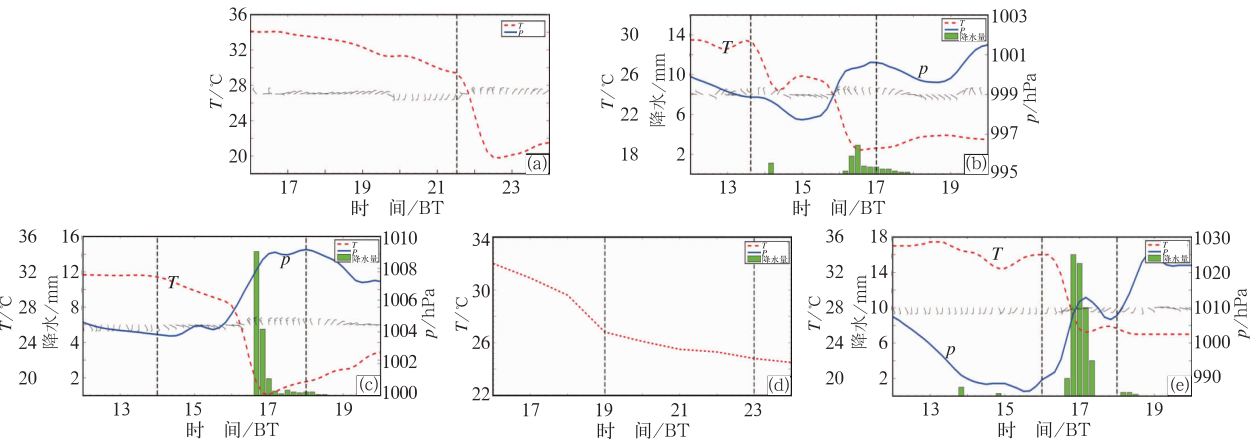


图 9 系统经过站点气象要素时间变化序列
(红色虚线为温度;蓝色实线为气压;柱形为降水,单位:mm)

(a)个例 1,(b)个例 2,(c)个例 4,(d)个例 5,(e)个例 7

Fig. 9 Time series of surface temperature (red dashed lin) and pressure (solid blue line)
(The bar represents rainfall, unit: mm)

表 2 3 种形态 FNL 再分析资料区域平均各参数值

Table 2 The mean parameter values of three types of convective systems

	CAPE /J · kg ⁻¹	DCAPE /J · kg ⁻¹	1000~700 hPa 风速 /m · s ⁻¹	1000~500 hPa 风速 /m · s ⁻¹
弓状回波(5, 29.6%)	856	1247	11.6	13.4
线状对流(6, 35.2%)	704	1022	8.5	13.1
其他(6, 35.2%)	1354	1107	7.8	10.2

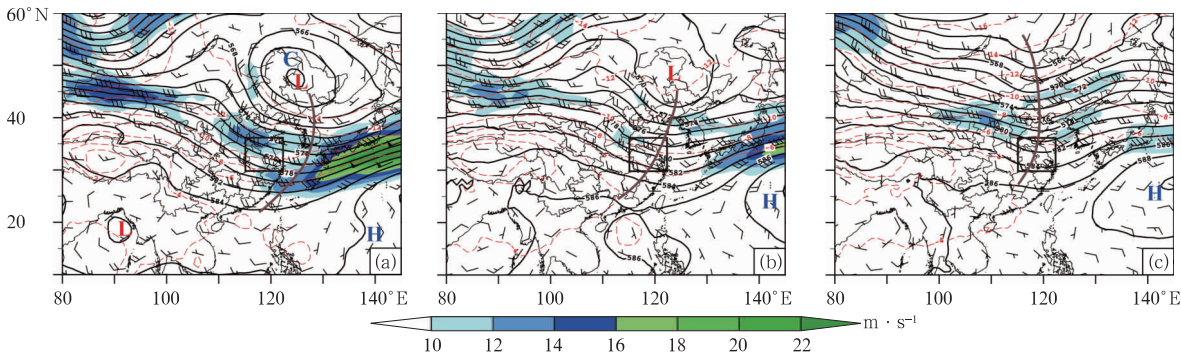


图 10 引起极端大风的 3 种弓状回波 500 hPa 环流

(a) 弓状回波类型, (b) 线状系统类型, (c) 其他类型

Fig. 10 500 hPa circulations of 3 kinds of bow echoes inducing extreme gales

(a) bow echo, (b) linear system and (c) other convective system

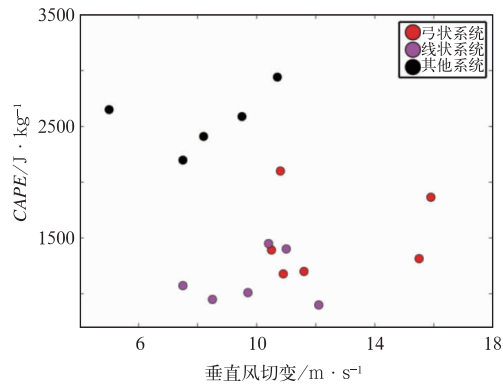


图 11 FNL 再分析资料提取系统发生前

离探空站点最近的格点 1000~700 hPa

垂直风切变与 CAPE 关系图

(红色圆圈为弓状系统, 紫色圆圈为线状

系统, 黑色圆圈为其他系统)

Fig. 11 Correlation of CAPE and 1000—700 hPa

vertical wind shear of the nearest grids

extracted from FNL reanalysis

(Red circle represents bow echo, the purple represents

linear system, while the black represents others)

合高时空分辨的雷达资料,分析了 2009—2012 年江淮流域灾害性大风时空分布特征,并深入分析了其中弓状回波的时空分布特征,以及形成此类天气的环境特征,得到了如下结论:

(1) 灾害性雷暴大风发生的日变化较为明显,主要是在 17—20 时。极端大风出现的时间分布和灾害性雷暴大风类似。在江苏西北部、江苏东北部、安徽中部、江苏中东部、上海部分地区、江苏南部与浙江交界处、安徽南部与浙江交界处发生灾害性雷暴大风的频率较高。极端大风发生的区域可分为两个路径和一个地域:从安徽西北部到江苏东南部一条路径,从山东东南部到江苏的西南部为另一路径,另外一个地域为安徽南部的两个山地之间的平原地区。

(2) 2009—2012 年 6—8 月引起江淮区域出现极端大风的系统被分为 3 类,线状对流系统、弓状对流系统以及其他类型对流系统,其中其他类型对流系统中包含非线性状的对流复合体以及普通对流单体和超级单体。线状对流系统占 35.2%,弓状对流系统占 29.6%,其他类型对流系统占 35.2%。

(3) 2009—2012 年发生在江淮区域的弓状回波过程分类情况与 Klimowski 等(2004)的结果类似,典型的弓状回波类型的尺寸在 100 km 左右,

5 结论与展望

本文统计利用地面、探空、FNL 再分析资料,结

SLBE 类型的弓状回波尺寸在 150~250 km,且我国的 SLBE 型占的比例最多。通过对弓状回波环境的分析和 3 种类型的天气形势的对比得到弓状对流系统出现的环境是 3 种形态中最干的,线状和弓状对流系统主要发生在槽后西北气流控制下,当槽后西北气流强(出现东北冷涡),冷空气输送强时,可形成弓状对流系统,弓状对流系统的平均 *DCAPE* 和风切变值最大,*DCAPE* 值的大小对产生的灾害性雷暴大风等级有一定的指导意义。

本文的部分结论通过 FNL 再分析资料得到。此类再分析场分析 14 和 02 时资料缺少探空观测,主要依靠同化分析 GPS 水汽延迟以及极轨气象卫星垂直探测器微波通道资料给出温湿廓线,低层的温度和露点可能会有误差。另外,这两个时刻风场主要依据模式预报和卫星的云导风,大气低层风场也会有一定的误差。鉴于使用资料的局限性,本文目前只是提供一个粗略的分析结果,将来会使用更高精度的再分析场进行深入的灾害性大风形成环境和机理分析。

参考文献

陈明轩,王迎春. 2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飇线过程发展维持的数值模拟. 气象学报, 70(3): 371-386.

何志强,卢新平,王丙兰. 2014. 首都机场雷暴大风的初步研究. 气象, 40(11): 1408-1413.

梁建宇,孙建华. 2012. 2009 年 6 月一次飇线过程灾害性大风的形成机制. 大气科学, 36(2): 316-336.

廖晓农. 2009. 北京雷暴大风日环境特征分析. 气候与环境研究, 14(1): 54-62.

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. 气象, 35(9): 18-28.

秦大河. 2008. 影响我国的主要气象灾害及其发展态势. 中国应急救援, 16(增刊): 4-6.

秦丽,李耀东,高守亭. 2006. 北京地区雷暴大风的天气—气候学特征研究. 气候与环境研究, 11(6): 754-762.

曲晓波,王捷建,杨晓霞,等. 2010. 2009 年 6 月淮河中下游三次飇线过程的对比分析. 气象, 36(7): 151-159.

孙建华,郑淋淋,赵思雄. 2014. 水汽含量对飇线组织结构和强度影响的数值试验. 大气科学, 38(4): 742-755.

王秀明,俞小鼎,周小刚,等. 2012. “6. 3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析. 高原气象, 31(2): 504-514.

王秀明,周小刚,俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. 气象学报, 71(5): 839-852.

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. 气象, 35(5): 91-96.

杨晓霞,胡顺起,姜鹏,等. 2014. 雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究. 高原气象, 33(4): 1057-1068.

余蓉,张小玲. 2011. 我国东部降水和对流天气年代际变化特征分析. 中国气象学会. 第 28 届中国气象学会年会论文集.

钟利华,曾鹏,李勇,等. 2011. 广西雷暴大风环流特征和物理量诊断分析. 气象, 37(1): 59-65.

Atkins N T, Arnott J M, Przybylinski R W, et al. 2004. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part 1: Single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 derecho. Mon Wea Rev, 132(9): 2224-2242.

Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. Mon Wea Rev, 133(8): 2275-2295.

Davis C, Atkins N T, Bartels D, et al. 2004. The bow echo and MCV experiment: Observations and opportunities. Bull Amer Meteor Soc, 85(8): 1075-1093.

Emanuel K A. 1994. Atmospheric Convection. New York: Oxford Univ Press.

Fujita T T. 1978. Manual of downburst identification for project Nimrod. Satellite and Mesometeorology Research Paper No. 156, Dept of Geophysical Sciences, University of Chicago, 104.

Gallus 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. Wea Forecasting, 23(1): 101-113.

Johnson R H, Bresch J F. 1991. Diagnosed characteristics of precipitation systems over Taiwan during the May-June 1987 TAMEX. Mon Wea Rev, 119(11): 2540-2557.

Kalnay E, Coauthors. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471.

Kelly D L, Doswell C A. 1985. Climatology of nontornadic severe thunderstorm events in the United States. Mon Wea Rev, 113(11): 1997-2014.

Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J. 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes. Wea Forecasting, 19(4): 727-734.

Saha S, co authors. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull Amer Meteor Soc, 91(8): 1015-1057.

Wakimoto R M, Murphey H V, Davis C A, et al. 2006. High winds generated by bow echoes. Part II: The relationship between the mesovortices and damaging straight-line winds. Mon Wea Rev, 134(10): 2813-2829.

Xu X, Xue M, Wang Y. 2015a. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over central US: Analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation. Mon Wea Rev, accepted.

Xu X, Xue M, Wang Y. 2015b. The genesis of mesovortices within a real data simulation of a bow echo system. J Atmos Sci, accepted.