

云 的 微 结 构

鄧 大 雄

前几讲中，我们已经讲到了云的分类与形成。从尺度上来讲，我们肉眼能见到的云的各种形态，从雷达荧光屏上见到的云和降水的回波，以及从卫星云图上看到的云场，它们的尺度从几米到上千公里，它们的特征与形成过程是与大气层结、流场和天气系统相联系的。这种把云作为一个整体来看的特征，如云的外形、生命史、云内温度分布、气流状况等都属于云的宏观结构范畴，已在上一讲作了介绍。如果我们深入到云的内部，考查云内的水滴与冰晶，凝结核与成冰核，它们的尺度只有百分之几微米到几毫米，与前者相比尺度要小得多，这是云的微观方面。为了了解云和降水发生发展的全过程，或者对它们施以人工影响，只研究云的宏观方面是远远不够的。近几十年来，随着对云的飞机观测资料的积累及观测质量的提高，

对云的微观结构和物理过程有了进一步的认识，云微物理已逐步成为一门专门的学科。在这一讲里，我们重点介绍云的微观结构的一般特征。

云中湿度与凝结核

一般说来，当空气中的水汽压达到饱和水汽压时，就会产生凝结。我们常把空气绝热上升膨胀冷却，温度到达它的露点处的高度，定义为凝结高度。再往上空气中的水汽就会凝结出很多小水滴而形成云。晴天积云的云底大体就在这同一高度上。

在完全纯净的空气中，即使相对湿度高达 100%，水汽也不发生凝结。而是要在相对湿度高达百分之数百的高过饱和条件下，通过水汽分子自身的互相聚合，才能凝结出水滴。在实际大气中，因为十分丰富的微

小粒子——气溶胶粒子充当了凝结的核心，所以湿度无需达到高饱和就能凝结出水滴来。因此，凝结核在这个过程中的重要作用是不能忽略的。它不仅使云得以容易形成，而且在某一过饱和条件下，也决定了云滴的浓度和初始大小的分布。

大气中气溶胶粒子的总浓度，大体上等于由爱根计数器测到的凝结核浓度。在这种计数器内可造成100—300%的过饱和。几乎可以激活全部气溶胶粒子，使其形成水滴沉降而被计数。由这种仪器测到的核，叫做爱根核。近地面大气中爱根核的浓度随时间、地点、气象因子等而变化，其量级一般为 10^4 — 10^6 /厘米³。实际上，充当云滴凝结核心的，只是全部气溶胶中的很小一部分，称为云凝结核。它们的尺寸比较大，一般在 10^{-2} 到1微米之间。有的本身具有吸湿性（如盐核），有的吸附了某些气体。它们在稍超过饱和不到1%的条件下，就能凝结出水滴来。它们的浓度比爱根核少2至3个量级。在海洋上，浪花溅散及水面气泡破碎蒸发形成的盐核，是云凝结核的主要来源。在内陆，云凝结核主要来源于火山灰、地面扬尘、花粉和燃烧产生的粒子等。

在一个逐渐冷却的空气团中，凝结首先发生在最大的吸湿性核上。有多少核能凝结成水滴，决定于凝结核本身的大小和浓度，以及水汽的供应率，也即所能达到的过饱和度。很多研究者观测了不同气团中云凝结核浓度与过饱和度的关系，得到了不同的谱线。其中以大陆与海洋气团的差别最为明显。如图1所示，大陆气团中云凝结核浓度比海洋气团中的约高一个量级。从而云中的云滴浓度也出现相应的差别。

云凝结核与云中湿度有着十分密切的关系。在吸湿性核较多的情况下，云中湿度可低于100%；活性较低的核则要求云中有一定的过饱和度；当云中湿度增高时，能激活一批新的凝结核形成云滴；云滴的形成与增长又会抑制云中湿度的进一步增高。淡积云和中积云中湿度约在98—102%之间，中值为100.1%。云中的相对湿度还与所处部位有关，在云边缘部分由于干空气的混合，相对湿度可低达70%，而云的中心部位则可高达107%。

过冷却水滴与成冰核

我们现在来考查温度低于0°C时云的情况。通常我们都认为水在0°C结冰，这对于自然界中大体积的

水来说是对的，而分散为小体积的悬浮在大气中的云滴却往往在0°C以下并不结冰，我们叫它们为过冷却水滴。飞机观测表明由过冷却水滴组成的云在大气中经常遇到。飞机进入这样的云中，会使飞机积冰，严重时会发生航行事故。据观测，在云顶温度高于-10°C时，约有半数的云是过冷却的。当云顶温度为-20°C时，只有约10%是过冷却的。图2是Peppler 1940年在德国作的观测结果，其他地区都有类似的情况。

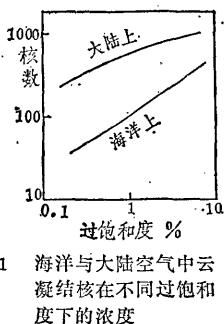


图1 海洋与大陆空气中云凝结核浓度在不同过饱和度下的浓度

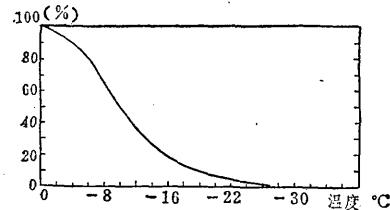


图2 在不同云顶温度下过冷云出现频率

对纯净水滴作冷却冻结试验表明，小水滴一直要过冷到-40°C以下才会自发地冻结成冰。在高于-40°C时，水滴只有沾染上某些杂质才能冻结。这一点与在凝结核上形成水滴的情形很相似。这些能使过冷水滴冻结或直接通过凝华而形成冰的粒子，叫做成冰核。成冰核的测量通常是在云室中进行。将空气样品引入云室，造成过冷云，然后测量在不同温度下所产生的冰晶数目。这种冰核计数器式样繁多，目前还没有统一的标准仪器，观测结果也相差较大。下面给出成冰核的一些主要观测结果。

1. 大气中成冰核的浓度随温度降低呈指数增加。大约每降低4°C，浓度增加一个量级。Fletcher总结出在-10—-30°C典型的成冰核浓度可用下式表示：

$$N = Ae \times p(\beta\Delta T)$$

其中 ΔT 是过冷却度， $A = 10^{-5}$ 升⁻¹， β 在0.4—0.8之间，通常取0.6。

2. 成冰核的浓度随时间变化大，随空间变化小。成冰核的浓度的逐日变化最大可比平均值高几个量级，而且可持续几天。这种高浓度的成冰核的出现，称为冰核暴。但是它们的平均浓度随地区的变化却不大。虽然大气气溶胶浓度是随高度降低的，但成冰核浓度随高度变化不大，在高空往往浓度更高。有人报告在高空急流附近曾观测到成冰核的高浓度。

3. 大气气溶胶中只有很少一部分能充当成冰核。成冰核与爱根核的比值约为 10^{-6} :1。观测表明，温度高于-20°C的成冰核浓度与爱根核没有什么相关，而与大核（尺度在0.1—1微米范围）的浓度有很好的相关，说明成冰核是气溶胶中尺寸较大的那一部分。

4. 大气成冰核绝大多数是粘土粒子。它们的直径为0.1至10微米，多不溶于水，这是电子显微镜对雪晶中心的固体微粒观测结果。当出现冰核暴时，上游常有风沙或尘暴出现，因而可以认为自然成冰核的主

要来源是被风带到高空的尘埃粒子。鉴于在平流层观测到成冰核的高浓度，也有人提出成冰核的来源是宇宙尘埃，但还缺少合理的物理证据来支持这一假说。

成冰核按它们在相变过程中的作用可分为三种：水汽分子在核表面上直接凝华产生冰相，这种核叫凝华核；成冰核在过冷水滴内部产生冰相，或通过凝结再冻结，叫冻结核；过冷水滴在与核接触的瞬间产生冰相，叫接触核。不过现有的冰核计数器还不能分别对这三种核进行计数。

虽然由过冷水滴变成冰需要有成冰核，但是对自然云中冰晶浓度的观测表明，在温度高于-10°C的过冷云中，有时实际的冰晶浓度比成冰核浓度高几个量级。这种情况一方面说明目前的冰核计数器还不能在各方面模拟自然界的条件，因而冰核计数不准确；另一方面表明云中的冰晶还可通过其他途径产生。云物理工作者对此称之为“冰晶繁生”的现象，作过很多研究工作，这里就不详细介绍了。

云滴和雨滴

云中水滴的尺度，包括一个很宽的范围，它可从微米量级的云滴直到毫米量级的雨滴。按一般的习惯，云滴与雨滴的分界线定在100微米。图3是云中水滴大小比例图，并同时给出水滴的浓度与末速。相对地说，云滴的尺寸小，浓度高，沉降速度小，而雨滴正好相反。组成我们一般能见到的云的主要是一些密集的云滴。只有在一定条件下，通过增长过程云滴才能转变成雨滴，所以多数云中并不出现雨滴。

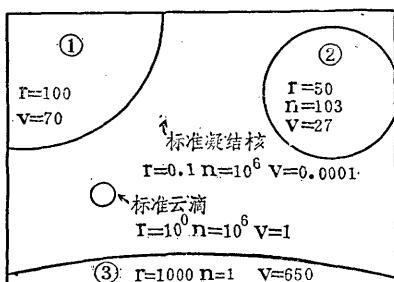


图3 云中水滴大小比例图

①为半径(微米) n为每升个数 v为末速度
(厘米/秒)

①云滴与雨滴之间的习惯边界线 ②大云滴 ③标准雨滴

云的浓和稀，可用单位体积内云滴的个数来表示，称为浓度。云滴各种大小尺度下的浓度分布叫做滴谱。浓度和滴谱是表征云的微结构的两个主要参数。它们随气团性质、云型、云的部位和出现时间而异。这里我们只定性地描述一下平均情况和一般特点。

1. 云滴浓度的量级，一般为 $10^1 - 10^3 / \text{厘米}^3$ ，小滴多，大滴少，谱型呈对数正态分布。因受观测仪器

方法的限制，小滴段的测量和计数误差较大，有些云的滴谱在大滴段再出现一个峰值（双峰）。滴谱窄表示水滴分布均匀，互相碰撞并合的机会少，稳定性好；滴谱宽表示云滴大小分布不均匀。理论计算表明，如果云中出现了大于18微米的水滴，它们就能与其他云滴并合，随着水滴增大，并合效率趋近于1。因此，云滴谱宽，意味着云滴易于产生并合，稳定性差。

2. 气团不同，云凝结核的性质、浓度与水汽供应条件不同，云的微观结构也不同。在海洋与大陆性气团之间，这种差别最为明显，例如同是积云，海洋性积云云滴平均浓度为45个/厘米³，内陆积云的浓度为228个/厘米³；中数直径前者约为30微米，后者约为10微米；前者谱较宽，后者谱窄。

3. 积状云与层状云（包括波状云，以下同）由于上升气流大小和过饱和条件不同，微结构的差别也很明显。非降水性的层状云（包括St，薄的Sc，Ac，As等）云滴平均浓度在200—600/厘米³之间，平均直径为5—10微米，云滴小，谱窄，结构比较均一。Ns和Fs等云中还包括有大云滴。积状云上升气流强且结构比较复杂，微观参数的起伏也大。从淡积云、中积云、浓积云到积雨云，云滴的平均直径及滴谱宽度都依次增大，而云滴浓度则依次减小。

4. 云的微结构还与云的发展阶段及云的部位有关。新生的云，云滴小，浓度高，谱窄。随着时间的推移，云滴变大，浓度变小，有时滴谱出现双峰或产生雨滴。从空间部位来说，云底以上几十到几百米处云滴浓度一般较高。云滴小，谱窄，对应于云滴的最初形成阶段。由云底向上，浓度降低，云滴变大。积状云的大水滴一般出现在云的中上部。云的边缘及云顶由于干空气的混合作用，部分云滴蒸发，浓度低，水滴也小。在云顶处，由于云的不断发展与混合，滴谱有时也出现双峰。

冰晶与雪晶

在温度低于0°C的云中，都可能存在冰晶。卷云的温度很低，通常在-35°C以下，全部由冰晶组成。从外观上看，它们多呈丝缕结构，且常伴有如晕、假日等冰云所特有的光学现象。在温度为0—-30°C的范围内，多数的云中同时存在过冷水滴与冰晶，这种云叫做混合云。观测表明，在中纬度，大多数降水性云中都包含有冰晶。由于存在着冰与水的饱和水汽压差，在混合云中，水汽压常常处于对水滴而言尚未饱和，而对于冰晶已是过饱和状态，因而造成水滴蒸发减小，而冰晶则凝华长大，由于过冷水滴数比冰晶数多得多，就形成液态水量向冰晶上大量转移的所谓贝吉隆过程，这使冰晶迅速增长，冰晶长到一定大小，还能在降落过程中捕集过冷水滴，即通过撞冻（凇附）过程继续增长。因此，混合云中的冰晶在降水的发展过程

中具有十分重要的地位。

冰晶与雪晶也是以大小来分的：线性尺度小于300微米的叫冰晶，大于300微米的叫雪晶。只有长到足够大的雪晶才能降到地面。与云滴浓度相比，云中冰晶浓度至少要小四个量级。在卷云中，冰晶的大小在100至1000微米之间，浓度为10—50个/升。锋面云系(Cc, Ci, As)中直径100至250微米的冰晶浓度为1—20个/升，直径为1000微米的雪晶，浓度为0.1—1个/升。在积雨云中，冰晶浓度要高得多，直径100至250微米的冰晶浓度为20—50个/升，直径为1至3毫米的雪晶浓度为1—10个/升。

冰雪晶的一个主要特点是形状非常复杂，而且它们的落速、质量与线尺度的关系，以及计算它们增长速度的参数都依赖于形状。这虽然使观测和理论处理变得复杂，但是也提供了云中结构的更多信息。

冰晶的主要结晶形状是由两个六角平面和六个四方侧面组成的六方形。与侧面平行的轴称为c轴，与六角平面平行的轴称为a轴。沿两个轴向生长速度的比值是随温度而变化的。沿c轴生长快就形成柱状和针状，沿a轴生长快，就形成片状或枝星状。加上冰雪增长过程中经历温湿场的变化，便会形成千姿百态的冰雪晶来（见图4）。根据Hallett和Mason的实验，下面给出冰晶形状与温度的关系：

0—3°C	薄的六角片状
-3—-5°C	针状
-5—-8°C	空心棱柱
-8—-12°C	六角片状
-12—-16°C	枝状
-16—-25°C	片状
-25—-50°C	空心棱柱

冰雪晶的基本形状是由温度决定的，但云中湿度也影响它们的次要特征和增长速度。在冰面过饱和而不到水面饱和时，冰雪增长缓慢，常出现厚的片状、片状、宽枝和扇形片状、实心棱柱等；在水面过饱和条件下，冰雪晶增长迅速，相应地出现尖的枝状、枝状、针状和空心棱柱等。所以冰雪形状提供了云中温湿条件的信息。

云中冰晶除浓度外，关于它们大小分布的资料不多，关于降落到地面的雪晶的资料则比较多。Nakaya和Terada给出了六种不同类型雪晶的平均直径(d)、质量(m)和下落速度(v)见附表。

Hobbs等给出了各种雪晶大小相对分布图（见图5），以枝星状雪晶最大，柱状晶最小。

冰雪晶在降落过程中，过冷水滴碰上即冻结，形成凇附冰雪晶。冻滴多时，冰晶本身的形状不能辨认，成为小球形的米雪和霰粒，白色不透明，它们的下降

附表

雪晶类别	d(毫米)	m(毫克)	v(厘米/秒)
针状	1.53	0.004	50
平面枝状	3.26	0.043	31
立体枝状	4.15	0.046	57
粉雪	2.15	0.064	50
凇附雪晶	2.45	0.176	100
霰	2.13	0.80	180

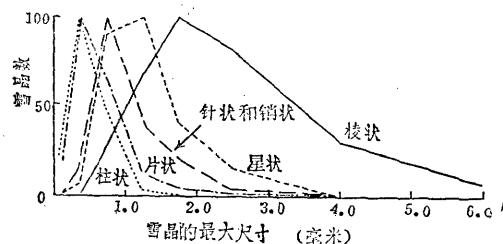


图5 地面雪晶大小的相对分布

速度比未凇附雪晶大，能较快地到达地面。所以出现凇附雪晶及霰，表明云中有过冷却水滴层存在。

多个单晶的冰雪晶聚合攀附在一起就形成雪花，最大的雪花可达4厘米，包含上千个单晶，即出现所谓“鹅毛大雪”。这个过程比较复杂，尚未完全弄清楚。一般雪花多由枝星状晶聚合而成，而且形成它们时云中的温度一般高于-10°C。

云的宏观结构间的关系

我们已经讲到了云中各种粒子的一般情况，也指出过上升气流与水汽等宏观条件，是决定云宏观结构的主要因素。云的某些宏观结构与微结构又有相应的关系。例如含水量的大小主要决定于大水滴的多少，而不是与云滴浓度分布平行；积状云的雷达回波所反映的云中大水滴和雨滴的情况与云厚云宽成正相关；云发展得越高，滴谱越宽，大水滴的浓度也越高。

在一定条件下，云的某些微结构变化又能使云的宏观结构发生变化。这正是某些人工影响云的着眼点。如在过冷云中播下部分冰晶激发贝吉隆过程，或在云中撒入吸湿性物质形成大水滴加速碰撞过程，可使原来不降水的云产生降水。在这方面最突出的例子也许要算Simpson等人设计的用碘化银对积云进行动力催化试验。据估算每千克云空气中冻结1.5—3.0克过冷水，释放出的冻结潜热能使云加温0.5—1.0°C，由于由水面饱和转变为冰面饱和，水汽凝华释放的潜热又可使云加温0.8—0.9°C，总共可使云加温1.3—1.9°C。这样将大大增加云的浮力而使云发展。在对云顶温度低于-5°C的12块积云用碘化银进行播撒试验后，有8块云增长了2.2至5.3公里，云高发展，云体变宽，降水也随之增加。