

北京地区强对流天气短时 预报方法的研究

王笑芳 丁一汇

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

本文由两部分组成, 第一部分分析了北京地区冰雹落区与中尺度天气系统、散度场、涡度场、地面总能量场及相对湿度分布的关系。在此基础上概括出冰雹落区的概念模式, 为冰雹落区预报提供了一种依据。第二部分说明了利用北京 08 时单站探空资料预报强对流天气有无及强度的判断树方法, 为强对流天气的短时预报提供了有应用价值的思路和方法。

关键词: 强对流天气; 灾害性天气; 天气预报; 北京

一、引 言

暴雨和强对流天气(冰雹、雷暴、大风等)是北京地区夏季(6—8月)主要的灾害性天气。由于它们的发生发展具有突发性, 常使人们来不及作好充分的应急准备, 给人民的生命、财产造成严重的损失。因此, 如何有效地作好北京地区夏季灾害性天气预报, 是一件有关国计民生的大事。

为了做好北京地区夏季灾害性天气预报, 北京市气象局开展了3年(1984—1986)的中尺度天气观测和研究工作, 在暴雨和强对流天气发生时期内的地面和高空资料进行了加密观测。试验期间, 他们综合考虑各种预报方法, 提出了短时预报的一般流程¹⁾。此外, 作为“七·五”攻关项目之一的“京、津、冀灾害性天气预报方法的研究”也取得了很大成果²⁾。

本文的目的是在上述工作的基础上, 对制作北京地区6—18小时的强对流天气(主要是冰雹)预报方法作一些探讨。这个预报方法共分两个步骤, 首先是在测站较稠密的地面天气图上确定强天气可能出现的区域。为此, 本文分析了冰雹时期北京地区中尺度系统的演变及其与地面一些物理量场的配置关系。第二步是利用北京单站探空资料, 根

1990年11月8日收到, 1991年3月14日收到修改稿。

1) 北京市气象局, 1987, 北京地区夏季灾害性天气短时预报手册。

2) 国家气象局气象科学研究所中尺度研究所, 1989, 京津冀中尺度气象试验基地文集。

据强对流天气发生时的有关条件, 确定其发生的可能性和对流性质。

二、资料选取和计算方法

自 1984 年北京市气象局开展短时预报研究以来, 依据中尺度天气的尺度特征及监测系统的基本要求, 强化了常规地面观测网, 增加了现有气象站网的空间分布密度及观测时次。1984 年和 1985 年间, 他们以原有的 21 个常规地面气象站为基础, 增设了季节性临时观测站 16 个, 达到每 400 km^2 有一个地面观测发报站。除此以外, 在有重要天气时, 他们将每天 4 次的观测增加到 8 次 (3 小时一次) 或每小时一次, 从而获得了较高时间分辨率的实时地面气象资料。

本文用北京市气象局 3 年试验期间获得的加密观测资料, 对冰雹日各天的地面物理量进行一天 5 次的中尺度诊断分析。所选个例的日期、诊断时次等都列在表 1。

表 1 所选个例的日期及诊断时次 (时间: 北京时)

日 期	落雹时间	落 雹 地 点	诊 断 时 次	气压分型
1985-06-20	17:00—18:34	门头沟、延庆、怀柔、平谷、昌平、密云	08, 11, 14, 17, 20	A
1984-06-18	17:35—22:00	海淀、朝阳、密云、大兴、延庆	08, 11, 14, 17, 20	
1984-08-06	17:00—23:30	朝阳、延庆、怀柔、密云、房山	08, 11, 14, 17, 20	
1985-07-25	14:10—16:10	门头沟、怀柔、房山、延庆	08, 11, 14, 17, 20	
1984-07-08	17:40—19:08	平谷、延庆、怀柔	08, 11, 14, 17, 20	
1984-06-02	20:45—21:00	怀柔、密云、顺义	08, 11, 14, 17, 20	B
1984-07-27	19:15—19:18	昌平、怀柔	08, 11, 14, 17, 20	
1985-07-02	17:00—18:30	门头沟、房山	08, 11, 14, 17, 20	
1984-08-07	22:42—22:43	海淀	08, 14, 17, 20	D
1985-08-05	17:30—18:00	顺义	08, 11, 14, 17, 20	C

本文的客观分析采取有限元客观分析法, 网格距是 $20 \times 20 \text{ km}$ 。计算的地面物理量共有 10 个要素, 它们是散变、涡度、总温度、相对湿度、水汽能量散度、涡度平流、总温度平流、总温度梯度、涡度平流的局地变化、总温度平流的局地变化。

三、冰雹日地面中尺度天气系统的演变

根据 47 个地面站的气象资料分析了北京地区的地面天气图, 发现北京地区有冰雹的时候, 主要存在着 3 种中尺度系统: 中- α 尺度低涡, 中尺度切变线和气旋性弯曲与反气旋性弯曲相对而形成的涡旋对流场。

所分析的 10 例中, 在 08 时的地面图上, 北京地区都有一个中低涡存在, 有 8 例其中心位置位于昌平附近; 另外 2 例低涡位置距昌平有一定距离, 但在 11 时, 低涡又移到昌平附近, 并在此处加深发展。因而, 昌平附近 08 时的图上是否存在一个中低涡或者是 11 时以后别处的低涡能否移到昌平附近是北京地区当日是否会产生冰雹的一个可

能先兆。所选的 10 例中,午后都有中尺度切变线出现;冰雹过后,切变线消失。地面流场随时间的变化也很有指示性。在 08 时,北京地区大多数台站风速很小,只有 $1-2 \text{ m/s}$,风向也很紊乱,基本以弱偏北风为主。11 时或 14 时以后,北京地区的偏南风加强,出现一个很有秩序的流场,西部呈气旋性弯曲,而紧挨着这个气流的东部却存在着曲率为负的反气旋,结果形成一个正负相对的涡旋对,其中气旋要比反气旋强。这种流场在冰雹发生前一直在加强,到冰雹发生时,流场中南部的南风增强,切变明显。冰雹过后,此种流场便不复存在,北京地区又转为偏北风控制。流场的这种发展趋势在图 1、图 2 中可以明显看出。因此,涡旋对流场的出现与发展对北京地区冰雹的产生有着重要作用。它有利于向北京地区输送水汽和能量。地面流场的演变与地面天气系统的发展变化紧密相联。根据 08 时地面低涡的位置以及中尺度气压系统的演变形式,我们把 10 例分成 A、B、C、D 4 种类型。并将其对地面中尺度气压系统的发生、发展、消亡规律逐一进行分析。

A 型——中间低两边高型：共 4 例，见表 1。此型的特点是 08 时昌平附近都有一个中低压存在，中低压随时间逐步加深。在 14 时左右，气压场呈现两高一低的形态，北京地区中心部位是一个与流动相配合的低涡，东南与西北部则为小高压控制，即中间

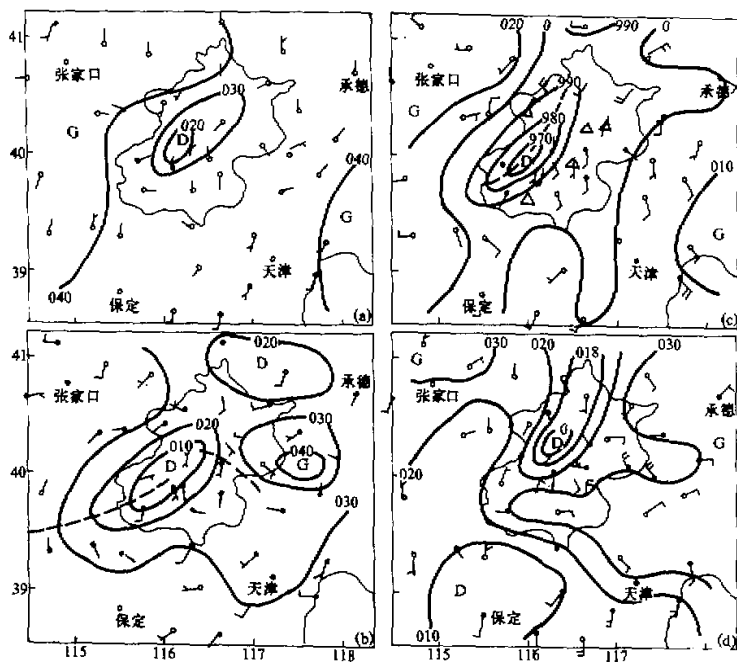


图 1 1984 年 8 月 6 日 08 地面天气图

(a) 08 时; (b) 11 时; (c) 17 时; (d) 20 时

实线是等压线 (气压值省去百位与千位, 带一位小数, 如 02 代表 1002.0 hPa),

虚线是切变线, $\triangle$ 是落雹点

气压低, 两边气压高。为了说明这种中尺度气压场是如何发展的, 我们以 1984 年 8 月 6 日为例进行讨论 (图 1)。

从图 1 中可知, 北京地区 08 时基本为静风区, 在昌平附近存在着一个中低压, 气压最低值为 1002 hPa。在 11—14 时, 低涡发展加深。北京地区的流场在 11 时就变得非常有规律, 出现前面介绍过的涡旋时, 切变也已出现。在 14 时, 北京地区南风加强, 风速加大, 气压场呈现中间低两边高型式, 东南部的高压向北京地区输送暖湿气

流, 西北部的高压向北京地区输送干冷空气, 增强了北京地区局部的斜压性, 有利强天气的发生 (气压场与 17 时差异不大, 见图 1c)。在 17 时, 低涡发展到最深, 中心气压下降到 997 hPa, 东南部的南风大大加强, 西北部偏北风加强, 切变线与低涡相合, 呈东北—西南走向。冰雹发生 17 时以后, 落点是在低涡中心及外围的延庆、昌平、怀柔、密云、朝阳、房山。到 20 时, 地面气压回升, 昌平的气压已经上升到 1000 hPa, 中间的低压位置已被小高压脊所取代, 规则流场消失, 切变已不存在。此时冰雹已经结束。

B 型——中间高两边低型: 此型也有 4 例, 见表 1。此型在 08 时与 A 型没有多大区别, 昌平附近也有一个中低压, 并随时间而加深发展; 但 14 时左右, 气压场的形状与 A 类不同, 它是东西两边低, 北京地区中心是一高压。下面以 1984 年 7 月 8 日为例, 说明这类天气过程的发展规律 (图 2)。

从图 2 可见, 北京地区 08 时基本为静风, 风向紊乱, 昌平附近有一闭合的低涡, 中心气压为 1002 hPa。到 14 时, 中低压中心偏西, 向东为一横槽, 中心气压下降到 999 hPa, 中部地区为高压控制; 再向东又有一小低涡, 气压场呈中间高两边低的型式。此时的流场非常有序, 涡旋对、切变线皆已出现。到 17 时, 横槽又演变成低压东移到昌平附近, 南部为一致的偏南风, 北部转为偏东风, 与偏南风形成一条东西走向的横切变。未来的冰雹落在此切变线北侧的延庆、密云、平谷, 时间是 17:40—19:08。到 20 时, 低涡减弱, 切变消失, 北京地区已被偏

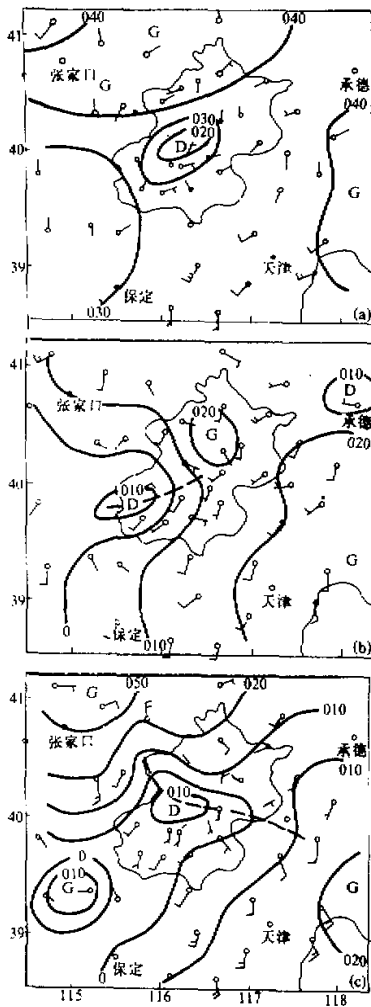


图 2 1984 年 7 月 8 日地面天气图

(a) 08 时; (b) 14 时; (c) 17 时

图例同图 1

东及偏北风控制。

C 型——低涡西移型: 此类仅有 1985 年 8 月 5 日一例, 特点是在 08 时的天气图上, 低涡的位置在平谷以东; 11 时, 低涡西移到昌平附近, 并在那儿摆动加深。此型的发展规律, 除 08 时低涡位置在昌平以东外, 与 A 型的发生发展并无多大区别。为节省篇幅, 我们就不再详细分析, 此处只给出 17 时的地面天气图 (图 3)。

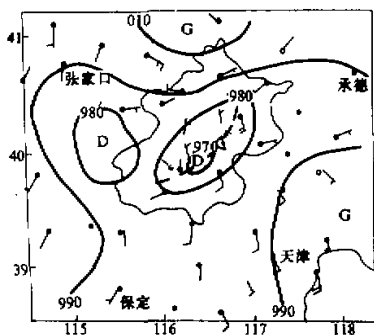


图 3 1985 年 8 月 5 日 17 时的地面天气图
图例同图 1

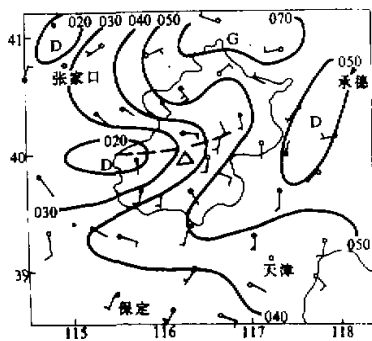


图 4 1984 年 8 月 7 日 20 时的地面天气图
图例同图 1

D 型——低涡东移型: 此型也只有 1984 年 8 月 7 日一例 (图 4)。与 C 型相反, 在 08 时的地面图上中低压位置偏西, 位于河北省与北京交界的山区。11 时东移到昌平附近, 14—17 时低压加深, 中心气压值为 1002 hPa。20 时低压区中切变线形成, 并横贯北京中部, 切变线以南南风加强。冰雹天气发生在 22:42—22:43, 主要位于切变线南缘的海淀。23 时中低压西退到蔚县附近, 气压值回升到 1004 hPa, 北京地区切变线消失, 并由东风控制。

四、地面物理量场与冰雹落区的关系及其天气学模式

在总共计算的 10 个地面物理量中, 经过仔细分析发现, 与冰雹落区对应关系较好的只有 4 个: 散度、涡度、总温度和相对湿度。水汽通量散度的分布与散度基本上是一致的。另外, 几个物理量与雹落区的关系不很明显。下面仅就散度等 4 个物理量场与冰雹落区的关系进行讨论。

1. 地面散度和涡度

上一节已指出, 08 时北京地区都有一个中低涡存在, 相应的地面散度场是辐合区, 涡度场则是正涡度区。11—14 时以后散度和涡度场随气压场变化而发生较大调整。在 17 时 A 型中与切变线相应的地区出现一个辐散带, 离切变线两侧稍远处 (20—40 km) 则是辐合带, 如图 5 所示, 冰雹落区位于辐合和辐散之间的地区。在涡度分布上, 冰雹落在最大正涡变区的边缘。

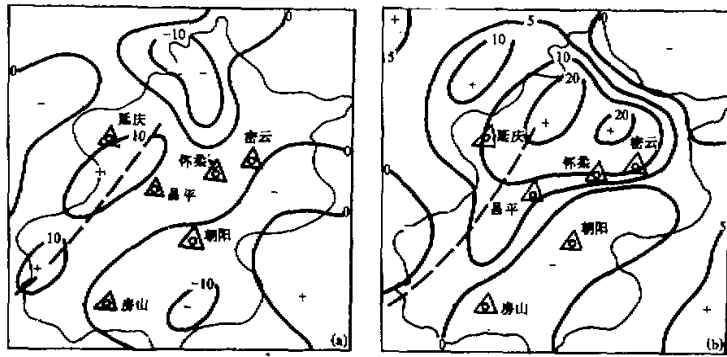


图 5 1984 年 8 月 6 日 17 时散度 (a) 和涡度 (b) 分布
粗实线是等散度和等涡度线 (单位: 10^{-5} s^{-1}),
粗虚线是切变线, $\triangle$ 是当日落雹点

B 型的情况与 A 型不同, 冰雹发生前切变线对应的不是辐散带而是辐合带, 冰雹的落区在切变线北侧辐合带与正涡度区重合的区域。C 型、D 型的情况类似, 冰雹落区在正涡度中心后部, 切变线边缘、辐合与涡度中心的交界处。

2. 地面能量场

从 10 个例子的分析可知, 冰雹落区大都在能量锋区及其附近。图 6 是一个实例。从图上可看出, 高能舌在东部向北扩展, 而低能舌在西部向南侵入。冰雹出现在能量锋区靠高能区的一侧。

3. 地面湿度场

在相对湿度场的分布中, 冰雹的发生地点有的在高相对湿度区之内, 如 1985 年 8 月 5 日; 有的在露点锋上, 如 1985 年 6 月 20 日; 有的则在鞍形场中心, 如 1984 年 6 月 18 日; 还有的发生在湿区与干区的过渡范围内, 如 1984 年 7 月 27 日。由此可见, 冰雹对相对湿度的条件要求并不高, 只要满足一定的温度条件即可。

如果根据地面的中尺度分析, 在 08 时的地面图上, 昌平附近有中低压存在, 而且又有能量场的锋区与之相配, 湿度场度也能满足一定的湿度条件, 我们就可以由此确定冰雹的可能落区。

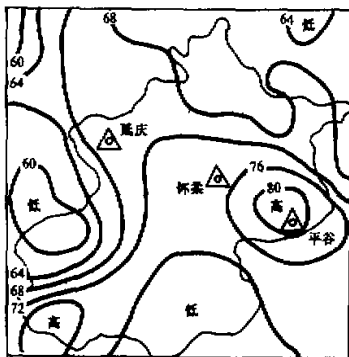


图 6 1984 年 7 月 8 日 17 时能量场分布
粗实线是总温度线, 单位: $^{\circ}\text{C}$, $\triangle$ 是当日落雹点

五、预报强对流天气的判断树方法

如何准确预报北京地区强对流发生的地点和时间, 是一个较为困难的问题。首先我们先要能判断即将发生的天气是强对流还是暴雨。丁一汇等^[1]指出强对流天气与暴雨之间以及不同类型暴雨内部在散度场、涡度场、温度平流、水汽辐合等方面具有明显不同的分布特征。但是, 暴雨与强对流又相互联系, 如可造成局地暴雨的强雷雨就是强对流天气的一种形式。暴雨与强对流天气之间这种复杂的关系, 进一步使强天气预报变得困难。另外还有一个问题是, 如果已确定了将要发生强对流, 那么其强度应如何判定。

天气预报是一个很复杂的物理问题, 考虑所有方面是不容易的, 所以这一部分主要对强对流的单点预报方法的进行的初步讨论。

根据文献[2]的思路启示, 我们结合北京地区的实际情况, 经过反复比较与推敲, 设计了一个适合于北京地区判断强对流天气发生的判断树方法(图7)。图7中所选的都是与强对流有关的最基本的气象要素。这个方法共分三步, 现对这三步判断逐一进行说明。

1. 有无强对流天气的判断

图7中的第1—4判断是用来确定北京地区有无对流天气发生的。第1判断由大尺度预报结果提供, 是本判断树是否进行的前提, 它可综合卫星云图、雷达观测、数值预报产品、08时探空资料分析出的大尺度环流势及天气尺度系统等预报结果而得出。如此判断预报北京地区在未来18小时内不会产生任何天气, 则下面的判断就无需连续进行。如08时北京地区存在有利于天气发生的环流和天气系统, 则进入第2判断。

第2判断: 位势不稳定层结是对流天气发生的重要条件, 用于位势不稳定层结判别的参数很多, 如沙瓦特数(SI)、 K 指数等等。根据游景炎的工作^[3], 选择哪种参数与预报效果并没有太大关系。在此, 我们选用抬升指数 LI , 如果 $LI < 0$, 则表示层结稳定; $LI > 0$, 则表示层结不稳定; $LI = 0$ 是中性层结。

第3判断: 下一步是计算层结曲线与状态曲线之间所包围的面积, 判断正不稳定能面积 S_+ 是否大于负不稳定能面积 S_- , 由此判断对流天气是否会发生。

第4判断: 一个有效的触发机制, 在强对流天气发生的初期是非常重要的。触发机制是很多的, 可以是气团的整层抬升, 也可以是高空槽、切变线、低压、低涡等。在第三、第四节中分析的中低压和切变线就是明显的触发机制。在北京地区, 一般如果由中尺度系统扰动而使地面散度的辐合值达到 $10^{-4} s^{-1}$ 的量级, 就可产生强对流^[1]。

图7中的判断5、6非常重要。强对流天气的产生必须具备两个条件, 适当的垂直风切变以及中层干冷空气的侵入。

第5判断: 观测研究证实, 强对流天气与强垂直风切变紧密相连。李吉顺等^[4]对北京地区1970—1979年5—9月59个强对流个例的环境风垂直分析进行了统计分析, 得出如下结论: ①59个强对流天气的平均环境风的垂直分布是风向从低层至高层有一个从

1) 北京市气象局, 1987, 北京地区夏季灾害性天气短时预报手册。

2. 有无强对流的判断

第 6 判断：中层（700—400 hPa）是否有干冷空气入侵，是区别强对流与暴雨的一个重要指标。暴雨与强对流产生的物理因子有不少是共同的，如需有位势层结不稳定、触发机制、一定的风切变等，但在温湿环境上两者却有很大的不同（见表 2）¹⁾。从表 2 中可以明显看出，500 hPa 上的温度、露点强对流天气都比暴雨低得多，说明强对流发生前 500 hPa 的空气要比暴雨发生前 500 hPa 的空气干冷得多。文献[4，5]的资料分析统计也证实了这一点，因而在中层无干冷空气入侵条件下，应进一步做有无暴雨的判断。

表 2 暴雨与强对流发生前的温湿条件比较

天 气 \ 物 理 量	T_{500} (℃)	T_{850} (℃)	T_{d500} (℃)	T_{d850} (℃)	$\Delta T_{500-850}$ (℃)
暴 雨	-2.2	19.4	-6.4	17.0	-21.6
强对流	-8.4	18.1	-17.3	12.1	-16.5

3. 强对流各类天气的分类

图 7 中的判断 7、8、9、10、11 是用来判别强对流天气到底是以什么样的形式出现的，是强雷雨，还是冰雹，还是两者同时发生；出现的强雷雨有没有引起局地洪水的可能性等等。

第 7、8 判断是根据文献[5]对北京地区暴雨日各层温、湿、风的统计以及我们对 1983—1986 年 6—8 月北京地区冰雹发生日 08 时各层的相对湿度计算结果而得出的，见表 3。

表 3 暴雨、强对流各类天气发生日 08：00 时各层的平均相对湿度（单位：%）

天 气 \ 高 度	地面	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa
多年气候值 ¹⁾	86.1	65.0	58.4	43.1	41.8	40.2	未算	34.4
暴雨日 ²⁾	91.3	84.5	74.5	64.8	56.9	53.8	未算	47.7
雹+大雨 ²⁾	86.2	73.5	65.1	68.6	60.0	60.0	54.8	47.5
雹+大雨 ²⁾	75.5	60.2	48.4	46.1	33.9	37.9	38.0	35.8
无雹+大雨 ²⁾	86.8	75.3	68.7	62.4	55.7	53.4	49.8	46.6
无雹无雨 ²⁾	53.4	35.7	37.8	25.6	22.7	28.4	28.1	28.1

注：①是文献[5]的计算结果，②是作者的计算结果

1) 吕达仁，中尺度气象的现代化探测和预报技术系统，超短期天气预报的原理和方法（一），中国科学院大气物理研究所编。

从表 3 可以看出,暴雨日各层的相对湿度都比多年气候值大 10% 以上,从地面到 200 hPa 整层大气异常潮湿。有雹且有大雨日和无雹大雨日的情况与暴雨日基本一样,各层(除地面)都比多年的气候平均值大 10% 左右。雹加小雨湿度分布则是中低层(地面—850 hPa)较湿,中高层却很干,400 hPa 以上各层的相对湿度小于 40%。无雹无雨的天气则是整层干燥,850—500 hPa 各层的相对湿度小于 50%,400 hPa 以上则小于 30%。因此,判断树中可用整层是否干燥这个特征来把非雹非雨却属于强对流天气的龙卷和风暴从别的天气中区别出来。

其次,在前面已提到过雹加小雨的分布特征,它的中低层相对湿度较高,地面是 75.5%,比龙卷时要大 20%,但比大雨的情况又要小 10% 以上,中高层(400—200 hPa)的相对湿度则比大雨时相对湿度明显偏小 10% 以上。因此,不难用判断 8 把雹加小雨的天气与另外两种对流天气区分开。

降雹并伴有大雨的情况与无雹的强雷雨的湿度分布并没有什么区别。如何区分这两种天气呢?这就进入了第 9 判断。周名扬指出:从气候分布概况来看,北京地区发现冰雹有两个必要条件:① 0℃ 层要在 3800—4400m 之间,② 500—300 hPa 之间的厚度要合适¹⁾。如某日的天气满足这两个条件,则出现冰雹,否则只能产生强雷雨。

第 10 判断是简单地用强雷雨的移速来确定是否可能形成局地洪水。强雷雨的移速可根据 08 时的探空资料进行计算^[6]。

第 11 判断是估计是否有雷雨大风同时发生。如果近地面有很强环境风(UHF 雷达风廓线仪可随时获得风廓线),则表明对流天气发生时有大风相伴。

六、结 论

在北京地区 10 个冰雹天气个例地面中分析和物理诊断的基础上,提出了一种强对流天气的短时预报方法。其主要步骤如下:

(1) 如果 08 时昌平附近有一个中低压(或 11 时从别处移来一个中低压),且地面对应的是辐合正涡度区,则可以初步预报北京地区当日有出现冰雹的可能性。

(2) 密切注意中低压的演变,判断切变线、涡旋对流场是否出现并加强。

(3) 根据地面物理量场的诊断分析,参考所得到的几种尺度天气学分析,确定未来冰雹的潜在落区。

(4) 与此同时,用北京地区的探空资料,根据本文提出的判断树方法,进一步确定潜在发生区是否确有强对流出现,并估计强对流天气发生的类型。

上述方法仅仅是预报地区性强对流天气的一个思路,尚停留在研究分析的水平上,今后有待于在实际业务预报中不断加以检验和改进。

致谢:感谢吴正华和石定朴同志的大力协助。

1) 周名扬, 1991, 北京地区冰雹落点预报方法, 北戴河冰雹会议文集。

参 考 文 献

- [1] 丁一汇等, 1981, 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析, 大气科学, 5, No. 4, 388—397.
- [2] Colquhoun, J. R., 1987, A decision tree method of forecasting thunderstorms, severe thunderstorms and tornadoes, *Weather and Forecasting*, 2, 337—345.
- [3] 游景炎, 1981, 华北雹暴发生条件及预报问题, 强对流天气文集, 气象出版社, 1—7.
- [4] 李吉顺, 田生春, 1981, 北京地区强对流环境风垂直分布的一些统计特征, 强对流天气文集, 气象出版社, 149—152.
- [5] 田生春, 杜长萱, 1983, 北京地区暴雨时各层温、湿、风的统计特征, 大气科学, 7, No. 1, 68—77.
- [6] Colquhoun, J. R., 1980, A method of estimating the velocity of a severe thunderstorms using the vertical wind profile in the storm's environments, *Preprints Eighth Conference of Weather Forecasting and Analysis*, Denver, Amer. Meteor. Soc., 316—323.

Study on Method of Short-range Forecast of Severe Convective Weather in Beijing Area

Wang Xiaofang and Ding Yihui

(Chinese Academy of Meteorological Science, State Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

This paper includes two parts. The relations between the hail fallout zone and surface meso-scale synoptic systems, the distribution of divergence, vorticity, total temperature, and relative humidity at the surface in Beijing area are analysed in the first aspect. Thereafter one conceptual model of the hail fallout zone is established, providing a scientific basis for predicting the hail fallout zone. The second part describes a decision tree method of forecasting whether severe convective weather will happen and how strong it will be. This brings us a valuable idea about the short-range forecast of severe convections.

Key words: severe convective weather; disaster weather; weather forecast; Beijing.