

华北地区降雹回波系统的分类及单体特征

杨培才 郭裕福 刘锦丽 马振骅

在人工防雷试验中,需要雷达及时判断一块积雨云是否是冰雹云,并确定它的降雹部位、时间和强度。为此目的就要求对冰雹云回波单体的结构、活动和演变等方面特征有较精细的了解。然而,在实际工作中,为了对冰雹灾害采取适当的防御措施,往往要求更长一些的预报时效。这就迫使我们在研究单块雹云的同时,还必须研究时间尺度更长一些的中尺度降雹回波系统。

本文根据近年来在山西昔阳(1970—1976)和北京(1973—1977)两地用雷达研究冰雹云的结果,总结了冰雹云回波系统和单体的主要特征。

一、几类主要降雹回波系统的特征

华北地区经常遇到的降雹回波系统有以下五类,即南移型飑线回波带、东移型飑线回波带、气团型回波群、超级单体和复合单体。虽然这五类还不能包括所有类型的冰雹云,每类的属性也未能完善地概括出来,但它们基本上能代表大多数较强的冰雹云。下面分别叙述各类降雹回波系统在结构、移动和降雹方面的特征。

1. 南移型飑线回波带 此型的主要特征是整个回波带以及带中的单体都是朝偏南方向移动的,这种移动特性表明回波系统是处在高空槽过境或槽后西北气流控制之下,高空冷空气通常比较活跃,很多强降雹过程发生在这一类中。

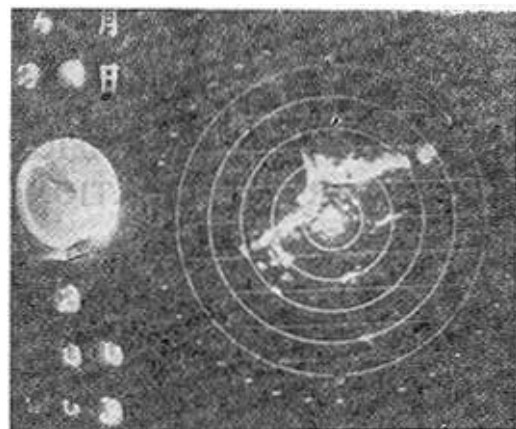


图1 波动型回波带。北京1977年6月29日
22:13, PPI 3°, 距圈每圈20公里

南移型降雹回波带多呈东西向排列。其长度一般在200公里以下,而其宽度仅为一个单体的宽度。有的时候回波带由离散排列的单体组成,在这种情况下,当系统处于强盛阶段时,系统中常有一个尺度和强度皆超过其它单体的主体回波,它们大多为条状或波动型条状。有时回波带也会由多个互相弥合的单体组成,表现为连续的带状形式。图1为一个连续的波动型回波带的实例。

在本型中,回波系统更新的方式大多是在带前激发起新生回波带,亦即原先的回波带

逐渐消亡,新生的回波带逐渐发展成熟,最后取而代之,并继续朝偏南方向移动,呈一种“跃进式”的传播,系统整体得到更新。由于存在这样的传播方式,系统的移速可以大于单体的移速。对于连续的回波带,降雹部位发生在带上的强反射率区内,范围可以较大。对离散的回波带,降雹主要发生在主体回波上,并可能持续较长的时间。非主体回波中的个别强单体有时也可以发生降雹,但一般较弱。

图2是一次南移型飑线回波带活动的过程图,18:18回波带中的单体A已经发展成熟,它于18:21—18:23在延庆西北部降了些小冰雹,到18:28单体A与单体B合并,构成带上的主体回波,并在延庆多处降雹,造成了较重的灾害。18:48单体A+B已经减弱。到19:02回波系统开始发生传播,原先的回波带进一步减弱,而在它的前方大约十公里的地方,出现一条新生的回波带,其中C回波最强,到19:28,新回波带已发展成熟,而老回波带消失,C回波成为新回波带上的主体回波,并在南移过程中多次降雹,雹块最大直径达5—6厘米。20:18回波带到达本场,从20:27到20:32本场也降了雹。回波系统的移速约为35公里/小时。

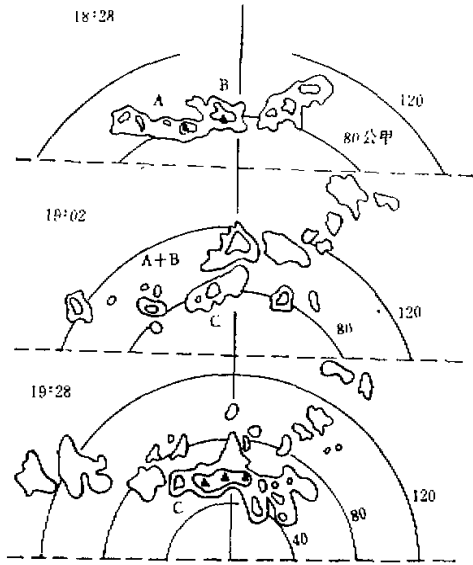


图2 一次南移型飑线回波带活动过程图。
北京, 1974年8月26日, PPI 3°

2. 东移型飑线回波带 此型的主要特征是组成带的单体朝东北方向移动,而整个回波系统朝偏东或东南方向移动。相应的环境高空风为西南风,系统处于高空低槽或低涡前部的西南气流中。本型中的一些强降雹过程都是在高空这种有利的大尺度系统临近时发生的。

东移型回波带多呈东北—西南向或南—北向排列,并常由一些离散的单体组成,在大多数情况下,带上并不存在尺度和强度都十分超越于其它单体的主体回波。此型的一个重要特征是,系统不断地发生局部更新,亦即处于回波带北端的单体逐渐减弱消亡,而带的南端不断有新生回波发展。正是这种回波系统朝偏南方向不连续传播,而回波单体朝东北方向移动的结果,使得整个回波带朝东或东南方向移动。有时在回波系统很强时,也可能出现带前“跃进式”传播。

在本型中,降雹多发生在带中成熟而强大的单体上。单体在降雹后即行减弱,以后也不再发生降雹。随着系统的传播,降雹又发生在下一个发展成熟的单体上,并可依此传播下去,因此东移型飑线回波带降雹具有“传递式”的特征。

图3给出东移型回波带的一个例子。这是1974年7月11日在北京观测到的。13:45位于回波带中段的A回波在昌平降雹,14:11 A回波已经减弱,在它南侧的新生回波B

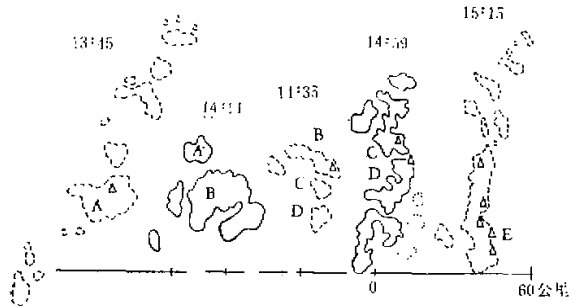


图3 一次东移型飑线回波带活动过程图。

北京, 1974年7月11日, PPI 3°, 距圈每圈20公里

已发展起来。14:35 B回波在怀柔降雪,在它向东北方移动的过程中,其南侧又有新生回波C和D出现。到14:59 C回波发展成熟开始降雪,与此同时位于它南侧的新生回波D也得到发展。在图上还用虚线绘出了高仰角(12°)PPI上所发现的几块新生单体。到15:15这些新生单体合并,形成一块南北向的条状回波E,其长度约为50公里,此回波降下了密度较大的乒乓球大小的冰雹,造成了严重灾害。这个例子清楚地表明了系统中降雪现象在单体间不断转移的特性。这几块降雪回波都移向东北,在降雪时其平均移向为49°,而平均环境风向为27°,因此降雪回波的移向比环境风偏右22°。从13:45到15:15回波带东移了60公里,其平均移速为40公里/小时。

3. 气团型降雪回波群 与前两类回波带不同,气团型回波群是在没有明显的有利天气系统影响下发生的,既没有有利的高空大尺度系统,也没有有利的中小尺度系统。它们多发生在高空脊前的暖气团里,有时亦会发生在高空横槽后部的冷气团里。在这两类气团中,高空环境风速通常较小,而且风向散乱,因此这类回波群无明显的有组织的排列,

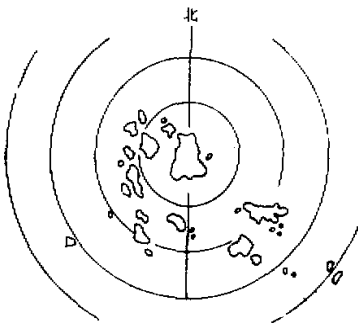


图4 一个暖气团内的降雪回波群。

北京, 1974年8月6日, 17:01,

PPI 3°, 距圈每圈20公里

单体分布杂乱, 生消呈此起彼伏的状态。回波容易在中午或下午热力条件比较有利的情况下产生, 而且大都出现在山区上空。其移动受中层环境风影响。降雪单体虽常是回波群中较强大的单体, 但一般降雪强度较弱, 较少造成灾害。回波在降雪后即减弱消散, 而且降雪回波之间并无互相影响。

图4给出一个气团型降雪回波群的实例。群中回波单体皆较弱小, 垂直尺度一般不超过8公里, 单体生命史约40分钟左右, 降雪回波是图中位于本站上空那块尺度最大的回波。它在本站南面降了短时间的小冰雹。

4. 超级单体 超级单体在观测中并不多见, 它都发生在有利的降雪天气形势下, 有时孤立地出现, 有时周围虽有其它单体, 但与超级单体并无明显的相互作用。超级单体有自己独特的典型结构, 通常只包含一个主要的强反射率核, 低层右前侧存在一个无回波区(或弱回波区)。这些无(弱)回波区有时可深

入到云的中上层而形成穹窿结构。在它的上方和前方是所谓的悬挂回波,其后侧与“回波墙”毗连。这种结构可准定常地维持一段时间,有时可长达1至数小时。超级单体一般偏向高空风右侧移动。它的降雹通常是猛烈的,降雹主要发生在后侧的强区内,并可能在几十到上百公里的路径上形成比较连续的雹击带。有时由于超级单体内部冰雹增长的周期性,地面降雹呈现出“间歇式”特征。

图5给出一个超级单体的观测实例。这块雹云在从延庆到海淀的70公里的路程上断断续续地降雹,雹块最大直径达5—6厘米,有的地方积雪厚达5—6厘米,在多处造成了灾害。这块雹云回波,至少在一小时以上的时间内维持着图上所示的形态。高空平均风向是 300° ,雹云的运动偏向高空风右侧约 40° 。

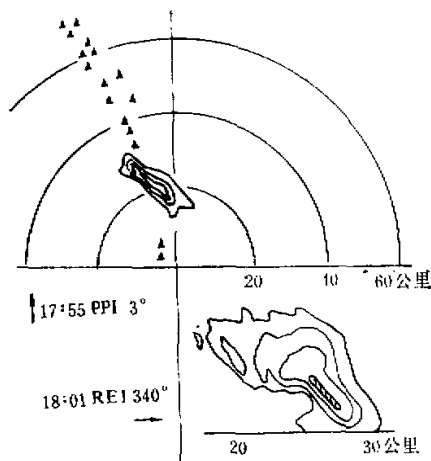


图5 一个造成连续雹击带的超级单体。
北京, 1973年9月20日。

图6是另一块具有穹窿结构的超级单体回波图片。在图上,弱回波穹窿、悬挂回波和回波墙几部分都清晰可见。此时刻对应回波墙的下方降下了成灾冰雹。

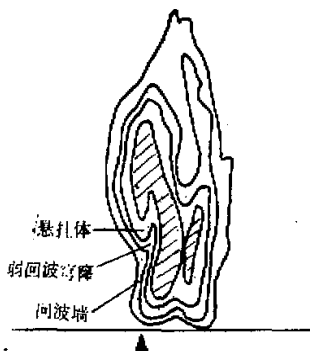


图6 一个超级单体的垂直剖面。
昔阳, 1976年7月9日,
12:36, RHI 220° 。

5. 复合单体

复合单体比较常见,它在结构上的主要特征是:雹云由处在不同发展阶段的若干个小单体组成,其中每个单体都有其新生、成熟和消亡的生命过程。这种发展过程常以如下方式实现,先在离开雹云一定距离处出现新生对流单体,雷达往往首先在高空观测到它的回波,接着新生回波与雹云发生合并,并在合并部位或后来发展的回波部位出现降雹,而原云体回波则减弱。因此复合单体型雹云的运动一般由单体的移动和离散传播两部分合成。这种离散传播在高空风的上游或下游方向都可发生。当它向高空风上游传播时,复合单体回波可以显示出停滞的倾向,或者甚至整体向上游方向移动,或者发生回波取向旋转一定角度的运动。当它向高空风下游传播时,复合单体表现出明显的移动。图7是1975年7月14日在山西昔阳地区观测到的一个向高空风上游方向传播的复合单体。当天高空盛行西北风。这块雹云持续了五个多小时,断续降雹三个多小时,有十几万亩庄稼受灾。

由图可见,15:37 A回波是主体回波,它包含多个强反射率核,其最强部分位于西北端,形成一个伸向西北方的指状突起,对应指状部位的地面上产生了降雹(图中▲)。同时,从图上还可看到在A回波的西北方还有一块回波B,它是由几块新生小回波合并而成

由图可见,15:37 A回波是主体回波,它包含多个强反射率核,其最强部分位于西北端,形成一个伸向西北方的指状突起,对应指状部位的地面上产生了降雹(图中▲)。同时,从图上还可看到在A回波的西北方还有一块回波B,它是由几块新生小回波合并而成

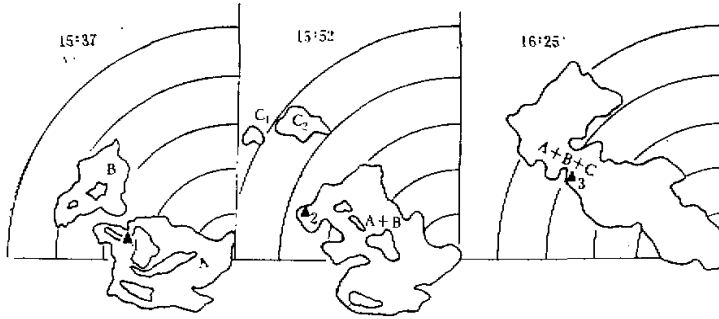


图7 一个复合单体的演变过程图。昔阳, 1975年7月14日 PPI 3°, 距圈每圈10公里。

的。到15:52 A和B回波合并, 接着在合并部位和新生回波部位再次降雹(图中▲₂)。与此同时, 在主体回波的西北方又有新生回波 C₁ 和 C₂ 出现, 大致也是在半小时后, 它们与主体回波合并, 并再次在合并部位和新生回波部位降雹(图中▲₃)。这样大约在一个小时的时间内, 类似的不连续传播过程就发生了两次。在这个复合单体整个生命过程中, 基本保持了这种传播特征。虽然这个复合单体就整体而言在此时段内维持少动, 但回波却不断向西北方向发展。因此降雹地点也由南向北推移。由于回波朝西北方不连续传播和回波向偏东方向移动的结果, 造成了回波系统的长轴取向由开始时的东西向, 转为以后的西北—东南向。

上面讨论的五种降雹回波系统, 除气团型回波群外, 其它四类降雹回波系统都要求有有利的大尺度天气形势相配合。前两类回波带与中尺度切变线活动关系较大, 超级单体和复合单体多与小一些的中小尺度系统活动有关, 其中超级单体与中小尺度涡旋关系更大, 而那种向上风方向传播发展的复合单体还与地形密切相关。因此这几种回波系统的降雹强度通常都较大, 持续时间较长, 影响范围也较大。气团型回波群虽然无明显的影响系统, 但由于存在着有利的大气层结条件, 因此虽然每个单体的降雹时间短, 范围小, 然而作为整个降雹系统, 还是可以存在相当一段时间, 只不过相对另四类而言, 降雹点分散零乱无一定规律罢了。总之, 作为回波系统, 这五类降雹回波系统的生命史都可达几小时, 有的甚至更长一些, 而且可以影响较大的范围, 因此它们都属于中尺度降雹回波系统的范畴。研究这些回波系统在结构、运动和降雹方面的特征将有助于我们延长冰雹警报的时效。

二、降雹回波单体的统计特征

为了进一步正确地报出降雹的地点、时间和强度, 必须更细致地研究组成回波系统的降雹单体的结构和演变特征。

1. 冰雹云的垂直发展 对流云的厚度是衡量对流强度的一个重要标志。根据北京地区73、74和76三年6—9月成熟阶段雹云回波顶高的统计, 其结果是57块雹云回波的平均顶高为10.5公里, 最小为8.0公里, 最大为15.0公里, 顶高在9—12公里之间的占76%。在这些回波中, 有18块是成灾严重的, 它们的平均顶高是12.0公里, 最小为10.0

公里,最大为 15.0 公里。就北京地区夏季的情况来说,自然冻结温度 (-20°C) 的平均高度大约在 7.5 公里左右。上述统计结果是满足这个成雹的物理条件的。

2. 雹云形成阶段的特征 了解雹云形成阶段的特征在雹云回波的研究中具有重要意义,它有助于及早地判断出回波的降水性质和强度。根据我们的研究,处于这个阶段的雹云回波特征主要有两点。

(1) 回波通过合并发展成雹云回波。

根据我们的观测分析,大多数的降雪回波是通过合并发展形成的,这个特点在成灾冰雹云中表现得尤为突出。据昔阳 75、76 两年资料的统计,这种形成方式在成灾雹云中占 88%,在一般雹云中占 23%。回波的合并方式主要有两种,一种是两块或几块新生回波合并发展成冰雹云;另一种是新生回波与原雹云回波合并,在合并部位及新生回波部位发生降雪。整个合并过程通常都进行得十分迅速,有时从合并开始到发生降雪为止,只要十几分钟的时间。

(2) 中高空新生回波的突发式增长。

当降雪回波系统处于新陈代谢过程时,雷达常可发现一些新生回波单体在中高空产生。它们的尺度通常都小于 5 公里。这些单体有时以极其迅猛的速度发展,常在十几分钟的短时间内顶高增长到十几公里,水平尺度扩展到几十公里。在 RHI 剖面上可以看到,回波朝上下两头发展,顶部猛增,而底部着地,与此同时降雪也到达地面。

3. 雹云生命史中回波参数的演变和降雪特征 雹云单体发展史一般可分为三个阶段,即发展阶段,成熟阶段和消散阶段。整个生命史较雷雨云单体长得多,多为 1—2 个小时。

雹云单体在发展阶段雷达回波参数,如回波顶高 (H_m),强回波区顶高 ($H_{\Delta z}$) 都有明显增长,有时这种增长过程进行得很迅速,只要几分钟到十几分钟。这可能是由于云中形成大量冰雹,释放出冻结潜热所引起的。与此同时,反射率表现为开始增长而后又略有下降。下降的原因可能是由于云体急剧膨胀,大粒子浓度降低的结果。

成熟阶段是以 H_m 达到极值为标志的。在这个阶段,一些回波出现特征结构,并维持一段时间。在一般雹云单体中,这个阶段可持续半小时左右。在成熟阶段内,回波参数比较稳定,并维持一个较高的数值,或者稍呈起伏变化。在大多数情况下,降雪开始时间是在回波顶达到最高前后,只有在个别例子中发现在发展阶段也可降落少量冰雹。在一些例子中,也发现在成熟阶段雷达回波参数发生大幅度下降,这可能是猛烈降雪的后果。降雪的顺序一般是先降比较大的冰雹,后降比较小的冰雹。在强降雪开始时,往往先是干雹,然后是雨夹雹。

在消散阶段,回波参数稳定地降到一个低值,特别是强回波区顶高和反射率表现得更为明显。这时回波结构也变得比较松散,逐渐向一般雷雨云或稳定性降水转化。在消散阶段

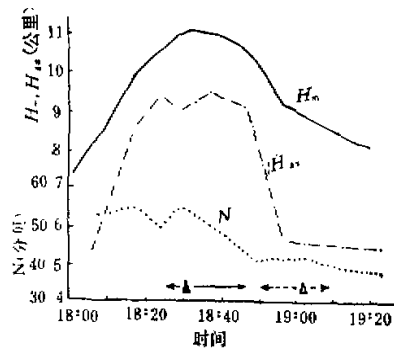


图 8 一个雹云单体回波参数演变图。
昔阳 1976 年 7 月 10 日,图中 N 为增益
衰减分贝数,▲成灾冰雹,△一般冰雹。

前期,偶而也可在雨中发现残余的小冰雹。

图 8 是一个雹云单体回波参数的演变图。

三、几种具有典型形态的雹云回波

大量观测事实表明,有一部分雹云除了深厚、强大以外,可能并无其它显著的特征,但另有一部分雹云,尤其是强雹云,则呈现为某种典型的形态。这些典型形态可归纳为条状、钩状和指状三种,对这些结构的细致分析,不仅有助于了解冰雹云的形成机制,而且对强冰雹云的识别也有重要意义。下面就这几种典型特征的形成、结构和运动等方面的问题做一概要介绍。

1. 条状回波 这是雹云回波中经常见到的一种形态,在我们统计的几十块雹云回波中约占一半左右。

条状回波在 PPI 上呈现出长条状或波动型条状(人字形、倒人字形或W形),其长度为几十公里,而宽度仅一、二十公里。多数条状回波经增益衰减后,可以看出它包含几个强反射率核,这说明它常常是由若干个单体组合而成的。图 9 给出了一个波动型条状回波形成过程的观测实例。它们是由一些作辐合运动的单体,通过两两合并形成的。

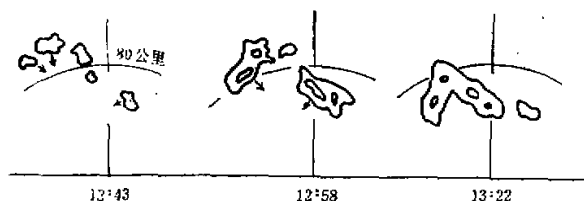


图 9 波动型条状回波的形成过程。北京,1974年6月29日,PPI 3°。

一般来说,在条状回波的许多部位都可能发生降雹,但主要发生在条状回波的强区中,特别是在新生回波部位的强区内。对它们中的大多数来说,是在中右部,也见过个别在左侧有强降雹的例子,这时合并过程发生在左前侧。

条状回波的取向往往与中尺度天气系统(如地面流场切变线)的取向相近,而移动方向与平均高空风成较大夹角,而且是偏向右侧的居多。

2. 钩状回波 虽然这种回波并不是经常能观测到的,但当雷达上出现它时,往往预示着地面有强降雹发生,有时还会伴有大风或龙卷。

钩状结构常从主回波的右侧或右后侧伸出,钩本身是强回波区的所在,并与主回波的强区相连。国外给出的典型钩状回波呈“6”字形,这样的钩状回波我们很少观测到。我们较多观测到的是如图 10 所给出的那样一种钩状回波。从图 10(a) 上可看到钩状回波和主体回波间有一明显的无回波区,这正是强的低层入流进入云体的标志。通过钩部所取的垂直剖面绘在图 10(b) 中。由图可见,从回波前方进入的强上升气流形成的弱回波穹窿一直伸展到高层,悬挂回波和回波墙的结构也很典型,地面有六级左右的东南强风,并在本站维持了相当一段时间,这说明雹云中有很强的上升气流。这块回波在后来南移的

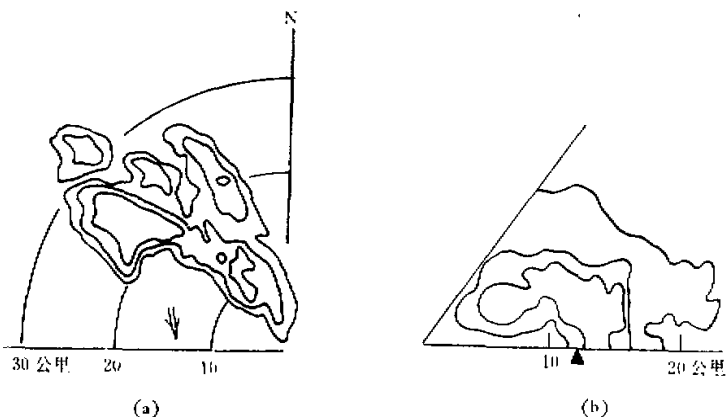


图 10 一块造成巨大灾害的钩状回波, 昔阳, 1976 年 7 月 12 日
(a) 13:43 PPI 3°, (b) 14:17 RHI 297°.

过程中,降下了鸡蛋和拳头大小的冰雹,使十余万亩庄稼受灾。钩状回波的降雹部位通常在钩部和与之相连的主回波强区内。钩状结构可在几分钟内形成,持续时间为几分至几十分钟。此外,我们还观测到从条状回波右端伸出的钩状回波(图略),这也是一种强降雹的典型形态。

3. 指状回波 这种形态在雹云回波中也不很常见,但当回波中出现这种特征结构时,往往对应着地面有中等强度以上的降雹。

在 PPI 剖面上,指状从主回波的后部伸出,在低层最明显,并可以延伸到一定的高度。指状部位及其根部(与主回波相连处)附近强度最大,其边缘反射率梯度也很大,这是与一般对流云回波边缘常见的不平整突起的主要差别。强降雹常发生在指状部位及其根部附近的强区内。

图 11 给出了一个指状回波的实例。对应指状根部附近地面降下了 2 厘米大小的密集冰雹。根据对这块回波三维结构和环境风场的配合分析,可推断指状是云内含水量累积区中的冰雹降落到下层云体外侧而形成的。

上述关于降雹回波系统的分类及回波单体特征的研究是很初步的,还有待于进一步充实和完善。尽管如此,本文得出的一些主要特征仍是很有意义的。几年来的实践证明,建立在这些研究结果基础上的冰雹云的雷达识别方法和超短时预告方法,在实际应用中取得了较大的成功。

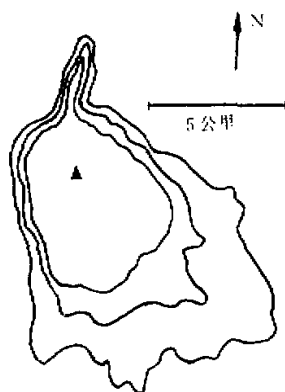


图 11 由冰雹降落形成的指状回波。北京, 1974 年 8 月 26 日, 17:59, PPI 9°.

THE CLASSIFICATION OF HAILSTORM SYSTEMS IN NORTH CHINA AND THE CHARACTERISTICS OF THE CELLS IN THE HAILSTORMS

Yang Pei-cai Guo Yu-fu Liu Jin-li Ma Zhen-hua

Abstract

In this paper five sorts of meso-scale hailstorms which often take place in North China are presented. They are southward moving squall line, eastward moving squall line, air mass hailstorm, super-cell and multi-cell hailstorm. The characteristics of the structure, movement and fall-out of these systems are described briefly.

勘 误 表

对本刊四卷二期作下列勘误:

页	误	正
113 图 1 说明	当 $u(x,0) = \sin 2\pi x$ 时	当 $u(x,0) = \sin 2\pi x$ 时
113 图 2 说明	当 $(x,0) = 1.5 + \sin 2\pi x$ 时	当 $u(x,0) = 1.5 + \sin 2\pi x$ 时
113 图 2 纵坐标	$\frac{1}{2} \sum_i u_i^2$	$\frac{1}{2} \sum_i u_i^2$