

一种改进的 DMT 云凝结核计数器过饱和比标定方法

马楠¹ 赵春生^{1,†} 邓兆泽² 陶江川¹ 于仁杰¹ 陈静¹ 边宇轩¹

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

† 通信作者, E-mail: zcs@pku.edu.cn

摘要 提出一种改进的标定云凝结核计数器中等效过饱和比的方法。相对于 DMT 公司的标定方法, 该方法在流程和数据处理方面都做了改进。标定时观测完整的硫酸铵活化率曲线, 通过高斯误差函数拟合的方法确定硫酸铵活化的临界粒径, 从而减少标定结果的误差。根据该方法, 用户可自行对 DMT 云凝结核计数器云室过饱和比进行周期性的检验和标定, 保证高质量的云凝结核观测。

关键词 云凝结核计数器; 过饱和比; 标定方法

中图分类号 P402

A Modified Method for Calibrating the Supersaturations in DMT Cloud Condensation Nuclei Counter

MA Nan¹, ZHAO Chunsheng^{1,†}, DENG Zhaoze², TAO Jiangchuan¹, YU Renjie¹, CHEN Jing¹, BIAN Yuxuan¹

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; † Corresponding author, E-mail: zcs@pku.edu.cn

Abstract A modified method for calibrating the supersaturations in the chambers of DMT Cloud Condensation Nuclei Counter is introduced, which decreases the uncertainty in the results of the calibration. In the new method, the complete size-resolved activation ratio for ammonium sulfate is observed, and the activation critical diameter is yielded via fitting the size-resolved activation ratio with two Gauss error functions. With the new method, users can do the calibration periodically to guarantee high-quality observations.

Key words cloud condensation nuclei counter; supersaturation; calibration

气溶胶是大气的重要组成部分, 对于天气、气候和环境有着重要的影响。当环境达到一定的饱和比时, 一部分气溶胶会被活化, 形成云滴或雾滴, 这部分气溶胶称为云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)。作为云凝结核, 气溶胶的活化特性会在一定程度上影响云雾的微物理特性, 影响云的生命时间, 从而改变大气辐射平衡, 并间接影响降水过程^[1-2]。因此, 气溶胶活化特性研究是探讨气溶胶对于天气和气候影响的关键。

利用 CCN 计数器可以对 CCN 的数浓度进行直接观测。目前应用最广泛的是 Droplet Measurement Technologies (DMT)公司生产的恒流热梯度 CCN

计数器, 其基本原理和仪器设计基于 Roberts 等^[3]的研究。在该 CCN 计数器中, 云室为竖直安置的柱状腔体, 筒壁采用热传导性良好的材料, 并通过温控装置使壁上温度沿轴向连续变化。筒壁材料吸附有液态水, 由于热量和水汽的扩散速度不同, 在云室中心轴会出现一段过饱和的区域。气溶胶样气被鞘气包围, 以层流方式从低温端流向高温端, 在过饱和区域内一部分气溶胶活化, 形成粒径较大的液滴后即可被云室末端的光学计数器计数。通过改变云室两端的温度差, 即可改变云室中的等效过饱和比。近几年, 国内多家单位购买了 DMT CCN 计数器, 用该仪器进行很多的地面和飞机观测, 并

发表一批 CCN 数浓度和气溶胶活化率的观测结果^[4-9]。

利用 DMT CCN 计数器进行观测时,最重要的一个仪器参量是云室等效过饱和比,CCN 数浓度或活化率观测必须在已知的确定的过饱和比下进行。CCN 计数器云室两端的温差(ΔT)直接决定云室中的等效过饱和比,但 ΔT 与等效过饱和比的关系需要利用一些已知活化特性的粒子进行标定得到。DMT CCN 计数器的使用说明书中建议,每年需对云室等效过饱和比进行一次标定。但有研究指出,CCN 计数器中云室的老化会使等效过饱和比与 ΔT 的关系偏离标定曲线^[10]。另外,等效过饱和比与 ΔT 的关系受气压影响很大,在不同海拔地点的标定结果有很大差异。因此,建议在每次外场观测开始和结束时,都对 CCN 计数器进行现场标定。

本文详细介绍标定 DMT CCN 计数器中过饱和比的方法,包括标定原理、仪器设置、标定流程以及数据处理方法。相对于传统方法,本标定方法在流程和数据处理方面都做了改进,降低了标定结果的不确定性。另外,本文还指出标定时容易出现的问题和相关注意事项。DMT CCN 计数器使用者根据本文可对 CCN 计数器的过饱和比进行高质量的标定。

1 标定原理

对 CCN 计数器的过饱和比进行标定,简单地说就是在不同的云室 ΔT 下,将活化特性已知的气溶胶粒子通入云室,通过粒子的活化表现推断云室中的等效过饱和比。在 0.07%~2%的过饱和比范围内,云室等效过饱和比与 ΔT 之间基本上为线性关系。因此,确定一系列 ΔT 下的云室等效过饱和比后,即可拟合得到 CCN 计数器所需的过饱和比标定参数。事实上,过饱和比小于 0.1%时,云室过饱和比与 ΔT 的关系开始偏离线性,因此使用线性的标定关系可能会使 0.1%以下云室过饱和比的不确定性增大。

硫酸铵粒子的活化特性可由 Köhler 模型很好地描述,而且可近似地认为是球形,因此标定时一般选用硫酸铵粒子。在某个设定的云室 ΔT 下,将不同粒径的硫酸铵粒子通入云室,可以找到临界粒径 D_{crit} ,大于此临界粒径的硫酸铵粒子都可以被活化,而小于此临界粒径的硫酸铵粒子都不能被活化。利用 Köhler 模型,即可由 D_{crit} 计算等效过饱和

比。在一些近似条件下,描述单粒子吸湿活化特性的 Köhler 方程^[11]可写为

$$s = \exp\left(\frac{A}{D_{wet}} - \frac{B}{D_{wet}^3}\right), \quad (1)$$

其中, $A = \frac{4\sigma_w M_w}{\rho_w RT}$, $B = \frac{6i_s n_s M_w}{\pi \rho_w}$, s 为粒子所处环境的饱和比, D_{wet} 为粒子湿粒径, R 为普适气体常数, T 为绝对温度, $M_w = 0.0180153 \text{ kg/mol}$ 为纯水的摩尔质量, σ_w 为纯水的表面张力,与绝对温度 T 的关系^[11]为

$$\sigma_w [\text{Nm}^{-1}] = 0.0761 - 1.55 \times 10^{-4} (T - 273). \quad (2)$$

ρ_w 为纯水的密度,与摄氏温度 t 的关系^[12]为

$$\rho_w = \frac{A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5}{1 + Bt}. \quad (3)$$

参数 $A_0 \sim A_5$ 以及 B 的取值见表 1。 n_s 为溶质硫酸铵的摩尔数,可由 $n_s = \frac{\pi \rho_s D_s^3}{6M_s}$ 计算得到,其中, D 为溶质粒子的干粒径, $M_s = 0.1321395 \text{ kg/mol}$ 为硫酸铵的摩尔质量, $\rho_s = 1770 \text{ kg/m}^3$ 为硫酸铵的密度。

表 1 式(3)中各个系数的取值

Table 1 Parameters in Eq. (3)

| 参数 | 数值 |
|-------|-----------------------------|
| A_0 | 9.998396×10^{-2} |
| A_1 | 1.8224944×10^{-1} |
| A_2 | -7.92221×10^{-3} |
| A_3 | -5.544846×10^{-5} |
| A_4 | 1.497562×10^{-7} |
| A_5 | $-3.932952 \times 10^{-10}$ |
| B | 1.8159725×10^{-2} |

i_s 为硫酸铵溶液的 Van't Hoff 系数。在完全溶解和理想溶液的假定下,硫酸铵溶液的 Van't Hoff 系数为 $i_s = 3$ 。但有研究发现,硫酸铵溶液的 Van't Hoff 并非一个常数,而是随着溶质摩尔浓度

$\mu_s = \frac{\rho_s D_s^3}{M_s \rho_s (D_{wet}^3 - D_s^3)}$ 的变化而变化。对于硫酸铵溶液,当 $\mu_s > 1$ 时, Van't Hoff 系数与 μ_s 的关系^[13]为

$$i_s = 0.021 \mu_s^2 - 0.0428 \mu_s + 1.9478; \quad (4)$$

当 $\mu_s \leq 1$ 时, Van't Hoff 系数与 μ_s 的关系^[14]为

$$i_s = -0.007931 \log^2(\mu_s) - 0.1844 \log(\mu_s) + 1.9242. \quad (5)$$

基于以上关系,饱和比 s 即可表示为湿粒径 D_{wet} 的函数。实验得到硫酸铵粒子的临界干粒径

D_{cr} 即为当前云室过饱和比下所能活化的最小粒子的粒径，当前云室等效过饱和比即为此粒径硫酸铵粒子 Köhler 曲线的最大值。令 $D_s = D_{cr}$ ，代入式(1)，借助 Matlab 软件中的“fmincon”函数即可求得 s 的最大值， $(s-1) \times 10\%$ 即为当前云室状态下的等效过饱和比。

2 仪器设置

对 DMT CCN 计数器进行标定，所需的仪器设备有气溶胶发生器、干燥器、差分迁移率分析仪 (Differential Mobility Analyzer, DMA) 及支持系统、凝结核计数器 (Condensation Particle Counter, CPC) 以及若干管线和接头。作为范例，同时考虑到这些设备在国内的普及情况，本文采用 DMT 公司生产的气溶胶发生器以及 TSI 公司生产的 3080 型电迁移率分析仪 (Electrostatic Classifier) 和 3772 型凝结核计数器来介绍 CCN 计数器的标定。本文采用的气溶胶干燥器为自制的扩散式硅胶干燥管，管线采用 Swagelok 公司生产的 1/4 英寸 316 不锈钢管线和接头，部分连接处采用 TSI 公司生产的导电胶管。仪器连接如图 1 所示。

气溶胶发生器中所用的硫酸铵溶液推荐采用摩尔浓度约为 0.05 mol/L 的溶液，配制时可直接对硫酸铵饱和溶液 (5.71 mol/L) 进行 100 倍稀释得到。通过调节气溶胶发生器的总流量阀，使气溶胶发生器出口流量略高于下游仪器所需的总流量，多余流量由干燥器前端的旁路排空。通过调节气溶胶发生

器的稀释空气阀，使经过 DMA 筛选后的准单一粒径粒子浓度在 1000 cm^{-3} 左右。若粒子浓度太高，则可能在流路中碰并损耗，同时在云室内可能发生水汽竞争，从而给标定结果带来误差；若粒子浓度太低，则 CPC 与 CCN 计数器计数的随机误差会增大，同样会增加标定结果的不确定性。气溶胶干燥器需要有足够的干燥效率，保证通过干燥器后相对湿度降至 20% 以下，有条件的话可以在干燥器后增加湿度传感器用以监测相对湿度。

干燥后的多分散硫酸铵粒子即可通入电迁移率分析仪，通过中和器达到稳定的带电分布后，由 DMA 筛选出准单一粒径的硫酸铵粒子。之后准单一粒径的粒子被分为两路，一路通入 CPC 计数总浓度，另一路通入 CCN 计数器，计数 CCN 浓度。若是对 CCN-200 型计数器进行标定，则可将 DMA 筛选后的粒子分为三路，对计数器内的两个云室同时进行标定，如图 1 所示。

在设置仪器时，很重要的一点是流量的选择，因为 CPC 和 CCN 计数器的流量决定 DMA 中样气的流量，而 DMA 中样气和鞘气的流量，又会决定 DMA 所能筛选的粒径范围和筛选出的准单一粒径粒子的谱分布宽度。对于一次完整的标定，需要在 2~17 K 之间选择 ΔT ，对应的等效过饱和比为 0.07%~1.2%。为了得到这些过饱和比下硫酸铵完整的活化率上升段曲线，DMA 的筛选粒径至少应包含 20~300 nm 的范围。对于最为普及的 DMA 系统——TSI 3080 型电迁移率分析仪，鞘气流量在 2~10 L/min 范围内时，都能满足上述筛选粒径范围。另外，在利用 DMA 进行粒径筛选时，得到的并不是理想的单分散气溶胶，而是具有一定粒径分布的气溶胶。当筛选粒径为 D_0 的粒子时，通过 DMA 的粒子最大粒径为 D_{max} ，最小粒径为 D_{min} ，用相对粒径宽度 $W(D_0) = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_0}$ 来描述通过 DMA 的粒子分布宽度。对于 TSI 3080 型电迁移率分析仪，当样气与鞘气的比例为 0.1 时， $W(20) = 0.1033$ ， $W(100) = 0.1166$ ， $W(300) = 0.1460$ ；当样气与鞘气的比例为 0.2 时， $W(20) = 0.2107$ ， $W(100) = 0.2386$ ， $W(300) = 0.3004$ 。因此，样气与鞘气的比例越小，DMA 筛选效果越好。DMA 筛选的非理想性会造成测量的硫酸铵活化率曲线的展宽，使实测硫酸铵活化率曲线呈现一定的坡度而非突变。Rose 等^[10]指出，虽然 DMA 的粒径筛选宽度会使标定时的活化率曲线展

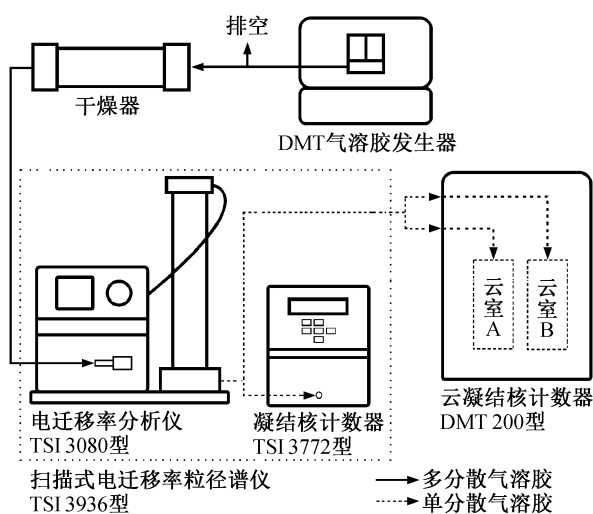


图 1 对 DMT CCN 200 进行标定时的仪器和管线设置
Fig. 1 Settings of the instruments for the calibration of DMT CCN 200

宽,但对云室内等效饱和比计算的相对影响小于 1%,可以忽略。目前常见的 CPC 都是固定采样流量,例如本文所采用的 TSI 3772 型 CPC,采样流量恒定为 1 L/min,如果需要较小的采样流量,则需要 在 CPC 进气口安置额外的流量补偿装置,利用经过过滤的环境空气补偿样气。但 TSI 公司各系列 CPC 的流量补偿装置都无法自动监测和维持补偿流量,需要操作者通过电迁移率分析仪的样气流量监测来手动调整。电迁移率分析仪的样气流量计为压差流量计,通过一个直径约 0.5 mm 的微孔来形成压差。在样气流量较大且粒子浓度较高时,这个微孔容易被粒子阻塞而造成微孔气阻增大,一方面会使流量计的测量出现偏差,另一方面也可能使 CPC 流量补偿装置的补偿流量发生变化。因此,应尽量避免在标定时使用 CPC 流量补偿装置。综合以上各方面的因素,在对 CCN 计数器单个云室进行标定时,样气流量可设置为 1.5 L/min,即 0.5 L/min 的单个云室流量和 1 L/min 的 CPC 流量,DMA 鞘气流量可设置为 7.5 L/min,此时 DMA 的粒径筛选范围约为 8~380 nm。在对 CCN 计数器两个云室同时进行标定时,样气流量可设置为 2 L/min,即两个云室 1 L/min 的流量和 1 L/min 的 CPC 流量,DMA 鞘气流量设置为 10 L/min,此时 DMA 的粒径筛选范围约为 7~305 nm。

3 标定方法和数据处理

按图 1 连接好各个仪器,即可开始标定。打开所有仪器,首先调整气溶胶发生器的输出流量和稀释比例,使 CPC 测到的单分散气溶胶数浓度在 1000 cm^{-3} 左右。同时,确保气溶胶发生器输出流量大于 DMA 样气流量,可在干燥器之前的旁路处用流量计测量是否有输出流量。CCN 计数器开机后即会以 1 秒的时间分辨率自动开始数据采集,CPC 开机后使用其自带数据采集软件 AIM 开始数据采集,时间分辨率也为 1 秒。

由于管线长度和流量的不同,筛选后的单分散粒子从 DMA 出口到 CCN 计数器中光学计数器的时间会晚于到 CPC 中光学计数器的时间。为了将两者测量数据对应起来,需要获得这个时间差。可以将 DMA 筛选粒径值从 0 nm 突然改变为 300 nm,这样经 DMA 出来的粒子浓度也会从 0 突增到大约 1000 cm^{-3} ,CPC 测量的凝结核(CN)数浓度和 CCN 计数器测量的 CCN 数浓度会依次出现一个骤升的

台阶,如图 2 所示。处理数据时,通过比较两者数据中骤升的时间,即可得到时间差。对于 TSI 3080 型电迁移率分析仪,操作时可先将工作模式选为“Panel Ctrl”,此时 DMA 筛选粒径值可由转轮选择。将 DMA 输出粒径选为 300 nm,工作模式选为“Analog Ctrl”,由于此时并无外部信号控制电迁移率分析仪,所以 DMA 的筛选粒径值会变为 0。待 CPC 和 CCN 计数器示数都降到 0 之后,重新改变电迁移率分析仪工作模式到“Panel Ctrl”,此时 DMA 筛选粒径值会突然回到 300 nm,即实现筛选粒径值和数浓度的突变。

得到 CPC 与 CCN 计数器数据时间差后,即可设置 CCN 计数器中云室的 ΔT 。为了得到等效过饱和比与 ΔT 之间的关系,需要选择多个 ΔT ,分别利用硫酸铵粒子测试每个 ΔT 下的云室等效过饱和比。标定时选择的 ΔT 越多,得到的标定参数不确定性就越小,但是标定所需时间也越长。对于一次典型的标定,推荐至少选取 6 个 ΔT : 2, 3, 5, 8, 11 和 17 K,对应的等效过饱和比为 0.07%~1.2%。在设定云室 ΔT 为某个值后,需要等待云室中各处温度达到稳定的预设值,之后即可开始筛选单粒径硫酸铵粒子检测活化率。

如第 1 节所述,需要通过实验找到硫酸铵粒子的临界干粒径 D_{cri} ,从而推断当前 ΔT 下的云室等效过饱和比。但如第 2 节提到的,由于仪器的非理想性,造成经 DMA 筛选的粒子仍具有一定的粒径分布,从而造成硫酸铵粒子的活化率随粒径分布曲

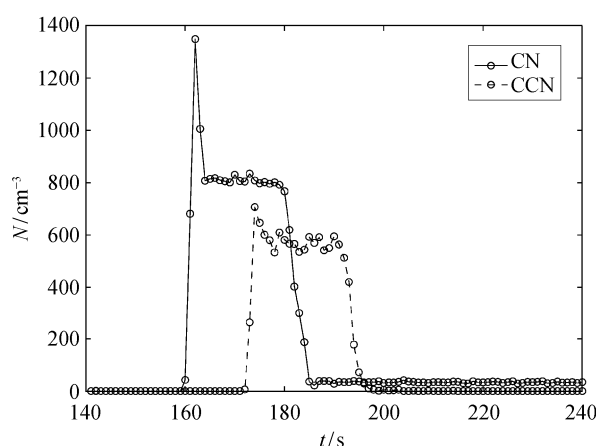


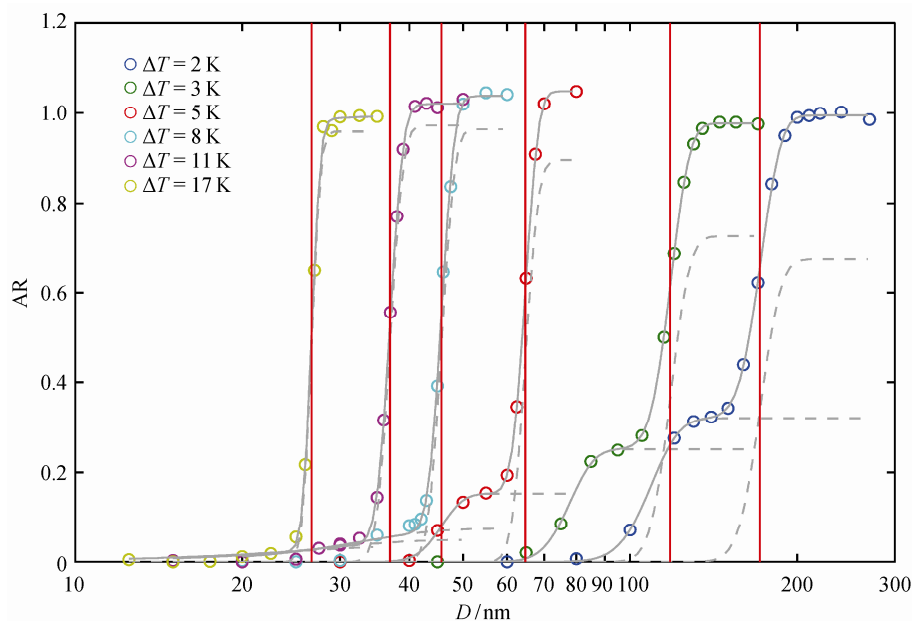
图 2 通过突然改变 DMA 筛选粒径造成的 CN 和 CCN 数浓度(N)突变

Fig. 2 Sudden changes of CN and CCN concentrations produced by changing the selecting diameter of the DMA

线具有一定的坡度, 而不是台阶状的突变。因此, 将利用活化率为 50% 的粒径 D_{50} 代替临界干粒径 D_{crit} , 用于计算云室等效过饱和比。在实验时一般通过两种方法得到 D_{50} , 比较简单的方法是不不断调整 DMA 的筛选粒径, 并同时观察 CCN 计数器和 CPC 所示浓度, 当 CCN 计数器显示的 CCN 浓度是 CPC 显示的 CN 浓度的 50% 时, 即认为此时粒径为 D_{50} 。这种方法简单快速, 不需要复杂的数据处理, 但是具有先天缺陷, 无法修正 DMA 粒径筛选时多电荷粒子对结果的影响。另外, 由于流量和流路几何尺寸的差异, 进入 CCN 计数器和 CPC 的粒子在流路中的损耗可能不同, 即便粒子全部活化, 观测得到的活化率可能也不为 1。在这种情况下, 之前定义的 D_{50} 并不是活化率为 50% 时的粒径, 而应为活化率为最大活化率的 50% 时的粒径。相对于人工寻找活化率为 0.5% 时的粒径, 更精确的方法是观测一系列粒径上硫酸铵粒子的活化率, 从而得到完整的硫酸铵活化率随粒径的变化曲线, 然后通过函数拟合得到 D_{50} , 如图 3 所示。这种方法可以修正多电荷粒子的影响, 并可有效避免由于流路中粒子损失不同造成的误差。本文建议, 标定时都应采用第二种方法。

为了得到较为完整和精确的硫酸铵粒子活化率随粒径的变化曲线, 需要选择一系列恰当的粒径观测其活化率。选择粒径的原则是, 必须覆盖完整的活化率上升段, 并包含部分活化率为 0 和 1 的粒径。粒径选择可以不等距, 为了得到更好的拟合结果, 应在活化率上升段选择较小的粒径间隔, 以保证在曲线上上升段有多个观测点, 而在活化率为 0 或 1 的部分粒径间隔可以相对大一些。一般情况下, 在每个 ΔT 下选择 10~20 个观测粒径即可。电迁移率分析仪配套的控制软件并不支持用户自己编程控制 DMA 的电压变化, 因此目前只能通过人工调节电迁移率分析仪面板的转轮来控制 DMA 筛选的粒径值。实际操作时应事先拟定需要观测的粒径所对应的时间计划表, 然后按表中的计划时刻调整粒径, 得到 CCN 数浓度和 CN 数浓度时间序列后, 亦应按此时间表找到选择的每个粒径对应的有效数据。对于熟练的操作者, 调整 DMA 筛选粒径到某一值所需时间一般小于 10 秒, 调整粒径后整个系统的稳定时间也大约为 10 秒左右, 因此, 建议给每个粒径分配 2 分钟的时间, 其中前 30 秒为调整粒径和稳定时间, 之后的 1 分 30 秒为有效数据。

得到 CCN 浓度和 CN 浓度的时间序列后, 首



灰色虚线为误差函数拟合结果, 红竖线表示最终得到的 D_{50}

图 3 6 个 ΔT 下硫酸铵粒子的活化率(AR)曲线

Fig. 3 Size-resolved activation ratios of ammonium sulfate for different ΔT

先根据之前得到的 CCN 计数器和 CPC 数据的时间差对两个时间序列进行时间匹配, 然后根据事先拟定的选择粒径的时间计划表选出每个粒径对应的 1 分 30 秒有效数据, 并进行平均, 得到每个粒径下的平均 CCN 浓度和 CN 浓度, 两者相除即得到每个粒径下的硫酸铵粒子活化率。图 3 展示一次完整标定得到的 6 个 ΔT 下的硫酸铵粒子活化率曲线。可以看到, 15 个左右的采样点已经可以很好地描绘活化率随粒径变化曲线的形态。对于几乎所有的活化率曲线, 都可以看到由于带双电荷粒子通过 DMA 而造成的双台阶形态。 ΔT 越小, 活化率上升段所处粒径范围越大, 这个效应也越明显。为了消除双电荷粒子的影响, 更准确地估计临界活化粒径 D_{50} , 需要用两个高斯误差函数对活化率曲线 $AR(D)$ 进行拟合:

$$AR(D) = \frac{a_1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\log(D) - \log(D_{g1})}{\sqrt{2} \log(\sigma_{g1})} \right) + 1 \right) + \frac{a_2}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\log(D) - \log(D_{g2})}{\sqrt{2} \log(\sigma_{g2})} \right) + 1 \right) \quad (6)$$

可利用 Matlab 程序中的“fit”函数(Gauss-Newton Method)实现拟合。式(6)中第一项为拟合带双电荷粒子形成的活化率曲线第一个台阶, 即把带双电荷粒子的影响分离出去。图 3 中的灰色实线为应用式(6)对活化率曲线进行拟合的结果, 可以看到, 拟合结果与观测点非常符合。式(6)中的拟合参数 D_{g2} 即为当前 ΔT 下的临界活化粒径 D_{50} , 在图 3 中以红色竖线标出。值得注意的是, 由于考虑了双电荷粒子的影响, 这里得到的 D_{50} 对应的表观活化率都在 0.5 以上, $\Delta T = 2 \text{ K}$ 时 D_{50} 对应的表观活化率甚至超过 0.6。这也说明, 如果不考虑双电荷粒子的影响, 直接以 0.5 表观活化率来定 D_{50} 会造成 D_{50} 的低估, 对标定结果造成误差。

在得到每个 ΔT 下的临界活化粒径 D_{50} 后, 即可按第 1 节中介绍的理论计算每个 ΔT 下云室中的等效过饱和度。CCN 计数器所需的标定参数即为对 ΔT 和等效过饱和度进行线性拟合得到的斜率和截距, 如图 4 所示。对于一次高质量的标定, 线性拟合的 R^2 可以达到 0.999。将拟合斜率输入 CCN 计数器中, 即完成标定。

需要特别说明的是, CCN 计数器中云室的等效过饱和度对总流量非常敏感, 准确的浓度测量要求

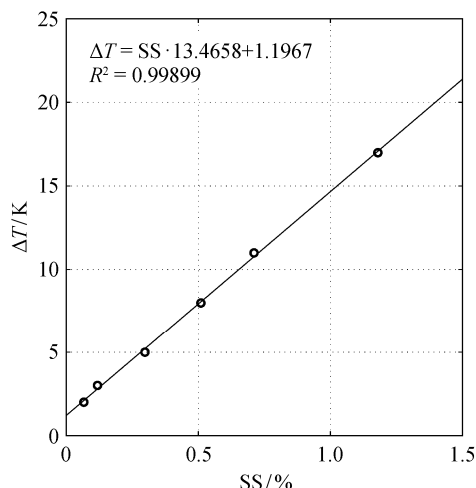


图 4 一次完整标定得到的云室等效过饱和度(SS)与 ΔT 之间的关系及线性拟合结果

Fig. 4 Result of the calibration for the supersaturations in the chamber, the line is the result of linear fitting

样气和鞘气流量都达到一定的精确度。因此, 在对云室过饱和度进行标定前, 应先对样气和鞘气流量分别进行检测, 如果流量与预设值存在偏差, 则应进行样气和鞘气流量的标定, 之后再对云室过饱和度进行标定。

4 总结

本文提出一种改进的 DMT CCN 计数器云室等效过饱和度标定方法, 详细介绍了标定原理、仪器设置、标定流程以及数据处理方法。本方法可操作性强, 便于在 DMT CCN 计数器用户中推广。借助扫描式电迁移率粒径谱仪和气溶胶发生器, CCN 计数器用户可随时依据本方法对 CCN 计数器的云室等效过饱和度进行标定, 从而保证高质量的 CCN 数浓度观测。

相对于传统的标定方法, 本标定方法在流程和数据处理方面做了改进, 使标定结果的不确定性更低。在用本方法标定时, 观测完整的硫酸铵分粒径活化率曲线, 然后利用双高斯误差函数拟合找到硫酸铵粒子在当前云室 ΔT 下的临界活化粒径, 从而使估计硫酸铵临界粒径的准确性大大提高, 使最终推断的云室等效过饱和度不确定性减小。需要注意的是, 本方法依然假定云室等效过饱和度与 ΔT 之间为简单的线性关系。事实上, 在过饱和度小于 0.1% 时, 这种线性关系与实际结果符合得并不好, 因此利用线性关系得到的过饱和度在这个范围内不

确定性较大, 在实际观测时应谨慎使用 0.1% 以下的过饱和比。

参考文献

- [1] Twomey S. Pollution and the planetary albedo. *Atmospheric Environment*, 1974, 8(12): 1251–1256
- [2] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245: 1227–1230
- [3] Roberts G C, Nenes A A. continuous-flow streamwise thermal-gradient CCN chamber for atmospheric measurements. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(3): 206–221
- [4] Rose D, Nowak A, Achtert P, et al. Cloud condensation nuclei in polluted air and biomass burning smoke near the mega-city Guangzhou, China —part 1: size-resolved measurements and implications for the modeling of aerosol particle hygroscopicity and CCN activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 3365–3383
- [5] Wiedensohler A, Cheng Y F, Nowak A, et al. Rapid aerosol particle growth and increase of cloud condensation nucleus activity by secondary aerosol formation and condensation: a case study for regional air pollution in northeastern china. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D00G08
- [6] Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al. Size-resolved and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 3835–3846
- [7] 石立新, 段英. 华北地区云凝结核的观测研究. *气象学报*, 2007, 65(4): 644–652
- [8] 孙霞, 银燕, 韩洋, 等. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1165–1170
- [9] 王婷婷, 孙俊英, 沈小静, 等. 天津武清地区云凝结核变化特征. *气象科技*, 2012, 40(3): 466–473
- [10] Rose D, Gunthe S S, Mikhailov E, et al. Calibration and measurement uncertainties of a continuous-flow cloud condensation nuclei counter (DMT-CCNC): CCN activation of ammonium sulfate and sodium chloride aerosol particles in theory and experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(5): 1153–1179
- [11] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley, Inc, 1998
- [12] Pruppacher H R, Klett J D. *Microphysics of clouds and precipitation*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer, 1997
- [13] Frank G P, Dusek U, Andreae M O. Technical note: characterization of a static thermal-gradient CCN counter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 3071–3080
- [14] Young K C, Warren A J. A reexamination of the derivation of the equilibrium supersaturation curve for soluble particles. *Journal of the atmospheric sciences*, 1992, 49(13): 1138–1143