

南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响

尚倩¹, 李子华¹, 杨军¹, 濮梅娟^{2*}

(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. 江苏省气象局, 南京 210008)

摘要:2009年11~12月采用宽范围气溶胶粒径谱仪(WPS)、自动气象站和能见度仪等高分辨率仪器对南京北郊气溶胶粒子的谱分布特征与气象因子的关系及其对大气能见度的影响进行研究. 结果表明, 数浓度谱呈双峰分布, 主峰集中在 $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$; 质量浓度谱的2个主峰位于 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \mu\text{m}$ 左右; 表面积谱的2个主峰分别位于 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 之间. 气溶胶浓度存在明显的日变化和日际变化, 日变化主要与人类活动及大气边界层状况有关, 而日际变化主要受降水、风、相对湿度等气象条件的影响; 粒子数浓度分布受相对湿度(RH)的影响较显著, 当 $\text{RH} < 54\%$ 时, 随着RH增大, 直径 $< 1 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度增加, 而直径 $> 1 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度几乎无变化, 当相对湿度 $> 54\%$ 时, 随着RH增大, $0.01 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内粒子数浓度降低, $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 之间的粒子数浓度明显增加; 雨、雾、晴和灰霾天气状态下气溶胶粒子谱分布各异, 雨天各尺度档数浓度与晴天相比都有减少, 雾天 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围的气溶胶粒子数浓度比晴天低, 而 $0.3 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 之间的粒子数浓度高于晴天, 降雨和浓雾对粗粒子的清除作用依次比核模态和积聚态粒子大; 灰霾天气气溶胶粒子谱的峰值略向大粒径方向偏移, $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间的粒子数浓度比晴天低, 而 $0.1 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 范围内粒子数浓度高于晴天; 根据Mie理论, 对能见度和不同粒径段气溶胶粒子的表面积浓度进行相关性分析, 发现 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间的粒子表面积浓度与能见度相关性较好, 是导致南京地区能见度降低的主要因素.

关键词:气溶胶粒子; 尺度谱; 气象因子; 能见度; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2750-11

Size Distributions of Aerosol Particles and the Impact on Visibility in Winter of Nanjing

SHANG Qian¹, LI Zi-hua¹, YANG Jun¹, PU Mei-juan²

(1. The Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Meteorology Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract: High resolution instruments were used to investigate the relationship between aerosol size distribution characteristics and meteorological factors, and its possible influence on visibility in urban Nanjing from November to December 2009. Results show that the size distribution of aerosol number concentration showed a bimodal shape with the main peak value concentrating at particle sizes of $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$. Mass concentration distribution presented a bimodal shape with the two peak values concentrating at particle sizes of $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ and $2.7 \mu\text{m}$, and the surface area concentration distribution presented two peaks from 0.1 to $0.5 \mu\text{m}$ and from 0.5 to $0.9 \mu\text{m}$. It is found that the diurnal and interdiurnal variations of particle concentrations are obvious. Human activities and variation of atmospheric stability had great effect on daily variation of particle concentrations, while meteorological conditions such as precipitation, wind, relative humidity and so on had strong influence on interdiurnal variation. The aerosol size distribution was significantly affected by relative humidity. When RH was lower than 54% , number concentration of aerosol particles less than $1 \mu\text{m}$ in diameter increased gradually as RH increased, and concentration of particles with diameter larger than $1 \mu\text{m}$ almost had no change. When RH was higher than 54% , number concentration of aerosol particles ranging from 0.01 to $0.2 \mu\text{m}$ and from 2.7 to $10 \mu\text{m}$ decreased with the increase of RH, in contrast, concentration of aerosol particles between 0.5 and $1.5 \mu\text{m}$ in diameter increased. In addition, the particle number size distributions were different in rainy, foggy, sunny and haze weather conditions. Compared to sunny day, concentration of particles with different sizes all decreased in rainy day. In foggy weather, The number concentration of aerosol particles ranging from 0.01 to $0.3 \mu\text{m}$ and from 2.7 to $10 \mu\text{m}$ decreased, and aerosol particles between 0.3 and $2.7 \mu\text{m}$ increased in comparison with sunny day. Scavenging action of rain and fog to particles of different sizes from high to low was that coarse particles $>$ nuclei mode particles $>$ accumulation mode particles. In haze day, the peak of number concentration distribution moved toward a higher value. Compared to sunny day, the number concentration of aerosol particles ranging from 0.03 to $0.1 \mu\text{m}$ decreased, and aerosol particles between 0.1 and $2.7 \mu\text{m}$ increased in haze day. Based on Mie theory, the correlation between visibility and surface area concentration with different particle sizes indicated that particles between 0.1 and $2 \mu\text{m}$ in diameter shows a good correlation with visibility, which was the major contributor to visibility degradation in Nanjing.

Key words: aerosol particles; size distribution; meteorological factors; visibility; Nanjing

收稿日期: 2010-11-17; 修订日期: 2011-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40975085); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906012); 江苏省重大科技支撑与自主创新示范工程项目(BE2008618)

作者简介: 尚倩(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理学与大气环境, E-mail: victorminqian@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pumeijuan@126.com

大气气溶胶是影响辐射传输的一个重要因素,它不但吸收和散射太阳辐射,影响大气的光学性质,改变大气能见度,而且对地气系统的辐射能量平衡也有重要影响.特别是 $\text{PM}_{2.5}$ 细粒子,不仅通过消光作用造成大气能见度下降,而且还是聚集大量有毒有害物质的复杂污染物,危害人体的健康^[1,2].鉴于气溶胶在环境、气候、健康等很多方面起着重要作用,连续监测气溶胶颗粒物谱分布具有重要意义.气溶胶粒子在大气环境中的行为取决于其粒径大小及其谱分布特征,认识气溶胶颗粒物的粒径分布特征是研究气溶胶污染的基础^[3].气溶胶对能见度的影响主要取决于其光学性质,气溶胶粒子的吸收和散射等光学特性由其微物理特征决定^[4],包括气溶胶数浓度、谱分布及复折射率等.气溶胶颗粒物对人体健康影响研究更加关注颗粒物数浓度,尤其是超细粒子的数浓度^[5].所以研究气溶胶粒子的数浓度变化规律和谱分布特征,对于揭示其形成机制和来源及对大气能见度的影响极为重要.2013 年亚洲青少年运动会和 2014 年青少年奥林匹克运动会将在南京举行,南京市及周边地区正在大力治理空气环境,本研究将为净化南京空气质量提供科学依据.

近年来,我国许多城市 $\text{PM}_{2.5}$ 细粒子污染严重,且呈现加重的趋势^[6],在区域特定的大气环境过程影响下,能形成大范围的严重污染事件^[7].分析卫星遥感和地面气象站观测资料发现,我国东部发达城市人口密集地区灰霾天气比较严重^[8].华东地区霾日数呈现出逐渐增多的年际变化特征^[9].南京作为长江三角洲城市群三大中心城市之一,也受到了霾天气的严重影响.研究表明,南京地区 20 世纪 70 年代中期至 90 年代中期,工业和城市化大发展,空气质量下降,霾日急剧增加^[10].环境监测资料显示^[11],1965~2005 年这 40 a 来,南京的能见度逐年下降,从 6.5 km 降到 4 km. $\text{PM}_{2.5}$ 细粒子污染对城市灰霾的形成及能见度的恶化有极大贡献^[12].

目前国外开展了粒子谱分布与能见度、气溶胶光学厚度及化学组分之间的关系研究,并考察了五大源类(硫酸盐、硝酸盐、元素碳、有机碳和地壳物质)对能见度的贡献^[13-15].国内也相继开展粒子谱分布观测研究^[16-21],黄书华等^[22]研究了夏季高湿度气象条件对气溶胶颗粒物粒子谱特征的影响;张涛等^[23]分析了颗粒物数浓度和质量浓度粒径分布特征,并探讨了其与能见度的相互关系;段菁春等^[24]开展了不同粒径颗粒物中化学成分的观测研究;时宗波等^[25]分析了雾过程对北京市大气颗粒物

理化特征的影响.但针对不同相对湿度条件下,粒子谱的演变特征及不同天气状况下粒子谱变化情况及其对能见度的影响还鲜有研究;此外,由于以上研究受仪器测量范围的限制,不能反映尺度更小粒子的变化特征及与能见度的关系.本研究利用测量范围更广的 WPS 仪器获得的气溶胶粒子谱资料,对气溶胶尺度谱分布特征、浓度变化情况进行分析,结合能见度及气象参数等数据,重点研究了气溶胶粒子谱变化与相对湿度之间的关系,并详细分析了雨天、晴天、雾天及霾天不同天气状况下粒子谱的相对变化情况,最后根据 Mie 理论,对能见度和不同粒径段气溶胶粒子的表面积浓度进行相关性分析,以期对能见度预报及大气环境治理提供科学依据.

1 仪器简介及资料概况

使用美国 MSP 公司的宽范围气溶胶粒径谱仪(WPS)观测气溶胶粒子谱分布和数浓度.该仪器可以对空气动力学直径为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 的气溶胶颗粒进行自动计数和粒径分级,同时可以用于计算颗粒物的表面积浓度、体积浓度及质量浓度,其中质量浓度由体积浓度和假定的气溶胶密度(1 g/cm^3)计算获得^[26].仪器主要由微分电迁移率分析仪(DMA)、凝结核计数器(CPC)和激光散射粒谱仪(LPS)三部分组成.DMA 的工作原理是利用动态电场对颗粒物进行不同粒径的分类,而 CPC 则是利用工作液的凝聚和凝结液滴的增长来测定颗粒物的数浓度.两者联合使用的测量范围为 $0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$,共分为 48 个通道.激光散射粒谱仪(LPS)利用通过单个粒子的散射光强度测量颗粒物的大小,测量范围为 $0.35 \sim 10 \mu\text{m}$,分为 24 个通道.由于测量原理的不同,在以上交叉测量范围内($0.35 \sim 0.5 \mu\text{m}$)的观测值有所差异.样品空气由一个普通进样口在 1.0 L/min 的流量下进入分析仪器,其中 0.70 L/min 的样品空气进入激光散射粒谱仪, 0.3 L/min 的样品空气进入微分电迁移率分析仪,再进入凝结核计数器.观测中使用的时间分辨率为 5 min ,即 5 min 内仪器扫描 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径范围并测量出气溶胶粒子的个数.仪器内部配备有干燥管,当环境相对湿度 $> 80\%$ 时,外接干燥剂管道,并将仪器内部的相对湿度控制在 50% 以下.雨雾天测量时仪器采样口朝下,以保证雨滴不能进入,雾天测量结果包括气溶胶粒子和干燥后的雾滴.数据处理时进行质量控制,剔除了部分无效数据.在观测前和观测期间对仪器进行定期标定,以确保测量结果准确可靠.

本试验还利用自动气象站同步测量各气象要素,包括温度、气压、风速、风向、相对湿度(RH)和总辐射量等. 另外还利用 HY-ZH1A 前向散射能见度仪进行能见度在线测量. 自动气象站和能见度仪 24 h 连续测量,时间分辨率均为 1 min. 观测时间是 2009-11-24 ~ 2010-01-03. 观测地点为中国气象局气象综合观测培训实习基地(南京),位于南京市北郊南京信息工程大学校园内. 分析中使用的气溶胶资料是 30 个有效观测日的测量结果,共 5 504 组数据. 数据处理分别采用小时平均和日平均.

表 1 不同时期南京地区气溶胶粒子数浓度特征比较¹⁾

时间 (年·月·日)	平均值 /个·cm ⁻³	最大日均数浓度 /个·cm ⁻³	最小日均数浓度 /个·cm ⁻³	仪器	文献
1993-11-15 ~ 1993-12-10	135.5	247.2	33.0	LG-83	[27]
2006-12-01 ~ 2006-12-29	565.7	1 178.2	196.2	WPS	[26]
2009-11-26 ~ 2009-12-30	733.5	2 442.7	188.7	WPS	本研究

1)表中粒径为 0.3 ~ 10 μm 的气溶胶颗粒物

和 2.1 倍. 可见近十几年来,随着城市化进程的加快,南京北郊气溶胶颗粒物数浓度有明显增加趋势.

表 2 列出了观测期间 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的数浓度及质量浓度. PM₁₀ (0.01 ~ 10 μm) 平均质量浓度为 118 μg/m³, 平均数浓度 12 101.5 个/cm³. PM₁₀ 质量浓度和数浓度的最大日均值分别是它们的 3 和 2.3 倍. PM_{2.5} (0.01 ~ 2.5 μm) 的平均质量浓度和数浓度分别为 78 μg/m³、12 100.8 个/cm³, PM_{2.5} 细粒子与 PM₁₀ 的数浓度相差很小,占 PM₁₀ 数浓度的 99.9%. PM_{2.5}/PM₁₀ 质量分数的平均值为 66.1%, 可见大粒子数虽少,却在质量浓度中贡献较大. 如果 PM₁₀ 按国家二级标准^[28] (150 μg/m³), PM_{2.5} 参照 2006 年美国环境保护署 (USEPA) 颁布的日均标准 (35 μg/m³) 来衡量^[29], PM₁₀ 和 PM_{2.5} 超标日数分别占总观测天数的 20% 和 87%, 可见 PM_{2.5} 细粒子的污染相对较严重. 南京北郊是化工、钢铁、能源等工业的集中区,工业废气和烟尘以及汽车尾气的排放形成了煤烟型与石油型并重的复合型污染^[26]. 汽车尾气的直接排放及通过光化学反应形成的二次气溶胶细粒子,以及来自城市旧房改造、房屋拆迁和建筑施工排放的扬尘和建筑尘^[30], 都是 PM_{2.5} 的重要来源. 另外煤炭燃烧直接排放出大量粒径较小的一次粒子,同时排放的大量 SO₂ 气态污染物经反应后也可形成粒径较小的二次粒子^[31]. PM_{2.5} 目前是我国城市大气环境的首要污染物,我国新颁布的污染物排放标准迫切需要对细粒子的排放进行有效的控

2 PM₁₀与 PM_{2.5}污染水平及其关系

表 1 给出了粒径为 0.3 ~ 10 μm 的气溶胶颗粒物数浓度变化的相关统计数据. 本次观测期间 0.3 ~ 10 μm 范围内粒子的平均数浓度为 733.5 个/cm³, 最大日均数浓度为 2 442.7 个/cm³, 最小日均数浓度为 188.7 个/cm³. 与 1993 年^[27]、2006 年^[26] 的观测结果相比, 0.3 ~ 10 μm 范围内的粒子数由 135.5 个/cm³ 上升到 733.5 个/cm³, 约增大 5 倍, 日均最大数浓度分别近似为 1993 年、2006 年的 10 倍

制. 虽然现有除尘装置的除尘效率可达 99% 以上, 但这些除尘器对细粒子的捕获率较低, 仍有大量的细粒子进入大气中, 构成大气气溶胶的主要部分. PM_{2.5} 细粒子对气候和人类生活影响极大. 轻雾、霾等低能见度现象的频繁发生也与大气细颗粒物污染加重有关^[12].

表 2 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 日均数浓度及质量浓度
Table 2 PM₁₀ and PM_{2.5} daily mean number concentration and mass concentration

项目	粒径范围	平均值	最大值	最小值
数浓度/个·cm ⁻³	PM _{2.5}	12 100.8	27 592.7	1 190.9
	PM ₁₀	12 101.5	27 593.7	1 191.2
质量浓度/μg·m ⁻³	PM _{2.5}	78	296.1	10.1
	PM ₁₀	118	361.1	14.4

3 气溶胶粒子谱分布特征

气溶胶粒子按照其尺度可以大致分为 3 种模式: 直径 < 0.1 μm 的称为爱根核模式, 直径在 0.1 ~ 2 μm 之间的称为积聚模式, 直径 > 2 μm 的称为粗粒子模式. 由于细粒子的数浓度通常很大, 数浓度谱能较好的反映小粒径粒子的情况, 可以用数浓度谱对其加以研究. 而直径 > 2 μm 的粗粒子, 数浓度通常很小, 数浓度谱很难反映粗粒子的分布特征, 但其表面积浓度和质量浓度较大, 可以用表面积谱和质量谱对其进行研究.

图 1(a) 是观测期间气溶胶粒子的平均谱分布,

可看出在直径 $0.01 \sim 10\mu\text{m}$ 范围内数浓度谱有两个峰值,第一个峰出现在核模态粒子区,中心位于 $0.04 \sim 0.1\mu\text{m}$,峰值直径是 $0.05\mu\text{m}$. 在粒子直径 $>0.1\mu\text{m}$ 的积聚态粒子区,粒子数密度随着粒子直径的增大迅速减小. 第二个峰出现在粗粒子区,中心位于 $2 \sim 3.3\mu\text{m}$,峰值较小. 其中核模态粒子约占总数浓度的 64%,主要是由污染气体经过复杂的多相大气化学反应转化而成,或者由高温下排放的过饱和气态物质冷凝而成^[16]. $0.1 \sim 2\mu\text{m}$ 范围内的积聚态粒子数约占 35%,除直接生成源外,积聚模态粒子主要来自于核模态粒子的凝聚并长大^[32]. $2 \sim 10\mu\text{m}$ 的粗模态粒子数仅 $2\text{个}/\text{cm}^3$. 约 98.9% 的粒子集中在粒径 $<0.6\mu\text{m}$ 的范围内. 吴兑等^[12] 的研究表明,能见度的恶化主要与细粒子关系比较大,尤其是出现较重气溶胶污染导致低能见度事件出现时,细粒子的比重会更大.

对比国内外其他地区大气气溶胶粒子数浓度谱分布(见表 3)可知,国外 3 个地区数浓度谱的主峰都出现在直径 $<0.1\mu\text{m}$ 的细粒子段. 我国城市峰值主要出现在积聚模态,合肥的峰值中心大约在 $0.7\mu\text{m}$ 左右,北京的峰值在 $0.5 \sim 0.7\mu\text{m}$,沈阳地区在粒径约 $0.3\mu\text{m}$ 附近达到一个极大值,天津的主峰出现在 $0.30 \sim 0.35\mu\text{m}$ 之间. 对比以上地区,泰山、黄山、南京的峰值要偏向较小的粒子.

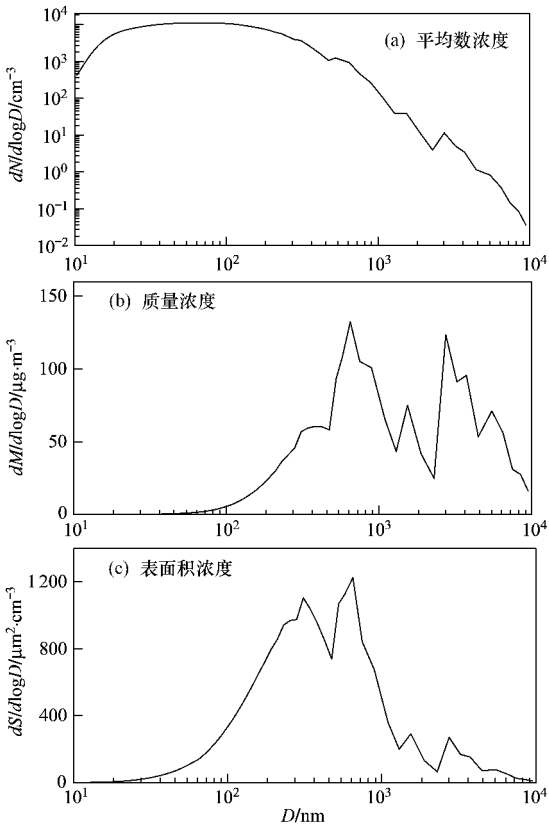


图1 大气气溶胶粒子平均数浓度、质量浓度和表面积浓度谱分布
Fig.1 Size distribution of mean number, mass and surface area concentration

表 3 不同地区气溶胶粒子数浓度谱分布峰值范围				
Table 3 Aerosol modal locations of the size distribution of mean number concentration in different areas				
地点	第 1 峰值中心/ μm	第 2 峰值中心/ μm	仪器	文献
德国 Erfurt 地区	0.016 ~ 0.025	0.158 ~ 0.251	MAS	[33]
德国 Leipzig 地区	0.01 ~ 0.02	—	Twin DMPS	[32]
爱沙尼亚 Tahkuse 天文台	0.035 ~ 0.06	—	EAS	[34]
黄山	0.04 ~ 0.12	—	WPS	[16]
泰山	0.02 ~ 0.08	0.15 ~ 0.3	WPS	[17]
合肥	0.6 ~ 0.8	—	APS-3321	[18]
北京	0.5 ~ 0.7	—	BCJ-1	[19]
沈阳	0.2 ~ 0.4	—	Grimm180	[20]
天津	0.30 ~ 0.35	0.50 ~ 0.58	GRIMM1.109#	[21]
南京	0.04 ~ 0.1	2 ~ 3.3	WPS	本研究

图 1(b)给出了气溶胶质量谱,具有 2 个主峰,自左向右第 1 主峰出现在积聚态粒子区域,中心位于 $0.5 \sim 0.7\mu\text{m}$ 处,第 2 主峰出现在粗模态粒子区域,中心位于 $2.7\mu\text{m}$ 左右,另外在 $1.5\mu\text{m}$ 处还出现一个较小的峰. 比较图 1(a)和图 1(b)可知,直径 $<0.1\mu\text{m}$ 的核模态粒子数浓度虽然很高,但质量浓度仅为 $0.8\mu\text{g}/\text{m}^3$,约占总质量浓度的 1%,对质量

浓度的贡献率很小. 积聚模态粒子不论在数浓度谱还是质量浓度谱中都占有较高的比例,质量浓度约占 63.85%,对质量浓度的贡献率较大. 另外分析图 1(a)和图 1(b)发现, $2 \sim 10\mu\text{m}$ 粗模态范围内粒子虽然数浓度很小,但约占总质量浓度的 35.5%. 由于煤烟型污染城市大气气溶胶体积谱最大峰值总是出现在粗模态粒子区,而质量谱与体积谱的变化规

律相似,南京的质量谱更偏向细粒子区,说明南京的空气污染已从单一的煤烟型污染转化成煤烟型与石油型并重的复合型污染.

图 1(c) 是气溶胶粒子的平均表面积浓度谱分布,可看出表面积谱近似成双峰分布. 自左向右第一峰位于直径 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间,其表面积浓度约占总表面积的 52%,第二峰出现在直径 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 之间,约占总表面积的 27%. 另外在 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \mu\text{m}$ 附近出现 2 个较小的峰. 直径位于 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 10 \mu\text{m}$,其表面积浓度所占比例很小,分别为 8.2% 和 6.3%. 可见, $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内的积聚模态粒子对表面积浓度的贡献最大,该范围内粒子的大小和可见光波长相比拟,对光的散射效率很大,直接影响大气能见度.

4 气溶胶粒子的日变化特征

图 2 是气溶胶粒子数浓度、质量浓度以及表面积浓度的平均日变化情况. 可看出三者的变化趋势基本一致,呈有规律的双峰结构,主要是与人类活动及大气边界层状况的变化有很大关系. 在早上 08:00~09:00 出现第 1 个峰值,该时段是人类活动、工业生产、交通运输的高峰期,另外早上大气层结稳定,垂直方向湍流输送比较弱,排放的污染物容易堆积在近地面. 随着太阳辐射逐渐增强,地面增温较快,混合层高度升高,利于污染物的扩散和输送,气溶胶粒子浓度逐渐下降,14:00 时达到最低值. 之后气溶胶粒子浓度逐渐增加,晚上 17:00~19:00 之间达到第 2 个峰值,该时段正处于下班的高峰期,可见这与人为活动的加剧也有密切关系. 夜间虽有边界层逆温结构的影响,垂直湍流输送大大减弱,但由于人类活动急剧减少,所以气溶胶粒子浓度仍逐渐下降,质量浓度在凌晨 03:00,数浓度和表面积浓度在 05:00 左右达到最小值.

5 气溶胶粒子数浓度、谱分布与气象条件的关系

图 3 是不同相对湿度条件下气溶胶粒子数浓度谱分布情况. 可看出气溶胶粒子的数浓度与相对湿度有密切的联系. 由图 3(a) 可见,在相对湿度低于 54% 的情况下,随着相对湿度增加,直径 $< 1 \mu\text{m}$ 的细粒子数浓度缓慢增加,而直径 $> 1 \mu\text{m}$ 的粒子浓度几乎没有变化. 这是由于气溶胶粒子在相对湿度 $> 35\%$ 时,便能吸附水汽凝结增长^[35],随着相对湿度的进一步增大,气溶胶吸附水汽的能力更为显著,使得原来低于粒子计数器测量下限的小粒子吸湿增

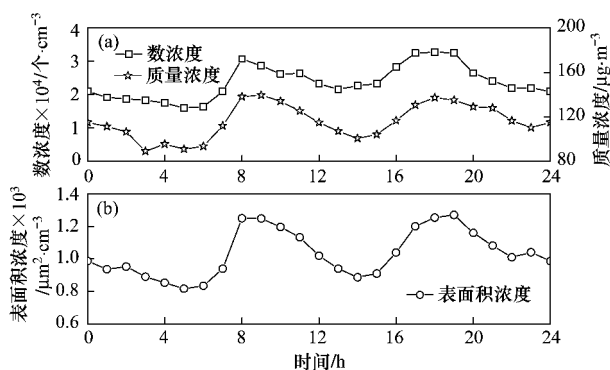


图 2 PM_{10} 数浓度、质量浓度和表面积浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variations of PM_{10} number, mass and surface area concentration

长到可测范围使其数浓度增大^[20];另外,相对湿度增大,提高了气溶胶颗粒表面的水份含量,有利于周围大气中的活性气体如 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 O_3 等发生气粒转化过程,此过程可以通过均相凝结形成新粒子,也可以是在现有粒子上的凝结(非均相凝结),有研究指出,95% 的粒子质量来源于非均相凝结,生成的气溶胶颗粒粒径主要集中在 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 范围^[36]. 尺度 $> 1 \mu\text{m}$ 的粒子由于增长的速度较慢,尺度增大较困难,数浓度基本上无变化. 当相对湿度 $> 54\%$ 时,气溶胶小粒子数浓度随着相对湿度的增大而减小,数浓度谱的变化比较显著[图 3(b)]. 当相对湿度从 54% 变化到 92% 时, $0.01 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 范围内粒子数浓度减小幅度达到 2~7 倍,而直径在 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 之间的粒子浓度则明显增加. 这是由于气溶胶的尺度分布通过气粒转化和聚合而演变. 当相对湿度接近 54% 时,随着气溶胶粒子浓度的升高,由于布朗运动或小尺度湍流扩散引起的碰并率也随之增高,而且气溶胶粒子的碰并在粒子尺度不均匀时要比近于相同大小时要快^[37],因而较小的核模态粒子的浓度下降较明显,粒子碰并形成大粒子的机会增多,尺寸较大的粒子浓度相对增加,但增加的幅度较小. 在直径为 $2.7 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内,气溶胶粒子的数浓度随相对湿度的增加而降低. 这是由于粗粒子吸湿后易通过湍流和随机碰并而进一步增大,但又因重力沉降而清除,因此数浓度反而减少. 由于核模态粒子在总数浓度中占主导,在相对湿度 $> 54\%$ 之后,随着相对湿度的继续增加,总数浓度是减少的.

图 4 是观测期间,剔除雨天和雾天的资料后所有相对湿度的小时平均值和对应时刻 PM_{10} 数浓度小时平均值的散点图,可看出相对湿度与数浓度的关系是非线性的. 在相对湿度 $< 50\%$ 的区间,两者正

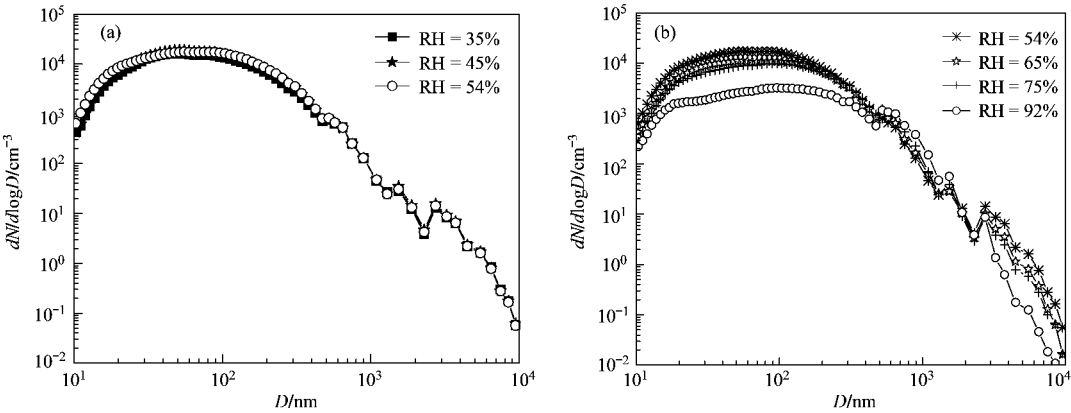


图3 不同相对湿度条件下气溶胶粒子数浓度谱分布

Fig. 3 Size distribution of aerosol average number concentration in different relative humidity

相关,而当相对湿度 > 50% 时,两者负相关,与上述相对湿度对数浓度谱的影响是一致的。

除相对湿度外,风速、风向和大气稳定度等气象因子也是影响气溶胶浓度变化的重要因素。由图 5 可看出,气溶胶粒子的数浓度和质量浓度日际变化较大。12 月 1 日晚上到 12 月 2 日早上出现大雾, 09:00 之后转为轻雾。12 月 2 日与 12 月 1 日相比, 粒子总数浓度有缓慢增加的趋势。这是由于雾天气层稳定,不利于颗粒物扩散。该天粗粒子浓度相对下降,可能是受到雾滴湿沉降的作用而清除出大气。11 月 27 ~ 28 日气溶胶粒子的数浓度和质量浓度明显下降,能见度逐渐上升,主要由于该时段发生的降雨对气溶胶粒子有明显的清除作用。12 月 10 ~ 14 日

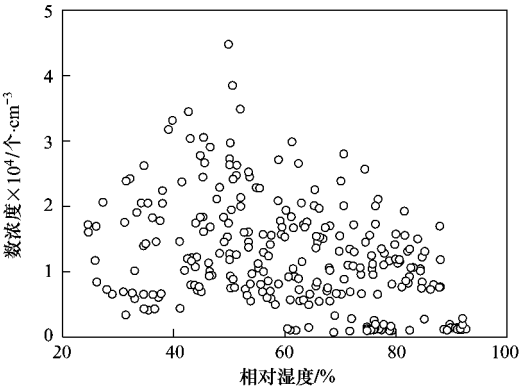


图4 PM₁₀数浓度与相对湿度的散点图

Fig. 4 Relation between PM₁₀ number concentration and relative humidity

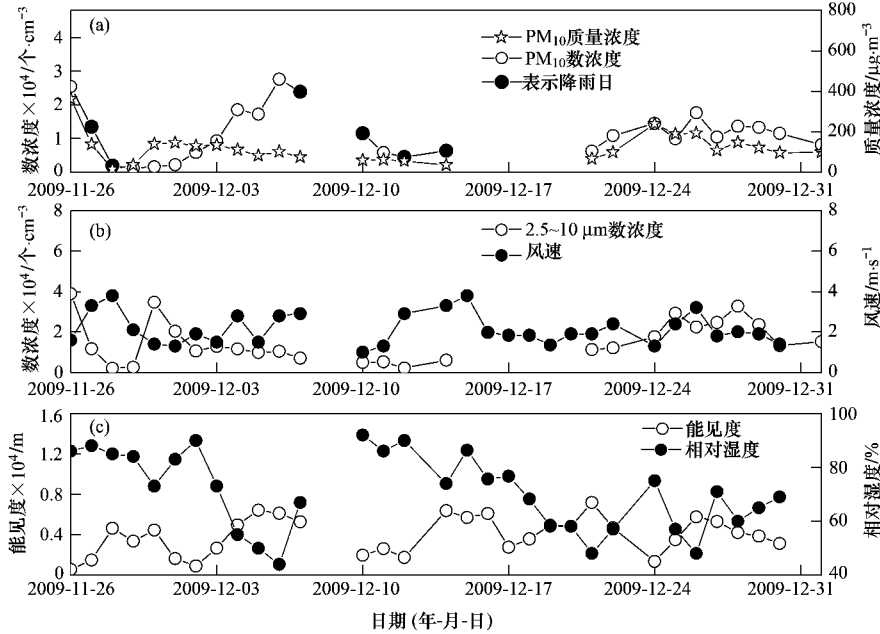


图5 2009 年气溶胶粒子数浓度、质量浓度和气象参数逐日变化

Fig. 5 Interdiurnal change of particle number, mass concentration and several meteorological elements in 2009

气溶胶粒子数浓度和质量浓度的低值也与该时段的降雨冲刷有关。

结合风玫瑰图 6(a) 可知, 整个观测期间, 风向主要分布在西北风和偏南风上, 但是数浓度的高值出现在偏东风的条件下, 其他风向的浓度值都较小。12 月 6、7 日数浓度的高值与主导风向为偏东风有关[图 6(b)], 这可能是由于观测点东边钢铁、化工园区的污染物输送所致。但这 2 d 的质量浓度升高幅度不大, 主要与输送的小粒子较多有关。12 月 24 号日均数浓度 $14\,514.5$ 个/ cm^3 , 比平均值高 20%, 质量浓度为 $239\,\mu\text{g}/\text{m}^3$, 是平均质量浓度的 2 倍, 平均

能见度降低到 $1\,351\,\text{m}$ 。该日出现了一次较严重的灰霾天气, 由于 16~23 日持续无降水, 气溶胶粒子逐渐积累, 是灰霾形成的主要原因。该日风速很小, 仅 $1.3\,\text{m/s}$, 相对湿度上升到 75%。探空资料显示, 该日大气层结比较稳定, 不利于污染物扩散。此外, 灰霾天气也有利于污染气体发生非均相化学反应生成二次气溶胶粒子^[38], 使得气溶胶颗粒物数浓度及质量浓度明显增加。该天粗粒子数浓度较低, 说明灰霾天气下, 主要以细粒子为主。由图 5(c) 还可看出, 整个观测期间, 能见度与相对湿度变化趋势明显相反, 相关系数 -0.78 。

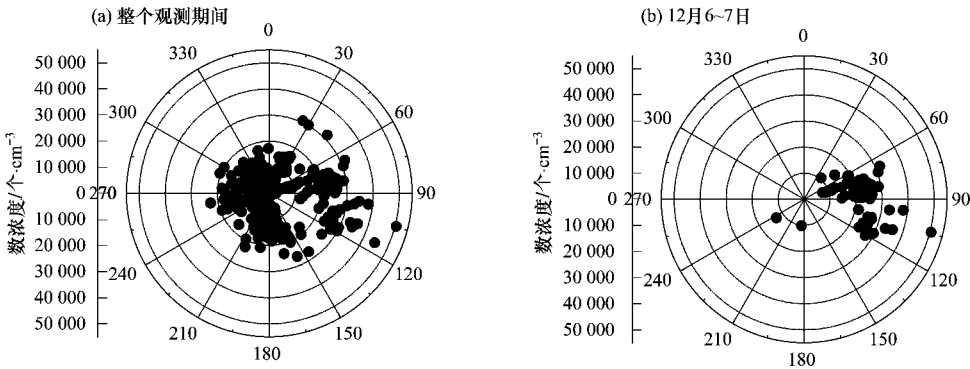


图 6 整个观测期间和 12 月 6~7 日的风向玫瑰图
Fig. 6 Wind direction rose map in the whole observation period and Dec. 6-7

为进一步研究不同天气状况对气溶胶数浓度的影响, 将观测期间的天气状况分为晴天、阴天、雨天和雾天这 4 种类型, 分别计算 4 种天气条件下的气溶胶粗、细粒子浓度值, 结果列于表 4。可以看出, 不同天气状况下数浓度有一定的差异, 尤其是在细粒子端, 差异更明显。其中, 阴到多云和晴天的气溶胶浓度比较高, 特别是阴天时的数浓度居各种天气状况下的气溶胶数浓度之首。雾天的数浓度比晴天低, 这可能与气溶胶的背景浓度有关, 由于此次雾过程发生前, 持续的降水已经使南京的气溶胶粒子浓度降低到本次观测的较低值。雨天的气溶胶浓度最低, 雨水的冲刷作用比较明显。

表 4 不同天气状况气溶胶粒子数浓度

天气	0.01~2.5 μm 细粒子	2.5~10 μm 粗粒子
	数浓度/个· cm^{-3}	数浓度/个· cm^{-3}
阴到多云	12 502.3	1.46
晴	11 884.3	1.95
雨	3 203.6	0.25
雾	6 274.6	1.07

为研究降雨和浓雾对颗粒物数浓度谱的影响, 本研究将所有晴天、雾天和雨天的数浓度谱取平

均, 同时计算了雨天和雾天气溶胶粒子相对于晴天的减少率。图 7(a) 为观测期间晴、雨、雾这 3 种天气条件下气溶胶粒子数浓度的谱分布情况, 可看出不同天气状况气溶胶的谱分布各异。雨天各尺度档数浓度相对晴天都有减少。雾过程中 $0.01\sim0.3\,\mu\text{m}$ 和 $2.7\sim10\,\mu\text{m}$ 范围内, 气溶胶的数浓度有明显减小, 而在 $0.3\sim2.7\,\mu\text{m}$ 范围内, 雾过程中的气溶胶粒子浓度要高于晴天。主要是由于雾中相对湿度很高, 雾滴易通过碰并、粘附等过程使进入雾滴的气溶胶粒子, 随雾滴的沉降而移出大气^[39], 减少了环境中 $0.01\sim0.3\,\mu\text{m}$ 范围粒子的个数。另外, 雾中活跃的大气非均相反应, 使雾滴及气溶胶中水溶性离子的浓度成倍增加^[25], 并在颗粒表面沉积使其尺度增大, 加之雾滴碰并气溶胶粒子后尺度增大, 蒸发后也会增加 $0.3\sim2.7\,\mu\text{m}$ 范围内的粒子数。 $2.7\sim10\,\mu\text{m}$ 范围内粒子数减少, 是由于该范围内粒子易通过重力沉降作用清除出大气, 雾滴也可以碰并这部分粒子使得其数浓度减小。

由于雨滴和雾滴的大小、形状等属性都有差别, 两者对气溶胶的清除效果亦有所差异。为对比

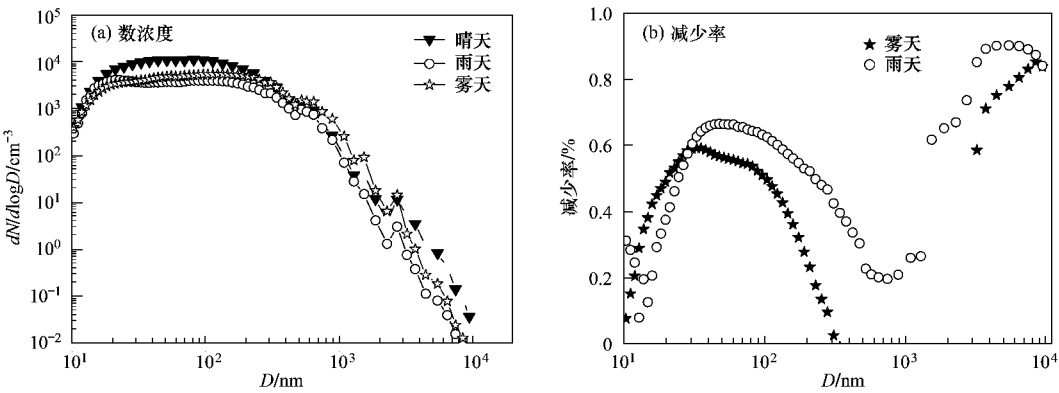


图 7 晴、雨、雾日气溶胶数浓度谱分布和减少率的比较
Fig. 7 Comparison of the number distribution and decrement rate in sunny day , rainy day and foggy day

研究降雨和浓雾对不同粒径气溶胶粒子的清除效果,本研究分析了雨天和雾天气溶胶数浓度相对晴天的减少率随粒径的变化[见图 7(b)]. 可知在直径 $>0.03\ \mu\text{m}$ 范围内,两者均成“V”字形分布,在 $1\ \mu\text{m}$ 附近出现一个谷值. 核模态和粗模态范围内减少率都随直径的增大而增大,且雨天的减少率比雾天大. 对于核模态粒子而言,主要由于布朗扩散机制所主导而被雨滴清除;积聚态粒子主要受布朗扩散和湍流扩散的共同作用而被雨滴清除;粗粒子则主要受惯性碰撞机制所主导而被雨滴清除^[40],且粒径越大,惯性碰撞越显著. 计算发现,雨天粗粒子的减少率依次比核模态和积聚态粒子的减少率大,积聚态粒子的减少率最小,很难被雨滴捕集,直径位于 $0.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 之间的区域通常称“greenfield gap”^[40].

如果定义日均能见度 $<10\ \text{km}$,日均相对湿度 $<90\%$,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘等其他能导致低能见度事件的情况为一个霾

日^[41],则霾日占本次观测天数的 67%. 为对比研究晴天和灰霾天气溶胶粒子分布特征,本研究分别选取 2009-12-22(晴天)和 2009-12-24(灰霾天)的资料进行分析. 图 8 是本次观测中灰霾天和晴天气溶胶的数浓度和质量浓度谱分布情况. 比较灰霾天和晴天大气气溶胶的粒径分布可以发现[图 8(a)],灰霾天积聚模态颗粒物的峰值略向大粒径方向偏移,峰区在 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$,峰值直径是 $0.2\ \mu\text{m}$,平均直径 $0.17\ \mu\text{m}$,大于晴天的平均直径 $0.12\ \mu\text{m}$. $0.03\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间的核模态粒子相比晴天减少,而 $0.1\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 范围内灰霾天粒子数浓度明显高于晴天,粗模态粒子浓度基本上无变化. 由图 8(b)可知,晴天和灰霾天气溶胶质量谱均成双峰分布,且峰值所在位置基本相同,但灰霾天的 2 个峰值明显高于晴天,且峰值相差较大,其中 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 之间的峰相比晴天升高幅度很大, $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 之间的峰相对于晴天变化不大. 表明灰霾天细粒子污染较为严重,尤其

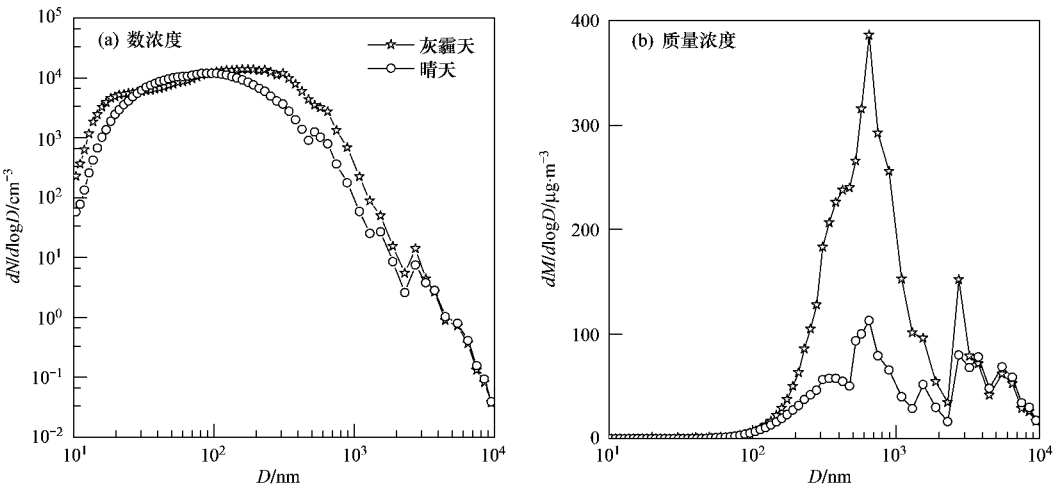


图 8 灰霾天与晴天气溶胶数浓度和质量浓度谱分布
Fig. 8 Size distribution of number and mass concentration in haze and sunny day

是积聚态粒子所占比例较大(约占总质量浓度的69%)。由于雨水对该范围内粒子的清除作用较低,加上长时间的无雨天气,积聚模态粒子大量积累,是灰霾形成的主要原因。由于积聚模态粒子消光作用更强,尤其是直径在0.5~1.0 μm之间的粒子,对消光系数的贡献最大^[23],这可能是导致灰霾天气能见度急剧下降的主要原因。

6 能见度与气溶胶表面积浓度的关系

整个观测期间,平均能见度很低,仅为3 869 m。其中,最大小时平均值为14 067 m,最小值为61.4 m。参考低能见度日的定义:能见度小时平均数据,在1 d中24个时刻任一时刻出现能见距离低于1 000 m时,称1个低能见度日,1 d内重复出现的按1 d计算,则低能见度日占总观测天数的46%。刘新罡等^[42]的研究表明,大气气溶胶粒子的散射和吸收对广州市大气能见度降低的贡献率分别为75.26%和12.89%,对于首要污染物为颗粒物的城市,大气消光的主要贡献者就是大气中的气溶胶粒子。南京即为一个以颗粒物为首要污染物的城市,所以分析气溶胶颗粒物的浓度及尺度分布对能见度的影响,具有重要意义。

假设大气中所有气溶胶颗粒成分相同,且颗粒物形状呈均匀球体的理想状态下,根据Mie理论,由已知的颗粒物粒径和折射率可以求得颗粒物的消光系数(β_{ex})^[37]和能见度^[37](V):

$$\beta_{\text{ex}} = \sum_i \frac{\pi D_{\text{p},i}^2}{4} N_i Q_{\text{ex},i}$$

(1)

$$V = \frac{3.912}{\beta_{\text{ex}}}$$

(2)

式中, $D_{\text{p},i}$ 为气溶胶粒子的直径, N_i 为WPS测量得到的某粒径段的粒子数浓度, $Q_{\text{ex},i}$ 为消光效率因子。由式(1)和式(2)可知,消光系数与气溶胶粒子的总表面积浓度正相关,能见度则与总表面积浓度反相关。另外,相对湿度对 β_{ex} 影响较大,因为当相对湿度增大时,不仅大气中可吸湿性粒子吸附水汽能力增强,从而使 $D_{\text{p},i}$ 增大,而且还会使气溶胶粒子的光学折射率发生变化,有研究表明, β_{ex} 随相对湿度的增加而增大^[35],可见,能见度(V)会随相对湿度的增大而减小。

为研究南京地区能见度与气溶胶粒径分布之间的关系,本研究选取相对湿度在80%~90%范围的观测资料,并将测量粒径范围(0.01~10 μm)划分为5段:0.01~0.1、0.1~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0和2~10 μm。对观测期间的气溶胶粒子表面积浓度和能见度均取小时平均,分别作出能见度与5个粒径段气溶胶表面积浓度的散点图,并进行其相关性趋势分析。

图9反映了观测期间所有能见度与相应时刻各粒径段粒子的表面积浓度关系。总体而言,能见度是随着气溶胶总表面积浓度的增加而降低的[见图9(f)]。由图9(a)、9(d)和9(e)可看出,在粒径0.01~0.1、1.0~2.0及2~10 μm范围内,表面积浓度

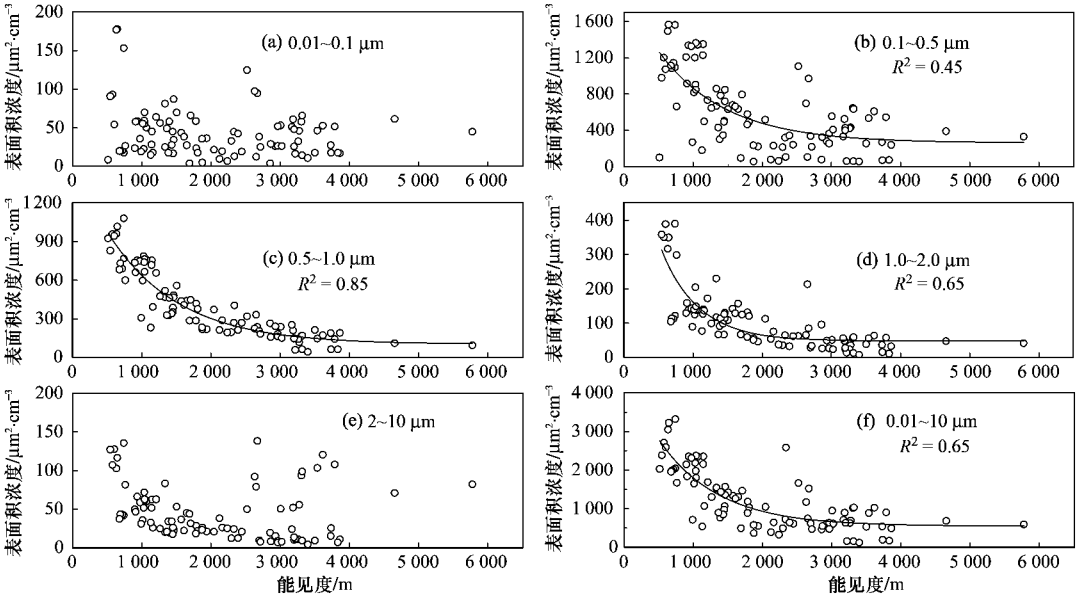


图9 能见度与不同粒径段气溶胶粒子的表面积浓度关系

Fig.9 Relation between visibility and surface area concentration of aerosol particles in different size

分布范围较小,主要集中在 $0 \sim 400 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 之间,说明这 3 个粒径段粒子对总表面积浓度的贡献较小.能见度的变化,与粒径为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内粒子的表面积浓度没有明显的规律.在粒径 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 范围内,能见度与其表面积浓度有较明显的负相关关系,相关系数为 -0.81 .由图 9(b)和 9(c)可看出,在粒径 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内,表面积浓度分布范围较广,对总表面积贡献较大,该粒径段粒子表面积浓度与能见度的相关系数为 -0.81 .其中 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子表面积浓度与能见度相关性较弱,相关系数为 -0.67 , $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子与能见度相关性最好,相关系数为 -0.92 .可见 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 粒径段的粒子是导致南京地区能见度降低的主要因素.

7 结论

(1)南京冬季气溶胶粒子 PM_{10} 平均数浓度为 12101.5 个/ cm^3 ,平均质量浓度为 $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$.与 1993 年相比, $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径段粒子数浓度约增大 5 倍,与 2006 年相比,该范围粒子也有明显增大.

(2)气溶胶粒子以细粒子为主, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度已达 PM_{10} 的 99.9%; $\text{PM}_{2.5-10}$ 的数浓度虽不足 1%,但质量浓度却占近 34%.

(3)气溶胶平均数浓度谱有 2 个峰值,第一个峰值出现在 $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$,且峰值较大.第二个峰值出现在 $2 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 之间,峰值较小.质量浓度谱具有 2 个主峰,第 1 主峰在 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 处,第 2 主峰在 $2.7 \mu\text{m}$ 左右.表面积谱近似成双峰分布,第一峰位于直径 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间,第二峰出现在直径 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 之间. $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内的积聚模态粒子对表面积浓度的贡献最大,该范围内粒子对光的散射效率很大,直接影响大气的能见度.

(4)气溶胶粒子数浓度、质量浓度和表面积浓度具有明显的双峰型日变化特征,峰值分别出现在早上 08:00~09:00 和晚上 17:00~19:00,在 14:00 出现最低值.主要与人类活动及大气边界层的状况变化有关.

(5)气溶胶粒子数浓度日际变化,主要受降水、风速、风向及相对湿度等气象条件的影响.偏东风有助于气溶胶浓度的增加.当 $\text{RH} < 54\%$ 时,随着 RH 增大,直径 $< 1 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度增加,而直径 $> 1 \mu\text{m}$ 的粒子数浓度几乎无变化,当相对湿度 $> 54\%$ 时,随着 RH 增大, $0.01 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内粒子数浓度降低, $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 之间的粒

子数浓度明显增加.

(6)不同天气状况下的谱分布有很大不同,雨天各尺度档数浓度相对晴天都有减少.降雨和浓雾对粗粒子的清除作用依次比核模态和积聚态粒子大,积聚态粒子的清除作用最小.雾天 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内,气溶胶的数浓度比晴天低,而 $0.3 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子数浓度高于晴天.灰霾天气气溶胶粒子谱的峰值略向大粒径方向偏移, $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间的粒子数浓度比晴天低,而 $0.1 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 范围内粒子数浓度高于晴天.

(7)根据 Mie 理论,对能见度和不同粒径段气溶胶粒子的表面积浓度进行相关性分析,发现 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间的粒子表面积浓度与能见度相关性较好,是导致南京地区能见度降低的主要因素.

参考文献:

- [1] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution; lines that connect [J]. Air & Waste Management Association, 2006, **56**: 709-742.
- [2] Hand J L, Kreidenweis S M, Sherman D E, et al. Aerosol size distributions and visibility estimates during the Big Bend regional aerosol and visibility observational (BRAVO) study [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**: 5043-5055.
- [3] 胡敏,刘尚,吴志军,等.北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J].环境科学,2006,**27**(11):2293-2298.
- [4] Levoni C, Cervino M, Guzzi R, et al. Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes [J]. Applied Optics, 1997, **36**(30): 8031-8041.
- [5] Peters A, Wichmann H E, Tuch T, et al. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1997, **155**: 1376-1383.
- [6] 李伟芳,白志鹏,史建武,等.天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J].环境科学研究,2010,**23**(4):394-400.
- [7] 任阵海,苏福庆,高庆先,等.边界层内大气排放物形成重污染背景解析[J].大气科学,2005,**29**(1):57-63.
- [8] Husar R B, Husar J D, Martin L. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**: 5067-5078.
- [9] 史军,崔林丽,贺千山,等.华东雾和霾日数的变化特征及成因分析[J].地理学报,2010,**65**(5):533-542.
- [10] 魏建苏,孙燕,严文莲,等.南京霾天气的特征分析和影响因素初探[J].气象科学,2010,**30**(6):868-873.
- [11] 周远舟.南京能见度 40 年降 2.5 公里,霾天数增加近百倍 [EB/OL]. http://news.longhoo.net/2010-09/03/content_4007533.htm. 2010-09-03/2010-11-01.
- [12] 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等.细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J].热带气象学报,2007,**23**(1):1-6.

[13] Baumer D, Vogel B, Versick S, *et al.* Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-west Germany [J]. *Atmospheric Environment*,2008,**42**:989-998.

[14] Kikas U, Mirme A, Tamm E. Examining the relationship between aerosol size distribution and atmospheric visibility in an urban area[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998,**29**: S661-S662.

[15] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Air & Waste Management Association*, 2007, **57**: 1326-1336.

[16] 银燕,陈晨,陈魁,等. 黄山大气气溶胶微观特性的观测研究[J]. *大气科学学报*,2010,**33**(2):129-136.

[17] 高健. 大气颗粒物个数浓度、粒径分布及颗粒物生成-成长过程研究[D]. 济南:山东大学, 2008.

[18] 黄红莲,黄印博,饶瑞中. 合肥地区气溶胶数浓度和谱分布特征的观测研究[J]. *红外与激光工程*,2006,**35**(增刊):390-395.

[19] 张仁健,王明星,戴淑玲,等. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究[J]. *气候与环境研究*,2000,**5**(1):85-89.

[20] 严文莲,周德平,王扬峰,等. 沈阳冬夏季可吸入颗粒物浓度及尺度谱分布特征[J]. *应用气象学报*, 2008,**19**(4):435-443.

[21] 张金娜,董海燕,白志鹏,等. 天津初夏大气气溶胶粒度谱分布特征[J]. *城市环境与城市生态*,2007,**20**(5):1-5.

[22] 黄书华,刘建国,刘文清,等. 夏季高湿度条件下北京市气溶胶颗粒物粒谱特征研究[J]. *环境科学*, 2010,**31**(1):17-21.

[23] 张涛,陶俊,王伯光,等. 广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究[J]. *中国科学院研究生院学报*,2010,**27**(3): 331-337.

[24] 段菁春,毕新慧,谭吉华,等. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J]. *中国环境科学*,2006,**26**(1):6-10.

[25] 时宗波,贺克斌,陈雁菊,等. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响[J]. *环境科学*,2008,**29**(3):551-556.

[26] 钱凌,银燕,童尧青,等. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征[J]. *中国环境科学*, 2008,**28**(1): 18-22.

[27] 陈金荣,周文贤,安 强. 南京冬季大气气溶胶的物理特征[J]. *南京气象学院学报*, 1996,**19**(3):374-378.

[28] 黄鹂鸣,王格慧,王荟,等. 南京市空气中颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5}污染水平[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(4): 334-337.

[29] 余锡刚,吴建,酆颖,等. 灰霾天气与大气颗粒物的相关性研究综述[J]. *环境污染与防治*,2010,**32**(2):86-88.

[30] 樊曙先,徐建强,郑有飞,等. 南京市气溶胶 PM_{2.5}一次来源解析[J]. *气象科学*,2005,**25**(6):587-593.

[31] 王玮,汤大钢,刘红杰,等. 中国 PM_{2.5}污染状况和污染特征的研究[J]. *环境科学研究*, 2000,**13**(1):1-5.

[32] Wehner B, Wiedensohler A. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, **3**: 867-879.

[33] Wittmaack K. Advanced evaluation of size-differential distributions of aerosol particles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, **33**(7): 1009-1025.

[34] Horrak U, Mirme A, Salm J, *et al.* Air ion measurements as a source of information about atmospheric aerosols [J]. *Atmospheric Research*,1998, **46**: 233-242.

[35] 孙景群. 能见度与相对湿度的关系[J]. *气象学报*,1985,**43**(2): 230-234.

[36] 浦一芬,杨建亮. 大气气溶胶的酸化与相对湿度的关系及其对酸雨形成的贡献[J]. *气候与环境研究*,2000,**5**(3):296-303.

[37] 麦卡特尼著,潘乃先等译. 大气光学[M]. 北京:科学出版社, 1988. 293-298.

[38] 魏玉香,杨卫芬,银燕,等. 霾天气南京市大气 PM_{2.5}中水溶性离子污染特征[J]. *环境科学与技术*,2009,**32**(11):66-71.

[39] 杨军,牛忠清,石春娥,等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. *环境科学*,2010,**31**(7):17-23.

[40] Greenfield S M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere[J]. *Journal of Meteorology*,1957,**14**:115-125.

[41] 李菲,吴兑,王婷,等. 广州 2010 年亚运会会期的灰霾天气问题[J]. *广东气象*,2008,**30**(2):19-21.

[42] 刘新罡,张远航,曾立民,等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. *气候与环境研究*,2006,**11**(6):733-738.