

文章编号:2095-6134(2015)04-0490-08

兰州大气细颗粒物中有机碳与元素碳的污染特征^{*}

李英红^{1,2}, 段菁春³, 郑乃嘉², 谭吉华^{2,4†}, 饶志国¹, 马永亮⁴, 贺克斌⁴

(1 兰州大学 西部环境教育部重点实验室/西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000;

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3 中国环境科学研究院 环境基准与

风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

(2014 年 8 月 14 日收稿; 2015 年 1 月 2 日收修改稿)

Li Y H, Duan J C, Zheng N J, et al. Characteristics of organic and element carbon in fine particles in Lanzhou[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(4):490-497.

摘 要 采集兰州冬季采暖期及夏季 PM_{2.5} 样品共 60 个, 通过 DRI 测定有机碳(OC)和元素碳(EC). 结果显示: 冬季 OC 和 EC 平均质量浓度分别为 (35.39 ± 13.88) μg/m³ 和 (13.80 ± 5.41) μg/m³, 夏季分别为 (9.74 ± 3.30) μg/m³ 和 (4.44 ± 2.00) μg/m³, 冬季污染远高于夏季. 冬夏季 OC 和 EC 相关系数分别为 0.91 和 0.76, 表明冬季兰州 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的来源相似. 二次有机碳质量浓度冬夏季分别为 (8.48 ± 6.10) μg/m³ 和 (3.07 ± 2.20) μg/m³, 约占 OC 含量的 (22.46 ± 11.93)% 和 (31.29 ± 18.51)%, 表明兰州冬夏季 PM_{2.5} 中 OC 的来源均以一次排放为主, 夏季二次源贡献高于冬季. 对 8 种不同温度段碳质组分分析表明, 兰州冬季生物质燃烧较夏季有所增加, 夏季可能主要为机动车尾气.

关键词 PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 二次有机碳; 季节变化

中图分类号: X513 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2015.04.010

Characteristics of organic and element carbon in fine particles in Lanzhou

LI Yinghong^{1,2}, DUAN Jingchun³, ZHENG Naijia², TAN Jihua^{2,4}, RAO Zhiguo¹, MA Yongliang⁴, HE Kebin⁴

(1 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems(MOE), Research School of Arid Environment & Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4 State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A total of 60 PM_{2.5} samples were collected during winter and summer seasons in Lanzhou city. OC and EC were measured by the thermal/optical method using DRI-2001A. The results indicated that carbonaceous aerosol in winter was significantly higher than that in summer. The average concentrations of OC and EC were (35.39 ± 13.88) μg/m³ and (13.80 ± 5.41) μg/m³ in winter and (9.74 ± 3.30) μg/m³ and (4.44 ± 2.00) μg/m³ in summer, respectively. The

^{*} 国家自然科学基金(41475116,41275134)、国家环境保护大气复合污染源与控制重点实验室基金(SCAPC201401)和中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012ysky09)资助
[†] 通信作者, E-mail: tanjh@ucas.ac.cn

correlation between OC and EC was 0.91 in winter and 0.76 in summer, which revealed that OC and EC had similar sources. The concentrations of SOC were $(8.48 \pm 6.10) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $(3.07 \pm 2.20) \mu\text{g}/\text{m}^3$ in winter and summer, and they were about $(22.46 \pm 11.93)\%$ and $(31.29 \pm 18.51)\%$ of OC in $\text{PM}_{2.5}$, respectively, which manifested that OC was mainly from primary sources and the contribution of secondary transformation was higher in summer than in winter. Analysis on the eight fractions of carbonaceous aerosol within the different temperature ranges showed that biomass burning had a high contribution for carbonaceous aerosol in $\text{PM}_{2.5}$ in winter, but vehicle emissions might be the major source in summer.

Key words $\text{PM}_{2.5}$; OC; EC; SOC; seasonal variation

大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)不仅降低城市大气能见度,直接改变能量收支平衡,还危害人类健康,其污染成为国内外城市面临的重要环境问题^[1-2]. 在城市地区,碳质组分是 $\text{PM}_{2.5}$ 中最重要的组分之一,主要由有机碳(OC)和元素碳(EC)组成. 其中EC主要来源于不完全燃烧,因其良好的稳定性,常作为一次源排放的示踪物;OC既有直接排放的一次有机碳(POC),也有经过反应生成的二次有机碳(SOC). 碳质组分因其直接和间接辐射强迫以及对人体健康的影响而引起人们的广泛关注^[3-4].

兰州市是中国西北地区重要的工业城市,其污染物排放量大,再加上接近封闭的特殊山谷盆地地形,形成了风速较小、静风天气较多的气候特点^[5-6],导致大气污染物不易扩散,成为空气污染较严重的城市之一,冬季尤为严重. 虽然研究者对兰州 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质气溶胶的研究越来越重视^[7-8],但相较于其他城市开展得较晚,成果还比较少. 本研究连续采集兰州市冬夏两季 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,对比分析冬季和夏季兰州OC和EC的污染特征,旨在为制定兰州大气污染控制对策提供基础数据与技术支持.

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

采样时间2012年12月1日—30日和2013年6月23日—7月25日,冬季采样为采暖期. 样品从上午9时到次日9时,采样持续时间约24 h. 采样点位于兰州市环保局5楼楼顶,离地高度约15 m,周围是居民楼和商业区,附近没有明显的工业区以及局地污染源,能较好地代表兰州市平均污染状况. 采样仪器为TE-6070大流量($1.13 \text{ m}^3/\text{min}$)采样器,采样前对仪器流量进行校正,并

对 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头进行清洗. 采样滤膜为石英滤膜,采样前用铝箔纸包裹放置在马弗炉中,于 480°C 高温下灼烧4 h以除去滤膜上残留的有机物. 共收集样品冬夏季各30个,共60个,并采取避光密封低温保存.

1.2 样品分析

$\text{PM}_{2.5}$ 中的OC和EC浓度由美国沙漠所DRI Model 2001A热/光碳分析仪测得. 该仪器测试原理详见文献[9]. 每天样品分析前后均采用标准气体进行校正,每10个样品中随机抽出1个进行平行分析,二者TC的相对偏差均 $<3\%$,符合分析质量控制标准,说明数据比较可靠.

1.3 气象数据

气象数据采用“wunderground”(http://www.wunderground.com/)甘肃省兰州市标准地面气象站每隔1 h的地面气象观测数据. 采样期间,冬季平均温度为 -7.6°C ,平均相对湿度为 64.9% ,风向以北风、东北风为主;夏季平均温度为 19.6°C ,平均相对湿度为 62.9% ,主导风向不明确.

2 结果与讨论

2.1 OC和EC的浓度水平

表1为冬季和夏季兰州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中OC与EC的平均质量浓度,并列出国内其他城市相对应观测期内大气OC和EC的质量浓度. 兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中OC和EC浓度冬季分别为 $(35.39 \pm 13.88) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(13.80 \pm 5.41) \mu\text{g}/\text{m}^3$,夏季分别为 $(9.74 \pm 3.30) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(4.44 \pm 2.00) \mu\text{g}/\text{m}^3$. 与同地区其他研究相比^[8,15],本研究冬季和夏季OC和EC浓度均有升高,然而OC/EC比值基本一致. 与国内其他城市相比,兰州 $\text{PM}_{2.5}$ 中OC与EC的值冬季略低于西安,略高于乌鲁木齐,远高

于北京、上海和广州. 夏季远低于西安和广州, 高于北京、上海和乌鲁木齐. OC/EC 值冬夏季均低于国内其他地区. 相比国内其他城市而言, 兰州市大气碳质组分污染程度较高.

由表 1 可以看出, 兰州市冬季大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的质量浓度明显高于夏季, 冬季浓度分

别是夏季的 3.6 倍和 3.1 倍, 这可能与冬夏季污染源和气象条件有关. 冬季由于集中供暖燃煤源排放, 使得排放总量很高, 再加上冬季逆温现象明显强于夏季, 在特殊地形条件下污染物更不易扩散, 加剧了冬季的污染程度. 而降水却集中分布在夏季, 降水的冲刷作用使夏季污染程度减弱.

表 1 兰州市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的质量浓度与其他城市比较

Table1 Comparison of OC, EC and OC/EC in PM_{2.5} of Lanzhou with other cities

地名	采样时间	分析方法	OC/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC/EC
兰州	2012-12-01—2012-12-30	TOR	35.39 \pm 13.88 *	13.80 \pm 5.41	2.58 \pm 0.46
			10.52 ~ 59.51	4.29 ~ 24.48	1.95 ~ 4.43
兰州 ^[8]	2011-12-05—2011-12-12	TOR	22.71	7.48	2.95
北京 ^[10]	2011-12-01—2012-02-01	TOR	21.91 \pm 12.02	5.03 \pm 2.58	4.47
上海 ^[11]	2005-12—2006-02	TOT	16.7 \pm 8.4	2.3 \pm 1.0	6.8 \pm 1.7
广州 ^[12]	2008-01-01—2008-01-31	TOR	24.6 \pm 19.3	7.9 \pm 5.4	2.9 \pm 1.6
西安 ^[13]	2009-12-07—2009-12-13	TOR	38.33 \pm 2.93	7.26 \pm 1.20	5.36 \pm 0.56
	2010-1-11—2010-1-17				
乌鲁木齐 ^[14]	2011-01-02—2011-12	TOT	30.4 \pm 16.4	3.6 \pm 1.2	7.6
兰州	2013-06-23—2013-07-25	TOR	9.74 \pm 3.30 *	4.44 \pm 2.00	2.44 \pm 1.13
			3.13 ~ 17.24	1.54 ~ 8.36	1.50 ~ 7.19
兰州 ^[15]	2006-06-18—2006-07-27	TOR	6.6 \pm 2.9	2.9 \pm 1.4	2.5 \pm 0.8
北京 ^[15]	2005-06-29—2005-08-02	TOR	8.2 \pm 3.7	4.9 \pm 2.9	2.2 \pm 1.3
上海 ^[11]	2006-06—2006-08	TOT	7.2 \pm 5.6	1.9 \pm 0.6	3.4 \pm 1.5
广州 ^[12]	2008-07-01—2008-07-31	TOR	14.0 \pm 5.6	4.5 \pm 1.5	3.2 \pm 1.0
西安 ^[13]	2010-07-13—2010-07-21	TOR	14.63 \pm 1.34	4.13 \pm 0.62	3.58 \pm 0.38
	2010-08-16—2010-08-22				
乌鲁木齐 ^[14]	2011-06—2011-08	TOT	6.7 \pm 2.2	1.6 \pm 0.7	4.4

注: * 数值表示方法为平均值 \pm 标准偏差 (最小值 ~ 最大值).

2.2 OC 与 EC 的逐日变化规律

如图 1 所示, 采样期间 OC 和 EC 的质量浓度逐日变化趋势基本相同. 冬季碳质组分质量浓度较高, 波动幅度较大, 最高浓度出现在日均温度最

高、风速较小的天气, 最低浓度出现在降雪天气. 冬季降雪期间平均浓度为 (18.22 \pm 8.16) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 非降雪期间平均浓度为 (40.61 \pm 10.66) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 降雪对 OC、EC 的浓度逐日变化的影响最明显.

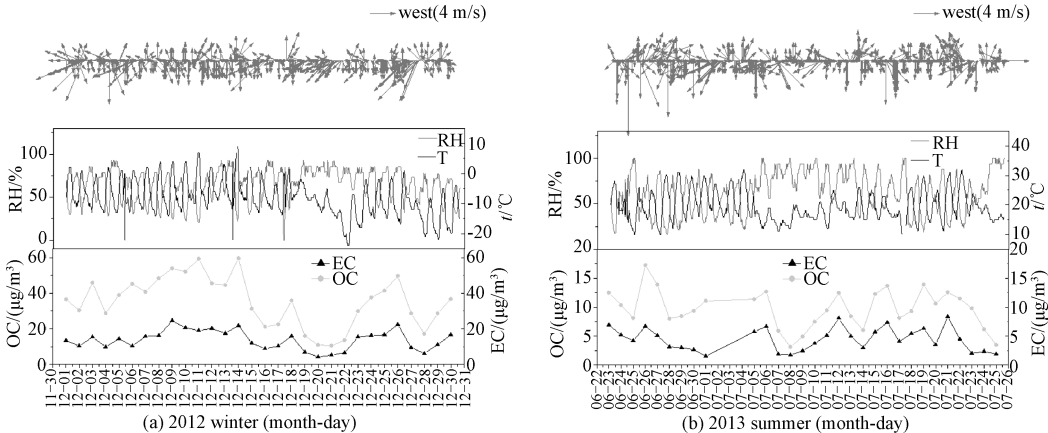


图 1 兰州市 PM_{2.5} 中 OC、EC 和气象参数的时间序列变化

Fig. 1 Time series of OC, EC, and meteorological parameters in atmospheric PM_{2.5} in Lanzhou

兰州市 2012 年 12 月 2 日、12 月 4 日、12 月 19—22 日及 12 月 28 日为降雪天气,OC 和 EC 质量浓度均呈下降趋势,且降雪时间越长,质量浓度越低。夏季碳质组分浓度较低,波动幅度小于冬季,最低值出现在连续降雨天气,最高值出现在风速较大的天气,夏季风速较大时,扬尘对大气颗粒物的贡献增加,兰州大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 质量浓度较高的天气,日均风速也较大,一般超过 5 km/h。此外夏季易受多种因素的影响,使碳质组分的浓度变化较复杂。

2.3 影响因素分析

温度、风速及相对湿度对 OC 和 EC 的影响如图 2 所示,冬季大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的质量浓度与日均温度成正相关,相关系数分别为 0.61 和 0.47,夏季相关性较小,相关系数小于 0.35,温度与 OC 的相关性大于 EC。风速与 OC 和 EC 成负相关,相关性整体较弱,冬季相关系数分别为 0.36 和 0.45,夏季均小于 0.3,与温度相反,风速与 EC 相关性大于 OC。相对湿度与 OC 浓度大致成负相关,冬夏季相关系数分别为 -0.65 和 -0.56,说明相对

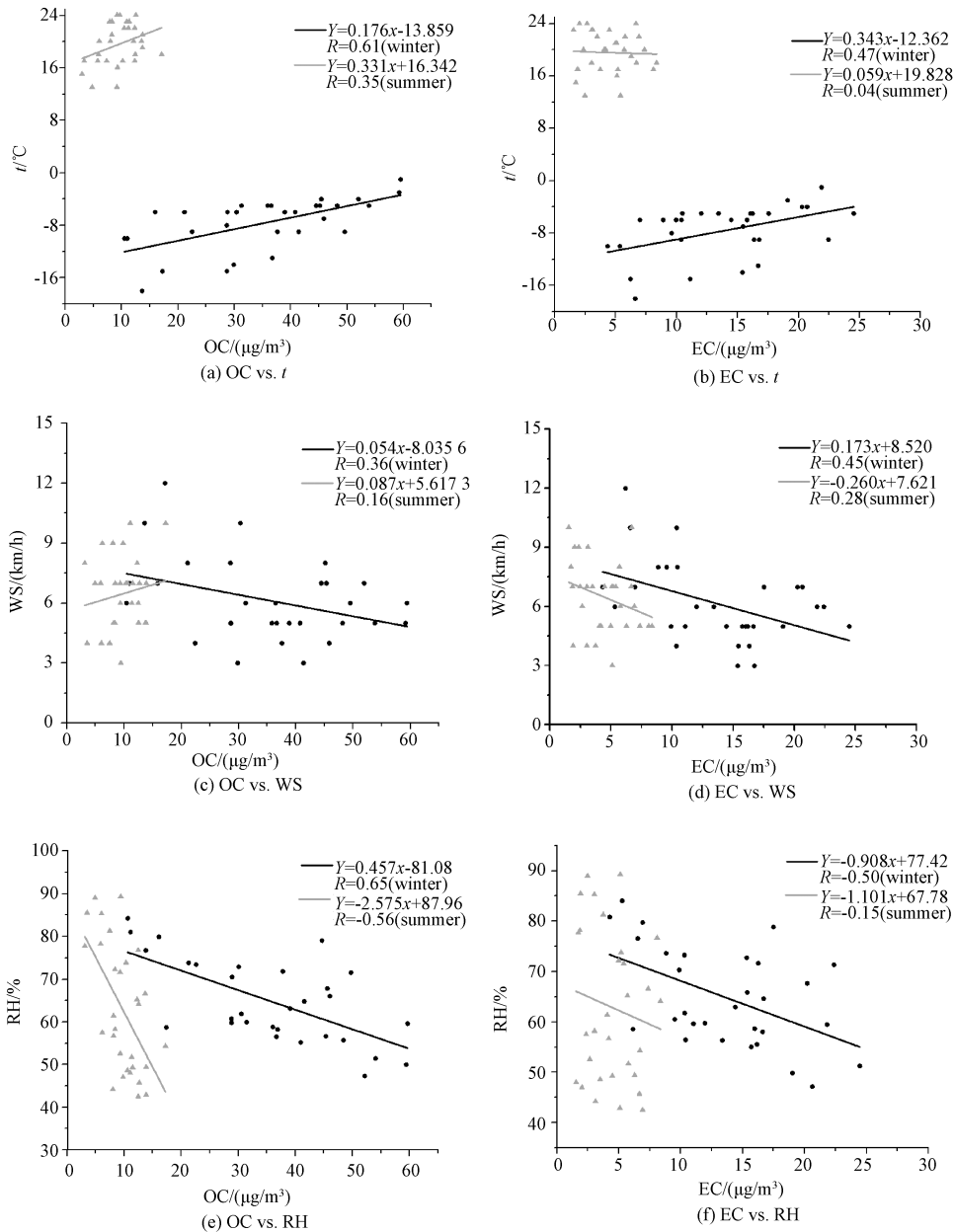


图2 兰州市冬夏季 OC、EC 和相对湿度 (RH)、日均温度 (t) 及日均风速 (WS) 的相关性
Fig.2 Correlations of OC and EC with RH, t , and WS during summer and winter in Lanzhou

湿度对 OC 质量浓度的影响较大,且冬季比夏季明显. 冬夏季 EC 浓度与相对湿度的相关性差异较大,冬季相关性明显,相关系数为 -0.5 ,而夏季相关系数仅为 -0.15 ,说明夏季相对湿度对 EC 质量浓度的影响很小. 在采样期间,不论是冬季还是夏季,相对湿度与 OC 的相关性均比与 EC 的相关性显著,说明相对湿度对 OC 质量浓度的影响较大.

结果表明,冬季碳质组分受温度、湿度和风速等的影响较大,且具有一定的相关性,尤其与相对湿度的相关性最强.

分别选取冬夏季碳质组分浓度先上升后下降的一周进行气团来向轨迹分析,采用后向轨迹算法,分析过去 24 h 的气团移动轨迹变化与碳质组分浓度变化的关系模式,结果如图 3 所示.

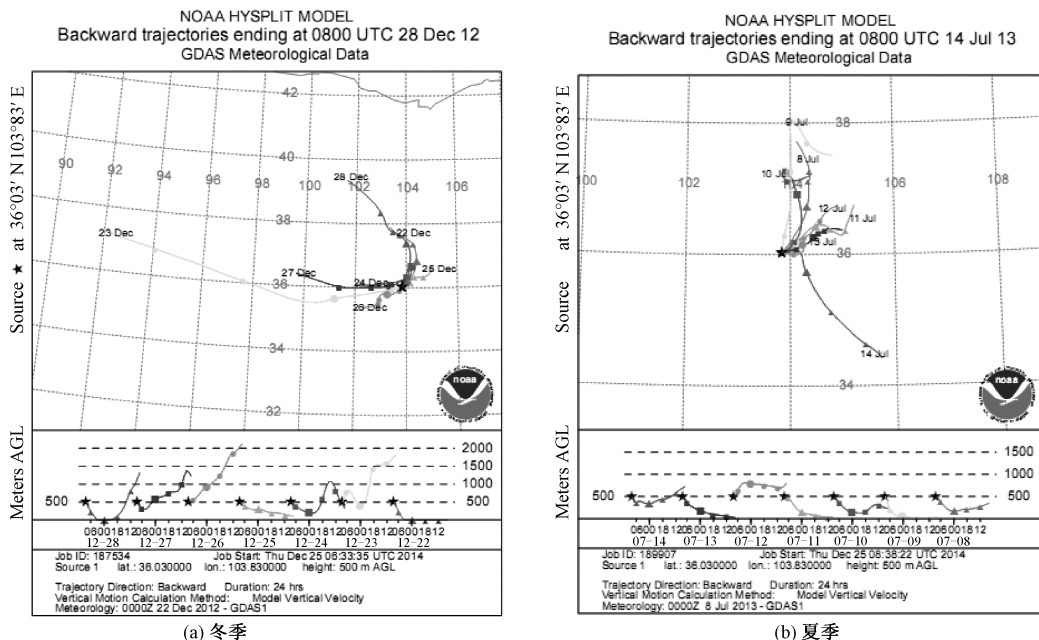


图 3 兰州市冬夏季代表性污染过程的气团后向轨迹图

Fig. 3 Backward trajectories of typical pollution process during summer and winter in Lanzhou

经过 12 月 19—22 日连续降雪后,兰州市冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分达到冬季的最小值. 23 日气团后向轨迹的走向和移动速度在 14 时发生了改变,气团由西偏北方向转为西偏南方向,运动速度不断减缓,污染物在兰州西偏南附近混合,到达兰州时,气团由上午的下沉运动变为水平输入,污染物在兰州汇聚,致使 23 日兰州 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分急剧上升. 24—26 日影响兰州的气团主要为短距离输送,移动速度相对缓慢,到达兰州的气团以水平和下沉方式输入,相应地,大气扩散条件较差,污染物浓度出现持续升高的趋势,至 26 日碳质组分浓度达到最大值. 27—28 日气团一般是经长距离的传输从东北方向吹来,移动速度较大,对兰州的大气有较强的稀释作用,加上 28 日降雪天气的冲刷,使兰州 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分浓度持续下降.

经过 7 月 7—8 日连续降雨后,兰州市夏季大

气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分达到夏季的最小值. 8—10 日气团后向轨迹的走向由北方逐渐向东偏转,移动速度逐渐减缓,到达兰州时,气团以水平气流输送为主,污染物在兰州汇聚. 10—12 日影响兰州的气团以东北方向的短距离输送为主,移动速度缓慢,到达兰州的气团主要以水平方式输入,大气扩散条件较差,污染物浓度出现持续升高的趋势,至 12 日碳质组分达到最大值. 13—14 日气团逐渐向东南偏转,移动速度变大,污染物得到有利扩散,加上 14 日前后降雨的作用,使兰州 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分呈下降趋势.

2.4 相关性来源分析

OC 和 EC 的主要来源有机动车尾气排放、燃煤和生物质燃烧. Turpin 等^[16]认为,通过研究 OC 和 EC 的相关关系可以识别碳质组分的来源:如 OC 和 EC 相关性较好,表明 OC 和 EC 来自于相同的污染源. 因此 OC 和 EC 的相关性可以在一

定程度上对碳气溶胶的来源进行定性分析. 本研究对 OC 和 EC 做线性回归曲线,结果如图 4 所示,冬季 OC 和 EC 的相关性较好,相关系数高达 0.91,表明冬季 OC 和 EC 存在相似来源. 夏季 OC 和 EC 也具有明显的正相关关系,但相关系数较低,为 0.76,表明夏季兰州大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 来源比冬季复杂. 由于夏季来自城区燃煤的贡献较小,再加上夏季二次光化学反应加剧、降水过程对 OC 和 EC 的去除,导致夏季污染源相对复杂.

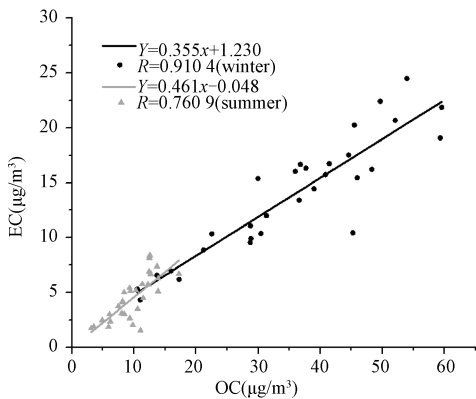


图4 兰州市冬夏季 OC 和 EC 的相关性

Fig.4 Correlation between OC and EC during summer and winter in Lanzhou

2.5 二次有机碳

大气 PM_{2.5} 中的碳质组分来源复杂,主要包括一次来源和经光化学转化的二次来源,OC/EC 常用来分析碳质气溶胶的排放和转化特征. 研究表明,当 OC/EC 为 1.0~4.2 时主要有柴油和汽油车尾气排放^[17-18],当比值为 16.8~40.0 时主要有生物质燃烧排放^[19],当比值为 2.5~10.5 时主要为燃煤源排放^[20],当比值为 12.7 左右主要为家庭天然气燃烧排放^[21]. 兰州市冬季 OC/EC 范围是 1.95~4.34,平均值为 (2.58±0.46),夏季 OC/EC 范围是 1.50~7.19,平均值是 (2.44±1.13). OC/EC 在冬季相对稳定,变化幅度较小,而在夏季有较强烈的变化,并且冬季均值高于夏季.

OC/EC 也常用来分析大气 PM_{2.5} 中的二次来源,这对控制有机物的污染有重要意义^[22]. 如果 OC/EC>2 说明有 SOC 的存在^[23],由表 1 可知,兰州市冬季和夏季均有 SOC 存在. SOC 的估算采用 Castro 等的经验公式,通过 OC/EC 最小比值

法可以粗略估算其含量^[24],公式为

$$SOC = OC - EC \times (OC/EC)_{\min},$$

式中,SOC 为二次有机碳的质量浓度,OC 和 EC 分别为质量浓度,(OC/EC)_{min} 为采样期间 OC/EC 的最小值. 计算表明,兰州市大气 PM_{2.5} 中冬季 SOC 值为 (8.48±6.10) µg/m³,约占 OC 含量的 (22.46±11.93)%,表明冬季由于气温及光照较低导致大气中 SOC 的生成较少,含量较低. 夏季 SOC 值为 (3.07±2.20) µg/m³,约占 OC 含量的 (31.29±18.51)%,表明夏季虽然 OC 的绝对质量浓度较低,但是由于夏季温度较高,光照充足,有利于 SOC 的生成,导致大气中 SOC 在总 OC 中的比例明显增大.

2.6 不同温度段碳组分分析

一般将 OC 定义为 OC₁+OC₂+OC₃+OC₄+OPC;EC 定义为 EC₁+EC₂+EC₃-OPC. 不同温度段碳质组分的丰度表现出一定的源成分谱特征. 研究认为 OC₁ 和 OPC 是生物质燃烧中最丰富的碳组分^[25],OC₂、OC₃、OC₄ 和 EC₁ 可能是燃煤和机动车尾气排放物中最丰富的碳组分^[25],EC₁ 主要代表汽油车尾气的贡献,而 EC₂ 和 EC₃ 则主要表示柴油车尾气的贡献^[26-27].

兰州市大气 PM_{2.5} 中 8 个碳组分的质量分数,OC₁、OC₂、OC₃、OC₄、EC₁、EC₂、EC₃ 和 OPC 占的比例,冬季分别是 (16.88±4.65)%、(11.35±1.27)%、(14.10±3.68)%、(12.78±6.27)%、(26.21±4.28)%、(1.70±0.87)%、(0.54±0.31)%、(16.44±6.29)%,夏季分别是 (4.45±2.37)%、(18.35±3.86)%、(24.83±3.49)%、(17.60±4.66)%、(29.01±6.84)%、(1.76±0.81)%、(0.16±0.38)%、(3.86±3.35)%. 冬季 EC₁ 含量最高,OC₁ 含量次之,夏季 EC₁ 含量最高,OC₃ 含量次之. 其中 (OC₁、OPC) 的贡献率冬季为 33.32%,夏季为 8.31%. (OC₂、OC₃、OC₄ 和 EC₁) 的贡献率冬季为 64.44%,夏季占 89.78%. EC₁ 的贡献率冬季为 26.21%,夏季为 29.01%. (EC₂、EC₃) 的贡献率冬季为 2.24%,夏季为 1.92%. 冬季生物质燃烧排放源较夏季贡献增大. 不论是在冬季还是夏季,机动车汽车尾气污染贡献都较大,是兰州大气 PM_{2.5} 的主要污染源. 此外冬季采暖期取暖燃煤排放的贡献也不能忽视.

3 结论

1) $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 的质量浓度冬季污染程度明显高于夏季。相比国内其他城市而言,兰州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染程度较高。冬季降雪对 OC 和 EC 质量浓度逐日变化的影响最为明显。冬季碳质组分的质量浓度与相对湿度的相关性最强。长距离输送,移动速度较大的气团有助于污染物的有效扩散。

2) 冬季 OC 和 EC 的相关性较高,相关系数高达 0.91,表明冬季兰州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 有相似来源。夏季 OC 和 EC 也具有明显的正相关关系,但相关系数较低,为 0.76,说明夏季兰州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 的来源比冬季复杂。

3) 冬季 OC/EC 的平均值为 (2.58 ± 0.46) , SOC 值为 $(8.48 \pm 6.10) \mu\text{g}/\text{m}^3$,约占 OC 含量的 $(22.46 \pm 11.93)\%$,夏季 OC/EC 的平均值为 (2.44 ± 1.13) , SOC 值为 $(3.07 \pm 2.20) \mu\text{g}/\text{m}^3$,约占 OC 含量的 $(31.29 \pm 18.51)\%$ 。表明兰州市冬季和夏季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 的来源均以一次污染源为主,夏季比冬季容易发生大气光化学反应,二次污染源的贡献增强。

4) 对 8 种碳组分的分析结果表明,兰州市城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染来源冬季可能主要是燃煤排放、机动车尾气,生物质燃烧比夏季增加。

参考文献

- [1] Muyzer G, De Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA[J]. Applied and environmental microbiology, 1993, 59(3): 695-700.
- [2] 谭吉华, 段青春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 145-155.
- [3] Kim Y P, Moon K C, Hoon Lee J. Organic and elemental carbon in fine particles at Kosan, Korea [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(20): 3309-3317.
- [4] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 181-188.
- [5] 杨德保, 王式功. 兰州市区大气污染与气象条件的关系 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1994, 30(1): 132-136.
- [6] 孙旭映, 尉元明, 庞朝云, 等. 兰州城区大气污染物分布特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 18(6): 15-18.
- [7] 张磊, 张镭, 张丁玲, 等. 兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1248-1255.
- [8] 李刚, 石广玉, 李宏宇, 等. 冬季兰州城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染特征 [J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 439-443.
- [9] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. 环境科学, 2011, 32(2): 313-318.
- [10] 程水源, 刘超, 韩力慧, 等. 北京市采暖期 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳和元素碳的污染特征与来源解析 [J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(4): 586-591, 597.
- [11] Feng Y, Chen Y, Guo H, et al. Characteristics of organic and elemental carbon in $\text{PM}_{2.5}$ samples in Shanghai, China [J]. Atmospheric Research, 2009, 92: 434-442.
- [12] 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_3 和气象条件的关联 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 1942-1949.
- [13] 张承中, 丁超, 周变红, 等. 西安市冬夏两季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染特征分析 [J]. 环境工程学报, 2013, 04: 1477-1481.
- [14] 热比古丽·达木拉, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 等. 乌鲁木齐市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中有机碳、元素碳的粒径分布及季节性分布 [C]. // 第十一届全国气溶胶会议暨第十届海峡两岸气溶胶技术研讨会论文集. 2013: 367-380.
- [15] Pathak R K, Wang T, Ho K F, et al. Characteristics of summertime $\text{PM}_{2.5}$ organic and elemental carbon in four major Chinese cities: implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC) [J]. Atmosphere Environment, 2011, 45: 318-325.
- [16] 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.
- [17] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C1 through C30 organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(10): 1578-1587.
- [18] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6): 1169-1180.
- [19] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29 organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(9): 1716-1728.
- [20] Chen Y, Zhi G, Feng Y, et al. Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential

raw; coal combustion in China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(20): L20815.

[21] 王广华, 位楠楠, 刘卫, 等. 上海市大气颗粒物中有机碳(OC)与元素碳(EC)的粒径分布 [J]. 环境科学, 2010, 31(9): 1 993-2 001.

[22] 谭吉华, 赵金平, 段青春, 等. 广州典型灰霾期有机碳和元素碳的污染特征 [J]. 环境污染与防治, 2009, 31(3): 105-108.

[23] Chow J C, Watson J G, Lu Z, et al. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQAS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2 079-2 112.

[24] 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): 2 771-2 781.

[25] 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 Air Qual Res, 2006, 6(2): 106-122.

[26] Gu J, Bai Z, Liu A, et al. Characterization of atmospheric organic carbon and element carbon of PM_{2.5} and PM₁₀ at Tianjin, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2010, 10:167-176.

[27] 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):1 460-1 466.