

北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究^{*}

颜 鹏^{1,2} 潘小乐¹ 汤 洁¹ 周秀骥¹ 曾立民³
YAN Peng^{1,2} PAN Xiaole¹ TANG Jie¹ ZHOU Xiuji¹ ZENG Limin³

1. 中国气象科学研究院,北京,100081

2. 北京大学大气科学系,北京,100871

3. 北京大学环境学院,北京,100871

1. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China

2. Atmospheric Department, Peking University, Beijing 1000871, China

3. College of Environmental Science, Peking University, Beijing 1000871, China

2007-01-31 收稿,2007-04-06 改回.

Yan Peng, Pan Xiaole, Tang Jie, Zhou Xiuji, Zeng Limin. 2008. An experimental study on the influence of relative humidity on the atmospheric aerosol scattering coefficient at an urban site in Beijing. Acta Meteorologica Sinica, 66(1):111-119

Abstract The humidity-controlled aerosol measurement system is developed to study the hygroscopic properties of aerosols. The system includes a humidity-controlled inlet to humidify the sample air, and two nephelometers to simultaneously measure the aerosol scattering coefficients under “dry” and “wet” conditions. During the measurement, the air passes through the inlet and are humidified by the water vapor diffusing through the wall of the membrane tube. The method used to adjust the amount of water vapor, was called the “combination of water vapor addition and/or thermal control” method, which is realized by controlling the temperature of water out of the membrane tube. Using this system, the experimental study on the hygroscopic growth of aerosol scattering coefficients at an urban site (CAMS) in Beijing city was conducted from December 7 to 22, 2005. The instrument was installed on the roof of a building on the campus of Chinese Meteorological Administration in the northwest of Beijing urban area, so that the inlet of the instrument was about 50 m above the ground. The preliminary analysis of the measurements indicate that: overall, the hygroscopic growth factor of the scattering coefficient $f(U)$ increased continuously when the U increased. the average growth factor $f(U)$ of the aerosols for the whole measurement period could reach to 2.1 when U increased from less than 40% to 93%. The average hygroscopic growth factor at relative humidity of 80%, $f(U=80\% \pm 1\%)$, was about 1.26 ± 0.15 . Further calculation shows that the hygroscopic growth factor $f(U)$ was relatively higher when the air was relatively polluted, where, the $f(U)$ at $U=80\%$ was about 1.48, however, when the air was clean, the growth factor $f(U)$ at $U=80\%$ was about 1.2. The growth factor $f(U)$ for relatively polluted case was lower than the result reported by Carrico (Carrico et al., 2003), where the $f(U=82\%)$ was 2.22 ± 0.20 for polluted aerosol type during the Ace-Asia experiment, but the behavior of the hygroscopic growth under clean air conditions was similar to those influenced by burning biomass or blowing dust as reported (Carrico et al. 2003; Kotchenruther et al, 1998). These results reflect the different characteristics of aerosol types at Beijing urban area under the different air conditions in the winter.

Key words Humidifier, Aerosol scattering coefficient, Hygroscopic growth factor

摘 要 利用自制的“进样气流湿度调节”装置,2005年12月7—22日在中国气象局科技大楼测点(记为CAMS)对北京市区冬季气溶胶散射系数随湿度的变化关系进行了观测试验,结果显示,观测期间北京市区气溶胶散射系数亲水增长因子 $f(U)$

^{*} 资助课题:中国气象局气候专项(CCSF2005-3-DH03),科技部公益项目“我国大陆大气本底基准研究”(G99-A-08)、国家自然科学基金重大国际合作项目“我国东部大气气溶胶理化和光学特性观测研究”项目(49899270)。

作者简介:颜鹏,从事大气物理和大气环境方面的观测研究和数值模拟,近年来主要研究大气气溶胶及其辐射效应,以及气溶胶与云的相互作用等。E-mail: yanpeng@cams.cma.gov.cn

(定义为一定湿度下的气溶胶散射系数与“干”气溶胶散射系数的比值)在湿度从低到高的变化过程中,主要表现出“平滑连续”的增长特点。总体上,当相对湿度(U)从小于40%增大到93%左右时,平均气溶胶散射系数亲水增长因子可达2.10,而平均散射系数亲水增长因子 $f(U=80\% \pm 1\%)$ 为 1.26 ± 0.15 。按照污染情况把观测期间划分为“相对污染”时段和“清洁”时段,则在“相对污染”情况时,北京市区CAMS测点的气溶胶散射系数增长因子 $f(U=80\%)$ 大约为1.48,而在“清洁”时段约为1.2。与国外有关观测相比,北京冬季“清洁”时段气溶胶的散射系数亲水增长因子 $f(U=80\%)$ 在数值上与生物质燃烧型和扬尘类型气溶胶的亲水增长相似。反映了在不同天气背景下北京市区的气溶胶类型有不同的特点。

关键词 湿度调节装置,气溶胶散射系数,亲水增长因子

中图法分类号 P402

1 引言

大气气溶胶通过散射和吸收辐射直接影响地球大气辐射平衡,通过影响云的光学特性和云的寿命间接影响地球辐射平衡。气溶胶对大气的辐射强迫可以是正的或负的,这依赖于气溶胶的光学特性、云况和地表的反照率(Chylek, et al., 1974)。气溶胶光学特性是由气溶胶的化学成分、粒子大小、形状和混合状态决定的,而这些性质都与大气的湿度有关(Pilinis, et al., 1995)。气溶胶的亲水特性影响颗粒物的尺度分布和折射指数,从而影响气溶胶的辐射性质。气溶胶对辐射的散射是重要的气溶胶光学特性之一,它是对流层大气气溶胶辐射强迫的主要部分,也是造成环境大气能见度降低的主要原因。空气湿度对气溶胶的散射系数有很大的影响,随着湿度的增加,气溶胶(尤其是细粒子)中具有亲水性的化学成分(如硫酸盐、硝酸盐、和一些有机物等)会吸湿长大,从而增加颗粒物的散射能力,影响气溶胶的单次散射反照率。如在90%的相对湿度下,硫酸铵气溶胶的散射截面相比于干气溶胶,可增加5倍以上(Malm, et al., 2001)。气溶胶的亲水增长可以是随湿度“连续平滑”的变化,也可以是“跳跃”式的变化(Carrico, et al., 2003)。对于“跳跃”式的变化,气溶胶的“潮解点(Deliquescence)”或“结晶点(Crystallization)”相对湿度(Deliquescence Relative Humidity 或 Crystallization Relative Humidity)决定了气溶胶是以“干”气溶胶还是“湿”气溶胶存在于大气中(当环境湿度在“潮解点”或“结晶点”以上,可视为“湿”气溶胶),从而大大影响气溶胶的辐射特性以及气溶胶在非均相化学中的作用(Chameides, et al., 1998)。

空气湿度对大气气溶胶散射系数的影响通常用干、湿气溶胶的散射系数比(称为气溶胶散射系数亲水增长函数),或用气溶胶散射系数亲水增长因子

(定义为某个相对湿度下,如 $U=80\%$ 的亲水增长函数数值来表征。散射系数亲水增长函数定义为

$$f(U) = \sigma_{\text{scat}}(U) / \sigma_{\text{scat}}(\text{dry}) \quad (1)$$

其中, $\sigma_{\text{scat}}(\text{dry})$ 和 $\sigma_{\text{scat}}(U)$ 分别表示气溶胶在“干”和相对湿度 U 时的散射系数。在实际测量中,通常用相对湿度 $U < 40\%$ 作为“干”气溶胶情况(Xu, et al., 2002)。

气溶胶散射系数亲水增长因子是估算气溶胶直接辐射效应的重要参数,也是气溶胶辐射强迫估算中一个重要的不确定性来源(IPCC, 2001)。

对气溶胶散射系数亲水增长因子的测量已有几十年的历史(Covert, et al., 1972; Kus, et al., 2004)。实验方法上也有很多种,如用两台浊度仪同时测量“干”大气条件和环境大气湿度条件下的散射系数,称之为“被动”方法(Li-Jlnes, et al., 1998; Gassó, et al., 2000; Bergin, et al., 2001);通过“稀释/混和”的方法控制相对湿度方法(Covert, et al., 1972; Rood, et al., 1985);“水汽加入结合加热控制”的方法(Malm, et al., 2001, 2005; Carrico, et al., 1998, 2003; Kotchenruther, et al., 1999; Day, et al., 2001; Sheridan, et al., 2001)。所研究气溶胶类型也是多种多样,如海洋背景(Background marine)大气气溶胶类型(Carrico, et al., 1998);生物燃烧类型(Biomass smoke)(Kotchenruther, et al., 1998);美国国家公园一类地区(Class I National Park)(Malm, et al., 2001, 2005);矿物沙尘型气溶胶(Mineral dust)(Carrico, et al., 2003; Li-Jones, et al., 1998);以及污染的城市地区(Rood, et al., 1987)和大陆乡村地区气溶胶等(Xu, et al., 2002; Koloutsou-Vakakis, et al., 2001)。Saxena(1995)基于模式分析美国大峡谷国家公园等地的观测结果,认为气溶胶中不同有机成分的类型和在大气中的氧化状况对气溶胶的亲水性有不同的影响。

在中国,虽然近年来对气溶胶的辐射特性以及气溶胶与能见度的关系开展了一些研究(毛节泰等, 2002, 2005; 王京丽等, 2006; Wu, et al., 2007),但对湿度影响气溶胶辐射特性的研究还不多。有限的研究基本上都是在一些假设下用经验公式或简单的理论模型由计算间接获得的(张立盛等, 2002; 杨军等, 1999),与实际大气气溶胶的亲水特性还有很大的差别。

本文报告了利用自制的湿度控制调节装置对北京市区测点的散射系数及其随湿度变化的测量结果,研究了不同污染情况下大气气溶胶散射系数随湿度的变化关系。

2 湿度控制调节装置

参考美国海洋大气局气候诊断实验室 NOAA/CMDL(现为 NOAA/GMD)在大气本底站点测量气溶胶湿度影响时对湿度的控制调节方法(<http://www.cmdl.noaa.gov/aero/instrumentation/humid.html>),本工作采用的进样气流湿度调节方法是属于“水汽加入结合加热控制”的方法(Malm, et al., 2001; Carrico, et al., 2003; Carrico, et al., 1998; Kotchenruther, et al., 1999; Day, et al., 2001; Sheridan, et al., 2001; Malm, et al., 2005)(图 1)。其对进样气流相对湿度调节是利用水汽渗透管选择性透过的特性,通过调节水温控制渗透管内进样气流湿度。本工作目前对水温的控制是通过人工调节“水浴”加热层的功率实现的。试验

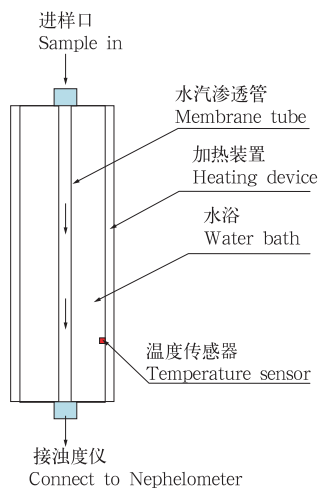


图 1 进样口湿度调节装置示意图

Fig. 1 Structure of the “humidity control” inlet system

表明,该湿度调节装置调节的相对湿度可达到 90% 以上。

3 仪器和质量控制

本工作采用两台浊度仪、两个进气管进行同步测量。其中一台浊度仪在观测过程中一直保持在“干”的条件下测量,另一台浊度仪在其进气管前端通过上述湿度调节装置调节进样气流的湿度(图 2)。

测量散射系数的浊度仪采用由澳大利亚 ECOTech 公司生产的 M9003 积分浊度仪(M9003, ECOTech, Australia)。该浊度仪是一种针对环境监测设计的低维护费用的气溶胶散射测量仪器,其光源采用超长寿命且稳定的发光二极管阵列 LED,波长 525 nm。该仪器光学和电子背景噪音很低,其测量范围为 0—2000 M/m,最低检测限小于 0.5 M/m(低于空气分子 Rayleigh 散射的 10%)。仪器具有完全自动的标定程序,可自动进行零/跨点(Zero/Span)检查。仪器装备内置的温度、压力、相对湿度测量,其可选择的加热进气管可控制湿度在一定的相对湿度以下测量。

试验中浊度仪数据记录每 5 min 一个,由计算机采样软件自动记录。仪器每日定时用两重过滤的不含颗粒物的“干净”空气进行零点检查。仪器标定一般每 3 d 由现场值班操作人员手工进行。标准气采用由厂家推荐的已知散射系数的气体(本观测采用 R134a 作为校准用标准气)。

散射系数亲水增长试验通过对一台浊度仪控制相对湿度从低到高的变化,另一台一直保持在“干”的条件($U < 40\%$)同步测量,散射系数增长函数由式(1)计算并经过归一化处理得到。仪器测量腔体内的温度和相对湿度由浊度仪自身配置的温度、湿度传感器测量。其中“干”气溶胶散射系数测量是通过浊度仪自带的加热进气管控制相对湿度 $U < 40\%$ 。

限于条件,本工作没有对两台浊度仪的相对湿度传感器进行多点标定,但为了检查其测量的准确性,我们用两台浊度仪和 Vaisala 温、湿度传感器(Vaisala HMP41/45, Finland)在室内稳定温度、湿度环境下进行了同步对比测量,并考虑了浊度仪内部由于仪器运行中生热造成的测量腔体温度与室内环境温度差别的订正。对比结果显示,测量的相对湿度差别都不超过 3%,在湿度传感器的测量精度范围内。

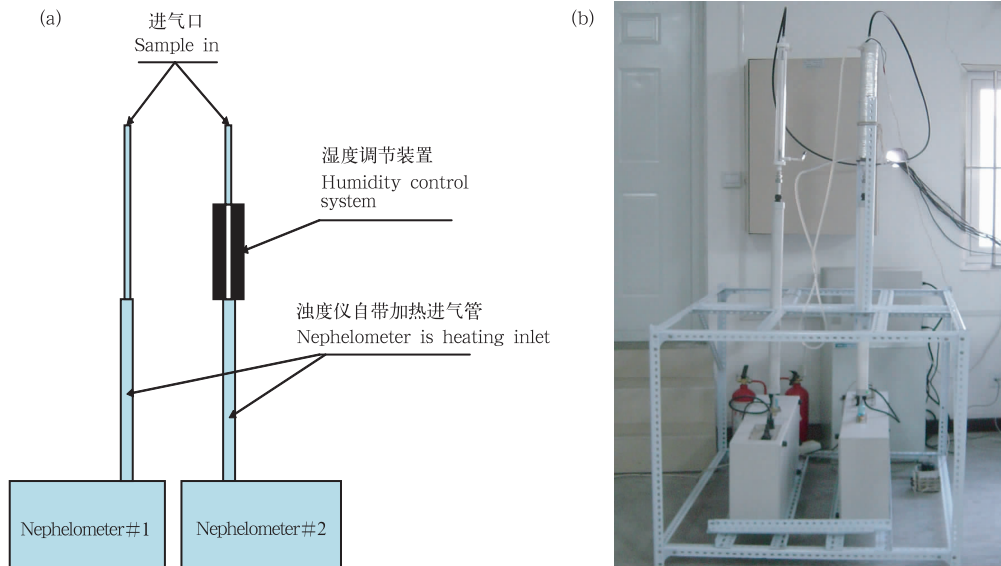


图2 测量系统图

(a. 测量系统示意图, b. 本文测量仪器现场工作照片)

Fig. 2 Schematic map (a) and working picture (b) of the measurement system

4 试验地点

2005年12月7—22日,试验在北京市海淀区中国气象局科技大楼楼顶(记为CAMS, $39^{\circ}56'N$, $116^{\circ}24'E$ 距地面大约50 m高度)进行。该测点位于北京市城区的西北部,周边地区以办公、居民生活为主,测点环境的局地影响主要来自居民生活和交通污染。冬季受冷空气影响,测点主要受西北气流控制,空气质量较好,此时测点气溶胶主要体现了来自西北(或偏北)地区气溶胶的特点;而当地面为偏东风影响时,来自城区和北京市区东部污染物影响测点,观测的气溶胶主要反映了来自城市人为污染的气溶胶特点。

5 分析和讨论

5.1 散射系数时间序列及测点空气质量状况

图3是测点在观测期间“干”气溶胶的散射系数5 min观测结果。从散射系数时间序列看出,观测期间可以明显区分出散射系数较低时段和较高时段。其中2005年12月7—10日(DOY: 341—344)、2005年12月17—20日(DOY: 351—354)为相对污染时段,而2005年12月10—17日(DOY: 344—351)、2005年12月20—21日(DOY: 354—355)为相对清洁时段。从地面风(图3和表1)的变化也可

以明显看出,在两个污染时段,地面风速较小,风向主要为偏东来向,有时出现偏南风,由于CAMS测点位于北京市的西北部,来自城市中心地区以及市区东部的污染将影响测点,造成测点污染指数较高,散射系数很高。而对应清洁时段,地面风主要为偏北和偏西北风,位于北京市区西北部的CAMS观测点主要受来自其西北郊区农村的清洁气团影响。同时西北风也把当地的污染吹走,导致该时段空气质

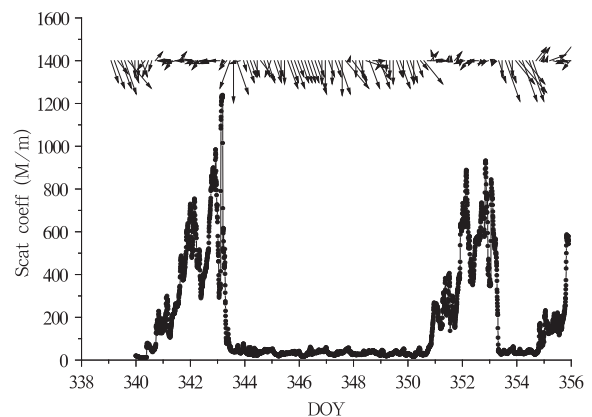


图3 CAMS测点“干”气溶胶散射系数5 min记录的时间序列(DOY表示1年中的日数)

Fig. 3 The 5 minute time series of aerosol scattering coefficients at CAMS site ($39^{\circ}56'N$, $116^{\circ}24'E$) under “dry” conditions

表1 2005年不同时段气象要素和气溶胶平均状况

Table 1 Average states of the meteorological variables and atmospheric aerosols during various time periods, 2005

时段	平均空气污染指数(API)	主导风向 / 风速	平均散射系数 (标准差)(M/m)
12月7日 12:00 —10日 12:00	97.3	E/1.9 m/s	394.9 (266.6)
12月10日 12:00 —17日 12:00	48.2	NNW/3.8 m/s	33.5 (9.8)
12月17日 12:00 —20日 12:00	106.7	ENE/1.8 m/s	366.1 (245.7)
12月20日 12:00 —21日 12:00	57.0	NNW/5.7 m/s	36.8 (7.0)

注:API为50—100,空气质量为良;API为100—150,空气质量为轻微污染。

量良好,散射系数很低。各个时段的北京市空气质量污染指数API、地面风向风速和对应时段的平均散射系数统计结果见表1。

从表1可以看出,北京市空气污染状况和气溶胶散射系数与地面风关系密切。在12月10—17日、12月20—21日两个时段,测点受持续偏北气流控制,北京市区空气清新,空气质量优良,观测的空气污染指数API和散射系数都很低;而在12月7—10日,以及12月17—20日受偏东风影响,且风速较小,空气质量呈轻微污染,空气污染指数和散射系数都较高。上述分析说明,对应这几个不同时段,北京市气溶胶的浓度水平不同,其来源也是各有不同的。

5.2 散射系数随湿度的变化关系

图4为观测期间获得的气溶胶散射系数与相对湿度的关系 $f(U)$ 。由于仪器还不能监控湿度过大时是否有凝结水出现,故图中只给出湿度 $U < 93\%$ 的观测结果。

从图4可以看出,在整个观测期间测量的散射系数亲水增长函数 $f(U)$ 随湿度的变化曲线基本呈连续平滑增长,没有明显的“跳跃”点出现。由于两台浊度仪存在一定的偏差(小于5%),为订正这种偏差,我们按照Day(2001)的方法,对测量的散射系数进行归一化处理,即在相对湿度 $< 35\%$ 时,令其平均湿度增长函数值为1,由此算出订正系数。表2是经过订正后得到的不同湿度下平均湿度增长因子。总体上看,当湿度低于50%时,散射系数亲水增长因子 $f(U)$ 增长很小,数值基本在1左右;当相对湿度超过60%以后, $f(U)$ 开始增加;而当湿度增加到约90%以上时, $f(U)$ 增长很快,且变化较大,

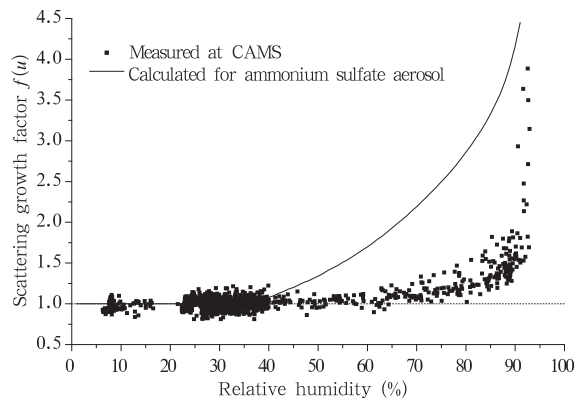


图4 CAMS测点测量的气溶胶散射系数随湿度的变化曲线($U < 93\%$)

(实线为美国能见度监测网(IMPROVE)根据硫酸铵气溶胶计算的散射系数亲水增长)

Fig. 4 Variations of aerosol scattering coefficient growth factor with relative humidity ($U < 93\%$) at CAMS site

(The solid line indicates the calculated growth factor for ammonium sulfate given by IMPROVE, USA)

表2 经过归一化订正后测点不同湿度下散射系数平均亲水增长因子

Table 2 Normalized average hygroscopic growth factor of aerosol scattering coefficients at different relative humidities

U (%)	Mean U (%)	$f(U)$
20—25	23.5	1.00
25—30	27.9	1.01
30—35	32.3	1.02
35—40	37.2	1.02
40—45	42.7	1.05
45—50	47.7	1.03
50—55	53.0	1.06
55—60	57.7	1.07
60—65	63.1	1.08
65—70	67.6	1.13
70—75	72.1	1.17
75—80	77.7	1.24
80—85	83.1	1.33
85—90	87.9	1.48
> 90	92.9	2.10

$f(U)$ 有时最高可超过3.5。与美国IMPROVE计算的硫酸铵气溶胶亲水增长相比,CAMS测点测量的 $f(U)$ 还是明显偏低的。这也说明用硫酸铵的亲水增长函数对北京市区实际大气气溶胶散射系数进行湿度订正是不适用的。作为参考,表3给出了Day等(2001)在美国3个乡村地区观测的结果,3个测点分别为Great Smoky Mountain(记为GSM)、Grand Canyon(GC)和Big Bend(BB)国家公园。从

表3 美国3个乡村地区测量的结果(Day, et al., 2001)

Table 3 Hygroscopic growth factors of aerosol scattering coefficients measured at three rural sites in USA

U (%)	GSM		GC		BB	
	Mean U (%)	$f(U)$	Mean U (%)	$f(U)$	Mean U (%)	$f(U)$
20—25	22.8	1.06	22.2	1.01	22.8	1
25—30	27.2	1.11	27.5	1.01	27.6	1
30—35	32.6	1.16	32.6	1.03	32.0	1.02
35—40	37.8	1.21	37.4	1.04	37.3	1.06
40—45	42.5	1.22	42.7	1.07	42.5	1.09
45—50	47.1	1.27	47.3	1.06	47.4	1.13
50—55	52.1	1.33	52.6	1.14	52.5	1.18
55—60	57.6	1.38	57.4	1.18	57.4	1.24
60—65	62.8	1.45	62.4	1.23	62.5	1.33
65—70	67.9	1.55	67.6	1.34	67.6	1.44
70—75	72.3	1.65	72.5	1.55	72.4	1.62
75—80	78.0	1.83	77.4	1.74	77.6	1.79
80—85	82.8	2.1	82.3	2.04	82.5	2.07
85—90	87.4	2.46	87.6	2.51	87.5	2.58
>90	93.3	3.17	92.2	2.66	92.1	3.19

对比结果看,在湿度超过 65%,Day 等的结果比本试验得到的值平均高出 1.5 倍左右。

由于本次试验缺少对应的气溶胶化学成分观测,还无法根据气溶胶化学性质来分析我们的观测与 Day(2001)的观测之间的相似性和差异点。但我们还是根据文献报道的部分气溶胶化学成分数据,对北京和美国 GSM、GC 及 BB 几个地区细粒子中的化学成分进行了比较。据对北京大气气溶胶的观测研究(Zhang, et al., 2002; 张仁健等,2002),冬季采暖期煤炭燃烧、汽车排放和扬尘是北京气溶胶的主要来源。由于土壤扬尘等通常具有较低的亲水增长能力(Malm, et al., 1994),因此北京冬季较多的扬尘是造成观测的较低散射系数亲水增长因子的一个原因。另一方面,从文献报道的北京与上述美国几个测点的气溶胶中化学成分的比较发现,气溶胶中硫酸盐含量的差别可能是造成北京较低气溶胶亲水增长因子的另一个原因。根据 Malm 等(2001)提出的方法计算的 GSM、GC、BB 和北京市区冬季的硫酸铵或氨化硫酸盐(ammoniated sulfate)占细粒子质量的百分比发现,GSM、GC 和 BB 测点硫酸铵(或氨化硫酸盐)与细粒子的比值大约为 31%—63%(Malm, et al., 2001, 2005),而北京市区冬季的许多观测结果显示硫酸铵(或氨化硫酸盐)与细粒子的比值基本只有 16%—28%(He, et al., 2001; Sun, et al., 2004)。由于硫酸盐具有较强的亲水增长能力,因此北京冬季细粒子中较低的硫酸铵(或

氨化硫酸盐)含量,可能是造成观测的 $f(U)$ 偏低的另一个重要原因。

一些研究通常用 U 在 80% 时的散射系数亲水增长因子 $f(U=80\%)$ 来表征不同气溶胶类型的亲水增长能力(Hegg, et al., 1993)。如 Xu 等(2002) 1999 年 11 月在长江三角洲地区临安区域大气本底监测站观测的 $f(U=80\% \pm 1\%)$ 为 1.7—2.0; Kotchenruther 等(1998)在巴西测得的生物质燃烧类型气溶胶的 $f(U=80\%)$ 为 1.16; Carirco 等(2003)在 ACE-Asia 期间对主要是沙尘气溶胶的测量结果为 $f(U=82\%)$ 为 1.18(粒径 $D_p < 10 \mu\text{m}$)。本文计算得到的北京市区(CAMS)的 $f(U=80\% \pm 1\%)$ 为 1.26 (0.15)。该值明显低于 Xu 等(2002)1999 年 11 月在临安的结果,但比巴西生物质燃烧期间和 ACE-Asia 在主要是沙尘气溶胶影响时观测的亲水增长因子略高。这也反映了北京市区在观测期间的气溶胶性质与长江三角洲地区背景点有所不同。

5.3 不同污染时段的气溶胶亲水增长曲线

气溶胶的亲水特性是由气溶胶中的化学成分决定的。由于不同的气溶胶来源其尺度分布和化学成分都有不同,故其散射系数随湿度的变化也有不同的特点。图 5 给出了 CAMS 测点在“相对污染”和“清洁”时段气溶胶散射系数随湿度的变化曲线。

从图中可以看出,在“污染”条件下的散射系数亲水增长比“清洁”条件下的明显增大,说明污染情

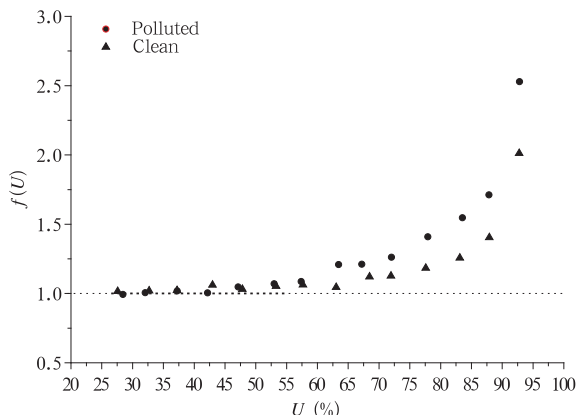


图 5 CAMS 测点污染和清洁情况下散射系数亲水增长关系

Fig. 5 Average hygroscopic growth factors of aerosol scattering coefficients vs. U under "polluted" and "clean" conditions measured at CAMS site

况时气溶胶中的亲水性成分含量相对较高。事实上,清洁情况下,冬季 CAMS 测点都是 N—NW 风为主,且天气晴好,CAMS 测点位于北京市区的西北部,城区的污染不会影响测点,此时测点的结果主要反映了来自城市上游相对清洁地区气团的影响,气溶胶主要来源可能以生物质燃烧和扬尘影响较大。因此,在清洁情况下 CAMS 测点观测的 $f(U)$ 值都较低。而在相对较污染情况时,根据前面对测点低层风的分析,测点气溶胶主要受来自市区的排放影响,城市污染气溶胶中人为污染的成分,如硫酸盐、硝酸盐含量相对较高,因此其散射系数亲水增长因子也较大。要弄清这种气溶胶散射系数随湿度不同变化曲线的原因,还需要结合气溶胶化学成分及其尺度分布特点作进一步的研究。在“清洁”和“污染”情况下测得的归一化散射系数亲水增长因子 $f(U=80\% \pm 1\%)$ 分别为 1.20(清洁时)和 1.48(污染时)。作为比较,这里也给出了 Carrico 等(2003)在 ACE-Asia 期间得到的海洋型、污染型、沙尘型和火山气溶胶等几类型的气溶胶($D_p < 10 \mu\text{m}$)散射系数的亲水增长因子,以及在巴西观测的生物燃烧为主时的值(Kotchenruther, et al., 1998)。其中,ACE-Asia 期间不同类型气溶胶(粒径 $D_p < 10 \mu\text{m}$)的亲水增长因子 $f(U=82\%)$ 分别为:海洋型 2.45 ± 0.27 ,污染型为 2.22 ± 0.20 ,沙尘型为 1.18,火山型为 2.55 ± 0.22 (Carrico, et al., 2003)。在巴西测得的生物质燃烧型气溶胶亲水增长因子为 $f(U$

$=80\%$)约为 1.16(Kotchenruther, et al., 1998)。从这些数值的对比可以看出,本试验得到冬季北京市区(CAMS 测点)气溶胶的亲水增长因子在污染情况下比 Carrico 等(2003)的观测结果明显偏低,但在清洁大气条件下,气溶胶亲水增长因子与生物质燃烧型和沙尘型的结果更接近。

进一步,根据图 5 的结果,参考美国 IMPROVE(美国能见度监测网)对散射系数亲水增长因子 $f(U)$ 的拟合公式(<http://vista.cira.colostate.edu/improve/tools/reconbext.htm>),对观测期间北京 CAMS 测点“污染”和“清洁”情况下的 $f(U)$ 进行了拟合。所采用的拟合公式形式为

$$f(U) = b_0 + b_1(1-U)^{-1} + b_2(1-U)^{-2} \quad (2)$$

拟合得到的各个项的系数见表 4。

表 4 散射系数亲水增长拟合公式的有关参数(CAMS)

Table 4 Parameters for the regression formula of the hygroscopic growth factors of aerosol scattering coefficients(CAMS)

类 型	b_0	b_1	b_2	R^2/N (样本数)
污染型	0.8513	0.1021	0.0009	0.993/14
清洁型	0.9832	0.0243	0.0036	0.996/14
IMPROVE 网:				
年平均	0.3371	0.5860	0.0916	0.93

从表 4 的各个系数与 IMPROVE 网采用的年平均湿度订正公式的系数对比可以看出,CAMS 测点的 $f(U)$ 随相对湿度的增长要低于 IMPROVE 监测网得到的结果,这也反映了北京测点气溶胶亲水性性质与美国 IMPROVE 监测地区有较明显的差别。

5.4 不确定性来源

虽然各种湿度控制调节方法在许多研究中广泛使用,但对这些测量方法本身所带来的误差目前研究的并不多。用“水汽加入结合加热控制”的湿度调节方法由于测量系统的加热(包括浊度仪自身运行产生的加热)造成半挥发性气溶胶的损失是用浊度仪测量气溶胶散射系数及散射系数亲水增长的一个重要不确定性来源(Carrico, et al., 2003; Kus, et al., 2004)。这种加热损失的大小与测量时的温度、气溶胶性质,以及气溶胶暴露在加热环境的时间有关。系统的另一个不确定性来源是系统对相对湿度的测量,由于在高相对湿度时 $f(U)$ 变化很快,因此湿度测量较小的偏差也会带来 $f(U)$ 的测量有较

大的不确定性。对各类湿度调节控制系统测量中的不确定性进行定量评估,也是当前测量空气湿度对气溶胶光学特性影响的重要课题。

6 结 论

(1) 本工作制作的湿度调节装置能够在较大湿度范围内控制湿度的变化,并在现场试验中得到较好的应用。

(2) 观测期间,北京 CAMS 测点散射系数亲水增长因子 $f(U)$ 在湿度从低到高的变化过程中,主要表现出“平滑连续”的增长特点。平均而言,当湿度从 $<40\%$ 增大到约 93% 时, $f(U)$ 可达 2.10。

(3) 现场观测表明,北京市区冬季气溶胶散射系数随湿度的变化,在污染情况时较高,而在清洁情况时较小,且数值上表现出类似生物质燃烧和扬尘类型的气溶胶亲水增长特点。

需要说明的是,上述结果主要反映的还是观测期间测点气溶胶散射系数随湿度变化的一些平均特性,由于本次试验缺少现场气溶胶化学成分和尺度分布的观测,因此对形成这种观测结果的原因还不能给出满意的解释。要深入研究中国不同地区气溶胶光学特性随湿度的变化规律,有必要进一步结合气溶胶理化特性观测和气溶胶来源分析,开展气溶胶长期、综合的观测试验。

致谢:感谢美国 NOAA/CMDL Dr. Pat Sherridan 在制作湿度调节控制装置中提供的大力帮助。

Reference

- Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. 1999. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June, 2001. *J Geophys Res*, 106: 17969-1798
- Carrico C M, Kus P, Rood M J, et al. 2003. Mixture of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity. *J Geophys Res*, 108(D23), 8650, Doi:10.1029/2003JD003405
- Carrico C M, Rood M J, Ogren J A. 1998. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE-1). *J Geophys Res*, 103: 16565-16574
- Chameides W L, Stelson A W. 1992. Aqueous-phase chemical processes in deliquescent sea salt aerosol: A mechanism that couples the atmospheric cycles of S and sea salt. *J Geophys Res*, 97:20525-20580
- Chylek P, Coakley J A. 1974. Aerosol and climate. *Science*, 183: 75-77
- Covert D S, Charlson R J, Ahlquist N C. 1972. A study of the relationship of chemical composition and humidity to light scattering by aerosols. *J Appl Meteorol*, 11: 968-976
- Day D E, Malm W C. 2001. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: a comparison between measurements made at three different sites. *Atmos Environ*, 35: 5169-5176
- Gassó S, Hegg D A, Covert D S, et al. 2000. Influence of humidity on the aerosol scattering coefficient and its effect on the upwelling radiance during ACE-2. *Tellus*, 52B:546-567
- He K, Yang F, Ma Y, et al. 2001. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 35: 4959-4970
- Hegg D, Larson T, Yuen P F. 1993. A theoretical study of the effect of relative humidity on light scattering by tropospheric aerosols. *J G R*, 98(D10): 18435-18439
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Bases*. Cambridge: Cambridge University Press
- Koloutsou-Vakakis S, Carrico C M, Kus P, et al. 2001. Aerosol properties at a mid-latitude Northern Hemisphere continental site. *J Geophys Res*, 106(D3): 3019-3032
- Kotchenruther R A, Hobbs P V, Hegg D A. 1999. Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-Atlantic coast of the United States. *J Geophys Res*, 104(D2): 2239-2251
- Kotchenruther R A, Hobbs P V. 1998. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *J Geophys Res*, 103 (D24): 32081-32089
- Kus P, Carrico C M, Rood M J, et al. 2004. Measured and modeled light scattering values for dry and hydrated laboratory aerosols. *J Atmos Ocean Technol*. 21: 981-994
- Li-Jones X, Maring H B, Prospero J M. 1998. 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*, 103(D23): 31113-31121
- Malm W C, Day D E. 2001. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity. *Atmos Environ*, 35: 2845-2860
- Malm W C, Day D E. 2005. Hygroscopic properties of an organic-laden aerosol. *Atmos Environ*, 39: 4969-4982
- Malm W C, Sisler J F, Huffman D. 1994. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. *J Geophys Res*, 99(D1), 1347-1370
- Mao Jietai, Li Chengcai. 2005. Observation study of aerosol properties over China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 622-635
- Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60(5): 625-634
- Pilinis C S, Pandis S N, Seinfeld J H. 1995. Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosol size and composition. *J*

- Geophys Res, 100: 18739-18754
- Rood M J, Covert D S, Larson T V. 1987. Hygroscopic properties of atmospheric aerosols in Riverside, California. *Tellus*, 39B: 383-397
- Rood M J, Larson T V, Covert D S, et al. 1985. Measurement of laboratory and ambient aerosols with temperature and humidity controlled nephelometry. *Atmos Environ*, 19: 1181-1190
- Saxena P, Hildemann L M, McMurry P H, et al. 1995. Organics alter hygroscopic behavior of atmospheric particles. *J Geophys Res*, 100: 18755-18770
- Sheridan P J, Delene D J, Ogren J A. 2001. Four years of continuous surface aerosol measurements from the Department of Energy's Atmospheric Radiation Measurement Program Southern Great Plains Cloud and Radiation Testbed site. *J Geophys Res*, 106(D18): 20735-20747
- Sun Y, Zhuang G, Wang Y, et al. 2004. The air-borne particulate pollution in Beijing: concentration, composition, distribution and sources. *Atmos Environ*, 38: 5991-6004
- Wang Jingli, Liu Xulin. 2006. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 64(2): 221-228
- Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2007. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteorologica Sinica*, 21(2): 215-223
- Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. 2002. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China. *Atmos Environ*, 36: 161-173
- Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on short wave radiative properties of atmospheric aerosol particles. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23(2): 239-247
- Zhang Lisheng, Shi Guangyu. 2002. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 60(2): 230-237
- Zhang R J, Wang M X, Xia XA. 2002. Chemical composition of aerosols in winter/spring in Beijing. *J Environ Sci*, 14(1): 7-11
- Zhang Renjian, Wang Mingxing, Hu fei, et al. 2002. Elemental concentrations and distributions of atmospheric particles before and in heating period in Beijing. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 19(1): 75-81

附中文参考文献

- 毛节泰,李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究, *气象学报*, 63(5): 622-635
- 毛节泰,张军华,王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述, *气象学报*, 60(5): 625-634
- 王京丽,刘旭林. 2006. 北京是大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探, *气象学报*, 64(2): 221-228
- 杨军,李子华,黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响, *大气科学*, 23(2): 239-247
- 张立盛,石广玉. 2002. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响, *气象学报*, 60(2): 230-237
- 张仁健,王明星,胡非等. 2002. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究, *中国科学院研究生院学报*, 19(1): 75-81