

南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征

杨军^{1,2}, 牛忠清¹, 石春娥³, 刘端阳¹, 李子华¹

(1. 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044; 2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 3. 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031)

摘要:2007年冬季南京雾外场试验获得了雾霾转换过程的大气气溶胶和雾滴尺度谱分布同步观测资料, 根据能见度和含水量将雾霾过程划分为雾、轻雾、湿霾、霾4个不同阶段, 进而分析了不同阶段粗、细气溶胶粒子的微物理特征. 结果表明, 4个阶段的主要发生顺序为霾 $\longleftrightarrow$ 轻雾 $\longrightarrow$ 湿霾 $\longrightarrow$ 雾 $\longrightarrow$ 湿霾 $\longrightarrow$ 轻雾 $\longleftrightarrow$ 霾, 雾前湿霾阶段持续时间长于雾后. 尺度 $>2\ \mu\text{m}$ 的粗粒子数浓度、表面积浓度和体积浓度在雾阶段均显著大于其他3个阶段, 其中霾阶段浓度最低. 雾滴表面积浓度和体积浓度尺度谱分布为双峰或多峰型, 而轻雾、湿霾和霾阶段粗粒子谱均为单峰型. 尺度 $>0.010\ \mu\text{m}$ 的细粒子表面积浓度谱形在雾和湿霾阶段、轻雾和霾阶段分别相似, 雾和湿霾阶段数浓度占优势的尺度范围分别为 $0.04\sim0.13\ \mu\text{m}$ 和 $0.02\sim0.14\ \mu\text{m}$, 轻雾及霾阶段数浓度优势粒子尺度范围均为 $0.02\sim0.06\ \mu\text{m}$. 从霾、轻雾、湿霾到雾的转换过程中, 以 $0.060\sim0.090\ \mu\text{m}$ 为界, 小粒子减少, 大粒子增多. 雾霾演变过程中气溶胶粒子数浓度与均方根直径呈显著负相关关系, 雾阶段气溶胶粒子数浓度最低、平均尺度最大.

关键词:雾; 霾; 大气气溶胶; 尺度谱分布; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1425-07

Microphysics of Atmospheric Aerosols During Winter Haze/Fog Events in Nanjing

YANG Jun^{1,2}, NIU Zhong-qing¹, SHI Chun-e³, LIU Duan-yang¹, LI Zi-hua¹

(1. The Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Intensive field observations of fog/haze events, including simultaneous measurements of aerosol particle and fog droplet size distributions, were conducted in Nanjing in November, 2007. Four weather conditions (fog, mist, wet haze and haze) were distinguished based on visibility and liquid water content firstly. Then, the microphysical characteristics of coarse and fine particles in each condition were investigated. The results showed the dominant sequence of the four weather conditions was haze $\longleftrightarrow$ mist $\longrightarrow$ wet haze $\longrightarrow$ fog $\longrightarrow$ wet haze $\longrightarrow$ mist $\longleftrightarrow$ haze. The lasting time of pre-fog wet haze was longer than that of post-fog wet haze. The number, surface area and volume concentration of coarse particles with diameter larger than $2.0\ \mu\text{m}$ in fog were much higher than those in the other three conditions, and the smallest concentrations were observed in haze. The size distributions of surface area and volume concentration exhibited multi-peak in fog droplets, while it showed single peak for coarse particles in haze, mist and wet haze. For the fine particles with diameter larger than $0.010\ \mu\text{m}$, the spectral shapes of surface area concentration are similar in fog (mist) and wet haze (haze) condition. The dominant size ranges of fine particle number concentration were in $0.04\sim0.13\ \mu\text{m}$ and $0.02\sim0.14\ \mu\text{m}$ for fog and wet haze, separately. The same dominant size ranges located in $0.02\sim0.06\ \mu\text{m}$ for both mist and haze. During the transition processes from haze, mist and wet haze to fog, the concentration of smaller particles (less than $0.060\sim0.090\ \mu\text{m}$) reduced and vice versa for the corresponding larger particles. Temporal variation of aerosol number concentration correlated well with the root mean diameters negatively during the observation period. The number concentration of aerosol was the lowest and the mean diameter was the largest in fog periods.

Key words: fog; haze; atmospheric aerosol; size distribution; Nanjing

伴随着工业、交通和城市化的迅猛发展, 大气中的颗粒物含量增多, 我国很多城市雾日减少, 霾日剧增^[1~5]. 雾霾天气除了造成低能见度对交通运输、工农业生产具有严重危害外, 还由于其复杂的化学成分和沉降过程给人体健康和生态环境带来多不利影响. 所产生的这些危害本质上决定于雾滴和气溶胶的数浓度、尺度谱分布、化学性质等特性. 这些特

性除了受气象条件和大气中化学活性气体成分的影响之外, 在很大程度上还受控于雾滴与气溶胶粒子

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2009-09-20

基金项目: 江苏省自然科学基金重点招标项目(BK2007727); 国家自然科学基金项目(40775010); 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题项目(2009006); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX) 2007-6-26)

作者简介: 杨军(1971~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气物理学与大气环境, E-mail: jyang@nuist.edu.cn

的物理、化学相互作用过程^[6].

浓雾发生时,伴随逆温层的存在,大气稳定,气溶胶粒子在逆温层下累积.气溶胶粒子作为凝结核,为雾的形成提供了必要的物质条件.同时,气溶胶粒子的增多在夜晚可影响长波辐射,改变近地层温度分布状态,从而影响雾的形成和发展^[7,8].气溶胶粒子的增加通过对光的衰减直接导致能见度降低,或通过增加凝结核数量间接导致能见度降低.在相同的水汽条件下,后者将会增大雾滴的数浓度,大量的小雾滴引起能见度更大幅度的减小^[9,10].Bott 等^[11]曾用一维辐射雾模式,采用详细的微物理参数化方案和不同(城市、乡村及海洋)气溶胶尺度谱得出了气溶胶粒子对雾的整个生命周期产生的直接效应.

另一方面,雾对气溶胶也有影响.Pandis 等^[12]计算认为,持续时间短的雾不足以使多数气溶胶粒子通过雾滴的湿清除过程移出大气.随着雾的消散,经历了非均相化学反应的雾滴蒸发后形成新的气溶胶粒子,这些新生成的气溶胶粒子往往吸湿性较强,在浓度较高时产生霾^[13].而持续时间长的雾过程对气溶胶粒子浓度的影响则与此不同,Jacob 等^[14]在美国圣华金山谷观测表明,在长时间维持的雾过程中,雾滴对气溶胶粒子的沉降作用较强,限制了雾中气溶胶的累积,引起气溶胶粒子浓度下降.

对雾霾期间雾滴和气溶胶粒子物理特性进行观测研究是准确认识雾霾过程的环境效果的基础.南京每年浓雾日约 30 d 左右,89.9% 的浓雾事件发生在 10 月~次年 4 月^[4,15],加之长江三角洲经济总量

大、发展快、人口密度大、环境负荷重,空气中气溶胶粒子浓度显示出增加趋势.自 20 世纪 90 年代以来,南京每年霾日数均超过 100 d,并有不断增加的趋势,其中 11 月~次年 1 月出现频次最高^[2].2007 年冬季在南京开展了雾的外场观测试验研究,进行了雾滴及气溶胶粒子的同步连续测量.本研究分析了雾霾过程不同阶段雾滴及气溶胶粒子的微物理特征,对于揭示长江三角洲地区雾霾过程的环境强迫机制具有重要意义.

1 观测概况

2007 年 12 月 15 日 00:00 至 29 日 00:00 在南京北郊进行了雾滴谱和气溶胶谱的连续观测,表 1 列出了观测中使用的主要仪器设备.尺度 > 2 μm 的粗粒子(雾滴和非液水粒子)的尺度谱分布使用 FM-100 型雾滴谱仪测量^[16,17],时间分辨率为 1 s.尺度在 0.010 ~ 2 μm 的细粒子尺度谱分布使用 WPS 1000XP 宽范围粒谱仪测量^[18],该粒谱仪使用微分电迁移率分析(DMA)、凝结核计数(CPC)及激光散射(LPS)3 种测量技术可同时获得 0.010 ~ 10 μm 粒径范围的气溶胶粒子数浓度尺度分布,单次测量所需要时间约为 5 min.使用 HSC-Parsivel 激光降水粒子谱仪测量雨强,以便在分析中去除降水的影响,本研究分析使用无降水时段的雾滴和气溶胶观测资料.观测中同时使用 ZQZ-DN2 型能见度仪测量水平能见距离,使用 HMP45C 温、湿传感器测量气温与湿度.

表 1 观测仪器概况
Table 1 Instrumentation and measurements

仪器名称	型号	生产商	测量项目	时间分辨率	备注
雾滴谱仪	FM-100	DMT,美国	雾滴尺度谱	1 s	2 ~ 50 μm,选用 20 个通道
气溶胶粒谱仪	WPS Model 1000XP	MSP,美国	气溶胶粒子尺度谱	5 min	0.01 ~ 10 μm,选用 67 个通道
激光降水粒子谱仪	HSC-Parsivel	OTT,德国	降水强度	10 s	± 5%
散射式能见度仪	ZQZ-DN2	江苏无线电科学研究所,中国	能见距离	1 min	± 10% (≤ 1 000 m)
温湿传感器	HMP45C	Campbell,美国	温度、湿度	1 min	± 2% (0% < RH < 90%); ± 3% (90% < RH < 100%); < 0.5℃

2 雾霾天气过程

2.1 雾霾过程不同天气状况的分类

大气中颗粒物增多、能见度降低是雾和霾 2 种天气状况的共性,二者的区别在于含水量的差异.我国现行气象行业标准^[19]从粒子组成、颜色、能见度 3 个方面对雾、轻雾、霾进行了定义,而气溶胶核化

理论^[20]则根据粒子凝结增长规律对单个雾(云)滴和霾粒子进行了微观概念上的严格区分.气溶胶核化理论中由霾粒子构成的胶体系统在行业标准中对应轻雾,行业标准中没有给出大量已吸湿的气溶胶粒子使水平能见度 < 1.0 km 的分类,而这种情况在实际大气中却是存在的.Gultepe 等^[21]根据与 FM-100 型雾滴谱仪测量原理和测量范围相同的前向散

射云滴谱仪探测资料分析认为,可通过计算所得液水含量 $> 5 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 作为判断雾的标准,与 Kunkel^[22] 提出的在雾霾过程中以 $> 2.5 \mu\text{m}$ 作为雾滴区别于霾粒子的判据基本一致. 对于因吸湿气溶胶粒子引起的能见度下降, Ahrens^[23] 则以相对湿度是否 $> 75\%$ 来区别湿霾和干霾.

本研究根据含水量和水平能见距离的大小,将以水滴为主的粒子群称为雾和轻雾,以非水滴组成的气溶胶粒子群称为霾和湿霾,具体分类标准列于表 2. 其中水平能见距离判据遵从气象行业标准,含水量判据在参考以上研究结果的基础上,根据观测

期间含水量稳定 $> 1.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的阶段与水平能见距离低于 1000 m 的雾过程对应,将能见度 $< 1000 \text{ m}$ 且含水量大于等于 (或小于) 此值的天气状况确定为雾 (或湿霾). 霾和轻雾的含水量阈值以 $1.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为界,是由于含水量小于此值时,所对应的 FM-100 测得尺度 $> 2.5 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度 $< 1 \text{ cm}^{-3}$,此时的天气状况确定为霾. 表 2 中同时给出了观测期间 4 种天气状况的平均相对湿度、雾滴和气溶胶谱分布样本数、各阶段累积时间. 从平均相对湿度可以看到,雾阶段 $> 95\%$,湿霾阶段 $> 90\%$,而霾和轻雾阶段则约为 80% .

表 2 天气状况分类与资料概况

Table 2 Criteria of weather classification and data summary

天气状况	雾	湿霾	霾	轻雾
水平能见距离/m	< 1000	< 1000	$1000 \sim 10000$	$1000 \sim 10000$
液水含量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\geq 1.0 \times 10^{-4}$	$< 1.0 \times 10^{-4}$	$< 1.0 \times 10^{-5}$	$\geq 1.0 \times 10^{-5}$
平均相对湿度/%	95.3	91.0	79.1	79.3
雾滴谱样本数	4283	2301	3135	5698
气溶胶粒子谱样本数	859	494	733	1160
累积时间	71 h 23 min	40 h 59 min	65 h 59 min	95 h

2.2 2007 年 12 月的雾霾天气过程

观测期间南京地面受冷高压控制,在低层充足的水汽配合下有利于雾的形成. 图 1 给出了观测期间能见度、雾滴液水含量及相对湿度随时间的变化. 15 日、18~23 日共有 6 次雾过程发生,各次雾过程之间能见度并没有明显好转,仅个别很短时段能见

度超过 10000 m .

从图 1 可以看到,15 日 00:00~16 日 16:00,经历了湿霾到雾再到湿霾的变化,然后在较长霾阶段出现多次短时轻雾时段. 17~22 日,首先出现的是霾-轻雾-湿霾到雾的转化过程,这 6 d 期间的 4 次雾过程均表现为轻雾-湿霾-雾-湿霾-轻雾的交替出现.

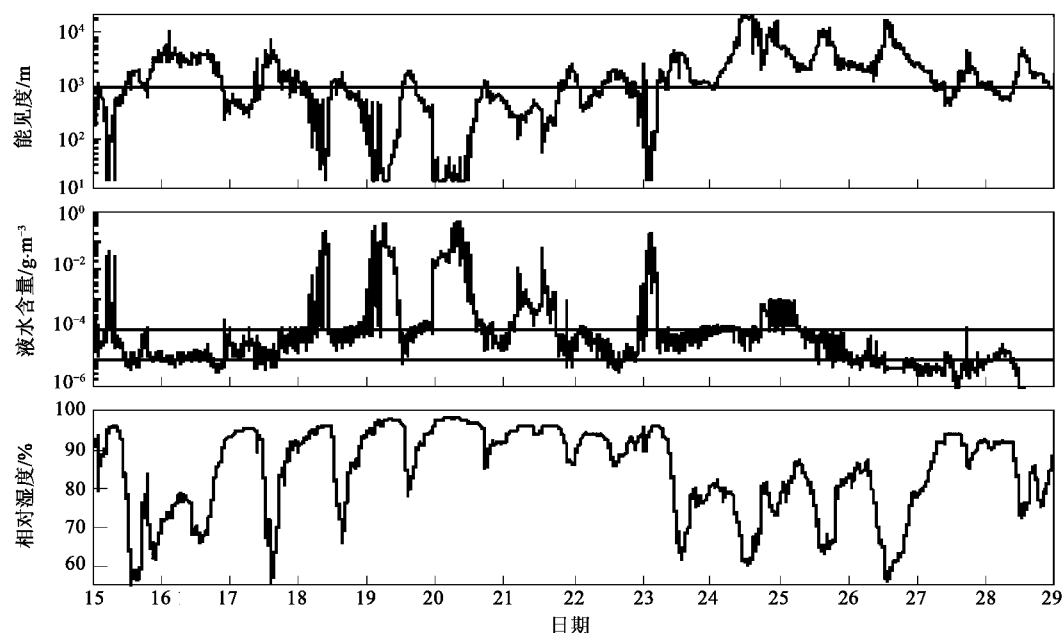


图 1 2007 年 12 月 15~29 日能见度、液水含量和相对湿度随时间的变化

Fig. 1 Temporal variations of visibility, liquid water content and relative humidity from Dec. 15 to Dec. 29 of 2007

22 日 13:00 ~ 23 日 01:00, 经历了轻雾-霾-湿霾-雾的发展过程, 23 日 05:00 后为持续轻雾. 24 日 20:00 ~ 29 日 00:00 为轻雾-霾-湿霾的发生顺序. 整体上看, 4 种天气状况的转换存在如下特点: 雾阶段前后为湿霾阶段, 连续雾霾过程中雾前湿霾阶段较雾后持续时间长. 湿霾、轻雾、霾 3 个阶段存在 2 种发生顺序: ①霾-轻雾-湿霾-轻雾-霾; ②轻雾-霾-湿霾-霾-轻雾, 其中以第一种顺序居多. 而霾和轻雾则可以直接相互转换.

3 结果与分析

3.1 粗粒子的尺度谱分布

图 2 为雾霾过程不同阶段 FM-100 雾滴谱仪测得尺度 $> 2 \mu\text{m}$ 的粗粒子 (包括雾滴和非液水粒子) 尺度谱分布. 可以看到, 雾阶段粒子谱明显宽于其他 3 个阶段, 最大直径达到 $40 \sim 50 \mu\text{m}$, 以雾滴为主. 在表面积浓度和体积浓度谱分布曲线上, 5、13 及 $21.5 \mu\text{m}$ 处分别存在峰值. 而轻雾、湿霾和霾阶段与雾阶段明显不同, 均为单峰型, 高浓度粒子均位于小滴一侧, 尺度 $> 10 \mu\text{m}$ 的粒子仅在湿霾阶段少量存

在, 说明这 3 个阶段主要以微米尺度 (吸湿) 气溶胶粒子为主.

各尺度粗粒子的数浓度、表面积浓度和体积浓度在雾阶段均明显大于其他 3 个阶段, 其中霾阶段浓度最低, 二者差 1 个数量级, 轻雾、湿霾阶段介于二者之间. 比较轻雾和湿霾的数浓度尺度谱分布曲线可以看出, 以 $4 \mu\text{m}$ 为界, 轻雾阶段尺度 $< 4 \mu\text{m}$ 的粒子数多于湿霾阶段, 而 $> 4 \mu\text{m}$ 则相反. 说明从轻雾到湿霾的转换过程中, 随着相对湿度增大, 轻雾阶段的部分 $< 4 \mu\text{m}$ 的粒子吸湿增大为湿霾阶段的尺度 $> 4 \mu\text{m}$ 的粒子, 导致湿霾阶段 $> 4 \mu\text{m}$ 的粒子浓度增大. 但粒子增大后, 聚并、沉降等过程加强, 所以相对而言, 湿霾阶段尺度 $< 4 \mu\text{m}$ 的粒子浓度减小较多, 而尺度 $> 4 \mu\text{m}$ 的粒子浓度增加较少.

从表面积谱和体积谱分布曲线来看, 尺度 $< 25 \mu\text{m}$ 的雾滴对表面积贡献最大, $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 的雾滴对体积和液水含量的贡献最大. 而湿霾、轻雾、霾的体积分布均显示 $3 \mu\text{m}$ 附近的粒子具有明显的贡献, 但在该尺度之后均没有形成峰值, 这与在美国^[24,25]和德国^[26]等地的观测结果基本一致.

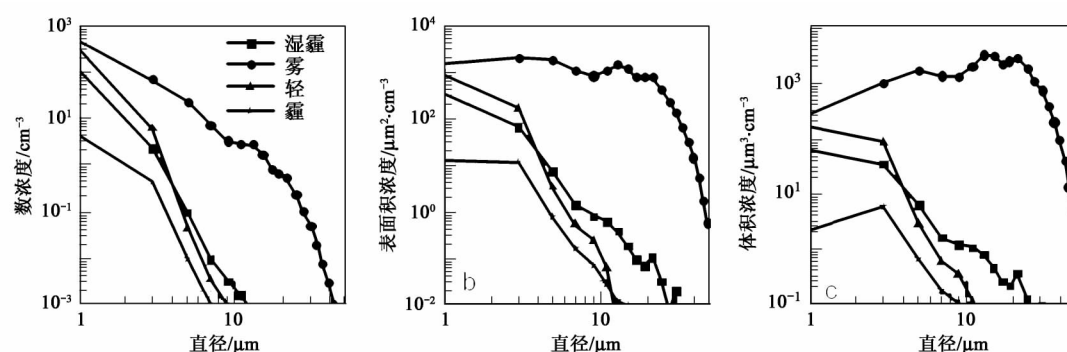


图 2 雾霾过程不同阶段粗粒子数浓度、表面积浓度和体积浓度的尺度分布

Fig. 2 Size distributions of coarse particle number, surface area and volume concentration in four weather conditions

从以上对 4 种天气状况下粗粒子谱分布的分析来看, 谱形从霾、轻雾、湿霾到雾阶段存在渐次转化的特点, 与观测期间主要出现的“霾-轻雾-湿霾-雾-湿霾-轻雾-霾”转化过程 (图 1) 对应.

3.2 细粒子的尺度谱分布

图 3 为 4 种不同天气状况下由宽范围粒径谱仪测量得到的细粒子 ($0.010 \sim 2 \mu\text{m}$) 数浓度和表面积浓度谱分布, 由于不同粒径范围测量原理不同, 因此在 $0.5 \mu\text{m}$ 造成谱的不连续. 可以看到, 雾、湿霾、轻雾、霾阶段的气溶胶谱分布特征表现出各自明显的特征. 轻雾和霾阶段细粒子数浓度谱形相似, 轻雾阶段数浓度最高, 雾和湿霾阶段峰值数浓度相当, 但雾

阶段峰值直径大于湿霾阶段.

4 个阶段细粒子数浓度最大差异出现在 $0.020 \sim 0.060 \mu\text{m}$ 范围, 从高到低依次为轻雾、霾、湿霾、雾. 雾阶段 $0.04 \sim 0.13 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度占气溶胶总粒子浓度的 51%. 湿霾阶段优势粒子的范围最宽, $0.02 \sim 0.14 \mu\text{m}$ 的粒子占总浓度的 75%. 轻雾及霾阶段优势粒子尺度范围相当, 均为 $0.02 \sim 0.06 \mu\text{m}$, 均占总粒子数浓度的 52%.

数浓度最高值在不同尺度范围与雾霾过程的不同阶段存在对应关系, $< 0.015 \mu\text{m}$ 、 $0.015 \sim 0.080 \mu\text{m}$ 和 $> 0.080 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子最高数浓度分别出现在霾、轻雾和雾阶段. 霾和轻雾中 $< 0.015 \mu\text{m}$ 的

粒子数浓度相当,均大于湿霾和雾阶段,峰值直径为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 左右,而该尺度气溶胶粒子在雾阶段最少;轻雾阶段 $>0.015\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数浓度整体高于霾阶段。 $>0.090\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子,在雾和湿霾阶段浓度相当,均大于轻雾和霾,在霾阶段最小。 $0.100\text{ }\mu\text{m}$ 以上的

粒子易活化增长,但 CCN 仅约占大陆性气溶胶粒子数的 1%,对数浓度的影响相对较小。而同时较小的粒子吸湿后易与气体污染物反应,使其干粒子尺度增大,从而不仅改变了该范围粒子的化学成分,使其吸湿性增强,同时也增加了该范围粒子的浓度。

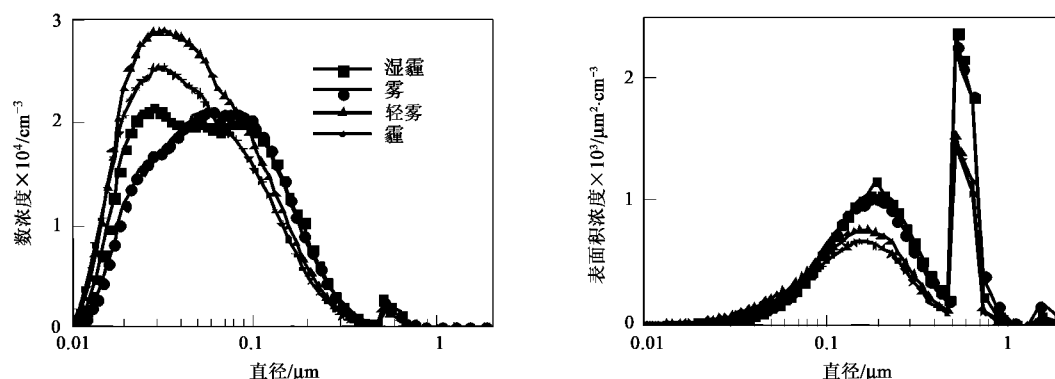


图 3 雾霾过程不同阶段细粒子数浓度和表面积浓度的尺度分布

Fig. 3 Size distributions of fine particle number and surface area concentration in four weather conditions

从霾、轻雾、湿霾到雾,以 $0.060\sim 0.090\text{ }\mu\text{m}$ 为界,小粒子减少,大粒子增多。一方面峰值从约 $0.030\text{ }\mu\text{m}$ (霾、轻雾、湿霾) 增大到 $0.055\text{ }\mu\text{m}$ (雾),另一方面谱形整体向尺度增大方向移动,单峰谱(轻雾、霾)过渡到双峰谱(湿霾、雾),湿霾阶段峰值直径为 $0.028\text{ }\mu\text{m}$ 及 $0.082\text{ }\mu\text{m}$,雾阶段峰值直径为 $0.056\text{ }\mu\text{m}$ 及 $0.076\text{ }\mu\text{m}$ 。

细粒子的表面积浓度谱分布显示出雾和湿霾阶段、轻雾和霾阶段谱形分别相似的特点,雾和湿霾阶段表面积浓度整体上大于轻雾和霾阶段,主要差异出现在 $>0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的尺度范围, $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 处差异最大。

3.3 细粒子的微物理特征量

表 3 列出了雾霾过程不同阶段细粒子的微物理特征量。可以看到,就气溶胶粒子总数浓度而言,雾阶段最低,为 $20\ 256.45\text{ cm}^{-3}$,轻雾阶段最大,为 $26\ 113.27\text{ cm}^{-3}$,湿霾与霾阶段介于二者之间。可能是由于雾滴对气溶胶粒子的清除作用较强,而轻雾阶段雾滴较少,清除不明显。而轻雾主要出现在 18 ~ 24 日,多在雾阶段之后出现, Pandis 等^[13] 的研究认为,当多次雾过程连续出现时,由于雾中非均相化学反应过程,易造成雾后气溶胶粒子增多。表 3 中表面积浓度与体积浓度在雾与湿霾阶段高于其他 2 个阶段,在霾阶段最小。3 种特征直径的平均值均以雾阶段最大,湿霾阶段与之相当,轻雾与霾阶段最小。

表 3 雾霾过程不同阶段细粒子微物理特征量

Table 3 Microphysical characteristics of fine particles in four weather condition

特征量	数浓度 $/\text{cm}^{-3}$	表面积浓度 $/\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$	体积浓度 $/\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	算术平均直径 $/\mu\text{m}$	均方根直径 $/\mu\text{m}$	均立方根直径 $/\mu\text{m}$
雾	平均值	20 256.45	253.50	64.62	0.094	0.134
	最大值	82 569.61	739.85	313.03	0.213	0.345
湿霾	平均值	22 005.90	252.74	58.12	0.089	0.129
	最大值	75 543.08	605.17	109.82	0.138	0.157
轻雾	平均值	26 113.27	190.13	37.94	0.069	0.100
	最大值	77 881.18	465.96	92.44	0.118	0.168
霾	平均值	22 645.79	165.05	33.52	0.071	0.104
	最大值	56 610.52	346.57	69.70	0.133	0.196

为进一步说明雾霾过程不同阶段气溶胶微物理特征的变化情况,图 4 给出了观测期间 $0.01\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 粒子数浓度和 $0.5\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 细粒子数浓度及均方

根直径随时间的变化。 $0.01\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 尺度范围的粒子数浓度与均方根直径呈显著负相关关系(Pearson 相关系数 $r = -0.64$, 信度 $\alpha = 0.00$),即气溶胶粒子

总数浓度的增多主要决定于粒径较小的粒子数浓度. 虽然整个观测期间气溶胶粒子总数浓度相对差异不大, 但 18~21 日连续雾霾转换天气过程期间, 直径在 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数浓度 (图 4) 明显高于其他时段, 这一范围的粒子属于大气中最为稳定、能直接危害人体呼吸系统的积聚模态粒子^[27]. 其高浓度一方面是因为雾滴吸收可溶性气体、并合气溶胶粒子使其化学成分改变、尺度增大, 从而在雾消散时雾滴蒸发形成该尺度范围的粒子; 另一方面还与连续雾日近地层大气稳定, 不利于气溶胶粒子扩散有关. 18~21 日气溶胶的均方根直径在 $0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$ 之间, 大于观测期间其他时段 $<0.12 \mu\text{m}$ 的平均值.

以上结果说明, 雾霾过程的不同阶段对气溶胶

粒子的微物理特征产生明显影响. 雾的发展使大气气溶胶中小粒子减小, 大粒子增多. 一般来说, 雾形成时部分气溶胶粒子被活化增长成雾滴, 但随着雾滴尺度和含水量的增大, 雾滴通过核化、碰并、黏附等过程对气溶胶粒子的湿清除加剧, 进入雾滴的气溶胶粒子随雾滴的沉降而移出大气到达地面. 但在雾的整个过程中, 雾滴通过非均相化学反应过程产生大量新的吸湿性气溶胶粒子, 同时新生成的吸湿性粒子还有利于下次雾霾过程的发生. 从而造成了 23 日雾阶段结束后, 连续数日能见度持续较低. 因此, 虽然雾发生时气溶胶粒子浓度相对于湿霾、轻雾和霾较低, 但连续性雾霾过程则易产生高浓度的颗粒物污染.

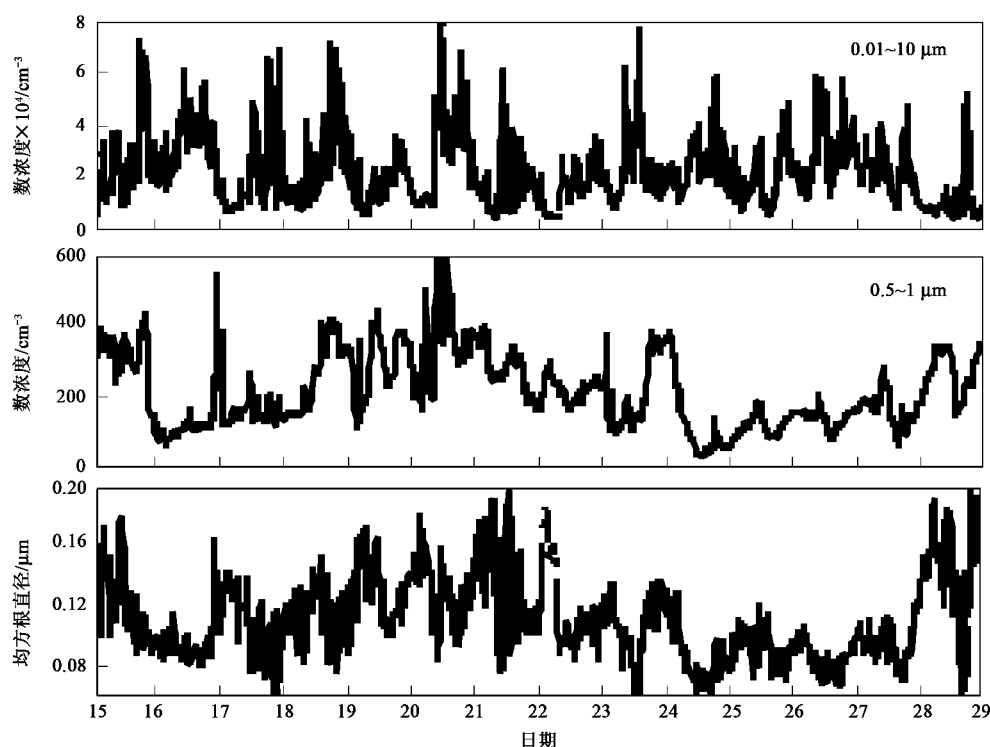


图 4 2007 年 12 月 15~29 日气溶胶粒子数浓度及均方根直径随时间的变化

Fig. 4 Temporal variations of aerosol number concentration and root mean diameter from Dec. 15 to Dec. 29 in 2007

4 结论

(1) 根据能见度和液水含量的不同, 可将连续雾霾过程划分为雾、湿霾、轻雾和霾 4 个阶段, 其主要发生顺序为霾 $\longleftrightarrow$ 轻雾 $\longrightarrow$ 湿霾 $\longrightarrow$ 雾 $\longrightarrow$ 湿霾 $\longrightarrow$ 轻雾 $\longleftrightarrow$ 霾, 雾前湿霾阶段持续时间长于雾后.

(2) 雾阶段粗粒子数浓度、表面积浓度和体积浓度均明显大于其他 3 个阶段, 其中霾阶段浓度最

低. 雾、霾阶段 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的粒子数浓度相差 1 个数量级. 雾滴表面积浓度和体积浓度谱在 5、13 及 $21.5 \mu\text{m}$ 处分别存在峰值, 对雾水体积和液水含量的贡献最大的尺度范围为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$. 而轻雾、湿霾和霾阶段粗粒子谱均为单峰型.

(3) 细粒子表面积浓度在雾和湿霾阶段、轻雾和霾阶段尺度分布分别相似, 雾和湿霾阶段数浓度占优势的细粒子尺度范围分别为 $0.04 \sim 0.13 \mu\text{m}$ 和 $0.02 \sim 0.14 \mu\text{m}$, 轻雾及霾阶段优势粒子尺度范

围相当,均为 $0.02 \sim 0.06 \mu\text{m}$. 4 个阶段数浓度最大差异出现在 $0.020 \sim 0.060 \mu\text{m}$ 范围,从高到低依次为轻雾、霾、湿霾、雾. $< 0.015 \mu\text{m}$ 、 $0.015 \sim 0.080 \mu\text{m}$ 和 $> 0.080 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子最高数浓度分别出现在霾、轻雾和雾阶段. 从霾、轻雾、湿霾到雾的转换过程中,以 $0.060 \sim 0.090 \mu\text{m}$ 为界,小粒子减少,大粒子增多.

(4) 雾霾演变过程中,细粒子的数浓度与平均直径整体上呈显著负相关关系. 总数浓度在轻雾阶段最高、雾阶段最低、霾和湿霾阶段相当. 总表面积和体积浓度最高为雾和湿霾阶段,轻雾和霾阶段依次减小. 雾和湿霾阶段的气溶胶粒子平均尺度相当,轻雾与霾阶段最小.

参考文献:

- [1] 李丽珍,沈振兴,杜娜,等. 霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性粒子特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, **24**(5): 674-679.
- [2] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [3] Shi C E, Roth M, Zhang H, *et al.* Impacts of urbanization on long-term variation of fog in Anhui Province, China[J]. Atmos Environ, 2008, **42**(36): 8484-8492.
- [4] 林建,杨贵名,毛冬艳. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(2): 171-181.
- [5] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 1-9.
- [6] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, *et al.* Fog Research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure Appl Geophys, 2007, **164**(6): 1121-1159.
- [7] 石春娥,姚克亚,马力. 气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2001, **6**(4): 485-492.
- [8] 石春娥,杨军,邱明燕,等. 从雾的气候变化看城市发展对雾的影响[J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(3): 327-336.
- [9] Mohan M, Payra S. Influence of aerosol spectrum and air pollutants on fog formation in urban environment of megacity Delhi, India[J]. Environ Monit Assess, 2009, **151**(1-4): 265-277.
- [10] 李子华,彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性[J]. 气象学报, 1994, **52**(4): 477-483.
- [11] Bott A. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life-cycle of radiation fogs[J]. Boundary-Layer Meteorol, 1991, **56**(1): 1-31.
- [12] Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. Heterogeneous sulfate production in an urban fog[J]. Atmos Environ, 1992, **26**(14): 2509-2522.
- [13] Pandis S N, Pilinis C, Seinfeld J H. The smog-fog-smog cycle and acid deposition [J]. J Geophys Res, 1990, **95** (D11): 18489-18500.
- [14] Jacob D J, Waldman J M, Munger J W, *et al.* A field investigation of physical and chemical mechanisms affecting pollutant concentrations in fog droplets [J]. Tellus, 1984, **36** (B4): 272-285.
- [15] 周自江,朱燕君,鞠晓慧. 长江三角洲地区的浓雾事件及其气候特征[J]. 自然科学进展, 2007, **17**(1): 66-71.
- [16] Eugster W, Burkard R, Holwerda F, *et al.* Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest [J]. Agr Forest Meteorol, 2006, **139**(3-4): 288-306.
- [17] 刘端阳,濮梅娟,杨军,等. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微物理结构及演变特征 [J]. 气象学报, 2009, **67**(1): 147-157.
- [18] Gao J, Wang T, Zhou X, *et al.* Measurement of aerosol number size distributions in the Yangtze River delta in China: Formation and growth of particles under polluted conditions [J]. Atmos Environ, 2009, **43**(4): 829-836.
- [19] QX/T48-2007,地面气象观测规范,第 4 部分:天气现象观测[S].
- [20] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric science: An introductory survey[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006. 209-215.
- [21] Gultepe I, Milbrandt J A. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project[J]. Pure Appl Geophys, 2007, **164**(6): 1161-1178.
- [22] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models[J]. J Appl Meteorol, 1984, **23**(1): 34-41.
- [23] Ahrens C D. Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment[M]. Florence: Cengage Learning, 2007. 61-76.
- [24] Eldridge R G. Haze and fog aerosol distributions [J]. J Atmos Sci, 1966, **23**(5): 605-613.
- [25] Eldridge R G. The relationship between visibility and liquid water content in fog [J]. J Atmos Sci, 1971, **28**(7): 1183-1186.
- [26] Pinnick R G, Hoihjelle D L, Fernandez G, *et al.* Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared extinction [J]. J Atmos Sci, 1978, **35**(10): 2020-2032.
- [27] 章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京:气象出版社, 1995. 48-50.