第35卷 第4期　　气 象 学 报　　Vol. 35, No. 4
1965年11月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Nov., 1965

春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点*

游来光　熊光瑩　高明忍
(中央气象局观象台)
陆煜鈞　孙可富　任德福等**
(吉林省气象局)

提　　要

1963年春季，利用鋁箔取样技术对吉林地区的降水性层状冷云中的冰晶、雪晶进行了飞机观测．本文摘要给出云中冰晶与雪晶浓度的空间分布、雪晶形状和温度与晶体浓度的关系、雪晶直径随高度的变化以及在一次探测中观测到的雪晶谱的变化特点等观测结果．并根据这些资料对云中冰晶的形成、增长和云中固态含水量大小等问题做了初步分析．

一、引　　言

为了明确冷云降水特点及人工降水催化条件，了解云中冰晶和雪晶的各种特征，分析冰晶生成与雪晶增长条件是十分必要的．因为仅凭地面上的雪晶观测还很难间接推断云中的冰晶量．利用铝箔取样技术，进行飞机观测在目前是一个比较理想的方法．Durbin曾根据飞机观测[1]给出了云中冰晶浓度及大小的一般概量，但沒有见到更详细的资料．看来，由于云的条件及冰核浓度在时间和空间分布上的差异，势必造成云中冰晶浓度上的巨大差别．而这些差别在降水过程以及催化条件上的影响需要明确．

关于雪晶增长特点上的研究，过去的工作中绝大多数偏重于雪晶的形态学，大多是通过地面雪晶观测用以间接推断高层大气层结与降水特点；或是研究单晶增长速率．进一步研究雪晶的浓度变化特点与雪晶增长的谱特点很少，看来，这还是一个关系到人工催化云层的相当重要的问题．

为此，在1963年春季结合人工降水飞行，在吉林收集了一批层状云中冰、雪晶资料．除对云中冰、雪晶的一般特点进行了解外，还想通过这些资料进一步了解几个问题．1)云中冰、雪晶浓度的空间分布特点及其与冰核活化条件的关系；2)冰、雪晶浓度间的关系；3)云中的固态水含水量；4)云中雪晶增长的谱特点．通过分析以逐步明确几个冷云人工催化的基本问题，即云中冰晶浓度与一般观测到的冰核浓度的关系如何，云中冰晶在那些条件下、在什么部位上缺乏和程度如何，从而进一步讨论人工降水催化技术问题．

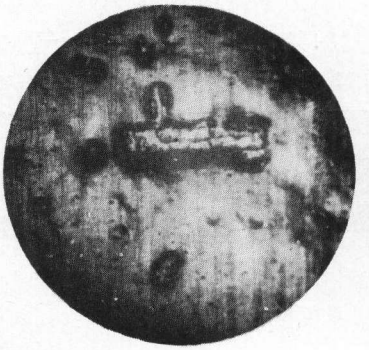
二、观测与资料整理

利用铝箔取样技术，沿飞行航线对云中降水质点连续取样．取样面积为4×10平方

* 本文于1965年6月1日收到．
** 本工作是在程纯枢总工程师指导下，中央气象局观象台与吉林省气象局合作进行的．

20×

1963 年 4 月 23 日 4480 米(−13.8℃)
柱的组合

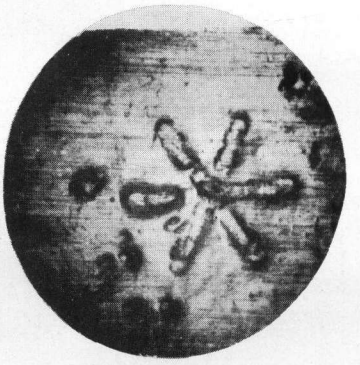


20×

1963 年 4 月 23 日 4480 米(−13.8℃)
柱　状

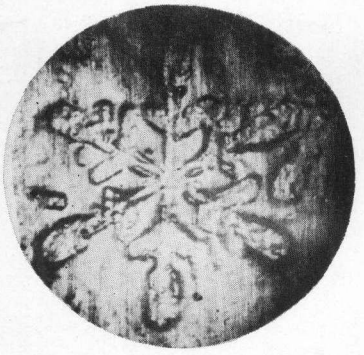
20×

1963 年 5 月 19 日 3530 米(−3.0℃)
片　状



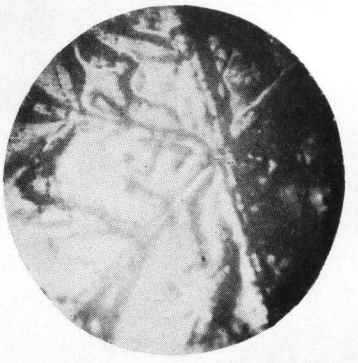
20×

1963 年 4 月 23 日 2260 米(−5.0℃)
星　状



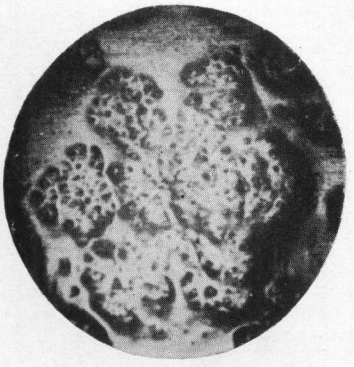
20×

1963 年 4 月 23 日 2100 米(−4.0℃)
枝状片端



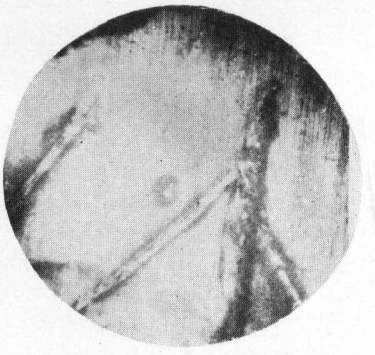
20×

1963 年 4 月 23 日 2100 米(−4.0℃)
枝星状



20×

1963 年 4 月 13 日 2500 米(−3.0℃)
片状带冻滴



20×

1963 年 5 月 24 日 4230 米(−3.2℃)
冰　针

图 1　鋁箔表面上的雪晶斑迹

厘米，暴露时间 1 至 10 秒，按云中质点浓度而定．相应取样体积为 0.28 至 2.8 立方米，代表取样航线上 70 至 700 米距离上的平均情况．用铝箔取样技术可以观测晶体浓度、大小以及一些结构简单的雪晶形状（图 1）．但对一些结构复杂的，尤其是对具有空间结构的雪晶形状不易辨认．根据观测结果看来，对片、枝、针、柱以及扇形晶体常可取到完好图象，且没有明显的表现出取样时由于晶体与铝箔表面的撞击而产生折裂、破碎现象．

根据对取样器捕获性能的计算，对直径 56 微米的滴捕获系数达 0.99；我们认为对直径 100 微米以上的晶体可以完全捕获．但对直径在 300 微米以下的晶体，大多数都不易在铝箔样片上观察出有明显的棱边，形状不易辨认，因而，对直径 300 微米以下者，只计浓度及一般大小．

铝箔样片利用读数显微镜在人工光源下整理，记录冰晶浓度、大小、雪晶浓度、大小及雪晶形状．

由于云中固体质点随直径的不同，相应的在浓度上有很大差别[1]．为了整理方便，采用中谷宇吉郎[2]按晶体大小区分的冰晶与雪晶概念分别进行整理（本文中冰晶指晶体外接直径小于 300 微米者，雪晶指其外接直径大于 300 微米者），然后分析其关系，进一步分析晶体增长的谱特点，再把它们联系起来考虑．

我们按以上方法整理了 20 次飞行中（其中 5 次为积状云）取得的 689 份铝箔样片，其中 534 份是在云中冷层取得的．对 155 份暖层取得的样片只计浓度、斑痕大小；斑与滴的直径比由检定确定．我们着重分析了其中资料较完整的 15 次在层状冷云中冷层观测结果．此外，还分析了 1963 年 4 月 16 日的雪晶谱．分析所用云的有关参量，由其它各项观测给出．

三、云中冰晶浓度

15 次飞行观测的云中垂直向冰晶平均浓度[1)]在 3×10 个/米^{3}至 9.7×10^4 个/米^{3}的范围内，逐次差别颇大．在一次飞行过程中冰晶浓度在垂直方向及水平方向上存在着明显变化．冰晶浓度的极端最大值为 2.2×10^5 个/米^3．有关冰晶浓度的主要特征如下．

1. 冰晶浓度与云层的宏观结构的关系

各次飞行间天气系统的强弱及飞行所处系统的部位很不一样，相应的在云的宏观特点上也有很大不同．不少次由于云层颇厚（一般顶高大于 5 公里、顶温低于 −15℃），飞行未达云顶，在这些次观测到的浓度都较大，在飞行层以下至 0℃ 层的垂直向平均浓度，在 10^4 个/米^{3}至 9.7×10^4 个/米^{3}间，平均为 6.2×10^4 个/米^3．而其余云顶温度高于 −15℃的各次平均为 7.7×10^3 个/米^3，可见，云中冰晶浓度随云顶温度降低而明显增加．

然而，在云顶温度高于 −15℃，一般都飞达云顶的各次间，即使云顶温度相近，冰晶的平均浓度也有很大差别，可达 2—3 个量级．根据在高层云顶平飞过程中观测的冰晶浓度的水平分布看来，在高层云上存在的卷云有雪旛时，常常引起对应部位有高的冰晶浓度．根据飞行取样部位不同，将观测样片分为以下四类．(1)飞行在高层云顶上见不到垂直方向上有卷云迹象的“碧空”取样．(2)在高层云顶上，见到有卷云，但距卷云的垂直距

1) 垂直向平均浓度指不包括水平向平飞过程中所取样片的垂直爬升过程中所取样片的平均——下同．

离较大，而卷云下拖的旛又未达飞行层的卷云下部取样．(3)卷云下部雪旛甚长，达飞行层，在雪旛中取样．(4)在高层云顶部隆起的云"泡"中取样（一般"泡"的水平尺度 2 至 8 公里不等，在其中飞行时可以估计到飞行层以上云颇厚)．图 2 为以上四类样片的取样部位示意图．根据四次飞行中(云顶温度在 −12℃ 至 −13.6℃ 间) 33 个样片统计结果，如表 1．由表可见，除云顶温度外，高云的发展状况是影响云层中冰晶浓度的重要因子．

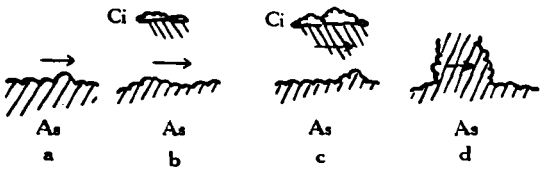


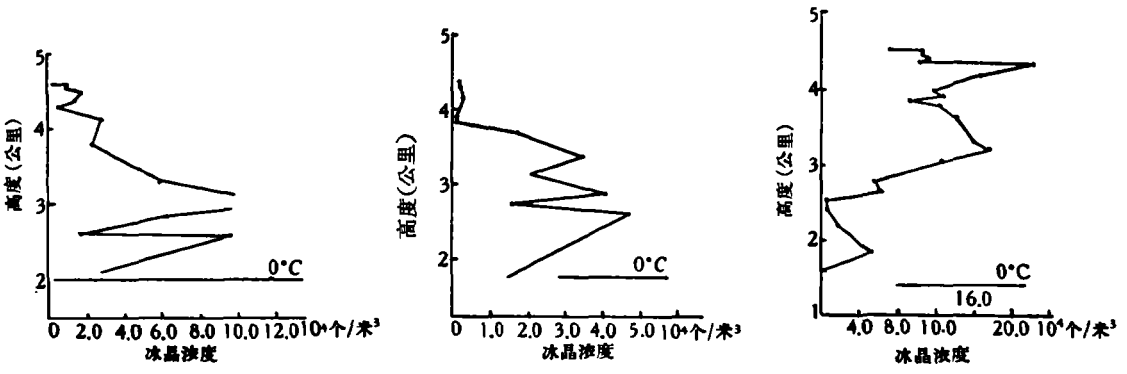
图 2 高层云顶部观测部位示意图

表 1

取样部位	取样次数	冰晶浓度(个/米³)	
		平均	最大
"碧空"	10	1.9×10^3	9.6×10^3
卷云下部	6	1.3×10^3	9.7×10^3
卷云的雪旛中	10	6.2×10^3	1.4×10^4
高层云隆起部分	7	1.6×10^4	4.2×10^4

2. 云中冰晶浓度的空间分布

根据 10 次飞行观测的冰晶浓度垂直分布特点，归纳成以下二类．(1)自云顶至 0℃ 层，浓度随高度降低而增加；个别次在冷层偏下部出现最大，自 0℃ 层以上 1 公里高度处向下再次减少．在所分析的 10 次中有 6 次属于这种类型，如图 3a,b 例．(2)10 次中有 4 次浓度是向下减少的，如图 3c 例．在这些次飞行中，爬高航线很不一致，有的在爬高过程中水平航线达 150 公里．因此，给出的垂直分布状况中由于浓度的水平变化所引起的部分无法免除．就垂直爬高的水平范围不十分大，而爬高地区云与降水特点也较一致的几次探测看来(如：5月 4 日和 7 日)，浓度自云顶向下增加，在云的中、下部达最大，是云层中冰晶浓度垂直分布的一个基本特征．而其余 4 次浓度随高度降低而降少的例子，飞行均未达云顶，无从了解整层的分布特点．



a. 1963 年 5 月 7 日　b. 1963 年 5 月 4 日　c. 1963 年 4 月 28 日

图 3 冰晶浓度的垂直分布

除在高层云顶平飞观测到冰晶浓度的不均匀分布特点外，在高层云中也观测到在同一高度上冰晶浓度水平分布上有很大差别。图 4 为 5 月 7 日例，飞行高度在 4510 米到 4610 米间，水平航程约 100 公里．每次取样暴露时间为 2 秒，代表各点附近 150 米距离内的平均值．浓度变化于 4.9×10^4 个/米^{3}至 1.6×10^3 个/米^{3}间．冰晶浓度水平向分布的不均匀和上部云层的发展状况有关，可能是冰晶浓度空间分布的一个重要特征．

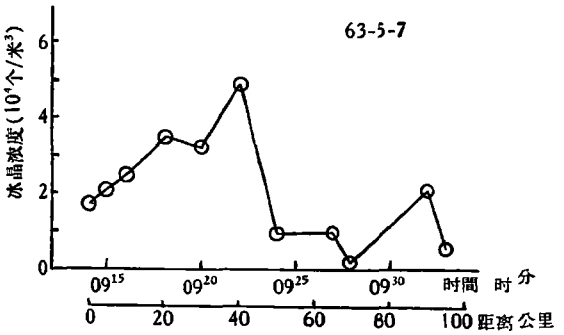


图 4　冰晶浓度的水平分布

四、雪晶浓度与增长特点

1. 雪晶浓度和形状特点

雪晶浓度值各次飞行间差别也很大，垂直向平均浓度范围在 7.0×10^2 个/米^{3}与 3.0×10 个/米^{3}间．各次雪晶垂直向平均浓度与云的宏观结构的关系、雪晶浓度的空间分布特点与冰晶的相应特点一致．各次观测中，雪晶浓度与冰晶浓度是正相关的．图 5 为各次飞行观测的雪晶平均浓度 N_s 与冰晶平均浓度 N_i 的相关．在图 5 中还给出了两者比值 N_s/N_i 与冰晶平均浓度 N_i 的相关．由图 5 可以看出，(1) N_s 与 N_i 正相关．只有一次 $N_s/N_i=1$，即冰晶浓度与雪晶浓度相等，一般，N_s 远小于 N_i．(2) N_i 小于 1.5×10^4 个/米^{3}段 N_s/N_i 随 N_i 减小而迅速增加．(3) N_i 大于 1.5×10^4 个/米^{3}段比值 N_s/N_i 基本不随 N_i 变化，N_s/N_i 近似为一常值 5.2×10^{-3}．此值不因天气系统、云的条件有明显的变化．

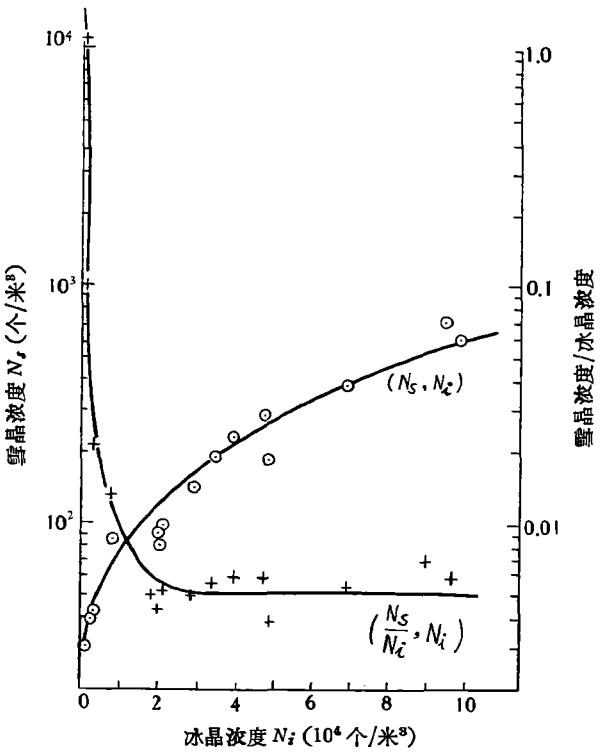


图 5　雪晶浓度 N_s 与冰晶浓度 N_i 的关系和比值 N_s/N_i 与 N_i 间的关系

关于雪晶的形状，由于飞行上限高度与云顶温度出现机会的限制，还不能完全明确自然条件对雪晶增长形状的影响．图 6 给出的不同形状的雪晶在各温度下出现的频率，只能做为各温度下观测到该型晶体的机率．其中冰针只在较高温度条件下产生，在观测到冰针的 7 次飞行中，冰针出现的上限高度处的温度在 −8.0℃ 至 −3.2℃ 间，这与一些室内试验结果一致．

雪晶形状与冰晶浓度的关系如图 7．主要特点是：(1)当有枝状雪晶出现时，对应云

中都有很低的冰晶浓度（10^2 个/米^{3}至 10^3 个/米^3），而柱与柱的组合对应有最高的冰晶浓度．（2）冰针只在较高温度条件下形成，而观测到的冰针常有非常高的浓度，最大值达 8.8×10^3 个/米^3（平均直径在 1000 微米左右）．（3）由各不同形状晶体的雪晶浓度频率分布与相对应的同时观测到的冰晶浓度的频率分布对比可以看出，枝星状雪晶与冰晶频率的峯值浓度一致，枝片差两个量级，冰针差一个量级，柱与柱束差两个量级。

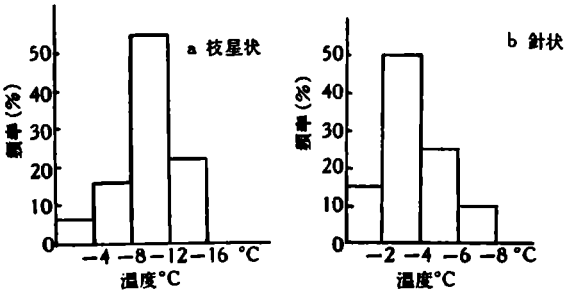


图 6 雪晶形状在各温度下的出现频率

2. 雪晶的径向增长

雪晶在下落途中不断增长，如果不考虑风对落雪的影响及水平向分布的不均一性，则可由直径的高度分布粗略地估计增长率．图 8 为各次雪晶的平均直径与最大直径高度分布例．其中观测次数多、飞行爬高的水平航线不过长的各次，雪晶外接直径随高度降低而增加的特点明显．平均看来，在云的上层（一般在 0℃ 层以上2.5公里），雪晶的平均直径约为500

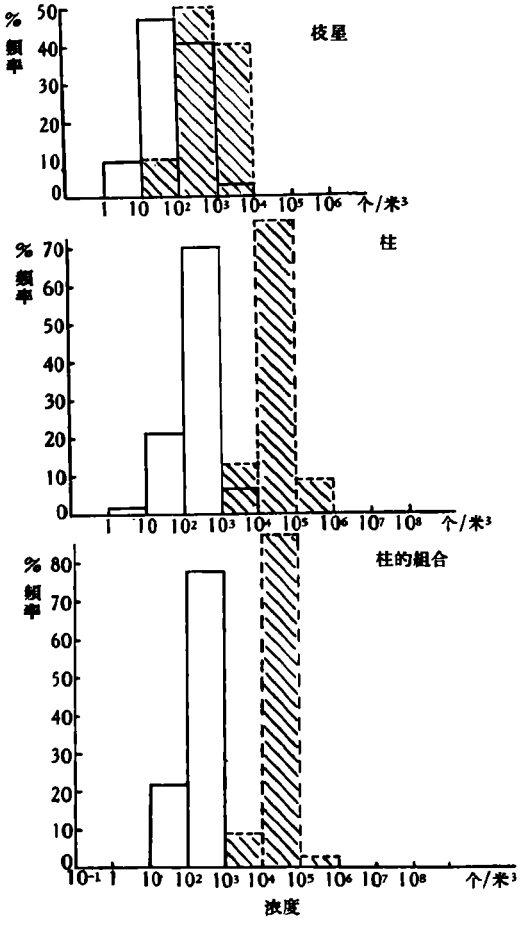


图 7 雪晶形状出现频率与晶体浓度的关系

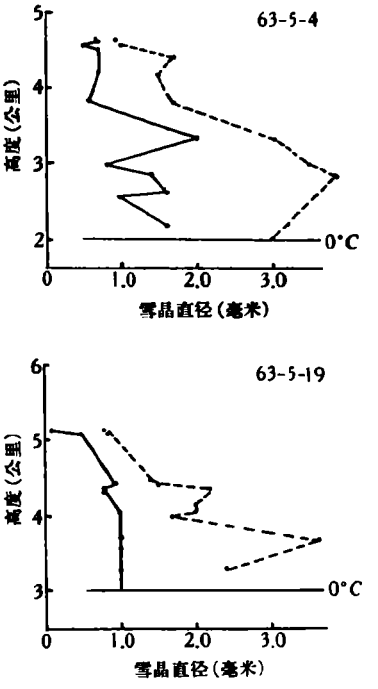


图 8 雪晶平均直径与最大直径的高度分布

微米，至 0℃ 层可达 1500 微米，因此估计其增长率约为 0.4 毫米/公里.

图 8 中的另一组曲线给出雪晶最大直径的高度分布，与平均直径比较看来，随高度降低两者差别增大. 推想，随高度降低各高度上雪晶的直径分布范围加大，即雪晶的谱分布是随高度降低而变宽的.

五、雪 晶 譜

云中不同大小的晶体在浓度上的巨大差异表明，雪晶直径分布(雪晶谱)是雪晶增长过程的重要特征量. 我们整理了 1963 年 4 月 16 日一次气旋前部暖锋段上取得的 40 个样片，根据取样部位、高度以及雪晶形状的分析结果，雪晶谱具有以下几个特点.

1. 雪晶谱的谱型

(1) 云层上部或主要包含片、柱及其他形状而沒有出现冰针、枝星状雪晶的云中各点，雪晶浓度随直径增加成指数递减，如图 9.

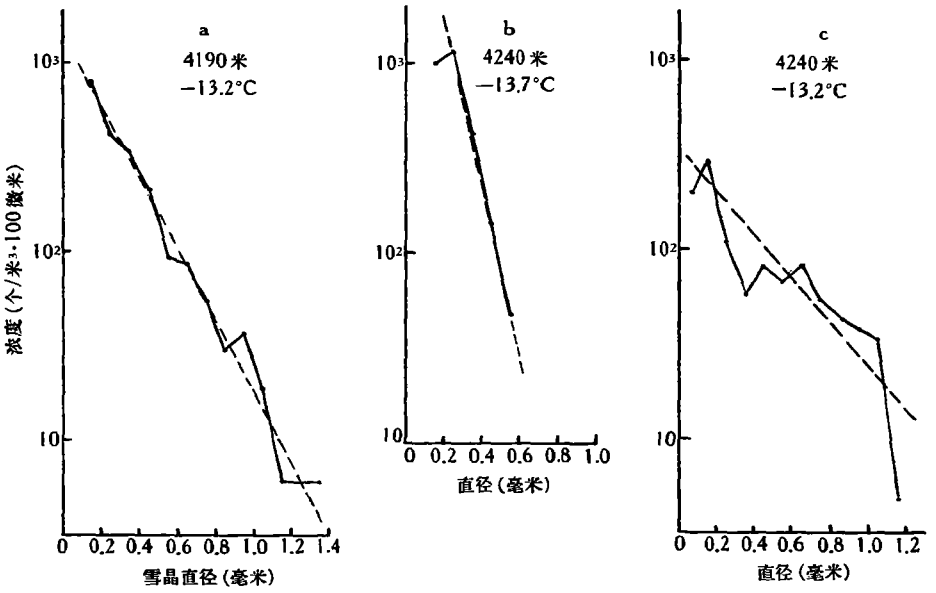


图 9　雪晶的基本谱型(一)

(2) 只计样片上的冰针或只计枝星状(或有片状的枝)雪晶的浓度，其谱形基本上呈近似的正态分布，如图 10.

此外，包含有多种形状雪晶的雪晶谱常出现明显的多峯，如图 11 例. 看来，这个特点是由于以上两种基本谱型迭加造成的. 图中在直径小于 600 微米段浓度随直径增加成指数性减少，在 600 微米处出现的峯值与观测到的霰的峯值对应，而在 1600 微米处出现的明显的峯值与冰针谱的峯值对应. 图中粗线表示只计冰针的直径大小分布.

2. 雪晶谱的垂直变化

图 12 给出自 4240 米至 1680 米间 5 个高度上的雪晶谱. 由图可以看出，谱形垂直向下变宽，当有冰针增长时，出现峯值. 单一形状的雪晶谱的演变以冰针为例，从三个高度上的谱形看，具有以下特点. 浓度随冰针长度基本呈正态分布的特点不变，峯值直径

自 3080 米处的 1000 微米至 1680 米处的 1600 微米向下增加,而绝对浓度向下减少.

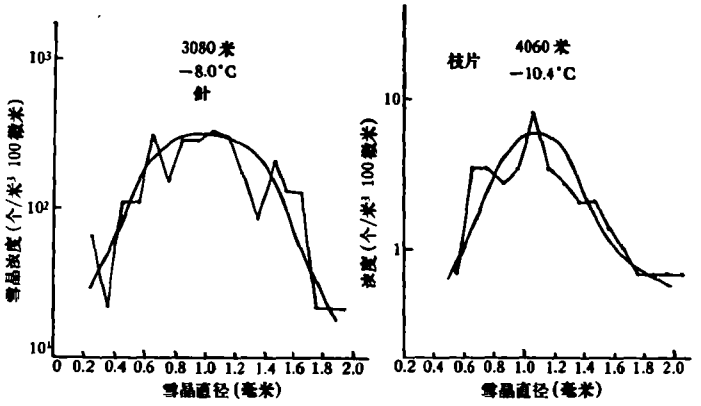


图 10 雪晶的基本谱型(二)

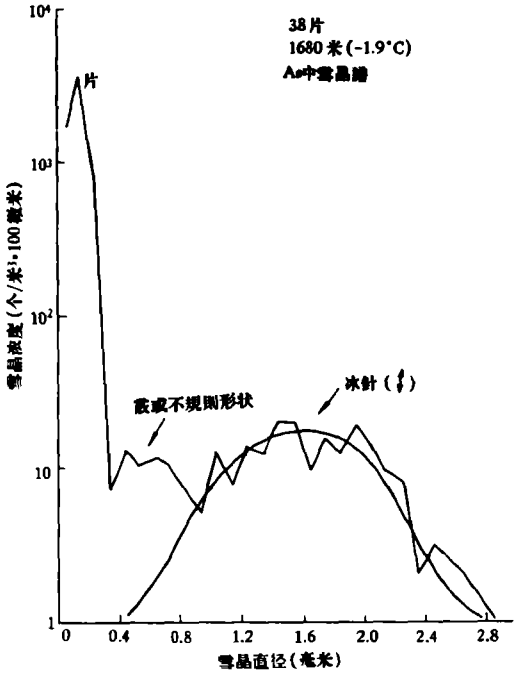


图 11 有多种形状雪晶存在时的雪晶谱

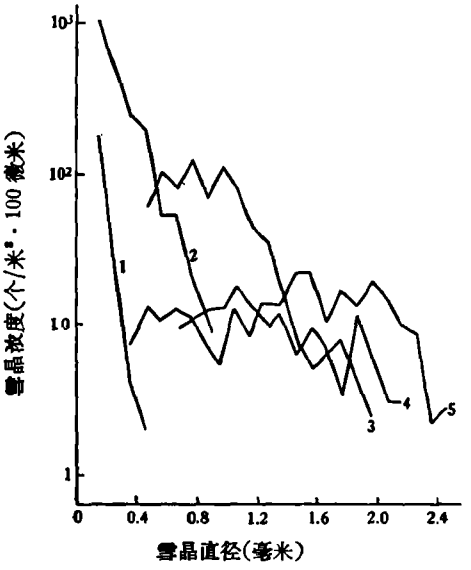


图 12 雪晶谱随高度的变化

(1——4240 米, −14.0℃; 2——3440 米, −10.4℃; 3——2440 米, −4.8℃; 4——2080 米, −4.4℃; 5——为冰针, 1680 米, −1.9℃)

3. 雪晶谱的水平变化

雪晶谱的特点在云中不同部位常有重大差别. 从高层云顶部观测的不同部位下的雪晶谱表明,在卷云下拖的雪旗中的谱分布是没有微小冰晶,晶体直径都较大. 在高层云顶部没有观测到取样正上方卷云的谱窄、直径都小. 高层云顶部隆起处的云体中谱较宽.

实际上就所分析的这 40 个样片看来,除以上所摘要的一般特点外, 谱形本身及谱的空间分布上的个别特点还相当复杂. 仍需分析更多的资料才能进一步明确雪晶在云中的一般增长特点.

六、云中固态含水量

云中固态含水量缺乏可靠的观测方法．我们根据云中冰晶与雪晶浓度及一般大小的观测间接地估算了固态含水量的概量．

冰晶态含水量　云中垂直向冰晶的平均浓度各次间差别很大，直径一般都在100微米左右．有关微小晶体直径与质量的关系研究得还少，这里引用了 Itoo(1952)[3] 的资料，每个 100 微米直径的片晶质量约为 1.35×10^{-7} 克，每个长 83 微米的柱晶质量约为 1.41×10^{-7} 克．按每个冰晶的质量为 1.4×10^{-7} 克，根据浓度计算冰晶态的含水量．

雪晶态的含水量　由于雪晶的形状复杂，直径与质量的关系难于确定，因而不易估计．不同形状，具有相同外接直径的晶体质量可以有量级上的差异．平均看来，雪晶直径一般都在 1000 微米附近．冰针出现的机会甚少，考虑其它形状中同等大小晶体的质量的极端值，对于霰为 6.5×10^{-5} 克，对于片枝带冻滴为 2.7×10^{-5} 克．根据以上两种质量，可以估算云中雪晶态的含水量的极端情况．

计算出的各次飞行的整个冷层中垂直向平均含水量，给在表 2 中．表中还给出了该次混合层中的平均过冷水含量．由表 2 看出，云中冰晶态含水量一般小于雪晶态含水量 1 个量级或具有相同量级，而小于液态含水量 1—2 个量级；雪晶态含水量一般小于液态含水量 1 个量级或具有相同的量级．液态含水量与雪晶态含水量的比值在 40.8 与 2.00 的范围内变动，差别很大．这反应出人工催化条件上的巨大差别．

表 2　各次飞行云中垂直向平均含水量

日　　期	冰晶态含水量 (克/米³)	雪晶态含水量(克/米³)		过冷水含水量 (克/米³)
		按　霰	按 片 枝	
4 月 13 日上午	9.7×10^{-3}	2.4×10^{-2}	1.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}
13 日下午	1.3×10^{-2}	4.6×10^{-2}	1.9×10^{-2}	3.9×10^{-2}
16 日上午	2.5×10^{-3}	5.9×10^{-3}	2.5×10^{-3}	7.7×10^{-2}
16 日下午	4.2×10^{-6}	2.0×10^{-3}	8.1×10^{-4}	2.9×10^{-2}
23 日	2.8×10^{-4}	2.7×10^{-3}	1.1×10^{-3}	2.8×10^{-2}
28 日	1.4×10^{-2}	3.8×10^{-2}	1.6×10^{-2}	6.3×10^{-2}
5 月 3 日	9.1×10^{-4}	5.5×10^{-3}	2.3×10^{-3}	5.0×10^{-2}
4 日上午	2.8×10^{-3}	6.4×10^{-3}	2.7×10^{-3}	8.7×10^{-2}
4 日下午	5.6×10^{-5}	2.6×10^{-3}	1.1×10^{-3}	4.0×10^{-2}
7 日	6.6×10^{-3}	1.8×10^{-2}	7.6×10^{-3}	1.2×10^{-1}
19 日	4.8×10^{-3}	1.2×10^{-2}	5.1×10^{-3}	3.5×10^{-2}
24 日	2.7×10^{-3}	5.2×10^{-3}	2.2×10^{-3}	6.6×10^{-2}
6 月 8 日上午	5.5×10^{-3}	1.5×10^{-2}	6.2×10^{-3}	1.1×10^{-1}
8 日下午	3.9×10^{-3}	9.1×10^{-3}	3.8×10^{-3}	
11 日	6.7×10^{-3}	1.2×10^{-2}	4.9×10^{-3}	2.0×10^{-1}

七、几个問題的初步探討

1. 云中的冰晶浓度

冰晶在冰核上形成，其浓度主要决定于大气中包含的冰核量与冰核活化的动力、热力

条件和云中冰晶的收支关系. 大气中的冰核随活化温度递减其浓度成指数增加. 冰核只在水面饱和或水与冰面饱和之间的湿度条件下活化,因此一般说来,可以认为云顶温度是冰核活化条件的指标. 在我们所分析的飞机飞达云顶的几次降水性层状云的云顶温度,在 −11.5℃ 至 −15.0℃ 间. 若按在吉林白城地面观测的平均冰核浓度估计,在云层中活化的冰核量约在 1×10^3 至 3×10^3 个/米^{3}的范围内. 一般都低于所观测到的冰晶浓度,平均看来,相差约达 1 个量级. 冰晶浓度与云层中可活化的冰核浓度的比值各次间的差别也大. 就飞达云顶的这 6 次飞行结果看来,除影响云中冰晶浓度的其它各因子外,这些差异很可能是由于卷云发展状况不同而引起的. 当高层云云顶以上有明显的雪旗下拖,并经常可达高层云云顶部的都有较高浓度(例如,4 月 16 日上午为 1.8×10^4 个/米^3, 5 月 4 日上午为 9.6×10^3 个/米^3). 而卷云颇高,无明显的雪旗下拖达高层云顶的,浓度都小(例如,4 月 16 日下午为 3×10 个/米^3, 5 月 4 日下午为 4×10^2 个/米^3). 结合表 1 看来,除云顶温度外,卷云的发展状况很象是影响云中冰晶量的重要因子.

根据最易折裂的枝状晶体出现时的冰晶浓度的分析结果(图 7)看来,由于晶体折裂而造成的增殖过程,不象是云中供应冰晶的重要来源. 此外,由于存在取样捕获性与观测设计上的问题,根据这些资料还得不到由于滴的冻结而造成冰晶增殖的充分证据. 由图 7 还可以看出,柱状与柱的组合状的晶体出现时,常对应有很高的冰晶浓度. 根据观测的条件分析这些晶体,主要是在较低的温度条件下形成的,与枝星状晶体出现时的情况比较,也可以推想冰晶浓度多少更决定于云层中冰核的活化条件. 由于高层卷云的发展情况对云中冰晶浓度的影响,注意观测高层卷云发展状况对明确云的微观结构很有意义.

2. 雪晶浓度与雪晶的增长条件

雪晶的凝华增长率决定于云中过饱和度,云中过饱和度决定于垂直气流、温湿状况,也决定于冰晶浓度及大小.

根据雪晶形状与浓度的相关看来,饱和型的枝星状晶体只在低冰晶浓度条件下出现(图 7),而在适于枝星状增长的温度条件下,冰晶浓度大时只出现片状或少数的扇状. 因此,有可能冰晶浓度在云中的过饱和度上有重要影响. 此外,初步看来,冰、雪晶浓度与混合层(存在有过冷水的层)的温度下限(或混合层的厚度)有关. 冰(雪)晶浓度高的各次,混合层一般都薄;而混合层厚的各次,冰(雪)晶浓度一般都较低. 这可能是由于冰(雪)晶在云中增长,大量消耗云中水分,致使湿度减至水面饱和以下而造成的. 但由于系统强弱及飞行所处系统部位不同,还得不出更严格的关系.

云层的自然激发与雪晶在云中增长的条件相互作用,关系到人工催化条件、催化技术,这是个需要进一步明确的问题.

八、結 束 語

根据 1963 年春季在吉林所做的飞机观测得到的云中固体质点的资料,发现云中冰、雪晶的一些基本性质,本文对这些基本特征进行了初步分析,主要结果如下.

1. 云中冰晶(直径小于 300 微米的晶体)浓度随云顶温度降低而明显增加,与在云顶温度下活化的冰核浓度比较,常偏高约一个量级. 在 15 次飞行中,冰晶的垂直向冰晶浓度在 3×10 个/米^{3}与 9.7×10^4 个/米^{3}的范围内,极端最大为 2.2×10^5 个/米^3.

高层云顶部经常观测到有不等量的卷云，卷云下拖的雪旛往往向高层云输送大量冰晶胚胎．由于这种影响，在高层云顶部冰晶浓度有重大起伏，变化可达两个量级．

根据以上分析，高层云云顶温度和其上部的卷云状况是影响云中冰晶形成的两个基本因子．

冰晶浓度的垂直分布特点，是自云的上部向下增加，到 0℃ 层以上约 1 公里处又再次减少，而在冷层的中、下部出现最大．

2. 云中雪晶（直径 300 微米以上的晶体）浓度远小于对应的冰晶浓度，相差一般都达两个量级．雪晶的垂直向平均浓度在 3×10 个/米^{3}与 7×10^2 个/米^{3}的范围内，极端最大浓度为 8.8×10^3 个/米^3．雪晶浓度与冰晶浓度呈正相关，两者比值 (N_s/N_i) 随冰晶浓度 N_i 增加而迅速减小，直到冰晶浓度为 1.5×10^4 个/米^{3}处，大于此值时，比值近似维持常值 5.2×10^{-3}．

雪晶浓度与云顶温度的相关及空间分布特点和冰晶的相应特点一致．

冰晶浓度与雪晶形状的相关指出，枝星状对应有最低的冰晶浓度，柱与柱的组合对应有最高的冰晶浓度．从这个事实看来，由于枝星状雪晶的折裂，引起云中冰晶增殖的过程不象是云中十分重要的冰晶来源．

由雪晶平均直径的高度分布，估算雪晶下落过程中直径的增长率约为 0.4 毫米/公里．

3. 由 1963 年 4 月 16 日的个例分析看来，云中雪晶直径分布有两种谱型．一为浓度按直径增加近似地成指数性递减，对应形状为片、柱及其它不易辨别形状的晶体．另一为对称于众数直径的近似正态分布．

雪晶谱的主要特点是：不同形状的雪晶在云中同一点存在时，由于谱的迭加可出现雪晶谱的多峯．雪晶谱自云的上部垂直向下变宽．此外，雪晶谱在水平方向上存在有重大变化．

4. 云中固态水含水量一般都远小于混合层中的过冷水含水量，冰晶态含水量小 1 至 2 个量级，雪晶态含水量小一个量级．根据 14 次情况统计，其极端值如表 3 所示．

表　3

	最大值含水量(克/米^3)	最小值含水量(克/米^3)
冰晶态 W_i	1.4×10^{-2}	4.2×10^{-6}
雪晶态 W_s（按片枝）	1.9×10^{-2}	8.1×10^{-4}
过冷水 W	2.0×10^{-1}	2.0×10^{-2}
W/W_s	41	2.0

参　考　文　献

[1] Durbin, W. G., *Weather*, **13** (1958).
[2] Nakaya, U., Snow Crystals, Harvard Univ. Press, 1954.
[3] Itoo, K., *Papers in Met. and Geophys.*, **3** (1952), 297—306.