

深圳地区气溶胶的光学特征及来源分析

杨红龙¹ 卢超¹ 刘爱明¹ 杨溯²

(¹ 深圳市气象局深圳市国家气候观测台, 广东 深圳 518040)
² 国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要 气溶胶是城市污染的主要成分,也是气候评估中最大的不确定因子。利用 2011 年 1 月至 2012 年 12 月气溶胶观测资料,分析了新型超级城市深圳地区的气溶胶光学特性。深圳地区气溶胶表现出强吸收特征,散射、吸收系数的平均值(标准偏差)分别为 $(175.4 \pm 127.8) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 、 $(30.5 \pm 24.5) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 单次散射反照率平均值为 0.83, 较北京、广州等国内城市观测值大,但小于国外城市的观测值。气溶胶光学特征呈明显的季节变化,散射、吸收系数和单次散射反照率均在冬季最大,夏季最小。气溶胶特征日变化不仅受边界层日变化影响,还与当地风向、污染源变化、光化学反应及夜间复杂的化学反应有关。利用轨迹模式聚类分析不同来源气溶胶的光学特征,结果表明当气溶胶来源于污染地区和城市人口密集区时,气溶胶的光学特征值都较高,尤其冬季。来自污染地区的气溶胶单次散射反照率不仅大于来自干净地区的气溶胶单次散射反照率值,且大于污染源地区的值。

关键词 大气光学;气溶胶光学特征;单次散射反照率;散射系数

中图分类号 X513 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1201003

Analysis of Aerosol Optical Properties and Sources at Shenzhen

Yang Honglong¹ Lu Chao¹ Liu Aiming¹ Yang Su²

(¹ Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen, Guangdong 518040, China)
² National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China)

Abstract Atmospheric aerosols are not only a major component of urban air pollution, but also one of the largest sources of uncertainty in the assessment of the climate evaluation. Aerosol optical properties are investigated at Shenzhen in Pearl River Delta of China according to the observation data of aerosol from 2011 to 2012. The aerosol at Shenzhen is characterized by strongly light-absorbing characteristics. Mean values (standard deviation, SD) of scattering and absorption coefficients for the entire period are $(175.4 \pm 127.8) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ and $(30.5 \pm 24.5) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, respectively. The mean single scattering albedo (S_{SA}) for the entire period is estimated as 0.83, which is higher than the values reported for the domestic cities, such as Beijing and Guangzhou, but lower than that in foreign cities. The absorption, scattering coefficients and S_{SA} values show a seasonal cycle with the lowest values in summer, while the highest values in winter. Their diurnal variations cannot be solely explained with the change of atmospheric boundary layer, and the influence of local wind patterns, variation of pollution, photochemical reaction and the complex chemical reaction at night should also be considered. A trajectory cluster analysis is applied to discern the source characteristics of aerosol optical properties for different air masses. The results show that the values of optical properties are all high when the air masses come from the dense population centers in industrial areas and contaminated regions, especially in winter. The cluster-mean S_{SA} for aerosol coming from the polluted areas is not only higher than those from the “clean” directions, but also higher than the reported values for the regions with high pollution emissions.

Key words atmospheric optics; aerosol optical properties; single scattering albedo; scattering coefficient

OCIS codes 010.1290; 010.1310

收稿日期: 2013-04-10; 收到修改稿日期: 2013-07-15

基金项目: 广东省气象局气象科技项目(2011B14)

作者简介: 杨红龙(1983—),男,博士,工程师,主要从事城市环境与气候变化方面的研究。E-mail: yanghl01@163.com

1 引 言

气溶胶颗粒物是最重要的气候变化因子之一。它通过吸收和散射太阳辐射,影响到达地面的太阳辐射,进而改变地面能量收支。此外,作为云的凝结核,气溶胶的体积浓度、粒子大小、粒子成分等因素在很大程度上决定云的光学特性和生命周期^[1],间接引起气候变化^[2]。另一方面,随着工业化进程不断加快,城市气溶胶污染日益严重,因此气溶胶成为城市环境研究的重要内容^[3-6]。

基于气候变化与城市环境研究的需要,迫切需求可靠的气溶胶光化学信息。然而,气溶胶分布具有高度的时间和空间变率,与基础气象资料相比,气溶胶观测开展较晚,普及程度较低,尤其是长时间序列的气溶胶观测更是匮乏,这是气溶胶在气候效应与城市环境研究中仍有较大不确定性的主要原因^[7]。

深圳市作为新型大城市,工业蓬勃发展、人口剧增、交通工具数量直线上升,在这种情况下,当地气溶胶污染不断增加。同时,深圳地区位于珠江三角洲(下文简称珠三角),该地区聚集了香港、深圳、广州、东莞、中山、佛山等城市,为中国最严重灰霾污染区域之一^[8]。周边地区气溶胶可能随着大气扩散输送到深圳地区^[9]。此外,深圳作为海滨城市,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^[10]。Liu 等^[11]研究发现珠三角地区有新的二次气溶胶形成。因此,深圳地区气溶胶复杂,研究其光学特征,有助于进一步认识大型城市气溶胶变化特性,也有助于进一步认识灰霾特征及成因。本文利用 2011 年 1 月至 2012 年 12 月深圳城市气溶胶观测资料,分析城市气溶胶变化特征,并借助轨迹模式分析不同来源气溶胶的变化特征。

2 资料与方法

2.1 观测时间与地点

气溶胶采样地点位于深圳市区福田区竹子林的园博园观测场(E114. 0°, N22. 53°),采样时间为 2011 年 1 月 1 日到 2012 年 12 月 31 日。站点周围没有明显的局地污染源,能够很好地代表深圳地区城市大气状况。气象观测资料来自深圳市国家基本气象站,距观测点 100 m。

2.2 观测仪器

气溶胶散射系数(σ_{sca})的观测采用了 M9003 积分浊度仪(澳大利亚 EcoTech)。该仪器安装在观测集装箱内,进气口位于箱顶,采用二极管阵列 LED,

波长为 525 nm,测量角度为 $10^\circ < \theta < 170^\circ$,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,实验设置值为 60%。积分浊度仪除设定每天自动进行零点检查外,还每周进行人工零点和跨度检查。理论分析表明,当测量粒子为粗粒子时(如沙尘天气),积分浊度计的系数误差较大^[12]。由于深圳地区气溶胶粒子以细粒子为主,没有沙尘暴现象,因而文中未做订正。

黑碳气溶胶浓度测量采用了 AE-31 型黑碳仪。AE-31 型黑碳仪有 7 个测量通道,分别为 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm。其利用黑碳气溶胶对可见光具有的吸收衰减特性,通过测量透过采样滤膜的不同波长光的光学衰减量,就可以确定样品中黑碳气溶胶含量,然后利用测得的黑碳浓度推算吸收系数(具体方法见 2.3)。黑碳仪安装在观测集装箱内,进气口位于箱顶,采样口离地面的高度大于 3 m,采样流量为 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,进气口加装了 SCC1. 82 型切割头(美国 BGI Inc.),切割粒径为 $2.5 \mu\text{m}$,每 5 min 做一次循环观测。

2.3 计算方法

吸收系数(σ_{abs})的计算采用了黑碳浓度推算吸收系数的间接方法,即

$$\sigma_{\text{abs}} = \alpha \times [C_{\text{B}}]. \quad (1)$$

式中 α 为黑碳浓度与吸收系数的转化系数,其取值一般根据理论计算或观测的吸收系数与黑碳浓度线性拟合^[13]的经验值来确定, C_{B} 为黑碳浓度。文中 α 的取值为 8.28,是根据吴兑等^[14]利用 Aethalometer 观测到的 880 nm 处的黑碳浓度与德国的声光法测量的 523 nm 处的吸收系数线性拟合得到,是珠三角地区平行对比结果。

为了计算单次散射反照率(S_{SA}),采用经验公式($\sigma_{\text{abs}} \propto \lambda^\beta$)将 523 nm 处吸收系数转化为 525 nm 处吸收系数,其中 β 取值为 -1(波长为 $0.45 \sim 0.70 \mu\text{m}$)^[15]。

3 结果分析

3.1 统计特征

表 1 给出了 2011 年 1 月至 2012 年 12 月深圳地区气溶胶光学统计特征。由表 1 可以看出气溶胶散射系数 σ_{sca} 、吸收系数 σ_{abs} 的多年平均值[标准偏差(SD)]分别为 $(175.4 \pm 127.8) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 、 $(30.5 \pm 24.5) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$,最大值分别达到了 $1720.8 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $271.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。考虑到不同观测实验的仪器、设计等方面存在不确定性,故只从数量级上与其他地区的观测结果进行初步的对比分析(见表

2)。 σ_{sca} 和 σ_{abs} 均低于珠三角番禺观测平均值^[14] ($358 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $82 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$) 的二分之一, 与珠三角北缘观测值^[16] ($151 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $34.3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$) 相当, 高于香港鹤咀海岸保护区^[17] 1997 和 1998 年秋季平均值 ($71 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $19 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$)。与亚洲其他地区的监测结果相比, 深圳地区 σ_{sca} 低于 1999 年 8~9 月临安的观测值 [$(353 \pm 120) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$]^[18] 和韩国孤山 2001 年污染期间的观测值 [$(244 \pm 123) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$]^[19]。然而, 尽管这三个地区均受区域输送和当地污染的影响, 但另两个地区的 σ_{abs} 较深圳地区低, 其值分别为 $(23 \pm 14) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $(25 \pm 13) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。北美和欧洲非城市污染地区^[20-22], 包括 Bondville、Southern Great Plains、Sable Island 的散射系数范围为 $(30 \sim 50) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 深圳地区的 σ_{sca} 是其 3~5 倍。深圳地区的 σ_{sca} 高于美国东南部地区的多年平均值 [$(100 \sim 125) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$]^[23]。

表 2 观测期间气溶胶光学性质统计值与文献报道观测值的对比

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

Location	$\sigma_{\text{sca}}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	$\sigma_{\text{abs}}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	S_{SA}
Hinterland of the Pearl River Delta ^[14]	358 ± 107	82 ± 23	0.81 ± 0.04
Northern edge of the Pearl River Delta ^[16]	151 ± 103	34.3 ± 26.5	0.82 ± 0.07
Cape D'Aguilar ^[17]	71	19	
Lin'an ^[18]	353 ± 202	23 ± 14	0.93 ± 0.04
Gosan, Korea ^[19]	244 ± 123	25 ± 13	0.87 ± 0.08
Bondville, Illinois, US ^[24]	57.7 ± 17.7	4.66 ± 2.27	0.92 ± 0.002
Southern Great Plain, Oklahoma, US ^[24]	46.9 ± 16.9	2.46 ± 1.09	0.95 ± 0.025
Sable Island, NS, Canada ^[24]	40.76 ± 32.8	1.89 ± 2.26	
Southeast United States ^[23]	100~125		
Atlanta, GA, US ^[23]	121 ± 48	16 ± 12	0.87 ± 0.08
Beijing ^[24]	488 ± 370	83 ± 40	0.81 ± 0.08
Shenzhen (urban area; this study)	175.4 ± 127.8	175.4 ± 127.8	0.83 ± 0.07

深圳地区 S_{SA} 的平均值为 0.83 ± 0.07 , 相对较低, 可能与观测值在低湿度条件下采集有关。如考虑高湿环境, 此值可能增加。根据现有研究结果, 在环境条件、污染源及时间积累等因素影响下, 在可见光波长范围内 S_{SA} 范围为 0.79 ^[17] (刚产生的生物燃烧气溶胶) 到 0.99 ^[23] (干净的海洋气溶胶)。深圳地区 S_{SA} 与马拉巴地区由森林燃烧产生的烟雾气溶胶的 S_{SA} 相当 (0.83 ± 0.02)^[17]。相对于周边城市, 深圳地区的 S_{SA} 高于广州番禺 (0.81) 和珠三角北缘 (0.82) 观测值。美国亚特兰大和韩国孤山的 S_{SA} 分别为 0.87 ± 0.08 和 0.88 ± 0.02 , 深圳地区较这些地区偏小了 5% 左右。1999 年, 北京地区观测到了更低的 S_{SA} 值 (0.81 ± 0.08), 而 2005 年 1 月北京地

此外, 深圳地区 σ_{sca} 和 σ_{abs} 也明显高于美国亚特兰大地区的平均值^[23], 尤其是 σ_{abs} [$(16 \pm 12) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$], 但低于 1999 年北京地区的平均值 [$(488 \pm 370) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $(83 \pm 40) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$], 只是北京地区平均值的三分之一。

表 1 深圳地区气溶胶光学特征统计值

Table 1 Statistical results of the aerosol optical properties at Shenzhen

	$\sigma_{\text{sca}}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	$\sigma_{\text{abs}}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	S_{SA}
Mean	175.4	30.5	0.83
SD	127.8	24.5	0.07
Maximum	1720.8	271.1	0.99
Minimum	15.8	6.6	0.54
Median	158.2	24.8	0.85
Number	701	701	701

区观测值为 0.84 ± 0.03 , 深圳地区观测值与其相当。

3.2 气溶胶变化特征

3.2.1 季节变化特征

利用 2011 年 1 月至 2012 年 12 月观测数据分析气溶胶光学特征的季节变化及影响因素。表 3 给出了根据日平均值计算的 σ_{abs} 、 σ_{sca} 和 S_{SA} 的季节平均值, 其中冬季为 12 月至次年 2 月, 春季为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月。由表 3 可以看出 σ_{sca} 和 σ_{abs} 在秋季和冬季较大, 春季和夏季较小, 其中冬季最大, 夏季最小。 S_{SA} 也呈现类似的季节变化, 冬季最大, 夏季最小。Man 等^[17] 在香港地区发现类似的季节变化, σ_{sca} 和 σ_{abs} 在冬季和秋季最大, 夏季最小。然而, 北京周边上甸子站气溶胶的观测结果却

呈现出不同的季节变化,夏季的 σ_{abs} 最大,秋季 σ_{sca} 最大,冬季的 σ_{abs} 和 σ_{sca} 最小。Yan等^[25]分析指出上甸子气溶胶的季节变化与主导风向和污染来源有关,冬季主导风向为东北风,气溶胶来源比较干净, σ_{sca} 和 σ_{abs} 都较低。夏季生物燃烧导致 σ_{abs} 增加,秋季灰霾天气较多,导致二次气溶胶增加,从而引起 σ_{sca} 增加。深圳地区气溶胶的季节变化原因相对复杂,包括污染源的季节变化、大气扩散及化学转化等,其中主导风向可能是重要因素之一。

图1给出了深圳地区四季风向分布玫瑰图。冬季,主导风向为东北(NE)和北东北(NNE),而深圳

地区东北方向为城市密集区。因此,大量城市污染随着大气气团扩散到深圳地区,导致 σ_{sca} 和 σ_{abs} 增加。春季,主导风向为东东北(ENE),而NE和NNE相对于冬季减少,西南(SW)和南西南(SSW)增加。因此大部分气溶胶来源于西北部的城市污染区,部分气溶胶来源于南部海洋,从而导致春季 σ_{abs} 和 σ_{sca} 较冬季低。夏季,深圳地区主导风向转变为西西南(WSW),也就是说深圳地区气溶胶主要来源于海洋,因此 σ_{sca} 和 σ_{abs} 最小。秋季,主导风向为NNE,气溶胶主要来源于城市集聚区, σ_{sca} 和 σ_{abs} 较夏季明显增加。

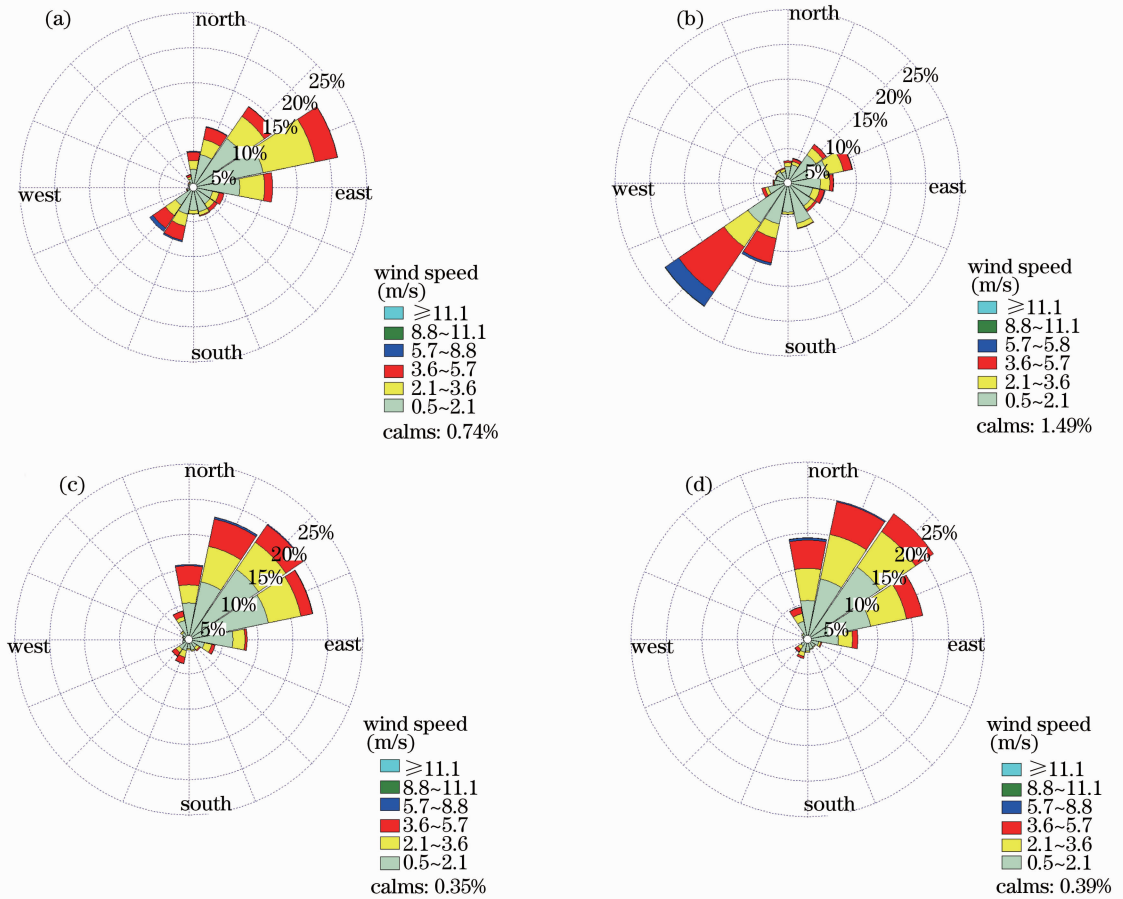


图1 深圳地区四季风向玫瑰图。(a)春;(b)夏;(c)秋;(d)冬

Fig. 1 Wind rose for seasons at Shenzhen. (a) Spring; (b) summer; (c) fall; (d) winter

表3 深圳地区 σ_{sca} 和 σ_{abs} 及 S_{SA} 的季节平均值

Table 3 Seasonal average values of σ_{sca} , σ_{abs} and S_{SA}

	$\sigma_{abs}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	$\sigma_{sca}/(10^{-6} \text{ m}^{-1})$	S_{SA}
Spring	37.0	203.2	0.84
Summer	26.5	116.7	0.78
Fall	43.7	235.8	0.83
Winter	53.4	327.7	0.86

气溶胶的季节变化在一定程度上可以用风向变化来解释,但冬季 σ_{sca} 和 σ_{abs} 高于秋季很难用风向变化来解释。光化学反应或二次气溶胶是影响气溶胶特征变化的另一大因素。深圳市气象局监测数据表明:2011年和2012年冬季深圳市灰霾总天数为73天,秋季灰霾天数为55天。灰霾期间会产生多种二次气溶胶,从而提升 σ_{abs} 和 σ_{sca} 。徐政等^[26]研究也表明灰霾期间 σ_{sca} 和 σ_{abs} 分别为非灰霾期间的2.6

和 2.8 倍。

3.2.2 气溶胶日变化

城市气溶胶的变化不仅受城市污染源影响,还受气象条件影响,如大气边界层和风的分布形态。为了分析风的分布形态对城市污染的影响,将风向分为 5 个分布形态,偏北风(N, $0^\circ \sim 45^\circ$ 和 $315^\circ \sim 360^\circ$)、偏东风(E, $45^\circ \sim 135^\circ$)、偏南风(S, $135^\circ \sim$

225°)和偏西风(W, $225^\circ \sim 315^\circ$),静风(C, 风速小于 0.5 m/s)。由图 2(a)可以看出深圳地区海陆风非常明显,白天主导风为从海上吹来的偏南风,夜间主导风向转变为偏北和偏东风,静风主要发生在 20:00 到 8:00。散射和吸收系数的大值主要发生在静风条件下 20:00 (见图 2)。

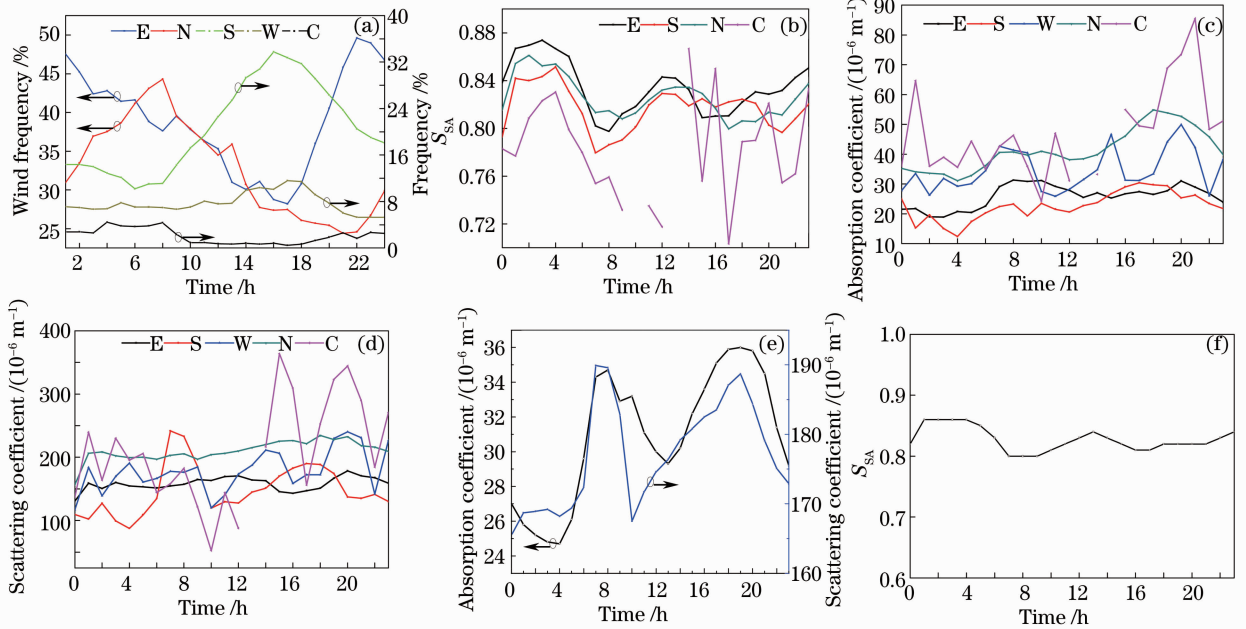


图 2 不同风向分布条件下气溶胶光学特征的日变化。
Fig. 2 Diurnal variations of various optical properties under the five wind patterns. (a) Wind frequency; (b) S_{SA} ;

(c) σ_{abs} ; (d) σ_{sca} ; (e), (f) diurnal variability

在 E、S、W 和 N 条件下,吸收系数第一峰值出现在 8:00~10:00,第二峰值出现在 18:00~20:00,而 C 条件下吸收系数只有一个峰值,发生在 20:00。在 N 条件下,散射系数只有一个峰值,发生在 18:00,大气边界层的变化对其日变化影响不明显。而在 C、S 和 W 条件下,散射系数在凌晨和傍晚时刻呈现峰值。在不同风条件下(N、S、E、W), S_{SA} 呈一致变化趋势,峰值出现在 2:00~6:00 和 12:00~14:00。而静风条件下, S_{SA} 变化与其他不同,日波动更加明显,可能由于不同风向条件下外来气溶胶输入或输出,而静风条件下,气溶胶主要由当地产生的气溶胶不断积累。

不同风向条件下气溶胶光学特征的日变化与总的日变化基本一致。然而,不同风向条件下气溶胶特征值不同:在 S 和 E 条件下,气溶胶主要来源于海洋, σ_{abs} 和 σ_{sca} 较小;在 N 条件下,气溶胶主要来源于城市污染区, σ_{abs} 和 σ_{sca} 较大;在 W 条件下,气溶胶大部分来源于城市污染区,而部分来源于海洋,故

σ_{abs} 和 σ_{sca} 介于上面两者之间。从后文的分析也可以看出这种变化趋势。

σ_{sca} 和 σ_{abs} 的日变化在一定程度上可以用边界层的变化来解释。然而, S_{SA} 的日变化反映了 σ_{sca} 和 σ_{abs} 峰值和谷值昼夜不同程度的变化,这意味着 σ_{sca} 和 σ_{abs} 不能单用大气边界层白天高度增加、浓度稀释,夜间高度降低、浓度增加来解释。从 10:00 开始到下午, σ_{sca} 和 σ_{abs} 减少, S_{SA} 增加,这可能与白天主要污染源排放的碳元素的稀释速度相对于散射成分更快。伴随着白天太阳辐射的增加,光化学反应增加,可能会产生更多次生污染物,如硫酸盐(气溶胶中主要散射成分之一)。4:00 时 S_{SA} 呈现了次高峰,可能由于元素碳的燃烧源减少,夜间化学反应形成的硝酸铵增加了散射成分^[27],因此导致 S_{SA} 增加。Bergin 等^[24]也在北京观测到硝酸铵在夜间对散射增加有贡献。

3.3 不同来源的气溶胶光学特征

为了进一步评估不同气溶胶排放源对气溶胶光

学特征的影响,选择冬季(2010年和2011年的1、2、12月),夏季(2010年和2011年的6、7、8月)进行轨迹聚类分析。气团轨迹计算采用了Wang等^[28]开发的轨迹模式系统(TrajStat_1.2.2.6),气象资料采用了美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析数据(GRADS),轨迹终点距站点地面高度为100 m,轨迹运动时间设定为72 h。利用TrajStat_1.2.2.6提供的聚类分析工具,把单个轨迹按照空间相似程度大小聚成类,得到具有代表性的气团轨迹簇。

从冬季的后向轨迹分布情况看[见表4和图3(a)],轨迹4主要来源于广西壮族自治区,途径柳州、惠州、广州等城市地区。而轨迹1可以追溯到更远地区,来源于我国云南省西南部,途径昆明、南宁、肇庆、汕头等地区,这些地区城市污染相对较重,

从而引起气溶胶特征值较大。轨迹3来源于深圳北部地区,72 h后向轨迹显示气团经过了武汉、南昌、长沙、柳州等城市,因此,气溶胶特征值也较大。由表4可以看出轨迹1在冬季发生最为频繁, σ_{abs} 和 σ_{sca} 相对较高, σ_{abs} 和 σ_{sca} 平均值分别为 $57.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $361.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。轨迹4也呈类似特征, σ_{abs} 平均值为 $62 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, σ_{sca} 也相对比较高,为 $355.3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。两类轨迹的 S_{SA} 一样,平均值均为0.86,为冬季所有轨迹中第二高值,且大于广州地区的观测平均值(0.81)。轨迹3对应的气溶胶特征值也较高, σ_{sca} 平均值为338.3, σ_{abs} 平均值为42.1, S_{SA} 为0.87,为所有轨迹中的最大值。轨迹1,4,3的72 h后向轨迹显示这两类轨迹主要来源于相对污染较重地区。

表4 冬季不同类气团对应的气溶胶平均特征

Table 4 Mean optical properties of aerosol for different types of air cluster in winter

Cluster No.	S_{SA}	Number	$\sigma_{\text{abs}} / (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	Number	$\sigma_{\text{sca}} / (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	Number
1	0.86	48	57	48	361.61	48
2	0.84	26	53.05	26	295.75	26
3	0.87	29	42.04	29	338.33	29
4	0.86	15	62.01	15	355.33	15
5	0.85	28	49.96	28	294.39	28

表5 夏季不同类气团对应的气溶胶平均特征

Table 5 Mean optical properties of aerosol for different types of air cluster in summer

Cluster No.	S_{SA}	Number	$\sigma_{\text{abs}} / (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	Number	$\sigma_{\text{sca}} / (10^{-6} \text{ m}^{-1})$	Number
1	0.78	26	20.47	26	92.79	26
2	0.76	63	15.06	63	56.89	63
3	0.85	18	44.42	18	252.33	18
4	0.77	24	12.85	24	114.72	24
5	0.81	32	24.69	32	132.28	32
6	0.72	19	19.13	19	55.28	19

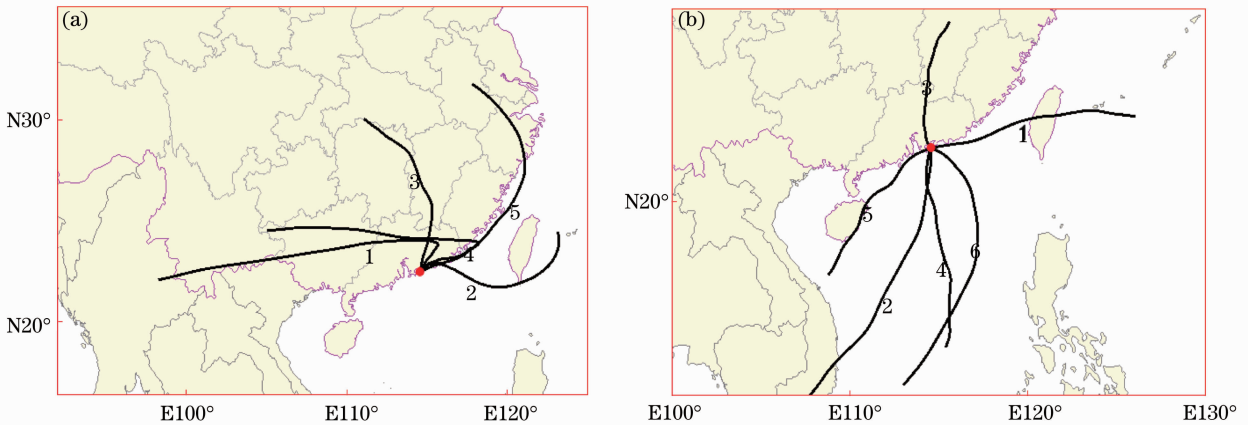


图3 72 h的轨迹分布。(a)冬季;(b)夏季

Fig. 3 Trajectory distributions of 72 h.(a) Winter; (b) summer

轨迹 5 所代表的气团来自长三角地区,该地区为中国严重污染地区之一,但传输过程中吸纳了海洋的干净空气。因此,该轨迹对应的 σ_{sca} 、 σ_{abs} 平均值相对较低,单次散射值为 0.85,低于轨迹 1,3,4 对应的气溶胶特征值,但高于来自干净地区的(轨迹 2)气溶胶特征值。

根据 72 h 后向轨迹和气溶胶特征值可以看出轨迹 2 来源于海洋,气块相对较干净。轨迹对应的 σ_{sca} 和 σ_{abs} 平均值均低于上面讨论的各类气团对应的气溶胶平均值, S_{SA} 值最低(0.84)。

上面的分析表明冬季各类气团来源不同,对应的气溶胶特征就不同。当气溶胶来源于污染较重地区时,不仅 σ_{sca} 和 σ_{abs} 大,且 S_{SA} 也较大;当来源于干净地区时, σ_{sca} 、 σ_{abs} 及 S_{SA} 平均值相对较小。

夏季后向轨迹分布与冬季轨迹分布差异明显[见图 3(b)]。夏季大部分轨迹来源于深圳东部、南部和西南部。根据深圳地区的地理位置可以看出深圳北部地区主要为人口密集区和工业地区,南部、西南部及东部为海洋。因此,轨迹 4,2,5,6 代表来自于干净海洋的气块,而轨迹 1 代表来自于污染地区的气块。从不同类型轨迹对应的气溶胶特征值可以看出气溶胶特征与气团来源紧密相关,轨迹 4,2,6,5,1 对应的 σ_{sca} 和 σ_{abs} 较小,而轨迹 3 对应的气溶胶特征值相对较大(见表 5)。这些类型轨迹中,5 和 1 所代表的气块来源于海洋,沿途经过了污染地区(台湾、海南),因此城市污染与干净空气混合引起了相对较高的气溶胶特征值。

夏季气溶胶 S_{SA} 值与冬季相似,当气团来源于污染较重地区时, S_{SA} 值相对较大,而当气团来源于相对干净地区时, S_{SA} 相对较低。

4 结 论

利用 2011~2012 年深圳市区气溶胶观测资料分析城市气溶胶的光学特征。深圳地区气溶胶表现出了强吸收特征, σ_{sca} 、 σ_{abs} 的平均值(标准偏差)分别为 $(175.4 \pm 127.8) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 、 $(30.5 \pm 24.5) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。 σ_{sca} 和 σ_{abs} 均低于珠三角腹地多年观测平均值($358 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $82 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$)的二分之一,与珠三角北缘观测值($151 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $34.3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$)相当,高于香港鹤咀海岸保护区 1997 和 1998 年秋季平均值($71 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 和 $19 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$)。 S_{SA} 平均值为 0.83,较广州番禺和珠三角北缘地区分别高 0.02 和 0.01。气溶胶光学特征呈明显的季节变化, σ_{sca} 、 σ_{abs} 和 S_{SA} 在冬季最大,夏季

最小。气溶胶特征日变化不仅受边界层日变化影响,还与当地风向分布形态、污染源变化、光化学反应及夜间复杂的化学反应有关。

气团后向轨迹聚类分析表明,当气溶胶来源于污染地区和城市人口密集区时,气溶胶的 σ_{sca} 、 σ_{abs} 和 S_{SA} 值都较高,尤其冬季。来自污染地区的 S_{SA} 不仅大于来自干净地区的 S_{SA} 值,且大于污染源地区(如广州)的值。

参 考 文 献

- 1 D Rosenfeld. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 2000, 287(5459): 1793–1796.
- 2 D P Kaiser, Y Qian. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954~1998; indication of increased haze pollution? [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(21): 381–384.
- 3 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 4 Xu Bo, Huang Yinbo, Fan Chengyu, *et al.*. Calculation of equivalent absorption coefficient of uniformly mixed hygroscopic aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0101001.
徐博, 黄印博, 范承玉, 等. 吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0101001.
- 5 Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501002.
卫晓东, 张华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501002.
- 6 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501001.
孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气散射偏振度特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501001.
- 7 Zhang Xiaoye. Aerosol over China and their climate effect [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(1): 12–16.
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 12–16.
- 8 D Wu, X X Tie, C C Li, *et al.*. An extremely low visibility event over the Guangzhou region; a case study [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(35): 6568–6577.
- 9 Y H Zhang, M Hu, L J Zhong. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6157–6173.
- 10 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.
- 11 S Liu, M Hu, Z J Wu, *et al.*. Aerosol number size distribution and new particle formation at a rural/coastal site in Pearl River Delta (PRD) of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6275–6283.
- 12 Theodore L Anderson, John A Ogren. Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 29(1): 57–69.
- 13 W P Arnott, K Hamasha, H Moosmuller, *et al.*. Towards

- aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength aethalometer; evaluation with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(1): 17–29.
- 14 Wu Dui, Mao Jietai, Deng Xuejiao, *et al.*. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39(11): 1542–1553.
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:地球科学*, 2009, 39(11): 1542–1553.
- 15 B A Bodhaine. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the South Pole [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100 (D5): 8967–8975.
- 16 R M Garland, H Yang, O Schmid, *et al.*. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China; implications for regional air pollution and radiative forcing [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(17): 5161–5186.
- 17 C K Man, M Y Shih. Light scattering and absorption properties of aerosol particles in Hong Kong [J]. *J Aerosol Science*, 2001, 32(6): 795–804.
- 18 X He, C C Li, A K H Lau, *et al.*. An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(22): 8903–8915.
- 19 S W Kim, S C Yoon, A Jefferson, *et al.*. Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(1): 39–50.
- 20 S Koloutsou-Vakakis, P Kus, M J Rood, *et al.*. Aerosol properties at a midlatitude northern hemisphere continental site [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D3): 3019–3032.
- 21 C M Carrico, M H Bergin, J Xu, *et al.*. Urban aerosol radiative properties; measurements during the 1999 Atlanta supersite experiment [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D7): 8422.
- 22 D J Delene, J A Ogren. Variability of aerosol optical properties at four North American surface monitoring sites [J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59(6): 1135–1150.
- 23 W C Malm, J F Sisler, D Huffman, *et al.*. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99(D1): 1347–1370.
- 24 M H Bergin, G Gass, J Xu, *et al.*. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999 [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D16): 17969–17980.
- 25 P Yan, J Tang, J Huang, *et al.*. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(8): 2229–2242.
- 26 Xu Zheng, Li Weijun, Yu Yangchun, *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.
- 27 Y F Cheng, A Wiedensohler, H Eichler, *et al.*. Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (25): 6351–6372.
- 28 Y Q Wang, X Y Zhang, R R Draxler. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(8): 938–939.

栏目编辑: 王晓琰