

刘晶晶, 胡献舟, 黄凤莲, 等. 广州 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 111-117. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.016

Liu J J, Hu X Z, Huang F L, et al. Characteristics of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 111-117. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.016

## 广州 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征

刘晶晶<sup>1</sup>, 胡献舟<sup>1\*</sup>, 黄凤莲<sup>2</sup>, 罗瑛<sup>1</sup>, 马社霞<sup>3</sup>

(1. 长沙环境保护职业技术学院 环境监测系, 湖南 长沙 410004;

2. 湖南省环境保护科学研究院, 湖南 长沙 410004; 3. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

**摘要:** 于2015年6月~2016年5月对广州大气细粒子 PM<sub>2.5</sub> 进行持续观察, 分析了样品中有机碳 (organic carbon, OC) 和元素碳 (elemental carbon, EC) 的含量. 结果表明: 广州大气 PM<sub>2.5</sub> 含量为 (66.03±43.11) μg·m<sup>-3</sup>, OC 含量为 (8.19±5.01) μg·m<sup>-3</sup>, EC 含量为 (1.75±0.80) μg·m<sup>-3</sup>; OC, EC 和总碳 (total carbon, TC) 占 PM<sub>2.5</sub> 的比例分别为 16.73%, 3.85% 和 20.58%, 表明广州细粒子的碳污染程度较为严重; PM<sub>2.5</sub>, OC 和 EC 污染都呈现冬季>春季>夏季>秋季的特征, 与历史研究基本一致; OC, EC 相关系数较高 ( $R^2=0.929$ ), 表明二者来源较为相近, 且 PM<sub>2.5</sub> 中 EC<sub>1</sub> 占比例最高 (45.41%), 表明广州燃煤和机动车尾气是重要的污染源; 二次有机碳 (SOC) 为 (4.10±3.56) μg·m<sup>-3</sup>, 占 OC 的比例为 46.19%, 表明广州二次有机碳的排放与形成是碳污染的重要因素. 与历史数据相比, 广州大气污染情况有所改善, 碳气溶胶污染几乎达到历史最低值.

**关键词:** 广州; PM<sub>2.5</sub>; 有机碳 (OC); 元素碳 (EC); SOC

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2019)04-0111-07

## Characteristics of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China

Liu Jingjing<sup>1</sup>, Hu Xianzhou<sup>1</sup>, Huang Fenglian<sup>2</sup>, Luo Ying<sup>1</sup>, Ma Shexia<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Monitoring, Changsha Environmental Protection College, Changsha 410004, China;

2. Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha 410004, China;

3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** Continuous observation was conducted in Guangzhou from June 2015 to May 2016 and the content of OC and EC of PM<sub>2.5</sub> samples were determined. The results show that the daily average concentration of PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou is (66.03±43.11) μg·m<sup>-3</sup>, which OC is (8.19±5.01) μg·m<sup>-3</sup> and EC is (1.75±0.80) μg·m<sup>-3</sup>. OC, EC and TC account for 16.73%, 3.85% and 20.58% of PM<sub>2.5</sub>, respectively, which indicates more severe carbonaceous pollution in Guangzhou. The degree of contamination of PM<sub>2.5</sub>, OC and EC shows winter > spring > summer > autumn, which is basically consistent with historical research; the correlation coefficient of OC and EC is 0.929, which shows that their source are rather similar; the highest percentage of EC<sub>1</sub> in PM<sub>2.5</sub> is 45.41%, which indicates that coal combustion and vehicle exhaust are important sources of particulate pollution in

收稿日期: 2016-04-22

修改日期: 2018-12-02

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目资助 (17C0020)

\* 通信作者, E-mail: 944160069@qq.com

Guangzhou. The average mass concentration of secondary organic carbon (SOC) is  $(4.10 \pm 3.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , account for 46.19% of OC, which indicates that the emission and formation of SOC in Guangzhou is an important factor of carbonaceous pollution. Compared with historical data, air pollution of Guangzhou has improved, carbon aerosol pollution almost reach its lowest value in history.

**Keywords:** Guangzhou;  $\text{PM}_{2.5}$ ; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); SOC

含碳组分是大气颗粒物的重要组成部分,一般占  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的 20%~60%,从组成上可分为有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)和无机碳(inorganic carbon, IC)<sup>[1]</sup>,对环境、气候、能见度和人体健康等方面具有重要影响.OC 富含致癌、致畸、致基因突变等有害物质<sup>[2]</sup>;EC 具有较强的吸附活性,容易成为活性中心和化学反应床,会对人类的健康产生很大的威胁<sup>[3]</sup>,且 EC 具有很强的吸光能力,对总消光的平均贡献率达到 21.6%<sup>[4]</sup>.因此含碳气溶胶大气污染成为近年来的研究热点.

近年来, $\text{PM}_{2.5}$ 对广州大气污染的影响已成研究热点.Hagler G S W 等<sup>[5]</sup>研究了 2002~2003 年珠三角地区 7 个点(包括香港) $\text{PM}_{2.5}$ 的污染状况和区域特征,通过分析不同风向条件下各个采样点  $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度及化学组成,得出珠三角地区的  $\text{PM}_{2.5}$ 污染呈现一定的区域性的结论,另外广州是珠三角地区的一个重要污染源区,北风条件下,广州对下风向的中山、深圳等相邻近城市的  $\text{PM}_{2.5}$ 具有较大贡献;Jihua TAN 等<sup>[6]</sup>研究了 2007 年 12 月 31 日~2008 年 1 月 12 日,广州一次典型雾霾期间  $\text{PM}_{2.5}$ 的化学特性,结果表明:灰霾天和正常天  $\text{PM}_{2.5}$ 中大部分化学物质都存在显著差异,灰霾天气化学物质的组成要远高于正常天气;王少毅等<sup>[7]</sup>分析了广州 2009~2010 年秋冬季  $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成成分及特点,结果表明: $\text{PM}_{2.5}$ ,OC,EC 的含量均呈现城区高于城郊,且城郊浓度最低的特点;李婷苑等<sup>[8]</sup>就广州 2013 年冬季各区大气  $\text{PM}_{2.5}$ 的输送过程进行研究,表明外来源是影响大气  $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要原因;胡伟<sup>[9]</sup>和陶俊<sup>[10]</sup>等分别研究了广州亚运会期间珠江三角洲地区颗粒物的污染特征,结果表明:亚运会期间广州的空气质量有所好转,减排措施起到一定作用.

上述研究大多针对广州单一季节的大气污染情况,为更加全面科学地分析广州  $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC,EC 的污染特征,本研究采集了 2015 年 6 月~2016 年 5 月期间大气  $\text{PM}_{2.5}$ 样品,并分析了其中含碳组份的组成及污染来源,同时与历年数据进行对比,更加直观地反映近年来广州大气污染情况,旨在为广州合理控制大气污染提供科学依据.

## 1 采样与分析

### 1.1 采样地点和时间

本研究采样点设在广州生态环境部华南环境科学研究所大气环境观测站(E113°21', N23°07',距地面 50 m).采样点周围为集中居住区,2 km 范围内无明显大气污染源,周围无建筑物遮挡,视野较开阔,观测数据在一定程度上代表广州城市区域大气污染水平.采样时间为 2015 年 6 月~2016 年 5 月,每月采集 3 个样品,每次间隔 10 d,每个样品连续 24 h 采集.

### 1.2 样品采集和分析

采样器为大流量采样器(TE-6070, Tisch Environmental, Inc),流量  $1.14 \text{ m}^3/\text{min}$ .采样滤膜为石英纤维滤膜(Whatman, QFF,  $17.5 \times 22.5 \text{ cm}$ ).采样前后滤膜均放入恒温恒湿箱中平衡 24 h(温度  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度  $(52 \pm 1) \%$ ),采用十万分之一电子分析天平(Sartorius T-114),称重获得  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量.

OCEC 分析仪:美国沙漠研究所研制的热光反射碳分析仪(DRI Model 2001A Thermal/Optical Carbon Analyzer, Atmoslytic Inc., Calabasas, CA, USA).采用热分解光反射结合法从采样滤膜上截取适量面积( $0.525 \text{ cm}^2$ )圆形滤膜用于 OC,EC 的化学分析.

### 1.3 质量控制与质量保证

为消除滤膜中挥发性组分对称重的影响,在采样前需将准备好的滤膜放入马弗炉中  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  焙烧 4 h,以去除滤膜内挥发性组分或其他半挥发性组分,滤膜在采样后需用铝箔纸封装后放入冰箱低温保存;在使用 DRI Model 2001A 型碳分析仪进行样品分析前,应采用标准气体进行仪器的校准.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>, OC 和 EC 的污染特征

#### 2.1.1 PM<sub>2.5</sub>, OC, EC 浓度全年变化特征

采样期间,全年 PM<sub>2.5</sub>, OC, EC 浓度变化见图 1. 由图 1 可知:采样期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度范围是 8.41 ~ 293.99 μg · m<sup>-3</sup>, 年均浓度 (66.03±43.11) μg · m<sup>-3</sup>. 《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 中 PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度二级限值为 75 μg · m<sup>-3</sup>, 本项目采集的 36 个有效 PM<sub>2.5</sub> 样品中有 8 个样品超标, 超标率为 22.22%; PM<sub>2.5</sub> 的年均浓度二级限值为 35 μg · m<sup>-3</sup>, 广州 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度为 66.03 μg · m<sup>-3</sup>, 超标 1.85 倍, 表明广州 PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重. 相比广州历年数据 (见表 1), 可知 2015 年广州年均 PM<sub>2.5</sub> 浓度除了高于 2006 年全年和 2008 年夏季的数值外, 均低于 2002~2010 年的全部历史数据, 表明广州大气细粒子污染情况有所好转.

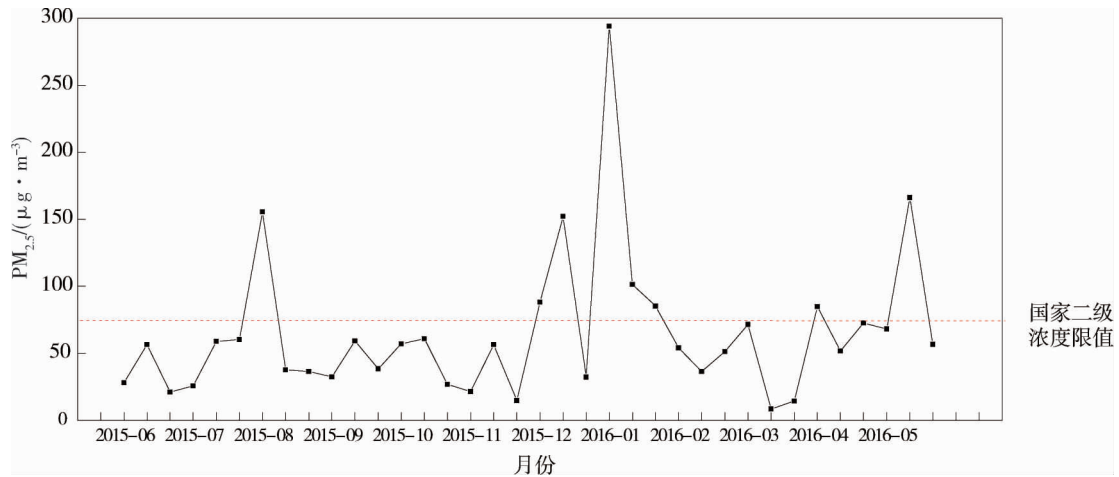


图 1 采样期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度的日变化特征

表 1 不同时期广州大气中碳气溶胶的质量浓度

μg · m<sup>-3</sup>

站点	观测时间	季节	碳气溶胶的质量浓度			参考文献
			PM <sub>2.5</sub>	OC	EC	
中山大学、黄埔、龙归	2002 年 1 月~2002 年 2 月	冬季	105.90	22.60	8.30	Cao J J 等 <sup>[11]</sup> , 2003
	2002 年 6 月~2002 年 7 月	夏季	78.13	15.80	5.90	赖森潮等 <sup>[12]</sup> , 2004
荔湾和五山	2004 年 8 月~2004 年 9 月	夏季	107.50	21.00	5.40	段菁春 <sup>[13]</sup> , 2005
	2005 年 2 月~2005 年 3 月	冬季	129.90	31.00	4.20	
白云、荔湾、海珠、天河	2004 年 8 月~2004 年 9 月	夏季	97.54	32.15	11.91	Wang X 等 <sup>[14]</sup> , 2006
广东省环境监测中心	2004 年 10 月~2004 年 11 月	秋季	103.00	22.40	7.10	Andreae M O 等 <sup>[15]</sup> , 2008
中山大学	2006 年 8 月~2007 年 8 月	全年	42.40	7.10	4.00	黄虹等 <sup>[16]</sup> , 2010
生态环境部华南	2008 年 1 月 1 日~2008 年 1 月 31 日	冬季	81.20	24.60	7.90	朱李华等 <sup>[17]</sup> , 2010
环境科学研究所	2008 年 7 月 1 日~2008 年 7 月 31 日	夏季	53.70	14.00	4.50	
广州市区	2010 年 11 月 11 日~ 2010 年 11 月 30 日	秋季, 亚运期间	73.30	14.00	3.60	胡伟等 <sup>[9]</sup> , 2013
		(2010 年 11 月 12 日~ 2010 年 11 月 27 日)				
生态环境部华南环境 科学研究所	2010 年 11 月 4~ 2010 年 11 月 30 日	秋季, 亚运期间	86.60	14.00	6.80	陶俊等 <sup>[10]</sup> , 2013
		(2010 年 11 月 12 日~ 2010 年 11 月 27 日)				
	2015 年 6 月~2016 年 5 月	全年	66.03	8.19	1.75	本研究

采样期间 OC, EC 的日变化特征如图 2 所示, 由图 2 可知: OC 的浓度范围是 1.66 ~ 31.14 μg · m<sup>-3</sup>, 均值为 (8.19±5.01) μg · m<sup>-3</sup>, EC 的浓度范围是 0.42 ~ 4.35 μg · m<sup>-3</sup>, 均值为 (1.75±0.80) μg · m<sup>-3</sup>. OC, EC 的浓度随时间的变化均出现“抛物线”趋势. 从 2015 年 6 月~2015 年 12 月呈现逐渐上升趋势, 在 2015 年

12月20日达到了最高值,而后呈现波浪式递减趋势,在2016年3月30日达到最低值,二者随时间的变化趋势相近,表明二者有相似的来源.OC,EC和总碳(TC)在 $PM_{2.5}$ 中的比例分别为 $(16.73\pm 14.08)\%$ , $(3.85\pm 3.62)\%$ 和 $(20.58\pm 17.56)\%$ ,由此可看出OC和EC是 $PM_{2.5}$ 中非常重要的组成部分,表明广州细粒子的碳污染程度较严重.相比广州历年数据(见表1),OC的浓度仅高于2006年数据,而EC的浓度则低于全部历史数据,表明广州大气中碳气溶胶污染几乎达到历史最低值.

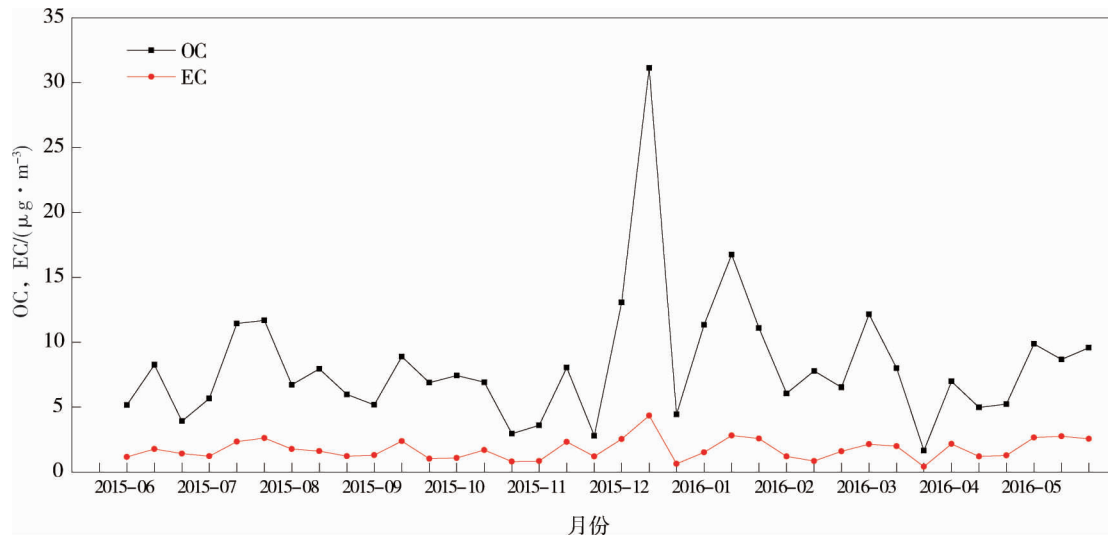


图2 采样期间 OC,EC 的日变化特征

### 2.1.2 $PM_{2.5}$ , OC, EC 浓度的季节变化特征

广州不同季节  $PM_{2.5}$ , OC, EC 浓度变化如表 2 所示,其中  $PM_{2.5}$  的浓度冬季最高,春季次之,分别为秋季的 2.44 倍和 1.62 倍,浓度最大值出现在冬季,与《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中日均浓度二级限值( $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )相比,超标 3.92 倍,夏季、秋季、冬季、春季超标率分别为 2.78%, 0.00%, 13.89%, 5.56%. OC, EC 的浓度各个季节均低于历史数据,表明广州大气碳气溶胶污染在全年范围内得到有效控制,减排措施对扭转大气污染情况有一定效果.

表 2 广州不同季节  $PM_{2.5}$ , OC, EC 的浓度

季节	样本数	$PM_{2.5}$		OC		EC	
		平均值 $\pm D_s$	浓度范围	平均值 $\pm D_s$	浓度范围	平均值 $\pm D_s$	浓度范围
夏季	9	53.31 $\pm$ 38.74	21.01~155.48	7.42 $\pm$ 2.55	3.91~11.69	1.68 $\pm$ 0.48	1.17~2.62
秋季	9	40.80 $\pm$ 16.91	14.76~60.79	5.86 $\pm$ 2.16	2.79~8.90	1.40 $\pm$ 0.56	0.80~2.38
冬季	9	99.38 $\pm$ 77.36	32.14~293.99	12.03 $\pm$ 7.68	4.44~31.14	2.01 $\pm$ 1.11	0.64~4.35
春季	9	66.03 $\pm$ 43.11	8.41~166.12	7.46 $\pm$ 2.97	1.66~12.17	1.91 $\pm$ 0.74	0.42~2.75
平均值		64.88 $\pm$ 53.70	8.41~293.99	8.19 $\pm$ 5.01	1.66~31.14	1.75 $\pm$ 0.80	0.42~4.35

注: $D_s$  为标准偏差

$PM_{2.5}$ , OC, EC 浓度的季节变化特征如图 3 所示,  $PM_{2.5}$ , OC, EC 浓度均表现为冬季>春季>夏季>秋季. 与黄虹<sup>[16]</sup>和张清艳<sup>[18]</sup>等的研究结果相比,除秋季不同外,其余季节都呈现冬季>春季>夏季的特征.本研究秋季采样期间多为小雨天气,可能在一定程度上导致 3 种物质在大气中浓度偏低,所以秋季  $PM_{2.5}$ , OC, EC 均为最低.引起其余季节的变化特征的可能原因如下:(1)相对于冬季,春夏降雨较多,降水过程对大气颗粒物的捕获、去除作用明显;(2)冬季气温较低、易于形成逆温层,致使污染物不容易扩散,所以冬季污染严重;(3)广州夏季主导风为南风 and 东南风,海洋上空的新鲜空气可稀释污染物,而冬季主导风为北风,内地的污染物会迁移扩散至广州.

## 2.2 OC,EC 来源初步分析

### 2.2.1 OC,EC 的相关性

OC 和 EC 的来源主要有燃煤、机动车尾气和生物质燃烧等方面。TURPIN 等<sup>[19]</sup>认为,通过分析 OC 和 EC 之间的关系,可以区分含碳气溶胶的来源。OC,EC 的相关性好表明 OC,EC 来自于相同污染源,反之,来源不同。因此,利用 OC,EC 的相关性可在一定程度上对含碳气溶胶的来源进行定性分析。

对样品的 OC,EC 的浓度做线性回归分析(置信度 99%),拟合结果见图 4。从图 4 中可以看出:OC,EC 的相关系数高达 0.929,二者呈显著正相关,表明广州碳气溶胶来源相近。

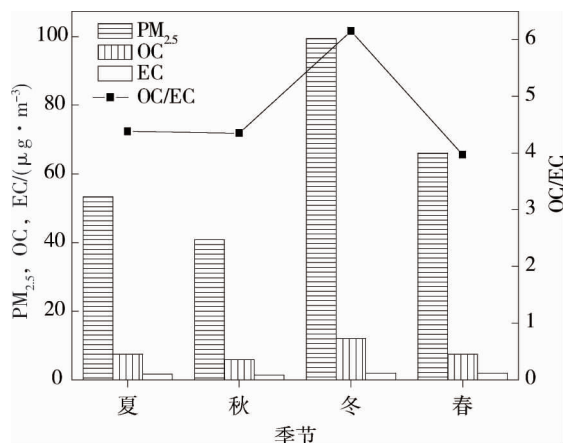


图3 PM<sub>2.5</sub>, OC, EC 和 OC/EC 的季节变化

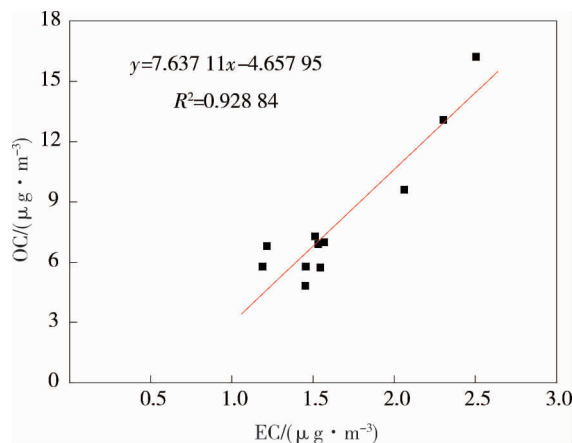


图4 广州大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC, EC 的相关性

### 2.2.2 单体碳质组分

热光反射法(TOR)碳测定采用程序升温的方法对每个测量样品同时给出 8 个碳组分(OC<sub>1</sub>, OC<sub>2</sub>, OC<sub>3</sub>, OC<sub>4</sub>, EC<sub>1</sub>, EC<sub>2</sub>, EC<sub>3</sub>, OP), 则 OC, EC 的含量分别为 OC<sub>1</sub>+OC<sub>2</sub>+OC<sub>3</sub>+OC<sub>4</sub>+OP 和 EC<sub>1</sub>+EC<sub>2</sub>+EC<sub>3</sub>-PC。样品中 7 个碳组分的丰度可表现其一定的源谱特征, CAO 等<sup>[20]</sup>认为, OC<sub>1</sub> 在生物质燃烧样品中最丰富, OC<sub>2</sub>, OC<sub>3</sub>, OC<sub>4</sub> 及 EC<sub>1</sub> 是燃煤和机动车尾气中丰富的碳组分, EC<sub>2</sub> 和 EC<sub>3</sub> 是柴油车尾气中丰富的碳组分, 据此可初步识别碳气溶胶污染源。

分别计算广州 PM<sub>2.5</sub> 中 7 个碳组分的含量, 其中 OC<sub>1</sub>, OC<sub>2</sub>, OC<sub>3</sub>, OC<sub>4</sub>, EC<sub>1</sub>, EC<sub>2</sub>, EC<sub>3</sub> 在 TC 中的占比分别为 4.71%, 18.85%, 18.55%, 11.01%, 45.41%, 1.13%, 0.33%, 结果见图 5。其中, 样品中 EC<sub>1</sub> 所占比例最高, 达 45.41%, 表明广州燃煤和机动车尾气排放是碳组分重要的污染源。

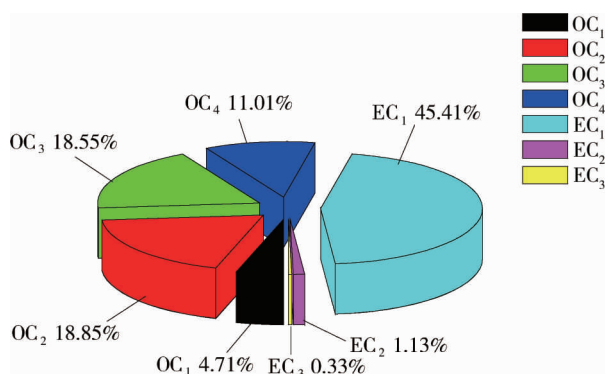


图5 广州大气 PM<sub>2.5</sub> 中 7 个碳组分的质量分数

## 2.3 气溶胶碳的组成分布

目前尚没有测量气溶胶中总有机碳(POC)和二次有机碳(SOC)的直接方法, 常用的间接方法有 OC/EC 最小比值法、特定化合物法及数值模型法。其中, OC/EC 比值法最为简单、直接, 被广泛采用。

OC/EC 比值法的基本原理: EC 由污染源排放后不会经历化学变化, 可视为惰性污染物, 全部为一次

排放,能够作为一次气溶胶的良好指示物.而 OC 在空气中由于适宜的温度、光照容易发生各种光化学变化,形成 SOC,使 OC/EC 升高.

Chow 等<sup>[21]</sup>认为,当 OC/EC>2 时表明大气中有 SOC 生成.如图 3 所示,本研究的 OC/EC 比值范围在 2.34~9.12,总体远大于 2,证明 SOC 的存在.SOC 的浓度可通过 CASTRO 等<sup>[22]</sup>的经验公式得到:

$$C_{\text{SOC}} = C_{\text{OC}} - C_{\text{EC}}(C_{\text{OC}}/C_{\text{EC}})_{\text{min}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{SOC}}$ 为二次有机碳的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_{\text{OC}}$ 为样品中有机碳的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_{\text{EC}}$ 为样品中元素碳的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $(C_{\text{OC}}/C_{\text{EC}})_{\text{min}}$ 为采样期间  $C_{\text{OC}}/C_{\text{EC}}$  的最小值(2.34).

由式(1)得到 SOC 含量及其在 OC 中所占比例见表 3.SOC 的年均值为  $(4.10 \pm 3.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占 OC 中的平均比例为  $(46.19 \pm 15.02)\%$ ,表明 SOC 为 OC 的关键组成部分,广州二次有机碳的排放与形成是碳污染的重要因素.

表 3 广州大气中  $C_{\text{SOC}}$  及  $C_{\text{SOC}}/C_{\text{OC}}$  值

	$C_{\text{SOC}}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_{\text{SOC}}/C_{\text{OC}}/(%)$
夏季	$3.49 \pm 1.57$	$44.96 \pm 11.39$
秋季	$2.57 \pm 1.49$	$40.77 \pm 18.28$
冬季	$7.33 \pm 5.36$	$59.44 \pm 10.28$
春季	$3.01 \pm 1.72$	$39.60 \pm 9.10$
均值	$4.10 \pm 3.56$	$46.19 \pm 15.02$

SOC/OC 值呈现冬季>夏季>秋季>春季的特征.大气中形成 SOC 的光化学反应主要受控于温度和太阳光辐射,太阳光辐射越强、温度愈高,SOC 愈容易形成,当温度低于  $15^\circ\text{C}$  时,基本不形成 SOC.采样期间广州夏季、秋季、冬季、春季的平均气温分别为  $24.56, 21.33, 15.33, 20.41^\circ\text{C}$ ,若单独照此分析,SOC/OC 的比值应为夏季>秋季>春季>冬季.另外本文 2.3 节分析的 3 个因素同样会影响 SOC/OC 值,故低温、持续多云阴天、主导北风风向等可能是造成冬季的 SOC/OC 超过夏季的主要原因.

### 3 结论

1) 广州细粒子中碳污染程度较为严重.研究期间,大气  $\text{PM}_{2.5}$ , OC, EC 的日均浓度值分别为  $(66.03 \pm 43.11), (8.19 \pm 5.0), (1.75 \pm 0.80) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , OC, EC 和 TC 在  $\text{PM}_{2.5}$  中所占比例分别为  $16.73\%, 3.85\%$  和  $20.58\%$ .

2) 广州大气  $\text{PM}_{2.5}$ , OC 和 EC 污染呈季节性变化,表现为冬季>春季>夏季>秋季的特征,与历史研究基本一致.SOC/OC 值表现为冬季>夏季>秋季>春季的特征.

3) 广州大气  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC, EC 的来源较为相近,二者的浓度相关系数高达 0.929.

4) 广州碳气溶胶污染主要以燃煤和机动车尾气为主,从碳组分中  $\text{EC}_1$  占  $\text{PM}_{2.5}$  的比例最高,达到  $45.41\%$ .

5) 广州二次有机碳的排放与形成是碳污染的重要因素,广州大气  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOC 浓度为  $(4.10 \pm 3.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占 OC 的比例为  $(46.19 \pm 15.02)\%$ .

### 参考文献:

- [1] 马永亮,贺克斌,杨复沫,等.大气颗粒物与区域复合污染[M].北京:科学出版社,2011:310-311.
- [2] 孟昭阳,张怀德,蒋晓明,等.太原冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中有机碳和元素碳的变化特征[J].应用气象学报,2007,18(4):524-531.
- [3] Offenberg J H, Baker J E. Aerosol size distributions of elemental and organic carbon in urban and over-water atmospheres[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(10): 1509-1517.
- [4] Tao J, HO K F, Chen L H, et al. Effect of chemical composition of  $\text{PM}_{2.5}$  on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring[J].

- Particology, 2009, 7(1): 68-75.
- [5] Hagler G S W, Bergin M H, Salmon L G, et al. Source areas and chemical composition of fine particulate matter in the Pearl River Delta region of China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(20): 3802-3815.
- [6] Tan J H, Duan J C, He K B, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> during a typical haze episode in Guangzhou[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(6): 774-781.
- [7] 王少毅,曾燕君,琚鸿,等.广州地区秋冬季细颗粒物 PM<sub>2.5</sub>化学组分分析[J].环境监测管理与技术,2013,4(25):9-12.
- [8] 李婷苑,范绍佳,邓雪娇,等.广州地区 PM<sub>2.5</sub>区域输送影响分析[J].中国科学院大学学报,2014,31(3):403-409.
- [9] 胡伟,胡敏,唐倩,等.珠江三角洲地区亚运期间颗粒物污染特征[J].环境科学学报,2013,33(7):1815-1823.
- [10] 陶俊,柴发合,高健,等.16届亚运会期间广州城区 PM<sub>2.5</sub>化学组分特征及其对霾天气的影响[J].环境科学,2013,34(2):409-415.
- [11] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(11): 1451-1460.
- [12] 赖森潮,叶计朋,张颖仪,等.广州夏季大气中碳气溶胶浓度水平及污染特征[J].中山大学学报(自然科学版),2004,43(5):61-65.
- [13] 段菁春.广州市大气颗粒物中多环芳烃粒径分布和穗港大气颗粒中有机碳/元素碳的分布特征研究[D].广州:中国科学院研究生院广州地球化学研究所,2005.
- [14] Wang X, Bi X, Sheng G, et al. Chemical Composition and Sources of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Aerosols in Guangzhou, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 119(1/3): 425-439.
- [15] Andreae M O, Schmid O, Yang H, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6335-6350.
- [16] 黄虹,曹军骥,曾宝强,等.广州大气细粒子中有机碳、元素碳和水溶性有机碳的分布特征[J].分析科学学报,2010,26(3):255-260.
- [17] 朱李华,陶俊,张仁健,等.冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O<sub>3</sub> 和气象条件的关联[J].环境科学学报,2010,30(10):1942-1949.
- [18] 张清艳.广州市 PM<sub>2.5</sub>及其有机碳和元素碳的变化特征[D].杨陵:西北农林科技大学,2012.
- [19] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon[J]. Aerosol Science and Technology, 1990, 12(1): 161-171.
- [20] Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(11): 3127-3137.
- [21] Chow J C, Watson J G, Lu Z, et al. Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2079-2112.
- [22] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(17): 2771-2781.