

云凝结核数浓度观测影响因子的实验室研究

陶江川¹ 赵春生^{1,†} 马楠^{1,2} 黄梦宇³

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig 04318;
3. 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089; † 通信作者, E-mail: zcs@pku.edu.cn

摘要 气溶胶的云滴活化能力影响云的微物理特性, 还表征气溶胶吸湿性的强弱。活化气溶胶(即云凝结核, Cloud Condensation Nuclei, CCN)的观测研究中的重要方法是CCN计数器(CCN Counter, CCNC)的应用。针对CCNC观测的影响因子进行了实验室研究。实验结果表明, CCNC所处的气压和设置的流量会对过饱和比产生等比例的影响, 而进气温度可能导致非线性的影响。实验中发现当气压差超过300 hPa时, CCNC气压调节装置会导致气溶胶的损失, 且损失的比例随着压差的增大而增大。在气溶胶浓度超过10000个/cm³、过饱和比低于0.2%时, 会出现对CCN数浓度的低估, 可能是由于水汽消耗导致CCN无法全部活化而不能被CCNC观测。研究结果及给出的建议对CCN的观测有指导意义, 同时有利于CCN数据的质量控制和分析工作。

关键词 云凝结核; 云凝结核计数器(CCNC); 过饱和比; 大气气溶胶

中图分类号 P414

Laboratory Study of Factors Impacting Measurements of the Cloud Condensation Nuclei Number Concentration

TAO Jiangchuan¹, ZHAO Chunsheng^{1,†}, MA Nan^{1,2}, HUANG Mengyu³

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig 04318; 3. Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089; † Corresponding author, E-mail: zcs@pku.edu.cn

Abstract Aerosol activity of forming cloud droplets affects cloud micro-physics and indicates aerosol hygroscopicity. Application of the cloud condensation nuclei (CCN) counter (CCNC) is an important method for studying CCN-active particles. Factors impacting measurements using CCNC are analyzed by laboratory study. In CCNC, variations of super-saturations (SS) are found to be proportional to variations of the pressure and the flow-rate. Temperature conditions, under which CCNC is working, exhibit nonlinear influences on SSs in CCNC. Varying aerosol losses with particle size due to the pressure adjustment is found when differential pressure is higher than 300 hPa. Underestimation of CCN number concentration is found when particle number concentration is higher than 10000/cm³ and SS in CCNC is lower than 0.2%. This is because only part of CCN-active particles can activate due to the vapor depletion in CCNC. The results and suggestions provide instructions for CCN measurement and would help improving quality control and analysis of CCN data.

Key words cloud condensation nuclei; CCN Counter (CCNC); super-saturation; atmospheric aerosol

云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)指大气中的水汽能在其表面凝结而形成云滴(液态或固态)的悬浮颗粒。气溶胶就是一种在一定过饱和比条件下可活化成为CCN的悬浮颗粒, 对云的微物理特性有重要影响, 同时气溶胶的活化能力可以表征

气溶胶的吸湿性。对CCN的观测可以为CCN的定量描述和参数化评估提供可靠的数据, 具有重要的科学意义。

产生并控制过饱和状态的水汽条件是CCN直接观测过程中的关键和难点。DMT (Droplet Measuring

Technology)公司近年研制的CCN计数器(CCN Counter, CCNC)基于Roberts等^[1]等有关恒流热梯度云室的研究工作,通过因水汽与热量的扩散速度差而产生过饱和比来进行CCN的观测。与其他CCN观测仪器相比,CCNC较为可靠^[2],已广泛用于世界各地的CCN地面观测^[3-5],近年来在国内也大量应用^[6-13],例如在污染严重的华北平原^[9-11],特别是北京城区^[12-13]。在飞机观测任务中也大量应用CCNC^[14-17]。基于CCNC的观测原理,在极高过饱和比条件下,测量粒径小于10 nm的凝结核计数器可以用于核模气溶胶的观测^[18]。人们在对CCNC的仪器敏感性进行研究的同时,发现了CCNC性能的不足。CCNC云室中的过饱和比通过云室两端的温度差来控制,研究发现,温度差与过饱和比的关系不仅受仪器参数影响^[1,19],而且随着外界环境的改变和云室的老化而变化^[2]。理论研究发现,在低过饱和比(0.1%以下)条件下,由于水汽扩散速度较慢,气溶胶在穿过云室的过程来不及完全活化,导致CCN偏少,活化率偏低^[20]。Rose等^[6]发现,CCNC存在计数效率随粒径增大的问题。为了获得分粒径的气溶胶活化率信息,人们尝试多种方法改进CCNC^[10,21-22],其中,邓兆泽等^[23]给出细致实用的分粒径活化率观测和分析方法。

从地面的雾到高层的云,CCN在大气中分布广泛,观测条件复杂多变。为了适应观测需求,常常必须改变CCNC的仪器设置和工作条件:为了得到合适的粒径扫描范围而配合其他仪器的流量,需要改变CCNC的工作流量^[23-24];不同海拔地区或飞机观测导致工作气压发生变化^[2,14-15];飞机观测需要安装压强调节装置。此外,CCNC可能在观测中遇到设计之初未考虑到的极端环境,影响CCN的观测质量。例如在高污染的地区观测时,气溶胶数浓度可能会超过CCNC的计数能力。

综上所述,对CCNC观测性能的测试研究依然十分必要。虽然针对CCNC仪器性能的测试研究已经有一些工作^[2,20],但是针对气溶胶污染非常严重环境下的性能测试研究还不充足。在中国,特别是华北平原,气溶胶污染非常严重,同时CCN观测的研究需求也非常大,实际应用非常多,因此有必要针对高污染条件进行CCNC性能的测试研究。本研究利用自行搭建的CCNC观测系统,对影响CCNC观测的条件和仪器设置(特别是华北平原的高气溶胶浓度条件和飞机观测设置)进行CCNC性能的测试

研究,为CCN观测提供建议。

1 实验方法

本文主要使用SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, 扫描迁移性粒径分析仪)-CCNC系统来研究CCNC工作条件和仪器设置的影响,包括气溶胶发生器、干燥器、差分迁移率分析仪(Differential Mobility Analyzer, DMA)、电迁移率分析仪、凝结核计数器(Condensation Particle Counter, CPC),仪器连接设置如图1所示。发生的气溶胶首先经过干燥,然后由DMA进行粒径筛选,最后分别进入CPC和CCNC,得到气溶胶(condensation nuclei, CN, 又称凝结核)和CCN浓度。该系统可以用来标定CCNC中的过饱和比,并进行分档活化率的观测^[23-24]。

采用标定CCNC过饱和比的方法^[24]测定CCNC中的过饱和比,即通过观测已知其活化特性的气溶胶的临界干粒径来推断CCNC中的过饱和比。实验中使用硫酸铵气溶胶,在不同CCNC仪器设置和工作条件下进行硫酸铵气溶胶的测量。通过两个高斯误差函数,对活化率曲线进行拟合,排除多电荷气溶胶的影响,得到临界干粒径。最后利用Köhler模型,得到不同实验条件下对应的过饱和比。

CCNC云室中的过饱和比由流量、气压和云室的温度分布决定^[1,19],通常固定流量、气压和进气温度,仅仅改变云室温度差来控制CCNC中的过饱和比。在CCNC观测中,温度和压强会随着观测点不同而改变,对于流量,则可能需要配合其他仪器

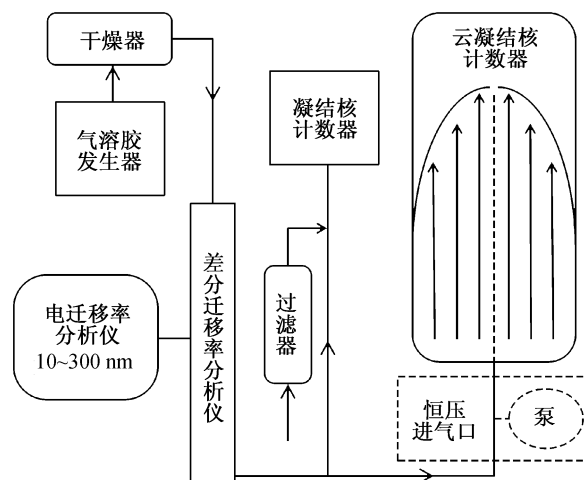


图1 SMPS-CCNC 工作系统
Fig. 1 The SMPS-CCNC system

(例如配合DMA和CPC选择粒径扫描的范围)进行改变。本实验中,流量通过CCNC设置而直接改变,进气温度通过空调控制,气压通过CCNC飞机观测用的恒压进气口控制。该装置安装在CCNC进气口之前,通过一个三通接口,将CCNC和气压调节装置并联。气压调节装置包括工控机(Industrial Personal Computer, IPC)和受其控制的抽气泵,在IPC上设定气压后,IPC将通过控制抽气泵功率来调整CCNC中的气压,适用于具有增压装置的飞机观测。本实验中,通过使用气压调节装置,CCNC中气压最低压强可达到566 hPa。

为了测试高气溶胶浓度下CCNC的性能,硫酸铵浓度会达到 10000 cm^{-3} 以上。在马楠等^[24]的标定方法中,可以获得浓度约为 1000 cm^{-3} 的单一粒径硫酸铵气溶胶,但是不能满足本实验的要求,因此需要改变气溶胶发生装置。本研究使用浓度更大的硫酸铵溶液,用功率更大的真空泵代替气溶胶发生器配备的蠕动泵,并相应地改进了气路:使用浓度约为 1 mol/L 的硫酸铵溶液(将饱和硫酸铵溶液稀释到原来浓度的20%得到);使用真空泵发生气溶胶时,由于真空泵流量过大,首先需要接上三通阀控制流量,然后再接入气溶胶发生器系统。

2 结果和讨论

2.1 工作环境温度和气压的影响

针对CCNC的工作条件,分别改变进气温度和气压进行过饱和比的测定。对于进气温度,以气压为 1 MPa 、进气温度为 300 K 、流量为 0.500 L/min 为标准,将进气温度增加和减少 7 K 进行对比实验。由于使用额外的恒压进气口,以气压为 0.700 MPa 、进气温度为 300 K 、流量为 0.500 L/min 为标准,将气压增加 0.150 MPa 和减少 0.144 MPa 进行对比实验。针对每组对比实验,选取3个温度差进行过饱和比观测,计算平均的过饱和比偏差。实验结果见表1。

当气压改变约20%时,导致过饱和比改变近20%,这与之前的CCNC过饱和比理论和观测研究相一致。Robert等^[1]的理论分析结果显示,当过饱和比为0.2%时, 100 hPa 和 10 K 的改变会导致过饱和比0.03%的变化,即15%的变化。Lance等^[19]给出CCNC中过饱和比的近似公式,其中气压、流量和温度差三者以乘积的形式决定过饱和比,考虑到通常工作状态下温度差与过饱和比近似地呈线性关系,在流量和温度差不变的条件下,气压与过饱和

比呈线性关系,即气压会导致过饱和比成比例地变化。Rose等^[2]在欧洲不同海拔观测站点进行的标定实验也得到类似的结果。

当进气温度升高 7 K 时,导致过饱和比升高约3%,但当进气温度下降 7 K 时,过饱和比下降约10%。之前的CCNC理论研究表明,过饱和比与进气温度之间为非线性关系^[1,19]。本研究中温度导致的过饱和比变化不具有线性,可能是两者非线性关系的表现。

综上所述,CCNC对工作的气压和温度敏感,需要稳定的工作气压和进气温度。以过饱和比偏差在10%以内为标准,则在标准大气压下工作时,气压扰动应控制在 100 hPa 以下,在更高海拔或飞机观测时,由于气压降低,相应地需要更严格地控制气压波动。通常在进气温度 300 K 条件下工作,由于存在非线性影响的可能,建议温度扰动控制在 5 K 以内。此外,由于工作条件改变会导致温度差与过饱和比的关系变化,在观测开始之前,必须在相应的工作条件下进行完整的标定实验。

2.2 流量设置的影响

仍然以流量为 0.500 L/min 、气压为 1 MPa 、进气温度为 300 K 作为标准,将流量增加和减少 0.100 L/min 进行对比实验。针对每组对比实验,选取3个温度差进行过饱和比观测,计算平均的过饱和比偏差,实验结果如表1所示。当流量改变约20%时,导致过饱和比改变近20%。与前面关于气压的讨论类似,基于Lance等^[19]给出的CCNC中过饱和比的近似公式,气压、流量和温度差三者以乘积的形式决定过饱和比,在气压和温度差不变的条件下,流量也

表1 过饱和比对比实验中的CCNC仪器参数设置和过饱和比偏差

Table 1 Settings of CCNC parameter and deviations of super-saturations in the comparison of super-saturations

气压/ mPa	流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	进气温度/K	变量相对 偏差/%	过饱和比 相对偏差/%
0.566	0.500	300	-19.1	-19.10
0.700	0.500	300	-	-
0.850	0.500	300	21.4	18.57
1.000	0.400	300	20.0	18.50
1.000	0.600	300	-20.0	-13.50
1.000	0.500	307	2.3	3.95
1.000	0.500	293	-2.3	-9.97

说明:加粗数字为对比实验中改变的参数。

与过饱和比呈线性关系,即流量也会导致过饱和比成比例地变化。

2.3 气压调整气路的影响

在改变气压的实验中,安装恒压进气口来调整 CCNC 内部气压,进一步在 CCNC 温度差为 11 K 时观测 40~300 nm 之间硫酸铵气溶胶的活化过程。图 2 给出 CCN 与 CN 的数浓度之比随粒径的变化。当气溶胶小于 90 nm 时,气溶胶中 CCN 的比例随粒径增加而增加,即通常的活化率上升过程。之后,566, 700 和 850 hPa 气压下的 CCN 与 CN 浓度之比在达到最大值后开始降低: 在 566 hPa 条件下,CCN 与 CN 浓度之比在 90 nm 处达到最大值 90%, 随即下降至 300 nm 处的 70%; 在 700 hPa 条件下,CCN 与 CN 浓度之比在 150 nm 处达到最大值 93%, 在 200 nm 之后显著下降至 80% 左右; 在 850 hPa 条件下,CCN 与 CN 浓度之比在达到 200 nm 之前基本上保持在 95%, 200 nm 之后缓慢下降, 300 nm 处约为 92%。

CCNC 中温度差为 11 K 时,在 850, 700 和 566 hPa 条件下过饱和比约为 0.6%, 0.5% 和 0.4%, 对于 90 nm 以上的硫酸铵气溶胶可以完全活化, CCN 与 CN 的数浓度之比在理论上可以达到 1, 实际情况是在 1 附近波动, 并且没有出现明显的下降趋势。在改变气压的实验中,恒压进气口安装在 CCNC 之前,在各种气压条件下都出现大粒径气溶胶 CCN 与 CN 数浓度之比的明显下降,可能是恒压进气口的抽气泵在分流降压时导致气溶胶损失所致。具体来看,相对地面气压, 850, 700 和 566 hPa 分别等于下降 15%, 30%

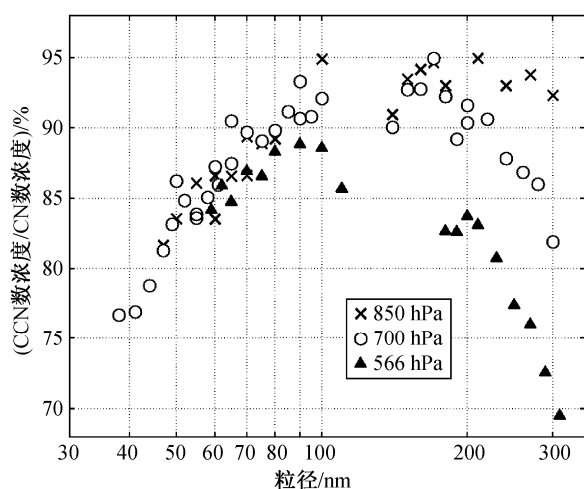


图 2 不同气压下 CCN 与 CN 数浓度之比随粒径的变化
Fig. 2 Size-resolved ratios of CCN number concentration to CN number concentration for different pressure

和 45%, 对应 300 nm 的 CCN 与 CN 数浓度之比最大值分别下降 3%, 14% 和 22%, 即损失随着压强改变的增大而增大。

实验结果表明, CCNC 过饱和比对流量设置敏感, 观测时应合理地选择 CCNC 中的流量, 并在观测前进行标定实验。在飞机观测中用到恒压进气口且调节气压差大于 300 hPa 时, 观测 CCN 整体浓度需要考虑粒径较大气溶胶的损失, 建议采用分粒径的 CCN 观测方法^[23], 直接获得损失信息。

2.4 高气溶胶浓度对计数效率的影响

在极高气溶胶浓度条件下进行 CCN 与 CN 数浓度之比在不同过饱和比下的观测, 结果如图 3 所示。选择粒径为 220 nm 的硫酸铵气溶胶, CCNC 温度差在 2~5.5 K 之间变化, 流量为 0.500 L/min, 气压为 1 MPa, 进气温度为 300 K, 在此条件下 220 nm 的硫酸铵气溶胶能够完全活化。当气溶胶数浓度达到 10000 cm^{-3} 时, CCN 与 CN 的数浓度之比会随着云室温差的减小而降低, 其中温度差小于 3.2 K 且气溶胶数浓度达到 20000 cm^{-3} 以上时, CCN 与 CN 的数浓度之比会明显下降, 最低可以降至 50%, 而当温度差大于 3.2 K 时, CCN 与 CN 的数浓度之比仍然维持在 80% 以上。当温度差小于 2.8 K 后, 计数效率不再下降, 而温度差大于 3.5 K 后, 计数效率也不再会增加, 这与 CCNC 说明书中不同过饱和比下气溶胶数浓度和 CCN 计数比例的实验结果基本上一致。

邓兆泽^[25]发现, 当气溶胶浓度超高, 数浓度达

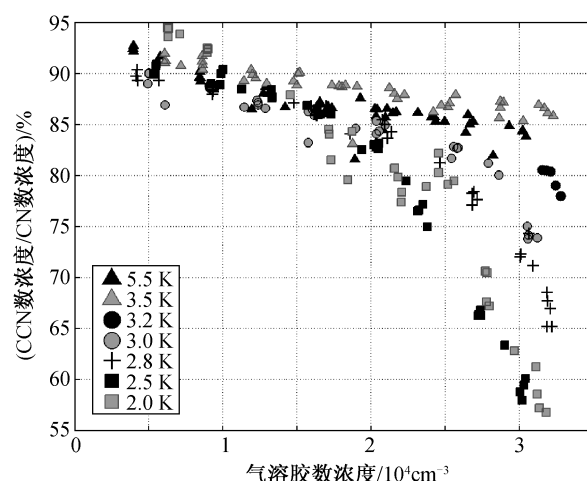


图 3 高气溶胶浓度条件下不同温度差下 CCN 与 CN 数浓度之比随气溶胶数浓度的变化

Fig. 3 Ratios of CCN number concentration to CN number concentration for distinguished temperature differences in high aerosol loading condition

到 10000 cm^{-3} 以上时,云室中活化液滴的总含水量不会随CCN数浓度的升高而继续升高,甚至会出现下降的情况。Latham等^[20]发现,CCNC中存在水汽消耗的问题,即在CCN浓度超高(数浓度达到 10000 cm^{-3} 以上)时,云室中过饱和比会随着气溶胶数浓度的升高而下降。CCN含水量偏低或CCNC过饱和比的下降都会导致CCN的粒径偏小,在低过饱和比条件下甚至会出现无法达到临界活化粒径(即无法活化)的情况。然而,CCNC中光学气溶胶计数器(Optical Particle Counter, OPC)的观测粒径下限为 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ (CCNC手册),CCN无法活化,加上CCN粒径偏小,会导致CCN的低估,即出现低过饱和比条件下CCN与CN的数浓度之比下降的情况。

在高气溶胶浓度条件(特别是在气溶胶污染特别严重的华北地区^[9-10])下的CCN观测中,为了避免CCN的低估问题,建议避免在较低过饱和比(0.2%)下进行CCN浓度的直接观测,或者采用分粒径的CCN观测方法来降低CCNC中气溶胶的绝对浓度。

3 结论和建议

本文的实验室研究中,通过改变CCNC的工作条件,研究流量、气压、温度和高气溶胶浓度对CCNC工作状态的影响,并据此给出CCNC观测的方法建议。

通过改变温度、流量和气压的对比实验,发现流量和气压会导致成比例的过饱和比变化,即20%的流量和气压变化会导致近20%的过饱和比变化,而进气温度可能导致非线性的过饱和变化,即温度升高和降低2%时,过饱和比分别增加约3%和下降约10%。

恒压进气口会导致粒径大于 90 nm 的气溶胶损失,对于能够完全活化的 300 nm 硫酸铵气溶胶,850,700和566 hPa条件下,CCN与CN的数浓度之比分别下降3%,14%和22%。

在气溶胶浓度超过 10000 cm^{-3} 时,由于水汽消耗导致CCN粒径偏小,甚至无法活化,当过饱和比低于0.2%时会出现CCN的低估:对于能完全活化的 220 nm 硫酸铵气溶胶,CCN与CN的数浓度之比降至60%。

基于上述结果,建议使用CCNC观测时应注意以下问题。

1) 由于流量决定CCNC中的过饱和比,因此CCN观测中,特别是为了配合其他仪器观测而需要

调整CCNC流量时,要关注流量的变化。

2) 在稳定的工作条件下,以过饱和比偏差在10%内为基准,建议气压的波动应控制在10%以内,即标准大气压条件下波动应限制在100 hPa,进气温度300 K条件下温度的波动则应控制在5 K之内。

3) 由于CCNC标定参数随工作条件变化,因此在观测之前必须在相应工作条件下进行CCNC的过饱和比标定。

4) 在飞机观测中,用到恒压进气口且调节气压差超过300 hPa时,需要考虑气溶胶损失的订正,并采用分粒径CCN观测。

5) 在气溶胶严重污染的条件下,建议避免在低于0.2%的过饱和比下进行观测,或者采用分粒径CCN观测。

本研究中发现的水汽消耗导致CCN数浓度低估的现象,对其发生机制的研究需要应用流体力学模型进行模拟。CCNC云室中透水材料的老化会导致过饱和比设置的变化,其变化规律有待长时间观测的检验。气溶胶中挥发性成分的存在也可能导致CCNC观测的误差,对此需要进一步的实验研究。

参考文献

- [1] Roberts G, Nenes A. A continuous-flow streamwise thermal-gradient CCN chamber for atmospheric measurements. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39 (3): 206–221
- [2] Rose D, Nowak A, Achtert P, 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
- [3] Whitehead J D, Irwin M, Allan J D, et al. A meta-analysis of particle water uptake reconciliation studies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(21): 11833–11841
- [4] Kerminen V M, Paramonov M, Anttila T, et al. Cloud condensation nuclei production associated with atmospheric nucleation: a synthesis based on existing literature and new results. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(24): 12037–12059
- [5] Ervens B, Cubison M J, Andrews E, et al. CCN predictions using simplified assumptions of organic aerosol composition and mixing state: a synthesis

- from six different locations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(10): 4795–4807
- [6] 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(7): 3365–3383
- [7] Meng J W, Yeung M C, Li Y J, et al. Size-resolved cloud condensation nuclei (CCN) activity and closure analysis at the HKUST supersite in Hong Kong. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(18): 10267–10282
- [8] Leng C P, Cheng T T, Chen J M, et al. Measurements of surface cloud condensation nuclei and aerosol activity in downtown Shanghai. *Atmospheric Environment*, 2013, 69: 354–361
- [9] 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 — Atmospheres*, 2009, 114: D00G08
- [10] 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(8): 3835–3846
- [11] 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
- [12] Gunthe S S, Rose D, Su H, et al. Cloud condensation nuclei (CCN) from fresh and aged air pollution in the megacity region of Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(21): 11023–11039
- [13] Cheng Y F, Su H, Rose D, et al. Size-resolved measurement of the mixing state of soot in the megacity Beijing, China: diurnal cycle, aging and parameterization. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(10): 4477–4491
- [14] Hersey S P, Craven J S, Metcalf A R, et al. Composition and hygroscopicity of the Los Angeles aerosol: CalNex. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres*, 2013, 118(7): 3016–3036
- [15] Roberts G, Mauger G, Hadley O, et al. North American and Asian aerosols over the eastern Pacific Ocean and their role in regulating cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D13): D13205
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Wang Z, Su H, Wang X, et al. Scanning supersaturation condensation particle counter applied as a nano-CCN counter for size-resolved analysis of the hygroscopicity and chemical composition of nanoparticles. *Atmos Meas Tech*, 2015, 8(5): 2161–2172
- [19] Lance S, Nenes A, Medina J, et al. Mapping the operation of the DMT continuous flow CCN counter. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40(4): 242–254
- [20] Lathem T L, Nenes A. Water vapor depletion in the DMT continuous-flow CCN chamber: effects on supersaturation and droplet growth. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(5): 604–615
- [21] Moore R H, Nenes A, Medina J. Scanning mobility CCN analysis — a method for fast measurements of size-resolved CCN distributions and activation kinetics. *Aerosol Science and Technology*, 2010, 44(10): 861–871
- [22] Su H, Cheng Y, Ma N, et al. A broad supersaturation scanning (BS2) approach for rapid measurement of aerosol particle hygroscopicity and cloud condensation nuclei activity. *Atmos Meas Tech*, 2016, 9(10): 5183–5192
- [23] 邓兆泽, 赵春生, 马楠, 等. 一种快速测量高粒径分辨率气溶胶活化率曲线的方法. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 386–392
- [24] 马楠, 赵春生, 邓兆泽, 等. 一种改进的 DMT 云凝结核计数器过饱和比标定方法. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(5): 805–811
- [25] 邓兆泽. 华北地区气溶胶活化特性的观测研究[D]. 北京: 北京大学, 2011