

冰雹云的指状回波结构及其形成机制探讨

马振骅 刘锦丽 马建骊*

(中国科学院大气物理研究所) (北京大学地球物理系)

一、前言

在天气雷达手册中常常提到,当雷达 PPI 上观测到从强对流云回波边缘伸出的具有高反射率的指状突起时,该处可能出现降雹。在雷达用于强风暴警戒或配合人工防雹的工作中,此类识别指标是很受人注意的。目前还没有一篇文章详细地描述指状回波的典型结构、尺度、它与主回波之间的联系以及它的形成等原因。因为这需要对产生指状回波的云体作非常详细的观测,而这种机会并不是很容易碰到的。通过我们最近几年在北京和普阳两个地区观测资料的分析,我们发现指状回波可以归纳为两种不同的形成过程。本文举两个例子说明两种指状回波的结构并讨论其形成机制。

二、单纯由主体回波降雹产生的指状回波

1974年8月26日下午,北京地区处在来自渤海湾的东南气流里,北部山区不时有零星的对流回波产生。在17⁰⁰时,在站北80公里附近存在两块较强的对流云回波,此后逐渐发展成一条东西向的回波带,并以较慢的速度向南移动。在南移过程中,回波前方出现不连续传播方式的更新。从这个回波带开始形成到最后一次降雹(21时左右)为止,其南移速度平均约27公里/小时。在这个回波带南移的路径上,延庆、昌平、海淀、朝阳等县区产生大面积的降雹(图1)。在16⁰⁰时即已目测到本站上空南侧有一块浓积云发展。当北方的回波带在17⁰⁰时刻南移到站北70余公里处时,雷达观测到本站上空的孤立浓积云已发展成厚约10公里的强积雨云,本站正处在该积云回波的内部。我们的雷达能够以0°—80°间的仰角作方位扫视,从而有机会以极好的空间分辨力详细观测云体结构。在17⁰⁰—18⁰⁰期间,雷达以逐级抬升仰角的方式记录下云体的一组PPI照片,包括3°—80°间共11个仰角。在40°以下各仰角的回波图象上,可以看到在回波块的北侧有一明显的指状突起(图2)。在18时的地面流场小图上,这块云的位置正处在南北气流相汇的辐合气流中(见图1),但从风力来看,底层人流主要来自南侧。在19时的北京气象台探空图上,大气层结在2.6至11.7公里高度间为一深厚的不稳定正能量区。来自东南方的低层暖湿气流为对流云的发展提供了丰富的能源。回波顶部达到11.7公里,与探空图上不稳定层的上界相一致。这块云在17³⁵—18⁰⁵期间在本场周围降下很密的冰雹和大雨滴(本站位在主回波内接

1978年12月16日收到修改稿。

* 现在山西省气象局

近指状回波根部处), 拣到的雹粒大者直径达 2 厘米以上。此后密集的大雨滴仍持续了一段时间。在 18⁰⁸—18¹⁴ 和 18²⁰—18²⁷ 期间, 又分别对这个云体取下了第二、三组包括各个仰角的 PPI 照片。在这后两组回波图片上, 指状特征部位仍旧存在, 但逐渐变浅变短, 趋向于与主回波平缓地弥合, 随后云体迅速消散。与此同时, 北方的回波带继续南下, 本站在该回波带经过时于 20²⁷—20³² 又发生了一次降雹, 雹粒的密度也较大, 并伴有大风雨。

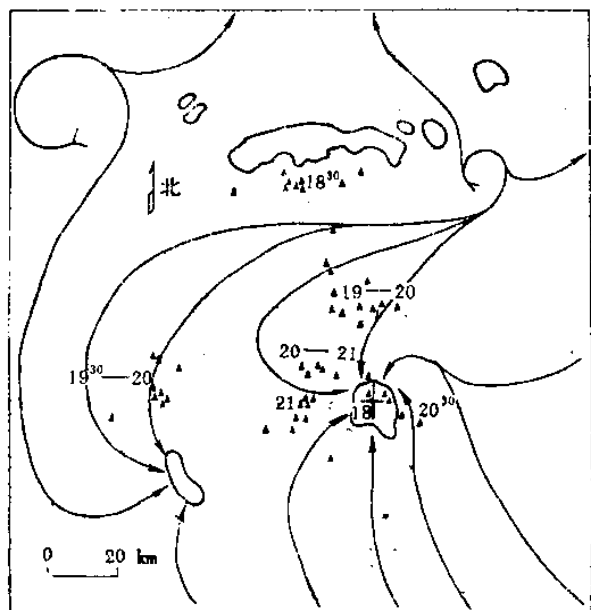


图 1 1974 年 8 月 26 日北京地区降雹位置及地面流场 (18⁰⁰)、回波分布 (17³⁰) 综合图。图中“▲”表示降雹地点, 旁边的数字表示降雹的大致时间。站西 60 公里附近的一片雹击区是由 18 时后在当地发展起来的一个雷雨云造成的。本站第一次降雹发生在 18 时前后, 由图中所示本站上空的孤立雷雨云所产生。除此之外, 图中其他降雹皆是由北方南移的回波带所产生。

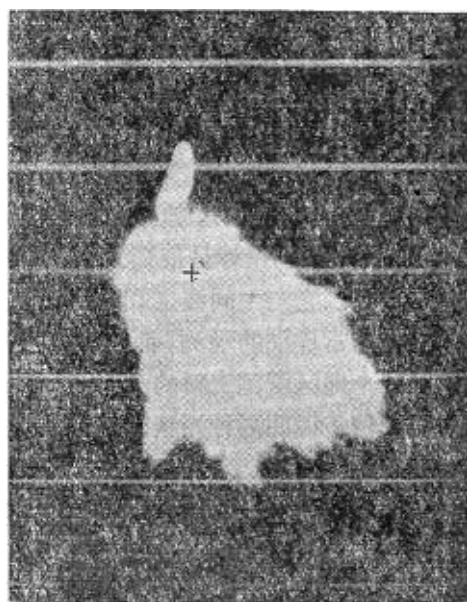


图 2 18⁰⁰ 时刻摄取的具有指状特征的雹云回波 PPI 照片, 仰角 9°, 图中横线之间距离约相当于 4.2 公里。雷达站位于图中“+”标记处。

为了直观地考察云体的三维结构, 我们根据原始的成组 PPI 图象经过图形变换得出云体在各个方位上的垂直剖面图形和各不同高度上的等高面图形。根据等高面图形, 可以利用合适的材料方便地作出云的立体模型。下面我们根据第一组 PPI 资料讨论云体的形态结构。在所用的雷达接收机中, 没有距离补偿装置。为了处理简单起见, 我们在作图形变换时也不对回波强度作距离订正。这样得到的图象虽然与云内实际反射率分布有所偏离, 但在反映一些结构的重要特征方面仍是可用的。

按 10° 的方位间隔, 我们作出了各个方位上的垂直剖面图。为了更详细地了解指状部位及其附近的结构, 在 340°—10° 的方位范围内, 按 5° 的方位间隔作垂直剖面。另外按 1 公里的高度间隔作出了 1—11 公里高度区间的 11 个等高面回波图形 (图 3)。从图可以看出, 云体无论在东—西或南—北方向, 皆有 10 余公里的水平尺度。在高空, 由于云砧向东—南方向伸出, 水平面积显得更大些。在冰雹云中, 这样的单体可算是中等大小。从图还可看出, 回波中的强区集中在西北部分, 云体的西侧边缘比较陡直 (这在表示东—西向垂直剖面的图 4a 中可以更直观地看出来)。最高云顶处在比云内强回波区略偏东的位置上。

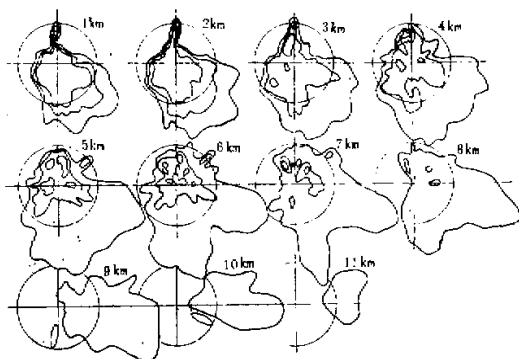


图3 1—11公里高度间的各等高度水平面上的云体回波图形,各廓线由外向内依次相应于雷达增益衰减0, 22和42分贝。距离圈为5公里。

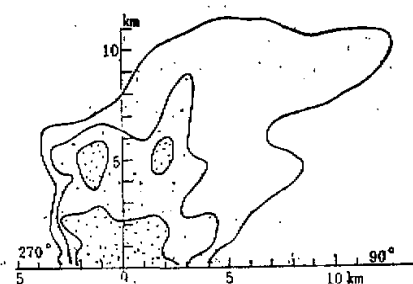


图4a 雹云东—西向垂直剖面图形。

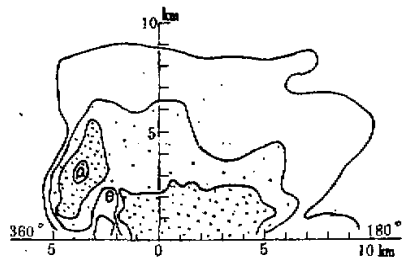


图4b 雹云南—北向垂直剖面图形。图中左侧部分相应于雹云水平剖面中的指状及其上空部位。

指状回波是个轮廓分明的具有较大的反射率的区域,它出现在低层,因此它应当对应于一个边界分明的集中的强降水区。因为在指状部位的直接底下没有测站,所以不了解该部位是否确实发生了降雪,但是在离指状根部约2公里的本场及附近地区观测到了降雪。此外,由于低层一般不存在很强的垂直气流,因此与高反射率的指状部位相对应的高浓度水量应是下落的。因此,唯有把指状部位看作是高空大含水量区产生的强降水在低层的回波表现才比较合理。

为什么会形成这样的结构?虽然雷达没有详细观测到此刻具有指状特征的云回波的形成过程,但是配合高空风层结和地面天气现象的资料,可以对回波结构作出合理的解释。

指状回波和地面降雪是出现在18时前后,但是没有当时的高空风资料可以利用,我们应用19时北京气象台(在本站南面20公里处)的测风资料来进行分析。

19时的高空风如图5所示。可以看到,在近地面为4米/秒左右的偏南风。随着高度增加,风向作顺时针偏转,在3公里高度上已变为6米/秒的偏北风。再往上,风速减小,至6公里高度上,是仅3米/秒的东北风。在此高度以上,风向开始作逆时针偏转,风速也逐渐增大,在云顶高度附近,为16米/秒的偏西风。在整个云层厚度内,平均高空风向为 318° (西北风),风速为4.5米/秒。

上述平均高空风速,折合约 16 公里/小时,但是在这个云体存在的 2 小时余的时间内,位置并未因高空风的推移而向东南方向移动,却是几乎始终保持在原来位置上。这需要从不断进入云体的低层入流带来东南风的动量来解释。进入云体的低层暖湿气流,在

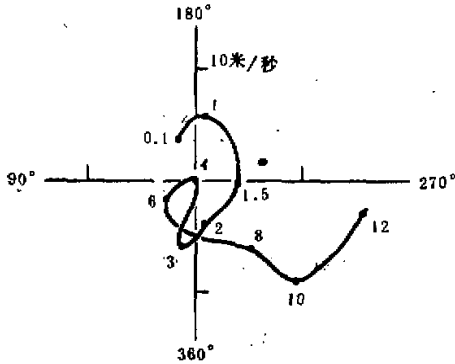


图 5 19 时的高空风曲线,黑点旁的数字表示风速所在高度。

上升过程中部分地保持着它的朝向西北方向的动量,并且在上升气流中积聚了很大的含水量。大含水量区存在于上升气流最大值高度之上,并且在大含水量区周围形成了强降水柱。大含水量区及强降水柱构成了云的“核心”(在雷达图象上构成强回波核)。这个核心对于各个高度上的环境风起着类似于障碍物的作用,中高层环境风在云体两侧绕行的结果,把云体周围一些较小的水成物粒子吹向下风方,在高空形成在东—南侧伸出于低层云体之外的弱云砧。

在云顶高度上,风向转偏西,使得云

顶位置比中下层的强回波区位置略偏东。

在云体的北侧,高空的云体部位突出于低层云体之外。产生这样的结构的原因,从高空风层结构来看,主要有两个:第一,低层入流是偏南风,这部分携带着丰富水份的气流在上升过程中在一定程度上保持着它的水平动量,因此上升气流柱以及相应的水份输送区是向北倾斜的;第二,云体中上层(4—6 公里间)高度上的环境风的北风分量比中下层(2—4 公里间)高度上的相应值为小,因而使得上层的北侧边缘比下层更少受到环境风的压力。这两个因素造成了上层云体向北突出于下层云体之外,而且突出部分包含着—部分大含水量区(强回波区),当含水量累积区中形成的大颗粒水成物脱离或克服上升气流的支托而往下掉落时,自然地一部分强降水将发生在低层云体之外。在空间上比较集中的包含着冰雹粒子或大雨滴的强降水柱就这样在低层云体的外侧形成一个指状的回波突起。

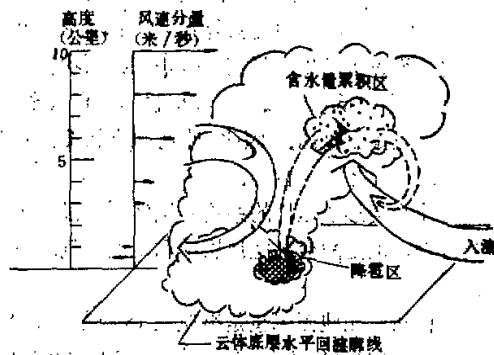


图 6 高空风速单调地增加时,产生的雹云结构示意图。

从以上分析可知,这一类典型的指状回波是云体外侧产生集中的强降水柱的表现。

在本例中,高空风速比较小,例如,在 7 公里高度以下,所有各层上的风速皆未超过 6 米/秒。虽然在云顶高度上风速达到 16 米/秒左右,但就整个云层厚度来讲,平均高空风速还不到 5 米/秒。这可能也是形成上述云体结构并产生指状回波的一个条件。因为如果高

空风速比较大的话,则低层入流在云内上升过程中难于保持其水平动量,结果将产生另一类形式的雹云结构(见图6)。在这后一类云中,在云体的前部存在庞大的云砧,高空的强回波区出现在低空强区的前方,降雪出现在云体底层的前侧边缘附近,并不断地向前推移。

根据前面所描述的产生指状回波的冰雹云的结构,可以画出如图7的示意图。

按照我们这个例子的分析看来,形成具有这类指状回波特征的冰雹云,除了必须具有

一般冰雹云的天气条件(深厚的不稳定层结、丰富的低层水汽和存在触发上升气流的动力因子)以外,还要求一些特定的条件:

1. 底层环境风与高空环境风具有大致相反的方向,且底层风速不很小。这样才能使上升气流在部分保持入流水平动量的条件下向云体后部倾斜。

2. 中上层的风速低于中下层的风速,且总的说来高空风速皆较小,这样可以使上部云体在后侧突出于下部云体之外。

在这样的条件下,形成了特定的云的结构,发生的降雪将有部分降落在云体后侧之外而形成强反射率的指状突起。

因此,在低空 PPI 图象上呈现的产生于主体回波后侧的指状强回波突起,可以作为降雪或强降水的一种识别指标,但不能作为一种很好的冰雹预报指标,因为出现指状回波时,冰雹粒子可能已经降落至离地面不远了,或者雹柱实际上已经降至地面了。当然,如果冰雹云是移动的话,那么对于移动的下游说起来,仍然是有些预报意义的。

因为这类指状回波仅是云中降雪在云体外的延伸物,所以指状的尺度不会太大,在我们这个例子中,指状的长度约3公里,宽度约1.5公里。由于指状的尺度不大,所以当云体离雷达站较远时,就可能由于波束增宽效应使空间分辨力降低的结果而观测不到指状的回波。因此,要在特定的气象条件下观测到出现在一定距离内的这类指状回波的机会是很少的。

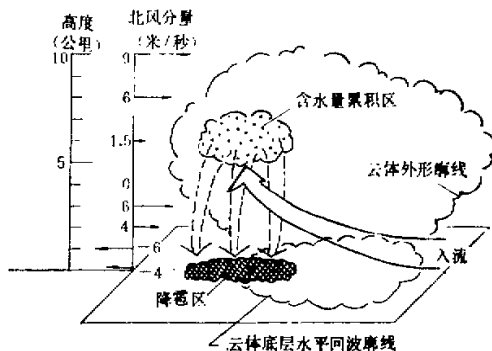


图7 出现指状回波的雹云结构之一类型及相应的高空风分布。

三、孪生强单体降雹形成的指状回波

1975年7月14日,山西省昔阳地区处在3000米高度以下的冷切变线东南侧的偏南气流里,湿度很大,大气层结极不稳定。在14³⁰雷达观测时,即发现在测站西面40公里以内已存在两块略呈条状的回波,此后回波迅速发展并合并,同时在其西北侧不断有新回波产生,并与之合并,使回波面积很快扩大。虽然这时高空风为西北气流,但由于低层入流为偏南风,所以回波位置并没有明显的移动。西北侧新回波发展合并的结果,使回波面积不断向西北侧扩展(见图8),实际上这时正是切变线从西北方移近的过程。这部分云体从

15³⁰ 开始降雹, 并且降雹的地点也逐渐向西北转移。17 时以后, 观测到在这块尺度超过 50 公里的雹云回波的西南侧产生一块虽然尺度不大但很“结实”的回波, 发展并与原雹云回波(称为 A 回波)合并的结果, 形成由 A 回波向外突起的指状强回波。随之, 在此指状回波的根部底下发生了强烈的降雹(17³⁰ 左右), 使一千多亩庄稼绝收。至 18¹⁵ 以后, 随着低层切变线的东南移, 低层风也转为偏北风, 而回波及地面降雹位置也向东南方向转移, 在

经历一些较弱的降雹过程之后, 回波也随之减弱、消散。这一个雹云系统的生命过程持续了五个多小时, 降雹时间也断续地经历了三个多小时, 造成昔阳、阳泉等地十几万亩庄稼受灾。

为了了解这次产生强烈降雹的指状回波的形成过程, 我们在图 9—11 中给出 17⁰¹, 17¹⁵ 和 17³⁰ 三个时刻所拍摄的三组雹云回波的多仰角 PPI 图片。在 17⁰¹ 时刻拍摄的 3°—15° 仰角的照片上, 这个庞大的雹云回波 A 的西南边缘是

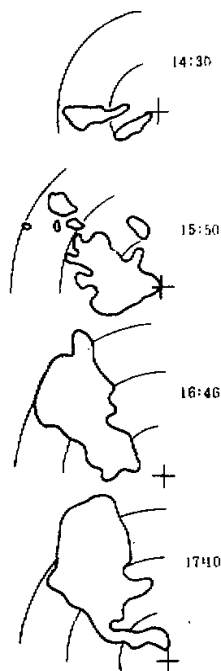


图 8 14³⁰—17¹⁰ 期间雹云回波发展过程。仰角 3°, 每图 20 公里。

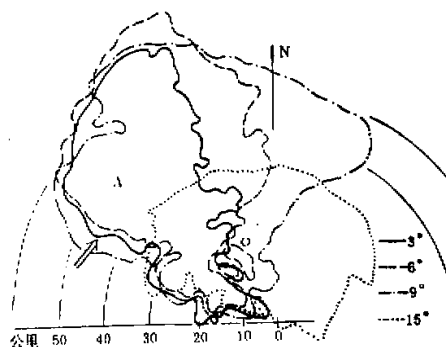


图 9 17⁰¹ 时刻的各仰角回波叠合图。在箭头所指处将产生指状回波。

很整齐的, 3°, 6° 和 9° 仰角照片上此侧边缘位置比较一致, 说明此侧云体边缘是比较陡直的。图 9 中箭头所指处(后来发生指状回波的地方), 这三个仰角对应的高度大约是 2.4, 4.8 和 7.2 公里。在边缘外面是很“干净”的, 即没有其他的小回波存在。至 17¹⁵ 时刻, 已可看到在 A 回波的西南侧已产生一块小而结实的回波 B(图 10)。这个 B 回波, 在 5 分钟前的 3° 仰角上尚未发现它的存在(见图 8 中 17¹⁰ 时刻图), 而在 17¹⁵ 时刻在此仰角上已可观测到, 而且在 6° 和 9° 仰角上观测到它与 A 回波已有部分相连, 但雷达增益衰减时, 仍可看到 B 回波的强核是与 A 回波相分开的, 因此可以说明, B 回波并非是从 A 回波伸展过来的, 而是独立发展起来的一个小单体。在 17¹⁵ 时刻, 其水平尺度已达十余公里。至 17³⁰ 时刻, 在 3° 和 6° 仰角的图片上, B 回波的部位已成为一个由 A 回波向西南方向伸出的指状(图 11), 而且它们的强回波区也是互相连通而无法再加以划分了。A 回波的其余部位, 则皆减弱, 甚至结构松散。在 17³⁴ 时刻, 我们通过指状部位靠近根部处摄取了一组垂直剖面照片(见图 12)。从图可以看出, 指状部位云体呈陡立的柱状, 宽度虽仅 10 公里,

但中心强度甚大(增益衰减 40 分贝),因此指状回波边缘的反射率梯度也是极大的。正是在此时刻,手指状部位根部的地方降下了极强的冰雹。在此地点附近的冰雹大约持续了 20 分钟。在这期间,从 17⁰⁰ 时 3° 仰角的回波图(图 11)上,还可以看到,通过 A 回波及指状部位已开始形成一条东北—西南向的回波带。实际上这已经是切变线过境的表现。在 18¹⁵ 观测时,回波带已增强, A 回波在回波带中已不占独特的地位,并随着回波带向东南方向移动。

对于这一次指状回波形成的环境条件,由于没有详细的地面流场图,也没有当时的高空风资料,无法确切分析。但是我们可以利用下列

气象事实来推测这次指状回波出现的环境条件: 指状回波出现时期正是大气低层东北—西南向的冷切变线从西北侧移经 A 回波的时期,因此在 A 回波的西南侧是个低层辐合特

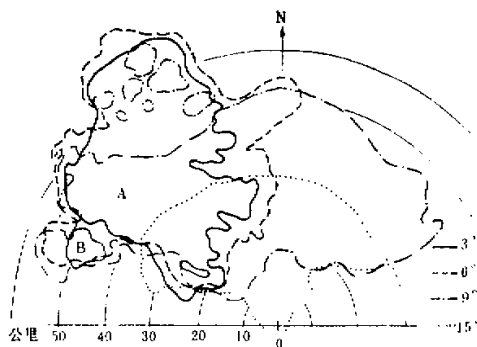


图 10 17¹⁵时刻的各仰角回波叠合图。

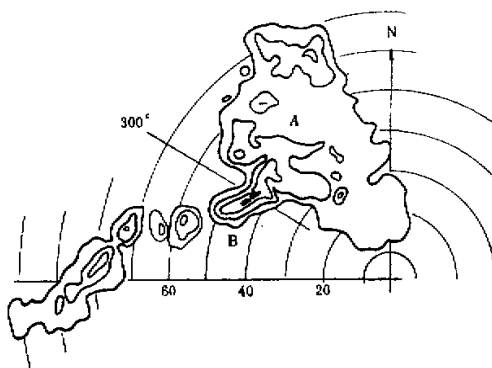


图 11 17³⁰ 时刻 3° 仰角回波图。回波廓线由外往内依次增强 10 分贝。

别强烈的地区。辐合区中合成气流的方向应为偏东,但庞大强盛的 A 回波云体正像一堵陡直高耸的墙那样挡住了辐合气流的水平去路,因此,在云体的西南侧造成了辐合气流集中而强烈地抬升,产生一块发展极为迅猛而尺度并不很大的云体,并很快与 A 回波相并合。强烈上升气流在此处发展的结果,附近的下沉补偿气流使 A 回波内的其余部分回波强度减弱(雷达观测到的事实是与此相符合的)。强烈上升的暖湿气流在高空造成了有利于大冰雹增长的水份累积区,以致最终造成了地面猛烈的降雹。从 B 回波开始出现到该处地面开始降雹,经历了不到 30 分钟。这类具有指状回波的雹云的发展机制可以概括如图 13 所示,由于这类指状回波对应于一个最初是在大云体上风方一侧独立发展起来的单体,因此,这类指状的尺度较大,在我们这个实例中,低层突出的指状部位的长度约 15 公里,

宽度约 8 公里,相当于一个强雷暴云的尺度。与之相比较,前述第一类指状回波的尺度就小得多了。

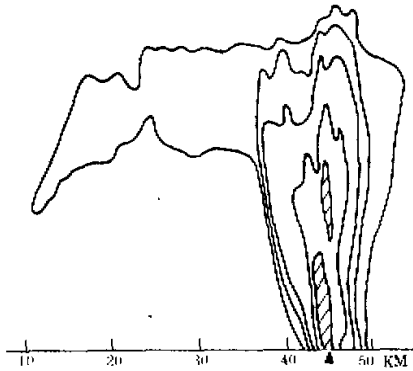


图 12 17¹⁴ 通过指状回波根部附近取得的垂直剖面图形,方位 300°。回波廓线由外往内依次增强 10 分贝,图中的回波顶高度离地 8 公里。

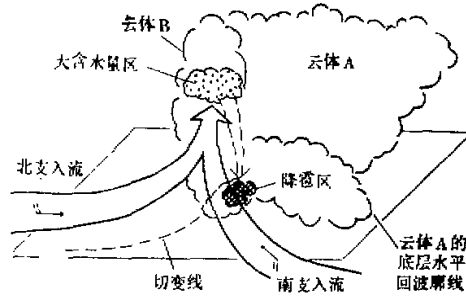


图 13 冰雹云的第二种指状回波形成过程示意图。

四、结 论

指状回波是在 PPI 显示器上强对流云低层回波边缘呈指状突出的一部分强回波区。与主回波比较起来,其尺度比较小,但回波中的最强回波核就出现在指状回波部位及其附近。在指状回波之上空,存在强云体。据我们现有的资料,指状回波具有两种可能的形成过程。一种是强积雨云内含水量累积区中产生的冰雹降落至下层云体外侧而形成的。另一种是在大云体一侧的强辐合区中发展起来的新云体与大云体相合并并降雹而形成的。这两种指状回波各产生于不同的环境中,具有不同的尺度,但都是云内冰雹(或降落过程中融化为大雨滴)集中地降落至地面附近的反映。因此,指状回波在相当大程度上可作为识别雹云和指示降雹部位的依据,但因在雷达屏幕上出现指状回波时,地面往往已经出现降雹,所以在冰雹预报上的意义不大。

THE STRUCTURE OF THE HAILSTORM'S "FINGER" ECHOES AND THE POSSIBLE MECHANISM OF THEIR FORMATION

Ma Zhen-hua Lin Jin-li Ma Jian-li

Abstract

In this paper we discussed the structure of two kinds of "finger" echoes and the possible mechanism of their formation. It is shown that the "finger" echo is the fingerlike protrusion protruded from the edge of severe convection echo. Its scale is much smaller than the main echo, but the most intense echo core is situated in and close to it.

Based on our data, there are two kinds of possible formation mechanism of "finger" echoes. One is that the echo may be formed from those hailstones and graupels dropped out of the upper intense cloud. The other mechanism is that it may be formed by combining the main echo with the new cloud cell developed in the intense convergent area nearby.