

康汉青, 朱彬, 樊曙先. 2009. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 523-530. Kang Hanqing, Zhu Bin, Fan Shuxian. 2009. Size distributions and wet scavenging properties of winter aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 523-530.

南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究

康汉青 朱彬 樊曙先

南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用 WPS (宽范围颗粒粒径谱仪)、雨滴谱仪和雾滴谱仪测量了 2007~2008 年冬季南京北郊大气气溶胶数浓度谱分布和降水强度, 分析了气溶胶粒子的分布特征以及气溶胶粒径与湿清除系数的关系。结果表明: 气溶胶粒子具有明显的双峰型日变化特征, 数浓度主要集中在 $0.02\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 粒径范围内, 受汽车尾气排放、混合层高度变化以及颗粒物水平输送的影响较大。降雨、降雪和雾过程都对气溶胶粒子有不同程度的清除, 降雨和浓雾对核模态和粗模态的气溶胶粒子的清除能力显著, 降雪对粒径小于 $0.03\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子的清除能力较强。

关键词 气溶胶 数浓度 湿清除

文章编号 1006-9585 (2009) 05-0523-08 **中图分类号** P513 **文献标识码** A

Size Distributions and Wet Scavenging Properties of Winter Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing

KANG Hanqing, ZHU Bin, and FAN Shuxian

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Measurements of aerosol particle number concentrations and precipitation intensity during the winter of 2007-2008 were made by Wide-Range Particle Spectrometer (WPS), disdrometer (OTT Parsivel) and fog monitor (FM-100), in the north suburb of Nanjing. The size distribution characteristics of particles and the relationships between particle size and scavenging coefficients were studied. With a bimodal distribution of diurnal variation, the aerosol particle number concentration, which is much affected by vehicle emission, change of boundary layer height, and the advection of particles, mostly falls between 0.02 and $0.2\ \mu\text{m}$. Rainfall, snowfall, and fog have different scavenging efficiency on particles. Aitken mode and coarse mode particles are more efficiently scavenged by rainfall and dense fog. Snowfall is efficient in the scavenging of particles smaller than $0.03\ \mu\text{m}$.

Key words particle, number concentration, wet scavenging

1 引言

气溶胶是目前影响我国城市大气最主要的污

染物之一, 它不仅可以降低能见度还会对人体健康产生严重危害 (任丽新等, 1999)。湿清除作为大气中气溶胶粒子的主要清除机制, 维持着大气中气溶胶粒子源、汇之间的平衡, 是大气自净最

收稿日期 2008-03-07 收到, 2009-05-28 收到修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 专项 GYHY200706026, 国家科技支撑计划 2006BAC12B07, 国家自然科学基金 40775012, 江苏省自然科学基金 BK2007227

作者简介 康汉青, 男, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气环境方向的研究。E-mail: hanqingkang@yahoo.com.cn

通讯作者 朱彬, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

重要的过程之一。气溶胶粒子的湿清除是指大气气溶胶粒子参与云滴的形成,并在云滴增长和发展为降水的过程中,被云、降水收集而随降水下落至地面,包括云内清除和云下清除两个阶段(章澄昌等,1995)。云下清除是指云底以下至地表之间的大气气溶胶粒子被降水清除的过程,这一过程中气溶胶粒子通过布朗运动、惯性碰并以及由热力、湍流、电荷、浓度梯度等作用造成的泳移而被下落的水滴或冰晶所捕获。Greenfield et al. (1957)、Wang et al. (1978) 以及 Herbert et al. (1986) 通过对这些过程的研究发现:降水对直径位于 $1\sim2\text{ }\mu\text{m}$ 之间气溶胶粒子的捕获效率较低,这一区域通常称作“Greenfield 缺口”。惯性碰并是直径大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子的主要清除机制,布朗运动主要清除直径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶,而电泳则被认为是目前清除系数计算中最不确定的部分 (Byrne et al., 1993; Jaworek et al., 2002)。Davenport et al. (1978)、Volken et al. (1993) 以及 Laakso et al. (2003) 对不同粒径气溶胶粒子的清除系数做过研究,国内彭红等 (1992)、姚克亚等 (1999) 对清除系数做过一些参数化研究,但关于气溶胶湿清除系数与气溶胶粒径关系的观测研究较少。

作为现代化工业城市,南京的污染日趋严重,研究表明近年来南京地区的霾日数和细粒子浓度呈上升趋势(童尧青等,2007;钱凌等,2008),颗粒物成为南京市危害最大的污染物之一(黄辉军等,2006)。为了研究降水对南京地区气溶胶粒子的清除效果,本文利用 WPS(宽范围颗粒粒径谱仪)对南京北郊冬季气溶胶粒子数浓度进行观测,并结合自动气象站、雨滴谱仪和雾滴谱仪的观测资料分析了气溶胶粒子的分布特征,以及不同降水类型对气溶胶粒子的清除效率。

2 实验

观测地点设置在南京信息工程大学校园内,位于南京北郊,观测点东南方约 3 km 处为南京化工园区。本研究的观测期分为两阶段,分别为 2007 年 12 月 14~29 日以及 2008 年 1 月 16~30 日。

观测中使用美国 MSP 公司生产的宽范围颗粒

粒径谱仪(WPS),测量直径在 $0.01\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子数浓度。仪器主要由静电分级器(DMA)、凝结核计数器(CPC)和激光颗粒物分光计(LPS)三个部分组成,前两者的测量范围为 $0.01\sim0.5\text{ }\mu\text{m}$,后者为 $0.35\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 。由于测量原理的不同,因此两者在其交叉测量范围内($0.35\sim0.5\text{ }\mu\text{m}$)的观测值也有所差异。观测中使用的时间分辨率为 5 min ,即 5 min 内仪器扫描 $0.01\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 粒径范围并测量出气溶胶粒子的个数。同时本次实验还使用了自动气象站、雨滴谱仪和雾滴谱仪记录了观测期间的气象要素以及降水的各项特性。表 1 为观测期间降水样本的概述,包括降水类型、持续时间及其强度。

表 1 降水类型、持续时间以及强度
Table 1 Precipitation types, duration, and intensity

持续时间	降水类型	平均降水强度 / $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
2007-12-16T15:00~		
2007-12-17T06:00	小雨	0.30
2007-12-19 T 01:00~09:00	强浓雾	
2007-12-20 T 00:00~10:00	强浓雾	
2007-12-21 T 00:00~03:00	小雨	0.21
2007-12-22 T 02:00~12:00	小雨	0.84
2007-12-24 T 15:00~19:00	小雨	0.28
2007-12-27 T 04:00~12:00	小雨	0.81
2008-01-18 T 18:00~		
2008-01-21 T 02:00	大雪	0.78
2008-01-21 T 19:00~23:00	中雪	0.23
2008-01-26 T 00:00~14:00	大雪	0.95
2008-01-26 T 23:00~		
2008-01-29 T 01:00	大雪	1.08

3 结果与讨论

3.1 南京冬季气溶胶粒子数浓度以及谱分布特征

气溶胶粒子数浓度通常具有日变化特征,它不仅受大尺度天气过程和边界层高度日变化的影响,而且与局地人类活动排放密切相关。图 1 为不同天气条件下气溶胶粒子数浓度的平均日变化,雨天、雾天及总平均日变化均呈双峰型分布,峰值出现时间分别为上午 8 时(北京时间,下同)和下午 18 时,雾天第一个峰值的出现时间稍晚,

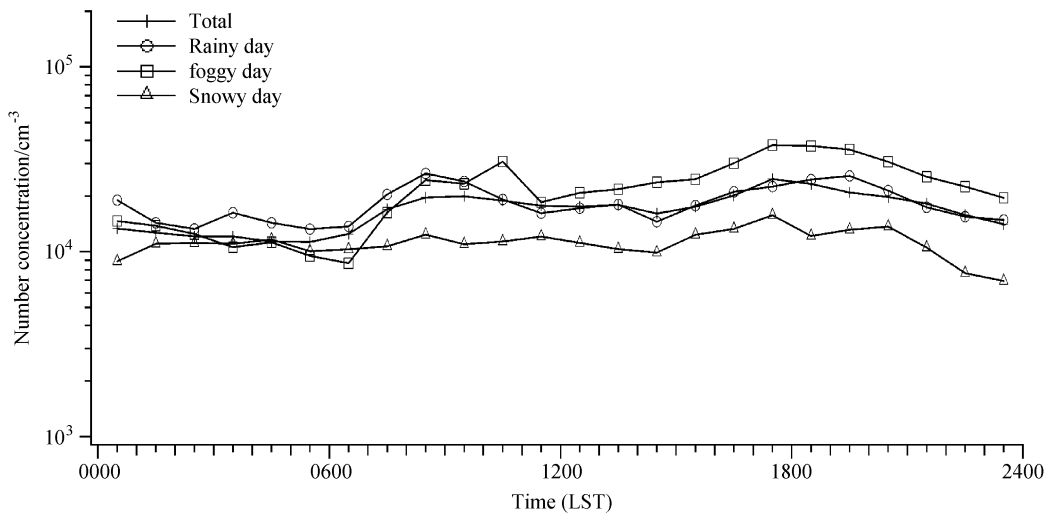


图 1 不同天气条件下气溶胶粒子数浓度平均日变化

Fig. 1 Averaged diurnal variation of particle number concentration under different weather conditions

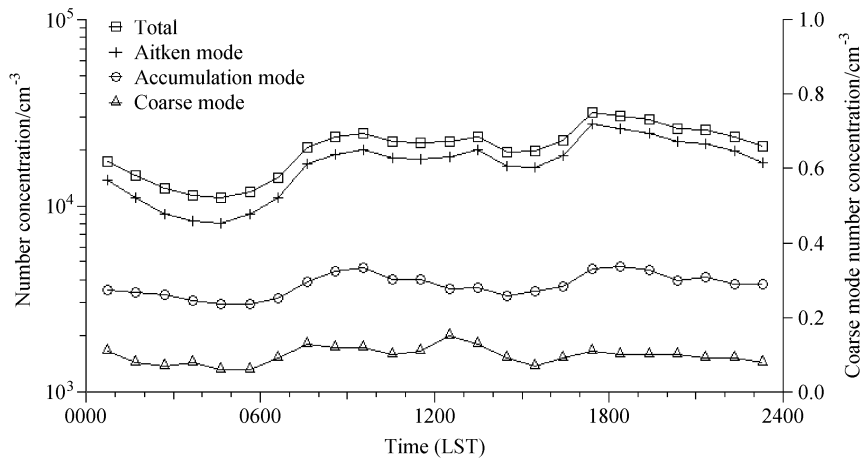


图 2 不同粒径气溶胶数浓度平均日变化

Fig. 2 Averaged diurnal variation of number concentration of aerosol with different particle size

为上午 10 时,可能与雾的消散时间有关,雪天气溶胶粒子浓度变化不明显,只在下午 17 时左右出现一个峰值。气溶胶浓度峰值的出现时间与上下班高峰期较为一致,说明汽车尾气排放是南京地区气溶胶粒子主要来源之一。图 2 给出了晴天气溶胶粒子核模态 ($0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$)、积聚模态 ($0.1 \sim 2 \mu\text{m}$)、粗模态 ($2 \sim 10 \mu\text{m}$) 以及总数浓度的平均日变化。除粗模态粒子(浓度极低,可以忽略)之外,其他三者的日变化均呈双峰型且峰值出现时间一致,说明不同粒径气溶胶粒子数浓度的变化是由相同的原因造成的。除上述汽车尾气排放之外,人类生产生活方式以及混合层高度

随太阳辐射的变化状况也是气溶胶浓度呈双峰型日变化特征的主要原因。从凌晨 5 时开始人类的生产活动逐渐加剧,大气中气溶胶粒子浓度持续上升直至上午 9 时左右达到峰值。9 时之后随着太阳辐射的逐渐增强混合层高度上升,气溶胶粒子得到一定程度的扩散稀释,且在 15 时左右出现谷值。随着辐射减弱混合层高度降低气溶胶数浓度上升,在 18 时再次达到峰值。之后人类活动减少气溶胶粒子浓度逐渐下降,至凌晨 4 时左右达最低值。

山东大学环境研究院于 2005 和 2006 年用 WPS 分别对上海和北京夏季大气气溶胶以及济南

冬夏两季气溶胶的分布特征进行了观测研究。本次观测结果与其对比如表 2 所示, 南京超细粒子的浓度低于上海, 高于北京 (高健等, 2006), 与济南冬季的观测结果比较一致 (Gao et al., 2007)。0.1~1 μm 的细粒子浓度明显高于上海、北京和济南, 但低于 Wu et al. (2008) 2004 年在北京使用 TDMPs (Twin Differential Mobility Particle Sizer) 和 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Model 3320) 系统观测到的年平均值 (7800 cm^{-3})。南京冬季大于 0.3 μm 的气溶胶粒子平均数浓度为 402 cm^{-3} , 比朱彬等 (2006) 2001 年冬季在重庆用 DLJ-92 型多通道光学粒子计数器观测的结果高约 60%。

表 2 南京与上海、北京和济南颗粒物数浓度比较
Table 2 Comparison of the particle number concentration in Nanjing, Shanghai, Beijing, and Ji'nan cm^{-3}

直径/ μm	南京	上海	北京	济南 (冬季)	济南 (夏季)
0.01~0.1	17240	28502	8789	15590	10300
0.1~1	4668	1740	1703	1817	481
1~10	2	7	7		

图 3 为气溶胶粒子数浓度的时间序列, 可以反映出观测期间气溶胶质粒数浓度的谱分布及其随时间的演变状况。粒子数浓度主要集中在 0.02~0.2 μm 粒径范围内, 约占总数浓度的 80%, 峰值达到 $10^5 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。日变化特征明显, 风速、风向以及降水过程的清除效果显著。2008 年 1 月的气溶胶浓度明显低于 2007 年 12 月, 这主要是由于 2008 年 1 月两次持续时间较长的降雪对气溶胶的清除比较明显; 2007 年 12 月虽然降水次数较多, 但总体持续时间较短, 且在降水结束后由于人类活动的排放使气溶胶浓度又迅速上升。白色区域为数据缺失部分。

天气状况、大气稳定度、相对湿度以及风速、风向等气象条件是影响大气气溶胶数浓度及其谱分布的重要因子。图 4 是观测期间的风速风向随时间的变化, 平均风速小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向以东风和西北风为主。结合图 3、4 可以发现, 风向为偏东风时气溶胶粒子数浓度偏高 (例如: 2007 年 12 月 23~28 日, 2008 年 1 月 16~20 日); 风向为西北风时浓度明显下降 (例如: 2007 年 12 月

28、29 日, 2008 年 1 月 21~24 日)。这是由于观测点位于南京北郊, 偏东风将化工园区及市区高污染大气输送到北郊, 造成气溶胶数浓度升高; 而西北风将西北地区较清洁的大气输送到南京, 可使该地区气溶胶浓度得到稀释。

3.2 气溶胶质粒的湿清除

根据以往研究 (Seinfeld et al., 2006), 气溶胶粒子的湿清除过程可以近似用一种指数衰减函数来描述, 这种情况下, 它的浓度变化率可以表示为

$$\frac{dn(d_p)}{dt} = -\lambda n(d_p), \quad (1)$$

其中, d_p 为气溶胶粒子的直径; $n(d_p)$ 为气溶胶粒子的浓度; λ 为清除系数 (s^{-1}), 它表示大气中气溶胶粒子在单位时间内被清除的比率, 表示为

$$\lambda(d_p) = \int_0^\infty \frac{\pi}{4} D_p^2 U_t(D_p) E(D_p, d_p) N(D_p) dD_p, \quad (2)$$

其中, D_p 是雨滴直径, U_t 是雨滴下落速度, $E(D_p, d_p)$ 为下落的雨滴与气溶胶的碰并系数, $N(D_p)$ 为雨滴数浓度谱。由于碰并系数难以获得, 本文采取另外一种方法计算清除系数 λ : 如果 t_0 时刻的气溶胶粒子浓度为 $n_0(d_p)$, t_1 时刻为 $n_1(d_p)$, 对方程 (1) 从 t_0 到 t_1 积分可得通过仪器测量得到的 $n_0(d_p)$ 、 $n_1(d_p)$ 以及 $t_1 - t_0$, 可以计算出清除系数 λ 。

$$\lambda(d_p) = -\frac{1}{t_1 - t_0} \ln\left(\frac{n_1(d_p)}{n_0(d_p)}\right) \quad (3)$$

数浓度比 (每小时气溶胶粒子数浓度与整个观测期间气溶胶平均数浓度之比) 可以在一定程度上反映气溶胶粒子的浓度变化状况, 比值小于 1 可能是由于降水清除或其它原因 (如输送、扩散、风速、风向等) 导致的浓度低值引起的。图 5 为观测期间核模态、积聚模态和粗模态的气溶胶粒子数浓度比以及降水强度随时间的变化状况。由图可见, 降水能够对气溶胶粒子造成明显清除 (例如, 2007 年 12 月 19、20 日的两次强浓雾过程, 12 月 22 日的降雨以及 2008 年 1 月 26~29 日的降雪过程等); 但也有清除效果不显著的情况 (例如, 2007 年 12 月 27 日和 2008 年 1 月 19 日), 此时降水已经不是影响气溶胶数浓度的最主要因

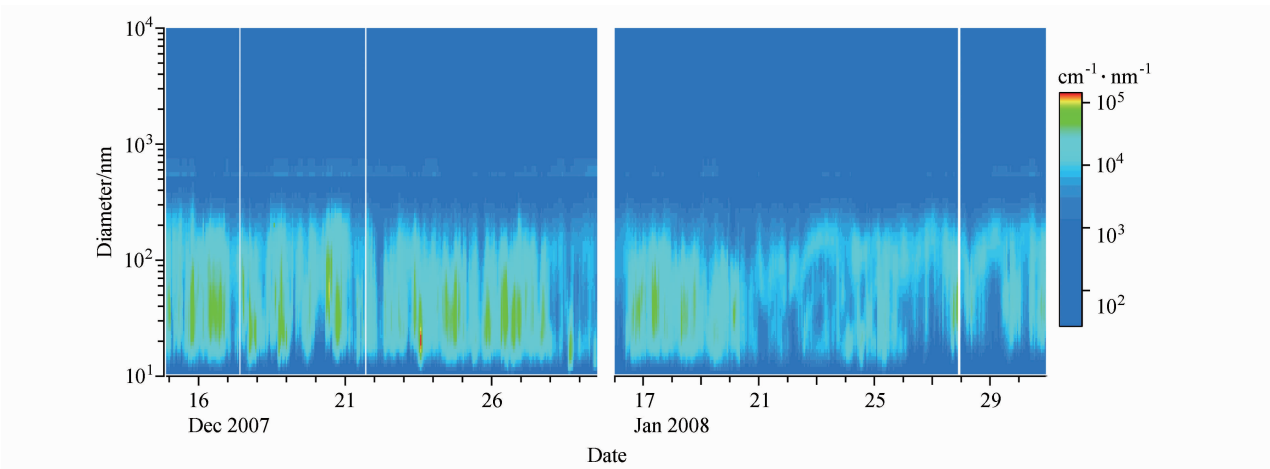


图 3 气溶胶粒子数浓度谱时间序列
Fig. 3 Time evolutions of particle number size distribution

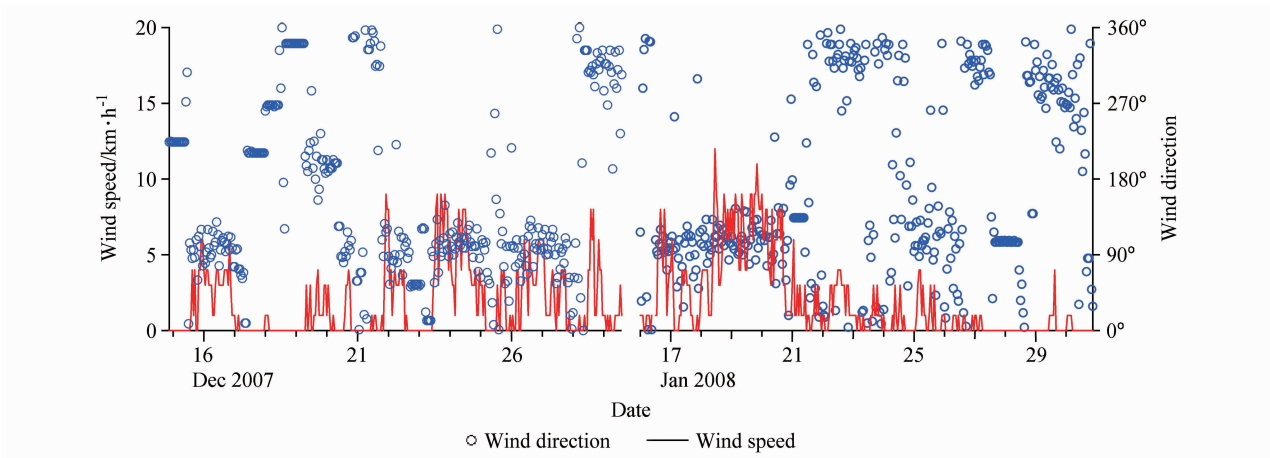


图 4 风速、风向的时间序列
Fig. 4 Time evolutions of wind speed and wind direction

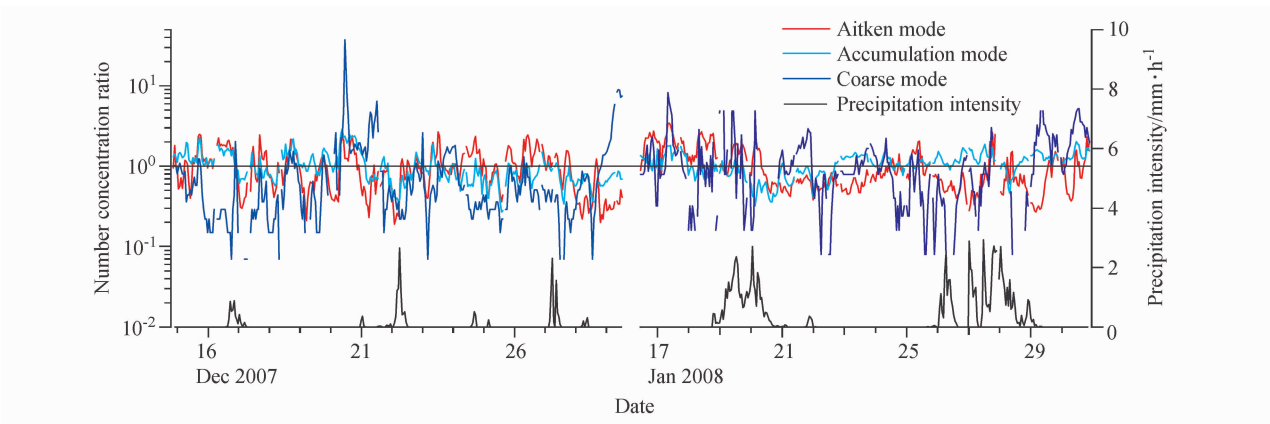


图 5 气溶胶数浓度比和雨强的时间序列
Fig. 5 Time evolutions of the particle number concentration ratio and precipitation intensity

素，水平输送和局地排放可能成为最主要的影响因子，从图 4 中可以发现 2007 年 12 月 27 日和 2008 年 1 月 19 日以偏东风为主，水平输送抵消了湿清除效果。与核模态和粗模态相比，积聚模态

气溶胶粒子数浓度比的变化相对平稳,降水对其影响较小。

鉴于气溶胶数浓度的日变化特征以及平流输送等因素对湿清除效果的影响,本文对气溶胶数据进行了质量控制,只选取静风或风速较小的夜晚至凌晨的数据用于清除系数 λ 的计算。

图6为观测期间气溶胶粒子的平均数浓度谱分布与降雨、降雪和雾过程后气溶胶粒子数浓度谱的比较。这三种降水类型对于粒径小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子都有明显清除,且三者清除后大气中气溶胶粒子的数浓度比较接近。 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 处的断层是由于WPS两种测量手段的不同测量原理造成的。

雨滴、雾滴和冰晶的大小、形状等属性都有差别,因此三者对气溶胶的清除效率也有区别。南京冬季降雨以雨强小于 $2.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的小雨为主,约占总降雨次数的88%,本文选取一次小雨过程计算降雨对气溶胶的清除系数,同时还计算了降雪和强浓雾的清除系数,并将三者进行比较。图7为三者的清除系数随气溶胶粒径的变化,三者均基本呈“V”字形分布,其中降雨的清除系数在 $3.45\times 10^{-6}\sim 1.15\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 之间,降雨对粒径小于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 和大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子清除效果明显,对粒径小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 气溶胶的清除系数与Laakso et al. (2003)的研究结果较为一致;强浓雾的清除系数在 $1.13\times 10^{-6}\sim 3.33\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 之

间,对粒径小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子有明显清除;降雪的清除系数在 $1.14\times 10^{-6}\sim 1.73\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 之间,对于粒径小于 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子清除效果显著。表3为不同降水类型湿清除系数的比较,三者对于气溶胶粒子总的清除效果依次是小雨大于强浓雾大于暴雪,这与Graedal et al. (1975)、Magono et al. (1975)以及Murakami et al. (1985)的研究结果有一定差别,他们的研究结果显示在相同的等价含水量条件下,降雪对气溶胶粒子的清除效率远高于降雨。根据上述湿清除系数的计算方法可以发现,清除系数的大小主要取决于降水前后气溶胶粒子的数浓度以及降水的持续时间,此次降雪过程发生前持续的西北风已经使南京地区的气溶胶粒子浓度显著降低,明显低于降雨和雾发生前的浓度,而降雪后的浓度与二者相差不大。这可能与气溶胶的背景浓度有关,由于本研究所设观测点以及获得的降水样本数还不够,还有待进一步观测研究证实。

表3 不同降水类型总清除系数比较

Table 3 Total scavenging coefficients for the three precipitation types

降水类型	持续时间/h	气溶胶总数浓度/ cm^{-3}		清除系数/ s^{-1}
		降水前	降水后	
降雨	6	35235.26	7562.92	7.124×10^{-5}
雾	6	25179.95	62.18	6.297×10^{-5}
降雪	5	10278.10	6973.43	2.155×10^{-5}

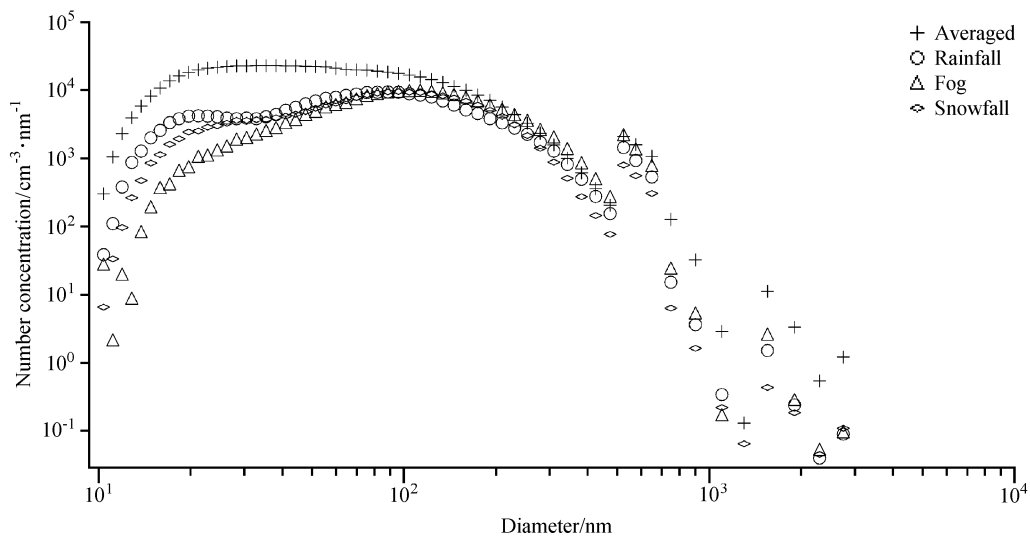


图6 降水前后气溶胶数浓度谱比较

Fig. 6 Comparison of particle number concentrations before and after precipitation

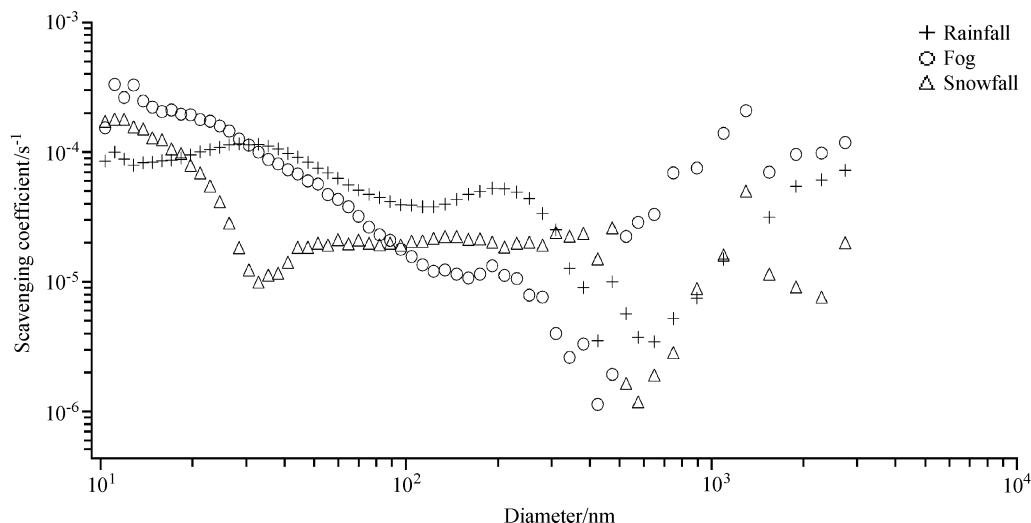


图 7 三种降水类型清除系数比较

Fig. 7 Scavenging coefficients for the three precipitation type

参考文献 (References)

4 结论

本文采用 WPS、雨滴谱仪、雾滴谱仪以及自动气象站等仪器设备, 对 2007 年 12 月至 2008 年 1 月南京北郊冬季大气气溶胶粒子数浓度、降水强度以及其它各气象要素进行观测分析, 得出以下结论:

(1) 南京北郊冬季大气气溶胶数浓度平均日变化呈双峰型。在有降水发生的天气条件下, 气溶胶浓度的变化主要受汽车尾气排放和人类生产生活的影 响; 在晴天, 混合层高度变化规律也是主要的影响因子之一。另外, 水平输送对气溶胶浓度也有显著影响, 偏东风有助于气溶胶浓度的增加, 而西北风能起扩散稀释作用。

(2) 降雨和强浓雾对核模态以及粗模态气溶胶粒子的清除效果显著, 对积聚模态粒子的清除效果较差。二者总清除系数比较接近, 降雨略高于强浓雾。

(3) 降雪只对粒径小于 $0.03 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子清除效果较好, 且清除能力低于降雨和强浓雾过程。这一现象与 Graedel et al. (1975)、Magono et al. (1975) 以及 Murakami et al. (1985) 等研究结果有一定差别, 还有待于进一步观测研究。

- Byrne M A, Jennings S G. 1993. Scavenging of sub-micrometre aerosol particles by water drops [J]. *Atmospheric Environment*, 27: 2099–2105.
- Davenport H M, Peters L K. 1978. Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation [J]. *Atmospheric Environment*, 12: 997–1008.
- 高健, 王韬, 王文兴, 等. 2006. 中国城市大气超细颗粒物浓度及粒径分布研究 [A]. 中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集 [C]. 成都: 中国气象学会, 879–885. Gao Jian, Wang Tao, Wang Wenxing, et al. 2006. The concentration and size distribution of ultra fine atmospheric particles in China cities [A]. Chinese Meteorological Society 2006 annual Conference “Atmospheric Composition and Climate and Environmental Change” Section Room Collection [C] (in Chinese). Chengdu: Chinese Meteorological Society, 879–885.
- Gao Jian, Wang Jin, Cheng Shuhui, et al. 2007. Number concentration and size distributions of submicron particles in Jinan urban area; Characteristics in summer and winter [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 19: 1466–1473.
- Graedel T E, Franey J P. 1975. Field measurements of submicron aerosol washout by snow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2: 325.
- Greenfield S M. 1957. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere [J]. *Journal of the Meteorology Sciences*, 14: 115–125.
- Herbert F, Behang K D. 1986. Scavenging of airborne particles by collision with water drops—Model studies on the combined effect of essential micro dynamic mechanisms [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 35: 201–211.

- 黄辉军, 刘红年, 蒋维楣, 等. 2006. 南京市 PM_{2.5} 物理化学特性及来源解析 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 713–721. Huang Huijun, Liu Hongnian, Jiang Weimei, et al. 2006. Physical and chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 713–721.
- Jaworek A, Adamiak K, Balachandran W, et al. 2002. Numerical simulation of scavenging of small particles by charged droplets [J]. Aerosol Science and Technology, 36: 913–924.
- Laakso L, Groenholm T, Rannik U, et al. 2003. Ultrafine particle scavenging coefficients calculated from 6 years field measurements [J]. Atmospheric Environment, 37 (25): 3605–3613.
- Magono C, Endoh T, Itasaka M. 1975. Observation of aerosol particles attached to falling snow crystals [J]. J. Fac. Sci. Hokkaido University, 4: 103–119.
- Murakami M, Kiluchi k, Magono C. 1985. Experiments on aerosol scavenging by natural snow crystals. Part I: Collection efficiency of uncharged snow crystals for micron and submicron particles [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 63: 119–129.
- 彭红, 秦瑜. 1992. 降水对气溶胶粒子清除的参数化 [J]. 大气科学, 16 (5): 622–630. Peng Hong, Qin Yu. 1992. The Parameterization of the influence of precipitation on the washout of aerosol particles [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (5): 622–630.
- 钱凌, 银燕, 童尧青, 等. 2008. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征 [J]. 中国环境科学, 28 (1): 18–22. Qian Ling, Yin yan, Tong Yaoqing, et al. 2008. Characteristics of size distributions of atmospheric fine particles in the north suburban area of Nanjing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 28 (1): 18–22.
- 任丽新, 游荣高, 吕位秀, 等. 1999. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响 [J]. 气候与环境研究, 4 (1): 67–73. Ren Lixin, You Ronggao, Lu Weixiu, et al. 1999. The physical and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (1): 67–73.
- Seinfeld J H, Pandis S N. 2006. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change [M]. New York: Wiley, 948.
- 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 2007. 南京地区灰霾天气特征分析 [J]. 中国环境科学, 27 (5): 584–588. Tong Yaoqing, Yin yan, Qian Ling, et al. 2007. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area [J]. China Environmental Science (in Chinese), 27 (5): 584–588.
- Volken M, Schumann T. 1993. A critical review of below-cloud aerosol scavenging results on Mt. Rigi [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 68: 15–28.
- Wang P K, Grover S N, Pruppacher H R. 1978. On the effect of electric charge on the scavenging of aerosol particles by clouds and small raindrops [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 35: 1735–1743.
- Wu Zhijun, Hu Min, Lin Peng, et al. 2008. Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 42: 7967–7980.
- 姚克亚, 郭俊, 傅云飞, 等. 1999. 气溶胶粒子的降雨清除 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 297–302. Yao Keya, Guo Jun, Fu Yunfei, et al. 1999. Rain scavenging of aerosol particles [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 297–302.
- 章澄昌, 周文贤. 1995. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 195. Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. 1995. Atmospheric Aerosol Particle Tutorial [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 195.
- 朱彬, 马力, 杨军, 等. 2006. 重庆冬季大气气溶胶的物理、化学特征 [J]. 南京气象学院学报, 29 (5): 662–668. Zhu Bin, Ma Li, Yang Jun, et al. 2006. Physical and chemical properties of winter aerosol particles in Chongqing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (5): 662–668.