

人工凝結核的实驗研究*

叶家东

(南京大学气象系)

提 要

本文对几种可溶性的物质微粒 (NaCl , MgCl_2 , NH_4Cl , CaCl_2 , P_2O_5 , NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等) 和樟脑、矽胶、高岭土、炭黑、生石灰等物质进行了实验研究, 测定了它们在不同的空气湿度条件下的凝結增长速度。发现所有上述可溶性核以及樟脑粉末都是活跃的人工凝結核, 而炭黑、矽胶、高岭土等在未饱和湿空气中沒有发生显著的凝結增长现象, 证明这些物质并不是活跃的人工凝結核。

一、仪器装置及实验方法

本文根据实验所测定的各种人工凝結核的凝結增长速度, 试图求得有关核的凝結效能的知識。

(1) 仪 器 装 置

仪器主要由两部分組成, 即湿空气发生器和观测系統。

湿空气发生器要求能够产生一定湿度的气流, 其示意图如图 1。

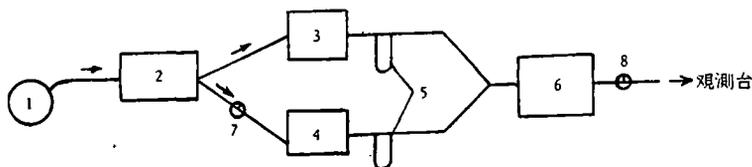


图 1 湿空气发生器示意图

- 1—鼓风机; 2—过滤器; 3—湿润器;
4—干燥器; 5—流量表; 6—混合室,
内装干湿表测量空气湿度; 7, 8—流量控制开关。

为了反复观测在不同条件下同一个凝結核的增长情况, 除了上述可以调节的湿气流以外, 还有一股干空气流直接通向显微镜台, 当一次凝結增长过程完毕后, 打开干空气流, 就可以使液滴重新蒸发获得原来的核。

观测系統主要是一架配备有移动游标尺和目鏡测微尺的显微镜。放大倍数取 450 倍或 675 倍。在鏡台上放一小架子, 其上繞一根細蜘蛛絲 (直径約为 1—2 微米), 将人工凝結核悬挂在絲上, 调节架子位置和显微镜焦距, 使蜘蛛絲上的核暴露在視野中, 打开湿气流即可进行实验。

* 本文 1961 年 11 月 6 日收到。

(2) 实验步骤

把新鲜蜘蛛丝绕在小架子上,再设法将要研究的人工凝結核悬挂到蜘蛛丝上,若核是可溶性物质,则可将该物质事先溶解于水中,再将其溶液喷成雾滴悬挂在蜘蛛丝上,若核是不可溶的,则可把它研成细粉再撒上去。此外,我们还用过其他方法。

调节显微镜找到蜘蛛丝和所要研究的人工凝結核,把事先调好湿度的湿气流对准核吹,就可以观测核的凝結增长情况,一边记时间,同时读出液滴的大小,这样就可以得到凝結增长曲线。利用干空气流可以反复对同一个核进行多次观测,以获得足够的数据进行比较。为使测量可靠起见,我们在各种条件固定不变的情况下重复观测五次,发现每次的增长过程基本一致。

二、结 果

利用上述仪器和方法,我们对各种物质进行了多次实验,兹将所得资料列于表 1。为了比较,部分核的凝結增长曲线绘于图 2, 3, 4, 5。

对于半径大于 1 微米的液滴,表面曲率的影响可以忽略,这样,凝結增长公式可以写成

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{\rho_k R_{nr} T} \left[(e_B - E_B) + c_n E_B \left(\frac{r_0'}{r} \right)^3 \right] \quad (1)$$

由(1)式可以求得在一定湿度下达到平衡时的增长率为:

$$\frac{r_m}{r_0'} = \left(\frac{c_n}{1-f} \right)^{1/3}$$

式中 r_0' 是饱和液滴的半径,对于 NaCl 溶液,饱和浓度可取 $c = 0.35$ 克/厘米³。以 r_0 表示盐核的等值半径,则有

$$\frac{r_m}{r_0} = \frac{r_m}{r_0'} \cdot \frac{r_0'}{r_0} \approx 1.83 \left(\frac{c_n}{1-f} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$c_n = 0.22$, 根据(2)式,可以计算在不同湿度下盐核的增长率(表 2)。

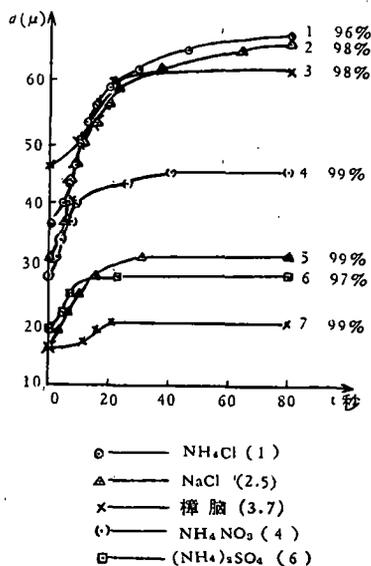


图 2 各种人工凝結核的凝結增长曲线

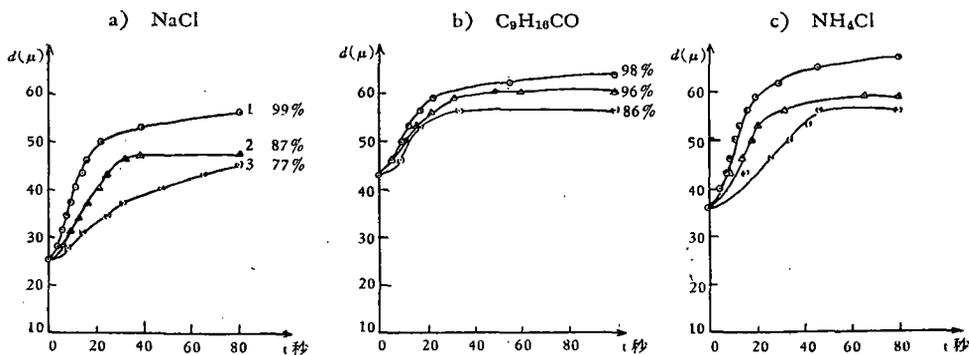


图 3 相对湿度对凝結增长的影响

表 1 不同相对湿度下各种核的增长率

物 质	核半径 $r_0(\mu)$	相对湿度 $f(\%)$	气 温 $T(^{\circ}\text{C})$	环境湿度 $f(\%)$	流 速 (厘米/秒)	平衡半径 $r_m(\mu)$	达到平衡的 时间 $t_m(\text{秒})$	相对增长率 r_m/r_0
食 盐 (NaCl)	5.1	~100	17.9	74	33	16	25	3.1
	5.1	98	17.9	80	25	15.5	30	3.0
	10.6	98	16.7	69	29	32.5	70	3.0
	11.7	98	24.5		25	33.3	70	2.9
	3.1	98			25	9		3.0
	27.9	92	17.6	70	22	60	180	2.2
	12.2	99	20.7	82	7	27	150	2.2
	12.2	87	19.6	77	7	24	90	2.0
	27.9	79	18.0	76	37	53.3	280	1.9
	12.2	77	20.9	78	11	22	120	1.8
	樟 脑 (C ₉ H ₁₆ CO)	21	98	20.7	85	11	32	150
21		96	20.9	82	22	31	51	1.4
21		86	20.5	56	15	28	40	1.3
7		99	17.3	76	20	10	20	1.4
7		78	18.0	76	16	9	60	1.3
12		98	20.9	70	22	17	32	1.4
硝 酸 铵 (NH ₄ NO ₃)	12	99	31	63	38	22	40	1.6
	12	97	32	63	36	18	60	1.5
	12	85	31	63	38	17	70	1.4
	12	74	31	63	36	15	30	1.2
	8	98	29	65	32	16	60	2.0
	5	98	29	57	34	9	40	1.8
	5	91	29	57	36	9	80	1.8
	5	87	29	57	36	8	30	1.6
	5	78	29	57	42	8	60	1.6
	5	73	29	57	34	7	30	1.4
	9	88	30	41	46	15	15	1.6
	9	84	30	41	59	14	20	1.5
	9	79	30	41	62	13	7	1.4
9	75	30	41	63	12	10	1.3	
9	73	30	41	73	12	10	1.3	
硫 酸 铵 (NH ₄) ₂ SO ₄	23	99	30	46	29	45	150	2.0
	23	87	30	46	35	33	90	1.4
	23	81	30	46	35	31	40	1.3
	23	79	30	46	39	30	60	1.3
	9	97	29		29	14	20	1.5
	9	90	29		31	13	30	1.4
	9	86	29		32	13	30	1.4
	9	78	29		35	11	30	1.1
	6	98	31		32	10	100	1.7
氯 化 铵 (NH ₄ Cl)	18	98			11	33	60	1.8
	18	96	21.0	68	22	33	60	1.8
	18	87	21.3	74	11	29	63	1.6
	18	77	21.1	74	6	27	55	1.5

續表 1

物 質	核半径 $r_0(\mu)$	相对湿度 $f(\%)$	气 温 $T(^{\circ}\text{C})$	环境湿度 $f'(\%)$	流 速 (厘米/秒)	平衡半径 $r_m(\mu)$	达到平衡的 时间 t_m (秒)	相对增长率 r_m/r_0
氯化镁 (MgCl_2)	15	~100				23	80	1.5
	3.5	92				8	20	2.3
	12	90				17	30	1.5
	28	89				42	160	1.5
	12	67				15	16	1.3
	3.5	65				5	5	1.4
	28	64				33	60	1.2
	15	61				18	20	1.2
氯化钙 (CaCl_2)	5	96				8	20	1.6
	7.5	95				17	60	2.3
	7.5	50				13	10	1.6
五氧化二磷 (P_2O_5)	1.5	98				2	3	1.3

C. H. Keith 和 A. B. Arons^[1] 根据溶液表面平衡水汽压的经验定律得到一个计算平衡半径的半经验公式, 换算成本文所采用的符号, 可以写成:

$$\frac{r_m}{r_0} = \left(\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{核}}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{0.146}{1-f}\right)^{0.299} \approx 2 \cdot \left(\frac{0.146}{1-f}\right)^{0.299} \quad (3)$$

为了比较, 将实验结果和根据上两式计算的结果列于表 2.

表 2 食盐液滴的增长率

相对湿度 $f\%$	77	78	79	87	92	98	~100
增长率 r_m/r_0							
按 (2) 式计算	1.8	1.83	1.86	2.20	2.52	4.80	∞
按 (3) 式计算	1.7	1.77	1.78	2.07	2.44	3.53	∞
实验值	1.8		1.9	2.0	2.2	3.0	3.1

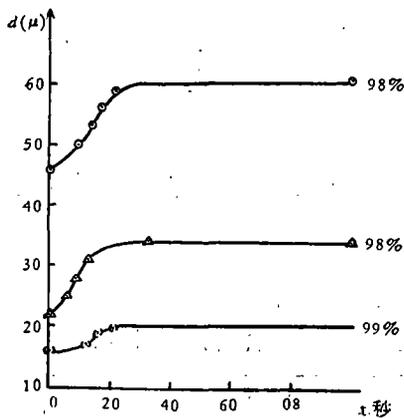


图 4 核的大小对凝结核增长的影响 (樟脑)

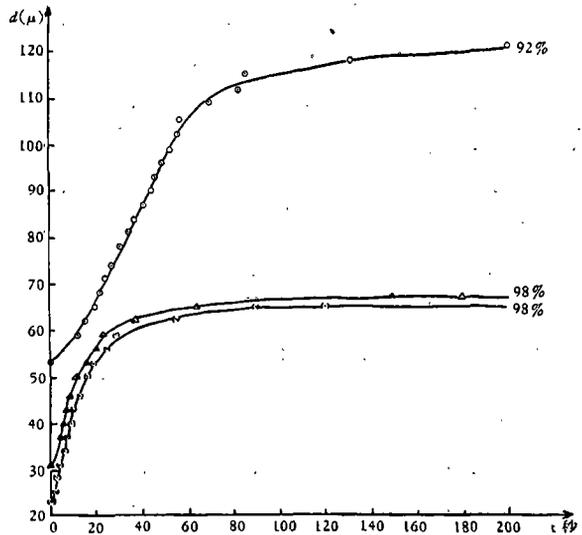


图 5 核的大小对凝结核增长的影响 (NaCl)

由表 2 可見,当相对湿度較小时 ($f < 95\%$), 实验值和計算結果比較符合, 偏差介于 $+6\% - 12\%$ 之間. 公式(2)沒有考虑离解系数随溶液浓度的变化, 所以数值偏大了.

当湿度接近饱和时, 实验值和計算值偏差較大, 主要是由于这时环境空气对液滴的增长过程发生較大的影响, 致使实际的湿度变小了, 这在吹气速度小时尤其明显. 如表 1 中 NaCl 核 $r_0 = 12.2$ 微米, $f = 99\%$ 一例, 当时吹气速度很小, 仅为 7 厘米/秒, 而此时环境空气的湿度是 82%, 少量空气卷入气流中就会使实际湿度减小, 从而影响到核的凝結增长. 这个誤差在吹气速度較大、气流的相对湿度較小时, 其影响是不大的.

三、可溶性人工凝結核的凝結增长

影响凝結增长的因子很多, 主要有凝結核的物理化学性质、核的大小、空气湿度、温度和风速.

根据实验資料(表 1), 可以看出下面几点:

1. 各种人工凝結核的起始凝結增长的相对湿度 在观测核的凝結增长时, 可以調节相对湿度到某一数值, 使核刚好发生凝結, 从而得到各种物質的起始凝結湿度, 現把測量結果列于表 3.

表 3 各种核的起始凝結湿度

人工凝結核	紅磷烧烟 (P_2O_5)	硝酸铵 NH_4NO_3	氯化鈣 $CaCl_2$	硫酸铵 $(NH_4)_2SO_4$	氯化鎂 $MgCl_2$	氯化鈉 NaCl	氯化铵 NH_4Cl
起始凝結湿度	<40%	40%	~50%	50%	60%	~80%	~80%

由表 3 可見, 紅磷烧烟的产物 (主要是 P_2O_5) 吸湿性很强, 由于它的烟粒小, 所形成的水滴也很小, 能长期悬浮在空中, 因此, 是一种很好的造雾葯剂.

2. 凝結增长速度 吸湿性强弱的一个很重要的判据是凝結增长速度, 因为只有人工凝結核的凝結增长速度远大于自然云滴的凝結增长速度时, 它才能很快地增长成特大的水滴以滿足碰并过程充分发挥作用的要求. 由表 1 可見, 各种人工凝結核的增长速度, 一般讲都是很快的, 特别是起始阶段更是迅速 (图 2). 从开始凝結到平衡所需的时间視相对湿度、核的大小、风速等因子而异. 就氯化鈉而言, 一般不超过 5 分钟 (对特別大的核, 增长过程会更长一些), 大多数情况是在 1 分到 1 分半钟就达到平衡了 (見表 1 t_m 栏). 其他各种核的增长时间一般都不超过 3 分钟. 这些核在未饱和湿空气中就能凝結增长, 所以, 当在云底撒葯时, 可以认为它們在进入云底时就已经具有平衡半径的大小了, 当然, 在饱和及过饱和空气中, 液滴是要繼續增长的.

3. 核的凝結增长率 从表 1 最后一行可以得到各种核在相对湿度 $f = 98\%$ 的空气中的平均增长率 (見表 4):

表 4

凝結核	氯化鈉	氯化铵	硝酸铵	硫酸铵	氯化鎂	樟 腦
增长率 $\frac{r_m}{r_0}$	3.0	1.8	1.8	1.7	1.5	1.4

除了氯化鈉可以比較精確地測量其大小外，其他物質由于形狀不規則，只能測出平均視直徑，因此，表 1 中個別例子的增長率與上述平均值會有些出入。

上面所列的平均增長率告訴我們，食鹽核的凝結效能是很高的，半徑為 10 微米的食鹽核撒在云中，單靠凝結作用，一二分鐘內就能增長成半徑為 30 微米的大水滴，這種水滴的碰并作用已經很顯著了。其它幾種人工凝結核，只要適當加大顆粒，也是能夠起到有效的催化作用的。從增長率的數值看，鹽粉的催化效能是最好的。圖 2 列出各種物質凝結增長曲線以資比較。

其他如相對濕度，風速等因子的影響與過去對鹽核生長所得結果相同。

四、不可溶的人工凝結核的凝結增長

在實驗中，發現只有樟腦粉末是不溶于水（溶解度很小）而能吸收大量水汽凝結增長成大水滴的（表 1），其它幾種不可溶的物質如炭黑、高嶺土、硅膠粉、生石灰等都無此現象。

我們曾用不同的方法獲得樟腦微粒的樣品，把樟腦研成細粉，設法懸在蜘蛛絲上，發現在濕氣流中能夠凝結增長成大水滴，水滴中並能發現不可溶的樟腦核心仍然存在。表 1 中所列的關於樟腦的凝結增長資料，都是用這種方法獲得的。把樟腦加熱，蒸發後又冷卻，樟腦蒸汽就會凝聚在蜘蛛絲上，呈白色結晶。當它暴露在濕氣流中時，蒸發很快，一般不超過 5 分鐘。蒸發後在蜘蛛絲上會留下幾顆很小的液滴，約 2—3 微米。在無風的空氣中，上述樟腦的蒸發速度要慢得多。樟腦蒸發後所殘留下來的小液滴在干空氣中並無顯著的蒸發現象，在濕氣流中的凝結現象也不明顯。這種小液滴可能是由某種雜質混在樟腦中，或者蜘蛛絲本身含有某種吸濕性的雜質所造成的，這種現象在其它場合也曾發現過。若把樟腦的酒精溶液噴入高熱的電爐上，樟腦蒸發，用玻璃片取樣可得少量結晶，它在濕氣流中並不增長。直接燃燒樟腦酒精溶液時，產生大量黑煙，這是溶液燃燒變成炭粒之故，它也沒有凝結增長現象。因此，我們認為，將樟腦用機械法研細所得到的樟腦微粒（ $d = 5-100$ 微米）是活躍的人工凝結核，可作為暖雲催化劑，而用其它方法產生的粒子，在未飽和濕空氣中並未發現有明顯的凝結增長現象。而且，很小煙粒或樟腦晶體，在空氣中容易被蒸發掉，而其蒸汽分子作為固定的凝結核的可能性是不大的。不過，較大的粒子是很難一下子被蒸發掉的。

樟腦粉的凝結性能是個很有意義的問題，由于實驗條件限制，對於樟腦粉末的凝結機制，一時尚難完全解釋清楚。在開始凝結時，由于樟腦表面很不光滑，存在大量毛細孔，因而，此時存在着毛細凝結現象，當核上已包滿一層水膜時，毛細凝結過程終止，其進一步的凝結增長可能是由下面的原因引起的：由于核是用機械法研細的，因此，很可能在核上附有某些雜質，或者這種樟腦表面能吸附空氣中某種成分的气体，它一方面保護樟腦不致蒸發（由實驗得知，由樟腦蒸汽凝聚成的樟腦結晶，由于表面新鮮純淨，很易在空氣中蒸發掉），同時也能吸收水汽使核增長起來；此外，也可能還有極化分子的吸附等過程在起作用。為了究其根源，需作進一步的研究。但無論如何，樟腦粉末能作有效的人工凝結核，這是可以肯定的。

至于炭黑、硅膠粉、高嶺土、生石灰等固体粒子，虽然也都有吸湿性，具有毛細凝結作

用,但如上所述,单是这种作用是不能产生明显的凝結增长的,它至多也只能形成一层不可見的水膜罢了. 实验也証明了这一点. 所以用它們来作为吸湿性的暖云催化劑,其效能是不好的.

五、暖云室的試驗結果

上面我們对个别核的凝結增长进行了实验,为了进一步說明人工凝結核对于云雾集体的影响,在这里我們引用了张世丰等同志所作的暖云室催化試驗結果^[2].

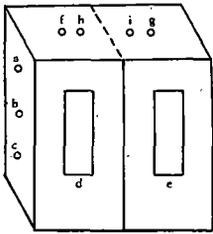


图6 暖云室示意图
a, b, c——取樣孔;
d, e——觀測窗;
f, g——撒粉孔;
h, i——光源。

他們所用的暖云室結構如图6所示. 其試驗方法大致如下:

在整个云室中充霧,当透明度下降到最低时,停止通霧,將中間的布幕放下,云室就隔成兩半,一边通入催化劑,一边任其自然消散,比較两边在消散过程中的差别以確定催化的效果. 測量項目包括透明度、溫度、滴譜等.

我們在这里选用一例来具体分析一下.

盐粉用量 1.8 克,催化結果发现:

(1) 催化的那一边,当盐粉通入后透明度迅速好轉,而不通盐粉的一边,由于霧的自然消散,其透明度好轉的速度远較前者为慢(图7). 显然,这是因为盐粉在云室里沉降过程中吸收水分致使

多数小水滴蒸发的緣故.

盐核在飽和空气中的初始凝結方程可取

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{\rho_k R_n T r} \cdot c_n E_B(T) \cdot \left(\frac{r_0'}{r}\right)^3 \quad (4)$$

液滴的降落速度 v 取斯托克斯公式,則有

$$dz = v dt = c_s r^2 dt = \frac{c_s \rho_k R_n T}{c_n D E_B \cdot r_0'^3} \cdot r^6 dr \quad (5)$$

設云室高度为 H ,积分上式可得

$$R = \left[\frac{H}{c} + r_0'^7 \right]^{1/7} \quad (6)$$

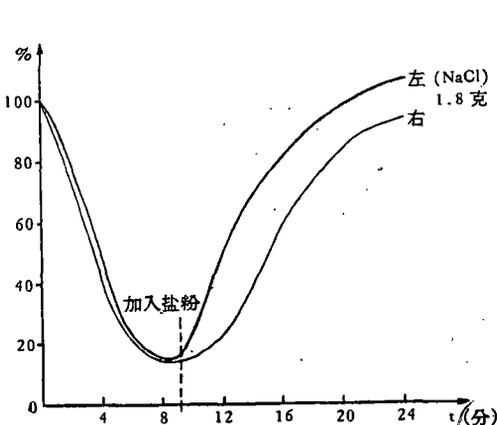


图7 暖云室中透明度变化曲线.

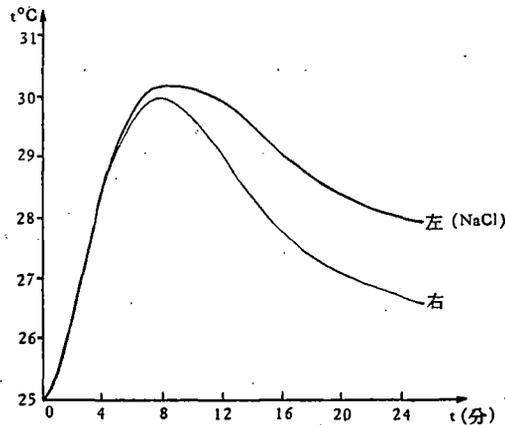


图8 暖云室中温度变化曲线

这里 r_0 为引入云室的盐核初始半径, R 为沉降在云室底部时液滴的半径, c 是常数, 显然, 在这一过程中, m 克半径为 r_0 的盐核所吸收的水分为

$$\Delta M = m \cdot \frac{\rho_{\kappa}}{\rho_0} \left(\frac{R}{r_0} \right)^3.$$

令 $r_0 = 30$ 微米, $T = 27^\circ\text{C}$, 取 $\rho_{\kappa} \approx 1.43$ 克/厘米³, 云室高 $H = 2.6$ 米, 由 (6) 式可得 $R \approx 58$ 微米, 于是

$$\Delta M = m \cdot \frac{1.43}{2} \left(\frac{5.8}{3} \right)^3 \approx 5.1m.$$

由此可见, 1 克盐粉就足以把雾迅速消除, 当然, 这里的计算是在假定空气维持饱和的情况下进行的。

(2) 图 8 表示云室两边的温度情况, 由图可见, 在停止通雾后温度是要下降的, 这是由于雾的温度较高的缘故。但喷盐粉的一边温度下降较慢, 不通盐粉的一边下降较快, 在雾消散时两边温差可达 1°C 左右, 这可以用盐粉吸收水汽释放凝結潜热来解释。要知道雾滴的蒸发是要耗热的, 但是, 在作对比试验中, 这一项作用不大, 因不通盐粉的一边, 其中大部分雾滴也是要蒸发掉的。

暖云室催化试验所显示出来的凝結增温效应很值得注意, 因为在暖云催化时, 它很可能是起作用的。

* * *

本实验是在 Б. В. Кирюхин 专家指导下进行的, 参加实验工作的有南京大学气象系大气物理专业各年级的部分同学。在本文内容的组织方面, 得到了徐尔灏教授的指导。

参 考 文 献

- [1] Keith C. H. and Arons A. B., The growth of sea-salt particules by condensation of atmospheric water vapor, *J. of Met.* 11, (1954) p. 173.
 [2] 张世丰等 (1960): “暖云室催化试验总结”南京大学气象系。

ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ

Е Тзя-дун

(Метеорологический факультет Нанкинского университета)

Резюме

Произведены опыты в лаборатории по изучению процесса роста конденсации нескольких растворимых частиц (NaCl , MgCl_2 , NH_4Cl , CaCl_2 , P_2O_5 , NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) и нерастворимых ядер (камфары, студенистого кремнезёма, каолина, чёрного угля негашёной извести и т. д.) при разных влажностях воздуха. В результате опытов оказалось, что все эти растворимые частицы и порошок камфары представляют собой активные искусственные ядра конденсации, а остальные нерастворимые частицы не имеют характера роста конденсации в ненасыщенном воздухе. Это значит, что такие частицы, как студенистый кремнезём, каолин, чёрный уголь и т. д., неактивны.