

# 大气中的冰核

游来光

人工降水目前采用的方法是向云中增加一定数量的人造冰核以补充自然冰核的不足。冰核在云中究竟起什么作用？大气中的自然冰核有多少？缺少到什么程度？大气冰核是哪儿来的？它们有哪些特性？这些问题对于了解人工降水的自然背景条件，合理掌握催化方法，都是需要明确的。但是这些问题目前还没有一致公认的确切答案，因此，这里只能根据目前的认识水平，综合一些已有的结果，作简略的介绍。

## 降水过程中最活跃的微观因子——冰晶

众所周知，降雨（雪）的时候，空中一定有云。但有云的时候，未必一定会降雨（雪）。根据气象资料统计，在我国大部分地区，一年中阴天的日数要比降水的日数多，如果再加上多云的天气，则大部分有云的日子里并没有产生降水。

有的云不降水比较容易理解，例如高云主要是高度太高，即使有降水物从云中落下来，也在云下干燥层中蒸发了而不能达地。但中、低云为什么在有的情况下也不产生降水，这主要决定于降水物在云中的增长条件。首先看一下云与降水的区别：除了高云外，中、低云主要是由无数10微米大小的水滴构成的，这些水滴在云内呈悬浮状态，只有它们增长至一定大小，落速增加，才在重力作用下从云中落下来。降水物在云下的干燥层中没有完全蒸发而达到地面的才成为降水。一个普通大小的雨滴约为1000微米（1毫米），因此，云滴和雨滴相比，其质量相差100万倍。

不降水的云，云滴大小比较均匀，而且是相对稳定的。云滴变为雨滴的增长过程十分缓慢，有时这种过程来不及完成，云的寿命就结束了。有两种情况能破坏这种稳定性：一种是在云中出现了与一般云滴大小相差很多的大水滴，由于大水滴有较大的落速，这样就可以和云滴相碰撞而迅速变大；另一种就是在0℃层高度以上的负温区里，在云中的过冷水滴中间出现冰晶，由于在相同的温度条件下，冰面饱和比水面饱和所需要的水汽含量要低，因此，在过冷水滴中间出现的冰晶就处于过饱和状态，可以不断增长，把水滴的水份集中到冰晶上来，这就是形成自然降水的最重要的过程——冰、水转化过程。在云中负温区产生冰晶，这些冰晶又有条件进一步增长，这几乎是中纬度地区产生降水必不可少的过程。

在对云的微结构进行直接观测前，人们早就注意到，浓积云在变为积雨云之前很少出现降水，而浓积云变为积雨云经常被人们认为是将要产生降水的前兆。浓积云变为积雨云的主要特征就是云的上部出现了冰晶，进一步发展后，其外观就呈现出砧状的顶。因而，冰晶在降水中的重要性很早就开始被人们认识了。

理论计算表明，冰晶的凝华增长速度要比水滴的凝结增长速度大得多（见图1），这在理论上说明了冰晶的出现可以大大加快云中形成降水的过程。

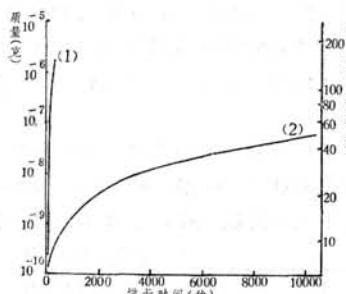


图1 冰晶与水滴的增长示意图  
(1) 冰晶凝华增长  
(2) 水滴凝结增长

程中最活跃的微观因子。

## 大气中形成冰晶的核心——大气冰核

如果水是纯净的，那么云中的小水滴要在温度接近-40℃左右才能发生冻结，在0℃以下，温度不太低的情况下则经常保持过冷的状态，并产生像飞机积冰、电线积冰、雾凇等常见的现象。

早在20世纪初就有人设想，在云中出现冰晶，可能需要有一种能导致小水滴冻结或是水汽可以在其上直接凝华的核，正象在不太高的过饱和空气中云滴要在凝结核上形成一样。到30年代又有人注意到这个问题。但是直到50年代以后，才对大气中形成冰晶所需要的核——冰核，进行了比较广泛的研究。

空气中除了含有氧、氮、二氧化碳、水汽等气体成份外，还含有一些微小的固体粒子——气溶胶，现在已经实验证实了其中不少粒子可以对水在大气中的物态变化起“诱导”作用。那些可以促使空气中的过饱和水汽在其上凝结而形成液滴的就是凝结核；那些可以“诱导”过冷却水滴发生冻结而形成冰晶的即所谓冰核。由于有凝结核的存在，可以使空气中的水汽在不太高的过饱和度下就凝结而形成云滴。同样，由于冰核的存在，可以使云中的水滴在不太大的过冷却温度下就冻结而产生冰晶。

因此，如果把大气中各种尺度的降水系统比拟为大大小小的“造雨机”，水汽为原料，热量是动力，云

体好比是“反应釜”，那么大气中的核正好似是必不可少的“催化剂”。

### 大气冰核的基本特性

大气中的气溶胶是由形形色色的微粒组成的，绝大多数的直径都小于1微米。无论是凝结核或是冰核，它们在降水过程中究竟充当着什么角色？我们可以在模拟了云与降水过程的环境条件下，观察它们的“活性”表现。因此，观测大气冰核常用的方法是人工制造过冷云，观察在其中形成冰晶的数目。大气中冰核的浓度大小及其变化规律是大气冰核最重要的特性，大气中冰核的浓度一般以每立升空气中所包含的冰核个数为计量单位。

**1. 冰核的成冰活性与大气冰核浓度** 冰核的活性指的是导致形成冰晶的能力，由于冰核的成份、大小等性质不同，有的在不太低的温度条件下就可以导致形成冰晶，有的则要在很低的温度条件下才能起到冰核作用，即前者的活性高于后者。观测表明，温度越低大气冰核浓度越高，这意味着大气中的微粒，温度越低能起到冰核作用的粒子越多，一般每降低3—5°C，冰核浓度就增加10倍。图2是国内外几个测点的观测结果。

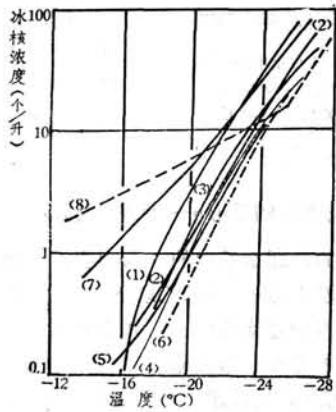


图2 大气中的冰核浓度

(1) 大西洋 (2) 澳大利亚  
(3) 撒丁岛 (4) 夏威夷  
(5) 澳大利亚 (6) 英格兰  
(7) 北京 (8) 吉林白城

归纳起来，冰核浓度与温度的关系，近似地具有下式的形式：

$$N = N_0 e^{-\beta T}$$

式中  $N_0$ 、 $\beta$  为经验常数， $T$  为过冷却度。

**2. 冰核源地** 从平均情况看，世界各地的冰核浓度差别似乎是不大的，但每个测站的冰核浓度随时间的变化很复杂，有时在很短的时间内（逐日间甚至在几小时内）就发生几个数量级变化的现象。根据冰核浓度随时间的变化规律，结合一些其他自然现象分析，发现冰核浓度明显增大时与地面发生的“尘暴”、特定的流星雨、火山爆发形成的“尘云”或人为造成的大气污染相关联，从而推论这是大气冰核的几个独立来源。

我国北自长城，南达秦岭，西至兰州，东抵太行山麓，40万平方公里的广大黄土高原上覆盖着一层深厚、疏松的黄土，每当土壤解冻之后，雨季到来之前的春夏之交，遇有大风天气经常伴有吹沙现象，强烈的吹沙可以垂直输送沙尘达几公里的高空，随着高空西风输送到几百公里以外的地方。通过观测分析，已经初步肯定了这种过程向大气输送冰核的重要性。

图2给出的资料表明，北京、白城两地的冰核浓度比其他地区显著偏高，并且在温度高于-20°C的温度范围更为明显。这两个测站位于黄土高原下游，观测期间又都是春季，看来这两地冰核浓度偏大反映了不同程度上所受到的风沙影响；并且根据其活性谱特点分析，这些大气中的尘粒在较高温度条件下就能起到冰核作用。

根据60年代世界各地的观测记录分析，在-20°C温度条件下活化的冰核量，北半球为2.6个/升，南半球为0.2个/升，从而说明大陆作为冰核源地的重要性。70年代初组织的世界范围的观测结果表明，世界六大洲中亚洲冰核浓度最高，在太平洋范围内组织的观测也得到了与以上一致的结果。通过分析认为，亚洲大陆的沙漠及半沙漠地带对世界范围来讲都是重要的冰核源地，构成冰核的主要成份可能是粘土和某些矿物尘。

初步的试验表明，北京西郊的土壤粒子，可以在-14°C的温度条件下的过冷云中起到冰核作用的约占1/1000，这从另一方面也说明地面土壤作为大气冰核源地的重要性。地球表面的土壤、某些矿物尘、陨石以及火山灰的成冰活性的实验结果综合如表1，由表可以看出，地球表面的土壤有较高的成冰活性，联想到土壤覆盖着广大的地表层，应该说这是大气冰核最重要的来源。有人对自然雪晶中心位置上的固体粒子成份进行分析，发现其中80%以上的粒子是粘土，这与以上结果也是一致的。

表1

物质名称	开始起冰核作用的温度(°C)
兰铜CuS	-5
磁铁矿Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-8
粘土	-11
土壤	-13
黑云母	-14
石膏	-16
长石	-17
石英	-18—-19
黄土	-11—-15
陨石	-17
火山灰	-12—-23

地球表面的土壤、尘粒是大气冰核的主要来源已被越来越多的观测结果证实，流星雨作为大气冰核也曾一度引起重视，但一直有很大争议，其作为大气冰核的重要性仍有很大疑点。

**3. 冰核的大小** 大气冰核大部份直径小于1微米，有人利用电子显微镜观测分析，在不同直径范围内的冰核粒子所占的百分比分布如表2。

表 2

直径范围(微米)	0.1—0.4	0.4—0.7	0.7—1.0	>1.0
相对数目(%)	29	38	18	15

4. 冰核的冰晶化过程 冰核通过什么过程形成冰晶的? 概括来讲不外以下几种途径: 水汽在冰核上凝华直接形成冰晶; 冰核先形成水滴而后冻结以及冰核与过冷水滴接触过程中导致水滴冻结, 这分别称之为凝华核作用、冻结核作用和接触核作用。一般认为在自然界中能起凝华核作用的冰核是很罕见的, 冰核在形成冰晶时大多都必须经历液态阶段。同样的冰核通过不同的过程而冰晶化时, 其所表现的成冰活性有很大差异。冰核作为接触核时活性最高; 冰核浸没在水滴中而导致冻结, 作为冻结核时活性较差; 在过饱和水汽的环境中直接凝华, 作为凝华核的可能性更小。有人进行过实验, 发现自然界中的冰核, 在相同的温度环境下, 起接触核作用的冰核数目比起冻结核作用的冰核数目高5倍。对于人工冰核——碘化银核来讲, 这种差异更为明显, 综合一些试验结果, 碘化银微晶通过不同过程作为冰核而活化的相对数目如表3。

表 3

温度条件(°C)	-20	-15	-10	-6
接 触 作 用	1,000	1,000	1,000	1,000
冻 结 作 用	1,000	800	400	100
凝 华 作 用	10	8	4	1

综上所述, 冰核是主要来源于地面的, 大部分小于1微米的, 可以引起过冷水滴发生冻结的固体粒子。其作为冰核的活性, 随温度的降低而迅速增加。

#### 大气中冰核的“缺乏”

在纯净的空气中, 水蒸汽含量要达到饱和时的几倍(过饱和百分之几百)才有可能发生凝结现象; 纯净的微小水滴要达到大约-40°C的过冷才有可能发生冻结。然而在自然界中的水汽很少达到1%的过饱和, 但却曾观测到低于-30°C的过冷却云雾, 这个事实已经可以推想到, 相对大气中的凝结核来讲, 大气冰核是很缺乏的。下面把大气中各种核——凝结核(爱根核及云核)与冰核的浓度及特征作一个比较。

爱根核是一种在人工制造的高过饱和(300%)条件下起凝结核心作用的微粒, 爱根首先进行了这项观测, 并因此而命名。爱根核长期以来被笼统的称之为凝结核, 由于在自然环境下不会出现这样高的过饱和条件, 因而这种核也就没有什么气象意义。为了与之区分, 近来把在自然云中的过饱和条件下能起凝结核心作用的核专称为云核。为了观测云核, 在模拟大气中的过饱和条件时, 过饱和度常控制在1%以下。

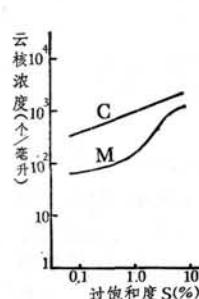


图3 大气中的云核浓度

C 大陆性 M 海洋性

爱根核与云核的浓度是随过饱和度的减小而迅速降低的, 爱根核如表4, 云核如图3。核浓度随过饱和度而变化的这种趋势与冰核浓度随冷却程度而变化的趋势相似。

大气中各种核的主要特征摘录如表5, 由表中的资料可以比较看出, 冰核在大气中的浓度相对是很低的。

有人进行过简单的估算, 在垂直运动为0.5米/秒的云

表 4

饱和度(%)	300	200	140	110
核浓度个/毫升	$1.08 \times 10^4$	$7.38 \times 10^3$	$5.02 \times 10^3$	$3.14 \times 10^2$

表 5

大气中的核	爱根核	云 核	冰 核
		过饱和度S=0.5%	-20°C
浓度个/升	$10^6$ — $10^7$	$10^6$ — $10^8$	1—10
尺度厘米	$10^{-8}$ — $10^{-7}$	$10^{-4}$ — $10^{-5}$	$10^{-4}$ — $10^{-5}$
活性谱		$N = CS^k$	$N = N_0 \exp(-\beta T)$

中, 在5分钟内使云中过冷却水完全冰晶化所要求的冰晶浓度如图4, 在同一图中给出了不同温度下的冰核浓度。比较图中的曲线(1)和(2)可以看出, 在云的温度高于-25°C时, 自然冰核浓度比使云完全冰晶化所需要的冰晶浓度低得多。这也解释为什么在0°C以下不太低的温度条件下云滴或雾滴不冻结, 而存在着水的过冷态。

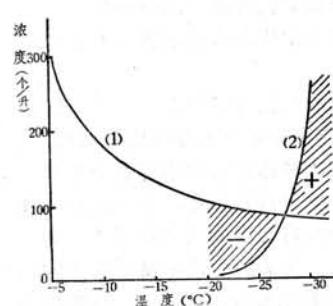


图4 (1)使云完全冰晶化所需冰晶浓度

(2)大气中冰核浓度(北京)

进一步看出, 在所给出的条件下, 只有当云顶温度达到-25°C以下时, 云中温度在0°C以下的各层, 冰水转化过程才变得十分活跃。

由于冰核活化的数目随温度降低而迅速增加, 而云的存在是冰核形成冰晶不可少的环境条件, 因此云顶温度就成为估计云内冰晶含量的直观指标。如果在云的上部形成的冰晶能够增长下落到云的低层, 则可以由图4

# 电炉溶雪观测

在寒冷的地区，冬天溶雪观测降水比较繁琐。尤其是在出现雨淞和雾淞的情况下更为麻烦。凝聚于整个雨量筒漏斗口上的雨淞和雾淞，必须用大量温水才能溶化，操作不慎，就会出现误差。若将雨量筒拿回屋内，等待温度升高溶化，又赶不上发报时间。我台去年冬季以来，采用电炉加热溶化的方法，可以消除以上弊病，效果较好。现介绍如下：

1. 将雨量筒漏斗背面，用氧焊 5—6 个带螺帽的螺丝钉，用来固定 5—6 个长形瓷夹。

2. 用一根 500 瓦左右的电炉丝（此电炉丝的瓦数不能过大），先在地面上通电加热半小时左右，使之炉丝定形后，盘绕在漏斗背面，用瓷夹固定好。

3. 在雨量筒漏斗部侧面的筒身上打一圆孔，电源线由此孔引出并装上插座。

4. 使用时，通电时间不能过长，一俟漏斗部位上的固体降水全部溶化，就要马上切断电源（以免通电时间过长而烧坏仪器或降水量蒸发而影响记录的准确性），将蓄水瓶拿回屋内，加温水量取降水量。

5. 电源线、电炉丝、插座等必须很好地绝缘，并装上地线。电源接通后，观测员不要再接触雨量筒，以保证安全。

此法简便易行，在有市电供给的台站都可以改装使用。

（云南昭通地区气象台 周祖元）

当云完全冰晶化后，对冰晶有效地集中云中水份，进一步长大而形成降水，也不是最有利的。因此，还不能简单的把使云完全冰晶化所需要的冰晶浓度值，看成是人工降水需要向云中引入人造冰核（催化剂）的适宜浓度。

总之，目前对大气冰核已有了一定的了解，但认识是没有止境的。近些年来对云中冰晶浓度的观测，发现在某些云中冰晶浓度比按冰核浓度估算值大得多，从而推论云中有冰晶的繁生过程存在，这一点已为部分实验证实，但其在降水过程中的重要性还需要通过实践进一步认识。此外，人类的生产活动不断向大气中排放的烟气常包含有不少高活性的冰核，这些附加的人工冰核源的气象效应究竟如何，也需要通过实践进一步提高我们的认识。近来已有人分析了在工业污染区的下风方，降水量显著偏高，并认为这与经常向大气排放高活性的冰核有关，或许这将成为一个大气污染气象效应中值得重视的微观因子。

## 消灭测报错情的小经验

窦天丁

在地面测报工作中，广大台站观测员同志本着“对工作的极端负责”和“对技术精益求精”的精神，摸索和积累了不少消灭错情、避免事故的好经验，对提高地面测报质量起到了很好的作用。为了互相交流，现将我们的一点小经验作一介绍。

在实际测报工作中，比较容易出错的地方，是各种变量（包括  $t_m$ ）的计算以及经常省略不报的电码组，而变量错情又多是错正负号、写错格、看错格 ( $t_m$  主要是看错格) 和计算错误。特别是  $t_m$  的计算，在新手、工作地点变动、停止工作一段时间以后再当班的同志，最容易出错。即使是工作时间较长的同志，也是容易出错的。有时即使连续计算好几次，还仍然

出现错情，既很费劲又一下子发现不了错情。这主要是人的眼睛看东西有一种习惯性作用，只有在过一段时间以后，才会发现错误所在，甚至在过一段时间后，会一眼就看出错处来。然而这是测报工作的时效所不能允许的。能不能找到一种迅速可靠的检验方法呢？

我们在工作中体会到改变一些统计方法，是检验查算结果的一个好办法。例如，为了检验  $t_m$  的正确与否，我们摸索出了下列一种复算方法。

当按正常计算步骤算得  $t_m$  后，即将本次  $t_m$  减去本次  $1/2\Delta t_{24}$ ，然后与前 12 小时的  $t_m$  比较；如果是相等的，则证明这几个数的计算都没有错误；如果相差  $\pm 0.1$ ，这是由于小数第二位四舍五入的原因造成的，一般对检验效果无影响，但为了确实可靠，也可将本次  $t_m$  和  $\Delta t_{24}$  再计算一次，若结果仍不变，就不必再顾虑  $t_m$  有错，而可将精力集中于其他工作。这既可减轻反复计算的劳动强度，提高工作效率，也减轻了担心出错的精神负担。

其公式来源，是根据：

$$t_m = \frac{t + t_{12}}{2} + \frac{h}{400}$$

$$t_{m12} = \frac{t_{12} + t_{24}}{2} + \frac{h}{400}$$

$$\text{则 } t_m - t_{m12} = \frac{t - t_{24}}{2}$$

$$\text{又 } \Delta t_{24} = t - t_{24}$$

$$\therefore t_m - t_{m12} = \frac{\Delta t_{24}}{2} = 1/2\Delta t_{24}$$

$$\text{即 } t_{m12} = t_m - 1/2\Delta t_{24}$$

其中  $t_{m12}$ 、 $t_{12}$ 、 $t_{24}$  均是对本次观测时间而言的。