



扩散云室和云凝结核计数器

王明康

(南京大学气象系)

扩散云室原是在核物理学中为提供过饱和条件以检测高能粒子而使用的，后来也用于研究过饱和度很小的大气中的凝结现象和系统地测量云凝结核浓度。

因云室内的空气或处于静止，或处于流动状态，故可分成静态或连续流扩散云室。扩散云室的主体是两块十分靠近的温度不同的湿润的平行板。平行板排列分水平和垂直两种。记录方式分照相法和光散射法两种。扩散云室的主要优点是其温度和湿度可独立地改变，其湿度控制的精度远非其他方法所能比拟。扩散云室的应用范围十分广泛，不胜枚举。本文主要讨论一种测量云凝结核的水平平行板静态扩散云室。

一、原 理

假设：(1)两块平行板无限长，暂不考虑云室壁的影响；(2)平行板之间的水汽扩散和热量输送过程的相互影响可略而不计；(3)水汽和热量的扩散系数(D, K)不随温度而变化；(4)云凝结核的浓度并不很大，云室内水汽的消耗以及凝结潜热的释放可忽略不计。基于以上假设，用一维扩散方程分析云室中的温度(T)和水汽压(P)的分布：

$$\frac{\partial T}{\partial t} K = \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} \quad (2)$$

方程的边界条件为：

在底板上， $Z=0$: $T(0, t) = T_1, P(0, t) = P_1$ $\quad (3)$

在顶板上， $Z=H$: $T(H, t) = T_2, P(H, t) = P_2$ $\quad (4)$

其中 $T_2 > T_1$ 。

当云室的温度和水汽压达到平衡时，从方程(1)，(2)和(3)，(4)不难求得：

$$T(Z) = T_1 + \frac{Z}{H} (T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$P(Z) = P_1 + \frac{Z}{H} (P_2 - P_1) \quad (6)$$

方程(5)，(6)表明：在扩散云室内两板之间的温度和水汽压随高度线性地增加。但根据克拉贝龙-克劳修斯方程，两平行板之间的饱和水汽压(P_s)的分布曲线向下凸出。在两板之间的任一高度上，实际水汽压大于该高度的饱和水汽压。不难证明：扩散云室内的过饱和值(S)和顶、底两板的温差平方成正比。

在达到平衡态以前，若饱和空气样品的温度与底板一致，通过变数变换^[1]可把方程(1)，(2)简化为常微分方程，求得的过饱和度的峰值，与平

衡态峰值相比较，约为后者的二倍。

从物理角度看，这种瞬时过饱和的出现是基于水汽的扩散快于热量的扩散。在上例中， $K = 0.2124$ 厘米²·秒⁻¹，而 $D = 0.2538$ 厘米²·秒⁻¹。当温度为 T_1 的饱和空气进入云室后，水汽很快扩散并接近平衡态，而热量扩散则比较慢，即云室内空气温度的上升稍迟缓，因而出现瞬时过饱和。若饱和空气样品的温度与顶板温度一致，则由于同样的物理原因，在云室内出现瞬时的未饱和。当空气样品的温度介于顶、底板之间，则在某高度以上出现瞬时过饱和，在此高度以下为瞬时未饱和。在云凝结核计数器的设计中，一般要求顶板与环境温度一致。

实际上，平行板并不是无限长。为了观测两板之间很小的云滴，必须对云室加以照明。每一云滴接受的照明显量与其受照射的立体角大小成比例。另一方面，由散射光强度测量云滴浓度时，散射光通量也是与收集散射光的立体角大小成比例。因而，两板之间的距离不能太小。但这一距离也不能太大，否则云室壁的影响趋向严重，使云室内的过饱和值远远偏离以上的理论计算值。例如，设想壁的温度与顶板一致，从云室壁向内输送的热量使云室内的空气温度上升，从而减小它的过饱和度。显然，对于一定的光源和检测方法来说，应该寻找适宜的直径与其距离(H)的比值(A)。按定义

$$A = 2aH^{-1} \quad (12)$$

设板的半径为 a ，壁的温度为 T_2 ，在任一高度 Z 上，以云室中心为基点，与中心距离为 r 的经向的温度分布可以写成：

$$T(r, Z) = T_2 - \Delta T \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(r\alpha_n) \sinh(H-Z)\alpha_n}{a\alpha_n J_1(a\alpha_n) \sinh H\alpha_n} \quad (7)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 和 $J_1(\cdot)$ 是第一类贝塞尔函数， α_n 为 $J_0(a\alpha_n) = 0$ 的正根。

设 $Z = \frac{H}{2}$ 和 $r = 0$ 的温度为 T_m ，则由方程(7)得：

$$\hat{T} = \frac{T_2 - T_m}{\Delta T} = \sum_{n=1}^{\infty} [(a\alpha_n) J_1(a\alpha_n) \cosh(\frac{a\alpha_n}{A})]^{-1} \quad (8)$$

根据方程(8)选择各种 A ，使方程左方的数值接近 0.5，其结果列于表 1。由表可知：设计云凝结核计数器时，扩散云室中的两板直径应大于其距离 5 倍以上。

当待测空气中的云凝结核浓度很大时，其水汽的消耗和凝结潜热的释放都可能导致云室内过饱和度的下降，从而使浓度的观测值偏低。Twomey 的数值计算结果(参阅 Squires^[2])表明：当云室高

表 1 A 值对 \hat{T} 的影响

A	1	2	3	4	5	7.5
\hat{T}	0.139	0.384	0.472	0.493	0.498	0.500

度为 1 厘米，在 1% 过饱和度中，待测空气的云凝结核浓度不应该超过 10^8 厘米^{-3} 。在高浓度场合，测量前必须用干净空气稀释空气样品。

根据以上的讨论，对云凝结核计数用的扩散云室各项要求可归纳成表 2。

表 2 测量云凝结核浓度的静态扩散云室的各项指标

直径与高度的比值	≥ 5
云室高度	1—2 厘米
最小过饱和值	0.2%
典型的过饱和极大值	1%
最大云滴浓度	10^8 厘米^{-3}
空气样品	同顶板
温度	非湍流
气流	1 微米
最小可检测的云滴半径	

二、结构

以 Lala 和 Jiustot [3]、Lala [4] 的自动化云凝结核计数器为例。首先应阐明这种计数器自动化测量的依据：散射光峰值决定于云滴的浓度。

在扩散云室中一束平行光（矩形截面积）照射一群由云凝结核增长而成的云滴，此照明体积的高度为 l ，在此体积内的初始云滴浓度为 N_0 。由于云滴的增长和沉降，其云滴数变化可写成：

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{VN_0}{l} \quad (9)$$

其中 V 是半径为 R 云滴的下降速度，按 Stokes 定律

$$V = BR^2 \quad (10)$$

B 为常数，假设云滴在增长过程中已趋于一致，不考虑曲率和溶液的作用，则云滴的凝结增长方程可简化为：

$$R \frac{dR}{dt} = GS \quad (11)$$

其中 G 为常数。散射光强度 (I) 可写成：

$$I = CNR^2 \quad (12)$$

其中 C 为常数。由方程 (9) — (12) 可以得出：

$$N = N_0 \left(1 - \frac{BGSt^2}{1}\right) \quad (13)$$

$$I = 2CGN_0St \left(1 - \frac{BGSt^2}{1}\right) \quad (14)$$

由方程 (13) 和 (14) 可求得散射光峰值 (I_m) 及其出现的时间 (t_m)

$$t_m = \left(\frac{1}{3BGS}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$I_m = \frac{4}{3} CG \left(\frac{1}{3BGS}\right)^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}} N_0 \quad (16)$$

由方程 (15) 和 (16) 可知：散射光峰值是初始云滴浓度和过饱和度的函数，其出现的时间仅仅决定于过饱和度。

云凝结核计数器可以分成三大部分：(1) 扩散云室；(2) 光源及其散射光测量；(3) 记录和控制。现分述如下：

1. 扩散云室

云室内上、下两板为直径 7.6 厘米的铝板，两板相隔 1 厘米，云室的壁为有机玻璃的圆环。云室的体积为 45.6 厘米³。顶板的温度保持室温，底板和一种热电效应的冷却器联接，其温度可调节。两板的温度用集成电路温度表测量。其感应部分置于铝板中心的表面层以下 0.1 厘米处，两板的温差作为一个反馈信号输入到温度调节器。当温差偏离指定的数值时，调节器相应地改变冷却器中的电流，调节底板的温度，直到温差恢复到指定的数值。应用以上方法，很长时间内温差的偏离值不大于 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。而且当铝板温度偏离 1°C 时，在 8 秒之内，其偏差可减小到 0.05°C 。

顶板的底部和底板的顶部用吸水纸覆盖，通过顶板中的小孔由云室外的水源提供云室内凝结所需的水汽。

2. 光源及散射光测量

选择波长为 8800 埃、频率为 6.25 千赫的单色光脉冲作为光源，经过透镜后成为直径约 0.4 厘米的圆柱形光束，照射到扩散云室内形成的云滴上。

在 45° 散射角设置一个透镜，散射光通过透镜后在狭缝上成像。狭缝的作用是消除杂光。贴近狭缝处安排一个光电检测和放大系统，把散射光强度信号转换成电压。此种检测器的灵敏度峰值恰好与光源的波长相匹配。

3. 记录和控制

用微型计算机完成计数器的控制和记录工作。在发出“测量开始”的指令后，计算机依次执行以下各项任务：(1) 测定云室顶板的温度；(2) 根据指定的过饱和度，计算相应的两板的温差；(3) 按计算结果改变底板的温度，约 2 秒钟底板温度与指定值的偏差减小到 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ；(4) 打开阀门，开动小型气泵，把空气样品吸入云室，约 6 秒钟。与此同时，测定光的本底值；(5) 关闭气泵和阀门；(6) 连续记录散射光强度，直到出现强度峰值；(7) 从强度峰值减去本底值，换算成凝结核浓度值；(8) 打印浓度值以及云室的有关数据。

上述测量过程一次约 20—45 秒。

4. 检定

自动计数器可以由照相法计数器的测定值加以检定。照相法计数器中除了扩散云室外，光源和记录部分都不同于自动计数器。它的光源是 100 瓦的水银弧灯，通过透镜系统后形成宽 0.4、高 0.2 厘米的矩形光束。在光束的直角方向，用示波器照相机对照明体积中的云滴照相。在低倍的显微镜下对照片中的云滴计数。

用自动和照相法计数器同时测量空气中的云凝结核，对各种过饱和度反复进行测量。可得到自动

计数器的检定曲线。

三、比较

关于云凝结核测量的国际专题讨论会在1967、1970和1980年共举行过3次。会议期间，用不同的扩散云室对同一种自然和人工云凝结核进行了比较测量。1967年讨论会上只有很少几个扩散云室参加，用照相记录。1970年共比较5个静态扩散云室的性能，当过饱和值为0.3、0.75和1%时，各种扩散云室测定的云凝结核浓度的差异不大于30%。在1980年讨论会上，参加的扩散云室增加到14个，9个为静态扩散云室（其中5个系散射法计数器），其他5个为连续流云室。比较的结果归纳如下：

1. 浓度测定值的变异系数（标准偏差/平均值）列于表3。

表3 浓度测定值的变异系数

测量对象	过饱和度 (%)			实验次数
	0.2	0.5	1.0	
多分散盐粒	0.51	0.50	0.33	8
单分散盐粒	0.46	0.54	0.31	8
空 气	0.54	0.57	0.33	7
平 均	0.50	0.54	0.32	23

由表3可知：（1）测量的结果并不随测量对象的不同而出现明显的变化；（2）当过饱和度减小时，测量结果的差异趋于增大。其原因是云室的温度控制、云滴和霾粒的辨别以及云滴的不均匀（对于散射光法计数器）都会引起浓度测量的误差。与1970年讨论会上测量结果相比较，从测量差异值的大小来看，10年来似乎并没有多大进展。其中一种解释是：9种静态扩散云室中有4种试制不久，系利用会议机会来试验仪器性能以便改进。若剔去这4个计数器的测量结果，仅仅比较其中性能较好的5个，其结果列于表4。

表4 5个性能较好的计数器的变异系数

测量对象	过饱和度 (%)			实验次数
	0.2	0.5	1.0	
多分散盐粒	0.42	0.29	0.19	8
单分散盐粒	0.36	0.30	0.31	8
空 气	0.48	0.35	0.22	7
平 均	0.42	0.31	0.24	23

由表4可知：测量结果比较接近。

2. 与迁移率分析法比较。

气溶胶粒子带电后，测量它的迁移率，从而可推算其大小分布^[5]。用此种方法得到的浓度值与扩散云室测量结果相比较，列于表5。

由表5可知：扩散云室测量结果小于迁移率分析法。

3. 比较静态和连续流扩散云室测定的浓度比值，列于表6。

由表6可知：一般说来，静态扩散云室测定的浓度小于连续流云室。

4. 对于9种静态扩散云室，按记录方法的不同（光散射和照相法），比较其测量的浓度，但并未得到确切结果。总的说来，对于经验丰富的观测者来

表5 迁移率分析法与扩散云室求得的浓度比值

测量对象	过饱和度 (%)			实验次数
	0.2	0.5	1.0	
多分散盐粒	0.84	0.58	0.73	8
单分散盐粒	0.89	0.80	0.91	8
平 均	0.87	0.69	0.82	16

表6 静态和连续流扩散云室测定的浓度比值

测量对象	过饱和度 (%)			实验次数
	0.2	0.5	1.0	
多分散盐粒	1.01	0.72	0.79	8
单分散盐粒	0.87	1.02	0.95	8
空 气	0.91	0.71	0.84	7
平 均	0.93	0.82	0.86	23

说，照相记录法的测量精度比较高。但自动记录和小型化也是必然的发展趋势。两种方法的共同弱点都是在低过饱和度场合测量精度下降。对于照相法来说，究竟是云滴还是霾粒，难以分辨，取样体积的边界也不清晰。至于光散射法，由于在凝结的初期云滴大小的分布很不均匀，势必导致对测量结果的错误理解。看来，在此种场合应该发展等温云室。作为一种补救办法，可同时设置散射法和照相法的扩散云室计数器各一台，前者用于日常的测量，后者用于定期的检定。

5. 选择几次测量记录比较完整的实验，可以对云凝结核的过饱和谱进行个例分析。根据迁移率分析法得到的过饱和谱作为计算值，与各种静态扩散云室测定的谱相比较。在多分散盐粒场合，其差异在±20%之内。在单分散盐粒场合，NRL^[6]静态扩散云室的测定值，对整个所选择的过饱和值范围来说，和计算值都很接近。对于自然凝结核，浓度测量值的差异明显地增大。

6. 比较5个不同的连续流扩散云室测定的过饱和谱，其结果是：与计算值的差异小于静态扩散云室（包括自然凝结核场合）。其原因是此5种云室已试验多年，其中3种又系由同一单位试制。

此外，还应该指出：NRL静态扩散云室与连续流云室的测定值十分接近。在过饱和度为0.3和1.0%时，其平均差异仅6%。

参考资料

- [1] Fitzgerald, J., Non-steady state supersaturations in thermal diffusion chambers. *J. Atmos. Sci.*, 27 (1970), 70-72.
- [2] Squires, P., Diffusion chamber for measurement of cloud nuclei. *J. Rech. Atmos.*, 6 (1972), 565-572.
- [3] Lala, G. G. and J. E. Jiusto, An automatic light scattering CCN counter. *J. Appl. Meteor.*, 16 (1977), 413-418.
- [4] Lala, G. G., An automatic light scattering CCN counter. *J. Rech. Atmos.*, 15 (1981), 259-262.
- [5] Hoppel, W. A., Measurement of the aerosol size distribution with NRL's mobility analyser. *J. Rech. Atmos.*, 15 (1981), 313-320.
- [6] Hoppel, W. A., Description of the NRL isothermal haze counter. *J. Rech. Atmos.*, 15 (1981), 263-264.