

# 关于卷云微结构的研究

王 鹏 云

对卷云(包括 Ci、Cs、Cc)微结构的观测研究是云物理学的一项基础科学研究,这项研究对高空飞行、卫星气象和过冷云的引晶催化都有实际应用的价值。对于研究地面辐射平衡也有重要的意义。

本文主要介绍国外对卷云中冰晶和气流结构的观测研究,以及作为自然冰晶源对下面过冷却云可能的引晶催化作用的一些研究成果。同时,也介绍国内的一些观测结果。

## 一、对卷云中冰晶结构的观测研究

Weickmann 于 1947 年最早直接用飞机取样的办法观测了不同型式的卷云冰粒特征,用涂油的玻璃片取样并进行显微照象发现,在对流性的卷云中主要冰晶形状是角锥玫瑰花结形,在卷层云中是单个的角锥形、柱状和板状。

从 1970 年开始,美国国家大气研究中心和芝加哥大学云物理实验室,相继对各种类型的卷云冰晶进

行了飞机取样观测。用涂硅油的玻璃片取样,用显微镜照象以及复模仿连续云素印模仪等观测冰晶形状和长度。用光排阵粒子谱仪测量冰晶浓度。该仪器使用线性排列的光检测器做成的测量网格,来度量冰晶质点在通过激光的平行光束时留下的阴影大小。在飞行中将所测冰晶质点大小的资料记录在磁带上,然后用计算机算出冰晶浓度谱和其它有关参数,如冰水含量、雷达反射率因子、降水强度等。

观测着重于冰晶密集的“胞”区,这些“胞”在 Ci unc 中最明显,即在它的头部。在 Cs 和 Ci dens 中也有冰晶相对密集的“胞”区,一般直径 1—2km,厚度 1km。观测时在不同高度上水平飞行取样或螺旋式上下飞行取样。主要测量结果如下:

### 1. 不同型式卷云冰晶结构的差异

Heymsfield 给出 1970—1972 年在明尼苏达、伊利诺斯州和落矶山区等地的测量结果(见表 1)。由表 1 可见,除积雨云砧部卷云外,钩卷云具有最大的冰

表 1 卷 云 冰 晶 结 构

日期 (年·月·日)	云型	取样高度 (Km)	取样温度范围 (°C)	冰水含量(g/m³)		浓 度 m⁻³		计算反射率因 子(mm⁶ m⁻³)		计算降水量 (mm/hr)		平均冰晶 长 度 (mm)
				最 大	平 均	总浓度	长度 > 100μ 的浓 度	最 大	平 均	最 大	平 均	
1970.7.9	Ci unc	6.5—8.0	-15—-30	0.27	0.16		$1.9 \times 10^4$	17	9	1.0	0.6	0.9
1971.9.19	Ci unc	8.5—9.1	-36—-43	0.39	0.24		$2.5 \times 10^4$	36	14	1.6	0.7	0.75
1971.9.19	Ci unc	8.9—9.4	-40—-44.5	0.25	0.15		$3.0 \times 10^4$	14	7	0.97	0.5	0.75
1972.4.6	Ci unc	9.6—11.0	-41.7—-57.6	0.43	0.30	$4.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^4$	20	10	1.0	0.6	0.6
1972.4.6	Ci unc	9.8—10.1	-43—-46	0.30	0.20	$2.0 \times 10^5$	$4.0 \times 10^4$	12	9	0.9	0.6	0.5
1972.4.6	Ci unc →Cs	9.4—9.8	-14—-45	0.16	0.075	$3.0 \times 10^5$	$1.5 \times 10^4$	14	4	0.7	0.2	0.5
1970.7.22	Cs	5.6—7.8	-8—-22	0.20	0.15		$1.3 \times 10^4$	11	9	0.65	0.55	0.9
1972.3.4	Cs	4.5—7.9	-20—-46	0.067	0.026		$8.0 \times 10^3$	4.3	0.5	0.3	0.1	0.35
1972.4.4	Cs	7.9—8.4	-35—-44.5	0.04	0.025	$2.0 \times 10^5$	$4.0 \times 10^3$	0.6	0.4	0.1	0.025	0.35
1970.7.3	Ci dens	5.5—7.8	-15—-30	0.15	0.06		$1.0 \times 10^4$	6.4	3.0	0.5	0.3	0.7
1971.9.13	Cb inc	9.0		0.95	0.70		$8.0 \times 10^4$	137	50	4.1	3.0	1.0

晶浓度和冰水含量;积雨云砧内含有大量的大冰晶粒子,冰水含量接近  $1.0 \text{ g/m}^3$ 。

### 2. 卷云中冰晶结构随高度的分布

Heymsfield 1974 年在俄勒冈和康涅狄格州等地对厚度超过 5km 的深厚卷云进行了 13 次飞行测量,取样是从卷云云顶(一般为 9—11km)往下,每隔 0.6km 测量一次,每次以 200km/hr 的速度水平飞行 24km。这些飞行测得了卷云冰晶浓度、冰水含量、最大冰晶

表 2 卷云冰晶结构随高度的变化

高度 (Km)	冰晶浓度 (m⁻³)		冰水含量 (g/m³)	最大冰晶 长 度 (mm)
	总 浓 度	长度 > 200μ 的浓 度		
9.3	$3.9 \times 10^5$	3.76	$1.0 \times 10^{-3}$	1.2
8.7	$1.71 \times 10^6$	$7.56 \times 10^1$		
6.3	$4.13 \times 10^6$	$3.76 \times 10^4$		
5.1			0.7	
3.9	$3.76 \times 10^6$	$8.8 \times 10^4$	4.0	3.0

长度随高度的变化(见表2)。

### 3. 卷云中冰晶形状和冰晶谱分布

在弱的 Ci unc 中, 冰晶主要呈板状、柱状; 在强的 Ci unc 中和对流性 Ci 中, 主要是角锥玫瑰花结形; 在 Cs 的“胞”区, 主要是角锥形及其集合。多数卷云的冰晶谱分布呈指数或幂函数递减型。

## 二、关于卷云中气流结构及其形成机制的探讨

Heymsfield 根据对 Ci unc 中冰晶结构的飞机探测和地面多普勒雷达、无线电探空的观测资料, 探讨了 Ci unc 的气流结构及其形成和维持的可能机制。

观测结果表明, Ci unc 的头部处于干绝热递减层, 其上、下各为一个稳定层结。多数 Ci unc 的头部分成两部份; 逆切变区(即切变风的上风方)为上升气流区, 其上升气流速度约 1—1.5m/s; 顺切变区(即切变风的下风方)为下沉气流区, 其下沉气流速度约 0.5m/s。在这两部份中间是一个冰晶浓度极低的“空洞”, 其宽度约 150m。

从观测得出的 Ci unc 中不同高度上冰晶浓度和大小的分布以及上述气流形式可以推论: 在有风速切变时, 冰晶在逆切变区的底部核化, 然后上升, 在上升运动中不断增长, 直到其落速超过上升气流而下落。由于风速切变, 冰晶落入顺切变区, 在下落中继续长大直至进入尾迹区开始蒸发。由于风速切变不同而形成的 Ci unc 的形式也不同, 图1、2、3、4 分别给出不同风速切变下 Ci unc 的示意图。由图可见, 当 Ci unc 的头部和尾迹区都处于正风速切变区时, 云钩的方向与气流方向相反(见图1); 当 Ci unc 的头部处于负风速切变区时, 云钩的方向与气流方向一致; 当 Ci unc 头部处于无风速切变区时, 则不存在“空洞”区, 即不存在云钩。在这种情形下冰晶长大到上升气流托不住它时仍通过原来的路径落下形成尾迹区(见图4)。至于经常观测到的没有头部的钩状尾

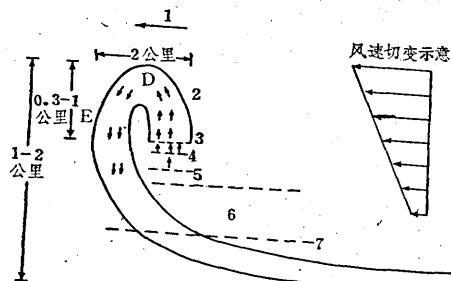


图1 正风速切变 Ci unc 示意图

图中 1 为气流方向 2 为冰晶增长区 3 为可见云底  
4 为核化高度 5 为上升气流起始高度 6 为稳定层  
7 为蒸发区(下同)

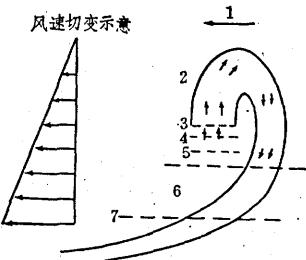


图2 负风速切变 Ci unc 示意图

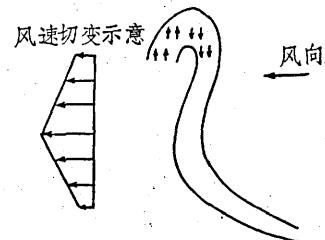


图3 头部为负风速切变、尾部为正风速切变的 Ci unc 示意图

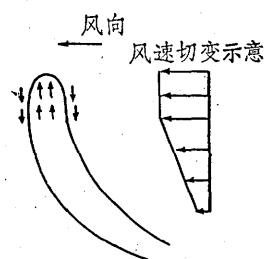


图4 头部无风速切变、尾部为正风速切变的 Ci unc 示意图

迹, 那是已处于消散阶段的 Ci unc。

对 Ci unc 的形成, Heymsfield 提出两种可能的机制: 对沿垂直风向排列的 Ci unc, 认为具有整层的抬升, 对流沿抬升线而发展; 对孤立的 Ci unc, 认为在下面的稳定层中一个波动引起头部区的一个小扰动, 这个小扰动导致该层的对流。冰晶在对流中核化、抬升、落下, 开始形成垂直的尾迹, 继而由于下面稳定层的阻尼作用逐渐趋于水平。

一般 Ci unc 存在的时间约 20 分钟, 但也有长达数小时的。对此有两种可能的解释: 1. 在尾迹区中, 由于冰晶的迅速蒸发而造成的局部冷却, 引起上升和下沉的湍流脉动, 因而造成稳定层中的局部对流, 形成新的云胞。2. 与原来下沉气流伴随发生的辐散或辐合: 在正风速切变时, 下沉气流中的空气比稳定层顶部的空气具有较大的水平速度, 因而在尾迹的下风

方形成辐合区，在上风方形成辐散区。在辐散区老的对流消失，而在辐合区形成新的云胞。在负风速切变时情形刚好相反（图略）。

Heymsfield 还对 Ci unc 冰晶增长和气流结构进行了数值模式计算，所得结果与观测事实和推论基本一致。

### 三、卷云作为冰晶源对过冷云自然引晶催化可能性的研究

1966 年夏季，芝加哥大学云物理实验室 在明尼

苏达州，在卷云下方用复模仿连续云素印模仪，对晴空中残留的冰晶粒子浓度进行了 7 次飞行观测。其中 3 次取样高度到卷云所在高度之间，没有其它可见的云；另外 4 次取样高度附近或与卷云云底之间有其它云存在。显然前者在确定卷云冰晶在晴空中的残留更有说服力；对后者也论证了测到的冰晶可能是从卷云中落下来的。因为测得的冰晶样品多数是卷云中常见的中空柱状冰晶，还有卷云所特有的角锥形和尖柱状冰晶。表 3 是这 7 次飞行观测的资料。另外，测到的冰晶长度最大可达  $70\mu$ ，最小能够识别的冰晶长度是

表 3

卷云下晴空冰晶观测资料

编 号		1	2	3	4	5	6	7
1966年(月·日)		6.22	7.8	7.20	7.25	8.6	8.9	8.16
云 状		Cu fra As brhn Cs	Ci unc Ci fil Ci dens	Ci unc Ci dens Ci fil	Cu fra Ac As Ac cast Cu cong Ci fil Cb	Cu med Cu cong 少量Cb Ci fil Ci dens	Sc Ci fil	Cu hum Cu med Cu cong As Ci dens
卷云情况	平均高度(Km) 高度范围(Km) 平均温度(°C)	6.0 - 10	9.6 - 46	10.5—13.2 - 50		8.7—9.9 - 46	8.7—9.9 - 45	8.7—12.0 - 46
取样条件	T-Td(°C) 高 度(Km) 温 度(°C)	16 5.64 - 9.6	14 5.4 - 9.2	15 4.92 - 4	12 5.7 - 10	13 4.35 - 4.2	10 3.36 - 5	12 5.1 - 10
取 样 部 位 情 况	晴 空	晴 空	晴 空	Ac cast 之间的晴空	Cu cong 附近的晴空	Sc 顶 附近的晴空	As 下 边的晴空	
冰晶最大浓度( $m^{-3}$ )	$10^6$	$10^5$	$10^5$	$10^6$	$10^3$	$10^4$	$10^6$	

$10\mu$ ，多数冰晶长度小于  $40\mu$ 。

对 Ci dens 下方的 As 云和 Cs 下方的 Ac 云中观测结果表明，在冰晶化的高积云中冰晶增长很快，主要冰晶形状是角锥形、中空的柱状和中心带有冻滴的板状，冰粒体积也明显地大，反射率因子也很高。在卷云下方的 As 和 Ac 的冰晶化可能是上面卷云播种的结果。

为了从理论上得到论证，Braham 及 Hall 分别进行了理论计算。在计算中主要考虑了一定形状和大小冰晶的落速及其在一定条件下的蒸发率。计算结果表明，在一些条件下冰晶从卷云底落下的距离很短，不能解释在取样高度上得到的大量冰晶，这可能是由于观测湿度的探空点离观测点太远（90哩）。在另一些条件下计算结果基本上能符合观测事实。Hall 等人还在风洞和冷云室中实测了影响冰晶蒸发速度的凝华关系数与环境温度的关系。这些实验证明了上述计算中所用的方法虽不严格完备，但其结果基本上是正确的。一些有利于卷云冰晶下落的因素，如从大范围卷云中

下落的冰晶蒸发对环境湿度的影响，冰晶蒸发冷却形成的下沉气流对小冰晶的拖带作用等，都有待于进一步的研究。

在对流层中部，经常由温度平流引起的不稳定而形成的 Ac、Ac cast 和 As fra，但单靠这种热力不稳定还不足以引起强烈的对流云发展。卷云冰晶落入这种缺乏冰晶的过冷中云，局地相变潜热的释放可能增加上升气流，使得杂乱的中尺度的对流云发展成具有相当规模的不稳定系统，因而诱发降水的发生。

#### 四、我国关于卷云冰晶的观测研究

1963 年春季，在吉林省对层状冷云观测中就发现，从卷云中有冰晶下落。观测取样按部位分为四类：

1. 飞行在高层云云顶之上，其上部垂直方向上没有卷云迹象的“碧空”取样（见图 5、a）；
2. 在高层云云顶之上有卷云，但距卷云的垂直距离较大，而卷云下拖的旗又未达到飞行层的卷云下方

取样(见图5、b);

3. 卷云下部雪幡甚长, 达到飞行层, 在雪幡中取样(见图5、c);

4. 在高层云顶部隆起的云泡中取样(见图5、d)。

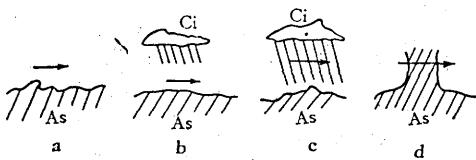


图5 1963年吉林省高层云顶部冰晶取样示意图  
箭头为飞机航行部位和方向

表4 1963年吉林省高层云顶部冰晶取样结果

取样部位	取样次数	冰晶浓度( $m^{-3}$ )	
		平均	最大
碧空	10	$1.9 \times 10^2$	$9.6 \times 10^2$
Ci下部	6	$1.3 \times 10^3$	$9.7 \times 10^3$
Ci雪幡中	10	$6.2 \times 10^3$	$1.4 \times 10^4$
As隆起处	7	$1.6 \times 10^4$	$4.2 \times 10^4$

表5 1968年在华中地区Ci dens中观测冰晶结果

日期 (年·月·日)	观测高度 (km)	云中温度 (°C)	冰晶浓度( $m^{-3}$ )			冰水含量(g/m <sup>3</sup> )			取样次数
			平均	最大	最小	平均	最大	最小	
1968.9.7	6.94	-15.6—-16.4	$2.52 \times 10^5$	$6.26 \times 10^5$	$6.5 \times 10^4$	$1.31 \times 10^{-2}$	$2.84 \times 10^{-2}$	$4.01 \times 10^{-3}$	7
1968.10.30	6.94	-19.0—-21.2	$3.2 \times 10^4$	$1.67 \times 10^5$	$3.0 \times 10^2$	$7.9 \times 10^{-3}$	$2.83 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^{-3}$	20
1968.10.30	6.94	-22.4—-23.7	$1.05 \times 10^5$	$4.15 \times 10^5$	$1.0 \times 10^4$	$1.24 \times 10^{-2}$	$4.80 \times 10^{-2}$	$5.31 \times 10^{-3}$	27

此外还分析了冰晶浓度的水平分布的不均匀性, 冰晶浓度与云的发展阶段、天气条件(云下温度露点差)的关系。9月7日的卷云处于冷锋云系的发展阶段, 下面有中、低云, 地面有降水, 云下温度露点差近于零, 这天测得的冰晶浓度要大一些; 10月30日是非锋面云系的卷云, 天气稳定, 下面只有中云, 空气温度露点差较大, 测得的冰晶浓度要小一些。

## 五、结语

1. 观测指出, 卷云冰晶有柱状、板状、角锥状和角锥玫瑰花结形。冰晶浓度的量级为  $10^5$ — $10^6 m^{-3}$ 。超过  $100\mu$  的冰晶线长  $0.1$ — $1 mm$ , 在温度低达  $-56^\circ C$

取样结果列于表4。

1963年4月16日取样(在Ci雪幡中), 冰晶浓度为  $1.8 \times 10^4 m^{-3}$ , 谱型: 随直径增加浓度近似地呈指数递减; 冰晶形状: 片状、柱状和其它不易辨别形状的晶体。

1968年9月, 在华中地区对Ci dens中的冰晶进行了取样观测。观测用铝箔取样, 手枪式取样器装在机身前部左侧方窗口外, 在压有微孔弹性海绵的金属方框下垫衬铝箔。取样片全长  $7 cm$ , 取样孔长  $5 mm$ , 一般取样时间7秒, 飞机空速  $160 m/s$ , 所得冰晶浓度是云中水平范围  $1 km$  的平均值。用生物显微镜和金相显微镜观测铝箔上的冰晶斑痕形状、大小和浓度。

根据冰晶浓度和冰晶斑痕快接直径按球形粒子采用公式

$$q = \sum_i \frac{1}{6} \pi D_i^3 n_i \rho$$

估算含水量。式中  $D$  为斑痕外接直径,  $n$  为冰晶浓度,  $\rho$  为冰晶密度(取  $\rho = 0.9 g/cm^3$ )。

观测和计算结果列于表5。从铝箔上观测的斑痕形状看, 多数是短柱状。冰晶谱型近似呈指数递减, 浓度大的相应的谱宽些, 浓度小的相应的谱窄些。

时长达  $2 mm$ 。计算所得冰水含量为  $0.02$ — $0.3 g/m^3$ 。这些数值随卷云的类型、部位和高度而异。

2. 从飞机观测和地面雷达探测建立了Ci unc云气流结构的模式, 并探讨了Ci unc的形成和维持的可能机制。

3. 在卷云下方的晴空中观测到卷云落下的冰晶粒子。甚至在温度露点差高达  $15^\circ C$  的晴空中, 在卷云下方  $5$ — $6 km$  处测到浓度高达  $10^5 m^{-3}$  的冰晶粒子。还无法得到理论上的解释。由于卷云冰晶对下面过冷层状云有引晶催化的作用, 对降水形成过程有很大影响。今后应进一步进行野外观测并结合风洞和云室的室内冰晶蒸发试验进行理论研究。