

一次雹暴回波和雹块微结构分析

杨颂禧 刘棠福 龚乃虎 徐家骝

(兰州高原大气物理所)

(兰州大学气象专业)

提 要

76年6月4日甘肃平凉发生一次猛烈雹暴。地面降雪前,等效反射率因子

$$Z_e \geq 10^{4.4} \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$$

的强回波有二个轴。主轴顶伸展较高,约离地8公里(对应环境温度约 -40°C);次轴顶较低,约离地6公里(环境温度约 -25°C)。两个轴在离地3—4公里(-5°C — -10°C)间互相连接。地面收集的雹块经切片分析后得知:雹胚有52%为透明和半透明圆球;雹块内部结构有4—5个层次和1—2个层次的各占45.8%和33.6%。由110个雹块的外形得知,扁球、圆球和半球形的各占33%、23%和22%。微结构特征说明雹块主要生长在温度较高和扰动较大的过冷却水滴区。

一、一般情况

76年6月4日,设于甘肃平凉县的气象雷达*自 $16^{\text{h}}-20^{\text{h}}$ (北京时,以下同)跟踪观测了一个强烈雹暴。这次雹暴使六盘山东侧的宁夏固原地区与甘肃平凉县交界区遭到严重雹灾,其雹击带分布见图1a。雹暴在 $19^{\text{h}}-20^{\text{h}}$ 间移至平凉县西北边,在青龙站邻近下了大冰雹,地面雹击带基本上限于等效反射率因子 $Z_e=10^{4.4} \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$ (46dBZ)的强回波包络线以内(见图1b),雹击带东西向宽约10公里,南北长约25公里。青龙站降雨和降雪时间为 $18^{\text{h}}-21^{\text{h}}$,总降水量为36.5毫米,其中降雪时间在 $19^{\text{h}}-20^{\text{h}}$ 间,大雹块出现在 $19^{\text{h}}-46$,最大的雹块长轴为4.5厘米。雹击带内的主要农作物冬小麦受灾达10万余亩,内绝收的农田占25%,余则减产3—7成。应该说明,青龙站于 $19^{\text{h}}-19^{\text{h}}36$ 间,曾用高射炮(口径37毫米)做了防雹试验,炮弹爆炸播撒碘化银1080克,但本文分析中未予考虑防雹的影响。

这次雹暴的环境条件,得自平凉气象台 19^{h} 的探空和测风资料(见图2),地面至海拔10公里间的平均风向为 284° ,风速为9米/秒。 $19^{\text{h}}-20^{\text{h}}$ 间雹暴回波的移向为 348° ,速度为6.4米/秒,右行于平均风向约 64° ,移速甚慢于海拔7公里以上的高空风。这次雹暴的不稳定度和风切变与美国科罗拉多州1970年6月18日的“格罗佛超级风暴”^[1]相比(见表1),主要差异是平凉雹暴的云下风速较小,说明这次平凉雹暴中低层人流分量较小,这可能是导致云下层的上升气流和“弱回波区”较弱的主要原因。这次雹暴的强回波只有一

1979年11月21日收到修改稿。

* 气象雷达是日本制JMA-133D型,波长3.2公分,波瓣宽 1.3° 脉冲宽度2微秒,脉冲功率200千瓦,重复频率210周/秒。

个主体,其尺度上和回波形态上均有着“超级单体”的诸多特点(如悬挂、钩状回波等,照片略),但不十分壮观。

表 1 平凉强雷暴与格罗佛风暴的不稳定度和风切变比较

日期和名称	不稳定度 ΔT_{500} ($^{\circ}\text{C}$)	云下风速转向 (度)	云下平均风向和 风速 (度/米/秒)	地面至 10 公里 间的平均风向风 速(度/米/秒)	风暴移动的方向 和速度 (度/米/秒)	云层中的切变 ($10^{-1}/\text{秒}$)
70 年 6 月 18 日 格罗佛超级风暴	+5	60	160/11	250/15	320/9	4.0
76 年 6 月 4 日 平凉强雷暴	+6.5	54	158/6.6	284/9	348/6.4	5.0

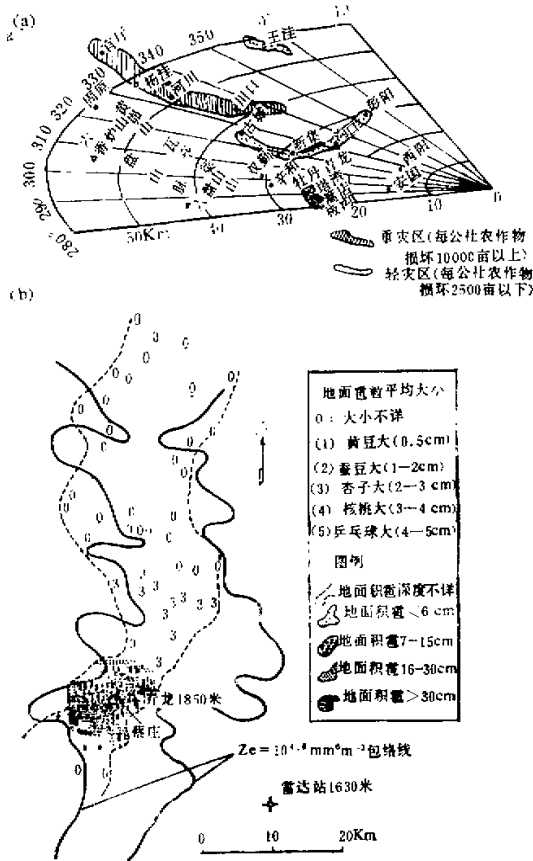


图 1 76 年 6 月 4 日平凉雷暴灾情
a. 雹击带
b. 强回波包络线及雹粒大小分布

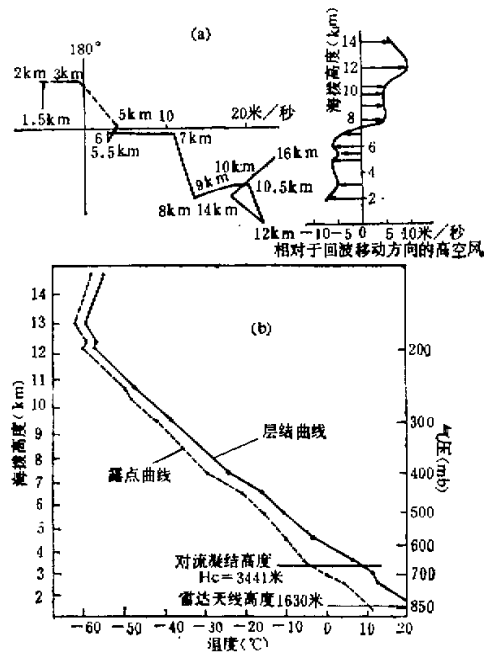


图 2 76 年 6 月 4 日 19⁰⁰ (北京时)
平凉高空气象要素
a. 高空风. b. 层结曲线.

二、回波结构

图 3 扼要地列出了 18²⁷—19³⁰ 的回波演变情况, 从 18⁴⁰—41 仰角 3° 的 PPI 分档显示图上可看出有三个回波单体, 1 号是雹暴主单体, 它的 $Z_e = 10^{2.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 廓线的离地高度达 12 公里 (见 18⁵²⁻⁵³ RHI 图), 该层温度约为 -55°C, 2 号和 3 号单体的 $Z_e = 10^{2.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 廓线离地高度都不到 5 公里 (见 18³⁵⁻³⁹ RHI), 该层温度为 -15°C, 它们是局地生成的积云, 移动方向和速度都和主单体不一致, 2 号作绕过主单体向东南移动 (见图 3 中 18⁵²⁻⁵³ 3° 的 PPI), 3 号作绕过主单体向东北移动 (见图 3 中 19¹⁶⁻¹⁸ 3° 的 PPI), 看来 3 号是顺着相对于主单体 (1 号) 的北支分流走, 而 2 号顺着相对于主单体的南支分流走, 这种情形与 Browning 等^[2] 分析的超级风暴迎流端存在着“气流滞止点”, 环境气流通过此点时形成分流的情形相似。图 3 中的 2 号和 3 号两个单体正好充当了分流的示踪物。

关于弱回波区垂直伸展的范围可充分代表风暴前上升气流的伸展范围, 这点已被人们所公认^{[3][4]}, 我们取 $Z_e = 10^{2.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 的廓线作为弱回波区的界限^[5], 自 18¹¹ (图略) 至 19¹⁶ (图 3) 间, 3° 和 9° 的 PPI 上一直有弱回波区, 它位于主单体和其前侧的小单体间, 面积约为 30 公里²。

为了分析回波的三维结构, 我们使用一种投影方法, 先将带有仰角的 PPI 锥形扫描面作斜投影, 再与 RHI 的斜投影配在一起, 成为一张直观的立体图 (方法从略)。图 4a—d 列举了 18²⁹—19³⁶ 期间的四个典型结构, 图 4a 由 18²⁷⁻³¹ 四分钟内的全部 PPI 和 RHI 资料结合成, $Z_e \geq 10^{4.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 的廓线只有一个主轴, 中心最大的 $Z_e \geq 10^{5.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$, 主轴的顶高离地约 9 公里。图 4a 的 RHI 剖面上, 在主轴回波的西北侧 (移行方向的后侧), 离地 2—8 公里间有二个 $Z_e = 10^{5.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 的区域, 推测这是由 1 号单体西北侧中空的降水质点绕到主轴回波的北侧而造成。如果此时回波结构是准常定的, 则某等值线的回波周界就可视为某些质点的包络, 这些质点可上下运动, 也可朝着书页内穿越出图 4a 的 RHI 剖面, 实际上两种运动兼而有之, 上述两个 Z_e 值区域中的大多数中小质点, 则跟着雹暴的高空砧状出流而落出雹暴, 大的质点则可能跟着相对于风暴的环境水平风而分选降落到雹暴北侧到西侧的地面, 它们不再有机会进入上升气流足部而再循环增长成大雹块。

图 4b 上主轴回波 $Z_e = 10^{4.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 的廓线顶高超过 8 公里, 温度为 -40°C 左右, 底部尚未接地, 推测内中的降水和冰雹质点还处在继续增长中。图 4b 的主轴前部, 还有一个次轴回波, $Z_e = 10^{4.6} \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 廓线的顶高不到 6 公里, 温度约 -25°C, 它是一个接地的已降水 (降雨和小雹) 回波。次轴回波的形态较特殊, 它不同于 Browning 等^[2] 所提出的超级单体前侧的“雹胚帘”, 因为按雹胚帘存在的最严格条件, 需要在胚帘与主轴回波之间存在“有界弱回波区”的穹窿, 胚帘的中心强度应比主单体的低好几档, 而且根本不接地而这里却不存在穹窿。而且次轴回波与主轴回波中心等强, 并已显现接地的降水形态, 就是说, 在次轴中, 与下落质点末速度相平衡的上升气流速度远远超过构成胚帘的上升气流速度, 降水质点的大小也已远大于雹胚。次轴回波的形态与 Dennis 等^[5]、Musil^[6] 以及 Browning^[7] 等所分析的多单体雹暴前的“供给云”或“子云”很相似, 这类云的生成与最大上升气流两侧离散的浓积云的“副上升气流”密切相关, 从雹胚到小雹块的第一级增长可

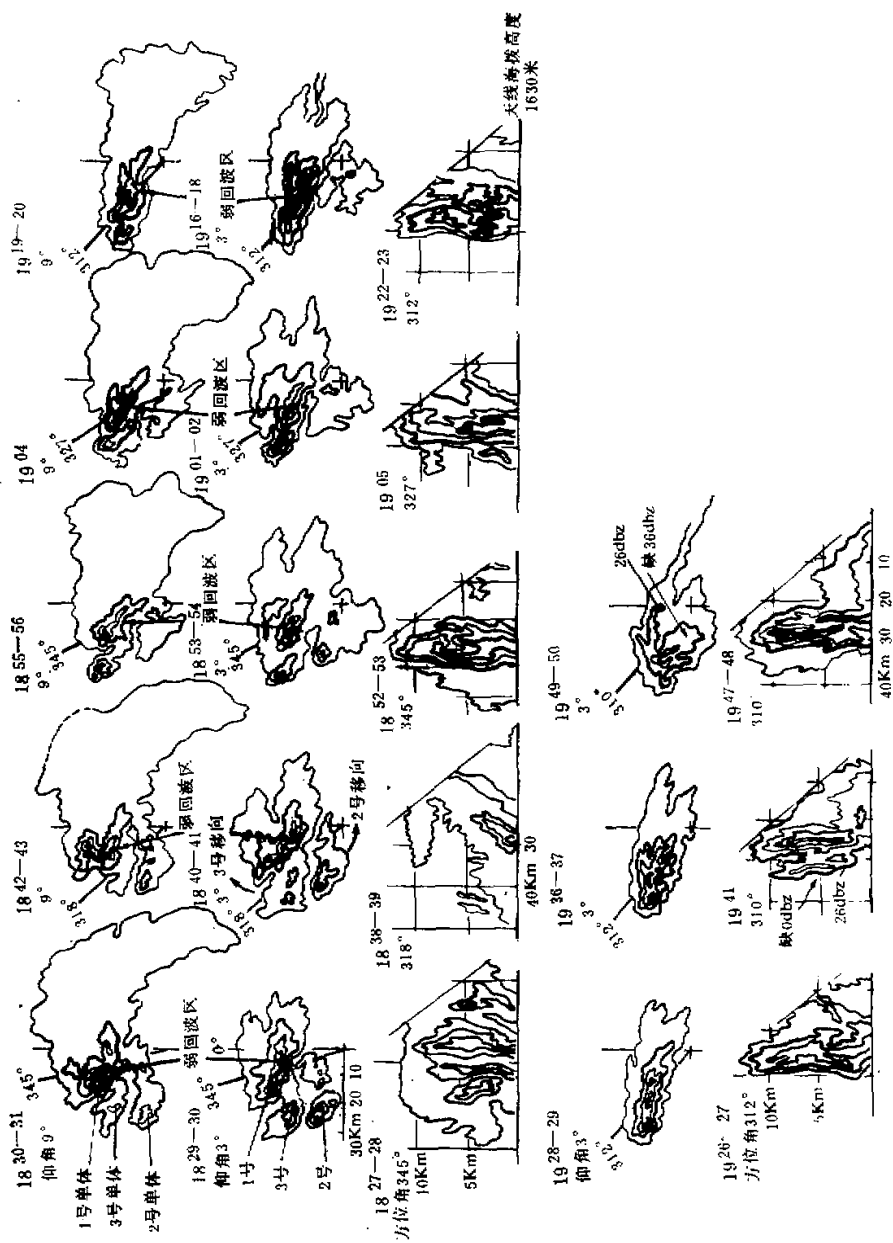


图 3 1976 年 6 月 4 日平凉雹暴回波演变列要。图中除注明者外,回波等值线由外至里依次为 0.26, 36, 46, 56 dbZ。

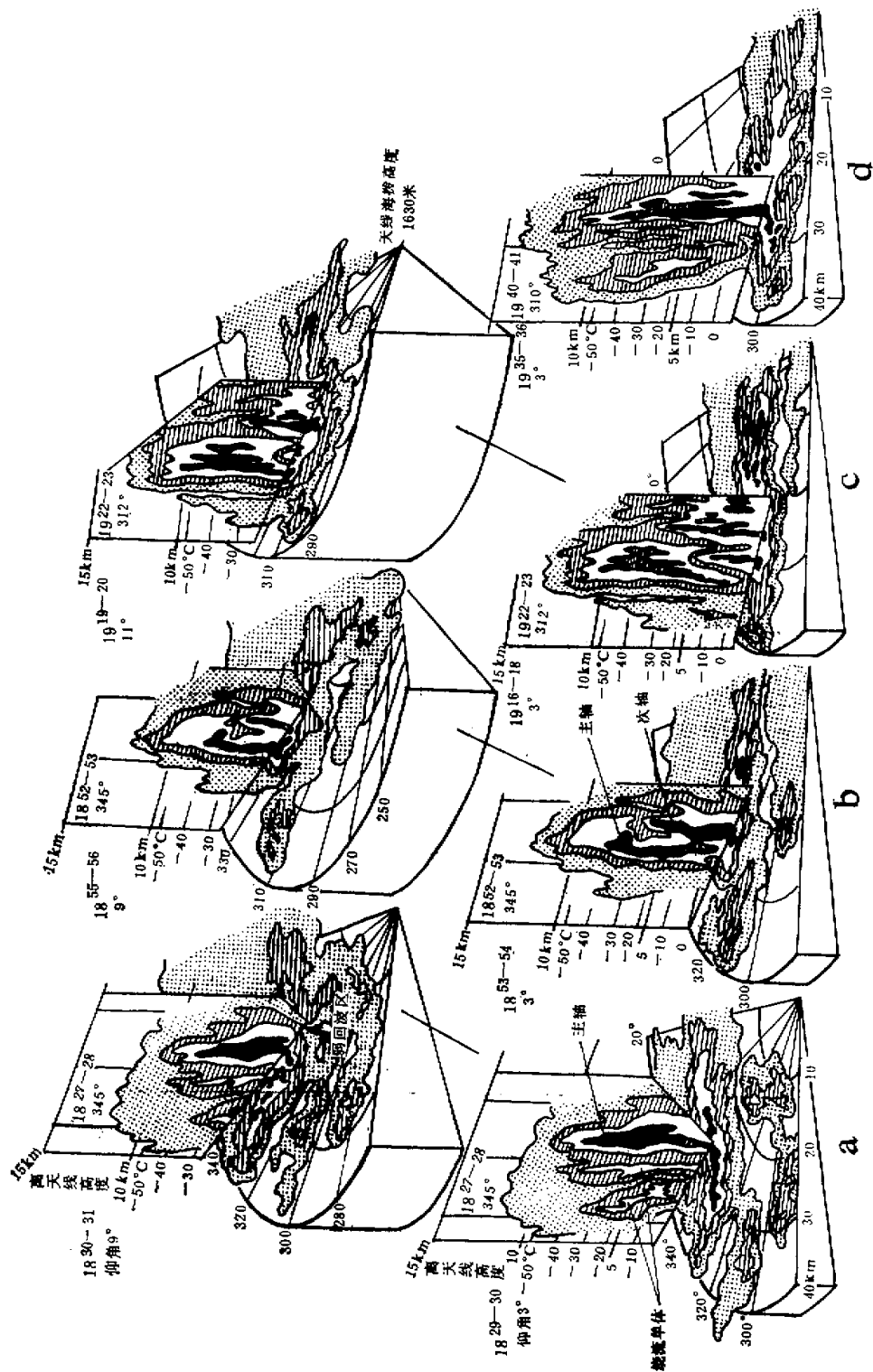


图 4 1976 年 6 月 4 日平凉雪暴回波三维结构。
图中回波等值线由外至里依次为 0, 26, 36, 46, 56 dbZ。

以在“子云”中完成。但次轴回波与之相比,也有显然的不同处:“供给云”,“子云”回波的高度和主单体回波的高度几乎相同,而这里所说的次轴回波高度比主轴回波低得多;因为“供给云”和“子云”回波享有与主单体同一的环境条件和同一的冰雹生长机制,因而不可能在比主单体低得多的条件下构成降水形态,而次轴回波明显呈现降水形态。因此我们推测,次轴回波可能是弱上升气流的条件下,单体前侧的一种上升气流扰动,因为它是在地面下大雹块之前出现的(见图 4b、4c 的时间是 18³²—19²³ 之间,而青龙站地面大雹块出现于 19²⁴⁻⁴⁰ 间),它必然对雹块增长起着重要作用。图 4b 上还有一点有趣的事实,即在两个回波轴之间有一个连接的地方,它位于 -5℃—-10℃ 之间,推测次轴上的某些降水质点或雹胚可通过连接处的扰动运动输送到主轴回波中去,而主轴回波中的某些雹块,又可凭借它们从高层获得的向东水平动量穿入次轴回波中,然后吸取了次轴中的过冷水滴而迅速增大,主轴和次轴的共存形态可能为制造大雹块创造了有利条件。

图 4c 是 4b 的持续和发展,正好反映了地面大雹块出现之前的回波形态特点。图 4d 正值地面下大雹块,它的形态只是重复了 4a,而在强度和高度上超过 4a 而已。

三、雹块的微结构特征

1. 雹块内部结构 先说明一下资料来源。这里选用的 25 个直径大于 1 厘米的雹块,是在青龙站下雹时当场收集的雹块中选择而得。收集的雹块放在广口冷藏瓶中,表面覆以干冰,分析工作于 6 月 5 日晚间进行,先将选择的雹块按中心部位用电热镍铬丝锯成切片,而后磨光,在普通灯光下观测其内部结构。

雹胚有五种类型(见表 2),它们的英文字母代号同文献[8],但各类所占比例的最明显特点是透明和半透明的圆球形(A 和 B 类)占总数的一半以上(52%),而锥形和椭球形的(D 和 E 类)只占 32%。A 和 B 类雹胚的直径是 3—13 毫米,其中 5—7 毫米的占大多数,对照 Bigg^[9] 的水滴冻结实验,5—7 毫米水滴的冻结温度约为 -19℃。以上说明这次过程中形成雹块的雹胚主要是缓慢冻结的大水滴,这意味着雹胚源地可能是液态含水量高、温度不太低的云体中间部位。还发现有些雹胚的外围第一生长层中有较大的裂缝,推测这是由于雹胚先经过含水量较大的区间,接着又进入温度较低的环境而骤然冻裂的结果。上节中的主、次轴回波共存和连接形态有利于雹块生成和增长的推测与此是能相互呼应的。

表 2 1976 年 6 月 4 日平凉雹暴的雹胚形状统计

类型说明	A 透明圆球形	B 带大气泡的半 透明圆球形	C 充满小气泡的 不透明圆球形	D 部分不透明(窄 带)大部分带大 气泡或空腔的锥 形或椭球形	E 不透明的锥形 或椭球形
个 数	8	5	4	4	4
百分比(%)	32	20	16	16	16

雹胚直径的频数分布,经过平滑处理后,其分布形式与正态分布比较接近(见图 6),其表达式为:



图5 大脑形雹块外形照片
(长轴 4.8 厘米, 短轴 3.5 厘米)
上: 侧视 下: 底视

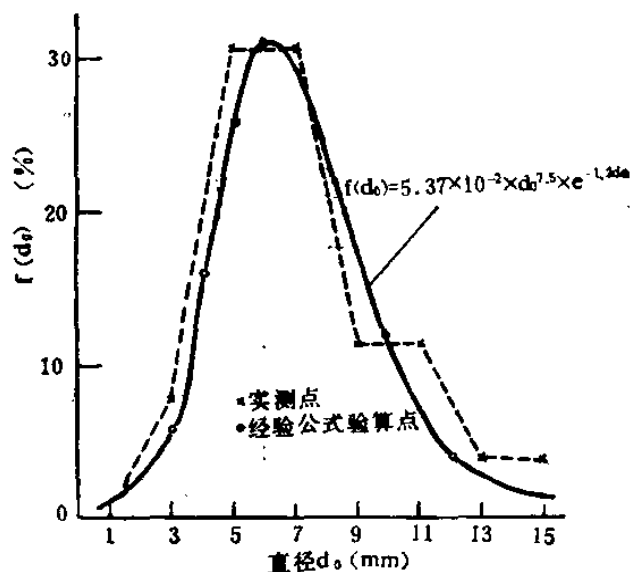


图6 1976年6月4日平凉雹暴雹胚直径频数分布
(总数 25 个)

$$f(d_0) = 5.37 \times 10^{-2} \times d_0^{7.5} \times e^{-1.2d_0} (\%)$$

式中, d_0 是雹胚直径(单位毫米), $d_0 > 6$ 毫米的约占总数的一半。

雹块内部按冰层的透明程度来分, 得知有 1—7 层不等, 其分布出现两个峰值: 4—5 层和 1—2 层, 它们各占雹块总数的 45.5% 和 33.6%。

表3 1976年6月4日平凉雹暴雹块内部层次统计

层 数	1	2	3	4	5	6	7	总 数
个数	4	4	1	6	5	3	1	24
百分比(%)	16.8	16.8	4.2	25.4	20.4	12.5	4.2	100

注: 表中雹块直径 > 1 厘米, 由雹切片分析得。

2. 雹块形态特点 先说明一下资料来源。这里所分析的 139 个雹块是由两处收集到的: 一处是在青龙站下雹当时收集的, 选用 26 个; 一处是在蔡家庄(在青龙的西西南 3 公里), 于下雹后第 9 天(6 月 13 日)收集到的, 选用了 113 个。说来很有趣, 我们在调查灾情中, 经当地农民热忱指点, 6 月 13 日在蔡家庄山顶的北坳, 发现了一个藏雹的深泥坑, 挖开淤泥后, 内冷藏着由 6 月 4 日下雹时泾流汇集来的大量雹块, 积厚约 1.5 公尺, 雹块层与淤泥覆盖层间的地温为 -3°C (上午 11 时测), 各种大小和形状的雹块形态完好, 我们开挖后才迅速融化, 于是就在现场进行剖析和数谱的紧张工作。

上述两处收集的 139 个雹块, 计有柿饼、扁球、苹果、大脑、包子、洋葱、椭球、梨形(锥形)和圆球形等多种形态(见表 4)。其中蔡家庄的 110 个雹样中柿饼形占 33% 之多, 圆球和大脑形各占 23% 和 22%。柿饼形比较扁平, 接近于盘形, 它的轴比 (dm/dM) 随长轴增大而减小, 据实验研究^[9], 这类雹块是在高含水量和较高温度条件下生长的。大脑形的整个轮廓是半球形, 底部有明显凹陷, 表面皱折不平(见图 5), 类似文献[10]中的“浅丘

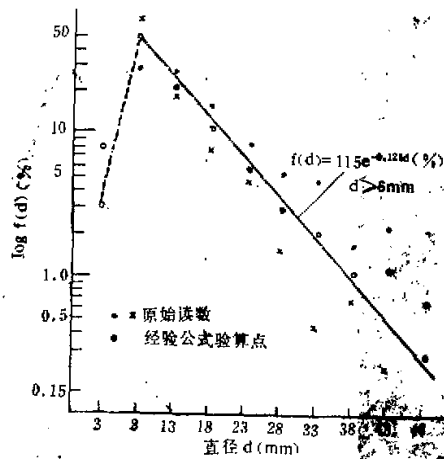


图7 1976年6月4日平凉雪暴的雹块谱分布(相对谱)

表4 雹块形状的有关参数

		扁球(包括扁圆、扁椭)	苹果	包子	椭球	梨形(包括圆锥)	圆球	备 注
青 龙	个数	3	2	7	8	4	5	总数: 29
	%	10	7	24.1	27.7	13.9	17.3	
	dm/dM	0.92	0.76	0.82	0.78	0.89	1.0	
蔡 家 庄		柿饼	苹果	大脑形	椭球		圆球	总数: 110
	个数	37	13	24	11		25	dm——短轴 dM——长轴 dH——厚度
	%	33	12	22	10		23	
	dm/dM	0.87	0.94					
	dH/1/2(dm+dM)	0.58	0.94					

状不规则形”,这种雹块也是在含水量比较大或过冷滴较大的条件下生长的。

3. 雹谱特点 这里应用的资料取自蔡家庄雹坑,随机取了710个雹样,统计了相对浓度 $f(d)$ 随直径 d (或长轴)增大而呈负指数递减的关系(见图7),这个雹谱的统计表达式为:

$$f(d) = 115e^{-0.125d}(\%) \quad d \geq 6\text{mm}$$

式中 d 是雹块直径,众数直径是6毫米。考虑到融化对小冰雹影响较大和6毫米以下的只占总数的3.1%,这部分谱可以不予考虑。我们在甘肃珙县也曾发现雹块相对浓度与直径之间的负指数关系,而国外观测到的雹谱,大多数也满足这一关系。

参 考 文 献

- [1] Marwitz, J. D., The structure and motion of several hailstorms, Part I: Supercell storms, *J. Appl. Meteor.*, 11(1), 166—179, 1972.
- [2] Browning, K. A. and Foote, G. B., Air flow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 499—533, 1976.
- [3] Marwitz, J. D. and Berry, E. X., The weak echo region and updrafts of a severe hailstorm, 14th

- Radar Meteor. Conf., 43—47, 1970.
- [4] Chisholm, A. J., The radar and airflow structure of Alberta Hailstorms. 14th Radar Meteor. Conf., 35—42, 1970.
- [5] Dennis, A. S., Sebick, C. A. and Koscielski, A., Characteristics of hailstorms of Western South Dakota, *J. Appl. Met.*, 9, 127—133, 1970.
- [6] Musil, D. J., Computer modeling of hailstone growth in feeder clouds, *J. Atmos. Sci.*, 27, 474—482, 1970.
- [7] Browning, K. A., Fankhauser, J. C., Chalon, J. P., and Eccles, P. J., Strauch, R. G., and Merrem, F. H., Musil, D. J., May, E. L. and Sand, W. R., Structure of an Evolving Hailstorm, Part V: Synthesis and Implications of Hailgrowth and Hail Suppression, *Monthly Weather Review*, 104 (5), 603—610, 1976.
- [8] 徐家骝、黄孟容、刘钟灵、段兆吉, 甘肃岷县地区 1964 年 6—7 月两次冰雹雹谱、雹切片的分析, *气象学报*, 35 (2), 1965.
- [9] 梅森, B. J., 云物理学, 科学出版社, 1978.
- [10] Browning, K. A., The lobe structure of giant hailstones, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 92, 1—13, 1966.

ANALYSIS OF THE ECHOES AND THE HAILSTONE MICROSTRUCTURE OF A HAILSTORM

Yang Song-xi, Liu Tang-fu, Gong Nai-hu

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Xu Jia-liu

(Meteorological Speciality, Lanzhou University)

Abstract

A severe hailstorm occurred on 4 June, 1976 in Pingliang region, Gansu province. Before hail shooting on the ground, the intense echo with equivalent reflectivity factor $Z_e \geq 10^4 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$ had two cores. The top of the main core extended to about 8 Km above the ground at -40°C layer and the top of the other core was lower, about 6 km above the ground at -25°C layer. The two cores connected with each other at -5°C — -10°C layer, about 3—4 km above the ground. From the section analysis of hailstones collected on the ground, it was shown that the number of spherical hail embryos which were transparent and semitransparent were 52% of the total embryos. Hailstones with 4—5 and 1—2 internal layers were 45.8% and 33.6% of the total hailstones collected respectively. Of 110 hailstones collected, the oblate spheroid, spherical and semi-spherical hailstones were 33%, 23% and 22% respectively. The microstructure features of hailstones indicated that they grew mainly in the supercooled-drop region with relatively high temperature and strong disturbance.