

韩冰雪 张国华 毕新慧 等. 广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征[J]. 环境科学研究 2015 28(2): 198-204.

HAN Bingxue ZHANG Guohua BI Xinhui *et al.* Pollution characteristics of atmospheric particle size and number concentrations during summer in urban area of Guangzhou [J]. Research of Environmental Sciences 2015 28(2): 198-204.

广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征

韩冰雪^{1,2}, 张国华¹, 毕新慧^{1*}, 王新明¹, 盛国英¹, 傅家谟¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广东 广州 510640
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 于 2013 年 6 月 2 日—7 月 15 日 利用扫描迁移性光谱仪(SMPS)对广州城区大气 17~800 nm 的粒子谱进行了连续观测, 同时结合在线小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 及气象数据 对颗粒物污染特征进行了分析. 结果表明: 观测期间, 凝结核模态粒子、爱根核模态粒子、积聚模态粒子的数浓度范围分别为 68~7 687、1 009~47 724、238~14 781 cm^{-3} . 平均数浓度谱及体积谱均呈单峰分布, 峰值分别出现在 50 和 300 nm 左右. 根据双模态对数正态分布模型对平均数浓度谱拟合的结果可知, 爱根核模态粒子和积聚核模态粒子的几何平均粒径分别为 48 和 144 nm. 颗粒物数浓度及其谱分布日变化特征明显, 在交通高峰及太阳辐射较强的时间段均出现峰值. 在观测阶段, 粒子增长现象频繁发生, 推测大气光化学反应引起的气-粒转化是广州城区夏季大气颗粒物的重要来源. 7 月 12—13 日广州城区发生了一次典型的大气污染过程, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增至 112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 能见度降至 8 km. 在该时间段, 积聚模态粒子体积分数与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化一致, R^2 (相关系数) 达到了 0.85. 后向轨迹分析表明, 污染气团主要来自于西南方向, 在陆地停留时间较长.

关键词: 大气颗粒物; 数浓度谱分布; 日变化; 污染特征

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2015)02-0198-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.02.05

Pollution Characteristics of Atmospheric Particle Size and Number Concentrations during Summer in Urban Area of Guangzhou

HAN Bingxue^{1,2}, ZHANG Guohua¹, BI Xinhui^{1*}, WANG Xinming¹, SHENG Guoying¹, FU Jiamo¹

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Province Key Laboratory of Utilization and Protection of Environmental Resource, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Atmospheric particles with size range 17-800 nm were measured in urban area of Guangzhou from June 2 to July 15, 2013. The particulate matter (PM) pollution characteristics were investigated based on the data of number concentrations and size distributions of PM as well as hourly average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and meteorological parameters. During the whole sampling period, the number concentrations of nucleation, aiten and accumulation modes ranged from 68 to 7,687, 1,009 to 47,724 and 238 to 14,781 cm^{-3} respectively. The average number distribution was fitted with two lognormal distributions with geometric mean diameters at 48 nm and 144 nm. The average number and volume distributions exhibited peaks at ~50 nm and ~300 nm respectively. Particle number size distribution showed clear diurnal variation, with peaks related to traffic and strong solar radiation. Particle growth was frequently observed. Secondary photochemical formation contributed greatly to the PM pollution in Guangzhou. A typical pollution episode occurred from July 12 to July 13, during which the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ sharply rose from 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and visibility decreased to 8 km. $\text{PM}_{2.5}$ concentration was strongly correlated with the number concentrations of particles in accumulation mode. Back trajectory analysis showed that air masses originated from the southwest direction and stayed in the continent for a long time during this pollution episode.

Keywords: atmospheric aerosol; number size distribution; diurnal variations; pollution characteristics

收稿日期: 2014-05-26 修订日期: 2014-10-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020205)

作者简介: 韩冰雪(1991-)女,河南扶沟人,hanbingxue@126.com.

* 责任作者 毕新慧(1973-)女,山西侯马人,研究员,博士,主要从事

大气环境科学研究, bixh@gig.ac.cn

颗粒物是造成大气环境质量下降、能见度降低的主要原因,严重时甚至形成灰霾^[1],同时颗粒物通过散射吸收太阳辐射以及作为云凝结核影响地球辐射平衡^[2-3]. 颗粒物携带有毒物质进入人体后可能引发

呼吸道、心血管等方面的疾病,危害人体健康^[4]。颗粒物的环境影响不仅与数浓度有关,还受其粒径的影响。吴兑等^[5-6]研究表明,灰霾的形成主要与细粒子污染有关。细粒子更易富集污染元素^[7],尤其是超细粒子(粒径小于100 nm)在人体肺部可渗透得更深、危害更大^[8]。因此,研究颗粒物数浓度及其谱分布对于研究城市大气污染治理及其健康、气候效应等方面具有重要意义。

近年来,广州大气颗粒物污染日益严重,灰霾现象频发,受到广泛关注^[9-15]。关于广州城区的细粒子,尤其是粒径小于100 nm粒子的数浓度及其谱分布研究较少。黄祖照等^[16]对秋季5 nm~10 μm粒子谱分布的研究表明,核模态粒子、爱根核模态粒子的日变化分别呈双峰及三峰结构。YUE等^[17]对珠江三角洲地区新粒子形成的研究发现,广州花都地区新粒子形成的频率约为25%左右,而广州城区约在10%左右,通常于09:00及14:30左右进行,区域性特点明显。该研究对广州城区夏季粒径在17~800 nm范围的颗粒物数浓度及其谱分布进行了连续观测研究,结合气象资料、气体污染物数据及后向气团轨迹,分析其污染特征,以期为进一步研究广州地区颗粒物污染来源、变化特征及其影响提供数据支持。

1 研究方法

1.1 采样点及时间

采样点设在广州市天河区中国科学院广州地球化学研究所有机楼四楼,距地面约10 m高,周围主要是学校及居民区,距采样点100 m左右为2条高速公路。观测时间为2013年6月2日—7月15日,温度平均值为28℃,相对湿度平均值为66%,风速平均值为1.7 m/s,主导风向为东南风。

1.2 观测仪器及方法

利用MSP公司生产的扫描迁移性粒谱仪(scanning mobility particle sizer, SMPS)进行在线观测。SMPS包括差分电迁移分析仪(differential mobility analyzer, DMA)、颗粒物计数器(condensation particle counter, CPC),能够提供17~800 nm范围内颗粒物数浓度谱分布,时间分辨率为3 min。采样流量及鞘流流量分别为0.3、3.0 L/min。采样过程中,进样口采用nafion干燥管,鞘流系统采用硅胶干燥管,以保证测量过程中仪器内部相对湿度小于20%。

使用MSP自带软件WPS commander对每个样本进行计算和分析,得到每个样本的数浓度及相应的谱分布。计算颗粒物数浓度的小时均值时,将缺失数据

达20 min以上的相应小时数据剔除。气象数据(包括温度、相对湿度、风速、风向)均由广东省环境监测中心提供; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 分别由赛默飞科技公司生产的TEOM 1405颗粒物检测仪、43i型 SO_2 分析仪、48i型CO分析仪、49i型 O_3 分析仪测量。

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物数浓度特征

颗粒物可以分为凝结核模态(17~25 nm)、爱根核模态(>25~100 nm)和积聚模态(>100~800 nm)^[18-19]3个模态。表1、2为广州夏季观测期间各模态粒子数浓度统计特征及与其他地区的比较。在整个观测期间,凝结核模态粒子、爱根核模态粒子、积聚模态粒子的数浓度范围分别为68~7 687、1 009~47 724、238~14 781 cm^{-3} ,平均值分别为1 090、9 972、3 210 cm^{-3} ,分别占总粒子数浓度的7.6%、69.9%、22.5%。图1为各模态粒子数浓度占总粒子数浓度的频率直方图。由图1可知,亚微米粒子主要分布于爱根核模态,其次为积聚模态、凝结核模态。各模态粒子数浓度平均值与济南^[20]相近,但却低于广州^[17]及北京城区^[21]。爱根核模态粒子的数浓度平均值与上海^[22]较接近,但由于笔者研究的粒径下限

表1 广州城区夏季各模态粒子数浓度统计特征

Table 1 Statistics of summer particle number concentrations in urban area of Guangzhou

粒径/nm	粒子数浓度/ cm^{-3}				占总粒子数浓度比例/%
	平均值	标准偏差	最大值	最小值	
17~25	1 090	724	7 687	68	7.6
>25~100	9 972	5 635	47 724	1 009	69.9
>100~800	3 210	2 057	14 781	238	22.5
总计	14 274	6 965	52 703	1 477	100

表2 国内各城市不同模态粒子数浓度分布

Table 2 Comparison of particle number concentrations in different cities of China

地区	观测时段	粒子数浓度/ cm^{-3}			数据来源
		核模态 ¹⁾	爱根核模态 ²⁾	积聚模态 ³⁾	
广州	2006年6月	—	21 000	6 000	文献[17]
北京	2004年3月— 2006年3月	9 000	15 900	7 800	文献[21]
上海	2005年5—6月	15 521	12 990	1 744	文献[22]
济南	2007年12月— 2008年11月	1 100	10 200	4 340	文献[20]

注: 1) 核模态除北京地区粒径范围为3~20 nm外,其他文献均设为10~20 nm; 2) 爱根核模态粒子粒径范围为20~100 nm; 3) 积聚模态粒子粒径范围为100~1 000 nm。

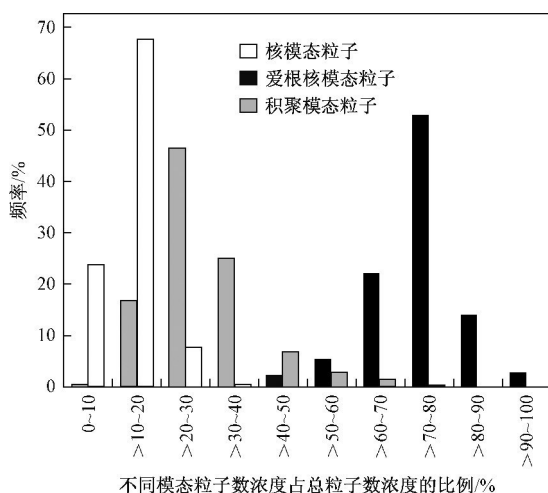


图1 不同模态粒子数浓度占总粒子数浓度比例的频率分布

Fig. 1 Frequency histogram of ratio of different modes particle number concentrations to total particle concentration

为 17 nm, 并且上海在监测期间频发新粒子形成事件, 所以上海凝结核模态粒子数浓度远高于该研究.

2.2 颗粒物数浓度谱的分布特征

由图 2(a) 可见, 广州夏季粒子平均数浓度谱呈单峰分布, 峰值出现在 50 nm 左右. 在假定所有粒子均为球形的情况下, 由数浓度谱得到体积谱, 同样呈单峰分布, 峰值出现在 300 nm 左右.

使用数学函数对颗粒物数浓度谱分布进行拟合具有重要意义. 拟合后的谱图不仅可以直接应用于颗粒物大气过程的研究^[23-25], 而且也便于不同地点数据集的比较. 采用多模态对数正态模型描述颗粒物的粒径分布已被广泛认可^[26-28]. 多模态对数正态分布模型假定颗粒物数浓度谱分布是由多个对数正态

分布叠加而成, 每个对数正态分布为一个模态, 其数学表达式:

$$\frac{dN}{d \lg D_p} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\sqrt{2\pi \lg \sigma_i}} \exp \left[-\frac{(\lg D_p - \lg D_{p,i})^2}{2 \lg^2 \sigma_i} \right]$$

式中 D_p 为粒子直径, nm; n 为模态数; N_i 为第 i 个模态的数浓度, cm^{-3} ; $D_{p,i}$ 为第 i 个模态的几何平均粒径 (数浓度中值粒径), nm; σ_i 为第 i 个模态对数正态分布的几何标准差^[26]. 一般采用三模态对数正态分布模型对颗粒物数浓度谱进行拟合, 但当超细粒子数浓度较高导致不同模态重叠时, 可采用双模态对数正态拟合^[25]. 该研究采用双模态对数正态模型, 分别对应于爱根核模态粒子与积聚模态粒子. 模拟值与实测值的对比见图 2(b). 爱根核模态粒子与积聚模态粒子的几何平均粒径分别为 48、144 nm, 数浓度分别为 11 892、2 729 cm^{-3} , σ 分别为 1.80、1.66.

2.3 广州城区颗粒物数浓度日变化特征

不同模态粒子数浓度的日变化特征见图 3. 对于凝结核模态粒子来说, 早上 06:00 左右数浓度开始升高, 到 10:00 左右达到峰值, 该峰值与早上交通排放高峰及新粒子形成^[17, 29-31] 均有关. 随后粒子粒径增长, 数浓度峰值不断向大粒径处移动, 核模态粒子数浓度降低. 下午 13:00 左右, 强太阳辐射导致核模态粒子数浓度重新开始升高, 再加上晚交通高峰的影响, 其数浓度一直维持在较高水平, 直到晚上 19:00 左右.

爱根核模态粒子数浓度的日变化较大, 出现 4 个峰值. 第 1 个峰值出现在早上 07:00 左右, 可能与早上交通高峰排放相关, 但由于广州夏季扩散条件好, 其值较小. 第 2 个峰值出现在中午 12:00 左右, 与大气光化学反应及核模态粒子的增长有关. 之后爱根核模态粒子数浓度稍有降低, 在 16:00 左右及 19:00

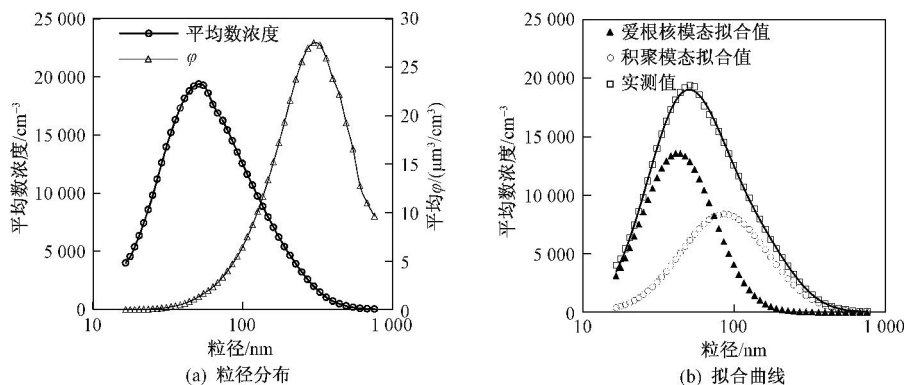


图2 夏季广州城区粒子平均数浓度谱分布及拟合曲线

Fig. 2 The average size distributions of particle concentrations and fitting curve in urban area of Guangzhou in summer

左右出现2个峰值, 随后数浓度降低. 爱根核模态粒子数浓度峰值主要出现于12:00—19:00间, 这与 $\rho(O_3)$ 峰值出现时间段较为一致, 二者的 R^2 为0.84, 表明主要受光化学反应引起的气-粒转化过程影响. 对于积聚模态粒子来说, 其数浓度较低, 日变化不明显, 在晚上18:00—21:00值稍高.

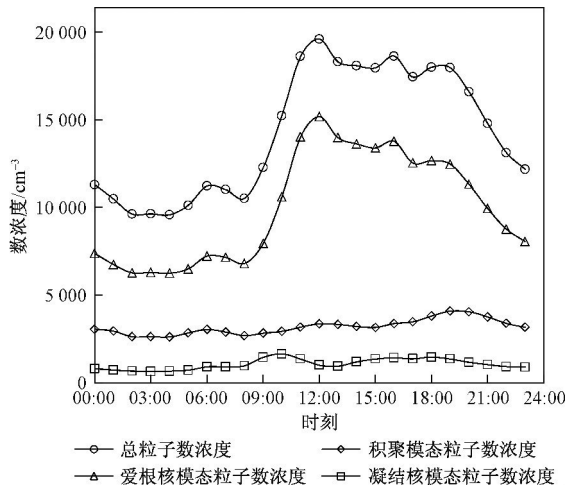


图3 广州城区夏季观测期间不同模态粒子数浓度的日变化特征

Fig. 3 Average diurnal variations of particle number concentrations in urban area of Guangzhou in summer

在整个观测期间有新粒子形成事件. 图4为6月6日颗粒物的日变化特征. 从图4中可清晰地看到, 凝结核模态粒子数浓度的增长持续了3h左右, 同时伴随着粒径的明显增长. Maso等^[18]对新粒子形成的判断标准是有新模态粒子形成且有明显增长, 持续时间(超过1h)较长. 据此判断, 6月6日当天可能发生了新粒子形成事件. 在夏季整个观测期间, 凝结核模态粒子数浓度暴增及后续增长的现象较多, 增长速率约为2.7~17.1 nm/h, 持续时间长短不一. 凝结核模态粒子数浓度暴增原因: ①可能直接源于交通排放. 据报道^[32], 公路附近大气粒子峰值粒径可低至10 nm. ②也可能是新粒子形成引发. 由于仪器检测下限为17 nm, 因此未能计算形成速率等参数. 据统计^[33-35], 珠江三角洲地区新粒子形成特别是在干净的环境下, 发生几率可达到20%~30%, 是大气颗粒物的重要来源.

2.4 污染过程成因分析

由图5可见, 在观测期间, 广州城区大气能见度平均值在15 km左右, 无严重灰霾过程. 尽管如此, 该研究还是观察到7次 $\rho(PM_{2.5})$ 在短时间内迅速超过 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 并引起能见度降低的情况. 7月12日

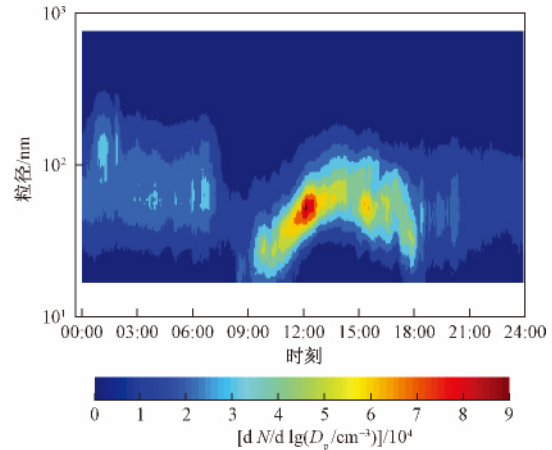


图4 6月6日粒子数浓度的变化特征

Fig. 4 Diurnal variation of particle numbers concentrations on 6th June

07:00—13日07:00为一次典型污染过程, 期间气温平均值为 32°C , 相对湿度平均值为53%, $\rho(PM_{2.5})$ 由 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增至 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 最高值($112 \mu\text{g}/\text{m}^3$)出现于7月12日22:00, 此时能见度降至8 km左右.

7月12日白天 $\rho(O_3)$ 维持在较高水平($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右), 为观测期间白天平均值的4倍左右, 二次污染严重. 同时段 $\rho(SO_2)$ 、 $\rho(CO)$ 也有所增高, 为观测期间平均值的2倍左右(见图5). 整个污染过程风速(平均值为1.3 m/s)较低, 不利于污染物扩散. 图6为7月12—13日粒子粒径和数浓度变化特征. 12日07:00粒子数浓度峰值粒径在70 nm左右, 而晚上20:00峰值粒径增至150 nm, 并持续到第二天早上. 积聚模态粒子数浓度从7月12日07:00左右开始增多, 至晚上20:00达到 11375cm^{-3} , 为整个观测期间平均值的4倍左右. 与此同时, 核模态、爱根核模态粒子的数浓度逐渐降低, 下午达到最低值. 爱根核模态粒子的碰撞和二次气溶胶的形成可能是导致积聚模态粒子大幅增长的主要原因^[36].

7月12日07:00—13日07:00, 积聚模态粒子体积分数与 $\rho(PM_{2.5})$ 的变化趋势一致($R^2 = 0.85$), 与能见度呈负相关($R^2 = 0.65$); 而爱根核模态粒子体积分数与能见度的 R^2 仅为0.29. 整个研究时段能见度与积聚模态粒子体积分数的 R^2 为0.33, 与爱根核模态粒子体积分数的 R^2 仅为0.02. 由此可见, 积聚模态粒子的增加可能是造成 $\rho(PM_{2.5})$ 升高及能见度下降的主要原因.

7月1—3日广州城区能见度平均值为16 km左右, $\rho(PM_{2.5})$ 平均值为 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 为清洁时期. 气团

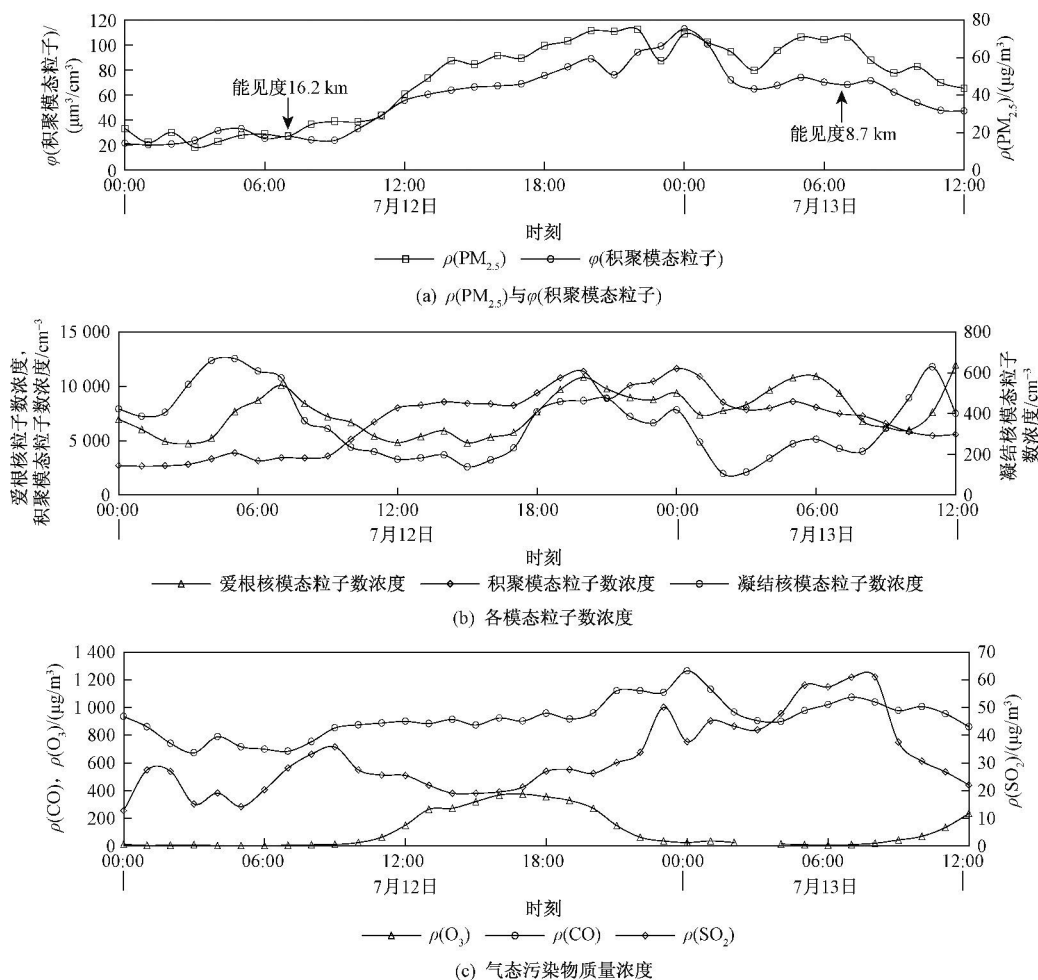


图5 7月12日00:00—13日12:00 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 φ (积聚模态粒子)、大气污染物和粒子数浓度的变化
 Fig. 5 Variations of $\rho(\text{PM}_{2.5})$, volume concentration of accumulation mode particles, particle number concentrations and gaseous pollutants mass concentrations from 00:00 July 12 to 12:00 July 13

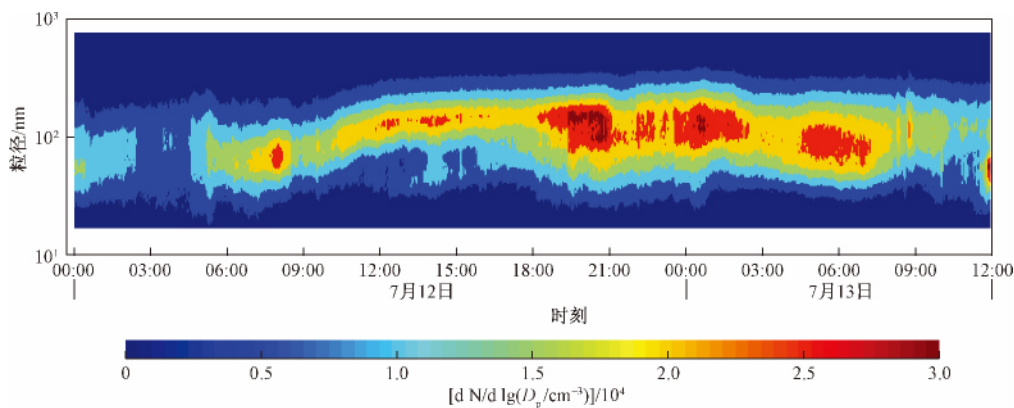


图6 7月12日00:00—13日12:00 大气粒子数谱
 Fig. 6 Variation of particle number concentrations from 00:00, July 12 to 12:00, July 13

后向轨迹分析(见图7)表明,清洁时期气团来自于东南方向的海上,并且在陆地停留时间较短。7月12—13日典型污染过程的气团主要来自于广州西南方,

轨迹较短,在陆地上停留时间较长,图7中时间为UTC时间。(a)(b)星号处时间分别为当地时间7月2日07:00及7月13日07:00。

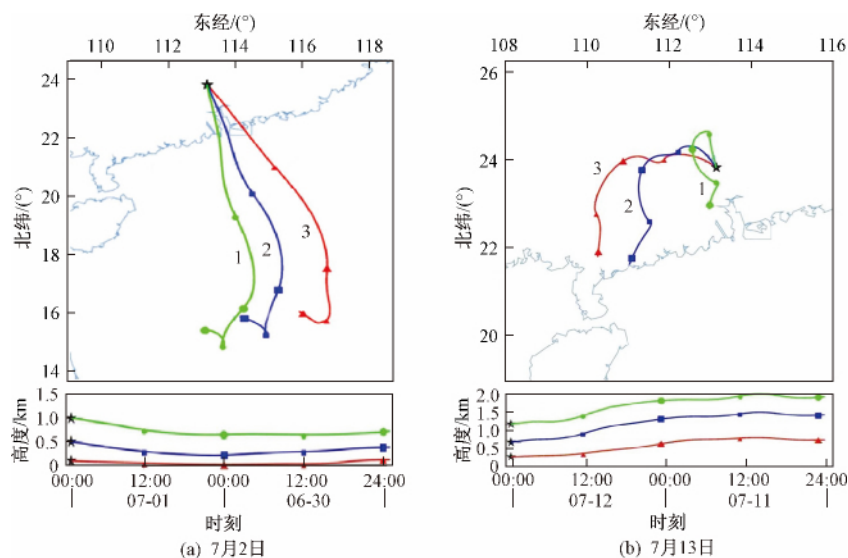


图7 7月2日07:00及7月13日07:00 48 h后向气团轨迹

Fig. 7 48 h back trajectories of air particles arriving in Guangzhou at 07:00 , July 2 and 07:00 , July 13

3 结论

a) 夏季观测期间广州城区亚微米级颗粒物主要分布于爱根核模态,其次是积聚模态、凝结核模态,3个模态粒子平均数浓度分别占总粒子数浓度的7.6%、69.9%、22.5%。对观测期间的颗粒物平均数浓度谱进行双模态对数正态分布拟合,爱根核模态粒子和积聚核模态粒子几何平均粒径分别为48、144 nm。

b) 广州大气颗粒物数浓度日变化特征明显,午间数浓度达到峰值。数浓度峰值通常与交通高峰及强太阳辐射相关。核模态粒子数浓度快速增加及其粒径增长现象频繁发生,由大气光化学反应引起的气-粒转化是广州夏季大气颗粒物的重要来源。

c) 7月12—13日污染过程中,风速较低, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增至 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, $\rho(\text{O}_3)$ 维持在 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,为观测期间白天平均值的4倍左右。小粒径粒子的碰撞和二次气溶胶的形成可能是导致积聚模态粒子大幅增加的主要原因。污染天气的气团主要来自于西南方,在陆地停留时间长。

参考文献(References):

[1] DENG Xuejiao, TIE Xuexi, WU Dui, *et al.* Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(7): 1424-1435.

[2] CHARLSON R J, SCHWAETZ S E, HALES J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.

[3] PÖSCHL U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition* 2005, 44(46): 7520-7540.

[4] NEL A. Air pollution-related illness: effects of particles [J]. *Science* 2005, 308(5723): 804-806.

[5] 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.

WU Dui, DENG Xuejiao, BI Xueyan, *et al.* Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area [J]. *Journal of Tropical Meteorology* 2007, 23(1): 1-6.

[6] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 257-269.

WU Dui. Hazy weather research in China in the last decade: a review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2012, 32(2): 257-269.

[7] 洪也, 马雁军, 李潮流, 等. 沈阳冬季灰霾日大气颗粒物元素粒径分布特征 [J]. *环境科学研究* 2011, 24(6): 637-644.

HONG Ye, MA Yanjun, LI Chaoliu, *et al.* Elemental size distribution characteristics of atmospheric particles on hazy days during winter in Shenyang [J]. *Research of Environmental Sciences* 2011, 24(6): 637-644.

[8] NEL A, XIA Tian, MADLER L, *et al.* Toxic potential of materials at the nanolevel [J]. *Science* 2006, 311(5761): 622-627.

[9] TAN Jihua, DUAN Jingchun, CHEN Duohong, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research* 2009, 94(2): 238-245.

[10] TAN Jihua, GUO Songjun, MA Yongliang, *et al.* Characteristics of particulate PAHs during a typical haze episode in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Research* 2011, 102(1): 91-98.

[11] 刘永红, 冯婷, 蔡铭. 广州灰霾现象特征分析 [J]. *环境科学研究* 2011, 24(10): 1081-1087.

LIU Yonghong, FENG Ting, CAI Ming. Characteristics of the haze

- phenomenon in Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences* 2011 24(10):1081-1087.
- [12] CHAN C K ,YAO Xiaohong. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment* 2008 42(1):1-42.
- [13] TAN Jihua , DUAN Jingchun , HE Kebin , *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences* 2009 21(6):774-781.
- [14] 张剑鸣 陶俊 张仁健 等. 2008年1月广州大气污染特征及能见度观测研究[J]. *环境科学研究* 2008 21(6):161-165.
ZHANG Jianming ,TAO Jun ,ZHANG Renjian ,*et al.* Observations of air pollutants and visibility during January 2008 in Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences* 2008 21(6):161-165.
- [15] 苏原 张素坤 任明忠 等. 广州大气二噁英污染水平及其季节变化特征[J]. *环境科学研究* 2014 27(8):813-819.
SU Yuan ,ZHANG Sukun ,REN Mingzhong ,*et al.* Pollution levels and seasonal variability of atmospheric PCDD/Fs in Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences* 2014 27(8):813-819.
- [16] 黄祖照 王杰 刘建国 等. 广州城区大气细颗粒物粒径分布特征分析[J]. *中国环境科学* 2012 32(7):1177-1181.
HUANG Zuzhao ,WANG Jie ,LIU Jianguo *et al.* The analysis of the characterization of fine particle size distribution in urban area of Guangzhou [J]. *China Environmental Science* 2012 32(7):1177-1181.
- [17] YUE Dingli ,HU Min ,WANG Zhibin *et al.* Comparison of particle number size distributions and new particle formation between the urban and rural sites in the PRD region ,China [J]. *Atmospheric Environment* 2013 47:181-188.
- [18] MASO M D ,KULMAL M ,RIIPINEN I *et al.* Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II ,Hyytiälä ,Finland [J]. *Boreal Environment Research* 2005 10(5):323-336.
- [19] WHITBY K T. The physical characteristics of sulfur aerosol [J]. *Atmospheric Environment* 1978 12(1):135-159.
- [20] XU Pengju ,WANG Wenxing ,YANG Lingxiao ,*et al.* Aerosol size distributions in urban Jinan: seasonal characteristics and variations between weekdays and weekends in a heavily polluted atmosphere [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* 2011 179(1/2/3/4):443-456.
- [21] WU Zhijun ,HU Min ,LIN Peng ,*et al.* Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing ,China [J]. *Atmospheric Environment* 2008 42(34):7967-7980.
- [22] GAO Jian ,WANG Tao ,ZHOU Xuehua ,*et al.* Measurement of aerosol number size distributions in the Yangtze River delta in China: formation and growth of particles under polluted conditions [J]. *Atmospheric Environment* 2009 43(4):829-836.
- [23] MAKELA J M ,AALTO P ,JOKINEN V ,*et al.* Observations of ultrafine aerosol particle formation and growth in boreal forest [J]. *Geophysical Research Letters* 1997 24(10):1219-1222.
- [24] MAKELA J M ,KOPONEN I K ,AALTO P *et al.* One-year data of submicron size modes of tropospheric background aerosol in southern Finland [J]. *Journal of Aerosol Science* 2000 31(5):595-611.
- [25] HUSSEIN T ,HAMERI K ,AALTO P P ,*et al.* Modal structure and spatial-temporal variations of urban and suburban aerosols in Helsinki-Finland [J]. *Atmospheric Environment* 2005 39(9):1655-1668.
- [26] HEINTZENBERG J. Properties of the log-normal particle size distribution [J]. *Aerosol Science and Technology* 1994 21(1):46-48.
- [27] HUSSEIN T ,MASO M D ,PETAJA T ,*et al.* Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions [J]. *Boreal Environment Research* 2005 10(5):337-355.
- [28] HUSSEIN T ,PUUSTINEN A ,AALTO P P ,*et al.* Urban aerosol number size distributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* , 2004 4(2):391-411.
- [29] BIRMILI W ,WIEDENSOHLER A. New particle formation in the continental boundary layer: meteorological and gas phase parameter influence [J]. *Geophysical Research Letters* 2000 27(24):3325-3328.
- [30] IMHOF D ,WEINGARTNER E ,ORDONEZ C ,*et al.* Real-world emission factors of fine and ultrafine aerosol particles for different traffic situations in Switzerland [J]. *Environmental Science and Technology* 2005 39(21):8341-8350.
- [31] MORAWSKA L ,BOFINGER N D ,KOCIS L ,*et al.* Submicrometer and supermicrometer particles from diesel vehicle emissions [J]. *Environmental Science & Technology* 1998 32(14):2033-2042.
- [32] ZHU Yifang ,HINDS W C ,KIM S *et al.* Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic [J]. *Atmospheric Environment* 2002 36(27):4323-4335.
- [33] LIU Shang ,HU Min ,WU Zhijun ,*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.
- [34] GONG Yougou ,HU Min ,CHENG Yafang ,*et al.* Competition of coagulation sink and source rate: new particle formation in the Pearl River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment* ,2010 44(27):3278-3285.
- [35] GUO Hai ,WANG Dawei ,CHEUNG K *et al.* Observation of aerosol size distribution and new particle formation at a mountain site in subtropical Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* , 2012 12(20):9923-9939.
- [36] MONKKONEN P ,KOPONEN I K ,LEHTINEN K ,*et al.* Death of nucleation and Aitken mode particles: observations at extreme atmospheric conditions and their theoretical explanation [J]. *Journal of Aerosol Science* 2004 35(6):781-787.

(责任编辑:孙彩萍)