

石家庄市大气颗粒物中有机碳和元素碳的季节变化特征

姜建彪, 常青, 冯媛, 罗毅, 李治国
(石家庄市环境监测中心, 河北 石家庄 050022)

摘要: 为了解石家庄市大气颗粒物中有机碳和元素碳的季节变化特征, 对春、夏、秋、冬四季采集的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 样品中的有机碳(OC)和元素碳(EC)进行了分析。结果表明, 石家庄市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染严重; PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 $\rho(OC)$ 和 $\rho(EC)$ 季节变化特征均为夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季。冬季 PM_{10} 中 $\rho(OC)$ 和 $\rho(EC)$ 分别为 42.85 和 $8.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $PM_{2.5}$ 中 $\rho(OC)$ 和 $\rho(EC)$ 分别为 41.2 和 $8.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $PM_{2.5}$ 中 EC 占比最高为 3.9% , EC 更容易在 $PM_{2.5}$ 中富集; 在四个季节中, 冬季 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 $\rho(OC)/\rho(EC)$ 为最高, 分别为 4.83 和 4.80 , 冬季取暖用燃煤加重了 OC、EC 的污染。冬季 PM_{10} 中二次有机碳 $\rho(SOC)$ 为 $20.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 中 $\rho(SOC)$ 为 $23.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

关键词: 石家庄; 可吸收颗粒物; 可入肺颗粒物; 有机碳; 元素碳; 污染特征
中图分类号: X83 **文献标志码:** B **文章编号:** 1674-6732(2017)02-0041-05

Seasonal Variation of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Shijiazhuang

JIANG Jian-biao, CHANG Qing, FENG Yuan, LUO Yi, LI Zhi-guo
(Shijiazhuang Environmental Monitoring Center, Shijiazhuang, Hebei 050022, China)

Abstract: In order to find out the seasonal variation characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in atmospheric particulate matter in Shijiazhuang, the PM_{10} and $PM_{2.5}$ samples were collected and analyzed. The results show that the PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution is serious in Shijiazhuang. The seasonal variation characteristics of OC and EC in PM_{10} and $PM_{2.5}$ both ranked in the order of summer < spring < autumn < winter. The concentration of OC and EC in PM_{10} in winter was 42.85 and $8.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, while in $PM_{2.5}$, 41.2 and $8.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. EC accounted for 3.9% at most in $PM_{2.5}$, which showed that EC is apt to be concentrated in $PM_{2.5}$. In winter, the value of $\rho(OC)/\rho(EC)$ in PM_{10} and $PM_{2.5}$ both reached to the highest, 4.83 and 4.80 respectively. The fire coal for heating in winter increased pollution of OC and EC. In winter, the concentration of SOC in PM_{10} was $20.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and the concentration of SOC in $PM_{2.5}$ was $23.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Key words: Shijiazhang; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; OC; EC; Pollution characteristic

大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总和^[1]。大气气溶胶的重要成分之一就是碳颗粒物,而在碳颗粒物中质量浓度含量最高的就是有机碳(OC)和元素碳(EC),大约占 ρ (气溶胶)的 $10\% \sim 50\%$ ^[2]。OC 对光具有散射作用,EC 对光则具有吸收作用,在两者的共同作用下可以达到消光作用,从而降低雾霾天的能见度^[3]。OC 和 EC 的组分里也存在着大量的致癌物质和基因诱变物质,从而导致细颗粒物 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 对人体健康、大气能见度以及大气气候等多方面产生重要影响。姚振坤等^[4]对上海城区和浙江临安的大气颗粒物

$PM_{2.5}$ 样品进行了分析,结果表明,上海地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 主要是由烟尘、飞灰、矿物质组成;临安地区大气环境中的 $PM_{2.5}$ 主要为不规则形貌颗粒物。孟昭阳等^[5]对太原市冬季大气颗粒物中的 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 进行了研究分析,结果显示 $PM_{2.5}$ 日平均值为 $193.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\rho(OC)$ 和 $\rho(EC)$ 分别为 28.9 和 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

收稿日期: 2015-08-04; 修订日期: 2016-12-20
基金项目: 河北省科技计划基金资助项目(13273702D)
作者简介: 姜建彪(1980—),男,工程师,本科,主要研究方向为环境监测。

现对石家庄市 2013 年春、夏、秋、冬季 PM₁₀、PM_{2.5} 中 OC、EC 的污染特征进行分析,探究其可能来源,为有效治理大气颗粒物污染提供科学依据。

1 研究方法

1.1 采样点及采样时间

采样点位 6 个,分别为:化工学校、西北水源、西南高教、高新区、监测中心、职工医院。

春、夏、秋、冬每个季节有效采集天数为 9 d,每天采样 20 h。春、夏、秋、冬季采样时间分别为:2013 年 4 月 22 日—5 月 7 日、6 月 17 日—6 月 28 日、10 月 9 日—10 月 17 日、11 月 25 日—12 月 5 日。

1.2 材料与仪器

直径分别为 90 和 47 mm 的石英滤膜。TH 150 系列智能中流量大气采样器、TH-16A 四通道大气颗粒物采样仪、十万分之一的天平、DRI 2001A 型有机碳/元素碳(OC/EC)分析仪。

1.3 样品采集

采样前,石英滤膜要在高温环境下焙烤 2 h,在恒温室放置 24 h 直到重量基本不变为止,称重。称重后的石英滤膜在滤膜盒中保存。

采样后的滤膜从滤膜夹上取出,放入原本的滤膜盒中,带回实验室进行分析。分析前,将采集后的滤膜样品在恒温室放置 3 d 直到重量恒重,称重。称重后的样品滤膜放置在滤膜盒中,冷藏保存,待测。

1.4 质量控制和质量保证

(1) 为了减小实验的误差,在测量样品前,要先检查所采集的样品,去掉不符合标准的样品;(2) 截取石英滤膜用的切刀和取石英滤膜使用的镊子在使用之前都要用不含任何碳质的滤纸擦拭;(3) 为了确保碳分析仪中的各种气体流量在规定的范围内,定期清理仪器内部,去除系统中的杂质气体,确保仪器系统内部不会对 OC 和 EC 的分析结果造成影响。

2 结果分析

2.1 PM₁₀、PM_{2.5} 季节变化特征

采样期间,石家庄市大气中 PM₁₀、PM_{2.5} 的季节变化见图 1。由图 1 可见,PM₁₀ 的季节变化特征为夏季<秋季<冬季<春季;PM_{2.5} 的季节变化特征为夏季<秋季<春季<冬季,冬春季节污染重于夏秋季节。这是由于冬春季节北方取暖用燃煤大量

增加,污染加重。同时,冬春季节降雨偏少,空气扩散能力较弱,使得冬春季的污染重于夏秋季节。春季 PM₁₀ 污染重于冬季,有可能是由于春季多风,扬尘污染严重。

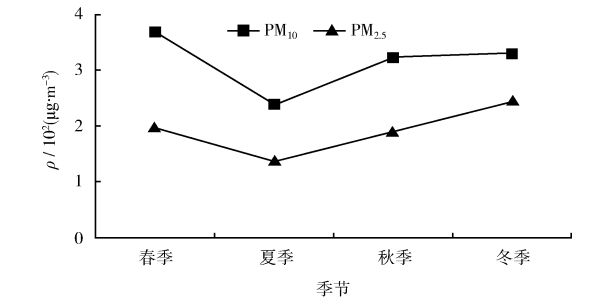


图 1 石家庄市 PM₁₀、PM_{2.5} 的季节变化

2.2 PM₁₀、PM_{2.5} 中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 的季节变化

石家庄市 PM₁₀、PM_{2.5} 中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 季节变化情况见表 1。由表 1 可见,PM₁₀、PM_{2.5} 中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 季节变化特征均为夏季<春季<秋季<冬季。夏季浓度最低,冬季浓度最高。石家庄市大气颗粒物的污染冬季最为严重,大气中颗粒物的浓度最高,从而造成 ρ(OC) 和 ρ(EC) 也相应最高。夏季大气污染较轻,大气中颗粒物的浓度最低,从而造成 ρ(OC) 和 ρ(EC) 也相应最低。PM₁₀、PM_{2.5} 中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 季节变化特征与 PM₁₀、PM_{2.5} 的季节变化特征并不完全相同。这是因为春季石家庄多风,扬尘污染加重,但扬尘中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 较低^[6],所以虽然春季 PM₁₀、PM_{2.5} 的污染严重,但是 OC、EC 的污染却轻于秋冬季节。

季节	表 1 石家庄市不同季节 PM ₁₀ 、PM _{2.5} 中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 变化 μg/m ³			
	PM ₁₀		PM _{2.5}	
	ρ(OC)	ρ(EC)	ρ(OC)	ρ(EC)
春季	15.73	5.64	11.11	5.52
夏季	8.86	3.61	5.80	2.48
秋季	27.78	7.38	23.53	7.27
冬季	42.85	8.88	41.20	8.59

2.3 PM₁₀、PM_{2.5} 中 OC、EC 占比的季节变化特征

石家庄市 PM₁₀、PM_{2.5} 中 OC、EC 占比的季节变化特征见图 2(a)(b)。

由图 2 可见,四季里 PM_{2.5} 中 OC、EC 占比均高于 PM₁₀ 中的 OC、EC 占比,说明 OC、EC 更易在小颗粒中聚集,与文献[6-10]研究结果相吻合。

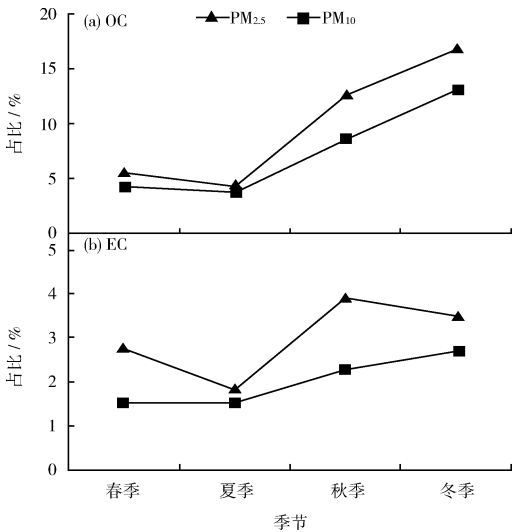


图2 石家庄市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 占比的季节变化特征

PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 OC 占比季节变化特征: 夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季。OC 在颗粒物中占比春夏季节较低, 秋冬季节有较大幅度的升高。说明不同季节, OC 的来源具有较大区别或者排放强度变化较大。冬季北方取暖用煤消耗大幅增加, 来自化石燃料的贡献加大, 排放强度大幅增加, 导致冬季 OC 的浓度变大。秋季浓度次之, 可能与秋季活跃的光化学反应有关, 光化学反应会生成二次有机碳。另外秋季秸秆焚烧时有发生, 对 OC 的污染有一定贡献, 从而造成 OC 的污染加重^[11-13]。

PM_{10} 中 EC 占比的季节变化特征是: 夏季 = 春季 < 秋季 < 冬季。夏季和春季相同, 较低, 秋季和冬季有一定幅度的升高。这说明夏季与春季引起 PM_{10} 中 EC 污染的排放源变化不大, 而秋冬季节引起 PM_{10} 中 EC 污染的排放源变化较大。 $PM_{2.5}$ 中 EC 占比的季节变化特征是: 夏季 < 春季 < 冬季 < 秋季。夏季最低, 秋季最高, 秋冬季节升高幅度较 PM_{10} 中 EC 升高幅度要大。EC 主要来自化石燃料和生物质的不完全燃烧^[14-15]。

造成 $PM_{2.5}$ 中 EC 的占比秋季高于冬季的原因有可能有两方面: 一是 EC 主要富集在超细粒子中, 因此 $PM_{2.5}$ 中的含量会更高。秋季北方农作物生产时, 存在一定的秸秆焚烧现象, 并且大部分燃烧并不完全, 会对 EC 有一定贡献, 燃烧源产生的颗粒对大粒径粒子贡献较小, 这有可能导致 EC 在 $PM_{2.5}$ 中占比有较大幅度的提高; 二是冬季雾霾天气较秋季更为频繁、严重, 在严重雾霾天气时, EC

的粒径分布与其他天气不同, 会向大粒径方向偏移^[16], 造成冬季 EC 在 PM_{10} 中的富集更多, 而在 $PM_{2.5}$ 中富集相对较少。

3 讨论

3.1 OC 和 EC 的来源分析

Turpin 等^[17]认为, 通过 OC 和 EC 的关系, 可识别碳气溶胶的来源。当 OC 和 EC 具有很好的线性时, 表明两者可能存在相似或者一致的排放源。石家庄市不同季节, OC 与 EC 的相关系数见表 2。

表 2 不同季节 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 之间的相关系数		
季节	PM_{10}	$PM_{2.5}$
春季	0.51	0.75
夏季	0.71	0.75
秋季	0.67	0.58
冬季	0.82	0.71

由表 2 可见, 夏冬季节, PM_{10} 中 OC、EC 的相关性均更好, $PM_{2.5}$ 则是春夏冬季相关性较好。这说明在夏季和冬季这 2 个时段, OC、EC 可能存在相同的排放源。文献[14]表明, 元素碳与有机碳混合颗粒主要来源于机动车尾气、燃煤与工业工艺源的排放, 结合石家庄的工业结构, 石家庄夏季 OC、EC 的主要来源可能是工业排放和机动车尾气, 而冬季主要来源可能是燃煤排放。春季 PM_{10} 中 OC、EC 的相关性不大, 而 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 的相关性较好, 说明石家庄市春季大气中 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 可能存在相同的排放源, 而 PM_{10} 中 OC、EC 的来源更复杂些。秋季大气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 中的 OC 与 EC 的相关性均不大, 来源不尽相同。

郑晓燕等^[18]通过研究发现, 1998 年秋收时段北京市发生重污染事件, 二次有机碳大量形成, 生物质燃烧是主要排放源之一。石家庄同处北方, 秋收季节秸秆焚烧时有发生。EC 在 $PM_{2.5}$ 中占比在四季中最高, 说明秋季 EC 具有较强的排放源, 原因可能是秸秆的不完全燃烧。石家庄市不同季节, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中的 $\rho(OC)/\rho(EC)$ 见表 3。

表 3 不同季节 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 $\rho(OC)/\rho(EC)$ 值		
季节	PM_{10}	$PM_{2.5}$
春季	2.79	2.01
夏季	2.45	2.34
秋季	3.76	3.24
冬季	4.83	4.80

由表3可见,石家庄PM₁₀与PM_{2.5}中的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 在相同季节时相差不大,总体上PM₁₀中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 要大于相应季节PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 。说明OC比EC更易在大颗粒物中富集。 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 为1.0~4.2,表明是汽车尾气排放,2.5~10.5表明是燃煤排放^[19-20]。春、夏、秋季,PM₁₀与PM_{2.5}中的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 为2.01~3.76,表明有汽车尾气排放的污染。而冬季 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 大幅攀升至4.8,说明冬季有来自燃煤的排放源。

四季PM₁₀、PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 为2.01~4.83。这表明石家庄市大气颗粒物中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 的特征符合机动车尾气和燃煤复合污染的特征。当 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC}) > 2$ 时,存在二次反应生成的有机碳^[21]。

石家庄市PM₁₀、PM_{2.5}中各个季节的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 均 >2 ,表明石家庄市大气颗粒物中存在二次有机碳(SOC)。

为了定量描述SOC的贡献率,Turpin等^[17]提出了经验公式:

$$\rho(\text{SOC}) = \rho(\text{OC}) - \rho(\text{EC}) \times [\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\min}$$

式中: $\rho(\text{SOC})$ ——二次有机碳的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
 $\rho(\text{OC})$ ——OC的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
 $\rho(\text{EC})$ ——EC的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
 $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\min}$ ——所观测到的所有样品

$\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 中的最小值。

石家庄市冬季PM₁₀中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 为2.47~7.92, $\rho(\text{OC})_{\text{平均}}$ 为42.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\rho(\text{EC})_{\text{平均}}$ 为8.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,通过计算得到PM₁₀中 $\rho(\text{SOC})_{\text{平均}}$ 为20.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,占OC的48.82%,占PM₁₀的6.36%。石家庄市冬季PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 为2.06~9.02, $\rho(\text{OC})_{\text{平均}}$ 为41.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\rho(\text{EC})_{\text{平均}}$ 为8.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,计算得PM_{2.5}中 $\rho(\text{SOC})_{\text{平均}}$ 为23.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,占OC的57.04%,占PM_{2.5}的9.60%。

3.2 石家庄市大气PM₁₀、PM_{2.5}中OC和EC占比与其他地区的比较

其他城市大气PM₁₀、PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 见表4。

由表1、表3、表4可见,石家庄市春季大气颗粒物PM₁₀、PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 比杭州和厦门的较高,秋季和冬季大气颗粒物PM₁₀、PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 比西安要低,与天津相当。其中夏季PM₁₀中 $\rho(\text{OC})$ 是厦门的2.36倍, $\rho(\text{EC})$ 是厦门的3.72倍;冬季PM₁₀中 $\rho(\text{OC})$ 是厦门的3.90倍, $\rho(\text{EC})$ 是厦门的2.84倍。这说明石家庄大气中存在着严重的OC、EC污染。

$\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 夏季时较其他城市要低,而冬季时与其他城市相差不大,表明石家庄夏季二次有机碳污染较其他城市要低,冬季与其他城市的相差不大。

表4 其他城市大气PM₁₀、PM_{2.5}中 $\rho(\text{OC})$ 、 $\rho(\text{EC})$ 和 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$

地区	颗粒物	采样时间	分析方法	$\rho(\text{OC})$ / $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho(\text{EC})$ / $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho(\text{OC})$ / $\rho(\text{EC})$
杭州 ^[22]	PM ₁₀	2001 年春	热光碳分析仪	14.03	2.96	4.74
		2001 年夏		13.54	2.82	4.80
		2001 年秋		23.64	4.38	5.40
		2001 年冬		23.28	4.43	5.26
天津 ^[23]	PM _{2.5}	2008 - 01 - 01—01 - 31	热光碳分析仪	30.7	7.9	3.89
	PM ₁₀			46.9	11.8	3.97
西安 ^[24]	PM _{2.5}	2003 - 09—2003 - 10	热分解光反射 (TOR)	34.1	11.3	3.02
	PM ₁₀			43.2	15.0	2.88
	PM _{2.5}	2003 - 11—2014 - 02		61.9	12.3	5.03
	PM ₁₀			93.0	22.7	4.10
厦门 ^[25]	PM ₁₀	2004 - 12		10.99	3.13	3.51
		2005 - 03		15.30	5.04	3.04
		2005 - 07		3.76	0.97	3.88

- 4 结论
- (1) 石家庄市大气颗粒物污染严重,PM₁₀、PM_{2.5}冬春季污染重于夏秋季。PM₁₀的季节变化特征
- 是:夏季<秋季<冬季<春季;PM_{2.5}的季节变化特征是:夏季<秋季<春季<冬季;
- (2) 石家庄市不同季节颗粒物中的 $\rho(\text{OC})$ 和

$\rho(\text{EC})$ 变化情况为: 夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季。其中 PM_{10} 中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 夏季最低分别为 8.86 , $3.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 冬季最高为 42.85 , $8.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 夏季最低分别为 5.80 , $2.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 冬季最高为 41.2 , $8.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$;

(3) 石家庄市不同季节颗粒物中的 OC、EC 占比变化情况与质量浓度变化情况不尽相同。 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 的占比的季节变化特征是: 夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季。 PM_{10} 中 EC 占比的季节变化特征是: 夏季 = 春季 < 秋季 < 冬季。 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC 占比的季节变化特征是: 夏季 < 春季 < 冬季 < 秋季;

(4) 从石家庄市大气颗粒物中 OC、EC 的污染特征来看, 石家庄市大气颗粒物中 OC、EC 来自工业排放、机动车尾气、燃煤及二次有机碳等。冬季取暖用燃煤的大量使用, 加重了石家庄市 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 的污染。秋季秸秆焚烧加重了 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC 的污染。

[参考文献]

- [1] 卢正永. 气溶胶科学引论[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 1-5.
- [2] SCHAUER J J, MADER B T, DEMINTER J T, et al. ACE-Asia inter-comparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon[J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37: 993-1001.
- [3] PRATSINIS S, NOVAKOV T, ELLIS E C, et al. The carbon containing component of the Los Angeles aerosol: source apportionment and contributions to the visibility budget[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1984, 34(6): 643-650.
- [4] 姚振坤, 冯满, 吕森林, 等. 上海城区和临安本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 的物化特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 289-295.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] CHEN S, LIAO S, JIAN W, et al. Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air[J]. Environment International, 1997, 23: 475-488.
- [8] TURPIN B J, SAXENA P, ALLEN G, et al. Characterization of the southwest Desert aerosol, Meadview, AZ[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1997, 47: 344-356.
- [9] 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: 1509-1517.
- [10] 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.
- [11] CA 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(3): 3127-3137.
- [12] 段卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2460-2467.
- [13] 张予燕, 陆晓波, 任兰, 等. 秸秆焚烧期间空气中细颗粒的组分特征[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(5): 38-41.
- [14] 杜娟, 张志朋, 宋韶华, 等. 桂林市细颗粒物部分典型排放源的粒径谱及成分分析[J]. 环境监控与预警, 2016, 8(5): 49-53.
- [15] 颜鹏, 鄯宁, 张养梅, 等. 北京乡村地区分粒径气溶胶 OC 及 EC 分析[J]. 应用气象学报, 2012, 23(3): 285-293.
- [16] 谭吉华, 段青春, 赵金平, 等. 广州市灰霾期间大气颗粒物中有机碳和元素碳的粒径分布[J]. 环境化学, 2009, 28(2): 267-271.
- [17] TURPIN B J, CARYR 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.
- [18] 郑晓燕, 刘咸德, 赵峰华, 等. 北京市大气颗粒物中生物质燃烧排放贡献的季节特征[J]. 中国科学, 2005, 35(4): 346-352.
- [19] SCHAUER J J, KLEEMAN M J, CASS G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources: 2. C_1 through C_{30} organic compounds from medium duty diesel trucks[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(10): 1578-1587.
- [20] SCHAUER J J, KLEEMAN M J, CASS G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources: 5. $\text{C}_1 - \text{C}_{32}$ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(6): 1169-1180.
- [21] CHOW J C, WASTON J G, LU Z Q, et al. Descriptive analysis of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2079-2112.
- [22] 焦荔, 祁国伟. 杭州 PM_{10} 中有机碳和元素碳变化特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 625-629.
- [23] 古金霞, 白志鹏, 刘爱霞, 等. 天津冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 中有机碳、元素碳的污染特征[J]. 环境污染与防治, 2009, 8(31): 88-91.
- [24] 曹军骥, 李顺诚, 李杨, 等. 2003 年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.
- [25] 王坚, 庄马展, 杨红斌, 等. 厦门市空气 PM_{10} 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境化学, 2006, 25(4): 518-519.