

# 云中冰晶尺度谱特征与分布函数

陈万奎 严采繁

(人工影响天气研究所)

## 提 要

本文给出了我国北方混合性、冷性层状云中冰晶(直径范围 $18\text{--}334\mu\text{m}$ )尺度谱分布特征和分布函数。冰晶尺度谱可归纳为单调下降和非单调下降两大类型,分布函数可用指数关系 $N = N_0 \exp[-\lambda D]$ 来拟合,相关显著水平 $\alpha < 0.01$ 的样本,占本文统计的样本99%以上。

冷性云中,谱分布参数 $N_0$ 和 $\lambda$ 随云中温度降低而增大,在云中温度 $T < -10^\circ\text{C}$ 时,增大更为明显。谱分布参数 $N_0$ 和 $\lambda$ 之间可用幂指数关系 $N_0 = \sigma_1 \lambda^{\beta_1}$ 来拟合,相关显著水平 $\alpha < 0.01$ 。系数 $\sigma_1$ 、 $\beta_1$ 与云中冰晶繁生过程有关。

## 一、前言

云中冰晶( $18\mu\text{m} \leq D \leq 334\mu\text{m}$ )形状、数浓度、尺度谱分布是研究云微物理结构、降水机制的重要资料。国外观测表明,云中冰晶数浓度可比同温度下冰核数浓度高1—3个量级<sup>[1]</sup>。云中这些冰晶通过什么途径产生?增长方式是什么?尺度谱分布类型如何?这些带根本性的问题无疑有待于对云中冰核、核化机制、冰晶增长方式、冰晶形状和尺度谱分布、繁生机制和荷电特性的精细观测和深入研究。

国内对云中冰晶常用观测方法是将厚度 $\sim 10^0 - 10^1\mu\text{m}$ 铝箔,平放在海绵胶衬垫上,利用飞机速度使冰晶撞击在铝箔上留下印痕,再用显微镜辨认其形状、大小、数目。按如下公式 $N(D_i) = n(D_i) / (V \cdot S \cdot \Delta t)$ 算出直径 $D_i$ 的数浓度 $N(D_i)$ ,式中 $n(D_i)$ 、 $V$ 、 $S$ 、 $\Delta t$ 分别是冰晶数目、飞机飞行速度、铝箔读数面积、铝箔取样时间。由于铝箔厚度、质量好坏、衬垫硬度等不同,可清晰辨认的最小冰晶尺度约 $100\mu\text{m}$ 左右。小于

$100\mu\text{m}$ 的冰晶因动量小,撞击在铝箔上的印痕多不清楚,而且易被雪花印痕覆盖而无法辨认。由于铝箔上辨认和读数困难,1982年前国内冰晶资料很少,可靠性也较差,直径在 $18\text{--}100\mu\text{m}$ 的冰晶资料几乎没有。

1982年国家气象局装备了一架专用多用途云物理探测飞机,其中机载二维云粒子(2D-C)探头<sup>[2]</sup>可连续测量云中冰晶形状、尺度、数浓度(有冰、水鉴别装置)。可测量粒子尺度下限是 $18\mu\text{m}$ ,上限是 $813\mu\text{m}$ ,上下限间等分为32个测量间隔,每间隔 $25\mu\text{m}$ ,取样率范围是0.5—7帧/秒。本文分析了内蒙古(1982年7月8日)、陕西(1983年5月24日)混合性层状云和新疆(1982年11月11日)冷性层状云中冰晶尺度谱特征、分布函数形式及分布参数,以及它们和云型、云中温度的关系。

## 二、冰晶尺度谱特征和分布函数

3次降水层状云共取得417份云中冰晶资料。内蒙古、新疆冰晶形状以枝状、星状和不定形粒子为主,陕西以针状和鞘状为主,

典型形状见图1。当粒子尺度接近可测下限大小时，粒子形状和相态难于分辨，但可以通过一维探头来补充判断，如用前向散射粒子谱仪(FSSP-100)所测的18—47 $\mu\text{m}$ 粒子数浓度和2D-C测的18—43 $\mu\text{m}$ 粒子数浓度比较来大致确定是冰粒子还是水粒子。

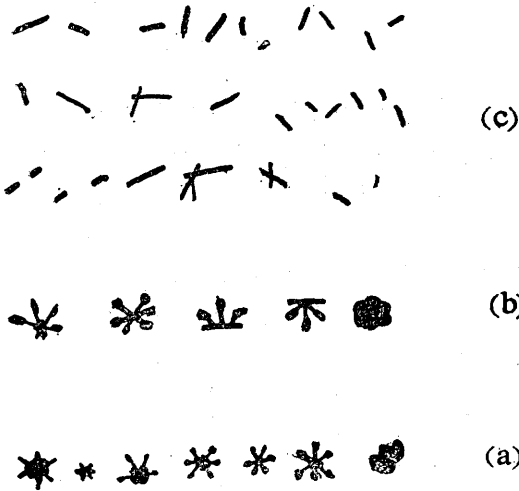


图1 云中冰晶二维图象  
a新疆冷云 b内蒙古混合云 c陕西混合云

云中冰晶尺度谱可归纳为两种类型：冰晶密度  $N(D_i)$  随直径  $D_i$  增大而单调减小和非单调减小型。前者谱分布峰值在25 $\mu\text{m}$ 处，仅当  $D_i \geq 200\mu\text{m}$  时， $N(D_i)$  时起时伏，这类型谱占大多数，称作单调下降谱。非单调下降谱型除数密度  $N(D_i)$  在25 $\mu\text{m}$ 处出现主峰外，还在50—125 $\mu\text{m}$ 处出现第二峰值， $D_i \geq 200\mu\text{m}$  时， $N(D_i)$  亦常有起伏，这类型谱多在低冰晶浓度时出现。单调下降和非单调下降平均谱绘于图2。单调下降平均谱和非单调下降平均谱中，瞬时偶尔相应出现非单调和单调下降谱。

从谱分布看，单调下降和非单调下降谱差异是明显的，谱分布函数是相近的，用指数关系  $N(D) = N_0 \exp[-\lambda D]$  拟合，相关系

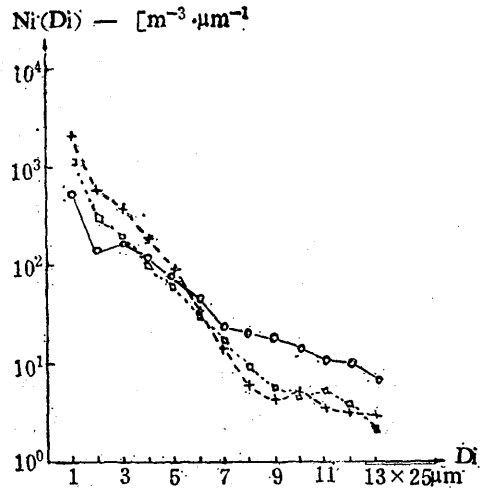


图2 云中冰晶尺度谱分布类型  
○—○陕西混合云 ( $-25 \leq T \leq 2.0^\circ\text{C}$ )  
+—+新疆冷云 ( $-7.6 \leq T \leq -3.0^\circ\text{C}$ )  
□……□内蒙古混合云 ( $-5.5 \leq T \leq -3.0^\circ\text{C}$ )

数绝大多数大于0.9，本文列出的417份资料中，414份资料相关显著水平  $\alpha < 0.01$ ，占总数99%以上，仅有3份资料  $\alpha$  值介于0.1—0.02间，只占总数0.7%。

$\alpha < 0.01$  的414份资料谱分布参数  $N_0$  和  $\lambda$ ，在各温度层中平均值  $\bar{N}_0$  和  $\bar{\lambda}$  变化范围、变异系数列于表1。从表1看出：参数  $\lambda$  变化范围（指  $\lambda$  最大值和最小值）小， $\lambda$  的变异系数  $\frac{S_\lambda}{\bar{\lambda}}$  亦小， $S_\lambda$  是  $\lambda$  的标准偏差。而参数  $N_0$  变化范围大， $N_0$  最大值比最小值高出1—2个量级， $N_0$  的变异系数  $\frac{S_{N_0}}{\bar{N}_0}$  亦大， $S_{N_0}$  是  $N_0$  的标准偏差。混合云参数平均值  $\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$  明显低于冷云。

### 三、冰晶谱分布参数与温度、云型的关系

#### 1. 冷云

分布参数平均值  $\bar{N}_0$  和  $\bar{\lambda}$  随云中温度降低而趋于增大，当云中温度降到一定界限

表1  $\alpha < 0.01$ 冰晶谱分布参数变化范围、平均值和变异系数

观测地区	降水云性质	温度范围 (°C)	样本数	$N_0$ ( $\text{cm}^{-4}$ )			$\lambda$ ( $\text{cm}^{-1}$ )		
				变化范围	平均值	变异系数	变化范围	平均值	变异系数
新疆	冷云	-4.0--3.0	72*	1.29--89.78	18.40	0.62	110.0--415.0	231.0	0.21
		-3.0--5.5	41	4.25--78.47	17.62	0.73	146.0--346.0	217.0	0.20
		-5.5--7.6	41	3.34--49.04	17.35	0.60	151.0--383.0	233.0	0.19
		-3.0--7.6	82	3.34--78.47	17.49	0.66	146.0--383.0	220.0	0.19
		-7.6--10.3	72	1.51--79.76	19.79	0.89	121.0--462.0	262.0	0.36
		-10.3--11.8	52	4.53--120.32	32.17	0.79	170.0--450.0	318.0	0.23
内蒙古	混合云	0--3.0	38	0.12--32.19	9.48	0.85	83.0--255.0	181.0	0.24
		-3.0--6.9	59	0.29--47.51	8.58	1.09	95.0--245.0	179.0	0.19
陕西	混合云	0--3.0	39	0.94--17.10	7.09	0.60	98.0--266.0	158.0	0.26

\* -4--3°C层是主体云-3--11.8°C层下逆温中的低云

(本文是-10°C)后,  $\bar{N}_0$ 和 $\bar{\lambda}$ 增大明显。如冷云个例, 在-3--5.5°C层和-5.5--7.6°C层中,  $\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$ 均十分接近, 而在-10--11.8°C层,  $\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$ 明显增大。

$\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$ 随云中温度降低而增大表明: 云中冰晶谱分布随云中温度降低而趋于变窄、变陡。为证明这一点, 我们作出了各种大小冰晶尺度  $D_i$  出现的频率分布和它们出现的时间序列。图3是不同直径的冰晶在不同温度下出现的样本数与总样本数的百分比, 记

为  $F(D_i)$ 。图4是不同直径的冰晶在不同温度下出现的时间序列分布。

从图3、4看出: 较小的冰晶粒子在各温度层中都是连续出现的, 较大的冰晶粒子在各温度层中是间断出现的, 出现频率  $F(D_i)$  随粒子增大而降低, 另一方面大的冰晶粒子出现频率随温度降低而趋于减小。这一观测事实表明, 在云中较低温度层, 小的冰晶粒子 ( $18 \leq D_i \leq 138 \mu\text{m}$ ) 占优势, 较大冰晶粒子没有大量形成, 时有时无。当较低温度层冰晶下落到较暖的冷层中, 由于凝华、淞附、冰雪晶碰连等原因, 使冰晶不断长大, 如在-7.6--3.0°C层, 连续出现的冰晶最大直径已由  $138 \mu\text{m}$  增大到  $163 \mu\text{m}$ 。大于  $163 \mu\text{m}$  的冰晶虽然仍是间断出现, 但出现频率  $F(D_i)$  已比-11.8--7.6°C层明显增大, 其中雪晶折裂繁生也起了重要作用<sup>[3]</sup>。

## 2. 混合云

由于没有探测到更低温度层冰晶, 仅就在0--6.9°C层中冰晶谱分布作简单分析。在该层中, 谱参数平均值  $\bar{N}_0$  和  $\bar{\lambda}$  在0--3°C和-3--6.9°C层中变化不大,  $\bar{N}_0$ 各为9.48和8.58 $\text{cm}^{-4}$ ,  $\bar{\lambda}$ 各为181和179 $\text{cm}^{-1}$ 。

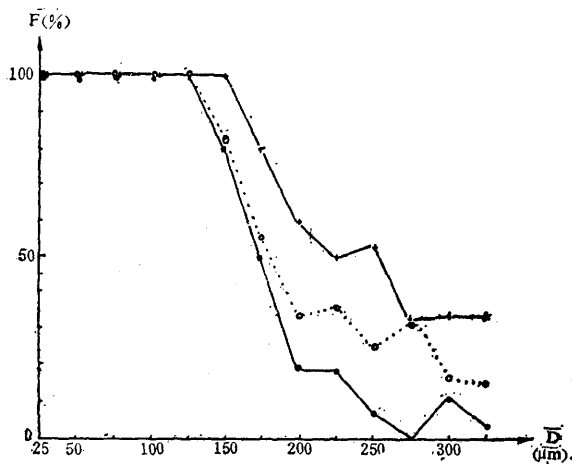


图3 新疆冷云中不同大小冰晶出现的百分比  $F(D_i)$

+ — + 表示云中温度 -3--7.6°C  
 o ..... o 表示云中温度 -7.6--10.3°C  
 ● — ● 表示云中温度 -10.3--11.8°C

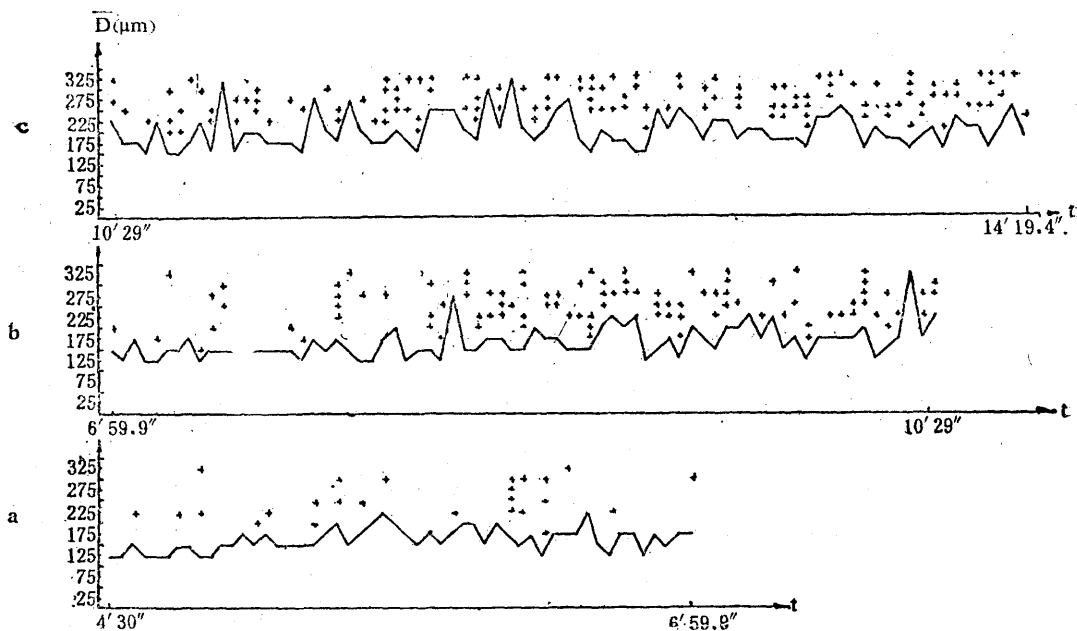


图4 新疆冷云中不同大小冰晶出现的时间序列

+表示间断不连续出现、折线表示连续出现，横坐标是时间(观测时间)对应的云中温度，a为 $-11.8 \sim -10.3^{\circ}\text{C}$ ，  
b为 $-10.3 \sim -7.6^{\circ}\text{C}$ ，c为 $-7.6 \sim -3^{\circ}\text{C}$

### 3. 冷云和混合云平均谱参数比较

同在 $-3 \sim -5.5^{\circ}\text{C}$ 层中，冷云中 $\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$ 比混合云中 $\bar{N}_0$ 、 $\bar{\lambda}$ 大，其中 $18 \sim 163\mu\text{m}$ 的冰晶数浓度，冷云比混合云每升高出40.3个，而较大冰晶粒子( $163 \sim 338\mu\text{m}$ )的数浓度很接近，混合云比冷云高出0.2个/升。就此来看，混合云中小冰晶少，较大冰晶略多于冷云，表明混合云中冰晶生长条件优于冷云。

### 四、谱分布参数 $N_0$ 与 $\lambda$ 之间的关系

在云降水数值模拟计算中，常采用双参数( $N_0$ 、 $\lambda$ )来描述降水粒子谱分布<sup>[6]</sup>，若把 $N_0$ 视作常数，将歪曲实际谱分布。从本文表1列出数据看出 $N_0$ 并非常数，它和 $\lambda$ 有相关趋势，和雪花、雨滴谱分布参数间关系一样<sup>[5]</sup>用幂指数 $N_0 = \sigma_1 \lambda^{\beta_1}$ 来拟合各实测值，结果列于表2。从表2看出： $N_0$ 和 $\lambda$

间有正相关关系，相关显著性水平 $\alpha < 0.01$ 。在既没有枝状折裂繁生，又没有Hallett-Mossop繁生的陕西混合云中 $\alpha_1$ 值最大，新疆冷云为次，有Hallett-Mossop繁生的内蒙古混合云 $\alpha_1$ 最小。 $\beta_1$ 值是内蒙古最大，其次为新疆和陕西，但它们之间无量级差异，这与 $\alpha_1$ 明显不同。

### 五、小结

1.  $18 \sim 338\mu\text{m}$ 冰晶尺度谱分布函数可用 $N = N_0 \exp[-\lambda D]$ 来拟合，其相关显著性水平 $\alpha < 0.01$ 的比值在99%以上。

2. 在 $0 \sim -11.8^{\circ}\text{C}$ 层状云中，谱分布参数 $\lambda$ 变化范围是 $88.0 \sim 462.0\text{cm}^{-1}$ ，最大最小值间无量级差异。而谱参数 $N_0$ 变化范围大，最小值为0.12，最大值为 $120.32\text{cm}^{-4}$ ，最大、最小值间可差3个量级。

3. 在 $0 \sim -7.6^{\circ}\text{C}$ 层中，冷云、混合云中

表2 谱分布参数的相关关系 ( $N_0 = \sigma_1 \lambda^{\beta_1}$ )

云的性质	观测地区 (观测日期)	温度层 (°C)	相关系数 R	$\sigma_1$	$\beta_1$
冷云	新疆 (1984.12.1)	-11--15	0.757	$4.10 \times 10^{-4}$	1.56
冷云	新疆 (1982.11.11)	-10.3--11.8	0.606	$4.84 \times 10^{-4}$	1.89
		-7.6--10.3	0.855	$1.83 \times 10^{-5}$	2.45
		-3--7.6	0.734	$3.06 \times 10^{-5}$	2.43
		-4--3	0.814	$1.36 \times 10^{-4}$	2.16
混合云	内蒙古 (1982.7.8)	-3--6.9	0.841	$4.11 \times 10^{-10}$	4.48
		0--3	0.849	$1.00 \times 10^{-10}$	4.75
混合云	陕西 (1983.5.24)	0--3	0.656	$2.01 \times 10^{-8}$	1.59

分布参数  $N_0$ 、 $\lambda$  各自变化范围是相近的, 平均值也各自接近。在冷云中, 当云中温度低于  $-10^\circ\text{C}$  时,  $N_0$ 、 $\lambda$  变化范围和平均值明显增大, 它反应了冰晶谱分布在低温下变窄、变陡。

4. 谱分布参数  $N_0$  和  $\lambda$  间可用幂指数关系  $N_0 = \sigma_1 \lambda^{\beta_1}$  来拟合, 其相关显著水平  $\alpha < 0.01$ , 参数  $\alpha_1$  值变化有量级差异, 看来和冰晶繁生过程有关,  $\beta_1$  值变化不大。

### 参考文献

- [1] Hobbs. P. V., Ice multiplication in clouds, J. A. S., 26, p375, 1969.
- [2] 人工影响天气研究所, "2D-C"说明书, 1982.
- [3] 陈万奎, 枝状雪花碰连攀附与折裂繁生, 气象科学研究院院刊, Vol.2, 1, 1987.
- [4] Hallett. J., S. C. Mossop., Production of secondary ice particles during the riming process, Nature, 249, p26-28, 1974.
- [5] 陈万奎, 融化层附近降水粒子微物理特征的个例分析, 气象科学研究院院刊, Vol.2, 2, 1987.
- [6] 许焕斌等, 一维时变雹云模式研究(一), 气象学报, 43卷1期 13-25.1985.

## The size distribution of ice crystals within clouds

Chen Wankui Yan Caifan

(Institute of Weather Modification, A. M. S.)

### Abstract

The size distribution and distribution function of ice crystals within mixed and cold cloud in Inner-Mongolia, Shan Xi, and Xin Jiang region were given. The size distribution of ice crystals may be classified to mono-decreasing type and non-mono-decreasing type. The size distribution function may be fitted with exponential formula  $N(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$ . Samples of correlation significance level  $\alpha < 0.01$  hold 99% or more of total samples. Within cold cloud distribution parameters  $N_0$  and  $\lambda$  increase with cloud temperature decreases. While at  $T < -10^\circ\text{C}$  layer,  $N_0$  and  $\lambda$  increase apparently. We proposed the correlation relation between the  $N_0$  and  $\lambda$  in the form of  $N = \sigma \lambda^{\beta}$ .