

陶俊,柴发合,朱李华,等. 2011. 2009 年春季成都城区碳气溶胶污染特征及其来源初探[J]. 环境科学学报, 31(12): 2756-2761

Tao J, Chai F H, Zhu L H, et al. 2011. Characteristics and sources of carbonaceous aerosol in the urban Chengdu during spring of 2009 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(12): 2756-2761

2009 年春季成都城区碳气溶胶污染特征及其来源初探

陶俊¹, 柴发合^{2,*}, 朱李华¹, 高健², 曹军骥³, 王启元³, 罗磊⁴

1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012

3. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

4. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

收稿日期: 2011-03-03

修回日期: 2011-05-12

录用日期: 2011-05-30

摘要: 于 2009 年 4 月 19 日至 5 月 17 日在成都城区每天采集 PM_{2.5} 样品, 然后对样品进行 8 种碳组分、水溶性有机碳、左旋葡聚糖及水溶性离子分析, 初步探讨了碳气溶胶的来源. 结果发现: 成都春季 PM_{2.5} 日均值质量浓度为 (133.2 ± 55.5) μg·m⁻³, TC、OC、EC 和 WSOC 质量浓度分别为 (26.4 ± 7.2), (20.7 ± 6.0), (5.7 ± 1.8) 和 (10.4 ± 3.4) μg·m⁻³, 左旋葡聚糖质量浓度为 (396.5 ± 405.3) ng·m⁻³, 最大值达到 1820.9 ng·m⁻³. 因子分析结果表明 OC2、OC3、OC4 和 WSOC 主要来源于生物质燃烧排放, EC1 主要来源于燃煤排放, EC2、EC3 主要来源于机动车排放. 利用中国地区生物质燃烧源成分谱 LC/OC 比值计算得到生物质燃烧对 OC 和 TC 平均贡献率分别为 46.0% 和 36.6%.

关键词: 碳气溶胶; 左旋葡聚糖; 生物质燃烧

文章编号: 0253-2468(2011)12-2756-06

中图分类号: X513

文献标识码: A

Characteristics and sources of carbonaceous aerosol in the urban Chengdu during spring of 2009

TAO Jun¹, CHAI Fahe^{2,*}, ZHU Lihua¹, GAO Jian², CAO Junji³, WANG Qiyuan³, LUO Lei⁴

1. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075

4. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071

Received 3 March 2011;

received in revised form 12 May 2011;

accepted 30 May 2011

Abstract: Aerosol samples for PM_{2.5} were collected from 19 April to 17 May 2009 in Chengdu. The concentrations of eight carbon fractions, water-soluble organic carbon (WSOC), levoglucosan and water-solubility ions of all particle samples were obtained by chemical analyses. The characteristics and sources of carbonaceous aerosols were investigated. The results showed that the average mass concentration of PM_{2.5} was (133.2 ± 55.5) μg·m⁻³. The average value of total carbon (TC), organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and WSOC were (26.4 ± 7.2), (20.7 ± 6.0), (5.7 ± 1.8) and (10.4 ± 3.4) μg·m⁻³, respectively. The averaged levoglucosan concentration was (396.5 ± 405.3) ng·m⁻³ with maximum of 1820.9 ng·m⁻³. Factor analysis indicated that OC2, OC3, OC4 and WSOC came mainly from biomass burning, while EC1 from coal combustion and EC2 and EC3 from vehicle exhaust. Calculation by LC/OC ratio of biomass burning emission factor in China showed that the contribution rate of biomass burning to OC and TC was 46.0% and 36.6%, respectively.

Keywords: carbonaceous aerosol; levoglucosan; biomass burning

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(No. 200809143, 201009001)

Supported by the Special Scientific Research Funds for Environment Protection Commonweal Section(No. 200809143, 201009001)

作者简介: 陶俊(1979—), 男, 副研究员, E-mail: taojun@scies.org; * 通讯作者(责任作者), Tel: 010-84915164, E-mail: chaifh@craes.org.cn

Biography: TAO Jun(1979—), male, associate professor, E-mail: taojun@scies.org; * **Corresponding author**, Tel: 010-84915164, E-mail: chaifh@craes.org.cn

1 引言(Introduction)

有机碳(OC, Organic Carbon)和元素碳(EC, Element Carbon)能直接影响云凝结核的性质及其成核能力从而对全球气候变化起着重要作用(Jacobson 2001). OC和EC具有明显的消光特性,是引起城市大气能见度下降的重要成分(Watson *et al.* 2002). EC主要来源于含碳物质的不完全燃烧,而OC的来源则相对复杂,有燃烧、工业和自然源的直接排放,还能由大气化学过程生成. 碳气溶胶作为城市大气PM_{2.5}中重要的成分之一(Cao *et al.* 2007),弄清其来源对于改善城市大气环境质量具有十分重要的现实意义.

国内外学者开展了大量有关碳气溶胶的研究,这些研究主要集中在分析OC和EC浓度特征(He *et al.*, 2001; Ye *et al.*, 2003; Cao *et al.* 2004; Cao *et al.* 2007; Gnauk *et al.*, 2008)、对能见度的影响(Andreae *et al.* 2008; 陶俊等 2009)、二次有机碳气溶胶(SOC, Secondary Organic Carbon)的生成机制(Bond *et al.*, 2004; Schichtel *et al.*, 2008)、水溶性有机碳(WSOC, Water-Soluble Organic Carbon)浓度特征(Yang *et al.*, 2005; Ho *et al.*, 2006; Viana *et al.*, 2007; Anderson *et al.*, 2008; Pathak *et al.*, 2011; Park and Cho, 2011)以及城市碳气溶胶来源估算(Cao *et al.* 2005)等. 尽管我国碳气溶胶研究相当多,但鲜见在成都地区针对OC、EC和WSOC污染特征及其来源研究(王淑兰等 2004).

成都是我国西南地区最大的城市之一,位于四川盆地西部. 2009年人口超过1000万,其中市区人口超过300万. 2009年的耗煤量超过600万吨,机动车保有量超过200万辆. 大量一次污染物的直接排放,加上成都地区的封闭地形,较高的静小风频率的气象特征,使得成都地区大气污染形势非常严峻(王淑兰等 2004). 此外,春季成都周边地区农业垃圾(如油菜秆和小麦秸秆等)焚烧和北方的沙尘天气通过区域输送均对成都地区大气环境质量造成了一定的影响.

本研究利用中国气象局成都高原气象研究所大气环境观测点,经过2009年4月19日—5月17日连续29 d的观测,获得了PM_{2.5}中OC、EC、WSOC(水溶性有机碳)、左旋葡聚糖(LC, levoglucosan)和水溶性离子质量浓度等第一手观测数据,同步观测了风速、风向、温湿度、大气压和降雨量等气象因

子,在此基础上分析了OC、EC、WSOC污染特征,并初步探讨了其来源,可为进一步开展碳气溶胶来源解析工作提供参考,也为政府开展城市大气污染的防治工作提供科学依据.

2 实验(Experimental)

2.1 采样地点

采样地点设在中国气象局成都高原气象研究所的办公楼顶,距离地面约15 m,采样点周围是集中居住区,5 km范围内无工业污染源,观测数据在一定程度上代表了成都城区大气污染水平.

2.2 样品采集

于2009年4月19日—5月17日利用美国MiniVol(Air Metrics Corporation)采样器每天采集1个PM_{2.5}样品. 采样时间为当日的10:00到次日的10:00,采样器流量为5.0 L·min⁻¹,使用的滤膜为直径47 mm的石英膜(Whatman QM/A, England). 滤膜在采样前用800 °C高温灼烧3 h(去除可能的碳污染),冷却后放在恒温恒湿箱(温度20~23 °C,相对湿度35%~45%)平衡24 h,再用精度为1 µg电子天平(Sartorius, Göttingen, Germany)进行称量,采样完成后样品放入冰箱冷冻柜中-18 °C保存待进行化学分析.

2.3 气象因子数据采集

利用自动气象站在线观测风速、温度、相对湿度、大气压和降雨量等气象因子.

2.4 样品化学成分分析

所有样品的OC和EC分析采用DRI Model 2001热光碳分析仪. 应用IMPROVE热光反射(TOR, Thermal Optical Reflectance)的实验方法进行样品分析,该方法的主要测试原理参考文献(Chow *et al.*, 1993).

2.0 cm²的石英膜片加入15 mL超纯水,超声萃取1 h,采用针孔滤膜过滤(0.2 µm PTFE membrane, Whatman). 用美国GE公司Sievers 900系列online型号的总有机碳分析仪对WSOC进行分析,检测限0.03 µg·L⁻¹. 该方法的主要测试原理是:样品水溶液进入仪器后,样品先被酸剂(6.0 mol·L⁻¹磷酸, H₃PO₄)酸化后进入无机碳脱除器(ICR, Inorganic Carbon Remover),测量无机碳CO₂含量,样品再被氧化剂(15%过硫酸铵((NH₄)₂S₂O₈)和紫外灯氧化,测量出总CO₂含量,两者差值得到有机碳含量.

2.0 cm²的石英膜片加入2 mL超纯水,超声萃

取 1 h,采用针孔滤膜(0.2 μm PTFE membrane, Whatman)过滤. 用美国戴安公司 ISC3000 色谱和 MA 糖柱分析 LC,具体分析方法见文献(Engling *et al.*, 2006).

剪取 1/4 的石英膜加入 10 mL 去离子水($R > 18.2 \text{ M}\Omega$) 超声萃取 1 h,采用 0.45 μm 的过滤器过滤,用 Dionex-600 型离子色谱仪对水溶性离子进行分析. 具体分析方法见文献(Shen *et al.*, 2009).

2.5 数据代表性分析

2009 年 4 月 19 日—5 月 17 日期间连续采集样品 29 个,在此期间经历降雨天气、阴天和多云天气,也有短暂的晴天. 整个观测期间绝大部分天气以全云阴天和多云为主,偶尔有小雨. 2009 年 3 月—5 月也基本是以全云阴天和多云为主. 因此某种程度上,本研究连续采集的 29 个样品可以代表成都春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均水平.

3 结果(Results)

3.1 OC、EC、WSOC 和 LC 浓度水平

表 1 为成都春季 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学组分质量浓度水平. $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $(133.2 \pm 55.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 变化范围为 60.0 ~ 300.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 总碳(TC, Total Carbon, $\text{TC} = \text{OC} + \text{EC}$)、OC、EC、WSOC 质量浓度分

别为 (26.4 ± 7.2) , (20.7 ± 6.0) , (5.7 ± 1.8) 和 $(10.4 \pm 3.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 $21.6\% \pm 6.1\%$, $17.0\% \pm 5.3\%$, $4.5\% \pm 1.2\%$ 和 $8.5\% \pm 2.7\%$. WSOC 作为 OC 的重要组成部分,占 OC 质量浓度的 $50.1\% \pm 5.6\%$, 变化范围为 33.6% ~ 60.5%. LC 作为生物质燃烧的示踪物(Engling *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010) 其浓度均值达到 $(396.5 \pm 405.3) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值达到 1820.9 $\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 远远高于国内城市北京(Zhang *et al.*, 2008) 和广州(Zhang *et al.*, 2010) 与生物质燃烧有关的水溶性组分 Cl^- 和 K^+ 浓度也处于较高的水平(Hays *et al.*, 2005), 可以推断春季成都城区受生物质燃烧影响十分明显.

表 2 列出了国内主要城市春季碳气溶胶浓度水平. 表 2 中 OC 和 EC 测量方法均为 TOR 分析方法. 由表 2 可知,春季成都城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平明显高于国内主要城市,这可能与成都地区封闭地形和较高的静风频率等因素有关(王淑兰等, 2004). OC 浓度略微高于其他城市,而 WSOC 也处于较高的水平,可能与成都地区生物质燃烧直接排放 WSOC 有关(Simoneit *et al.*, 2004). EC 浓度则略微低于上海、广州和北京,可能是由于成都城区禁止燃煤,而郊区燃煤源距离城区 20 km 以上,其区域输送对城区

表 1 成都春季 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学成分浓度水平

Table 1 Level of chemical components concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ in spring in Chengdu

数据类型	$\text{PM}_{2.5}$ $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	TC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	OC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	EC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	WSOC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	LC $/(\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3})$	F^- $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Cl^- $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
均值	133.2 ± 55.5	26.4 ± 7.2	20.7 ± 6.0	5.7 ± 1.8	10.4 ± 3.4	396.5 ± 405.3	0.3 ± 0.1	2.7 ± 1.7
最大值	300.5	49.4	41.8	9.9	21.4	1820.9	0.6	6.9
最小值	60.0	15.7	12.4	3.3	6.4	36.0	0.2	0.4
数据类型	NO_3^- $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	SO_4^{2-} $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Na^+ $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	NH_4^+ $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	K^+ $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Mg^{2+} $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Ca^{2+} $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	
均值	9.7 ± 6.2	15.5 ± 9.0	0.5 ± 0.7	4.7 ± 4.6	3.0 ± 1.8	0.0 ± 0.1	2.4 ± 2.0	
最大值	31.7	37.2	2.3	17.1	8.5	0.4	8.5	
最小值	3.7	4.5	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	

表 2 国内主要城市春季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分浓度水平

Table 2 Level of carbonaceous species in $\text{PM}_{2.5}$ in April in major cities of China

城市	时间	样本数	$\text{PM}_{2.5}$ $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	TC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	OC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	EC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	WSOC $/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	文献
成都城区	2009 年 4 月 19 日—5 月 17 日	$n = 29$	133.2	26.4	20.7	5.7	10.4	本研究
上海城区	2005 年 5 月 5 日—6 月 15 日	$n = 39$	67	26.9	16.9	10.0	5.8	Pathak <i>et al.</i> , 2011
广州城区	2007 年 4 月 1 日—4 月 30 日	$n = 28$	79.2	22.9	14.8	8.1	—	Tao <i>et al.</i> , 2009
北京城区	2000 年 3 月 9 日—5 月 25 日	$n = 12^a$	88.6	24.88	18.21	6.67	—	He <i>et al.</i> , 2001

注 a: 连续 7 天一个样品.

EC 浓度贡献相对较小,此外城区主要公共交通工具均采用天然气等清洁能源也减少了 EC 一次排放。尽管成都城区与上海 TC 浓度基本相当,而 $PM_{2.5}$ 浓度约是上海的 2 倍,其主要水溶性离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度也相当,但 Ca^{2+} 浓度较高,可能是成都当地的尘类(如土壤尘、建筑尘或道路扬尘等)污染对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献较大。

3.2 碳气溶胶逐日变化特征

图 1 为成都春季 $PM_{2.5}$ 中主要化学组分逐日变化趋势。图 2 为成都春季主要气象因子逐日变化趋势。 $PM_{2.5}$ 最大浓度 $300.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 出现在 4 月 24 日,其中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度明显升高,而 OC、EC 和主要的水溶性离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^-)并没有显著升高,但成都草堂环境监测站 PM_{10} 日均值浓度达到 $668 \mu g \cdot m^{-3}$ 明显高于 4 月 23 日的 $73 \mu g \cdot m^{-3}$,这主要是由于 4 月 17 日甘肃发生沙尘天气(兰州区域气候中心和兰州卫星遥感中心 2009 年 4 月第 1 期,沙尘监测报告),沙尘气溶胶通过远距离输送至成都地区,使得 $PM_{2.5}$ 浓度保持较高水平。4 月 25 日尽管仍受到沙尘气溶胶的影响,但 OC、EC 和 WSOC 明显升高, Cl^- 浓度高达 $5.1 \mu g \cdot m^{-3}$, LC 和 K^+ 浓度也略有升高,这可能与静小风天气和城区周边垃圾焚烧有关。4 月 29 日、5 月 5 日、8 日—13 日和 17 日, LC、OC 和 WSOC 浓度明显升高,说明这段时间成都城区大气环境明显受到生物质燃烧的影响,且该期间基本是静小风天气,可见生物质燃烧和静小风天气是导致该段时间内 OC 明显升高的主要原因。4 月 25 日、28 日—30 日、5 月 5 日、10 日和 17 日, EC 浓

度均大于 $7.0 \mu g \cdot m^{-3}$,其中 4 月 25 日高浓度的 EC 可能也与静小风天气和城区周边垃圾焚烧有关。4 月 28 日—30 日和 5 月 5 日 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度也处于较高的水平,较高浓度的 EC 可能与燃煤源的区域输送有关。结合图 2,这段时间尽管有降雨但对污染物清除不明显,而连续高湿度静风天气可能是导致 EC 浓度升高的主要气象因素。5 月 10 日和 17 日 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度没有明显升高,而 LC、 Cl^- 和 K^+ 浓度却明显升高,可以推断生物质燃烧对 EC 也有一定的贡献。综上分析,春季成都城区较高浓度的碳气溶胶主要与生物质燃烧和燃煤源的区域输送以及静小风天气有关。

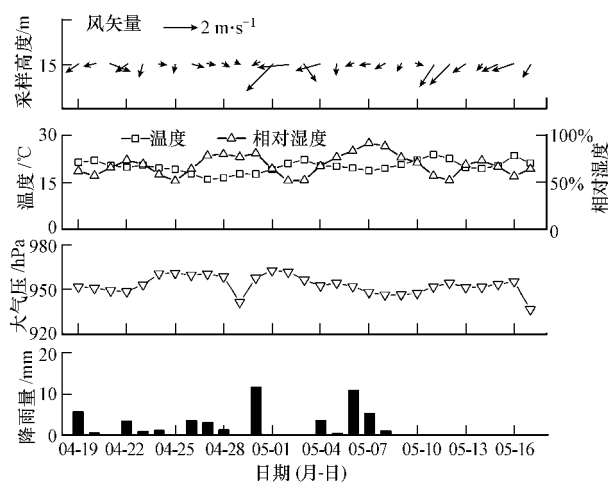


图 2 成都春季主要气象因子逐日变化趋势

Fig. 2 Diurnal variations of meteorological parameters in spring in Chengdu

3.3 碳气溶胶来源分析

通常情况下,可以通过 OC/EC 比值来判断碳气溶胶的来源(Turpin and Huntzicker, 1991)。OC/EC 比值主要与排放源类型、SOC 的生成以及碳气溶胶的清除效率有关(Cachier et al., 1996)。春季成都城区 $PM_{2.5}$ 中 OC 与 EC 相关性较差($R^2 = 0.32$),明显低于国内其他主要城市北京($R^2 = 0.75$)、上海($R^2 = 0.62$)、广州($R^2 = 0.93$ 和 $R^2 = 0.94$)和西安($R^2 = 0.66$ 和 $R^2 = 0.90$)(Dan et al., 2004; Feng et al., 2009; 朱李华等, 2010; Cao et al., 2005),这说明春季成都地区 OC 与 EC 来源有一定的差异性。为了能进一步弄清碳组分可能的来源,利用因子分析法来解析 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 和 OP 等 8 种碳组分(Chow et al., 1993)的来源。表 3 为成都春季 $PM_{2.5}$ 中化学成分最大方差旋转因子分析结果。由表 3 可知,因子 1($F1$) 高载荷的组分为

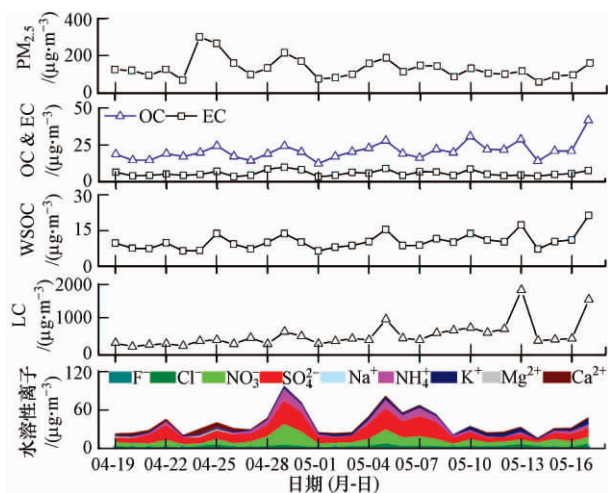


图 1 成都春季 $PM_{2.5}$ 中主要化学组分逐日变化趋势

Fig. 1 Diurnal variations of major components in $PM_{2.5}$ in spring in Chengdu

OC2、OC3、OC4、WSOC、LC、K⁺和 Cl⁻ ,其主要代表了生物质燃烧排放. 因子 2(F2) 高载荷的组分为 EC1、NH₄⁺、NO₃⁻和 SO₄²⁻ ,其主要代表了燃煤排放. 因子 3(F3) 高载荷的组分为 EC2、EC3、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和 F⁻ ,其主要代表了与道路扬尘相关的机动车排放. 由此可知 ,OC2、OC3、OC4 和 WSOC 主要来源于生物质燃烧排放 ,EC1 主要来源于燃煤排放 , EC2、EC3 主要来源于机动车排放.

表3 成都春季 PM_{2.5} 中化学成分最大方差旋转因子分析结果
Table 3 Factor analysis of chemical species in PM_{2.5} in spring in Chengdu

化学成分	F1	F2	F3
OC1	-0.192	0.361	-0.090
OC2	<u>0.938</u>	0.225	-0.071
OC3	<u>0.949</u>	-0.113	0.100
OC4	<u>0.930</u>	0.186	-0.028
OP	-0.488	0.195	0.415
EC1	0.321	<u>0.821</u>	0.161
EC2	-0.345	-0.489	<u>0.556</u>
EC3	-0.006	-0.135	<u>0.609</u>
WSOC	<u>0.936</u>	0.207	0.029
LC	<u>0.875</u>	-0.016	-0.169
Na ⁺	0.054	-0.051	<u>0.865</u>
NH ₄ ⁺	0.140	<u>0.933</u>	-0.239
K ⁺	<u>0.888</u>	0.002	-0.177
Mg ²⁺	0.027	-0.097	<u>0.890</u>
Ca ²⁺	-0.047	-0.259	<u>0.879</u>
F ⁻	-0.073	0.222	<u>0.772</u>
Cl ⁻	<u>0.834</u>	0.328	0.205
NO ₃ ⁻	0.194	<u>0.912</u>	-0.115
SO ₄ ²⁻	0.055	<u>0.948</u>	-0.018
特征值	6.3	4.1	4.0
解释变量	33.4%	21.5%	21.0%
指示来源	生物质燃烧	燃煤	机动车

注: 表中加下划线的为影响的显著因子.

通过上述分析可知 ,成都春季 PM_{2.5} 中碳组分主要来源于生物质燃烧、燃煤和机动车排放 ,但实际上除了上述 3 种主要来源 ,餐饮烹饪、生物气溶胶以及气-粒转化生成的 SOC 等对 OC 也有一定的贡献. 由于缺少成都地区主要污染源的成分谱 ,因此很难利用数学模型比较精确的计算出各种污染源对 TC 的贡献率. 考虑到生物质燃烧对 OC 的影响较大 ,本文仅利用实际样品中 LC/OC 比值与中国地区生物质燃烧源成分谱 LC/OC 比值(3.7%) (Zhang *et al.* ,2007) 来估算成都春季生物质燃烧对 OC 的贡献 ,计算得到春季成都地区生物燃烧对 OC 平均

贡献率为 46.0% ,范围为 6.7% ~98.3% ,对 TC 平均贡献率为 36.6% ,范围为 7.3% ~83.2% . 由此可见 ,生物质燃烧对成都春季碳气溶胶浓度贡献十分明显 ,因此需要进一步加强对成都周边地区生物质燃烧的控制.

4 结论(Conclusions)

1) 成都春季 PM_{2.5} 日均值质量浓度为(133.2 ± 55.5) μg·m⁻³ ,TC、OC、EC、WSOC 质量浓度分别为(26.4 ±7.2) (20.7 ±6.0) (5.7 ±1.8) 和(10.4 ± 3.4) μg·m⁻³ ,LC 质量浓度为(396.5 ±405.3) ng·m⁻³ ,最大值达到 1820.9 ng·m⁻³ ,生物质燃烧对成都城区大气环境质量影响十分明显.

2) OC2、OC3、OC4 和 WSOC 主要来源于生物质燃烧排放 ,EC1 主要来源于燃煤排放 ,EC2、EC3 主要来源于机动车排放.

3) 生物质燃烧对成都春季碳气溶胶质量浓度贡献十分明显 ,其对 OC 和 TC 平均贡献率分别为 46.0% 和 36.6% .

致谢: 感谢成都市环境科学研究院周来东教授级高级工程师提供了成都地区燃煤和机动车等方面的数据.

责任作者简介: 柴发合(1955—) ,男 ,研究员. 中国环境科学研究院副院长. 主要的研究方向是大气物理、大气环境管理理论与技术.

参考文献(References) :

Anderson C H , Dibb J E , Griffin R J , *et al.* 2008. Atmospheric water-soluble organic carbon measurements at Summit , Greenland [J]. *Atmospheric Environment* , 42: 5612-5621

Andreae M O , Schmid O , Yang H , *et al.* 2008. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou , China [J]. *Atmospheric Environment* , 42: 6335-6350

Bond T C , Streets D G , Yarber K F , *et al.* 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research* , 109 , D14203 , doi: 10.1029/2003JD003697

Cachier H , Liousse C , Pertuisol M H , *et al.* 1996. African fine particulate emissions and atmospheric influence , in: *Biomass Burning and Global Change* [M]. London: MIT Press. 428-440

Cao J J , Lee S C , Chow J C , *et al.* 2007. Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research* , 112 , D22S11 , doi: 10.1029/2006JD008205

Cao J J , Lee S C , Ho K F , *et al.* 2004. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River

- Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 38: 4447–4456
- Cao J, Wu F, Chow J C, *et al.* 2005. 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*, 5: 3127–3137
- Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* 1993. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in US air quality studies [J]. *Atmospheric Environment*, 27 (8): 1185–1201
- Dan M, Zhuang G S, Li X X, *et al.* 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 38: 3443–3452
- Engling G, Carrico C M, Kreidenweis S M, *et al.* 2006. Determination of levoglucosan in biomass combustion aerosol by high performance anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection [J]. *Atmospheric Environment*, 40: S299–S311
- Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al.* 2009. Characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} samples in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 92: 434–442
- Gnauk T, Müller K, Pinxteren D V, *et al.* 2008. Size-segregated particulate chemical composition in Xinken, Pearl River Delta, China: OC/EC and organic compounds [J]. *Atmospheric Environment*, 42: 6296–6309
- Hays M D, Fine P M, Geron C D, *et al.* 2005. Opening burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of Particle-phase emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 39: 6747–6764
- He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* 2001. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 35: 4959–4970
- Ho K F, Lee S C, Cao J J, *et al.* 2006. Variability of organic and elemental carbon, water soluble organic carbon, and isotopes in Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6: 4569–4576
- Jacobson M Z. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 409: 695–697
- Pathak R K, Wang T, Ho K F, *et al.* 2011. Characteristics of summertime PM_{2.5} organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC) [J]. *Atmospheric Environment*, 45: 318–325
- Park S S, Cho S Y. 2011. Tracking sources and behaviors of water-soluble organic carbon in fine particulate matter measured at an urban site in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 45: 60–72
- Schichtel B A, Malm W C, Bench G, *et al.* 2008. Fossil and contemporary fine particulate carbon fractions at 12 rural and urban sites in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 113, D02311, doi: 10.1029/2007JD008605
- Shen Z X, Arimoto R, Cao J J, *et al.* 2009. Seasonal variations and evidence for the effectiveness of pollution controls on water-soluble inorganic species in total suspended particulates and fine particulate matter from Xi'an, China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58: 1560–1570
- Simoneit B R T, Kobayashi M, Mochida M, *et al.* 2004. Composition and major sources of organic compounds of aerosol particulate matter sampled during the ACE-Asia campaign [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109, D19S10. doi: 10.1029/2004JD004598
- Tao J, Ho K F, Chen L G, *et al.* 2009. Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. *Particuology*, 7: 68–75
- 陶俊 张仁健 许振成, 等. 2009. 广州冬季大气消光系数贡献研究 [J]. *气候与环境研究*, 14(5): 484–490
- Tao J, Zhang R J, Xu Z C, *et al.* 2009. Contribution factors of ambient light extinction coefficient in the winter of Guangzhou [J]. *Climatic and Environmental Research*, 14(5): 484–490 (in Chinese)
- Turpin B J, Huntzicker J J. 1991. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles Basin: A descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 25A (2): 207–215
- 王淑兰 柴发合 张远航, 等. 2004. 成都市大气颗粒物污染特征及其来源分析 [J]. *地理科学*, 24(4): 488–492
- Wang S L, Chai F H, Zhang Y H, *et al.* 2004. Analysis on the sources and characters of particles in Chengdu [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(4): 488–492 (in Chinese)
- Viana M, Maenhaut W, Brink H M, *et al.* 2007. Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 5972–5983
- Watson J G. 2002. Visibility: science and regulation [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52: 628–713
- Yang H, Yu J Z, Ho S S H, *et al.* 2005. The chemical composition of inorganic and carbonaceous materials in PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 39: 3735–3749
- Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* 2003. Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 499–510
- 朱李华 陶俊 张仁健, 等. 2010. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O₃ 和气象条件的关联 [J]. *环境科学学报*, 30(10): 1942–1949
- Zhu L H, Tao J, Zhang R J, *et al.* 2010. Characteristics of the carbonaceous aerosol in PM_{2.5} and its relation to O₃ and meteorological conditions in the urban Guangzhou area in winter and summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(10): 1942–1949 (in Chinese)
- Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* 2007. Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 19: 167–175
- Zhang Z S, Engling G, Lin C Y, *et al.* 2010. Chemical speciation, transport and contribution of biomass burning smoke to ambient aerosol in Guangzhou, a mega city of China [J]. *Atmospheric Environment*, 44: 3187–3195
- Zhang T, Claeys M, Cachier H, *et al.* 2008. Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker [J]. *Atmospheric Environment*, 42: 7013–7021