

# 高时间分辨率加湿浊度计系统设计研究

刘宏剑 赵春生<sup>†</sup>

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: zcs@pku.edu.cn

**摘要** 为了研究华北地区气溶胶吸湿性的日变化特征, 独立设计并搭建一套高时间分辨率的加湿浊度计系统。该系统首次采用两台水浴来交替控制样气加湿过程, 将循环周期由先前的 2~3 小时缩减至约 1 小时。系统中 TSI3563 型浊度计的光源功率由 75 W 调整至 25 W, 并在光源前方安置一片热镜, 腔体内升温由 4.3°C 降至 2.3°C, 提升了系统加湿效率。由于浊度计自带的湿度探头测值不准, 故在浊度计进气口处和出气口处分别安置两枚温湿探头, 用于校正浊度计腔体内的相对湿度测值。该加湿浊度计系统将用于华北地区大气气溶胶的散射吸湿增长特性研究中。

**关键词** 加湿浊度计; 散射吸湿增长因子; 吸湿性

**中图分类号** P414

## Design of a Humidified Nephelometer System with High Time Resolution

LIU Hongjian, ZHAO Chunsheng<sup>†</sup>

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: zcs@pku.edu.cn

**Abstract** In order to study the diurnal variations of aerosol hygroscopic properties in North China, a new humidified nephelometer system is designed with the advantage of high time resolution and high humidification efficiency. In this system, two water baths are used for the first time to control humidification process in turn, reducing the circulation cycle from two to three hours to about one hour. Besides the nephelometer lamp power is reduced from 75 W to 25 W, and a piece of heat mirror is set ahead of the lamp. After those modifications, the temperature rising inside the chamber decreases from 4.3 °C to 2.3 °C and humidification efficiency rises. The original RH sensor inside the chamber is inaccurate, so two Vaisala sensors are set at the inlet and outlet of the nephelometer to correct the RH inside the chamber. In the future, this humidified nephelometer system will be used in *in situ* measurement in North China to get the diurnal variation properties of aerosol light scattering enhancement factor.

**Key words** humidified nephelometer; light scattering enhancement factor; hygroscopicity

大气气溶胶能够直接散射和吸收太阳辐射, 还能够通过参与云物理过程, 间接地影响地气系统辐射平衡。最新的 IPCC 报告<sup>[1]</sup>表明, 与包括温室气体在内的其他大气成分相比, 气溶胶辐射强迫结果的不确定性依然是最大的。为了准确地评估气溶胶直接辐射效应, 需要了解大气气溶胶的光学特性及其时空分布。气溶胶特性观测通常在干燥条件下进行<sup>[2]</sup>。环境相对湿度较高时, 气溶胶粒子吸收水汽,

粒径增长, 复折射率改变, 其散射吸收特性与干燥状态下差异显著。为了将在干燥条件下得到的观测结果应用于气溶胶辐射强迫评估中, 需要了解气溶胶光学特性随相对湿度的变化规律<sup>[3]</sup>。卫星数据反演<sup>[4]</sup>及地面观测数据和遥感数据对比研究<sup>[5-6]</sup>中亦需了解气溶胶的光学吸湿特性。

先前的研究中使用气溶胶散射吸湿增长因子 (light scattering enhancement factor)  $f(\text{RH})$  定量描述

气溶胶散射系数与相对湿度的关系, 定义为目标相对湿度下吸湿增长后的气溶胶散射系数  $\sigma_{sp}(RH)$  与干燥状态下气溶胶散射系数  $\sigma_{sp,dry}$  的比值<sup>[7]</sup>:

$$f(RH) = \sigma_{sp}(RH) / \sigma_{sp,dry}$$

加湿浊度计系统可用于气溶胶散射吸湿增长因子的测量。全世界第一套加湿浊度计系统由 Covert 等<sup>[7]</sup>于 1972 年设计, 包括加湿单元和浊度计两部分: 干燥气溶胶样气先通入混合腔室, 与潮湿洁净空气混合得到加湿后的气溶胶, 再通入浊度计, 测量加湿后的气溶胶散射系数。其后研究中使用的加湿浊度计系统沿袭 Covert 等的设计方案, 同时不断改进加湿单元, 提升加湿效率和测量精度。

最近 20 年, 气溶胶散射吸湿特性观测在全球范围内广泛开展, 观测对象涉及多种类型的气溶胶。海盐气溶胶的散射吸湿能力最强, 在世界各地测得海盐气溶胶在相对湿度 80% 条件下的散射吸湿增长因子  $f(RH=80\%)$  在 2.2~2.7 之间<sup>[8-10]</sup>。大陆型气溶胶和城市气溶胶主要由局地排放形成, 散射吸湿特性差异较大,  $f(RH=80\%)$  测值介于 1.4~2.0 之间<sup>[11-14]</sup>。生物质燃烧生成的气溶胶和沙尘气溶胶吸湿性很弱,  $f(RH=80\%)$  测值不超过 1.3<sup>[10,15-16]</sup>。国内的相关观测研究起步很晚。颜鹏等<sup>[17]</sup>使用两台 EchoTech 公司生产的 M9003 型积分浊度计搭建一套加湿浊度计系统, 其加湿单元设计参考美国国家海洋和大气管理局的相对湿度控制方案。这是目前国内唯一可从文献中查到的加湿浊度计系统。该系统已用于京津地区的环境气溶胶观测, 得到观测期间气溶胶散射吸湿增长特性的平均结果<sup>[18-19]</sup>。

华北平原地区是全世界气溶胶污染最严重的地区之一, 气溶胶理化特征复杂, 且表现出显著的日变化特征。高相对湿度串联差分迁移性粒径分析仪 (high humidity tandem differential mobility analyzer, HHTDMA) 观测结果表明, 白天不吸湿粒子仅占总粒子数的 8%, 而夜间不吸湿粒子增加至 20%<sup>[20]</sup>。气溶胶分粒径活化率观测结果亦证实华北地区气溶胶吸湿性日变化显著<sup>[21]</sup>。以 0.20% 过饱和比条件下的结果为例: 白天平均活化率接近 0.28, 而夜间仅为约 0.25, 早 7 点和晚 7 点出现活化率低值。Kuang 等<sup>[22]</sup>基于实测数据, 利用辐射传输模式评估华北平原气溶胶直接辐射强迫, 结果表明, 与气溶胶光学参数平均结果作为输入参数相比, 输入光学参数日变化数据能够显著提高评估结果的精度。然而, 目前国内尚无气溶胶散射吸湿增长特性日变化

特征的直接观测, 现有的唯一一套加湿浊度计系统单次循环耗时 2~3 小时, 无法满足日变化特征观测需求, 因此已发表的利用这套系统得到的观测结果仅展示观测期内的气溶胶散射吸湿增长因子平均特征, 而无日变化特征<sup>[18-19]</sup>。

综上所述, 开发一套用于气溶胶散射吸湿增长因子观测的高时间分辨率加湿浊度计系统, 并将该系统应用于散射吸湿特性的日变化特征观测十分必要。本文介绍我们自行设计研发的高时间分辨率加湿浊度计系统。

## 1 系统结构

在已有加湿浊度计系统设计<sup>[8,14,23]</sup>的基础上, 我们做了进一步的改进, 独立设计并搭建一套高时间分辨率加湿浊度计系统, 由浊度计、加湿管、水浴及其他辅助部件构成, 基本结构如图 1 所示。干燥气溶胶样气进入系统后分为两路: 一路样气直接通入第一台浊度计, 测量干燥状态下的气溶胶散射系数; 另一路样气先通过加湿管, 再通入第二台浊度计, 测量加湿后的气溶胶散射系数。温湿探头同时记录加湿后气溶胶的相对湿度。

本加湿浊度计系统的加湿单元采用水汽渗透加湿方案。加湿管由内层的半透膜管和外层的不锈钢管嵌套组成(图 2)。半透膜管为 Gore-Tex® 材质, 膜的表面密布着极细小的孔, 孔径比水分子的尺度大, 但小于分子簇的尺度。系统运行时, 样气从半透膜管内通过, 液态水从半透膜管与不锈钢管之间通过。水汽分子能够通过小孔渗透到半透膜管内加湿样气, 而液滴被膜阻挡。水分子渗透效率与水温相关, 水温升高, 水分子渗透效率增大, 加湿单元的效率提升。加湿管内的水与水浴构成闭合循环, 水温由水浴控制。经检定, 加湿后的气溶胶相对湿

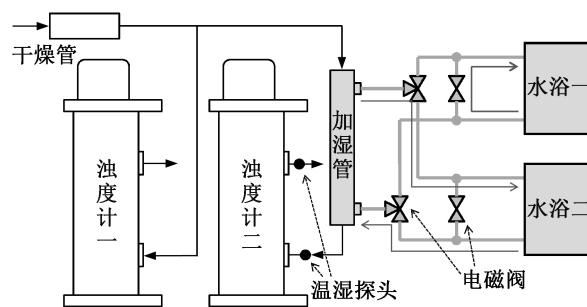


图 1 加湿浊度计结构示意图

Fig. 1 Instrumentation set-up of humidified nephelometer system

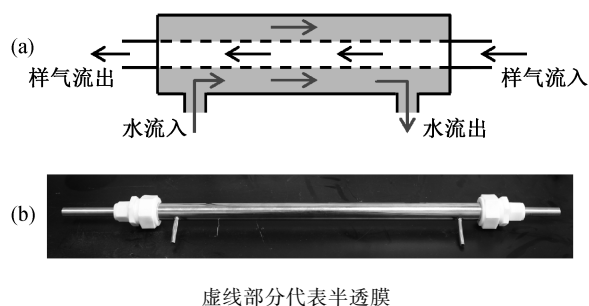
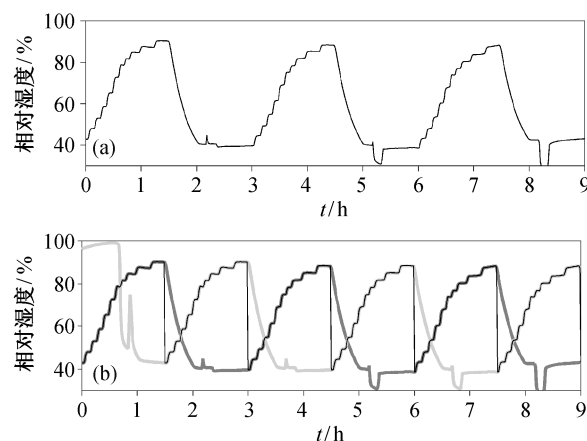


图2 加湿管结构示意图(a)及实物照片(b)  
Fig. 2 Sketch (a) and the photo (b) of humidifying tube

度最高可达 90%。

先前的加湿浊度计系统大多使用一台水浴控制加湿循环过程。在一次循环的前半个周期内,水浴在加热模式下运行,水温逐渐升高,加湿效率逐渐提升,加湿后气溶胶样气的相对湿度从约 40% 上升至约 90%。循环的后半个周期内,水浴在制冷模式下运行,水温逐渐下降,加湿效率逐渐降低,加湿后样气的相对湿度从约 90% 回降至约 40% (图 3 (a))。研究中发现,当系数处于相对湿度下降段时  $f(RH)$  测值偏差较大,故在数据分析过程中舍弃相对湿度下降段数据,仅保留上升段数据。受制于水浴制冷功率,系统无法大幅缩减相对湿度下降段耗时。因此,相对湿度下降段虽然占据了整个循环周期的近一半时间,却没有有效数据输出。

我们在设计加湿浊度计系统时,创新性地加入第二台水浴参与加湿效率控制。系统运行时,两台水浴的工作模式错开:当第一台水浴处于加热模式时,第二台水浴处于制冷模式;而当第一台水浴制冷时,第二台水浴加热。水浴一处于加热模式时,与加湿管构成回路,控制加湿管内水温逐渐升高,加湿效率提升,加湿后气溶胶样气的相对湿度从约 40% 上升至约 90%;此时水浴二处于制冷模式,且做内循环,水浴内水温降低(图 1 中用“→”指示此时水浴中水的循环方向)。当样气被加湿至阈值相对湿度后(一般为 90%),水浴一切换至制冷模式,而水浴二切换至加热模式。同时,借助电磁阀可以改变水循环管路(图 1),水浴二与加湿管连通,而水浴一做内循环。由于水浴二内水的温度已降至很低,加湿管加湿效率迅速下降,加湿后样气的相对湿度直接从 90% 跌落至 40%,之后随着水浴二加热再缓慢上升。与单水浴加湿浊度计系统相比,我们设计的新系统可将时间分辨率提高一倍,且在整个循环周期内,系统始终处于相对湿度上升段,保证了有



(a) 单水浴设计; (b) 双水浴设计, 浅灰曲线和深灰曲线分别指示水浴一或水浴二独立运行时样气的加湿效率, 黑色曲线表示两台水浴同时参与加湿效率控制时样气的相对湿度变化

图3 加湿后样气相对湿度曲线  
Fig. 3 RH cycle of humidified sample

效数据输出。

由于水温较高,加湿后样气比环境温度高。在经过加湿管与浊度计之间这一段管路时,样气温度逐渐下降。进入浊度计后,由于浊度计腔体内有热源,样气温度再次升高。因此,加湿后的样气在浊度计进气口处温度降至最低,相对湿度达到最高。为避免管路中出现过饱和凝结现象,我们在浊度计进气口处安置一枚探头,监视样气相对湿度(图 1)。

## 2 系统改进

### 2.1 降低浊度计腔体内热源的影响

我们设计的系统中使用的浊度计为 TSI 公司生产的 3563 型三波段积分浊度计。该型号浊度计的光源为卤素灯,发热严重。此外,浊度计的鼓风机、电路板等部件也会发热。测试结果表明,当浊度计流量为 13 L/min 时,腔体内的温度比进气口处气温高 4.3°C。如果流量降低,温差将进一步增大。测量干燥气溶胶的散射系数时,腔体内升温不会有任何影响。但是,当测量加湿后气溶胶的散射系数时,小幅度的升温将导致样气相对湿度大幅下降。例如,浊度计腔体内温度比进气口处高 4°C 时,样气进入浊度计后相对湿度从 90% 降至约 70%。因此,腔体内升温会严重影响高相对湿度条件下气溶胶散射系数的测量。

为了减弱浊度计腔体内升温,研究者们做过多种尝试。Carrico 等<sup>[9]</sup>将浊度计光源功率由 75 W 降至 25 W,同时移除浊度计外壳,用风扇对着浊度计

腔体外壁吹, 加快腔体散射。Fierz-Schmidhauser 等<sup>[23]</sup>在光源与浊度计腔体之间添加一片热反射镜, 削弱进入浊度计腔体的光强。我们的加湿浊度计系统中同时采用降低光源功率和添加热镜两种方法。我们使用的热镜为 ThorLabs 公司生产的 FM201 型热反射镜(图 4), 波长介于 450~645 nm 的可见光透过率高于 85%, 波长大于 750 nm 的红外光反射率超过 90%, 50%截断波长为  $720\pm 25$  nm。

我们做了室内试验, 测试降低光源功率和添加热镜的效果。测试分为两组, 分别在有无热镜情形下进行。测试初始时设定光源功率为 25 W, 3 小时后将光源功率调整为 50 W, 6 小时后调整为 75 W。测试过程中浊度计流量为 13 L/min。图 5 展示浊度计进气口处和腔体内的温度随时间的变化及两者温差的变化趋势。可以看出, 测试过程中进气口处气温基本上稳定, 其中的小幅波动是由实验室内空调周期性制冷造成的。腔体内温度随着光源功率的增强而不断上升, 与进气口处的温度差也在不断增大。在相同光源功率条件下, 添加热镜后腔室内升温减小。表 1 展示不同光源功率下及有无热镜时

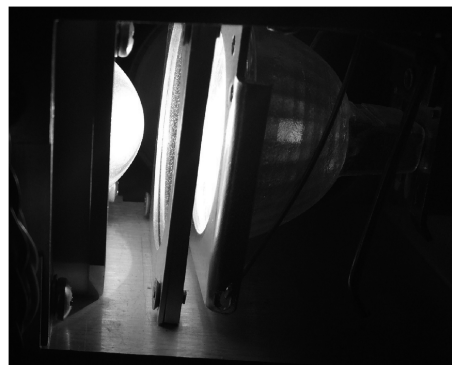


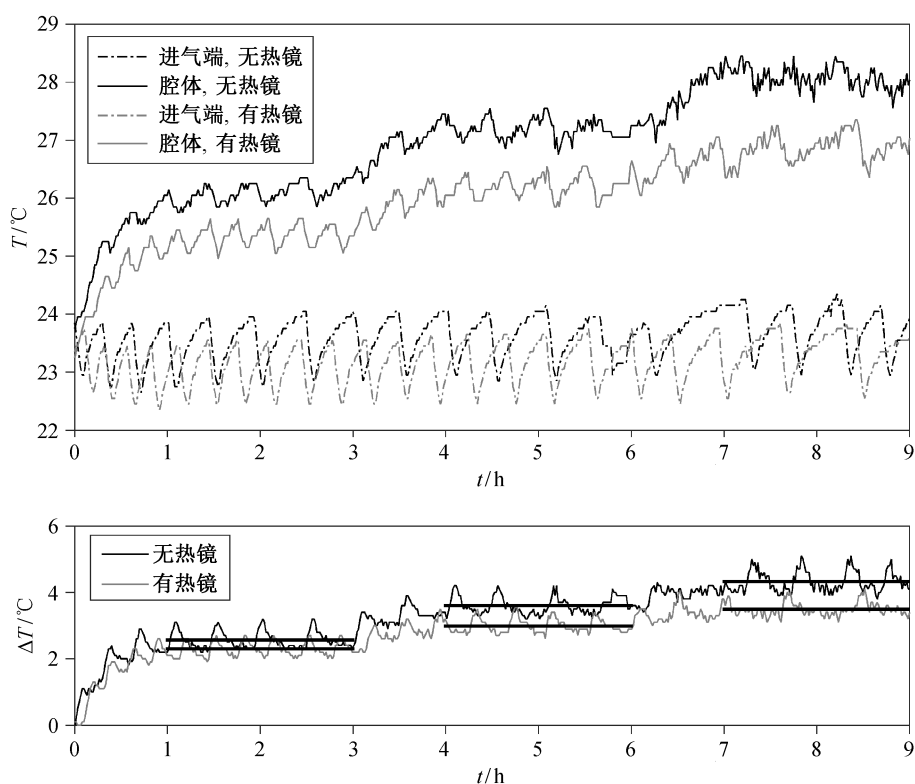
图 4 安装在光源前方的热反射镜

Fig. 4 Photo of heat mirror set in front of the halogen lamp

浊度计腔体内升温幅度。将光源功率由 75 W 调整至 25 W 以及添加热镜后, 腔体内升温由  $4.3^{\circ}\text{C}$  降低至  $2.3^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 浊度计腔体内相对湿度校正

气溶胶散射吸湿增长因子对相对湿度的敏感程度随相对湿度增大而升高。当相对湿度接近 100% 时, 相对湿度的微小变化会导致  $f(\text{RH})$  的巨大变化。因此, 精确测量浊度计腔体内的相对湿度对于



初始时光源功率为 25 W, 3 小时后调整为 50 W, 6 小时后调整为 75 W; 水平粗黑线指示两小时范围内有无热镜条件下平均升温幅度

图 5 添加热镜前后浊度计进气口处和腔体内温度及两者温度差随时间的变化

Fig. 5 Time variations of temperature at the inlet and inside the chamber, and the temperature discrepancy

表 1 不同光源功率及有无热镜时浊度计腔体内升温状况  
Table 1 Temperature rise inside the nephelometer chamber with different lamp power and with or without heat mirror

热镜	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$		
	75 W 光源	50 W 光源	25 W 光源
无	4.3	3.6	2.6
有	3.5	3.0	2.3

降低  $f(\text{RH})$  结果的不确定性至关重要。

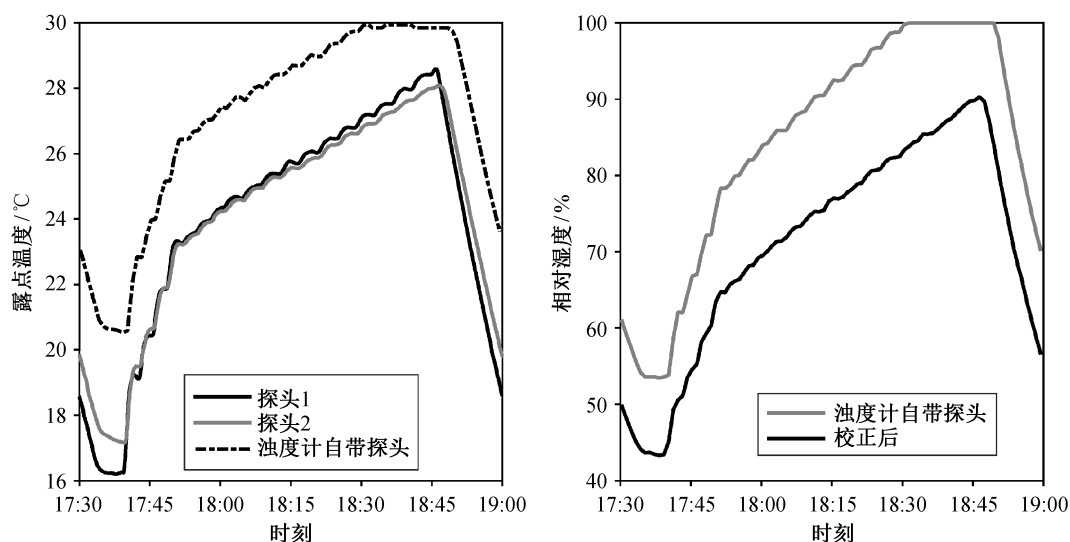
我们在搭建加湿浊度计系统过程中,发现浊度计自带的湿度探头测值不准,需要进行校正。加湿后的样气通过系统的不同位置时,由于温度变化,相对湿度会跟随变化,但露点温度是恒定的,除非有额外水汽补充或损耗。因此,可考虑在管路中其他位置测出样气的露点温度,间接算出腔体内的相对湿度。有研究者在浊度计后连接一台露点测温仪<sup>[14]</sup>,而我们在浊度计的进气口和出气口处各设置一枚 Vaisala 公司生产的 HMP110 型温湿探头(图 1)。系统运行时,两枚探头各测得一组温度值和相对湿度值,可计算进气口处和出气口处的露点温度 DP1 和 DP2。若系统运行正常,DP1 和 DP2 应相等。图 6(a)展示一次相对湿度循环内露点温度的变化,浊度计进气口处和出气口处的露点温度基本上相同,而浊度计自带探头测出的露点温度值则严重

偏高。利用 DP1 和 DP2 及浊度计腔体内的温度测值,可以得到校正后的腔体内相对湿度(图 6(b)中黑色曲线)。

### 3 结语

测量散射吸湿增长因子需要使用加湿浊度计系统。华北地区气溶胶性质复杂,日变化特征显著,而国内现有的加湿浊度计系统时间分辨率较低,仅能得到一段观测时期内的平均结果。为了研究华北地区气溶胶吸湿增长特性的日变化特征,我们在先前研究的基础上,独立设计并搭建一套高时间分辨率的加湿浊度计系统。该系统使用两台水浴交替控制加湿过程,显著提高了时间分辨率。另外还通过降低光源功率以及在光源前方添加热镜等方式,有效地降低了浊度计腔体内升温幅度,提升了加湿效率。与国内已有的加湿浊度计系统相比,该系统在时间分辨率和加湿效率方面具有显著优势。

该系统仍有较大的改进空间。TSI3563 型浊度计腔体较大,圆柱形腔体的直径为 10 cm,长度约为 90 cm,体积约为 4.7 L,与每分钟样气的流量相当。若加湿过程中样气的相对湿度变化过快,腔体内的相对湿度和温度会不均匀,影响散射吸湿增长因子的测量精度。由于该型号浊度计的腔体较大,限制了进一步提升时间分辨率的可能性。此外,该系统不能通过继续降低光源功率的方式来降低腔体



(a) 额外安置的两枚探头及浊度计自带的探头算出的露点温度; (b) 校正前后的相对湿度

图 6 利用温湿探头校正浊度计腔体内相对湿度

Fig. 6 Illustration of RH correction inside the chamber with extra RH/T sensors

内的升温,进而无法进一步提高加湿效率。若继续降低光源功率,光强降低的同时,光谱峰值向长波方向移动,将导致散射系数测值(特别是 450 nm 波长条件下)的不确定度大大增加。

EcoTech 公司生产的 Aurora3000 型三波段浊度计采用 LED 灯做光源,几乎不产热,且腔体体积小,能够很好地弥补以上两点劣势。今后我们将尝试使用 Aurora3000 型浊度计搭建一套新的加湿浊度计系统,并进一步提升时间分辨率。

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. New York: Cambridge University Press, 2013
- [2] WMO/GAW, No. 153 [R]. Geneva: World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch, 2003
- [3] Schwartz S E. The whitehouse effect — shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: an overview. *Journal of Aerosol Science*, 1996, 27(3): 359–382
- [4] Wang J, Martin S T. Satellite characterization of urban aerosols: importance of including hygroscopicity and mixing state in the retrieval algorithms. *J Geophys Res-Atmos*, 2007, 112(D17): DOI: 10.1029/2006JD008078
- [5] Esteve A R, Ogren J A, Sheridan P J, et al. Sources of discrepancy between aerosol optical depth obtained from AERONET and in-situ aircraft profiles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(6): 2987–3003
- [6] Zieger P, Weingartner E, Henzing J, et al. Comparison of ambient aerosol extinction coefficients obtained from in-situ, MAX-DOAS and LIDAR measurements at Cabauw. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(6): 2603–2624
- [7] Covert D S, Charlson R J, Ahlquist N C. A study of the relationship of chemical composition and humidity to light scattering by aerosols. *J Appl Meteorol*, 1972, 11(6): 968–976
- [8] Carrico C M, Rood M J, Ogren J A. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the first aerosol characterization experiment (ACE 1). *J Geophys Res-Atmos*, 1998, 103(D13): 16565–16574
- [9] Carrico C M, Kus P, Rood M J, et al. Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: radiative properties as a function of relative humidity. *J Geophys Res-Atmos*, 2003, 108(D23): DOI: 10.1029/2003JD003405
- [10] LI-Jones X, Maring H B, Prospero J M. Effect of relative humidity on light scattering by mineral dust aerosol as measured in the marine boundary layer over the tropical Atlantic Ocean. *J Geophys Res-Atmos*, 1998, 103(D23): 31113–31121
- [11] Day D E, Malm W C. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: a comparison between measurements made at three different sites. *Atmos Environ*, 2001, 35(30): 5169–5176
- [12] Carrico C M, Rood M J, Ogren J A, et al. Aerosol optical properties at Sagres, Portugal during ACE-2. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2000, 52(2): 694–715
- [13] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity. *Atmos Environ*, 2001, 35(16): 2845–2860
- [14] Koloutsou-Vakakis S, Carrico C M, Kus P, et al. Aerosol properties at a midlatitude Northern Hemisphere continental site. *J Geophys Res-Atmos*, 2001, 106(D3): 3019–3032
- [15] Gasso S, Hegg D A, Covert D S, et al. Influence of humidity on the aerosol scattering coefficient and its effect on the upwelling radiance during ACE-2. *Tellus Ser B — Chem Phys Meteorol*, 2000, 52(2): 546–567
- [16] Kotchenruther R A, Hobbs P V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *J Geophys Res-Atmos*, 1998, 103(D24): 32081–32089
- [17] 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究. *气象学报*, 2008, 66(1): 111–119
- [18] Pan X L, Yan P, Tang J, et al. Observational study of influence of aerosol hygroscopic growth on scattering coefficient over rural area near Beijing mega-city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(19): 7519–7530
- [19] Yan P, Pan X L, Tang J, et al. Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient: a comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing. *Particuology*, 2009, 7(1): 52–60
- [20] Liu P F, Zhao C S, Bel T G, et al. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(7): 3479–3494
- [21] 马楠. 华北地区气溶胶光学和活化特性研究[D]. 北京: 北京大学, 2012
- [22] Kuang Y, Zhao C S, Tao J C, et al. Diurnal variations of aerosol optical properties in the North China Plain and their influences on the estimates of direct aerosol radiative effect. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(10): 5761–5772
- [23] Fierz-Schmidhauser R, Zieger P, Wehrle G, et al. Measurement of relative humidity dependent light scattering of aerosols. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3(1): 39–50