

doi:10.3788/gzxb20124112.1427

# 深圳城市气溶胶物理光学特性的观测研究

杨红龙<sup>1</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 杨溯<sup>2</sup>, 卢超<sup>1</sup>, 陈星登<sup>1</sup>, 刘爱明<sup>1</sup>

(1 深圳市国家气候观象台, 深圳市气象局, 广东 深圳 518040)

(2 国家气象信息中心, 北京 100081)

**摘 要:**气溶胶是影响气候变化和空气污染的重要因子. 在深圳地区展开气溶胶观测实验, 可以获得可靠的光学物理特征, 进而有助于准确评估气溶胶在新型超级城市区域的气像和环境效应. 本文利用 2010 年 12 月至 2011 年 8 月太阳光度计、黑碳和浊度计等气溶胶观测资料, 分析了新型超级城市深圳地区的气溶胶物理光学特性. 深圳地区气溶胶呈明显季节变化, 冬、春季由于城市污染性气溶胶的影响, 气溶胶光学厚度和 Angstrom 波长指数都较大, 夏季受海盐气溶胶的影响, 光学厚度较小, Angstrom 波长指数也较小. 光学厚度与 Angstrom 波长指数对比表明城市综合性污染是引起深圳气溶胶高光学厚度的主要原因. 深圳地区气溶胶的散射系数、吸收系数的平均值(标准偏差)分别为  $178.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $126.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) 和  $32.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $18.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ), 均低于珠三角腹地多年观测平均值的二分之一和国内其他大型城市观测值. 而单次散射反照率为 0.81, 与珠三角其他地区得到的结果接近. 此外, 气溶胶吸收、散射和单次散射反照率呈明显日变化, 可能主要受大气边界层变化的影响.

**关键词:**气溶胶特性; 光学厚度; 单次散射反照率; 散射系数

**中图分类号:** 文献标识码: A

**文章编号:** 1004-4213(2012)12-1427-8P4

## 0 引言

伴随着中国经济快速发展, 环境污染问题不断加剧, 已引起了全球关注. 2004 年中国 360 个城市的监测结果表明几乎 70% 监测城市的空气质量不能达到国家标准<sup>[1]</sup>. 随着汽车数量的不断增加, 化石燃料不断消耗, 已导致空气中的氮氧化物浓度不断升高. 特别在城市或城市群集地区环境问题已由原来的煤烟性污染向汽车尾气性污染转变<sup>[2]</sup>.

从 1999 年开始, 在北京、广州、珠三角和长三角地区开展了大量关于光化学烟雾的调查研究项目<sup>[3-6]</sup>. 研究表明中国三大城市群地区都面临着  $\text{O}_3$  和细粒子污染, 主要由于污染物与光化学过程、气体化合物和气溶胶、当地和区域尺度之间复杂的相互作用引起的. 此外, 区域模式和全球模式<sup>[7]</sup> 模拟结果表明中国地区的空气污染不仅对自身和邻国产生有害影响, 同时可能对区域, 甚至全球尺度的环境和气候产生影响.

深圳市作为珠三角地区的典型新型大城市, 随着其国际化进程的加快, 大量土地被工业化利用、交通工具迅猛增加、企业工厂蓬勃发展, 在这种情况

下, 城市气溶胶不断增加. 同时, 深圳为海滨城市, 海盐巨粒子可能会与污染物发生反应, 生成数千个次微米的细粒子气溶胶<sup>[8]</sup>. 此外, 还有研究指出珠三角地区的区域扩散<sup>[9]</sup> 及内陆地区的长距离输送<sup>[10]</sup> 气溶胶到深圳地区, 这些复杂的气溶胶导致深圳地区成为灰霾污染较严重的区域之一, 例如 2006 年深圳地区一年中一半天数的能见度低于 1 公里<sup>[11]</sup>. 因此, 迫切需要开展深圳地区的气溶胶观测研究. 然而, 由于深圳地区缺乏气溶胶长期观测资料, 相应的研究开展也较少, 从而对本地气溶胶光学和物理特征认识不足. 本文在深圳地区进行气溶胶的地面观测研究, 将有助于进一步了解深圳地区气溶胶复杂的物理光学特性, 认识城市人为排放气溶胶对本地气溶胶光学、物理特性的影响及其产生的辐射效应提供科学依据, 也有助于进一步认识灰霾特征及成因.

## 1 仪器和资料介绍

### 1.1 观测时间和地点

采样地点有 2 处, 太阳光度计位于深圳市东南部的西涌海边观测场 ( $114.55^\circ, 22.48^\circ$ ), 距海大约

基金项目: 广东省气象局气象科技项目 (No. 2011B14) 资助

第一作者: 杨红龙 (1983-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为城市环境与气候变化. Email: yanghl01@163.com

通讯作者: 杨溯 (1983-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为地面太阳辐射和气溶胶研究. Email: yangsu@cma.gov.cn

收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-08-20

300 m, 海拔高度为 160 m, 离市区大约 60 公里, 采样时间为 2010 年 12 月 1 日到 2011 年 8 月 31 日. 黑碳仪和浊度计位于市区福田区竹子林的园博园观测场(114.0°, 22.53°), 采样时间为 2011 年 1 月 1 日到 2011 年 8 月 31 日. 2 处观测点周围均无明显局地污染源.

## 1.2 观测仪器

CE-318 自动跟踪太阳光度计是由法国 Cimel 公司生产. 该仪器是由光学头部、跟踪伺服系统和控制箱等部分组成. 它既可以自动进行太阳直射辐射观测, 也可以进行等高度角和主平面天空光扫描, 共有 8 个(1 020, 870, 670, 500, 440, 936, 380 和 340 nm)通道, 光谱覆盖从可见光到近红外.

AE-31 型黑碳仪(Aethalometer, Magee Scientific Co, USA)有 7 个测量通道, 波长分别为 370, 470, 520, 590, 660, 880 和 950 nm, 可以连续实时监测黑碳气溶胶(Black Carbon Aerosol, BC)的质量浓度, 采样周期为 5 min. 其原理利用 BC 对可见光的强烈吸收特性, 而气溶胶中的其他成分对可见光的吸收可以忽略不计, 用一束光照射附有黑碳的滤膜时, 通过测量透过采样滤膜的不同波长光的光学衰减量, 就可以确定样品中的黑碳浓度. 同时, 滤膜采用石英纤维制成, 可以最大限度消除气溶胶中非吸收成分对透光率的影响. 然后利用测得的黑碳浓度推算吸收系数(具体方法见 2.3).

M9003 积分浊度仪(EcoTech, Australia)用于测量气溶胶颗粒的散射系数(Scattering efficiency,  $\sigma_s$ ). 该浊度计采用二极管阵列 LED, 波长 525 nm; 内置温度、压力、相对湿度测量, 外置加热管, 用来控制仪器的测量湿度, 本实验设置值为 60%. 积分式浊度仪除设定每天自动进行零点检查, 还定期进行零点和跨度检查.

## 1.3 计算方法

吸收系数的计算采用黑碳浓度推算吸收系数(Absorption coefficients,  $\sigma_a$ ). 吴兑等<sup>[12]</sup>在 2004 年利用 Aethalometer 与德国的 Photoacoustic Spectrometer 进行平行对比分析, 通过 880 nm 处的黑碳浓度反算 523 nm 处的吸收系数, 即

$$A_{532} = 8.28\text{MBC} + 2.23$$

式中: MBC 为黑碳气溶胶的质量浓度(880 nm), 单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $A_{532}$  为 Photoacoustic Spectrometer 测量的气溶胶在 532nm 处的吸收系数, 单位为  $10^{-6} \text{m}^{-1}$ .

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOT)、Angstrom 波长指数(Angstrom wavelength exponent,  $\alpha$ )、气溶胶体积谱分布(Aerosol Volume

Size Distribution, AVSD)的计算, 采用格拉纳达大学和 Cimel 公司联合开发, 基于 Nakajima 等<sup>[13]</sup>发展的 Skyrad 反演模式基础上专门针对 CE-318 太阳光度计的模式, 其中 Angstrom 波长指数采用 440 和 870 nm 数据. 该模式主要由一个快速准确的辐射传输算法和反演气溶胶光学特性的线性和非线性反演算法组成. 此外, 在数据处理过程中还采用了日本千叶大学开发的除云方案<sup>[14]</sup>进行数据质量控制.

## 2 结果与讨论

### 2.1 气溶胶光学厚度

大气光学厚度可以直观表征大气气溶胶光学特征. 图 1 显示了 2010 年 12 月至 2011 年 8 月 500 nm 处深圳地区的月平均气溶胶光学厚度. 从图可以看出气溶胶具有明显的月变化, 光学厚度的最小值出现在 12 月, 最低值为 0.27, 1 月相对于 12 月, 有明显增加, 光学厚度有较大的上升, 并且持续上升到 3 月而达到最大值 0.62; 4 月气溶胶光学厚度逐渐下降, 但依然较大. 从 5 月开始光学厚度呈明显下降趋势, 一直持续到 8 月, 光学厚度维持在较低值. 从季节变化看, 春季 AOT 出现较大值的几率比较大, 冬季次之, 夏季最小. 这一结果与谭浩波等<sup>[15]</sup>在番禺、广州观测的光学厚度季节变化特征一致. 同时, 注意到气溶胶体积光学厚度与地面观测浓度的季节变化

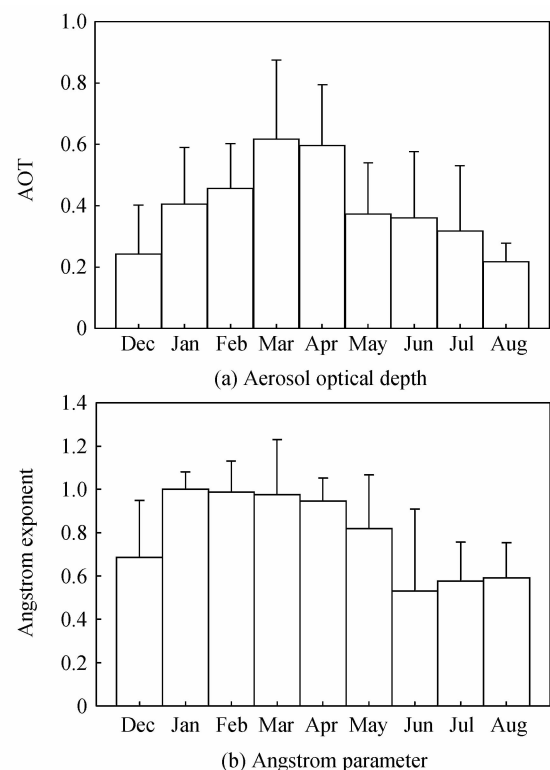


图 1 深圳地区气溶胶光学厚度和 Angstrom 波长指数月平均值变化

Fig. 1 Mean monthly values of aerosol optical depth at the 500 nm wavelength and Angstrom parameter

存在差异.如沈家芬等<sup>[16]</sup>利用广州市环境监测中心站的多年地面 PM<sub>10</sub> 监测数据,发现秋冬季节污染较重,春夏季污染较轻.影响地面浓度与体积差异的因素包括:气溶胶浓度垂直分布、大气相对湿度垂直廓线的季节变化及云和降水的季节变率.春夏季由于太阳的加热,对流旺盛,导致边界层高度较高,可能引起地面浓度较低,但整体垂直气柱浓度较大.此外,地面相对湿度和体积水含量在春夏季较大,冬季最小.高相对湿度情况下气溶胶吸湿增加较大引起光学消减可能大于地面浓度,尤其是地面以上相对

湿度和气溶胶吸湿增加最大.

图 2(a)显示了 AOT 日平均值的频率分布柱状图. AOT 频率分布形状较宽,最高频值主要集中在 0.1~0.4 之间,占 60% 左右,而大于 0.6 的部分只占 6%. 不同季节光学厚度(图 2)的统计直方图可以看出冬季光学厚度分布较宽,最大发生在 0.1~0.2 和 0.3~0.4 处.春季光学厚度分布更宽,出现 2 个大值区间,为 0.3~0.4 和 0.6~0.7,这可能与城市污染较重有关,后面将详细分析.而夏季光学厚度明显下降,呈逐渐减少趋势,大值区间为 0.1~0.2.

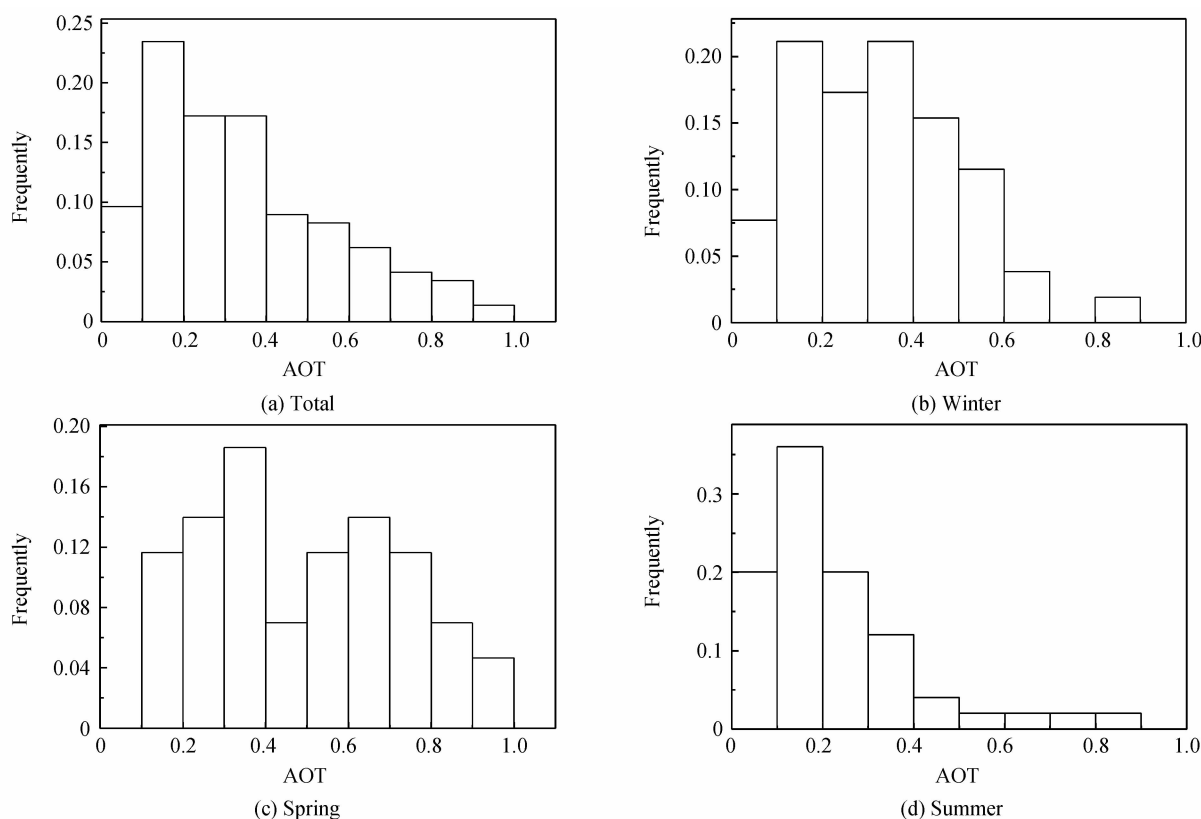


图 2 AOT 日平均值的频率分布

Fig. 2 Seasonal frequency of occurrences of aerosol optical depth

## 2.2 气溶胶粒子尺度特征

### 2.2.1 Angstrom 波长指数

Angstrom 波长指数被认为是最简捷和有效地描述气溶胶典型粒子尺度的物理量.图 1(b)显示了整个观测期间 Angstrom 波长指数的月平均值变化.由图可以看出所有月平均值都没有超过 1.2,表明深圳地区气溶胶为大粒子与小粒子模态混合存在,也间接表明在气溶胶高浓度情况时细粒子气溶胶凝结及细粒子的吸湿增长可能引起大粒子积聚模态.冬季除 12 月以外,1 月和 2 月 Angstrom 指数都大于 0.9,这与冬季深圳地区主导风向为偏北风,珠三角地区污染物可能会输送到深圳地区,与本地污染共同形成高光学厚度的小粒子为主要的城市污染型气溶胶.春季(3~5 月)Angstrom 波长相对较大,在

0.8~1 之间.春季与冬季相似,主要由城市综合性污染引起的高光学厚度的气溶胶.夏季(6~8 月) Angstrom 波长指数较小,都在 0.6 以下.夏季深圳地区主要以南风为主,影响气团主要来源海上,所以气溶胶可能主要来源于海盐气溶胶,粒子半径相对较大.总体来说,月平均 Angstrom 波长指数在 0.6~1.1 之间,春、冬季粒子相对比较小,而夏季粒子比较大.夏季 Angstrom 波长指数与谭浩波等<sup>[17]</sup>在南海北部观测的海盐气溶胶的 Angstrom 波长指数相近.冬季和春季结果较广州<sup>[15]</sup>观测的 Angstrom 波长指数小,可能是由于本文所用的观测站点离市区相对较远,且离海较近,中小粒子浓度所占比重较城区有所下降.

图 3(a)显示 Angstrom 波长指数的频率分布,

主要集中在 0.8~1.1 这段区间, 概率最大为 0.9~1.0(25%), 1.0 以下占 40%, 1.2 以上占 10%. 不同季节的 Angstrom 波长指数的统计分布图(图 3)显示: 冬、春季城市污染相对较重, Angstrom 波长指数分布相对比较宽, 大值主要分布在 0.8~1.1. 春

季分布相对比较窄, 大值为 0.8~0.9, 而 1.0 以上分布也相对比较大. 夏季城市空气质量好转, 气溶胶可能主要来源于海盐气溶胶, Angstrom 波长指数最大值为 0.4~0.5.

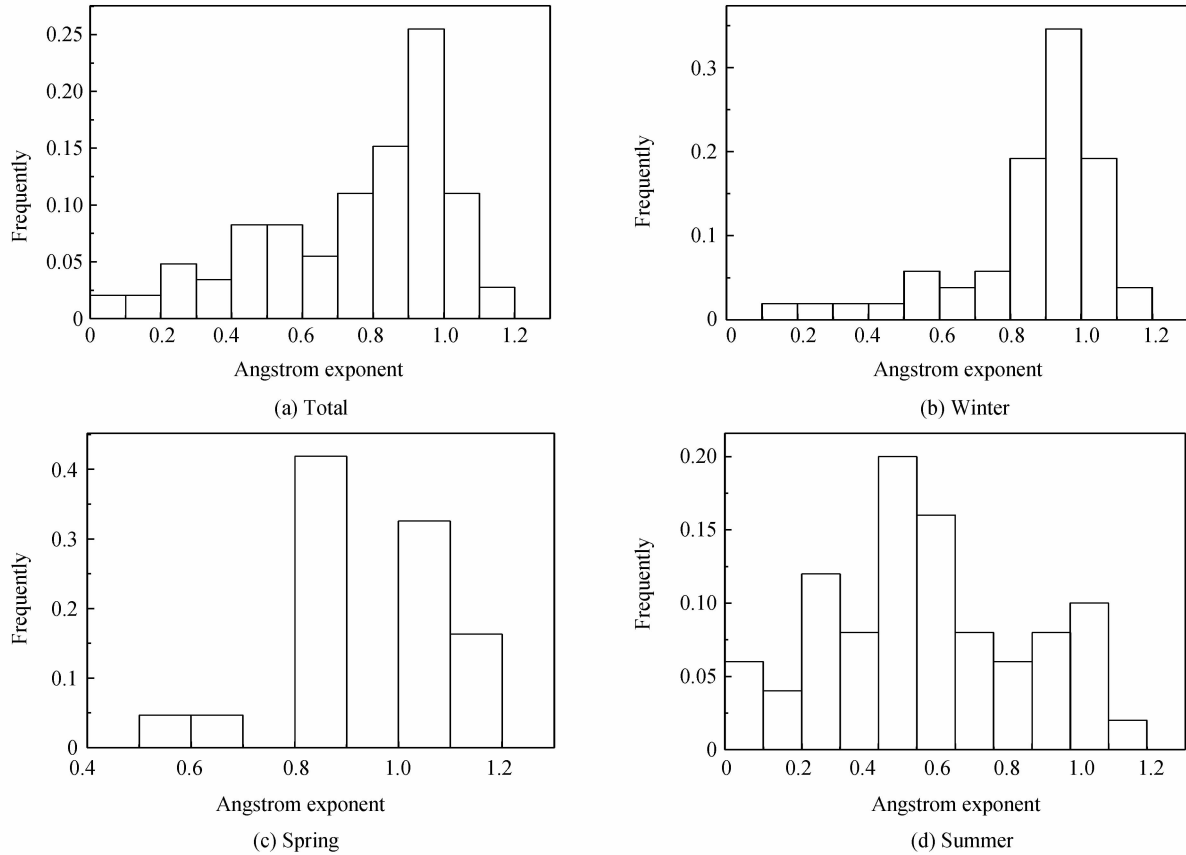


图 3 Angstrom 波长指数的统计直方图, 说明同图 2  
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Angstrom parameter

图 4 为光学厚度和 Angstrom 指数的散点图, 从图 4 可以看到随着光学厚度增加, Angstrom 指数可能出现的最大值在逐渐增加, 说明小粒子增加是引起高光学厚度的主要因素, 这与深圳地区冬、春季频繁的灰霾天气有直接关系; 当 Angstrom 指数小于 0.2 时, 大部分 AOT 都比较小(占总数的 5%), 说明大粒子气溶胶引起高污染现象的可能较小, 深圳地区大气中大粒子气溶胶的浓度较低. 而 Angstrom 指数大于 1 的值占总数的 30.5%, 说明深圳地区细粒子的比重较大. AOT 小于 0.5 时, Angstrom 的分布很大, 在 0~1.2 之间变化, 说明气溶胶组成成分复杂, 这可能由于该观测站靠近海边, 受到海盐气溶胶的影响, 同时也受到城市污染的扩散输送影响, 使得气溶胶成分比较复杂. 当 AOT > 0.5, Angstrom 基本都大于 0.8, 说明高污染的情况时, 气溶胶以混合型或细粒子为主, 气溶胶主要来源于城市污染物. 同时, 注意到高污染时, AOT 与

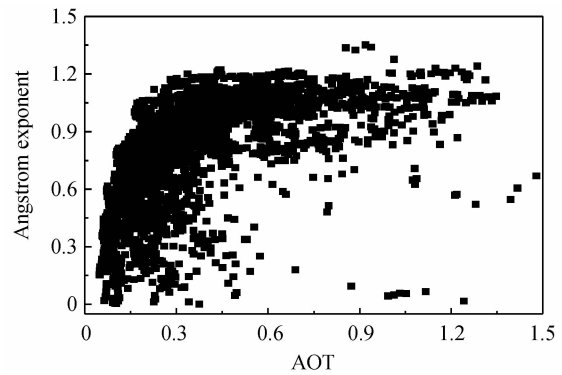


图 4 光学厚度和 Angstrom 指数散点图  
Fig. 4 Scatter grams of  $\alpha$  vs AOT

Angstrom 指数没有明显的关系, 这与谭浩波等<sup>[15]</sup>分析广州城区站点结果一致, 高污染事件主要是由局地排放有关局地污染引起的, 可能来源于珠三角地区<sup>[9]</sup>. 而李成才<sup>[18]</sup>在香港观测的结果表明 Angstrom 指数与 AOT 呈明显的反相关, 这可能与两个地区的污染来源不同有关, 深圳污染主要来源

于周边城市的局地扩散,而香港主要来源于长距离输送.

### 2.2.2 气溶胶谱分布

我们反演了观测期间各季的  $10^{-6} \text{ cm} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$  半径范围内的 20 个粒子尺度上的气溶胶体积分布(图 5). 由图 5 可以看到深圳地区气溶胶体积分布有显著的季节特征. 在冬季(黑色实线),气溶胶体积分布大致呈三峰分布,第一个峰值出现在  $0.68 \mu\text{m}$  左右,体积浓度约为  $3.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ ;第二个峰值出现在  $0.15 \mu\text{m}$  左右,是整个体积分布中粒子数量最集中的尺度,体积浓度达到  $2.61 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ ;在  $5 \mu\text{m}$  处出现第三个峰值,体积浓度为  $2.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ ,略低于第一峰值. 春季(红色实线)的粒子谱型与冬季较相似,在  $0.53 \mu\text{m}$  和  $5 \mu\text{m}$  左右分别出现两个峰值,体积浓度分别为  $3.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$  和  $2.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ . 此时第一峰值较弱,不如冬季显著. 进入夏季后,粒子谱呈三峰分布,但第一峰值对应的粒子半径大于冬、春季,集中在  $0.25 \mu\text{m}$  左右,第二、第三峰值粒子对应的粒子半径( $0.53 \mu\text{m}$ ,  $6.4 \mu\text{m}$ )与冬、春季较一致,体积浓度略高,约为  $3.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$  和  $2.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ . 粗粒子相对其他季节半径变大,体积

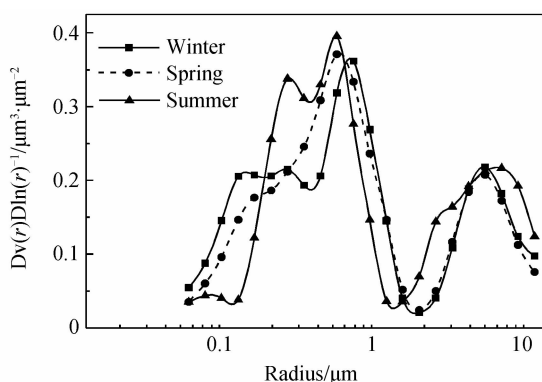


图 5 深圳地区各季 20 个不同尺度上气溶胶体积分布  
Fig. 5 Seasonal AVSD in the total atmospheric column

浓度高. 总的来看,冬季和春季的粒子谱型较为相似,而夏季细粒子部分变窄,大粒子部分变宽,粒径在  $0.15 \mu\text{m}$  左右的粒子浓度显著减少, $0.5 \mu\text{m}$  左右的粒子浓度增加显著,粗粒子的比重增加了 10%. 深圳地区的气溶胶主要来源于城市的复合型污染物和海盐气溶胶,夏季主要受海盐气溶胶影响,而冬季和春季主要来源于城市污染,以细粒子为主,且结构相对比较复杂.

### 2.3 吸收、散射系数和单次散射反照率

#### 2.3.1 统计特征分析

吸收系数和散射系数是气溶胶光学性质的重要参量. 单次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)是反映气溶胶粒子总消光中散射所占的比例,是气溶胶散射和吸收的重要性参量,对评估气溶胶的直接辐射强迫有重要的意义. 表 1 给出了气溶胶光学性质的统计特征. 深圳气溶胶的散射系数和吸收系数平均值(标准偏差)为  $178.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $126.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) 和  $32.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $18.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ),中位值分别为  $171.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ,  $29.3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ . 同时注意到标准偏差相对较大,暗示了观测的气溶胶特征波动性很强.

表 1 2010 年 1~8 月深圳气溶胶光学性质统计特征

Table 1 The statistical results of absorption and scattering coefficient, and single scattering albedo of aerosol during the measurements at Shenzhen from January 2011 to August 2011

	$\sigma_a (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	$\sigma_s (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	SSA
Mean	32.5	178.7	0.81
Median	29.3	171.1	0.84
Maximum	106.6	591.2	0.92
Minimum	7.8	18.64	0.54
S. D.	18.1	126.6	0.08

总体来说,深圳气溶胶吸收和散射系数均低于珠三角腹地多年观测平均值<sup>[12]</sup>的二分之一,与其北缘观测值<sup>[19]</sup>相当. 表 2 列出了一些其他地区研究得出气溶胶特征,考虑到不同观测试验的仪器、设计等

表 2 观测期间气溶胶光学性质统计值以及与文献报道的观测值的对比

Table 2 Statistical results of aerosol optical properties observed in this study and reported for other campaigns

Location	$\sigma_a (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	$\sigma_s (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	SSA
Beijing <sup>[20]</sup>	$288 \pm 281_{(525)}$	$56 \pm 49_{(532)}$	$0.80 \pm 0.09$
The hinterland of the Pearl River Delta <sup>[12]</sup>	$358 \pm 107_{(525)}$	$82 \pm 23_{(532)}$	$0.81 \pm 0.04$
Northern edge of the Pearl River Delta <sup>[19]</sup>	$151 \pm 103_{(550)}$	$34.3 \pm 26.5_{(532)}$	$0.82 \pm 0.07$
Linan <sup>[21]</sup>	$353 \pm 202_{(530)}$	$23 \pm 14_{(565)}$	$0.93 \pm 0.04$
Jinan <sup>[22]</sup>	$428.5 \pm 315.8_{(525)}$	$54.9 \pm 44.7_{(532)}$	$0.87 \pm 0.05$
Atlanta, USA <sup>[23]</sup>	$121 \pm 48_{(530)}$	$16 \pm 12_{(550)}$	$0.87 \pm 0.08$
Nagoya, Japan <sup>[24]</sup>	$53.5 \pm 39.6_{(530)}$	$18.6 \pm 13.7_{(550)}$	$0.72 \pm 0.12$
Granada, Spain <sup>[25]</sup>	$60 \pm 30_{(550)}$	$21 \pm 10_{(550)}$	$0.68 \pm 0.07$
Kwangju, Korea <sup>[26]</sup>	$319 \pm 222_{(520)}$	$42 \pm 12_{(880)}$	$0.84 - 0.93$
Shenzhen(urban area; this study)	$178.7 \pm 126.6_{(525)}$	$32.5 \pm 18.1_{(523)}$	$0.81 \pm 0.08$

方面存在不确定性,我们只是从数量级上与其他地区的观测结果进行初步的对比分析.观测期间气溶胶散射系数较北京<sup>[20]</sup>、临安<sup>[21]</sup>和济南<sup>[22]</sup>的观测值低很多,与美国的亚特兰大<sup>[23]</sup>的观测值相当,而高于日本名古屋<sup>[24]</sup>、西班牙的格拉纳达<sup>[25]</sup>和韩国的光州<sup>[26]</sup>的观测值.吸收系数与城市本地站临安<sup>[21]</sup>、美国的亚特兰大<sup>[23]</sup>、日本名古屋<sup>[24]</sup>、西班牙的格拉纳达<sup>[25]</sup>和韩国的光州<sup>[26]</sup>相当,而低于北京<sup>[20]</sup>、广州<sup>[12]</sup>和济南<sup>[22]</sup>的观测值.

本观测期间得出的单次散射反照率平均值为 0.81,与吴兑等<sup>[12]</sup>利用珠江三角洲腹地的多年平均值得出的 0.81 和 Garland 等<sup>[19]</sup>利用七月珠三角北缘的观测值得到的 0.82 非常接近,而低于城市本地站——临安<sup>[21]</sup>的观测值 0.93,也低于济南<sup>[22]</sup>,亚特兰大<sup>[23]</sup>和韩国光州<sup>[26]</sup>的观测值,高于日本名古屋<sup>[24]</sup>、西班牙的格拉纳达<sup>[25]</sup>的观测值.

### 2.3.2 日变化特征分析

图 6 给出了 2011 年 1 月~8 月份气溶胶吸收、散射、单次散射反照率的日变化特征.由图 6 可以看

出它们呈明显的日变化特征.吸收系数的低值出现在下午(14 点),而高值则发生在夜间,这种变化趋势是由于大气边界层变化特征引起的.夜间,大气边界层降低,从而导致大气污染物集中到了大气底层,引起地面气溶胶浓度增加,而白天,由于地面开始吸收太阳辐射温度升高,边界层开始抬升,同时地面湍流变得活跃有助于地面气溶胶扩散,从而导致午后地面出现低浓度值.吸收系数最大值出现在早晨(9 点左右),这是由于早晨上班交通高峰,大量汽车尾气等人为气溶胶的排放.凌晨时段(0~6 点),由于气溶胶的干沉降使得气溶胶浓度降低,从而引起气溶胶吸收系数减小.气溶胶散射系数也呈相似的日变化特征,但早晨 9 点左右交通高峰时的峰值没有吸收系数明显,峰值出现时间滞后.与此对应的单次散射反照率的峰值出现在中午 13~15 时,低值出现在早晨(08~09 时)和傍晚(18~19 时)时刻,夜间和下午单次散射反照率的大值可能与光学过程产生的二次气溶胶有关,但受限于资料,本文尚不能得出二次气溶胶生成的数量.

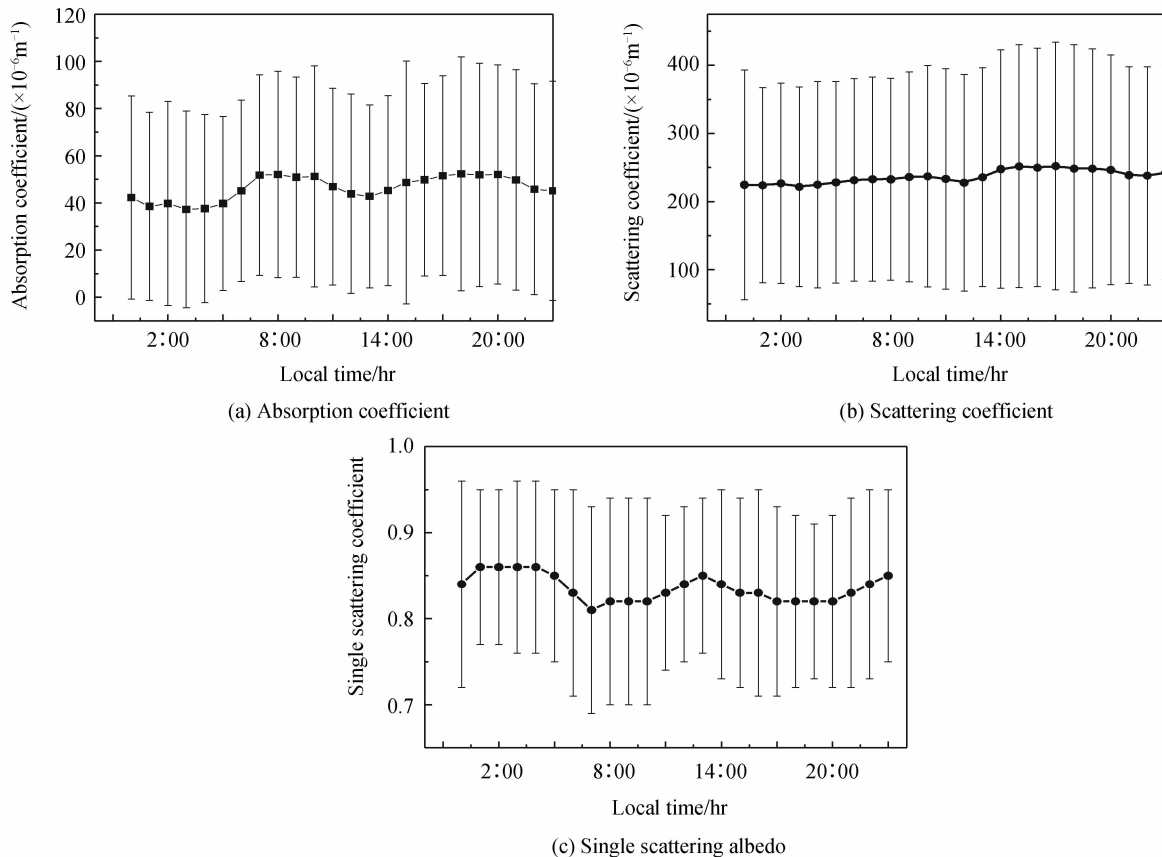


图 6 2011 年 1 月~8 月溶胶光学性质的日变化

Fig. 6 Diurnal variability of aerosol optical properties at Shenzhen from January 2011 to August 2011, error bars represent S. D.

## 3 结论

根据 2010 年 12 月~2011 年 8 月的观测资料得到深圳地区气溶胶 AOT、Angstrom 指数、体积谱

分布、吸收系数、散射系数等光学和物理特征,得出主要结论:

1)深圳地区的气溶胶光学厚度有显著的季节变化,最小值出现在 12 月,最大值出现在 3 月.春季出

现 AOT 高值的几率较大,冬季次之,夏季最小。

2)深圳地区各季气溶胶粒子谱均呈三峰型分布,结合光学厚度和 Angstrom 指数可以看出冬、春季深圳地区主要受城市气溶胶影响,以小粒子的气溶胶为主,夏季以大粒子的海盐气溶胶浓度为主。

3)深圳地区气溶胶中细粒子的所占比重较大,高污染的情况时( $AOT \geq 0.5$ ),气溶胶以混合型或细粒子为主,气溶胶主要来源于局地污染。空气清洁时( $AOT < 0.5$ ),Angstrom 指数的变化很大(0~1.2),气溶胶组成成分复杂。

4)深圳气溶胶的散射系数、吸收系数的平均值(标准偏差)分别为  $178.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $126.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ )和  $32.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $18.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ),均低于珠三角腹地多年观测平均值的二分之一,与珠三角北缘观测值相当。单次散射反照率为 0.81,与珠三角其他地区得到的结果接近,与北京城市气溶胶值(0.80)相当,低于城市本地站一临安观测值 0.93。

5)气溶胶吸收、散射系数呈明显的日变化,低值出现在白天,高值则发生在夜间,这可能由于大气边界层变化特征引起的。单次散射反照率在夜间和下午出现大值,可能与气溶胶的二次生成有关。

#### 参考文献

- [1] SHAO M, TANG X, ZHANG Y, *et al.* City clusters in China; air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology*, 2006, **4**(7): 353-361.
- [2] GUO H, JIANG F, CHENG H R, *et al.* Concurrent observations of air pollutants at two sites in the Pearl River Delta and the implication of regional transport [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(19): 9247-9791.
- [3] ZHANG Y H, ZHU X L, SLANINA S, *et al.* Aerosol pollution in some Chinese cities [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2004, **6**(76): 1227-1239.
- [4] ZHU Yan-wu, LIU Wen-qing, XIE Pin-hua, *et al.* Monitoring and analysis of atmospheric pollutants in traffic ban period of Beijing with DOAS [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2040-2045.  
朱燕舞,刘文清,谢品华,等.北京限行期间大气污染物的差分光学吸收光谱监测与分析[J].*光子学报*, 2009, **38**(8): 2040-2045.
- [5] TONG Yan-chao, LIU Wen-qing, ZHAO Nan-jing, *et al.* Observation and research on the typical atmosphere of Beijing Olympic Game by raman lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 279-283.  
佟彦超,刘文清,赵南京,等.北京奥运前期典型天气喇曼激光雷达观测研究[J].*光子学报*, 2010, **39**(2): 279-283.
- [6] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, *et al.* Measurements of the aerosol over naqu of tibet and suburb of beijing by micro pulse lidar (MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435-1439.  
刘诚,明海,王沛,等.西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量[J].*光子学报*, 2006, **35**(9): 1435-1439.
- [7] LIANG Q, JAEGLE L, JAFFE D A. Long-range transport of Asian pollution to the northeast Pacific: seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(23): D23S-D27S.
- [8] WU Dui. The relationships between increased haze weather in coastal industrial cities and sea salt aerosol particles [J]. *Guangdong Meteorology*, 2009, **31**(2): 1-3.  
吴兑.沿海工业城市灰霾天气增多与海盐气溶胶粒子的关系[J].*广东气象*, 2009, **31**(2): 1-3.
- [9] CHAN C K, YAO X. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [10] ZHANG Y H, HU M, ZHONG L J, *et al.* Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): Overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6157-6173.
- [11] WU D, TIE X, LI C, *et al.* An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(35): 6568-6577.
- [12] YAO Ting-ting, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, *et al.* High time resolution observation and statistical analysis of atmospheric light extinction properties and the chemical speciation of fine particulates [J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 2010, **40**(8): 1163-1171.  
姚婷婷,黄晓锋,何凌燕,等.深圳市冬季大气消光性质与细粒子化学组成的高时间分辨率观测和统计关系研究[J].*中国科学:化学*, 2010, **40**(8): 1163-1171.
- [13] WU Dui, MAO Jie-tai, DENG Xue-jiao, *et al.* Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, **52**(8): 1152-1163.  
吴兑,毛节泰,邓雪娇,等.珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J].*中国科学:D辑*, 2009, **52**(8): 1542-1553.
- [14] NAKAJIMA T, TANAKA M, YAMAUCHI T. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data [J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(19): 2951-2959.
- [15] KHATRI P, TAKAMURA T. An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, **87**(1): 189-204.
- [16] TAN Hao-bo, WU Dui, DENG Xue-jiao, *et al.* Observation of aerosol optical depth over the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(6): 1146-1155.  
谭浩波,吴兑,邓雪娇,等.珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究[J].*环境科学学报*, 2009, **29**(6): 1146-1155.
- [17] SHEN Jia-feng, FENG Jian-jun, XIE Chun-ling, *et al.* Analysis of temporal and spatial variation of PM10 in Guangzhou [J]. *Ecological Environment*, 2008, **17**(02): 553-559.  
沈家芬,冯建军,谢春玲,等.广州市 PM10 的时空变化特征分析[J].*生态环境*, 2008, **17**(02): 553-559.
- [18] TAN Hao-bo, WU Dui, BI Xue-yan. Measurement and study of aerosol optical depth over northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, **25**(5): 21-25.  
谭浩波,吴兑,毕雪岩.南海北部气溶胶光学厚度观测研究[J].*热带海洋学报*, 2006, **25**(5): 21-25.
- [19] LI Cheng-cai. Remote sensing of aerosol optical depth by MODIS and its application on the air pollution research [D]. Beijing: Peking University Department of Atmospheric Science, 2002.  
李成才. MODIS 遥感气溶胶光学厚度及应用用于区域环境大气污染研究[D].北京:北京大学大气科学系, 2002.
- [20] GARLAND R M, YANG H, SCHMID O, *et al.* Aerosol

- optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(16): 5161-5186.
- [21] HE X, LI C C, LAU A K H, *et al.* An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8903-8915.
- [22] XU J, BERGIN M H, YU X, *et al.* Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(2): 161-173.
- [23] XU Zheng, LI Wei-jun, YU Yang-chun, *et al.* Characteristics of aerosol optical properties at haze and non-haze weather during autumn at Jinan city [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(4): 546-552.  
徐政,李卫军,于阳春,等. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(4): 546-552.
- [24] CARRICO C M, BERGIN M H, XU J, *et al.* Urban aerosol radiative properties: Measurements during the 1999 Atlanta Supersite Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D7): 8422, doi:10.1029/2001JD001222.
- [25] KHATRI P, ISHIZAKA Y, TAKAMURA T. A study on aerosol optical properties in an urban atmosphere of Nagoya, Japan[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, **87**(1): 19-38.
- [26] LYAMANI H, OLMO F J, ALADOS-ARBOLEDAS L. Physical and optical properties of aerosols over an urban location in Spain: seasonal and diurnal variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(1): 239-254.
- [27] KIM K, HE Z, KIM Y. Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(D19): D19S02.

## The Measurement of Aerosol Optical Properties Over Shenzhen

YANG Hong-long<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, YANG Su<sup>2</sup>, LU Chao<sup>1</sup>, CHEN Xing-deng<sup>1</sup>, LIU Ai-ming<sup>1</sup>

(1 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen 518040, China)

(2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Atmospheric aerosols is a key element of climate changes and air pollution, the analysis of the aerosol optical and physical properties can reduce uncertainties in the quantitative assessment of aerosol effects on regional climate and environmental changes, especially in the mega-city. In this study, from December 2010 to August 2011, in situ measurements of aerosol optical properties were conducted at rural and city sites of the mega-city Shenzhen in southeast China. The aerosol optical depth showed a seasonal cycle with the lowest values in summer, while the highest values occurred in winter and spring. The annual cycle of Angstrom wavelength exponent showed a summer minimum associated with sulfate aerosols, and a spring/winter maximum associated with heavy air pollution. The scatter grams of the optical thickness and Angstrom wavelength exponent also indicates that the high aerosol optical thickness mainly come from the city pollution. Mean values (standard deviation, S. D.) of scattering and absorption coefficients for the entire period are  $178.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $126.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) and  $32.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  ( $18.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) respectively. These values are approximately half of the reported values obtained in the Guangzhou urban area. The mean single scattering albedo for the entire period was estimated as 0.81, which is similar to the values reported for the other urban area. The daily variations of aerosol absorption and scattering coefficients were strongly influenced by synoptic changes throughout the observation period.

**Key words:** Aerosol optical property; Aerosol optical depth; Single scattering albedo; Scattering efficiency