

雷蕾,孙继松,魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象,2011,37(2):136-141.

利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别^{*}

雷 蕾¹ 孙继松^{1,2} 魏 东¹

1 北京市气象台,北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

提 要: 利用北京南郊观象台探空资料计算出的 18 种物理参量及其时间变量,详细分析了 2007 年和 2008 年 5—9 月冰雹、雷暴大风以及暴雨强对流天气过程下物理量的差异。结果表明:0℃层高度、-20℃层高度、500 hPa 和 850 hPa 温差、逆温层高度、低空风切变能比较显著地区分冰雹和暴雨天气,其 σ 也比较小;此外 850 hPa 的温度露点差、500 hPa 和 850 hPa 的 θ_{se} 差、大气可降水量 PW 也是判断强对流类别的重要条件。而对于时间变量来说,CAPE、DCAPE、K 指数、500 hPa 和 850 hPa 的 θ_{se} 差、 PW 、低层的垂直风切变这几种物理量的 6 小时变量也能比较好地甄别出冰雹(雷暴大风)和暴雨天气。上述研究结果表明,合理利用探空资料甄别夏季强对流天气的类别是可能的。

关键词: 探空资料,强对流天气,物理参量,潜势预报

Distinguishing the Category of the Summer Convective Weather by Sounding Data in Beijing

LEI Lei¹ SUN Jisong^{1,2} WEI Dong¹

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

2 Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: This paper calculated 18 physical parameters and their 6-h, 12-h, and 24-h variations by the sounding data from Beijing Nanjiao Observatory, and then analyzed the physical parameter differences of hailstone, thunderstorm gale, and storm rainfall from May to September in 2007 and 2008. The results show that, as the physical parameters, the 0℃ height, the -20℃ height, the difference of temperature between 500 hPa and 850 hPa, the inversion height and the low-level wind shear could distinguish the category of the rainstorm and hailstorm. Besides, the depression of dew point of 850 hPa and the difference of θ_{se} between 500 hPa and 850 hPa are also the important conditions. On the other hand, for the 6-h variations of the CAPE, DCAPE, K index, the difference of θ_{se} between 500 hPa and 850 hPa, PW , and the vertical wind shear of the lower troposphere could also be better to distinguish the hailstorm and the storm rainfall. The results indicate that it is possible to distinguish the summer convective weather by better using of sounding data.

Key words: sounding data, convective weather, physical parameter, potential forecast

引 言

强对流天气通常包括强雷雨造成的暴雨、冰雹、

雷暴大风、龙卷等中小尺度天气现象,而对于北京来说,暴雨、冰雹、雷暴大风是夏季出现频率比较高的强对流天气,具有强度大、时间短、破坏力强等特点,一旦出现往往会造成严重的后果。因此,这几类强

* 行业专项项目“京津冀城市群强对流天气短时临近预报关键技术研究(GYHY200706004)”;国家支撑项目“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究——城市群高影响天气的特征和成因分析”(2008BAC37B01)共同资助

2009 年 12 月 20 日收稿; 2010 年 6 月 5 日收修定稿

第一作者:雷蕾,主要从事短时临近预报及相关研究. Email:fyrd1234@126.com

对流天气的预报被作为重点和难点越来越受到广泛的重视。随着探测手段的发展,雷达、闪电定位等先进仪器的应用使我们对强对流天气临近时刻所表现出来的征兆、特征等认识不断深入,也有很多成熟的研究成果已经应用于短时临近预报^[1-8]。但是这几类强天气的6~24小时的分类预报依然是一个比较困难的工作,通常条件下预报员利用天气型并结合一些探空计算的物理参量来进行潜势预报,探空资料成为反映强天气出现前本地上空大气温湿结构的重要手段。叶笃正早在1977年就初步阐述过利用探空资料可以寻找对流发展的有利条件^[9-10];王笑芳等提出用08时单站探空资料预报北京强对流天气的有无以及强度的判断树方法,给预报提供了有应用价值的思路^[11];刘玉玲用探空计算了CAPE、粗里查森数、螺旋度等几个对流参数并应用到强对流天气的潜势预测中^[12];田生春等用探空资料分析了北京45个日雨量大于100 mm暴雨时各层温湿风的特征^[13];廖晓农等也用探空资料计算了CAPE、LI、风切变等一些物理量,分析了北京历史上一次严重的大雹事件^[14];叶爱芬等曾用广州清远探空站的逐日资料专门针对CAPE与强降水、雷雨大风的关系进行了统计研究^[15]。

上述研究基本上是基于常用的几种物理参数进行单一类型强对流的分析,而究竟哪些物理量在冰雹、雷暴大风、暴雨这几种强对流天气下有显著差异,即有较好预报意义的分析研究还比较少。本文正是从这点出发,利用北京两年的5—9月加密探空资料计算多达18种物理参量及其6、12、24小时变量进行细致统计分析研究,期望遴选出对于冰雹、雷暴大风、暴雨敏感程度不同的物理量及其变量,为今后强对流分类潜势预报提供参考。

1 资料和方法

本文采用2007年和2008年5—9月北京20站常规观测资料和约180个自动站雨量、大风资料以及54511站(北京南郊观象台)每日2次或4次的实况探空资料(7月初至9月初增加02、14时的加密探空)进行分析研究。

1.1 天气现象分类

本文首先将天气类型进行划分和归类。把2007年和2008年5—9月的天气现象按对流活动的剧烈

程度依次分为:无降水日、无雷暴出现的稳定性降水日、1小时大于20 mm的暴雨日、3小时大于50 mm的大暴雨日、雷暴大风日以及冰雹日。冰雹被视为最严重的对流天气现象,雷暴大风次之,以此类推。

为了便于研究各种强对流特有的物理量特征,把同时出现几种强对流天气的个例按照天气现象就重的原则归类,如:雷暴大风伴有冰雹的归为冰雹天气,1小时大于20 mm的降水与3小时大于50 mm的强降水同时出现的则归为3小时大于50 mm的暴雨等。此外,为了保证各种天气类型筛选的准确程度,考虑了自动站资料的可靠性问题,规定3站或3站以上出现大风记录为一个大风日。按照上述天气分类的原则严格筛选出冰雹20例、雷暴大风32例、3小时大于50 mm的大暴雨13例、1小时大于20 mm的暴雨21例。此外,进一步把雷暴大风和短时暴雨这两种天气分为全市性和局地性两类,其原则是:雷暴大风天气若出现15个人工气象站以上有大风报则被视为是全市性雷暴大风日;半数以上的自动站出现强降水则被归为全市性暴雨日。从筛选的情况看,32个雷暴大风个例中仅有7例是全市性的;而34个暴雨个例均为局地性暴雨。

在上述分类过程中还发现,冰雹、暴雨天气常常伴有雷暴大风,甚至冰雹、雷暴大风、暴雨同时出现的现象也时有发生,这对日常强对流天气的定性预报带来了相当大的难度。

1.2 物理量说明和计算

根据上述天气类型,利用探空资料分别计算了6种天气状况下当日2个或4个时次的18种热力、动力物理量。同时计算了上述18种物理量的日最大值、日最小值、日平均值及相应的各物理量的标准

差($\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$)以及各物理量的6小时、12

小时、24小时变量。在计算变量的时候选取距离强对流发生之前最近时次的探空资料进行计算以保证能比较准确地反映物理量随天气的变化情况。

按照各物理参量的天气动力学意义,表示大气能量的物理量选取:对流有效位能(CAPE)、下沉对流有效位能(DCAPE)、K指数;表示热力不稳定的物理量包括:对流温度 T_{CON} 、500 hPa和850 hPa的 θ_{se} 差($\Delta\theta_{se500-850}$)、逆温层顶高度、逆温层顶温度;表示环境温湿状况的物理量有:0℃层高度、-20℃

层高度、500 hPa 温度露点差 $[(T-T_d)_{500}]$ 、850 hPa 温度露点差 $[(T-T_d)_{850}]$ 、500 hPa 和 850 hPa 温差 $[\Delta T_{500-850}]$ 、500 hPa 和 850 hPa 露点差 $[(T-T_d)_{500-850}]$ 、大气可降水量(PW);表示动力稳定度的物理量有:低层垂直风切变($SHRL_{1000-700}$)、中层垂直风切变($SHRH_{700-500}$)、低层粗里查森数、中高层粗里查森数。

2 物理量对冰雹、雷暴大风、暴雨 3 种强对流天气的甄别能力

3 种强天气下各个物理量的最大/最小值见表 1 (由于受 CAPE 和垂直风切变大小的双重影响里查森数离散度大,因此没有给出)。

2.1 能量条件

对流不稳定能量 CAPE 和 K 指数是我们日常强对流天气预报经常关注的两个判据。从统计可以看出,这两个物理量对于是否出现强对流表现敏感,

但是在 3 种强对流天气之间差异并不是很大,相比之下雷暴大风出现时对流有效位能稍高^[12],CAPE 均值能达到 $1307\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但是 CAPE 计算时受抬升高度的影响计算值差异比较大,因此其阈值在使用时需要进行订正。而 K 指数表现为暴雨比冰雹和雷暴大风时略大,说明暴雨对水汽条件依赖度更高。但是这两个物理量的 σ 都比较大,说明就单个个例来讲其值不确定性比较大(见表 1)。此外,对于下沉对流有效位能(DCAPE)统计发现,三者没有太大的差异,50 mm/3 h 的大暴雨天气的下沉对流有效位能与冰雹、雷暴大风天气的 DCAPE 相当,这与我们平时认为雷暴大风的 DCAPE 比较大的认识有所差异。20 mm/h 暴雨的 DCAPE 比较小(见表 1,图 1)。

强对流发生前期逆温层的存在有利于不稳定能量的积聚。从统计可以看出雹暴发生日一般具有比较深厚的逆温层,高度可达 3 km 以上,对其他对流天气而言,是否存在逆温并不是必要条件(见表 1,图 1)。

表 1 冰雹、雷暴大风、暴雨三种强对流天气的一些物理量的平均值和标准差
(Ave 表示各类天气下所有样本的均值,σ 表示标准差)

Table 1 Average values (Ave=average of samples and standard deviations (σ) of physical parameters for three categories of severe convective weathers; hailstone, thunderstorm gale, rainstorm

	冰雹		雷暴大风		暴雨(>50 mm/3 h)	
	Ave	σ	Ave	σ	Ave	σ
CAPE/J·kg ⁻¹	1012	723	1307	1141.58	964	435.54
DCAPE/J·kg ⁻¹	1126	362	1095	408	1126	221
KI/℃	31	8.14	29	12	34	8.44
T _{CON} /℃	28	4.7	28	6.7	29	2.9
0℃层高度/m	4174	487.71	4207	596.96	4751	478.54
-20℃层高度/m	7414	645.12	7501	734.33	8093	586.89
(T-T _d) ₅₀₀ /℃	28.38	13.94	26.60	13.89	26.56	14.05
(T-T _d) ₈₅₀ /℃	5	5.73	7	8.3	3	5.9
PW/cm	7.35	1.87	7.65	3.01	10.01	2.56
SHRL ₁₀₀₀₋₇₀₀ /10 ⁻³ s ⁻¹	5.26	2.22	5.06	1.46	3.32	1.35
SHRH ₇₀₀₋₅₀₀ /10 ⁻³ s ⁻¹	4.15	1.69	4.35	2.01	3.42	0.95
Δθ _{se} /K	-9.86	10	-8.93	9.67	-11.52	5.9
ΔT ₅₀₀₋₈₅₀ /℃	-28	2.3	-29	3.1	-25	2.76
逆温层高度/m	4625	808	3490	1732.3	3938	1432.55
逆温层温度/℃	-4	5.6	5	11.96	5	8.2

2.2 温湿参量

0℃层是云中水分冻结高度的下限,而-20℃层是大水滴自然成冰温度,这两个温度层的高度是识别和表示雹云特征的重要参数^[14]。从统计结果来看,冰雹的 0℃层高度约 4000 m 左右,-20℃层约在 7400 m 左右,这两个特性层的高度都要明显

低于暴雨约 500~600 m。不太高的 0℃层使冰雹不容易在落地之前就被融化,而暴雨的 0℃偏高(4750 m 左右)使得固态降水物出云后能融化形成大雨滴到达地面。这与以往的研究结果是一致的(见表 1,图 1)。

高低空的温差反映了大气垂直温度梯度,是判断夏季华北地区是否出现雷暴天气的重要判据。统

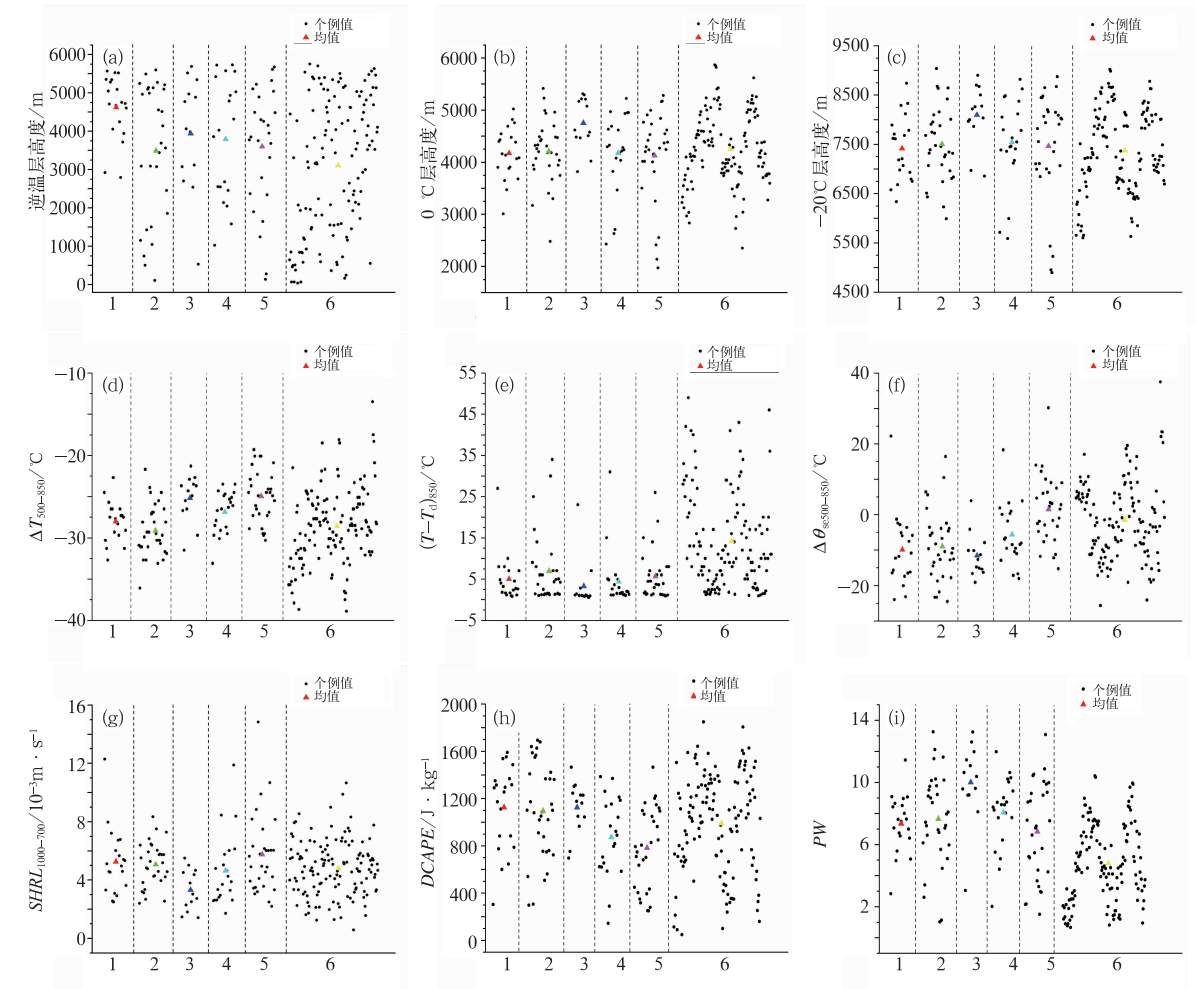


图 1 冰雹、雷暴大风、暴雨、稳定性降水、无降水日的 (a) 逆温层高度; (b) 0 °C 层高度; (c) -20 °C 层高度; (d) 500 hPa 与 850 hPa 温差; (e) 850 hPa 的温度露点差; (f) 500 hPa 与 850 hPa 的 θ_{se} 差; (g) 1000 hPa 到 700 hPa 垂直风切变; (h) 下沉对流有效位能 $DCAPE$; (i) 大气可降水量 PW

圆点: 个例值, $\blacktriangle$: 个例均值; 1: 冰雹, 2: 雷暴大风, 3 和 4: 暴雨, 5: 稳定性降水, 6: 无降水日

Fig. 1 Scatter diagrams of nine physical parameters for six weather conditions of (1) hailstone, (2) thunderstorm gale, (3) rainstorm, (4) rainfall of 50 mm/3 h, (5) rainfall of 20 mm/h, and (6) non precipitation. (a) inversion height, (b) 0 °C height, (c) -20 °C height, (d) temperature difference between 500 hPa and 850 hPa, (e) depression of dew point at 850 hPa, (f) θ_{se} difference between 500 hPa and 850 hPa, (g) vertical wind shear from 1000 hPa to 700 hPa, (h) $DCAPE$ (descending convection available potential energy), and (i) PW (precipitable water)

round point: case value, triangle: average value

计发现,冰雹和雷暴大风的高低空温差均值可达-28 °C 以上,而暴雨均值为-25 °C,两者之间温差 3~4 °C。说明不太大的高低层温差条件即可产生暴雨,但是强的雷暴天气必须要达到比较大的温差才有可能出现(见表 1,图 1)。这种差异反映了对流层中层不同强度的冷空气对不同对流天气形成过程的影响。

温湿条件的差异对于强对流天气的类别有重要

的影响。从 500 hPa、850 hPa 的温度露点差统计看出:冰雹和雷暴大风一般具有上干下湿的特点,高空的温度露点差可达 28 °C 以上,高层干冷空气的侵入有利于强雹暴的产生和发展;而暴雨需要整层的湿层,低层的温度露点差约为 3 °C,接近饱和。从单个个例来看高层 500 hPa 的 $T-T_d$ 不确定性较大,离散度较高。而暴雨个例中低层的 $T-T_d$ 仅有两次过程异常大,这可能与暴雨落区距离探空站较远有

关,因此影响了 σ 大小(见表 1,图 1)。

此外,我们还统计了大气可降水量(PW),结果表明单位面积整层气柱中的可降水含量越多越容易产生 50 mm/3 h 的大暴雨(均值约 10 cm),但是冰雹、雷暴大风、20 mm/h 的暴雨以及一般性降水 PW 的统计值相差不大(见表 1,图 1)。

强对流天气发生一般具有比较明显的层结不稳定特征,统计结果表明 500 hPa 与 850 hPa 的 θ_{se} 差更能指示暴雨的发生,其具有更强的不稳定性。虽然 σ 偏大,但分析发现是受两个个例的不稳定程度不明显或者较差影响的,大部分的集中度较高(见表 1,图 1)。

2.3 动力条件

冰雹和雷暴大风具有更大的对流层中低层垂直风切变,量值可达 $5\times10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 以上(表 1),而暴雨虽然也要求低层有一定大小的垂直风切变,但从量值上来看大部分个例风切变值比前两者要小。这一结果证实了暴雹的流场结构模型,比较大的低层风切变有利于强雷暴的产生和发展。

通过上面的分析可以看出,0℃层高度、-20℃

层高度、500 hPa 与 850 hPa 温差、逆温层高度、低空风切变能比较显著地区分冰雹和暴雨天气,其 σ 也比较小;此外 850 hPa 的温度露点差、500 hPa 与 850 hPa 的 θ_{se} 差值(定义为对流稳定度指数^[15])、大气可降水量也是暴雨天气的重要判据。

3 物理量的时间变量在甄别三种强对流天气过程中的作用

对于 6 小时、12 小时以及 24 小时变量的统计发现,12 小时变量受日变化因素影响变化波动较大,而 24 小时变量和 6 小时变量能反映出强天气发生前的物理量变化趋势,尤其表现在临近 6 小时物理量的变化上(这里仅给出 6 小时统计结果,见表 2),由于北京地区多数强对流天气现象发生于午后至前半夜,因此,14 时的加密探空对于强对流的临近预报是至关重要的^[16]。通过统计分析发现以下几个物理量[CAPE、DCAPE、K 指数、PW、500 hPa 和 850 hPa 的 θ_{se} 差($\Delta\theta_{se850-500}$)、低层的垂直风切变(SHRL)]的 6 小时变量在 3 种强天气下具有显著差异。

表 2 三种强对流天气有显著差异的物理量的 6 小时变量(Ave 表示各类天气下所有样本的均值)
Table 2 The 6 h variations of physical parameters with great differences for three categories of severe convective weathers

	冰雹				雷暴大风				暴雨(>50 mm/3 h)			
	Ave	百分比/%			Ave	百分比/%			Ave	百分比/%		
$\Delta\text{CAPE}(\geq 450/\geq 650/\geq 850)$	659	60	50	40	709	50	44.44	38.89	170	29.41	17.65	17.65
$\Delta\text{DCAPE}(\geq 50/\geq 90/\geq 120)$	119	54	46	38	121	66.7	66.7	61	45	50	43.75	43.75
$\Delta\text{KI}(\geq 2/\geq 4/\geq 6)$	4	60	60	40	1	38.89	27.78	27.78	1	35.29	29.41	17.65
$\Delta\text{PW}(\geq 0/\geq 1/\geq 2)$	-0.27	33.3	16.7	0	-0.32	38.9	22.2	11.1	0.96	75	43.75	18.75
$\Delta(\theta_{se})(\leq -2/\leq -4/\leq -6)$	-4	70	60	40	-5	61.1	38.89	27.78	2	29.41	23.53	11.76
$\Delta\text{SHRL}(>0/\geq 2/\geq 3)$	1.7	90	50	30	0.2	55.56	27.78	0	-0.2	23.53	11.76	5.88

3.1 CAPE、DCAPE 的 6 小时变量

冰雹和雷暴大风发生前能够在比较短的时间积聚较大的能量,统计发现临近 6 小时冰雹和雷暴大风的 CAPE 增量远大于暴雨,其中冰雹发生前 CAPE 6 小时增量约 659,并且 60%以上大于 450,半数以上可达 650。雷暴大风 6 小时 CAPE 的增量均值达到约 709,而暴雨前 6 小时增量均值仅有 170。

虽然就 ΔDCAPE 变量本身来说在 3 种强天气下差别不大,但是其 6 小时的变量似乎更有意义。统计发现,雷暴大风 DCAPE 的 6 小时增量尤为明显,60%以上增量能达到 120 以上,冰雹天气次之,而暴雨多数情况下 ΔDCAPE 的增量不明显。

3.2 K 指数的 6 小时变量

统计发现,3 种强对流天气 K 指数 24 小时的变

量都有比较明显的增大(增值大约在 4~8℃左右),并不能区分将出现哪种强对流天气。但是 6 小时的变化却能在临近时刻比较好地反映出冰雹天气。60%的冰雹出现前 K 指数的增量可达 4 以上;而大部分的雷暴大风和暴雨的 6 小时 K 指数增量小于 2。

3.3 大气可降水量 PW

大气可降水量 PW 的 6 小时变量大于等于零时出现暴雨的几率大(>75%),而冰雹和雷暴大风天气对于水汽的要求不是很高,因此在这两种强天气下大气可降水量 PW 的增量不明显,甚至还有减小的趋势(其均值均小于 0)。

3.4 层结的稳定度以及低层垂直风切变变量

统计发现,层结的稳定度($\Delta\theta_{se}$)以及低层垂直风

切变这两个物理量的临近6小时变量在冰雹(雷暴大风)与暴雨之间有相反的趋势。冰雹和雷暴大风的层结稳定度在临近6小时趋于越来越不稳定,60%以上的冰雹和雷暴大风500 hPa和850 hPa θ_{se} 差减幅达到4以上,而暴雨的增量均值反而大于0,表明短时暴雨临近时刻,层结的稳定性是趋于减弱的。

对于风场来说,3种强对流天气均需要一定的中低层风切变存在,但是大部分暴雨发生前低层风切变减小,而冰雹和雷暴大风则相反,冰雹低空垂直风切变的半数以上增幅大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;雷暴大风次之。由此可见,中低层持续增强的垂直风切变在临近时刻对于雷暴的触发确实有重要的作用。

4 结 论

利用北京南郊观象台的加密探空资料对2007年和2008年的冰雹、雷暴大风、暴雨强对流日多种物理量的统计计算分析,初步得到了一些能有效识别强对流天气及其类型的物理量及时间变量,结论如下:

(1) 预报中常用的CAPE、K指数能用来判断是否出现强对流天气,但是并不能甄别强对流天气的种类。

(2) 雹暴的发生要求环境空气的 $^{\circ}\text{C}$ 层和 -20°C 层的高度不宜太高, 0°C 层高度约4000 m左右, -20°C 层约在7400 m左右,这两个特性层的高度都要明显低于暴雨约500~600 m。并且冰雹的发生一般在低层有比较深厚的逆温层。

(3) 冰雹和雷暴大风要求500 hPa和850 hPa的环境温差达到 -28°C 左右,而不太大的高低层温差条件即可能产生暴雨,仅在 -25°C 左右。大部分暴雨的产生要求具有整层湿的垂直结构,并且低层850 hPa的温度露点差均值约为 3°C ,接近饱和,说明充足的水汽供应对于暴雨是必要条件,但并非冰雹和雷暴大风的必要条件。

(4) 单位面积整层气柱中的可降水量PW越多越容易产生 $>50\text{ mm}/3\text{ h}$ 的大暴雨,冰雹、雷暴大风、 $20\text{ mm}/\text{h}$ 的暴雨以及一般性降水PW的值相差不大。

(5) 500 hPa与850 hPa的 θ_{se} 差($\Delta\theta_{se500-850}$)更能指示暴雨的发生,其具有更强的不稳定性。冰雹天气发生前具有较大的低空垂直风切变,量值可达 $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 以上,而暴雨发生前虽然也有低空垂直风切变存在,但量值比较小。

(6) 探空资料的6小时变量在临近预报中比参量本身的大小具有更重要的指示意义^[17];冰雹和雷

暴大风发生前6小时CAPE的增量远大于暴雨的增量,DCAPE6小时增量也比其自身对于雷暴大风的预报意义更明显。冰雹的K指数在临近6小时出现 4°C 左右的增幅,而大部分雷暴大风和暴雨的增幅小于2。

(7) 绝大多数的暴雨天气大气可降水量PW在6小时内都出现增加的趋势,而冰雹和雷暴大风发生前PW是减小的。

(8) 大部分冰雹和雷暴大风500 hPa与850 hPa θ_{se} 差($\Delta\theta_{se500-850}$)6小时内减幅达到4以上,而暴雨不稳定性反而趋于减弱。

(9) 大部分暴雨发生前低空风切变减小,而冰雹和雷暴大风则相反,半数以上的冰雹天气低空垂直风切变6小时增幅大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;雷暴大风次之。

参考文献

- [1] 葛润生. 1964年北京地区降雹过程的雷达分析[J]. 气象学报, 1966, 24(2): 213-222.
- [2] 马振骅, 刘锦丽, 马建骊. 冰雹云的指状回波结构及其形成机制探讨[J]. 大气科学, 1980, 4(1): 21-29.
- [3] 李云川, 王福侠, 裴宇杰, 等. CINRAD/SA雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象, 2006, 32(10): 66-71.
- [4] 王令, 康玉霞, 焦热光, 等. 北京地区强对流天气雷达回波特征[J]. 气象, 2004, 30(7): 31-35.
- [5] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
- [6] 曾小团, 梁巧倩, 农孟松, 等. 交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用[J]. 气象, 2010, 36(1): 31-40.
- [7] 张德林, 马雷鸣. “0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象, 2010, 36(3): 62-69.
- [8] 何晖, 张蕾, 宛霞. 北京地区几次冰雹大风天气过程的地闪特征与雷达回波的对比观测. 中国气象学会2006年年会论文集, 2006年.
- [9] 叶笃正. 探空资料的应用(一)[J]. 气象, 1977, 2(11): 12-19.
- [10] 叶笃正. 探空资料的应用(二)[J]. 气象, 1977, 2(12): 24-26.
- [11] 王笑芳, 丁一汇. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 173-183.
- [12] 刘玉玲. 对流参数在强对流潜势预报中的应用[J]. 气象科技, 2003, 31(3): 19-23.
- [13] 田生春, 杜长萱. 北京地区暴雨时各层温、湿、风的统计特征[J]. 大气科学, 1983, 7(1): 70-79.
- [14] 廖晓农, 俞小鼎, 于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 12-19.
- [15] 叶爱芬, 武志方, 肖伟军, 等. 对流有效位能在强对流预报中的应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 70-76.
- [16] 廖晓农, 俞小鼎, 潭一洲. 14时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用[J]. 气象, 2007, 33(3): 30-34.
- [17] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 气象出版社.