

北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析*

何 娜^{1,2} 丁青兰¹ 俞小鼎³ 付宗钰¹ 周 璇¹ 刘 璐¹ 李 桑¹ 柳 克⁴
HE Na^{1,2} DING Qinglan¹ YU Xiaoding³ FU Zongyu¹ ZHOU Xuan¹ LIU Lu¹ LI Sang¹ LIU Ke⁴

1. 北京市气象台, 北京, 100089

2. 北京城市气象研究院, 北京, 100089

3. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

4. 中国民航华北空管局气象中心, 北京, 100621

1. *Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089, China*

2. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

3. *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China*

4. *Meteorological Center, North China Aviation Administration, Beijing 100621, China*

2019-06-28 收稿, 2019-11-06 改回.

何娜, 丁青兰, 俞小鼎, 付宗钰, 周璇, 刘璐, 李桑, 柳克. 2020. 北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析. 气象学报, 78(2): 250-259

He Na, Ding Qinglan, Yu Xiaoding, Fu Zongyu, Zhou Xuan, Liu Lu, Li Sang, Liu Ke. 2020. Statistical analysis of thunderstorm gust front characteristics in Beijing and surrounding areas. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(2):250-259

Abstract Gust fronts are a key element in the organization of convection initiation, yet comprehensive statistical knowledge of their typical characteristics is still not sufficient. To help alleviate this situation, the Doppler radar data in Beijing and observations of automatic weather stations in Beijing, Hebei, and Tianjin from May to September during 2006–2015 are used to analyze characteristics of gust front cases in Beijing and surrounding areas. Results indicate that 232 out of the 346 gust front cases triggered the formation of thunderstorms. The storm-triggering cases account for 67% of the total. Gust fronts show a strong potential to trigger thunderstorms. The number of days with gust front in June, July, and August accounts for 85% of the total number of days. The gust fronts occur mainly from afternoon to evening (from 12:00 to 21:00 BT), and last for about 0.5 to 3.0 h. Most gust front cases occur to the southeast of Beijing, followed by that to the east and northeast, and the least occur to north, west and northwest. 48% of the parent thunderstorms that produce gust fronts are isolated thunderstorms (including isolated thunderstorms and super-cell storms), 31% are thunderstorm clusters, and 21% are squall lines. 97% of parent thunderstorms have reflectivity above 50 dBz and the gust fronts are characterized on Doppler radar as thin lines of enhanced reflectivity between 10 and 25 dBz. 91% of the gust fronts move with the speed between 10 to 60 km/h. The maximum distance between gust fronts and their parent storms is between 1 and 60 km for 84% of the gust storms. After the parent storms decay with the reflectivity below 30 dBz, 80% of the gust fronts can maintain for no longer than 2 h. Comparing with the eight directions of compass, most of the parent thunderstorms move to the southeast. The relationship between gust front and parent storm moving directions can be classified into seven types: Same, opposite, perpendicular, in obtuse or acute angle, arc diffusion of gust front and stationary parent storm. The type of same moving direction for gust front and parent storm accounts for 32% of the total and is the largest among the above seven types, followed by the types of gust front arc diffusion and stationary parent storm, both of which account for 17% of the total, respectively; the type of opposite moving directions for gust

* 资助课题: 国家自然科学基金(41575050)、国家留学基金(留金项 [2018]10012)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-002)、北京地区局地突发性对流临近数值预报关键技术研发及示范应用项目(Z171100004417008)。

作者简介: 何娜, 主要从事中尺度天气系统诊断及客观预报方法研究。E-mail: hena0105@163.com

通信作者: 俞小鼎, 主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究。E-mail: xdyu1962@126.com

front and parent thunderstorm is the least, which only accounts for 3% of the total. The statistical results show that gust fronts passing by automatic weather stations are often accompanied with increasing wind speed, decreasing temperature, and rising relative humidity and pressure.

Key words Gust front, Statistics, Doppler radar, Thunderstorm triggering, Nowcasting

摘 要 为全面和系统研究北京及周边地区阵风锋各方面特征,使用2006—2015年暖季(5—9月)北京多普勒雷达探测资料及北京、河北、天津自动气象站观测资料对北京及周边地区的阵风锋过程进行综合统计分析。结果表明,346次阵风锋过程有232次触发了对流,占总数的67%,表明阵风锋对雷暴具有较强的抬升触发能力。阵风锋在6—8月出现的日数占5—9月阵风锋总日数的85%;出现的时段主要是午后至傍晚(12—21时,北京时),维持时间0.5—3 h;阵风锋在北京东南方向生成的数量最多,且触发对流的次数也最多;其次为偏东和东北方向;偏南和西南方向生成阵风锋数量居中,而偏北、偏西和西北地区阵风锋个例相对较少,触发对流的比例也相对较低。产生阵风锋的母风暴中48%为孤立雷暴(包括孤立多单体和超级单体风暴),31%为雷暴群,21%为飚线;97%的母风暴最强回波在50 dBz以上,阵风锋的回波强度为10—25 dBz。91%的阵风锋移动速度集中在10—60 km/h,84%的阵风锋与母风暴的最大距离为1—60 km;在母风暴回波强度减弱到30 dBz以下时,80%的阵风锋能够继续维持的时间不超过2 h。阵风锋母风暴向东南方向移动的个例最多,从阵风锋和母风暴移动方向的关系来看,阵风锋与母风暴移向一致的情况占比最高,为32%,其次为母风暴无移动及阵风锋弧形扩散情况,各占17%;阵风锋与母风暴移向相反情况所占比例最低,只有3%。最后统计了阵风锋经过地面自动气象站时,自动观测量的变化情况。结果显示,阵风锋在经过地面自动气象站时会造成风速增大、温度降低、相对湿度增大、气压升高。

关键词 阵风锋,统计,多普勒雷达,雷暴触发,临近预报

中图法分类号 P446

1 引 言

北京地区地形复杂,对流的新生、加强和减弱是短时临近预报的重点也是难点。一场局地、突发性对流天气可能导致整个城市的交通瘫痪。夏季对流新生常常会引起局地的短时强降水、大风、冰雹等灾害性天气。雷暴出流边界或外流边界,也称阵风锋,是最常见的对流触发条件(Purdum, et al, 1973, 1976, 1982; Wilson, et al, 1986, 1993, 1997, 2006; 俞小鼎等, 2012),尤其是暖季雷暴多发期。另外,阵风锋与对流系统的加强和减弱也有密切关系(Wilson, et al, 1993, 1997; 俞小鼎等, 2012)。

对流风暴中由降水导致的下沉气流将环境较干的空气夹卷进去,致使降水粒子因蒸发或升华剧烈降温,进而导致雷暴内下沉气流温度远低于环境温度,落地时形成冷池,冷池向四周流出的强烈出流的前缘就是阵风锋(张培昌等, 2001)。阵风锋本身会导致大风等灾害性天气,而阵风锋触发的对流有时也会带来恶劣天气,具有强致灾性。因此,阵风锋的研究对防灾、减灾具有重要意义。Wilson等(1986)对1984年5—8月科罗拉多州山区的653个对流风暴做了统计分析,发现其中79%是雷达观测到的边界层辐合线(在雷达回波上体现为弱的窄带回波)触发产生,71%的个例中辐合线交汇触发了

雷暴或加强了已经存在的风暴。Klingbein等(1987)研究表明,阵风锋过境会有明显的地面辐散。Wilson等(1993, 1997, 1998)指出,雷暴生成后,可否加强或维持其强度,首先与低层的风垂直切变相对于雷暴出流边界的方向有关。当大气边界层的风向与雷暴出流边界(或其他类型辐合线)移动方向相反,且边界层以上的风与雷暴出流边界移动方向相同时,对流能够容易地垂直向上发展,有利于雷暴的加强和维持;而若大气边界层的风向与雷暴出流边界(或其他类型辐合线)移动方向相同,且边界层以上的风与雷暴出流边界移动方向相反时,雷暴上升气流会出现明显倾斜,不利于其加强和维持。根据Wilson等(2006)对美国雷暴触发情况的统计,就平坦地区而言,排除地形触发,大约50%的雷暴是由靠近地面的边界层辐合线触发的地基雷暴,另外50%左右的雷暴是在大气边界层以上触发的,属于高架雷暴。地面附近的边界层辐合线包括与锋面或干线相联系的辐合线、雷暴的出流边界(阵风锋)、海陆风环流形成的辐合线以及地形造成的辐合线等。

由于阵风锋的回波强度较弱,常规的雷达一般很难探测到。在20世纪90年代之前,中国预报员即使在工作中能观测到阵风锋,细致的分析也并不多见。随着中国新一代天气雷达的逐步布设,更多

观测资料可供研究使用, 对阵风锋的研究逐步增多。刘勇等(2007)研究表明, 阵风锋的强度取决于雷暴的强度, 雷暴群产生的阵风锋生命期更长。韩雷等(2009)对京津地区的统计表明, 大约 75% 的雷暴生命期不超过 30 min, 体积小于 400 km³。这与 Wilson 等(1986)对美国科罗拉多州雷暴的统计结果类似。卢焕珍等(2012)对 2004—2009 年天津 50 次渤海湾海风锋导致雷暴的研究表明, 有 30% 的雷暴是由海风锋与阵风锋相遇造成的。俞小鼎等(2012)指出, 阵风锋等边界层辐合线是雷暴生成的重要触发机制。席宝珠等(2015)总结了近些年中国学者对阵风锋开展的相关研究, 阐明了阵风锋的空间结构、类型及其特征, 探讨了阵风锋窄带回波的形成机制, 提出了阵风锋的主观识别方法。孙敏等(2015)利用常规气象观测资料、雷达探测资料和加密自动气象站观测资料, 对 2013 年 9 月 13 日上海地区的一次以后向传播为主要特征、伴有强降水和大风的强对流过程进行了分析, 并采用双多普勒雷达风场反演等技术, 对其形成的环境条件及后向传播机制进行了研究, 结果显示阵风锋在上述强对流过程中起到十分关键的作用。陶岚等(2016)系统地研究了上海地区的移动性阵风锋, 将移动型雷暴产生的阵风锋分为两类: 一类出现在雷暴发展、成熟阶段, 阵风锋通常与雷暴保持一定的距离同向运动, 出现阵风锋的雷暴主体通常伴有高悬的后侧入流急流, 生命期超过 2 h; 另一类出现在雷暴的减弱、消亡阶段, 出现后即逐渐远离雷暴, 出现阵风锋的雷暴主体通常伴有从雷暴系统后侧倾斜向下正好到达雷暴前侧阵风锋处的后侧入流急流。徐芬等(2015)以江苏沿江的新一代天气雷达探测资料为主, 系统普查了雷达反射率因子数据中的阵

风锋总体特征和局部特征, 研究了阵风锋弧长与移速的关系, 统计了 3 种窄带回波分布特征和径向回波特征, 在此基础上设计了阵风锋自动识别算法。徐芬等(2016)改进了之前的设计算法, 设计了动态权重函数组合多组得分值, 有效地识别了阵风锋回波。虽然中外学者已经开展了不少阵风锋研究工作(Marsham, et al, 2006a, 2006b; Morcrette, et al, 2006; Browning, et al, 2007; Emerson, 2011; Wulfmeyer, et al, 2011; Khodayar, et al, 2013; 郑媛媛等, 2004; 夏文梅等, 2009; 陈明轩等, 2011, 2012a, 2012b, 2013; 陈双等, 2011; 孙继松等, 2013; 肖现等, 2013, 2015; 张文龙等, 2014; 刘莲等, 2015; 郑丽娜等, 2016), 认识到阵风锋在雷暴生成、发展和减弱过程中发挥着重要作用, 但较为全面和系统的阵风锋各方面特征的综合统计工作仍然较少。

拟基于 2006—2015 年 10 a 北京地区的多普勒雷达探测资料, 结合京津冀加密自动气象站观测资料对北京及周边地区阵风锋各方面特征进行统计分析, 以期全面认识产生阵风锋的母风暴及阵风锋的各项特征指标, 为阵风锋识别、探测和临近预报提供参考。

2 阵风锋结构及研究使用的资料和方法

2.1 阵风锋结构

雷暴中的下沉气流到达地面并进行水平传播时形成了阵风锋(图 1 中黑色粗实线)。由于下沉冷空气内部的出流速度较出流边界的移动速度快, 在适当条件下, 气流与它的传播面之间的摩擦会使气流的最低层受到阻碍。该层内的气流向下偏转, 产生“回流”。而摩擦层上面运动得更快, 突出在传播面边界的前部形成了“出流鼻”。继续向前运动

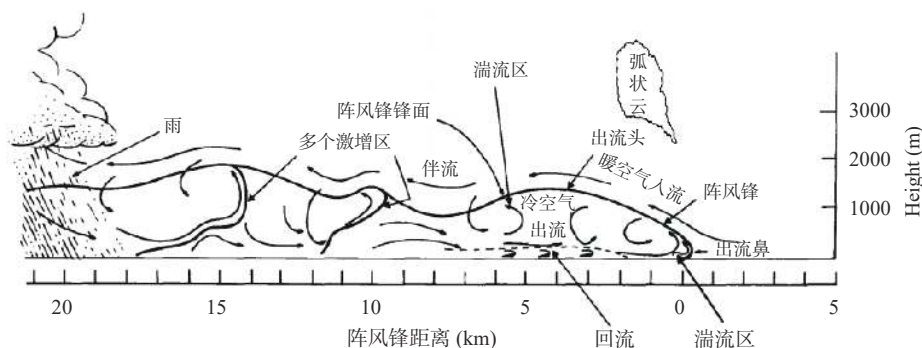


图 1 阵风锋结构模型示意 (Goff, 1976)

Fig. 1 Schematic diagram of the wind front structure model (Goff, 1976)

的气流遇到环境风阻碍被迫上升形成“出流头”，出流头后部在冷、暖交界面上部，由于出流抬升后的扰动形成了“伴流”。冷的密度大的出流侵入到暖的密度相对较小的空气中，将其抬升到阵风锋之上，抬升的暖湿空气经常会形成架云或滚轴云(Kling, et al, 1987)，有时会根据其在卫星云图上的形态称为弧状云。

在雷达回波图中，边界层辐合线(包括冷锋、干线、雷暴阵风锋、海风锋、地形辐合线等)常常表现为窄带回波。其中雷暴阵风锋通常表现为雷暴强回波外围的一条弧状或线状的弱窄带回波，根据雷暴阵风锋回波自身强度较弱和空间分布呈弧状或线状的特点(图 2a)，在雷达径向速度场(图 2b)中，阵风锋表现为风向或者风速的辐合区(Kling, et al, 1987; 俞小鼎等, 2019)。正如 Wilson等(1994)指出，晴空回波主要由两种机制产生：(1)大气低层中昆虫的后向散射所导致，其产生的晴空回波强度通常为 5—15 dBz；(2)由于大气折射指数脉动，当脉动的尺度约等于入射波长一半时，会产生散射回波，称为“Bragg 散射”，其回波强度为-10—0 dBz。因此，低层大气中昆虫的后向散射是产生低层晴空 0 dBz 以上强度回波的主要原因。

辐合线上昆虫数浓度比周边要高一些，导致辐合线呈窄带回波。窄带回波垂直伸展 1—2 km，所以通常用 0.5°或 1.5°仰角反射率因子图识别边界层辐合线。其中阵风锋在雷达回波图上一一般呈弧形，而且位于雷暴下沉气流导致的冷池前沿。

2.2 资料和方法

采用 2006—2015 年 5—9 月北京多普勒雷达 0.5°和 1.5°仰角回波反射率因子产品和径向速度产品，北京、河北地区逐 5 min 及天津地区逐 10 min 自动气象站观测资料，对北京地区雷达站点半径 175 km 范围内的雷暴阵风锋过程进行主观识别统计，得到北京地区暖季(5—9 月)阵风锋的特征。对雷暴阵风锋的主观识别标准参照席宝珠等(2015)的判别方法：使用雷达强度回波特征确定形态，在低仰角(0.5°和 1.5°)回波图中，出现在强回波(回波强度 ≥ 40 dBz)外围弧状或者线状的弱窄带回波(回波强度 < 30 dBz)，并且该弱窄带回波脱离母风暴；同时利用低仰角雷达径向速度回波特征确定阵风锋的移动，结合阵风锋强径向速度切变的特点，对其进行识别。判别时，窄带回波宽度不超过 3 km，长度 > 10 km，持续时间不少于 15 min(Wilson, et al, 1986)。统计过程中的方位判定是以北京观象台雷达位置为中心点，正北为起始点顺时针方向旋转 360°，划分为偏北(337.5°—22.5°)、西北(22.5°—67.5°)、偏东(67.5°—112.5°)、东南(112.5°—157.5°)、偏南(157.5°—202.5°)、西南(202.5°—247.5°)、偏西(247.5°—292.5°)，西北(292.5°—337.5°)8 个方位。此外，使用阵风锋经过区域中的自动气象站观测资料的风切变或温、压、湿梯度进行辅助判别。雷暴阵风锋统计过程中，只统计与雷暴伴随的阵风锋，雷达观测资料中无明显雷暴产生的边界层辐合线(如海风锋)不计入。

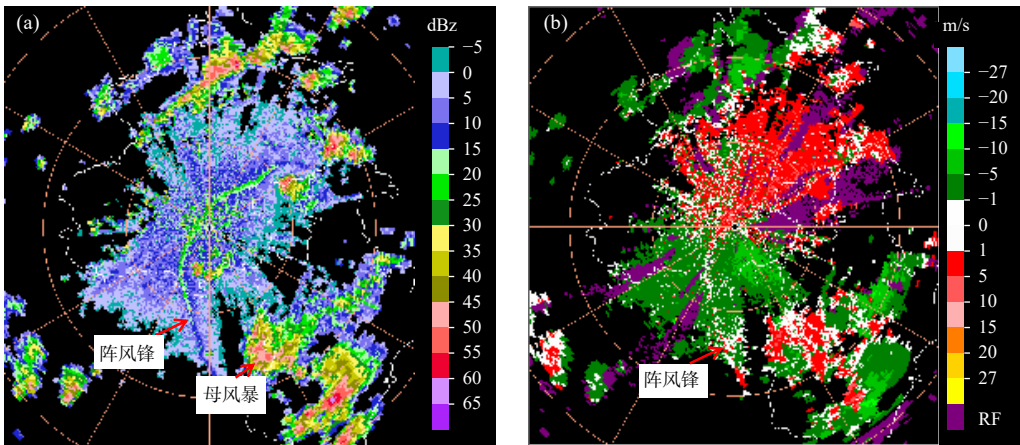


图 2 2015 年 7 月 24 日 15 时 37 分(北京时,下同)北京多普勒雷达 0.5°仰角回波反射率因子(a)和径向速度场(b)

Fig. 2 Radar echo reflectivity factor (a) and radial velocity field (b) at 0.5° elevation observed by Beijing SA Doppler weather radar at 15:37 BT 24 July 2015

3 结果及分析

3.1 阵风锋发生频率的季节和日变化及持续时间分布

经统计,北京及周边地区 2006—2015 年共有 210 个雷暴日(将一天中北京地区雷达站点周围半径 125 km 范围内出现回波强度 ≥ 40 dBz 且持续时间大于 30 min 记为一个雷暴日)出现了阵风锋过程。从出现阵风锋雷暴日频率的月变化来看,6、7、8 月出现阵风锋的雷暴日数分别为 44、63、71 d,占 5—9 月阵风锋总日数的 85%,明显多于 5 和 9 月(均为

16 d)。由于一个雷暴日中可能出现多条阵风锋,在实际统计工作中,按出现的阵风锋个数进行分析,共有 346 个阵风锋过程。其中,232 个阵风锋在移动过程中在其移动前沿或经过的地区触发了回波强度超过 40 dBz 的对流,占阵风锋过程总数的 67%。

从统计(图 3a)可以看出,午后至傍晚是阵风锋高发时段,88% 的阵风锋出现在 12—21 时,与此时段中雷暴出现的频率较高相关(Chen, et al, 2012)。从持续时间(图 3b)来看,阵风锋持续最短为 0.5 h,最长为 7 h,74% 的阵风锋持续 0.5—3 h。

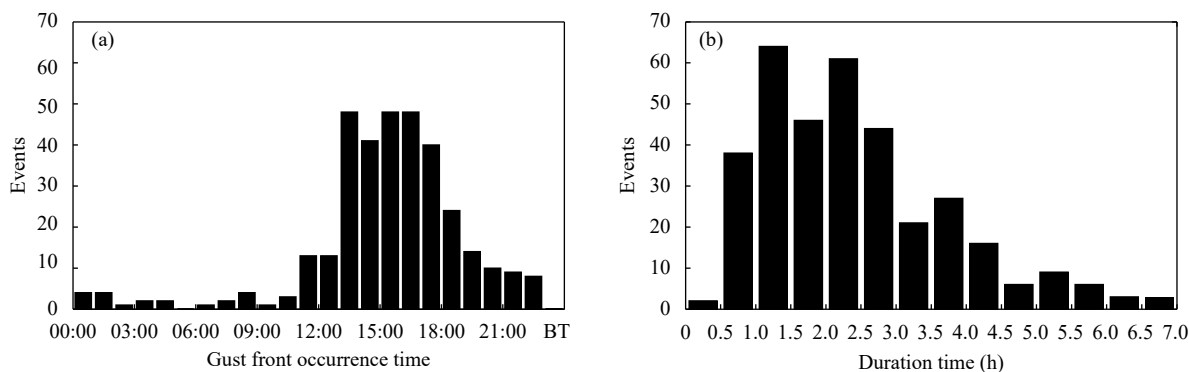


图 3 北京及周边地区暖季阵风锋发生频次的日变化 (a) 及持续时间 (b) 分布
Fig. 3 Characteristics of diurnal variation (a) and duration distribution (b) of gust front frequency in warm season in Beijing and surrounding areas

3.2 阵风锋的空间分布特征及移动方向统计

从阵风锋生成位置(图 4a)和方向(图 4b)可以看出,阵风锋在东南方向生成的数量最多,为

60 次,占总次数的 17%,同时其触发对流的次数也最多(45 次);其次为偏东和东北方向分别为 54 和 52 次,触发对流占阵风锋总数的比例约为 15%。偏

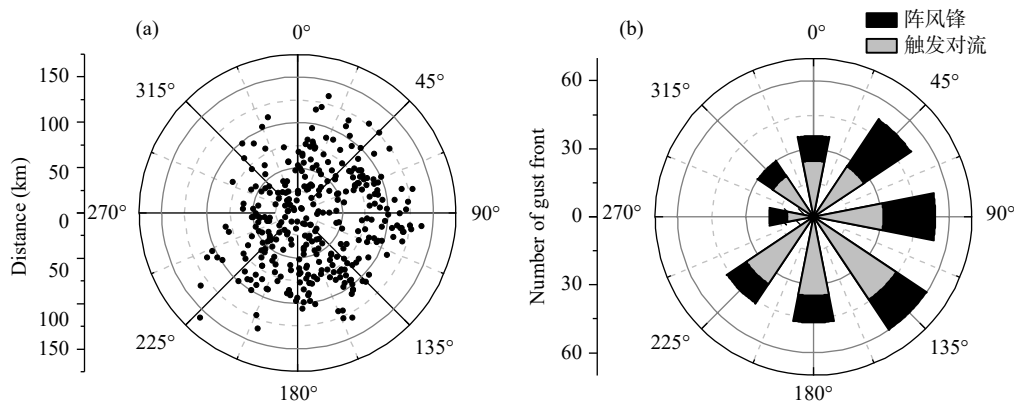


图 4 阵风锋生成方位 (a) 及次数 (b) 的玫瑰图
(黑色柱长代表阵风锋的数量,灰色柱长代表同方向上触发对流新生的阵风锋次数)

Fig. 4 Spatial distribution of gust fronts (a) and the number of gust fronts (b) in eight directions of the compass
(the number of gust fronts is indicated by the length of black bar, and the number of gust fronts that triggered convection in the same direction is indicated by the length of gray bar)

南和西南方向分别为 47 和 46 次。偏北、偏西和西北地区阵风锋个例相对少, 触发对流的比例也相对较低。造成阵风锋空间分布特征重要的原因之一是北京西部、北部山区平均海拔较高, 雷暴一般在西部、北部生成, 向东部、南部平原地区移动并发展加强, 而阵风锋一般是在雷暴发展到一定强度后才产生。因此, 在北京东部、南部地区阵风锋出现的频次较高。这与 Chen 等(2012)统计得到雷暴强度分析结果一致。

3.3 母风暴及阵风锋强度特征

将产生阵风锋的母风雷按形态分为 3 种: 孤立雷暴(含孤立多单体风暴和孤立超级单体)、雷暴群(多个多单体风暴)和飑线(Browning, 1977; 俞小鼎等, 2006, 2012), 文中由于主观统计雷达 PPI, 未区分孤立多单体风暴和孤立超级单体(二者均属于孤立雷暴)。其中, 产生阵风锋的母风暴 48% 为孤立雷暴, 31% 为雷暴群, 21% 为飑线。母风暴强度

(图 5a)最小为 40 dBz, 最大为 70 dBz, 其中 97% 在 50 dBz 以上。阵风锋的回波强度(图 5b)为 5—33 dBz, 其中, 79% 以上阵风锋回波强度分布在 10—25 dBz。

3.4 阵风锋平均速度特征

为统计阵风锋的平均移动速度, 使用雷达反射率回波中 10 个体扫(即 60 min)内阵风锋的移动速度为研究对象。结果(图 6)表明, 移速 20—30 km/h 的阵风锋最多, 占总数的 26%, 91% 的阵风锋移动速度集中在 10—60 km/h, 其中移速最快的阵风锋可达 100 km/h。平均移动速度不低于 50 km/h 的阵风锋中 66% 由下山雷暴产生, 24% 由平原雷暴产生, 其余 10% 由局地新生的雷暴产生。

3.5 阵风锋与母风暴的关系

统计了阵风锋离开母风暴后与母风暴的最大距离, 结果(图 7a)表明 84% 的阵风锋与母风暴的最大距离为 1—60 km, 其中, 27% 的个例为 20—30 km,

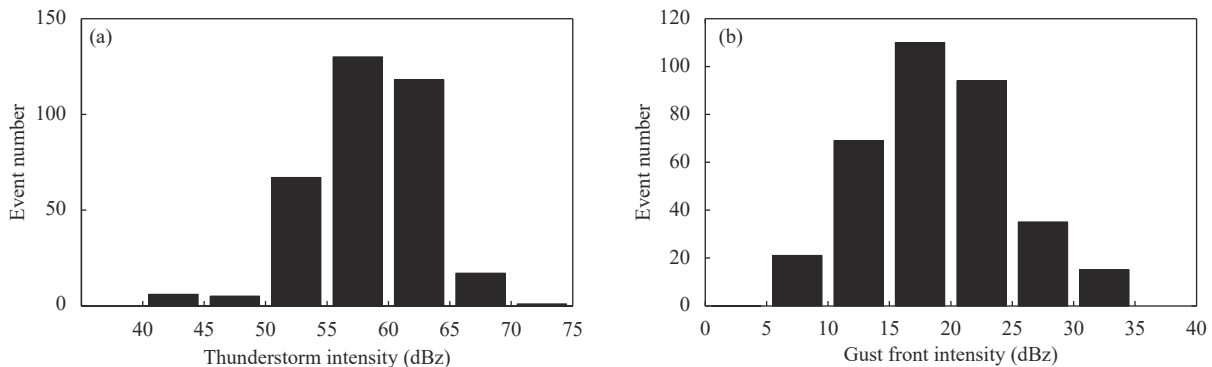


图 5 产生阵风锋母风暴最大回波强度 (a) 及阵风锋回波强度 (b)

Fig. 5 Maximum echo intensity of parent thunderstorms (a) and gust front echo intensity (b)

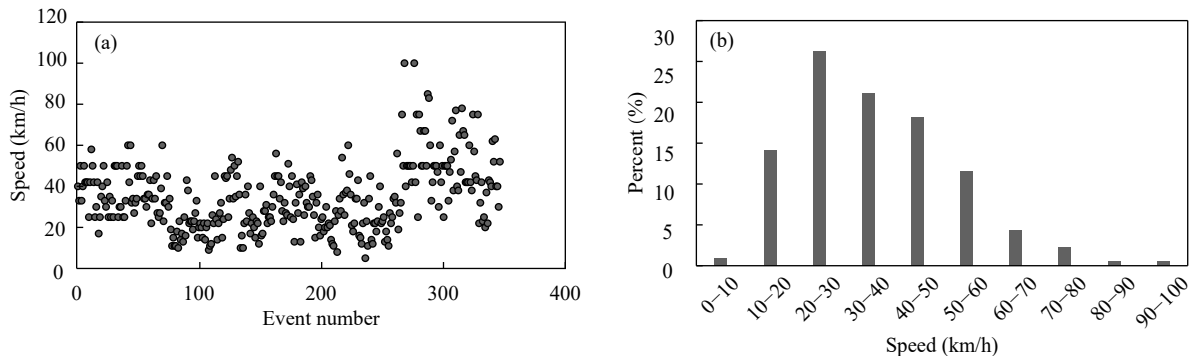


图 6 阵风锋移动速度分布 (a, 横坐标表示阵风锋个例序列) 及速度分布百分比 (b)

Fig. 6 Scatter distribution of the velocity of gust front (a, the horizontal coordinate represents the sequence of the events of the gust front) and their percentages (b)

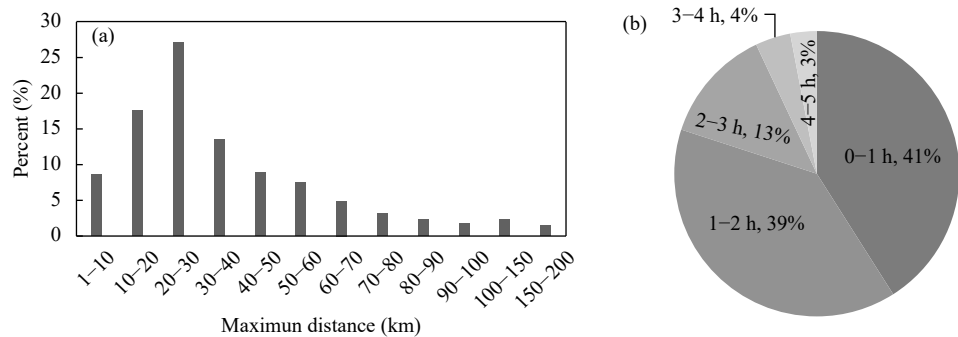


图 7 阵风锋与母风暴的最大距离分布所占百分比 (a) 及母风暴减弱后阵风锋持续时间分布百分比 (b)
Fig. 7 Percentage distribution of the maximum distance between the gust front and the parent storm (a) and percentage distribution of the maintenance time of the gust front after the parent storm attenuates (b)

18% 为 10—20 km, 14% 为 30—40 km。整体来看, 阵风锋与母风暴的最大距离与母风暴和阵风锋的移向、移速关系密切。当母风暴与阵风锋移向、移速基本一致时, 最大距离较小; 反之, 距离则较大。母风暴减弱(强度 < 30 dBz)后, 阵风锋持续时间(图 7b)最长为 5 h。80% 的阵风锋持续时间在 2 h 之内, 母风暴减弱后持续 2 h 以上的阵风锋只占 20%。

从产生阵风锋的母风暴移动方向(表 1)来看, 向东南方向移动的数量最多(78 次), 其次为少动或原地生消型(61 次), 东北方向和偏东方向分别为 46 和 36 次, 向东南、东北和偏东方向移动的母风暴数量要明显多于向西北、西南和偏南方向移动的数量。这可能与北京地区三面环山的特殊地形及城市热岛、城市地表非均匀分布等有关(Chen, et al, 2012), 北京地区雷暴一般在西部山前生成并向东南部平原发展加强, 因此向东南部移动的母风暴数量最多。此外, 从表 1 统计中可以看出多数母风暴

与阵风锋呈同向移动。将阵风锋与母风暴的移动方向分为相同、相反、垂直、呈锐角、呈钝角、母风暴不动或原地生消、阵风锋弧形扩散 7 种情况。其中, 阵风锋与母风暴移向相同所占比例最大, 为 32%; 其次为阵风锋弧形扩散和母体不动或原地生消, 均占 17%; 沿任意一个方向传播的母风暴均可能产生呈弧形扩散的阵风锋; 当母风暴少动时, 其产生的阵风锋可能向任意方向传播, 但相对来说, 向西北方向传播的次数明显较其他方向多; 阵风锋移向与母风暴移向呈锐角或垂直分别占 14% 和 13%; 移向呈钝角占 4%; 移向相反占 3%。

3.6 阵风锋引起的自动气象站气象要素变化

阵风锋过境时可以引起风速增大、气温骤降、气压涌升、相对湿度增大(Wakimoto, 1982)现象。从阵风锋经过区域自动气象站(包括国家级观测站)气象要素变化统计结果看, 风速、温度、气压和相对湿度均发生了变化。分析表明, 阵风锋经过的

表 1 阵风锋和母风暴移向统计
Table 1 Statistics of gust front and parent storm moving directions

母风暴移向	阵风锋移向									总计
	偏北	东北	偏东	东南	偏南	西南	偏西	西北	弧形	
偏北	3	0	1	0	1	0	3	5	6	19
东北	1	8	2	8	0	2	3	12	10	46
偏东	0	1	10	9	2	7	3	1	3	36
东南	0	0	2	36	10	17	4	3	6	78
偏南	0	0	0	0	12	9	2	0	3	26
西南	0	0	1	1	1	15	7	2	3	30
偏西	0	0	0	0	0	0	13	1	4	18
西北	1	0	0	0	0	1	2	19	9	32
少动	2	1	1	5	1	11	8	16	16	61
总计	7	10	17	59	27	62	45	59	60	346

自动气象站观测到的极大阵风风速为4.3—31.2 m/s,其中50%的阵风锋产生的极大阵风风速为9.8—18.9 m/s。阵风锋经过的自动气象站温度有一定程度下降,最小降低1.3℃,最大降低18.7℃,50%的自动气象站温度降幅为3.9—8.1℃。气压上升的幅度为0—5.9 hPa,其中50%的自动气象站气压上升幅度为0.7—2.5 hPa。相对湿度的变化幅度跨度较大,最小的升高1%,最大的升高68%,其中50%的个例相对湿度升高15%—32%。

4 结论和讨论

4.1 结 论

对2006—2015年暖季(5—9月)北京及周边地区346个阵风锋过程,使用北京S波段多普勒雷达反射率因子和径向速度图像产品,结合阵风锋经过时对应时段内的京津冀地面自动气象站风速、温度、湿度、气压观测资料,进行了阵风锋特征综合分析。结论如下:

(1)阵风锋可以用低仰角的雷达反射率因子结合径向速度产品识别。阵风锋是重要的触发雷暴(深厚湿对流)边界层辐合线的一种。由于其辐合和伴随的上升气流通常较强,对于雷暴和深厚湿对流的抬升触发能力强,在统计的346个阵风锋过程中有232个过程触发了对流,占总数的67%。

(2)阵风锋出现时间统计结果显示,6—8月出现日数最多,占阵风锋总日数的85%,5和9月较少;阵风锋具有明显的日变化规律,主要出现在午后至傍晚(12—21时),维持时间一般为0.5—3 h。

(3)北京阵风锋在东南方向生成的数量最多,且触发对流的次数也最多;其次为偏东和东北方向;偏南和西南方向生成阵风锋数量居中,而偏北、偏西和西北地区阵风锋个例相对少,触发对流新生的比例也相对低。造成阵风锋空间分布特征重要的原因之一是北京西部、北部山区平均海拔较高,雷暴一般在西部、北部生成,向东部、南部平原地区移动并发展加强,而阵风锋一般是在雷暴发展到一定强度后才产生,因此,北京东部、南部地区阵风锋出现的频次较高。

(4)从产生阵风锋的母风暴来看,孤立雷暴(包括孤立多单体及超级单体风暴)产生的阵风锋占比最高,为48%;31%的阵风锋由雷暴群产生,21%

为飚线产生;从母风暴强度分析来看,97%的母风暴最强回波在50 dBz以上。

(5)阵风锋回波的最小强度为5 dBz,最大为33 dBz,79%的阵风锋强度为10—25 dBz。91%的阵风锋移动速度集中在10—60 km/h,84%的阵风锋与母风暴的最大距离为1—60 km;在母风暴减弱后,80%的阵风锋持续时间能够超过2 h。

(6)阵风锋母风暴向东南部移动数量明显多于向其他方向移动,且多数母风暴和阵风锋移向相同。阵风锋和母风暴移动方向的关系可以分为同向、反向、移动方向呈锐角、垂直、呈钝角、阵风锋弧形扩散以及母风暴无移动7种类型,阵风锋与母风暴同向移动占比例最高(32%),其次为母风暴无移动及阵风锋弧形扩散,移向相反为最少。

(7)从阵风锋经过的地面自动气象站气象要素变化来看,阵风锋在经过地面自动气象站时会造成风速增大(4.3—31.2 m/s),温度降低(1.3—18.7℃),湿度增大(1%—68%),气压升高(0—5.9 hPa)。

4.2 讨 论

通过对阵风锋的统计分析,得到了很多定量的结论。但由于历史资料中很多观测资料是逐步增加的(如自动气象站),不可避免在分析中会因为资料问题而无法统计更多的信息。在下一阶段的研究中,将不断补充新的资料进行深入的研究。

此外,如何将上述统计结果应用到阵风锋的识别和能否触发对流的预判也是接下来研究中需要重点关注的问题。对于阵风锋能否触发对流的环境场特征的深入分析和讨论将另文进行详细阐述。

目前机器学习可以将大量个例的历史样本进行建模得到概念模型,文中的统计工作为进一步挖掘阵风锋客观分析预报提供了一定量的样本,下一步的工作将通过更多个例的补充,尝试开展阵风锋的客观识别和预判,以期进一步提高对阵风锋识别、探测和临近预报的能力。

致 谢:卞素芬高工对部分个例做了分析,李梓铭工程师绘制了部分图形,特此感谢。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,高峰等. 2011. 基于雷达资料4DVar的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. 气象学报, 69(1): 64-78.
Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis

- of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics. *Acta Meteor Sinica*, 69(1): 64-78 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春. 2012a. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012a. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 371-386 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春, 肖现等. 2012b. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 36(5): 929-944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2012b. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D Cloud model and 4-D variational assimilation on radar data. *Chinese J Atmos Sci*, 36(5): 929-944 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春, 肖现等. 2013. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 569-592 (in Chinese)
- 陈双, 王迎春, 张文龙等. 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. *气象*, 37(7): 802-813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al. 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing area. *Meteor Mon*, 37(7): 802-813 (in Chinese)
- 韩雷, 俞小鼎, 郑永光等. 2009. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征. *科学通报*, 54(11): 1585-1590. Han L, Yu X D, Zheng Y G, et al. 2009. Statistic characteristics of severe convective storm during Warm-Season in the Beijing-Tianjin region and its vicinity. *Chinese Sci Bull*, 54(14): 2493-2498
- 刘莲, 王迎春, 陈明轩. 2015. 京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析. *气象*, 41(12): 1433-1446. Liu L, Wang Y C, Chen M X. 2015. Spatio-temporal evolution characteristics of a squall line in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Meteor Mon*, 41(12): 1433-1446 (in Chinese)
- 刘勇, 王楠, 刘黎平. 2007. 陕西两次阵风锋的多普勒雷达和自动气象站资料分析. *高原气象*, 26(2): 380-387. Liu Y, Wang N, Liu L P. 2007. Analyses of two gust-fronts using Doppler radar and automatic meteorological station data. *Plateau Meteor*, 26(2): 380-387 (in Chinese)
- 卢焕珍, 刘一玮, 刘爱霞等. 2012. 海风锋导致雷暴生成和加强规律研究. *气象*, 38(9): 1078-1086. Lu H Z, Liu Y W, Liu A X, et al. 2012. Study of thunderstorm initiation and intensification rules associated with sea breeze fronts. *Meteor Mon*, 38(9): 1078-1086 (in Chinese)
- 孙继松, 何娜, 郭锐等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制. *大气科学*, 37(1): 137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 137-148 (in Chinese)
- 孙敏, 戴建华, 袁招洪等. 2015. 双多普勒雷达风场反演对一次后向传播雷暴过程的分析. *气象学报*, 73(2): 247-262. Sun M, Dai J H, Yuan Z H, et al. 2015. An analysis of a back-propagating thunderstorm using the three-dimensional wind fields retrieved by the dual-Doppler radar data. *Acta Meteor Sinica*, 73(2): 247-262 (in Chinese)
- 陶岚, 戴建华, 李佰平等. 2016. 上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析. *气象*, 42(10): 1197-1212. Tao L, Dai J H, Li B P, et al. 2016. Characteristics' statistical analysis of gust front generated by moving thunderstorms in Shanghai. *Meteor Mon*, 42(10): 1197-1212 (in Chinese)
- 席宝珠, 俞小鼎, 孙力等. 2015. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法. *气象*, 41(2): 133-142. Xi B Z, Yu X D, Sun L, et al. 2015. Generating mechanism and type of gust front and its subjective identification methods. *Meteor Mon*, 41(2): 133-142 (in Chinese)
- 夏文梅, 慕熙昱, 徐芬等. 2009. 南京地区初夏一次阵风锋过程的分析与识别. *高原气象*, 28(4): 836-845. Xia W M, Mu X Y, Xu F, et al. 2009. Analysis of a gust front process in early summer of Nanjing region. *Plateau Meteor*, 28(4): 836-845 (in Chinese)
- 肖现, 王迎春, 陈明轩等. 2013. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析. *气象学报*, 71(5): 797-816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al. 2013. A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing area with the radar data 4DVar. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 797-816 (in Chinese)
- 肖现, 陈明轩, 高峰等. 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制. *大气科学*, 39(1): 100-124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing. *Chinese J Atmos Sci*, 39(1): 100-124 (in Chinese)
- 徐芬, 杨吉, 夏文梅等. 2015. 雷达强度数据中的阵风锋特征统计和自动识别. *高原气象*, 34(2): 586-595. Xu F, Yang J, Xia W M, et al. 2015. Statistical characteristics and automatic detection of the gust front in radar reflectivity data. *Plateau Meteor*, 34(2): 586-595 (in Chinese)
- 徐芬, 杨吉, 郑媛媛等. 2016. MIGFA 阵风锋识别算法改进与检验. *气象*, 42(1): 44-53. Xu F, Yang J, Zheng Y Y, et al. 2016. Improvement of the MIGFA technique for identifying gust front and its verification. *Meteor Mon*, 42(1): 44-53 (in Chinese)
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 90-91. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Doppler Weather Radar and Applications. Beijing: China Meteorological Press, 90-91 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *气象学报*, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉等. 2019. 雷暴与强对流临近预报. 北京: 气象出版社, 79-83. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2019. Thunderstorms and Strong Convection Nowcasting. Beijing: China Meteorological Press, 79-83 (in Chinese)

- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 2 版. 北京: 气象出版社, 304-305. Zhang P C, Du B Y, Dai T P. 2001. Radar Meteorology. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 304-305 (in Chinese)
- 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣. 2014. 复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究. 大气科学, 38(5): 825-837. Zhang W L, Cui X P, Huang R. 2014. Intensive observational study on evolution of formation location of thunderstorms in Beijing under complex topographical conditions. Chinese J Atmos Sci, 38(5): 825-837 (in Chinese)
- 郑丽娜, 刁秀广. 2016. 一次华北飑线的阵风锋天气过程分析. 气象, 42(2): 174-182. Zeng L N, Diao X G. 2016. Analysis on a gust front of squall line event in North China. Meteor Mon, 42(2): 174-182 (in Chinese)
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 62(3): 317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. Acta Meteor Sinica, 62(3): 317-328 (in Chinese)
- Browning K A. 1977. The structure and mechanisms of hailstorms//Foote G B, Knight C A. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression. Boston: American Meteorological Society, 1-47
- Browning K A, Blyth A M, Clark P A, et al. 2007. The convective storm initiation project. Bull Amer Meteor Soc, 88(12): 1939-1956
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology. J Geophys Res, 117(D20): D20115
- Emerson T J. 2011. Case studies of convective initiations using dual-Doppler analysis during the Convective and Orographically-induced Precipitation Study(COPS) . Proceedings of the 10th Annual Student Conference. Seattle, WA: American Meteorological Society, S74pp
- Goff R C. 1976. Vertical structure of thunderstorm outflows. Mon Wea Rev, 104(11): 1429-1440
- Khodayar S, Kalthoff N, Wickert J, et al. 2013. High-resolution representation of the mechanisms responsible for the initiation of isolated thunderstorms over flat and complex terrains: Analysis of CSIP and COPS cases. Meteor Atmos Phys, 119(3-4): 109-124
- Klinge D L, Smith D R, Wolfson M M. 1987. Gust front characteristics as detected by Doppler radar. Mon Wea Rev, 115(5): 905-918
- Marshall J H, Parker D J. 2006a. Secondary initiation of multiple bands of cumulonimbus over southern Britain. II: Dynamics of secondary initiation. Quart J Roy Meteor Soc, 132(617): 1053-1072
- Marshall J H, Yorkshire W, Blyth A M, et al. 2006b. Idealised modelling studies of secondary initiation observed during CSIP. Proceedings of the 12th Conference on Cloud Physics. Madison, WI: American Meteorological Society
- Morcrette C J, Browning K A, Blyth A M, et al. 2006. Secondary initiation of multiple bands of cumulonimbus over southern Britain. I: An observational case-study. Quart J Roy Meteor Soc, 132(617): 1021-1051
- Purdum J F W. 1973. Satellite imagery and the mesoscale convective forecast problem. Proceedings of the 8th Conference on Severe Local Storms. Denver, CO: American Meteorological Society, 244-251
- Purdum J F W. 1976. Some uses of high-resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior. Mon Wea Rev, 104(12): 1474-1483
- Purdum J F W. 1982. Subjective interpretation of geostationary satellite data for nowcasting//Browning K A. Nowcasting. New York: Academic Press, 149-166
- Wakimoto R M. 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and Rawinsonde data. Mon Wea Rev, 110(8): 1060-1082
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. Mon Wea Rev, 114(12): 2516-2536
- Wilson J W, Mueller C K. 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. Wea Forecasting, 8(1): 113-131
- Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al. 1994. Boundary layer clear-air radar echoes: Origin of echoes and accuracy of derived winds. J Atmos Oceanic Technol, 11(5): 1184-1206
- Wilson J W, Meigenhardt D L. 1997. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence line. Mon Wea Rev, 125(7): 1507-1525
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: A status report. Bull Amer Meteor Soc, 79(10): 2079-2100
- Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. Mon Wea Rev, 134(1): 23-47
- Wulfmeyer V, Behrendt A, Kottmeier C, et al. 2011. The Convective and Orographically-induced Precipitation Study(COPS) : The scientific strategy, the field phase, and research highlights. Quart J Roy Meteor Soc, 137(S1): 3-30