

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2014.05.021

南京市秋季大气颗粒物中有机碳和元素碳的 浓度水平及分布特征^{*}

袁思宇^{**} 沈国锋 赵秋月

(江苏省环境科学研究院, 南京, 210029)

摘 要 在 2011 年秋季, 连续 24 h 采集南京市区大气粗颗粒物 (PM_{10}) 和细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 样品, 采用 IMPROVE-热光反射法 (TOR), 分析样品中的有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 的浓度水平和分布特征. 研究表明, 南京秋季观测期间 PM_{10} 中 OC 和 EC 的平均浓度水平分别在 $23.3 \pm 11.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $7.7 \pm 3.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}$ 中, OC 和 EC 的浓度分别是 $18.1 \pm 9.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $6.6 \pm 2.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 与国内其他城市相比, 南京市秋季的碳组分浓度处于较低水平, 但与发达国家的城市相比, 浓度水平很高. 观测期内 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中的 OC 和 EC 的日变化规律与颗粒物的相似, 趋势相近. OC 和 EC 主要分布于细粒子 $PM_{2.5}$ 中, 且 EC 比 OC 更倾向于在细颗粒物上的分布. 基于 8 碳组分 (OC1, OC2, OC3, OC4, OPC, EC1, EC2 和 EC3) 分析结果初步判断, 南京市秋季机动车汽油燃烧排放污染是 EC1 的主要来源, 对南京市碳气溶胶贡献最大; 生物质燃烧、工业燃煤, 道路和施工扬尘是 OC 的主要来源, 对南京市大气中碳气溶胶贡献较大; 柴油燃烧是 EC2 和 EC3 的主要来源, 对南京市碳气溶胶的贡献最小.

关键词 大气颗粒物, 有机碳, 元素碳, 浓度水平, 分布特征.

Concentrations and distribution characteristics of organic carbon and element carbon in ambient particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) during autumn in Nanjing

YUAN Siyu^{**} SHEN Guofeng ZHAO Qiuyue

(Department of Atmospheric Sciences, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Sciences, Nanjing, 210029, China)

Abstract: The 24 h $PM_{2.5}$ and PM_{10} samples were collected during Nov. 2011 in Nanjing. Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in atmospheric particles were simultaneously measured during sampling periods. The OC and EC were analyzed by thermal/optical reflectance (TOR) following the Interagency Monitoring of Protected Visual Environments (IMPROVE) protocol. The average concentrations of OC and EC in PM_{10} were $23.3 \pm 11.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $7.7 \pm 3.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively. The average concentrations of OC and EC in $PM_{2.5}$ were $18.1 \pm 9.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $6.6 \pm 2.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively. The level of $PM_{2.5}$ and PM_{10} was much higher than the cities of the developed countries. OC and EC concentrations were lower than other Chinese cities, but much higher than those in the developed countries. The particle size distribution of OC and EC indicated that the OC and EC were mainly enriched in the fine particles ($PM_{2.5}$). The results from the eight fractions of carbonaceous carbon (OC1, OC2, OC3, OC4, OPC, EC1, EC2 and EC3) suggested that the influences of diesel combustion and emission (EC2 and EC3) were negligible, while the emission of coal combustion, biomass combustion, road dust contributed to OC, and gasoline

2013 年 10 月 10 日收稿.

^{*} 江苏省自然科学基金 (BK20131031); 中国博士后科学基金 (2013M531322) 资助.

^{**} 通讯联系人, E-mail: reverse@163.com

combustion from EC1 dominated the source of carbonaceous carbon in the city.

Keywords: particulate matter, organic carbon, element carbon, concentration, distribution characteristics.

大气颗粒物对大气环境质量、人类健康和气候变化等都有显著的影响.近些年,大气可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的污染问题越来越受到科研机构、政府部门和公众的关注.颗粒物中,碳是重要的元素,通常以有机碳(Organic carbon, OC)、元素碳(Elemental carbon, EC)和碳酸盐(Carbonate carbon, CC)的形式存在^[1].EC 由不完全燃烧过程产生,而 OC 既有污染源直接排放的一次有机碳(Primary organic carbon, POC),也可以通过大气化学反应途径二次生成(Secondary organic carbon, SOC)^[2].颗粒物中的碳组分可以有效地吸收或散射太阳光,降低大气能见度.同时,有机碳可以散射光,具有制冷效应,而元素碳会吸收光产生正的辐射强迫,对区域内气候变化有着显著的影响.有机碳和元素碳含有多种有害污染物,如多环芳烃的吸附或吸收载体等,从而颗粒物会对长期暴露在其中的公众造成较大的危害.

长三角地区是中国大气污染较为严重的区域之一,但是对于大气颗粒物及其化学组分的基础研究相较于其他地区开展得较晚,关于大气颗粒物中碳组分的研究还比较少.南京市是该区域内城市化和工业化发展较快,城市人口密度较高的一个重要城市,文献研究指出,南京市具有较严重的颗粒物污染,而且多环芳烃和重金属等有毒有害物质的环境浓度较高,严重地威胁公众健康^[3].

本研究分析了南京市秋季大气颗粒物中 OC 和 EC 的浓度水平,分布特征和时间变化规律.研究结果将为南京市乃至其相邻区域内开展颗粒物碳组分研究和提出污染控制对策提供基础依据.

1 实验方法

1.1 样品的采集

采样点:南京市鼓楼区凤凰西街,江苏省环境科学研究院大楼顶层(离地高度约 21 m).同步采集 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 样品.采样时间:2011 年 11 月 9 日—11 月 28 日,每个样品连续 24 h 采集.采样仪器:1 台武汉天虹 4 通道(流量 $16.7\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)大气颗粒物采样仪和 4 台中流量颗粒物采样仪(流量 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).本次观测期间气象条件见表 1.南京市地处北亚热带季风气候区,秋、冬季以东北风为主,春、夏季以东风和东南风为主,平均风速不大,大风日数不多^[4].

表 1 采样期内气象状况
Table 1 Meterological conditions during sampling period

日期	天气	温度	风向和风力	平均相对湿度
11.10	多云	7℃—17℃	北风 3—4 级	63.6%
11.11	晴	9℃—18℃	南风小于 3 级	53.9%
11.12	多云	9℃—11℃	南风小于 3 级	68.5%
11.13	多云	11℃—18℃	东北风 3—4 级	62.3%
11.14	晴	11℃—20℃	东风 3—4 级	63.5%
11.15	晴	13℃—20℃	东南风 4—5 级	72.2%
11.16	晴	14℃—21℃	东南风 4—5 级	84.8%
11.17	雾	15℃—21℃	东南风小于 3 级	85.7%
11.18	阴	12℃—21℃	北风 3—4 级	98.2%
11.19	阴	7℃—15℃	北风 4—5 级	78.2%
11.20	晴	5℃—15℃	东风 4—5 级	49.3%
11.21	晴	7℃—15℃	东南风 4—5 级	63.2%
11.22	多云	7℃—15℃	东南风 3—4 级	79.0%
11.23	晴	3℃—13℃	北风 4—5 级	57.1%
11.24	晴	5℃—14℃	东南风 3—4 级	60.5%
11.25	多云	10℃—17℃	东南风 3—4 级	70.5%
11.27	多云	13℃—21℃	东南风 3—4 级	73.4%
11.28	多云	13℃—22℃	东北风 3—4 级	85.7%

1.2 样品预处理及称量

采样滤膜:47 mm 石英和特氟龙滤膜用于 4 通道采样仪,90 mm 石英和聚丙烯纤维滤膜用于中流量采样仪.滤膜预处理:将石英滤膜用铝箔纸包好,放入马弗炉中以 450 ℃焙烧 4 h.用铝箔纸将聚丙烯纤维滤膜包好,放入烘箱 60 ℃烘烧 4 h.烘烧结束后,将膜取出,用铝箔纸包好放到干燥器中,将干燥器放在天平室平衡 48 h.样品的称量:称重前后记录天平室的温度、湿度.称重时记录滤膜重量为 W1,将滤膜存放在干燥器中 24 h 后,再次称量,记录重量为 W2. $|W1-W2|<0.02$ mg,石英膜即为恒重,可以使用.如不然,按前面的顺序重新进行处理直至恒重.采样后,滤膜处理也按此方法进行.

1.3 样品分析

颗粒物样品中 OC、EC 的含量由美国沙漠所研制的 DRI Model 2001 热光碳分析仪(Thermal/Optical Carbon Analyzer, Atmoslytic Inc., Calabasas, CA, USA),根据 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environment Thermo Optical Reflection)协议规定的 TOR 法测量.

TOR 法的主要分析过程为:样品在无氧纯 He 环境中,分别在 120 ℃(OC1)、250 ℃(OC2)、450 ℃(OC3)和 550 ℃(OC4),对面积为 0.495 cm²的滤膜片进行加热,将滤膜上的颗粒态碳转化为 CO₂;然后再将样品在含 2% O₂的 He 环境中,分 3 步升温,依次为 550 ℃(EC1)、700 ℃(EC2)、800 ℃(EC3),此时样品中的 EC 释放出来,氧化为 CO₂^[5].上述各个温度梯度下产生的 CO₂,经 MnO₂催化,在还原环境下转化为 CH₄,通过火焰离子化检测器(FID)测定.在温度上升过程中,部分有机碳将发生碳化现象而形成黑碳,并致使滤膜变黑,还会导致热谱图上的 OC 过渡到 EC 的峰不易区分.此时采用 633 nm 的氦-氖激光可以监测到滤纸变黑过程中的反光光强的变化,从而明确指示出 EC 氧化的起始点.当氧气加入进来后,原始和碳化的黑碳燃烧,并且热反射值增加,加入氧气直到热反射值回到原始水平以后所测出的碳化物称之为裂解碳(OPC)^[5-6].

2 结果与讨论

2.1 OC、EC 的浓度水平

表 2 和表 3 分别显示了南京市 2011 年 11 月大气中 PM_{2.5}和 PM₁₀中 OC、EC 的质量浓度平均值,并列出了中外其他城市大气颗粒物中的 OC、EC 在各自观测期内的数值进行比较.南京市 PM₁₀中 OC 和 EC 的浓度分别为 11.6—55.8 μg·m⁻³和 2.8—14.3 μg·m⁻³,日平均浓度分别是 23.3 μg·m⁻³和 7.7 μg·m⁻³.从表 2 中可看出,南京 PM₁₀中 OC 和 EC 的值略低于北京和广州,远低于西安,与天津较为接近,远高于日本宇治市、欧洲阿尔卑斯山区、德国、意大利 Ispra 地区和美国洛杉矶.OC/EC 值为 3.2 与西安和美国洛杉矶地区相似.

表 2 南京市 PM₁₀中 OC、EC 平均质量浓度与其他城市比较 (μg·m⁻³)

Table 2 Comparison of OC, EC and OC/EC in PM ₁₀ of Nanjing with other cities (μg·m ⁻³)					
地名	采样时间	分析方法*	OC	EC	OC/EC
中国南京	2011.11.10—2011.11.28	TOR	23.3±11.0	7.7±3.2	3.2±0.89
中国北京 ^[7]	2002. 11	TOR	25.6	10.5	2.4
中国天津 ^[8]	2008.10.01—2008.10.25	TOR	20.2	6.5	2.8
中国西安 ^[9]	2003.11	TOR	67.5 ± 25.7	19.8 ± 8.2	3.6
中国广州 ^[10]	2004. 08.02—2004.09.10	TOR	34.8 ± 8.4	12.7 ± 3.0	2.7
日本宇治市 ^[11]	1999.11	TOR	6.10	2.02	3.0
阿尔卑斯山区 ^[12]	2001.02.21—2004.07.03	TOT	8.97 ± 5.22	1.89 ± 1.43	4.7
德国 Melpitz ^[13]	1997.11	TOR	5.2	7.8	0.7
葡萄牙 Areao ^[14]	1993—1996	TOT	2.5	0.7	3.6
意大利 Ispra ^[15]	2002.07.01—2003.07.01	TOT	7.79±6.80	1.83±1.32	4.3
洛杉矶 I-710 ^[16]	2011.3—2011.4	TOT	7. 3 ± 2.0	2.2 ± 0.4	3.3

* TOR 热光反射法, TOT 热光透射法.

南京市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的平均浓度分别为 18.1 μg·m⁻³ 和 6.6 μg·m⁻³. PM_{2.5} 中 OC 值略低于上海和广州, 明显低于北京和西安. EC 值略低于北京和天津, 远低于西安和广州, 明显高于上海. OC 和 EC 的值要远高于韩国 Kosan、德国 Erfurt、美国纽约和洛杉矶水平. OC/EC 值与广州和美国纽约接近, 明显低于上海的 5.3 ± 2.0 (表 3). 表 2 和表 3 的结果表明, 南京市相比国内其他城市而言碳气溶胶浓度水平较低, 但比中国周边国家和地区要高, 相比欧美发达国家城市而言碳污染情况很严重.

表 3 南京 PM_{2.5} 中 OC、EC 平均质量浓度与其他城市比较 (μg·m⁻³)

Table 3 Comparison of OC, EC and OC/EC in PM _{2.5} of Nanjing with other cities (μg·m ⁻³)					
地名	采样时间	分析方法	OC	EC	OC/EC
中国南京	2011.11.10—2011.11.28	TOR	18.1±9.6	6.6±2.9	2.8±0.88
中国北京 ^[17]	2006.10.24—2006.11.12	TOR	29.6 ± 15.6	8.1 ± 4.6	3.6
中国天津 ^[8]	2008.10.01—2008.10.25	TOR	33.2	7.4	3.7
中国西安 ^[9]	2003.11	TOR	52.4 ± 27.1	12.1 ± 5.1	4.3
中国上海 ^[18]	2005.9—2005.11	TOT	21.8 ± 14.2	3.9 ± 1.3	5.3 ± 2.0
中国广州 ^[19]	2004.11.29—2005.01.06	TOR	23.9 ± 11.9	9.2 ± 5.7	2.7
中国高雄 ^[20]	1998.11—1999.04	TOR	10.4	4.0	2.6
韩国 Kosan ^[20]	1996—1997	TOR	3.3	0.3	11
德国 Erfurt ^[21]	1997—2001	TOR	1.1	1.5	0.73
美国纽约 South Bronx ^[22]	2006.11—2008. 11	TOT	2.5	1.0	2.5
美国洛杉矶 I-710 ^[16]	2011.3—2011.4	TOT	6.2	1.9	3.3

2.2 OC、EC 的日变化规律

观测期内 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中的 OC 和 EC 的日变化规律与颗粒物的相似, 趋势相近, 见图 1. PM₁₀ 最高值和最低值分别出现在 11 月 28 日和 11 月 20 日, 分别为 308.2 μg·m⁻³ 和 76.7 μg·m⁻³. 其中 OC 和 EC 的最高值却出现在 11 月 27 日, 分别为 55.8 μg·m⁻³ 和 14.3 μg·m⁻³, 最低值却出现在 11 月 19 日, 分别为 11.6 μg·m⁻³ 和 2.8 μg·m⁻³. PM₁₀ 中 OC/EC 的最大值出现在 11 月 13 日为 5.1, 最小值出现在 11 月 17 日为 1.8 (图 1a).

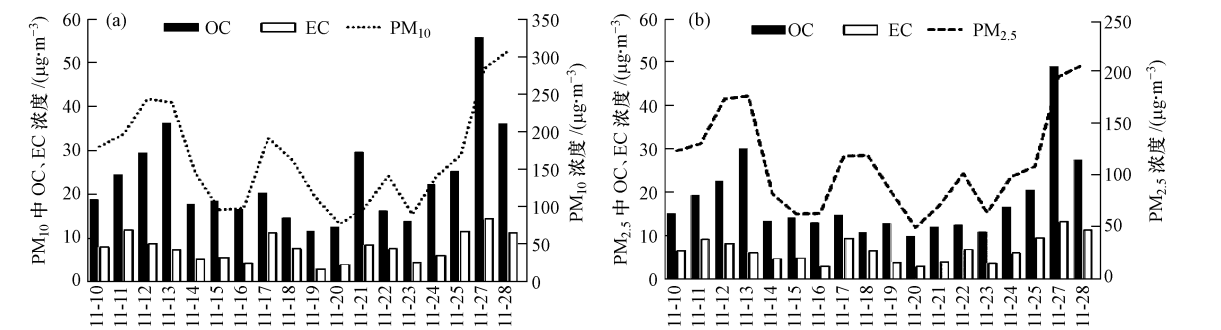


图 1 南京市 PM₁₀(a) 与 PM_{2.5}(b) 中 EC、OC 日均值

Fig.1 Diurnal variations of OC, EC in PM₁₀(a) and PM_{2.5}(b) during November

PM_{2.5} 最高值和最低值分别出现在 11 月 28 日和 11 月 20 日, 分别为 205.7 μg·m⁻³ 和 49.2 μg·m⁻³, 其中 OC 和 EC 的最高值出现在 11 月 27 日, 分别为 49.1 μg·m⁻³ 和 13.1 μg·m⁻³, 最低值出现在 11 月 20 日, 分别为 9.9 μg·m⁻³ 和 3.0 μg·m⁻³ (图 1b). PM_{2.5} 中 OC/EC 的最大值出现在 11 月 13 日为 5.0, 最小值出现在 11 月 17 日为 1.6.

有研究表明, 灰霾天的相对湿度与气溶胶粒子浓度呈正相关关系, 当颗粒物中含有水溶性成分时, 相对湿度大使得可溶性气溶胶易吸收水汽而长大, 且在一定的湿度范围 (以不发生重力沉降为界限) 内, 湿度越大越有利于颗粒物的形成^[23]. 大气低层风速、风向是边界层内影响污染物稀释和扩散的主要因素, 通常风速越大越有利于大气中污染物的稀释扩散, 而长时间的微风和静风则对污染物的扩散起抑制作用, 造成污染物近地层堆积浓度升高^[23]. PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染较严重的情况出现在 11 月 12 日、13 日、

17 日、18 日、27 日和 28 日,查询气象数据发现,这几天气象环境中风力较小(3—4 级),11 月 12 日、17 日的风力甚至小于 3 级.另外,11 月 17 日、18 日、27 日和 28 日当天的相对湿度较高,11 月 17 日、18 日和 28 日的相对湿度甚至高于 85%.这些因素都不利于颗粒物污染的扩散.

2.3 分布特征

本研究计算了 PM_{2.5}中的 OC、EC 与在 PM₁₀中 OC、EC 的比值,发现细颗粒(PM_{2.5})中的 OC 和 EC 占粗颗粒(PM₁₀)中 OC 和 EC 的比值分别超过了 75%和 80%,表明颗粒物中的 OC、EC 主要富集在细粒子中.这可能因为地壳元素对可吸入颗粒物中 PM₁₀的贡献率较高,所以碳气溶胶在 PM₁₀中占比较低,而在细颗粒(PM_{2.5})中占比较高.黄虹等^[24]提出 OC 主要来源于石化燃料的燃烧,EC 来源相对复杂,主要来源于石化燃料和生物质燃烧等各种不完全燃烧.本研究结果显示这几类源所产生的含碳气溶胶更多富集在 PM_{2.5}细粒子中.另外,Chen 等^[25]曾研究并指出总悬浮颗粒物(TSP)中分别有 75.1%和 70.3%的 EC 和 OC 集中于粒径<1 μm 的颗粒物中,84.9%的 EC 和 81.9%的 OC 集中于粒径< 2.5 μm 的颗粒物中,高于 93%的 OC 和 EC 集中在粒径<10 μm 的颗粒物中,此研究结果也表明了 OC 和 EC 主要存在于细粒子中.

2.4 碳气溶胶来源初步解析

根据 IMPROVE 协议规定的 TOR 测量方法,8 碳组分被用来作为污染源标记物,并可用主成分分析方法(PMF)来计算其对污染源的贡献^[26].南京秋季大气颗粒物样品中的主成分分析结果在表 4 中列出,PM₁₀的主成分分析提取出了 4 个主要因子,PM_{2.5}的分析结果提取出了 3 个主要因子.其中 PM₁₀的因子 1 中高载荷(因子载荷> 0.7 的值)组分是 OC1 和 OC2.OC1 组分比较高,可能表明了在此次观测期间南京及周边地区有秸秆焚烧的来源.虽然南京市区对其他生物质如落叶等已实施禁燃多年,但是南京周边地区尤其是农村地区秸秆焚烧问题在秋冬季时有发生.OC2 和 OC3 可能表明了燃煤源对碳气溶胶的贡献.南京是中国东南部典型亚热带季风气候城市,秋、冬季节没有暖气供应,居民燃煤源应排除在外,而南京市化工、电力和钢铁企业居多,所以工业燃煤源对 OC2、OC3 可能有较大的贡献.因此,因子 1 可能指示了工业燃煤和生物质燃烧混合源对碳气溶胶的贡献.因子 2 中 EC2 和 EC3 的组分较高,这可能指示了柴油燃烧所带来的排放.因子 3 中 OC4 组分值远远高于其他组分,考虑到在观测期间,观测点周围道路和工地施工较多,所以 OC4 组分很可能指示了道路和施工扬尘对大气环境的影响.因子 4 中 EC1-OPC 的值远高于其他组分,这指示了汽油车尾气的贡献.PM_{2.5}中相对组分载荷比 PM₁₀要复杂,因子 1 中 OC1、OC2、OC3 和 EC1-OPC 的载荷都比较高,说明其来源于汽油车排放、生物质燃烧和工业燃煤等混合源的可能性较大,这 3 种源所产生的碳组分更多地富集在 PM_{2.5}中,难以区分.还有与 PM₁₀中的碳组分不同的是,因子 2 中高载荷组分只有 EC2,因子 3 中 OC4 的值远高于其他组分,这可能指示了尘的来源.

表 4 南京市秋季 PM₁₀和 PM_{2.5}样品的主成分分析结果
Table 4 Analytical results of Positive matrix factorization (PMF) on PM₁₀ and PM_{2.5}

变量	PM ₁₀				PM _{2.5}		
	1	2	3	4	1	2	3
OC1	0.769	0.310	0.352	0.399	0.885	0.438	-0.109
OC2	0.762	0.362	0.315	0.409	0.817	0.562	-0.094
OC3	0.686	0.455	0.128	0.511	0.768	0.596	0.121
OC4	-0.111	-0.034	0.985	0.032	0.053	-0.141	0.982
OPC	0.365	0.391	0.779	0.250	0.665	0.671	-0.297
EC1-OPC	0.366	0.171	0.029	0.907	0.947	0.046	0.179
EC2	0.184	0.850	0.281	0.372	0.202	0.937	-0.135
EC3	0.530	0.831	0.044	0.019	0.665	0.631	-0.343
源	生物质/ 工业燃煤	柴油	尘	汽油	汽油/生物质/ 工业燃煤等 混合源	柴油	尘

南京市近几年大力发展基础设施建设,城区有多处道路施工,高铁南站项目以及多处房地产项目也在施工,总施工项目超过 2000 个,而且从 2011 年 10 月份以来南京市还施行了雨污分流工程和下水管网改造工程.在此次观测期间的观测点周围就有雨污分流工程和建筑工地的施工,另外,观测点所在周边道路,有多条是主干道,早晚上下班高峰期间车流量较大.所以交通源(柴油车和汽油车)和扬尘源也是本研究所揭示的主要污染源.

有文献研究指出 OC1 主要来源于生物质燃烧^[8-9].OC2 和 OC3 可能主要来源于燃煤和机动车的混合排放^[5,8-9].EC1 指示了汽油车尾气的贡献,EC2、EC3 则主要代表了柴油车尾气的贡献^[8-9,27].OC3、OC4 主要代表了道路扬尘排放源的贡献^[8].南京市秋季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品中 8 碳组分平均值见图 2,从下往上依次是 OC1、OC2、OC3、OC4、OPC、EC1、EC2 和 EC3,从中可看出南京市秋季颗粒物中 OC2、OC3、OC4、EC1 和 OPC 较 OC1 含量高,远高于 EC2 和 EC3.证明南京市秋季机动车汽油燃烧排放污染很严重,工业燃煤、道路和工地扬尘污染较严重,生物质燃烧污染排放较其他源而言较低,柴油车污染排放最少.

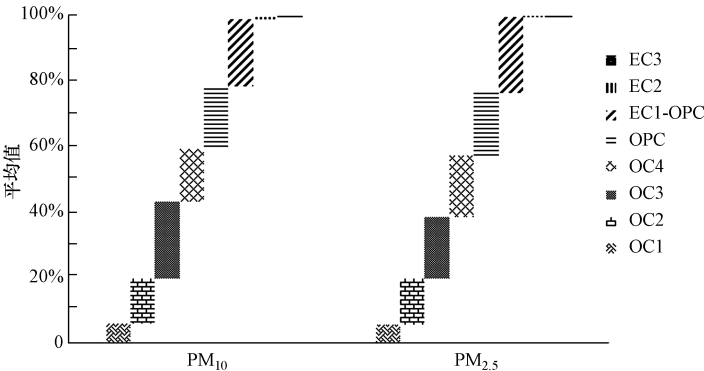


图 2 南京市秋季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品中 8 碳组分平均值
Fig.2 The eight carbon fractions of PM₁₀ and PM_{2.5} in Nanjing

3 结论

南京秋季观测期间碳气溶胶污染与国内其他城市相比处于较低水平,但与发达国家城市相比较严重.PM₁₀和 PM_{2.5}中的 OC 和 EC 的日变化规律与颗粒物的相似,趋势相近.OC 和 EC 主要分布于细粒子 PM_{2.5}中,且 EC 比 OC 更倾向于在细颗粒物上的分布.根据 8 碳组分分析情况,南京市秋季碳气溶胶中生物质、工业燃煤、道路和施工扬尘是 OC 的主要来源,EC1 主要代表了汽油燃烧的来源,其中 OC2、OC3、OC4、EC1 以及 OPC 含量较高,远高于 EC2 和 EC3,对南京秋季大气中碳气溶胶贡献较大.OC1 含量较低,代表了生物质燃烧对南京市碳气溶胶贡献较小.柴油燃烧是 EC2 和 EC3 的主要来源,但对南京市碳气溶胶的贡献最小.证明南京市秋季机动车汽油燃烧排放污染很严重,工业燃煤、道路和工地扬尘污染较严重,生物质燃烧污染排放较其他源而言较低,柴油车污染排放最少.

参 考 文 献

[1] Wolff G T. Particulate elemental carbon in the atmosphere[J]. Journal of Air Pollution Control Association, 1981, 31: 935-938
[2] 段风魁, 贺克斌, 刘咸德, 等.含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, 1(8): 1-8
[3] Gao J, ZhaY. Meteorological influence on predicting air pollution from MODWAS-derived aerosol optical thickness; a case study in Nanjing China[J]. Remote Sensing, 2010, 2(9): 2136-2147
[4] 杨卫芬. 南京地区霾天气下大气细粒子污染特征的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2010
[5] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characterization of roadside fine particulate carbon and its eight fractions in Hong Kong[J]. Aerosol and AirQuality Research, 2006, 6(2): 106-122
[6] 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, 37:1451-1460
[7] Duan F, He K, Ma Y, et al. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, 60:355-364

- [8] Gu J, Bai Z, Liu A, et al. Characterization of atmospheric organic carbon and element carbon of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at Tianjin, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, 10: 167-176
- [9] 曹军骥, 李顺诚, 李杨, 等. 2003 年秋冬季西安大气中有机碳和元素碳的理化特征及其来源解析[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(12): 1460-1466
- [10] Wang X, Bi X, Sheng G, et al. Chemical composition and sources of PM_{10} and $PM_{2.5}$ aerosols in Guangzhou, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 119: 425-439
- [11] Höller R, Tohno S, Kasahara M, et al. Long-term characterization of carbonaceous aerosol in Uji, Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(8): 1267-1275
- [12] Aymoz G, Jaffrezou J L, Chapuis D, et al. Seasonal variation of PM_{10} main constituents in two valleys of the French Alps. I: EC/OC fractions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 661-675
- [13] Plewka A, Gnauk T, Brüggemann E, et al. Size-resolved aerosol characterization for a polluted episode at the IFT research station melpitz in autumn 1997[J]. *Atmospheric Chemistry*, 2004, 48(2): 131-156
- [14] Castro L M, Pio C A, Harrison M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: Estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33, 2771-2781
- [15] Yttri K E, Bjerke A, Cape JN, et al. Elemental and organic carbon in PM_{10} : A one year measurement campaign within the European Monitoring and Evaluation Programme EMEP[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 5711-5725
- [16] Kam W, Liacos J W, Schauer J J, et al. Size-segregated composition of particulate matter (PM) in major roadways and surface streets[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 90-97
- [17] Zhou J, Zhan R, Cao J J, et al. Carbonaceous and ionic components of atmospheric fine particles in Beijing and their impact on atmospheric visibility[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12: 492-502
- [18] Feng Y, Chen Y, Guo H, et al. Characteristics of organic and elemental carbon in $PM_{2.5}$ samples in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 92: 434-442
- [19] Cao J J, Huang H, Lee S C, et al. Indoor/outdoor relationships for organic and elemental carbon in $PM_{2.5}$ at residential homes in Guangzhou, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12: 902-910
- [20] He Z, Kim Y J, Ogunjobi K O, et al. Carbonaceous aerosol characteristics of $PM_{2.5}$ particles in Northeastern Asia in summer 2002[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(12): 1795-1800
- [21] Gnauk T, Brüggemann E, Müller K, et al. Aerosol characterisation at the FEBUKO upwind station Goldlauter (I): Particle mass, main ionic components, OCEC, and mass closure[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(23/24): 4209-4218
- [22] Rattigan O V, Felton H D, Felton M, et al. Multi-year hourly $PM_{2.5}$ carbon measurements in New York: diurnal, day of week and seasonal patterns[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44: 2043-2053
- [23] 钱凌. 南京大气气溶胶的污染特征及其影响因素观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2008
- [24] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏季室内外 $PM_{2.5}$ 中有机碳、元素碳的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1242-1249
- [25] Chen S, Liao S, Jian W, et al. Particle size distribution of aerosol carbons in ambient Air[J]. *Environment International*, 1997, 23(4): 475-488
- [26] Larson T, Gould T, Simpson C, et al. Source apportionment of indoor, outdoor, and personal $PM_{2.5}$ in Seattle, Washington, using positive matrix factorization[J]. *Air and Waste Manag Assoc*, 2004, 54(9): 1175-87
- [27] Chow, J C, Watson J G, Kuhns H D, et al. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational (BRAVO) study[J]. *Chemosphere*, 2004, 54: 185-208