

# 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法

廖晓农 于 波 卢丽华

(北京市气象台, 北京 100089)

**提 要:** 北京地区雷暴大风的预报准确率低而且时效短。为了提高对这种灾害性天气的预警能力,在气候统计的基础上,研究了潜势预报方法和临近预报算法。对1998—2007年134个雷暴大风过程的统计结果表明,北京地区绝大多数的雷暴大风具有下击暴流特征,而且冰雹的落区附近也是大风的爆发区之一。因此,负浮力的作用和对冰雹具有指示性意义的因子是研究雷暴大风预报方法应主要考虑的因素。500hPa环流背景分析表明,尽管绝大多数雷暴大风爆发时对对流层中层有干空气侵入,但是还有少数个例产生在偏南暖湿气流中。目前,对后一类大风产生的机制仍然不清楚。研究表明,当对流层中层有干空气侵入时,有利于雷暴大风出现的环境条件是: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。此外,还讨论了经验指数——大风指数在北京地区的应用。基于上述的研究,形成了北京地区雷暴大风短时潜势预报方法,还使用相关分析和多元回归分析技术建立了基于雷达观测和环境条件的雷暴大风临近预报方程。个例分析表明,临近预报方程对于飑线和弓形回波等带来的地面大风具有一定的预报能力。

**关键词:** 雷暴大风 气候特征 潜势预报 雷达 临近预报

## Climatology and Nowcasting Methods for Thunderstorm Gale in Beijing

Liao Xiaonong Yu Bo Lu Lihua

(Beijing Weather Forecasting Office, Beijing 100089)

**Abstract:** Right now, the warning accuracy of the high wind is lower and the leading time is also very limited in Beijing. In order to change the situation, the forecasting methods are developed. Based on the statistics for 134 cases, it is known that most of the high wind events are caused by the downbursts and some of them break out while the hails are falling. Therefore, the negative buoyancy and the hail storm factors should be taken into consideration in

study of this severe weather. Even though most of the high winds break out when the air at the middle level becomes drier, there are still a few of events appearing in the warm and wet flow. The mechanism for the latter one is not clear yet. When there is some dry-incursion in the middle level of troposphere, the favorable conditions for the high wind are the great instability in ambient for downdraft and higher temperature lapse rate in the lower level. Besides, the use of WINDEX is also discussed. The potential forecasting method is developed on the basis of above study. Furthermore, the nowcasting equation on the basis of the radar reflectivity, radial speed and so on as the forecasting factors is given through the correlation analysis and multiple regression analysis. The case study shows that some strong wind gusts caused by squall-line or bow echo could be forecasted successfully by using the equation.

**Key Words:** damaging wind gust climatology potential forecasting radar nowcasting

## 引 言

雷暴大风是夏季发生频率较高的灾害性天气现象之一。近年来,面对认识雷暴大风进而提高其预报准确率的需求,国内外开展了一系列的、有针对性的研究<sup>[1-13]</sup>。秦丽等<sup>[1]</sup>根据北京地区3个观测站资料遴选的雷暴大风日,对其天气和气候特征作了统计,指出北京地区的雷暴大风具有地理分布不均、强度较强并伴有较大降水等特征。同时,其日变化和季节变化也较明显。此外,对流层中层的干冷空气在雷暴大风的产生过程中非常重要,并将雷暴大风产生的环流形势分为东北冷涡、西来槽、槽后锋生和西北冷涡等4种类型。Fu等<sup>[2]</sup>对一次雷暴大风的模拟结果表明,冰雹的融化和拖曳作用以及雨滴蒸发等产生的负浮力在雷暴大风爆发的过程中非常重要。梁爱民等<sup>[3]</sup>对造成北京地区雷暴大风的回波作了分类研究。廖晓农等<sup>[4-6]</sup>研究了北京地区雷暴大风日相当位温廓线的特征、伴有较大降水和没有或降水量很小的两种类型雷暴大风日临近时刻环境大气的特征并分析了一次北京地区罕见的强雷暴大风产生过程中雷达回波、不稳定能量等。Travis

等<sup>[7]</sup>研发了可用于产生在弱切变环境下的强风暴单体的、基于WSR-88D雷达观测的灾害性大风算法。上述研究成果为进一步开展北京地区雷暴大风的研究并在此基础上建立短时临近预报方法奠定了基础。

本文依据1998—2007年北京地区21个人工观测站以及北京市气象局近年来建立起来的、具有高时空分辨率的自动站观测网资料,遴选出134次雷暴大风过程。结合探空、NCEP/NCAR再分析资料、风廓线仪等,统计了地面强阵风爆发时降水和冰雹的特征、不同天气背景下干空气的活动、对流层中下层环境大气温度直减率以及一些参数在不同天气背景下对即将来临的雷暴大风的指示性意义等,进一步丰富了北京地区雷暴大风气候统计特征的分析结果。在此基础上,研究了雷暴大风的短时潜势预报和基于北京南郊观象台CINRAD/SA雷达观测的临近预报方法。

## 1 对流风暴的概念模型和雷暴大风产生机制

### 1.1 对流风暴的概念模型

雷暴大风与对流云中下沉气流有关。根

据对流风暴的概念模型(图1),测站的风速首先会因前侧阵风锋(如果有)的过境而增大(图1a),而且风向突变。阵风锋过境时一般没有降水。它的后面是前侧下沉气流区——风暴的第一个近地面大风核(图1)。前侧阵风锋与风暴主体的距离在不同的风暴单体间差异较大,有时当阵风锋紧贴风暴主体时,在雷达上很难将其分辨出来。在大雨、冰雹、龙卷等强对流天气之后是后侧下沉气流区,它是存在于近地面层的第二个大风核所在位置。当对流较弱时,常常出现干下击暴流,即不伴有降水或降水量非常小的对流性大风。

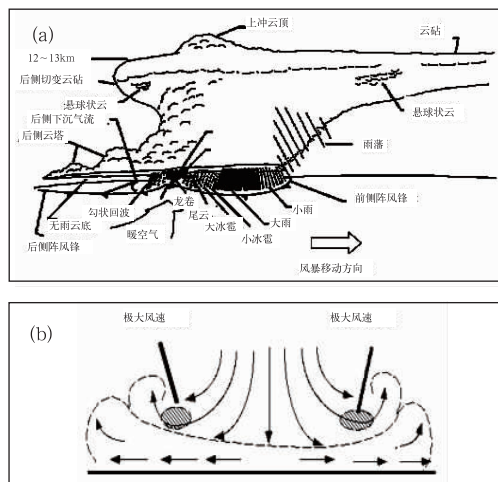


图1 对流风暴经典概念模型示意图  
(引自文献[12])

## 1.2 雷暴大风的产生机制

对流风暴中下沉气流的产生和维持主要决定于负浮力和降水物的拖曳作用。通常认为,降水物的拖曳作用是云中下沉气流的启动机制,而负浮力则是使其维持甚至加强的重要因素。负浮力的来源主要有:降水物相变(包括雨水滴蒸发和冰雹等融化)使云中空气冷却,对流层中层环境干空气被夹卷到对流云中加大了蒸发效应进而加大了云中空气冷却,在云中气流下沉的路径上环境空气的

温度变化率大于云内下沉气流使得下沉气流较环境大气冷,等等。因此,考察环境大气是否具有产生负浮力的潜势是利用环境条件制作雷暴大风潜势预报的基点。

## 2 北京雷暴大风的气候统计特征

全面掌握一种天气现象的气候特征是制作其预报的基础。如文献[1]和[2]指出,雷暴大风、地面降水和冰雹之间有着比较密切的联系。本文通过北京地区地面观测的事实,给出雷暴大风爆发过程中有关降水和冰雹统计结果。

### 2.1 雷暴大风爆发时地面降水的观测事实

1998—2007年,由21个人工观测站和近年来建立起来的自动观测站组成的北京地区地面观测网,共观测到134次雷暴大风过程(称为雷暴大风日)。其中,有2个雷暴大风日在对流活动中地面没有观测到降水,是典型的干型雷暴大风日。1个雷暴大风日在一部分测站有降水,而绝大多数雷暴大风日在大风出现的前后均有降水量大小不一的降水发生。为了考察雷暴大风爆发时地面降水的特征,本文将每一个测站观测到一次雷暴大风记为一个个例。在剔除了一些夜间没有降水开始时间记录的个例后,得到了由209个个例组成的个例集。

图2a给出了测站风速达到大风标准的初始时间(称为雷暴大风爆发时间)与降水开始时间的差值。其中,正值表示雷暴大风爆发先于地面降水;负值,反之;0表示强阵风和降水同时被观测到。统计结果表明,在雷暴大风爆发前降水已经开始的个例占72.25%,大风和降水被同时观测到的个例占5.74%,22.01%的大风发生在降水开始前。

因此,北京的雷暴大风多数发生在前侧下沉气流区和后侧下沉气流区中,具有下击暴流的特性。同时,统计了落在正值区的个例雷暴大风结束时间(测站风速减小,达不到大风标准的时间)与降水开始时间的差值(图2b)。其中,正值表示在地面降水开始前雷暴大风已经结束;负值,反之;0表示观测到降水的同时测站风速减小已达不到大风的标准。在46个个例中,有17个个例雷暴大风的结束时间落后于地面降水的开始时间,最长的落后15分钟。因此,在这些个例中,地面大风出现在阵风锋后面到前侧下沉气流区中。29个个例在地面降水开始时,大风已经结束。这些个例的地面强阵风由阵风锋过

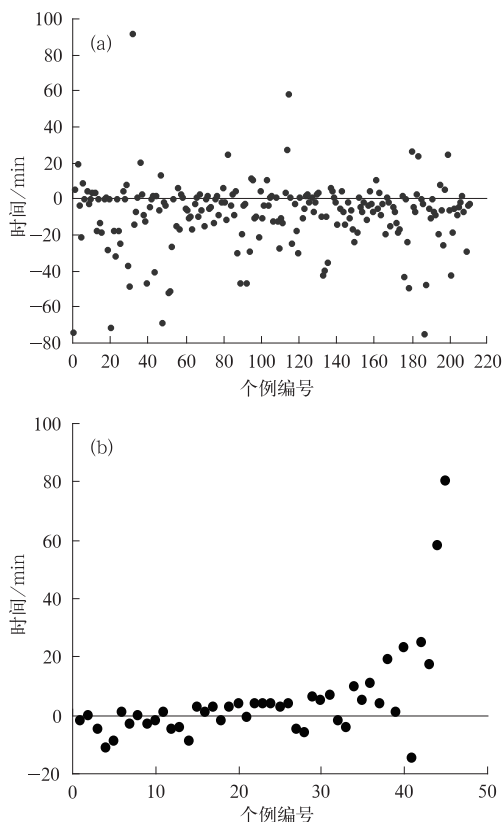


图2 雷暴天气与地面降水的时间差  
(a) 雷暴大风开始时间与降水开始时间差  
(b) 雷暴大风结束时间与降水开始时间差

境带来,同时也有可能是在主对流云前发展起来的弱对流云产生的干下击暴流。此外,还统计了与雷暴大风相关联的对流性降水持续时间。其中,14.22%的个例降水持续时间在30分钟以下,而且降水停止后天空云量减少。因此,这些个例的雷暴大风与移动迅速的飑线等线型回波或孤立的单体有关。上述分析表明,北京的雷暴大风是由下击暴流和阵风锋过境共同作用的结果,风暴的移动速度也是制作雷暴大风临近预报应该考虑的因素之一。

## 2.2 雷暴大风爆发时地面降雹概率

在北京地区,一次对流活动中雷暴大风与冰雹在同一个测站被观测到的概率为11.8%。统计了雷暴大风爆发时间与冰雹降落到地面的时间之间的关系(图3)。在伴有降雹的25个个例中,有11个个例大风的持续时间不到1分钟(图中空心圆圈落在纵轴上的个例),连续观测到强阵风的最长时间为18分钟。4个个例冰雹降落到地面的时间先于雷暴大风爆发,2个个例冰雹与雷暴大风同时发生,而多数个例的降雹开始时间落后于雷暴大风的爆发时间。有7个个例在降雹的过程中地面同时有大风;3个个例大风的

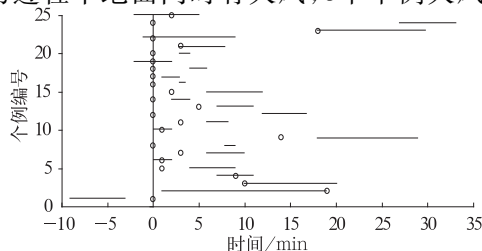


图3 雷暴大风和冰雹出现时间的统计关系图  
横坐标0表示雷暴大风的开始时间,用空心圆圈到纵轴间的时间表示雷暴大风的持续时间。实线的起点为雷暴大风爆发和冰雹开始的时间差,其终点则为雷暴大风爆发与冰雹结束的时间差,实线的长度表示冰雹的持续时间

结束时间与冰雹的开始时间重合。因此,冰雹落区附近也是大风的爆发区之一。

### 3 基于环境条件的短时潜势预报

#### 3.1 雷暴大风日对流层中层的干冷空气活动

在 1998—2007 年雷暴大风产生的过程中,500hPa 的影响系统或环流形势有:贝蒙或蒙古低涡低槽(52.9%)、东北低涡横槽或横槽(20.2%)、西北路径槽(9%)、西来槽(9%)、西太平洋副高西侧(4.5%)、华北低涡低槽(2.2%)和暖切变(1.1%)。此外,还有在西北气流控制下由于高低空温差导致的热对流发展而产生的大风(1.1%)。其中,在贝蒙或蒙古低涡低槽、东北低涡横槽或横槽、西来槽背景下产生的雷暴大风天气,伴有冰雹的概率较高。

对 500hPa 影响系统附近比湿水平分布特

征的统计结果表明(表 1),沿西北、偏西或偏北路径影响北京的系统附近通常有个相对的干区。在贝蒙或蒙古低涡低槽、东北低涡横槽或横槽以及西北路径槽附近的最小比湿只有  $1.3 \sim 1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而且北京的比湿常常高于系统附近的最小比湿。降水的观测资料表明,短历时降水天气过程容易产生在上述环流形势下。华北低涡低槽、西来槽以及西北气流型大风也具有相似的特征。而当北京处于西太平洋副高西侧或受暖切变影响时,偏南气流往往含水量较大,比湿值接近或达到  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而北京却相对较干。当对流性大风产生时,中层没有干空气侵入到风暴中。

上述分析表明,在一些环流形势下,对流层中层系统附近环境空气的比湿最小值低于北京,可以被作为判断雷暴大风能否产生的指标之一。而当对流风暴可能以偏南路径进入北京时,这条判据不适用。

表 1 各种形势下雷暴大风产生前系统附近/上游最小比湿的平均值\*

| 系统/环流编号                                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   | 7   | 8   |
|------------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $q_{\min}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 1.34 | 1.32 | 1.42 | 2.28 | 2.91 | 1.9 | 3.0 | 1.8 |
| 与北京的比湿差                                  | <    | <    | <    | <    | >    | <   | >   | ~   |

\*: 表中系统/环流编号从 1~8 分别表示:贝蒙或蒙古低涡低槽、东北低涡横槽或横槽、西北路径槽、西来槽、西太平洋副高西侧、华北低涡低槽、暖切变、西北气流类。比湿差“>”表示北京的比湿较低;“<”反之;“~”表示数值接近,差小于  $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### 3.2 一些参数对雷暴大风的指示意义

##### 3.2.1 下沉对流有效位能(DCAPE)

对流云中的下沉气流具有一定的热力不稳定性,是气块加速下沉产生地面强阵风的条件之一。本文采用下沉对流有效位能(DCAPE)来讨论雷暴大风产生的潜势。下沉对流有效位能是一个用于定量地表示负浮力使气块作下沉运动所能够达到强度的物理量,DCAPE 表示为:

$$DCAPE = \int_{p_i}^{p_n} R_d (T_{\rho'} - T_{\rho}) dp \quad (1)$$

式中  $T_{\rho}$  是密度温度,下标  $v$  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。负浮力做功引起的下沉气流的速度为:

$$-w_{\max} = \sqrt{2DCAPE} \quad (2)$$

式(1)和(2)表明,对于正在做下沉运动的气块来说,DCAPE 越大,则它到达中性浮力层或地面时的速度越大,越有利于地面强阵风的出现。

利用式(1)计算了雷暴大风日临近时刻的 DCAPE,结果表明,北京地区雷暴大风日下沉气流的热力不稳定性在个例间的差别较大。在本文研究的所有个例中,DCAPE 最小值仅为  $13.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,下沉气流的热力不

稳定性非常小;而最高值达到  $1942.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 下沉气流能够从环境大气中获取较多的、能够转化为动能的能量, 因此具有较大的雷暴大风潜势。绝大多数个例(82.1%)临近时刻的  $DCAPE$  超过了  $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  (图4),  $1100 \sim 1700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  区域个例最集中。

此外, 考察了临近时刻  $DCAPE$  未达到  $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  个例(多数是干型雷暴大风日—降水量小于  $0.25 \text{ mm}$ ) 下沉对流有效位能的变化发现, 在临近时刻前6小时内, 有些个例特别是临近时刻下沉对流有效位能的数值接近  $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的个例, 其  $DCAPE$  增幅达到了  $300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上。因此, 动态地考察雷暴大风来临前的下沉对流有效位能是必要的。

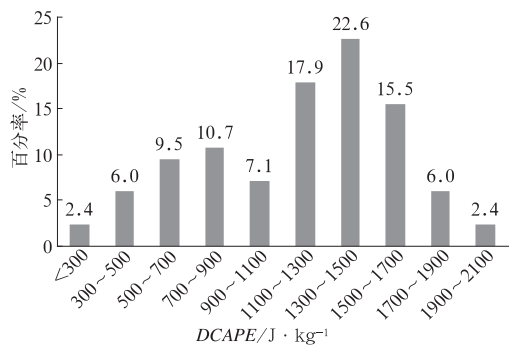


图4 雷暴大风日临近时刻  $DCAPE$  在各数值区间的分布

### 3.2.2 大风指数(WINDEX)

大风指数(WINDEX, 简称为  $WI$ ) 是为预报下击暴流潜势而引入的一个指数, 它的基础是观测数据和数值模拟。其表达式为:

$$WI = 5[H_M R_Q (\Gamma^2 - 30 + Q_L - 2Q_M)]^{0.5} \quad (3)$$

其中,  $H_M$  为融化层的高度,  $Q_L$  为近地面层  $1 \text{ km}$  以内的平均混合比,  $Q_M$  为融化层的混合比,  $\Gamma$  为地面到融化层间的温度直减率,  $R_Q = Q_L / 12$ 。式(3)得到的大风指数以  $\text{knot}$  为单位。

鉴于  $WI$  只用于预报下击暴流的潜势,

因此计算了有下击暴流活动的雷暴大风日的  $WI$  及其与阵风风速的相关系数。结果表明, 在北京地区地面强阵风的极大风速与  $WI$  的数值之间存在一定的正相关关系, 相关系数为  $0.344$ 。其中有4类天气背景下的相关性较好, 贝蒙或蒙古低涡低槽类的相关系数最高为  $0.55$ , 东北低涡横槽或横槽为  $0.4$ , 西北路径槽和西来槽分别为  $0.34$  和  $0.32$ 。这4种天气背景下  $WI$  的阈值分别为  $30 \text{ knots}$ 、 $20 \text{ knots}$ 、 $35 \text{ knots}$ 、和  $30 \text{ knots}$ 。而  $WI$  对于出现在副高边缘和由暖切变造成的对流性大风没有较好的指示性意义。在华北低涡和西北气流背景下  $WI$  的作用, 还需通过更多的个例来验证。

### 3.3 雷暴大风日对流层下层温度直减率的统计特征

计算  $DCAPE$  时有一个假设: 在气流下沉的路径上, 总是有适量的雨水蒸发, 使气块永远恰恰达到饱和。但是, 在很多情况下特别是在积云底以下的层次内实际下沉气流并非一直满足上述假设。根据气块理论, 下沉气流的维持和加强部分取决于气块下沉增温的幅度是否小于环境大气的温度变化率。

统计结果表明, 雷暴大风日的温度廓线在对流层下层的部分与湿绝热线平行或更陡峭的个例占的比例较小(图5),  $70\%$  雷暴大风日  $0 \sim 3 \text{ km}$  层内的温度直减率超过  $7^\circ \text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 。如前所述, 有  $77.99\%$  的雷暴大风发生在地面降水区中, 与环境温度直减率超过  $7^\circ \text{C} \cdot \text{km}^{-1}$  的数据集有  $72.36\%$  的交集。对于落在交集的伴有较大降水的湿型雷暴大风(降水量超过  $0.25 \text{ mm}$ ) 个例来说, 下沉气流是次饱和的<sup>[14]</sup>, 其下降过程中温度的变化率接近湿绝热直减率。当下沉气流进入到对流层下层时, 由于温度低于环境而或

多或少地因受到负浮力而加速。基于上述结论,在北京地区可以将  $0\sim 3\text{km}$  内环境温度直减率  $7^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  确定为判断是否有利于湿型雷暴大风产生的阈值。而在干型大风日,温度直减率超过  $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。因此,干、湿型雷暴大风日应分别考虑。

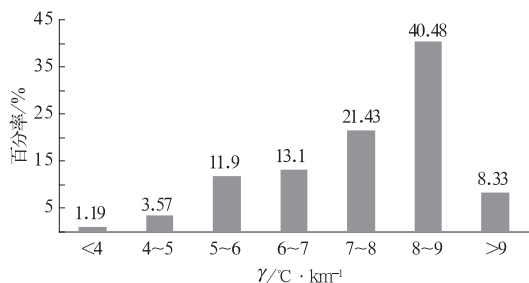


图 5 雷暴大风日  $0\sim 3\text{km}$  环境大气直减率  
在各个数值区间占的比例

### 3.4 基于环境条件的雷暴大风短时潜势预报判断树

综合上述分析结果,构成了基于环境条件的北京地区雷暴大风短时潜势预报判断树(图 6)。当北京处于西太平洋副热带高压西侧或将受到暖切变影响时,判断树的预报能力较低。因为,在这两种环流背景下,对流层中下层的湿度一般较大,而且低层的温度直减率较小,对流层中层系统附近或上游没有干空气。由式(1)和(3)知,  $DCAPE$  和  $WI$  对于对流层中层的湿度是敏感的。当对流层中层存在干层时,两个参数的数值往往较大,反之较小。要解决暖湿背景下雷暴大风的预报问题,还需对其产生的机制做深入研究。

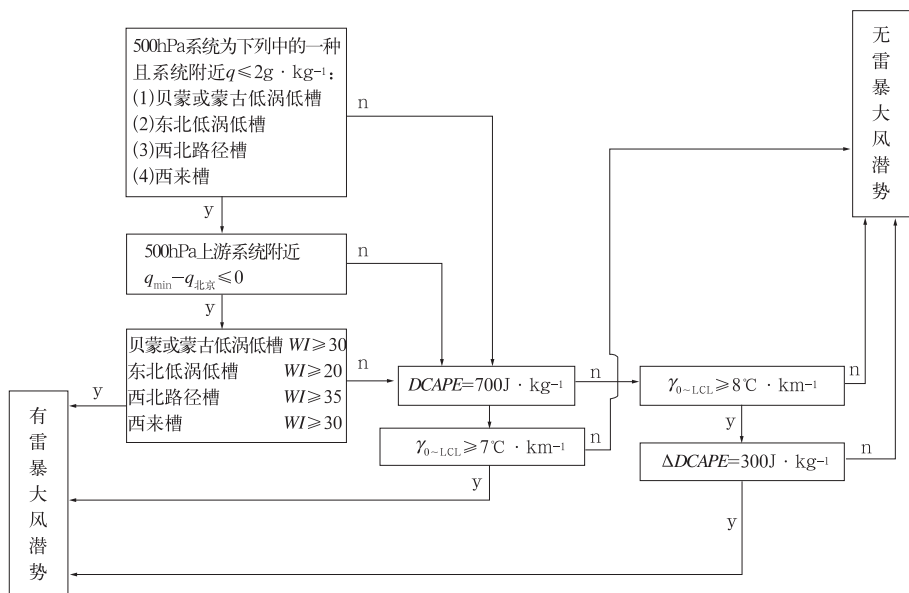


图 6 基于环境条件的北京雷暴大风短时潜势预报判断树

## 4 基于多普勒雷达观测的临近预报方法

### 4.1 预报因子筛选

雷达观测表明,影响北京产生雷暴大风的回波主要有飑线、弓形回波(有时嵌在飑线中)、超级单体和多单体风暴等。其中,飑线和弓形回波移动速度较快,通常可达到  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以上。有时,在线型回波和多单体风暴前,还可观测到阵风锋。此外,风廓线仪观测表明,在一些雷暴大风爆发过程中,对流层中层环境风先是陡增,然后大风核迅速下传,在观测到地面强阵风时到达地面,即地面大风与高空风动量下传有关。上述观测事实说明,北京地区的雷暴大风是多种因素综合作用的结果,与雷暴大风爆发时地面降水的气候统计特征结论相吻合。因此,遴选雷暴大风的临近预报因子时,不应仅仅局限于对下击暴流的考虑。

本文主要依据雷暴大风产生的机制、北京地区雷暴大风日降水和冰雹的气候统计特征并结合对造成地面强阵风的雷达观测分析来选取预报因子。初步选定的因子由雷达反射率、径向速度和环境参量组成,包括单体的最大反射率因子、回波移动速度、垂直积分液态水含量、 $\theta_{\text{emin}}$  高度最大反射率等 11 个因子。鉴于雷达在探测距离太近风暴时的局限性,参照文献[7]的做法,选择了 54 个距离雷达 20km 以上的单体作为研究对象,计算了地面风速与上述 11 个因子的相关系数(表 2)。但是由于个例数量有限,没有按照风暴与雷达间的距离对个例进行分组。结果表明,VIL、最大反射率高度、7km 以上最大反射率、 $\theta_{\text{emin}}$  高度最大反射率、1~6km 最大(辐合)速度差、单体的移动速度等 6 个因子通过了  $\alpha=0.001$  的显著性检验,被确定为预报因子。

通常,将风暴中 3~9km 高度径向速度出现辐合作为识别能够产生下击暴流风暴的信息。但是,如前所述北京地区的雷暴大风不仅仅只包括下击暴流,而且雷达观测实践表明,在对流活动中,当对流层中下层出现径向速度超过  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风速区时,即便观测不到中层辐合的特征,雷暴大风产生的几率仍然较大。因此,在没有中层辐合的情况下,取径向速度最大值中心的数值与其前部(沿风暴移动路径)最小值的差来替代“最大辐合速度差”,从而使预报方程具有更广泛的使用性。

通过相关分析筛选出的 6 个预报因子具有一定的合理性。对产生雷暴大风的单体和普通单体(未产生大风的单体)的对比分析表明,当风暴越强、发展越旺盛、液态水含量越高、移动速度越快时,产生雷暴大风的可能性就越大。此外,依据雷暴大风产生的机理,风暴的内部结构也是重要的。在干冷空气侵入的高度上( $\theta_{\text{emin}}$  所在的高度)应具有较大的反射率因子值。这样,当干冷空气被夹卷到风暴体内时,蒸发产生的负浮力将使下沉气流加强。冷空气侵入高度和冻结高度附近的径向速度差与地面雷暴大风的相关性不及 6km 以下任一层次内的径向速度差来得大。根据研究[4],北京地区雷暴大风日相当位温最小值的平均高度为 570hPa,而且北京夏季的冻结层高度一般在 6km 以下。因此,1~6km 最大(辐合)速度差将在一定程度上涵盖了冻

表 2 地面极大风速与预报因子的相关系数

| 因子                             | 相关系数 | 因子                                       | 相关系数 |
|--------------------------------|------|------------------------------------------|------|
| VIL                            | 0.61 | 0℃层最大(辐合) $\Delta V$                     | 0.43 |
| 最大反射率                          | 0.62 | $\theta_{\text{emin}}$ 最大(辐合) $\Delta V$ | 0.44 |
| 最大反射率                          | 0.43 | 1~6km 最大(辐合) $\Delta V$                  | 0.56 |
| 7km 以上最大反射率                    | 0.69 | 单体移速                                     | 0.53 |
| $\theta_{\text{emin}}$ 高度最大反射率 | 0.54 | $\theta_{\text{emin}}$ 高度环境风速            | 0.32 |
| $\theta_{\text{emin}}$ 以上最大反射率 | 0.43 |                                          |      |

结层和相当位温最小值高度附近速度差的信息。

4.2 雷暴大风临近预报方程

为了建立雷暴大风的临近预报方程,首先将预报因子和预报量 0,1 化,然后做多元线性回归分析,得到了回归方程(表 3)。当预报值 $>0.61$ 时,预报有雷暴大风。回归方程的历史拟合率为 94.4%。

本文将雷达完成一个完整的体扫后能够依据观测结果发布预警到地面观测到短时强阵风之间的时间差定义为预警时间。预报方程回报的预警时间为 4~21min。

表 3 回归系数

| 预报因子                    | 回归系数   |
|-------------------------|--------|
| VIL                     | -0.017 |
| 最大反射率                   | 0.24   |
| 7km 以上最大反射率             | 0.113  |
| $\theta_{\min}$ 高度最大反射率 | 0.03   |
| 1~6km 最大(辐合) $\Delta V$ | 0.077  |
| 单体移速                    | 0.363  |
| 1                       | 0.369  |

5 个例分析

2008 年 9 月 16 日 17—19 时(北京时,下同),北京的延庆、昌平、海淀、门头沟、平谷、顺义等地先后出现了雷暴大风,极大风速达到  $23.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。500hPa 西来小槽是造成对流天气的直接影响系统(图 7)。高空槽后分布着干冷空气,比湿小于  $2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。雷达观测表明,午后到傍晚一条飑线回波带扫过河北和北京。16 时 54 分,当飑线回波带接近北京的延庆时(图 8,见彩页),回波带的中部有弓形回波形成,弓形回波一直维持到 17 时 30 分。延庆、昌平、海淀和门头沟在飑线回波过境前后出现了大风天气。17 时 48 分,当飑线回波带移到北京东部地区时,弓形

回波再次形成(图略),并维持到 18 时 48 分。受弓形回波影响,顺义和平谷的短时阵风风力超过了 8 级。下面通过该个例来检验短时预报判断树和临近预报方程的预报效果。

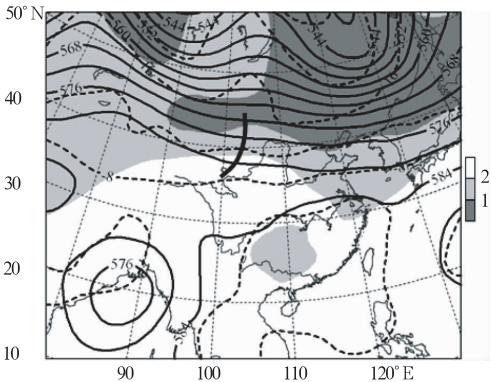


图 7 2008 年 9 月 16 日 08 时 500hPa 图

实线为位势高度,间隔 40gpm;  
虚线为温度( $^{\circ}\text{C}$ ),间隔  $4^{\circ}\text{C}$ ;阴影为比湿( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

首先,考察当日雷暴大风产生的潜势。根据 08 时南郊观象台的探空计算得到  $DCAPE$ 、 $WI$  和抬升凝结高度以下的温度直减率分别为:  $547.3\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.3\text{knots}$  和  $2.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (表 4),均未达到阈值。到 14 时, $DCAPE$  为  $1248.7\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $WI$  增加到  $47\text{knots}$ 、抬升凝结高度以下的温度直减率接近干绝热,达到  $8.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (表 4),下午的探空表明雷暴大风出现的潜势非常大。临近预报判断树对于即将到来的雷暴大风具有较好的预报效果。

表 4 2008 年 9 月 16 日 08 时和 14 时  
雷暴大风潜势预报参数

| 时间<br>(BT) | $DCAPE$<br>( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | $WINDEX$<br>(knots) | $MDPI$ | $\gamma_0-LCL$<br>( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ) |
|------------|----------------------------------------------|---------------------|--------|-------------------------------------------------------------|
| 08         | 547.3                                        | 10.3                | 1.9    | 2.0                                                         |
| 14         | 1248.7                                       | 47.0                | 1.4    | 8.5                                                         |

其次,依据雷达观测和相当位温等环境参量将临近预报方程用于组成飑线特别是弓形回波的单体。16 时 42 分(弓形回波形成

前的一个体扫)(图9,见彩页),针对飑线回波带能够影响北京的部分,临近预报方法预报有5个单体在未来将产生地面短时强阵风(图中黑色原点指示的位置)。从弓形回波形成(16:48)到17时,根据临近预报方法的预报,飑线回波带特别是弓形回波影响的地区将有多处会有雷暴大风(图9,见彩页)。预报和观测实况对比结果表明(图9,见彩页),临近预报方法对于弓形回波和飑线在延庆地区部分的预报比较准确。但是,在飑线回波带北段出现空报。从依据雷达观测能够发布大风预警(16:42)到延庆观测到第一个雷暴大风(17:05),有效的预警时间为23min。

## 6 结语

利用1998—2007年地面观测、探空和NCEP/NCAR再分析资料,统计了出现在该期间的134个雷暴大风过程地面强阵风爆发时降水和冰雹的气候特征;分析了雷暴大风日不同天气背景下对流层中层干空气的活动,并研究了雷暴大风爆发的临近时刻 $DCAPE$ 、 $WI$ 和0~3km环境温度直减率在短时预报中的意义,在此基础上构造了北京雷暴大风短时潜势预报判断树。此外,还建立了基于雷达观测资料分析和环境条件的临近预报方程。通过研究,得到如下结论。

(1)在北京地区,绝大多数雷暴大风过程有降水发生,但是降水量大小不一。在所研究的个例中,77.99%的雷暴大风发生在地面降水区中,22.01%的个例雷暴大风爆发超前于地面降水。在这些超前的个例中,有29个个例(占总个例数的13.88%)在雷暴大风爆发和持续期间没有降水;14.22%个例的降水持续时间在30分钟以下。北京地区的雷暴大风是下击暴流和阵风锋引起的。上述观测事实为遴选基于雷达观测和环境条件的临近预报因子奠定了基础。

(2) 11.8%的雷暴大风过程伴有地面降雹,降雹区也是雷暴大风发生概率较高的区域。因此,临近预报方法应考虑对雹云具有指示性意义的因子。

(3) 雷暴大风日500hPa影响系统和环流形势主要包括:贝蒙或蒙古低涡低槽、东北低涡横槽或横槽、西北路径槽、西来槽、华北低涡、西北气流、暖切变和西太平洋副高西侧等。前6类环流背景下,对流层中层系统附近或上游分布着比湿低于北京的干空气,因此雷暴大风的爆发与干空气的侵入有关。冰雹的发生概率也较高。而后两类环流形势下,则没有干空气活动。

(4) 当 $DCAPE \geq 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,雷暴大风出现的潜势较大。大风指数应用在贝蒙或蒙古低涡低槽、东北低涡横槽或横槽、西来槽和西北路径槽等环流背景下,对下击暴流类的雷暴大风潜势具有较大的指示性意义。上述4类环流形势下 $WI$ 的阈值分别为30knots、20knots、35knots、和30knots。此外,0~3km环境大气温度直减率达到 $7^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上(含)或 $8^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上分别可以作为湿型雷暴大风和干型雷暴大风临近潜势预报的指标之一。利用上述判据构成的短时预报决策树,在14时较好地预报出了出现在2008年9月16日傍晚的雷暴大风过程。

(5) 相关分析的结果表明, $VIL$ 、最大反射率高度、7km以上最大反射率、 $\theta_{\min}$ 高度最大反射率、1~6km最大(辐合)速度差、单体的移动速度等6个与雷达观测和环境有关因子与地面短时强阵风有较好的对应关系。依据相关分析的结果建立了临近预报回归方程,回归方程的历史拟合率为94.4%,有效的预警时间为4~21min。方程对2008年9月16日傍晚进入北京造成雷暴大风的飑线(包括镶嵌在飑线中的弓形回波)具有一定的预报能力。

对于出现在500hPa偏南气流中的雷暴

大风(例如:副高边缘),本文的短时预报决策树和临近预报方程的预报能力有限。要解决这类大风的预报问题,需在积累一定数量个例的前提下对其产生机制作进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 秦丽,李耀东,高守亭. 北京地区雷暴大风的天气—气候学特征研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6):754-762.
- [2] Fu Danhong, Guo Xueliang. Numerical study on a severe downburst-producing thunderstorm on 23 Aug. 2001 in Beijing[J]. Advance in Atmospheric Science, 2007, 24(2):227-238.
- [3] 梁爱民,张庆红,申红喜. 北京地区雷暴大风预报研究. 气象, 2006, 32(11):73-80.
- [4] 廖晓农,王华,石增云,等. 北京地区雷暴大风日  $\theta_e$  平均廓线特征. 气象, 2004, 30(11):35-37.
- [5] 廖晓农,俞小鼎,王迎春. 一次北京地区罕见的雷暴大风过程特征分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6)
- [6] 廖晓农. 北京雷暴大风环境特征分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1)
- [7] Travis M S, Kimberly L E and Shannon A D. A damaging downburst prediction and detection Algorithm for the WSR-88D[J]. Weather and Forecasting, 2004, 19(4):240-250.
- [8] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006: 17(4), 385-393.
- [9] Eilts, M. D., and Coauthors. Damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D [R]. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 1996:541-544.
- [10] 姚叶青,俞小鼎,张义军,等. 一次典型飊线过程多普勒天气雷达资料分析[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 373-381.
- [11] Johns R H, and Doswell C A. Severe local storms forecasting[J]. Weather and Forecasting, 1992, 7(4):588-612.
- [12] 正华,孙继松,李津. 2005 年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(2):49-56.
- [13] 李向江,薛荣康,唐伍斌. 一次强飊线天气过程的新一代天气雷达探测和临近预报[J]. 气象, 2006, 32(9):60-66.
- [14] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006: 136, 155.
- [15] Mark M W and Roeder W P. Forecasting wet microburst on the central Florida Atlantic Coast in support of the United States Space Program[R]. 18th Conf. on Severe Local Storms, 1996:654-658.

# 廖晓农等：北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法

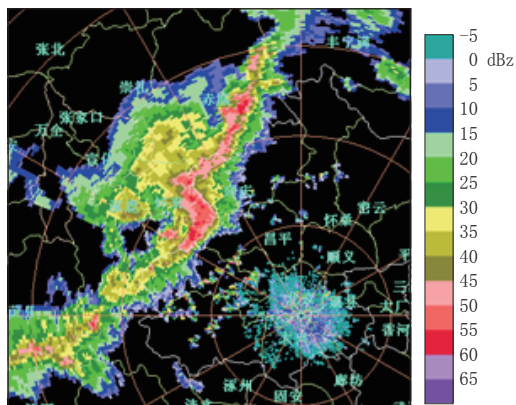


图 8 2008年9月16日16:45北京南郊  
观象台雷达1.5°仰角反射率因子

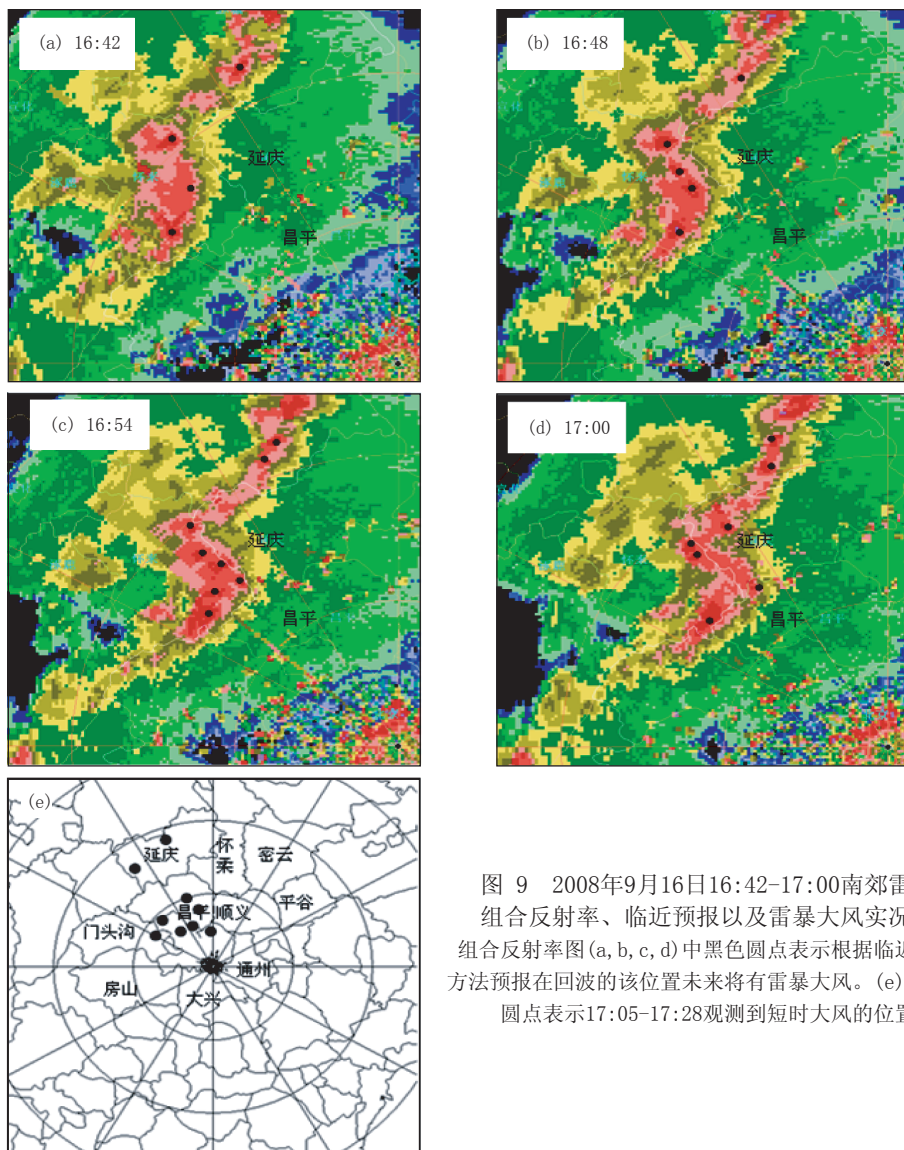


图 9 2008年9月16日16:42-17:00南郊雷达  
组合反射率、临近预报以及雷暴大风实况图  
组合反射率图(a, b, c, d)中黑色圆点表示根据临近预报  
方法预报在回波的该位置未来将有雷暴大风。(e)中黑色  
圆点表示17:05-17:28观测到短时大风的位置