

合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析

黄印博, 黄红莲, 韩永, 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 对合肥和东南沿海地区气溶胶粒子的光学特性进行了较为系统地实验观测和统计分析, 并初步建立了两个典型地区气溶胶光学特性的模式, 对这些地区气溶胶粒子的尺度谱分布、数浓度、散射和吸收系数以及大气能见度获得了规律性认识, 这有助于较为全面地了解合肥和东南沿海地区大气气溶胶粒子的各种光学特征量, 并可深入了解陆地和海洋型气溶胶粒子的光学特性。

关键词: 大气光学; 气溶胶; 光学特性; 测量; 模式分析

中图分类号: TN012; P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)06-0423-11

Measurement and Model Analysis of the Aerosol Optical Properties in the Regions of Hefei and Southeast Coast

HUANG Yin-bo, HUANG Hong-lian, HAN Yong, RAO Rui-zhong

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Optical properties of aerosol in the regions of Hefei and southeast coast were systematically measured and statistically analyzed. Moreover, the characteristic models were established, and the statistical laws of the parameters such as size distribution, total number concentration, scattering coefficient, absorption coefficient and visibility, were obtained. These typical results are helpful to realize other kinds of characteristic optical parameters, as well as continental and maritime aerosol.

Key words: atmospheric optics; aerosol; optical property; measurement; model analysis

1 引言

大气气溶胶光学特性是研究光波在大气中传输和大气辐射传输的基础, 在天文观测、光学遥感、自由空间光通信和激光大气传输等工程应用中作用

突出^[1-3]。为此, 发达国家投入大量的人力、财力, 通过实验观测以及理论分析对大气光学特性进行了系统深入地研究, 并建立了相应的数理模型和数据库^[1,4,5]。但是, 这些得来不易的成果受局地应用所限, 因此不能简单拿来照搬应用。大气气溶胶光

收稿日期: 2007-08-31

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目; 中国科学院合肥物质科学研究院物质计算科学中心资助课题

E-mail: ybhuang@aiofm.ac.cn

学特性受地域、天气、环境等多种因素影响,只有系统地测量光学特征参量,并建立符合当时、当地大气环境下的大气光学特性模式,才能准确评估实际大气对激光工程应用的影响。

我国幅员辽阔、自然环境复杂,各个地区的大气条件也是千差万别,大气光学参数的空间分布及其时间变化更是十分复杂。因此,在全国大范围内进行长期、系统的观测分析并建模,显然是不现实的;而选择一些地域、气候等具有代表性的地区进行较长时间的观测并进行统计分析,获取典型地区规律性的认识,以深入研究影响光波传输的大气光学参数无疑是一种行之有效的手段。我们实验室曾用 L300 和 L625 Mie 散射激光雷达在合肥地区分别对对流层和平流层气溶胶消光系数进行了长期的常规夜晚观测,统计分析了激光雷达近十年的观测资料(1991~2001年),并采用最小二乘法和指数衰减函数拟合得到了合肥地区气溶胶消光系数随高度分布的初步模式,该模式分为背景期和平流层火山灰影响期^[6]。在气溶胶吸收系数随波长平缓变化的假定基础上,还建立了气溶胶吸收系数随高度分布的模式。另外,利用自行研制成功的 DLJ-92 多道光学粒子计数器在合肥、北京以及东南沿海等地区多次进行了大气气溶胶光学参量常规观测,并采用 Junge 函数对粒子数密度谱进行了较好的拟合^[7-8]。

在此基础上,我们又引进、研制了一批新的测量仪器及设备,并选择合肥、东南沿海地区为测量点,较为系统地观测分析了这两个典型地区的大气气溶胶光学特性,包括气溶胶粒子的尺度谱分布、数浓度、散射和吸收系数以及大气能见度等;观测仪器主要是空气动力学粒度仪、积分浊度计、碳黑度仪以及前向散射能见度仪等。文中对这两个典型地区所获得的规律性认识,有助于较为全面地了解合肥和东南沿海地区大气气溶胶粒子的各种光学特征量,并且可以深入了解陆地形、海洋型气溶胶粒子的光学特性。

2 实验测量地点简介

合肥地区的测量点在合肥西郊董铺水库附近的办公楼内,采样高度为 10 m,远离城市的污染源。该地属于典型的北亚热带季风气候,气温和水汽压有明显的月变化,但年变化不大,年平均气温

在 15~15.8°C,年平均降水为 1000 mm 左右,并主要集中在 5~9 月份;对流层顶附近有很强的冬季西风急流,风速超过 60 m/s,夏季急流减弱,风速不超过 20 m/s^[9]。该测量点对分析陆地型气溶胶粒子的光学特性具有代表意义^[5]。

东南沿海地区的测量点在福建厦门东山岛附近紧挨海边的楼顶,采样高度 6 m,附近基本没有污染源。该地属于典型的南亚热带海洋性季风气候,与合肥内陆地区类似,气温和水汽压有明显的月变化,年变化不明显,年平均气温在 20.8°C,年平均降水为 1113.9 mm;常年受东北风侵袭,有明显的月变化特征,夏季较小,冬季偏大,平均风速为 6.8 m/s,对流层顶附近有很强的冬季西风急流,风速超过 50 m/s,夏季急流减弱,风速不超过 10 m/s^[9]。该测量点对分析海洋型气溶胶粒子的光学特性具有代表意义^[5]。

3 测量设备和基本原理

3.1 空气动力学粒度仪^[10]

APS-3321 空气动力学粒度仪能够高精度地实时观测气溶胶粒子的空气动力学粒径和粒子数浓度,可探测空气动力学直径大于 0.37 μm 粒子的总数浓度,并将直径在 0.5~20 μm 范围内的气溶胶粒子等对数间隔分为 52 档,进行谱分布观测;可观测的最小粒子浓度为 0.001 cm^{-3} ,最大粒子浓度高达 10⁴ cm^{-3} 。

该仪器采用双激光束空气动力学粒径测量方法,其原理简介为:泵入仪器的气溶胶粒子被鞘流限制在加速气流中心,垂直通过两束正交的聚焦光束并产生散射,计算每个单分散气溶胶粒子穿过两束激光的飞行时间,从而得到每个粒子的飞行速度,并根据粒子飞行速度与粒径大小之间的定标关系,把每一次测量到的飞行速度转化为空气动力学直径。

3.2 积分浊度计^[11]

IN-3563 积分浊度计是一种能够直接探测三种波长(450 nm,550 nm 和 700 nm)气溶胶粒子散射特性的高精度仪器,可实现全天候连续自动观测,不破坏气溶胶的组分,分辨率可达到 5×10⁻⁸ m^{-1} 。浊度计的积分范围可以调整为 7°~170°或 90°~170°,从而可以获得总散射和后向散射信号,其原理简介为:首先测量气体分子及气溶胶粒子的总散射光,

然后扣除检测腔内壁的散射、气体分子的散射和探测器内部的电子噪声。为了测定气体分子和电子噪声对散射信号的影响, 积分浊度计周期性地测量过滤前后空气的散射信号, 通过比较散射信号的差异可以测定大气气溶胶粒子的散射系数。

3.3 碳黑度仪^[12]

黑碳气溶胶是悬浮在大气中的黑色碳质颗粒物, 主要是含碳物质在不完全燃烧过程中产生的, 是大气气溶胶中最主要的吸光物质, 除去一些特殊的天气状况(如沙尘、扬尘), 对气溶胶光学吸收系数的贡献率在 90% 到 95% 以上, 因此, 一般认为黑碳气溶胶的吸收系数即为实际大气气溶胶的吸收系数。AE-31 七波段碳黑度仪可实时监测七种波长(370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm 和 950 nm) 黑碳气溶胶的质量浓度, 并利用黑碳气溶胶对光的吸收特性测量实际大气气溶胶的吸收系数。

碳黑度仪的工作原理是建立在石英纤维滤膜上收集的粒子对光的吸收造成的衰减, 属于光学灰度测量法, 即用一透光均匀的滤膜采集气溶胶样品, 并测量光线透过滤膜前 ($I_{\lambda 0}$)、后 (I_{λ}) 的光强, 而衰减遵循 Beer-Lambert 定律, 即: $I_{\lambda}/I_{\lambda 0} = \exp(-A_{\lambda})$, 式中 $A_{\lambda} = \sigma_{\lambda} m_{BC}$ 为介质的光学厚度; m_{BC} 为单位面积采样膜上的黑碳质量, 即黑碳的质量浓度, 单位为 g/cm^2 ; σ_{λ} 为黑碳气溶胶的质量吸收系数, 表示在单位面积的滤膜上沉积单位质量黑碳气溶胶时的吸收, 其单位为 cm^2/g 。

3.4 前向散射能见度仪^[13]

在可见光波段, 大气分子及气溶胶粒子的吸收较小, 气溶胶粒子散射是大气能见度降低的主要因子, 而在 33° 散射角附近大气散射相函数对气溶胶谱分布的变化不敏感, 消光系数与散射系数的比值近似不变。Model 6230A 前向散射能见度仪正是基于上述假定, 并选择合适的光源和光路结构, 通过检测专用光源在一定大气体积中的前向散射强度, 求得其散射系数, 进而用相关数学模型计算大气能见度值。

该仪器采用可见光源的前向散射体制、交叉光路结构, 发射器和接收器间的距离为 1.2 m, 主散射角为 33° ; 一中心波长为 550 nm 的可见光经发射器入射到大气中, 接收器将特定体积内的前向散射光

汇集到光电传感器的接收面上, 并将其放大处理, 转换为与大气能见度成反比关系的电信号, 采集此信号并经 CPU 取样, 可计算得到大气能见度的值。

4 测量结果及模式分析

4.1 气溶胶数浓度和谱分布的统计特征^[2,14]

数浓度是指单位体积空气中一定尺度范围内大气气溶胶粒子的个数 (cm^{-3}), 文中的数浓度是指单位体积内粒子直径 d 大于 $0.37 \mu m$ 的所有粒子数。

图 1(a)~(d) 分别为合肥地区典型月份的气溶胶数浓度的日变化。由图可知, 合肥地区气溶胶数浓度的日变化趋势与大多数的内陆城市相似, 呈明显的两峰结构, 一般在清晨 (4:00~8:00 左右, 各季节具体时刻有异) 出现第一个峰, 此后随太阳升起数浓度逐渐下降, 并在午后 (12:00~16:00) 数浓度达到最低, 然后又开始逐渐上升, 日落或夜晚 (16:00~23:00) 时分粒子数浓度达到第二个峰值。一般来说, 上午和夜晚大气层结相对比较稳定, 垂直方向湍流输送较弱, 致使在近地面堆积而出现气溶胶粒子数浓度的峰值; 午后由于地面增温造成近地面层的湍流垂直输送增强, 混合层高度增高, 从而使地面气溶胶数浓度减小; 到傍晚时分, 由于地表和底层大气温度降低, 上层空气冷却较慢, 此时对流较弱致使粒子数浓度较高。

对比图 1(a)~(d) 还可看出, 合肥地区秋季的气溶胶数浓度比其它三个季节明显要高。这可能是因秋收季节在农村有秸秆燃烧, 从而使秋季粒子的数浓度相对较高。冬季的粒子数浓度也比夏季略微偏高, 这是因为冬季太阳辐射较弱, 大气对流运动和湍流混合均比夏季要弱得多, 同时冬季的大气污染物也不易扩散。再者, 合肥的冬季多阴霾和雾天, 夏季多梅雨天气, 而数浓度与天气状况又是密切相关的: 一般而言, 阴天略大于晴天; 雾天数浓度普遍较大, 如冬季某天最大数浓度可高达 $1196.3 cm^{-3}$, 最小数浓度也有 $243.83 cm^{-3}$, 平均值为 $658.0 cm^{-3}$; 雨后数浓度明显降低, 如夏季某天数浓度最小值仅为 $31.4 cm^{-3}$, 平均值为 $57.7 cm^{-3}$, 最大值 $147.2 cm^{-3}$ 也比一般天气条件下的最小值还低, 这是降水对大气气溶胶有清除作用的一个例证。

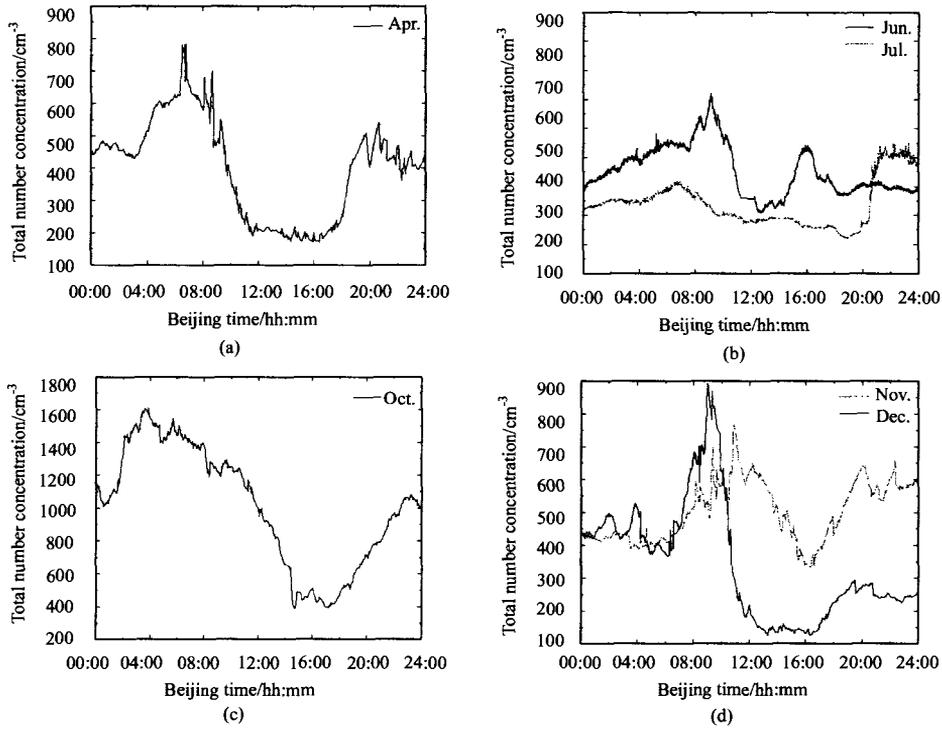


图 1 合肥地区典型月份气溶胶数浓度的平均日变化 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

Fig.1 Averaged diurnal variations of number concentration in several typical months in Hefei

(a) spring (b) summer (c) autumn (d) winter

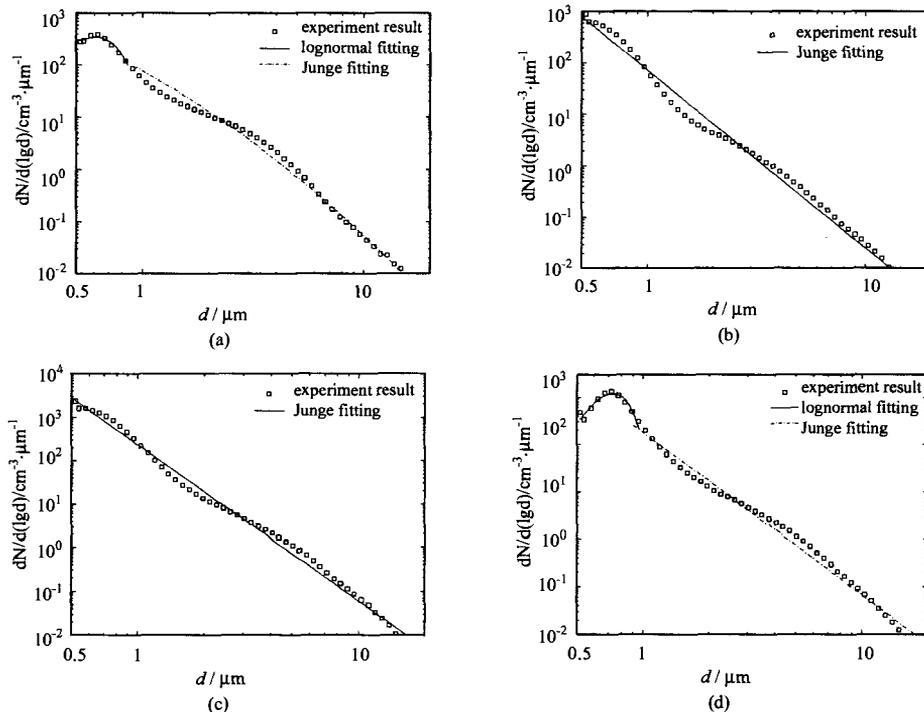


图 2 合肥地区四季气溶胶平均数浓度的实测谱和拟合谱 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

Fig.2 Measuring and fitting curves of size distributions of aerosol particles in Hefei

(a) spring (b) summer (c) autumn (d) winter

图 2 (a)~(d) 分别为合肥地区四季气溶胶粒子的平均数浓度谱及拟合谱。由图可知, 合肥地区的数浓度谱可用两种类型的谱分布来描述, 如: 夏、秋两季的数浓度谱基本上呈指数衰减, 较为符合 Junge 谱分布; 而春、冬两季的数浓度谱有一单峰, 峰值中心在聚集模态 ($0.1 \mu\text{m} < d < 2 \mu\text{m}$) 范围内, 春季大约在 $d = 0.65 \mu\text{m}$ 左右, 而冬季在 $0.75 \mu\text{m}$ 附近, 在聚集模态符合对数正态分布, 在粗模态较为符合 Junge 谱, 这与烟尘型气溶胶和沙漠型气溶胶的谱分布相差都很大。如图所示, 合肥地区四季的拟合谱和实测谱吻合得相当好, 其相关系数分别为

97.8%、99.7%、99.4% 和 97.9%。

合肥地区夏、秋两季的气溶胶数浓度谱的表达式为

$$n(\lg r) = dN/d \lg r = \begin{cases} 72.8r^{-3.46} & \text{summer} \\ 237.6r^{-3.60} & \text{autumn,} \end{cases} \quad (1)$$

而春、冬两季的数浓度谱利用对数正态分布谱、Junge 谱进行了分段拟合, 几何平均半径 r_g 、几何标准偏差 σ_g 、Junge 系数 ν 及 Junge 指数 c 等如表 1 所示。

$$n(\lg r) = \begin{cases} \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \exp\left[-\frac{(\lg r - \lg r_g)^2}{2 \lg^2 \sigma_g}\right] & r \leq 0.5 \mu\text{m} \\ cr^{-\nu} & 0.5 \mu\text{m} \leq r \leq 10.0 \mu\text{m}. \end{cases} \quad (2)$$

表 1 合肥地区春、冬两季大气气溶胶尺度谱的拟合结果

Table 1 Fitting parameters of size distributions of aerosol particles at spring and winter

Fitting parameter	$r_g(\mu\text{m})$	σ_g	N_0	ν	c
spring	1.42	0.32	132.16	3.15	80.75
winter	1.34	0.37	394.14	3.44	184.07

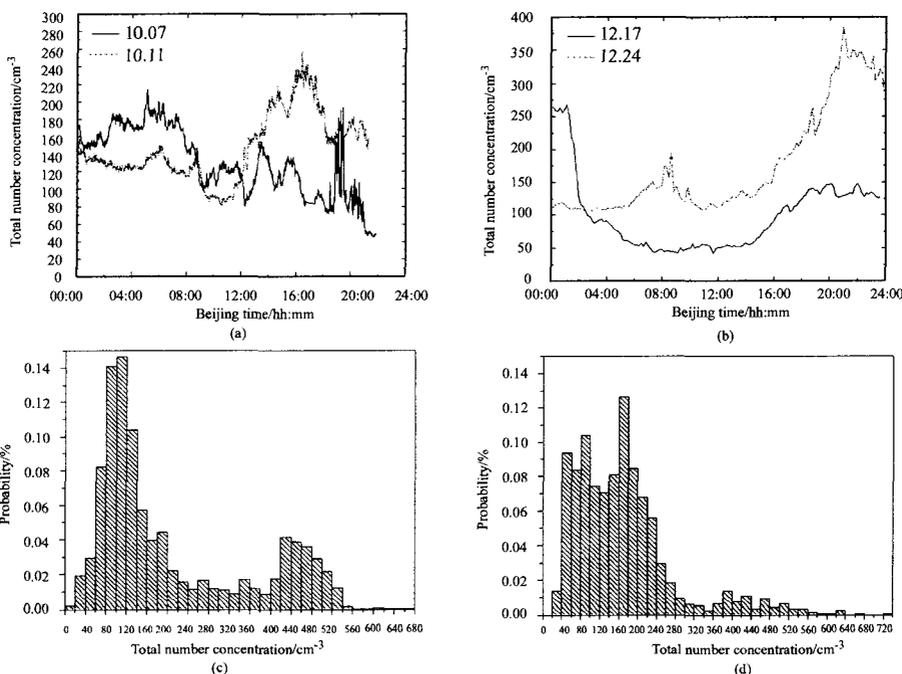


图 3 东南沿海地区气溶胶数浓度的平均日变化 (a) 10 月份 (b) 12 月份, 及数浓度的概率分布 (c) 10 月份 (d) 12 月份

Fig.3 Averaged diurnal variations of number concentration in Oct. (a) and Dec. (b), and probability distributions of number concentration in Oct. (c) and Dec. (d) on the southeast coast

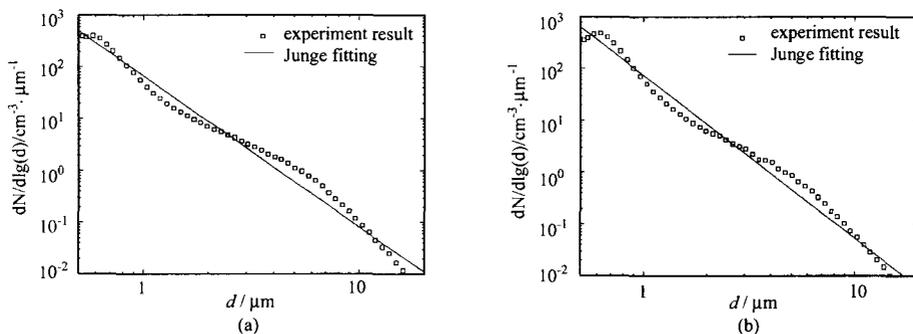


图4 东南沿海地区大气气溶胶的平均数浓度谱和拟合谱 (a)10月份 (b)12月份

Fig.4 Measuring and fitting curves of size distributions of aerosol particles in Oct. (a) and Dec. (b) on the southeast coast

与合肥等内陆地区相比,东南沿海地区气溶胶数浓度的平均日变化几乎没有规律可循,因此,我们未对其按照图1的方式进行统计平均分析,以免掩盖真实的日变化情况。图3(a)、(b)分别为10月和12月份有代表性的两天其数浓度的日变化,而图3(c)、(d)则为两个月份数浓度的概率分布。总体而言,沿海地区的数浓度比合肥地区的要小很多,10月和12月份气溶胶粒子的数浓度多集中在 $80\sim 140\text{ cm}^{-3}$ 和 $40\sim 240\text{ cm}^{-3}$ (概率超过6%)。一方面由于海边受人类活动的影响相对较小;另一方面也与海洋下垫面独特的热力性质有关,即海洋的昼夜温差不大,同时风速较大,导致湍流和对流一直都处于较为充分的状态,从而使得东南沿海地区气溶胶数浓度比较小,且没有明显双峰结构。

如图4所示,为东南沿海地区10月和12月份的平均数浓度谱及拟合谱。无论秋季还是冬季,沿海地区的数浓度谱都较为符合Junge谱,而且拟合结果的相关系数都在99%以上。秋季拟合得到的Junge指数为2.91,而冬季为3.15,都比合肥地区相应的 ν 值小,这说明东南沿海地区相对而言大粒子所占比例较大。海洋型、陆地型气溶胶粒子的组分主要为海盐、水溶物和烟尘、水溶物,一方面陆地型气溶胶粒子烟尘(小粒子)所占比例相对较大,而海洋型气溶胶粒子水溶物(大粒子)比例较大^[5],因此,东南沿海地区Junge指数相对合肥等内陆地区的值要小。

4.2 合肥地区气溶胶散射、吸收系数统计特征^[2]

图5(a)~(d)为合肥地区四季气溶胶三个波长

处的平均散射系数的日变化。由图可知,因为散射系数与气溶胶粒子的数浓度密切相关,故两者的日变化规律基本一致,都呈双峰结构,即早晨和傍晚时分数值较大,而在午后达到最小。再者,就450 nm、550 nm和700 nm三个波长而言,较短波长的蓝光散射最强,较长波长的红光散射最弱。

碳黑度仪可同时测量370 nm、470 nm、520 nm、590 nm、660 nm、880 nm和950 nm七个波长的吸收系数,为了与浊度计测量的散射系数进行对比,分别将520 nm、590 nm和660 nm、880 nm两个波长平均,并将470 nm等效为450 nm的情况,从而可近似计算450 nm、550 nm和700 nm三个波长的吸收系数。图6(a)、(b)分别为春、秋两季大气气溶胶吸收系数的日变化。由图可知,三个波长的吸收系数随时间的变化趋势基本相同,都呈两峰结构,早晨和傍晚时分达最大值,午后其值最小,并且最大值与最小值相差四倍以上。

从图中还可看出,吸收系数与散射系数随波长的变化规律一致,即随波长的增大而减小。合肥地区散射系数的量级基本在 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 之间,吸收系数的量级在 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 之间,散射系数的大小是吸收系数的2~4倍。另外,秋季气溶胶的吸收系数比春季有明显的增大,大约是春季时的二倍。这是因为秋季正是收获季节,而部分秸秆的燃烧正是黑碳气溶胶的重要来源之一。即便在黑碳的质量浓度较高的秋季,合肥地区的黑碳质量浓度也远低于北方一些烟煤型城市的质量浓度,合肥地区的污染还是相对较轻的。

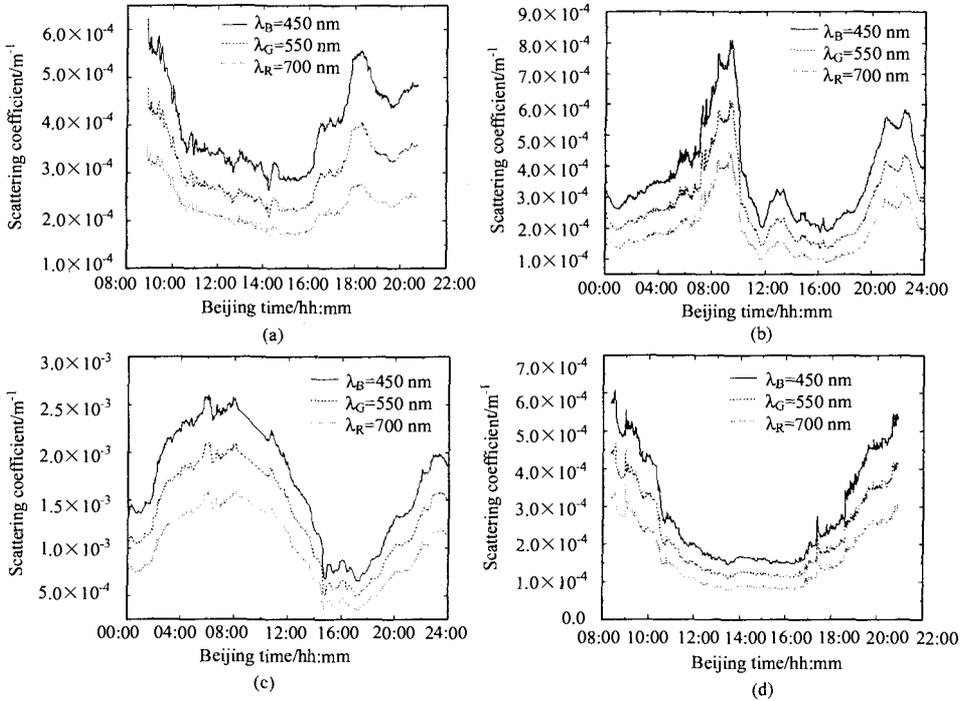


图 5 合肥地区气溶胶三波长的平均散射系数的日变化 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

Fig.5 Diurnal variations of scattering coefficients about three wavelengths in Hefei (a) spring (b) summer (c) autumn (d) winter

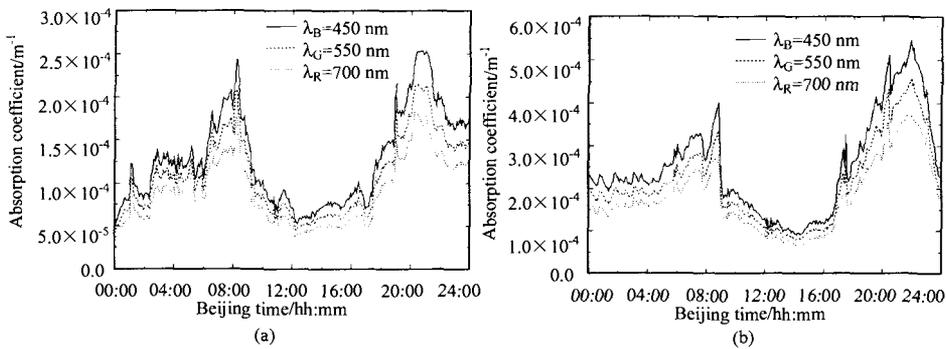


图 6 合肥地区三波段大气气溶胶的吸收系数的日变化 (a) 春季 (b) 秋季

Fig.6 Diurnal variations of absorption coefficients about three wavelengths in Hefei (a) spring (b) autumn

4.3 东南沿海地区气溶胶散射、吸收系数的统计特征^[2]

东南沿海地区气溶胶粒子的散射及吸收系数的日变化每一天都有所不同,不但随采样时间的变化趋势不同,而且衰减特征量的大小每天也都有一些差异。由于所测数据有限,无法得到气溶胶粒子衰减特征量日变化的规律性认识。表 2 列出了实验期间各天三个波长的散射系数 (10^{-4} m^{-1} 量级) 及

吸收系数 (10^{-5} m^{-1} 量级) 的平均值, 仅供参考。此处, 以 12 月 24 日典型的测量数据为例, 介绍了东南沿海地区三波长气溶胶的散射和吸收系数的日变化, 如图 7 (a)、(b) 所示。

显然, 散射系数的日变化特征与合肥地区不同, 而是与当天的气溶胶数浓度有大致相同的日变化, 如图 3(b) 所示, 即没有明显的双峰结构。相对数浓度和散射系数而言, 吸收系数在上午 8:00 左右

表 2 东南沿海地区冬季气溶胶粒子散射系数、吸收系数的平均值 (单位: m^{-1})

Table 1 Average values of scattering coefficients and absorption coefficients in winter on the southeast coast

Date	Sca. B	Sca. G	Sca. R	Abs. B	Abs. G	Abs. R
061211	3.1824 E-4	2.4929 E-4	1.8916E-4	7.0256E-5	5.8529E-5	4.8609E-5
061212	2.7662E-4	2.1656E-4	1.6303E-4	7.5829E-5	6.4597E-5	5.3856E-5
061213	2.1659E-4	1.6463E-4	1.1720E-4	7.6584E-5	6.5255E-5	5.5493E-5
061216	2.3306E-4	1.7405E-4	1.2484E-4	8.3977E-5	7.0390E-5	5.8975E-5
061217	1.2550E-4	9.7293E-5	7.5983E-5	4.8383E-5	3.9960E-5	3.2355E-5
061218	1.5082E-4	1.0712E-4	7.5189E-5	5.4949E-5	4.5656E-5	3.7079E-5
061219	1.4630E-4	1.0360E-4	7.3408E-5	6.1858E-5	4.9952E-5	3.8860E-5
061220	1.2454E-4	9.2472E-5	6.7310E-5	5.4213E-5	4.4577E-5	3.5738E-5
061221	9.8541E-5	7.5963E-5	5.9657E-5	4.3444E-5	3.5548E-5	2.8190E-5
061222	2.0252E-4	1.5139E-4	1.1014E-4	8.6371E-5	7.1439E-5	5.7369E-5
061223	2.0776E-4	1.5298E-4	1.0905E-4	6.3627E-5	5.3179E-5	4.2980E-5
061224	3.0865E-4	2.3324E-4	1.6941E-4	8.2296E-5	6.8439E-5	5.7468E-5
061225	4.6753E-4	3.6005E-4	2.6098E-4	1.2874E-4	1.1096E-4	9.4528E-5

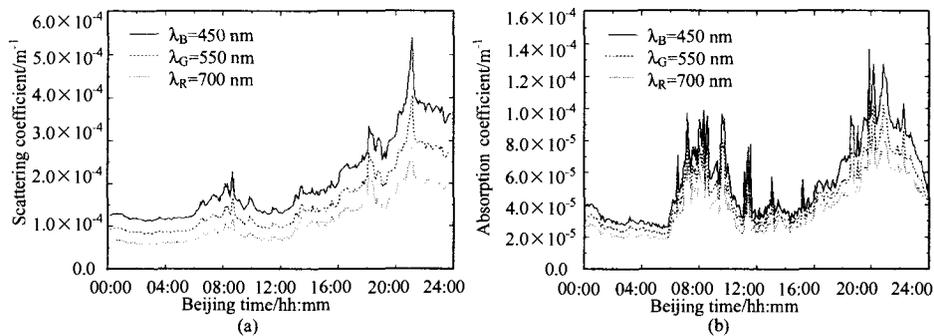


图 7 东南沿海地区 12 月 24 日三波长气溶胶散射、吸收系数的日变化 (a) 散射系数 (b) 吸收系数

Fig.7 Diurnal variations of scattering coefficients (a) and absorption coefficients (b) about three wavelengths on December 24 on the southeast coast

有一个尖峰,使得吸收系数的日变化与内陆地区相似,呈明显的两峰结构。另外,总体而言,东南沿海地区气溶胶的散射系数和吸收系数都较内陆地区要小,其散射系数在 10^{-4} 量级,而吸收系数的量级为 10^{-5} ;并且,东南沿海地区散射系数与吸收系数的比值也较合肥地区大,其散射系数多在吸收系数的 4~5 倍之间。这说明东南沿海地区黑碳气溶胶粒子的绝对含量和相对含量都较小,对光波吸收较小,符合海洋型气溶胶粒子的情况。

4.4 大气能见度的统计特征^[3]

大气能见度每天的日变化都各有差异,图 8 仅列出了合肥地区四季典型月份和东南沿海地区典型天数大气能见度的日变化。如图所示,合肥地区能见度的日变化规律较为明显,一般而言,每天下午 14:00~16:00 左右大气能见度最大,而在清晨 6:00 左右能见度最低。这主要是因为大气中气溶胶粒子的含量和太阳活动密切相关。清晨的温度较低、相对湿度较高,地面附近的逆温层使得污染物不易扩

散, 是一天中大气能见度最低的时段; 随着太阳升起, 地面空气温度升高、相对湿度降低, 逆温层遭到破坏, 对流活动增强, 有利于污染物的扩散, 因此下午一般是一天中能见度最好的时段; 日落时分, 热力对流活动减弱, 逆温层产生, 污染物重新集结使得大气能见度下降, 并在日出前降到最低点。相对而言, 沿海地区能见度的日变化规律不明显, 一天内能见度起伏相对较大, 与太阳的活动也没有明

显关系, 更多的是与海洋性的季风气候紧密相关。

图 9、图 10 分别为合肥和东南沿海地区各季节大气能见度的概率分布。合肥地区夏季多梅雨天, 而冬季阴霾、雾天较多, 因此能见度相对较低。春夏秋冬四个季节, 相对频数较高(概率超过 10%)的能见度大致分别为: 3~6.5 km; 3~5 km; 3 km 左右和 1~4.5 km。相对而言, 东南沿海地区的能见度明显好于合肥内陆地区, 特别是在秋季, 可谓是

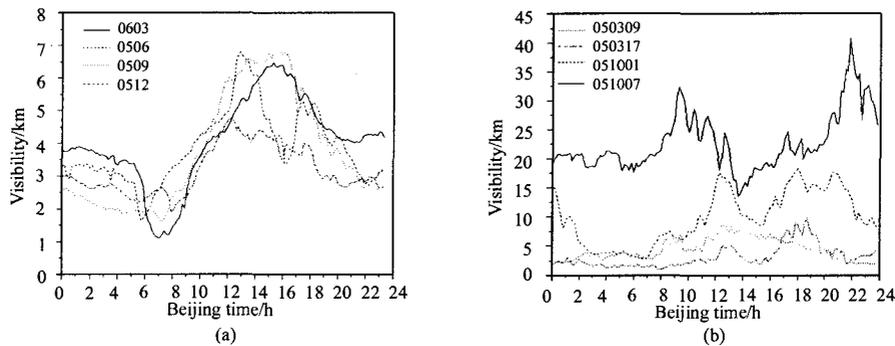


图 8 合肥四季典型月份 (a) 及东南沿海地区典型天数 (b) 大气能见度的日变化

Fig.8 Diurnal variations of the visibility in several typical months in Hefei (a), and in several typical days (b) on the southeast coast

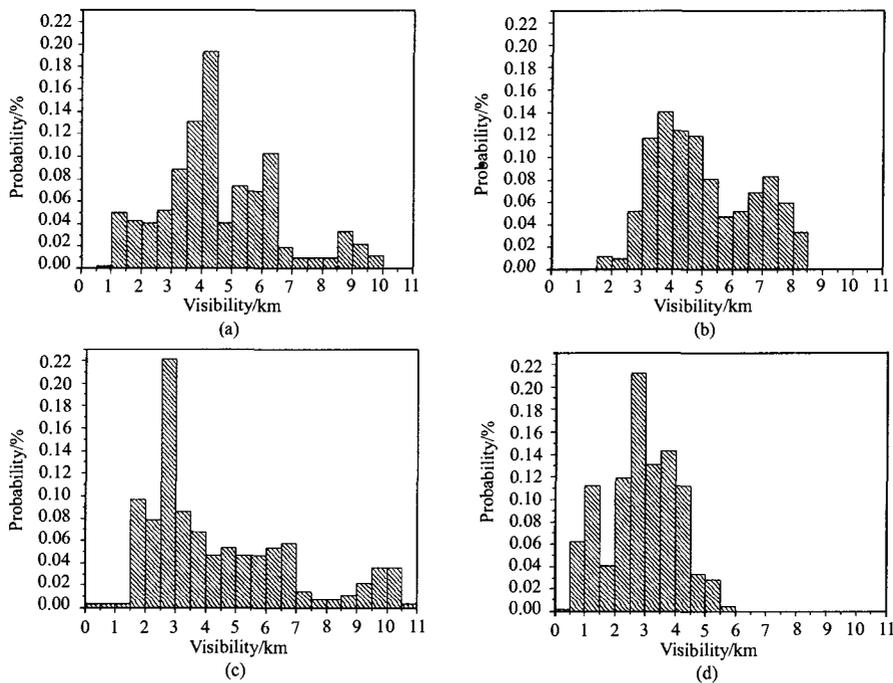


图 9 合肥地区大气能见度的概率分布图 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

Fig.9 Probability distributions of the visibility in Hefei (a) spring (b) summer (c) autumn (d) winter

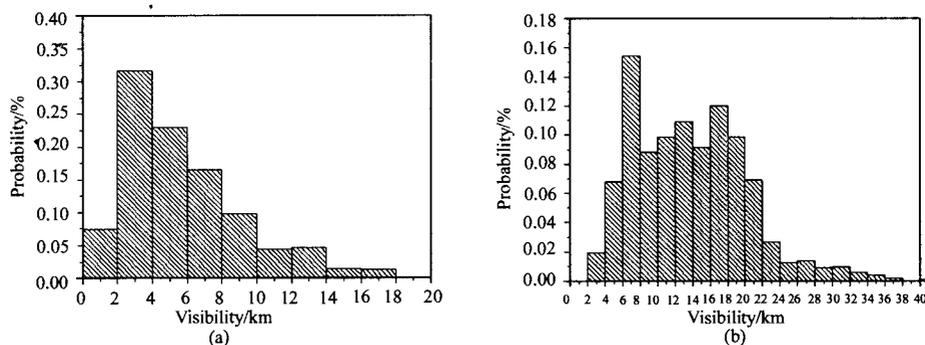


图 10 东南沿海地区大气能见度的概率分布图 (a) 春季 (b) 秋季

Fig.10 Probability distributions of the visibility on the southeast coast (a) spring (b) autumn

秋高气爽, 能见度最大达到了近 40 km, 而且相对频数较高的能见度的范围也大于内陆地区, 分别为: 春季 2~10 km, 6~20 km。

5 总结

合肥和东南沿海地区同属中国亚热带气候, 但前者冬冷夏热, 且夏季多梅雨天, 而冬季阴霾、雾天较多, 四季较为分明; 后者受海洋性气候影响更多, 冬无严寒, 夏无酷暑, 常年湿润。就下垫面而言, 前者为植被、土壤和水面相互交织的内陆, 而后者为潮湿的海边。两个地区大气环境的差异, 相应的气溶胶光学特性也有所不同, 主要表现在:

(1) 与大多数内陆地区相似, 合肥地区气溶胶数浓度、散射系数和吸收系数都存在显著的日变化, 且随时间的变化趋势基本一致, 呈有规律的两峰结构, 即早晨和傍晚时分较大, 而中午时分最小; 受秋收季节秸秆燃烧的影响, 秋季气溶胶粒子的数浓度明显较其它季节高。合肥地区散射系数的量级基本在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间, 吸收系数的量级在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间, 散射系数的大小是吸收系数的 2~4 倍。气溶胶粒子的谱分布在夏、秋两季符合 Junge 谱形式, 而春、冬两季的谱分布在聚集模态符合正态对数分布, 在粗模态较符合 Junge 谱。

合肥地区能见度的日变化规律较为明显, 通常每天下午 14:00~16:00 左右大气能见度最大, 而在清晨 6:00 左右能见度最低, 大气中气溶胶粒子的含量和太阳活动密切相关。合肥地区夏季多梅雨天, 而冬季阴霾、雾天较多, 因此相应的能见度相对较低; 而春夏秋冬四季相对频数较高 (概率超过 10%) 的能见度大致为: 3~6.5 km, 3~5 km, 3 km 左右

和 1~4.5 km。

(2) 由于受海洋下垫面独特的热力性质的影响, 海洋的昼夜温差不大, 同时风速较大, 对流一直处于较为充分的状态, 东南沿海地区气溶胶光学特征量全天起伏均较小, 没有明显的两峰结构。总体而言, 东南沿海地区气溶胶数浓度及散射、吸收系数都比合肥地区的小, 其散射系数在 10^{-4} 量级, 而吸收系数的量级为 10^{-5} ; 并且, 东南沿海地区散射系数与吸收系数的比值也较合肥地区大, 其散射系数多在吸收系数的 4~5 倍之间, 该地区黑碳气溶胶粒子的绝对含量和相对含量都较小, 对光波吸收较小。再者, 该地区秋、冬两季的气溶胶谱分布均符合 Junge 谱, 且 Junge 指数比合肥地区相应季节的值小, 即沿海地区大粒子所占比例较大。

相对而言, 东南沿海地区的能见度明显好于合肥内陆地区, 特别是在秋季, 能见度最大达到了近 40 km, 而且相对频数较高的能见度的范围也大于内陆地区, 春季 2~10 km, 秋季 6~20 km。但是, 受海洋性季风气候的影响, 沿海地区能见度的日变化规律不明显, 一天内能见度起伏相对较大, 与太阳的活动也没有明显关系。

通过上述较为系统的观测实验及统计分析, 初步建立了合肥和东南沿海地区气溶胶粒子光学特性的模式, 有助于较为全面地了解这两个典型地区大气气溶胶粒子的各种光学特征量, 并且可以深入了解一般陆地型以及介于污染和热带海洋型气溶胶粒子的光学特性。但是, 受观测实验样本数所限, 对于要求精度更高的定量分析计算, 还需要我们进一步的观测实验及分析。

参考文献:

- [1] Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics and its applications [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(1): 2-13 (in Chinese).
饶瑞中. 现代大气光学及其应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, **1**(1): 2-13.
- [2] Huang Honglian. Study on equivalence of light scattering properties for inhomogeneous aerosol particles [D]. Hefei: Master Thesis of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007(in Chinese).
黄红莲. 非均匀气溶胶粒子光散射特性的等效性研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士学位论文, 2007.
- [3] Han Yong. Measurements and statistical characteristics of atmospheric aerosol optical properties[D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese).
韩永. 大气气溶胶光学特性综合测量及统计特征分析 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士学位论文, 2006.
- [4] Pries T H. High energy laser meteorology [C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1221**: 254-293.
- [5] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosol and clouds: the software package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(5): 831-844.
- [6] Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi, et al. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 140-148 (in Chinese).
周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测 [J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 140-148.
- [7] Hu Huanling, Li Xuebin, Zhang Yinchao, et al. Determination of the refractive index and size distribution of aerosol from dual-scattering-angle optical particle counter measurements [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(16): 3864-3870.
- [8] Yan Fengqi. Study on measurements of atmospheric aerosol physical properties [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese).
阎逢旗. 大气气溶胶物理参数测量研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士学位论文, 2003.
- [9] Wu Xiaoqing. Investigation of optical turbulence characteristic and model in atmospheric boundary layer[D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004 (in Chinese).
吴晓庆. 大气边界层光学湍流特性与模式研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士学位论文, 2004.
- [10] TSI Corporation. Model 3321 aerodynamic particle sizer spectrometer [Z]. www.tsi.com.
- [11] TSI Corporation. Model 3563 integrating nephelometer [Z]. www.tsi.com.
- [12] Magee Scientific Company. The aethalometer [Z]. www.mageesci.com.
- [13] Belfort Instrument Company. Visibility sensor [Z]. www.belfortinstrument.com.
- [14] Huang Honglian, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Observational study on the concentration and size distribution of atmospheric aerosol over the Hefei area [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, Supplement C, 390-395 (in Chinese).
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, 增刊 C, 390-395.

作者简介: 黄印博 (1976-), 男, 博士, 主要研究方向为激光大气传输、大气光学特性和空间光通信等。