

# 广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究

黄欢<sup>1,2</sup>, 毕新慧<sup>1\*</sup>, 彭龙<sup>1,2</sup>, 王新明<sup>1</sup>, 盛国英<sup>1</sup>, 傅家谟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 主要对广州秋季(2014年9月)和冬季(2014年12月~2015年1月)大气PM<sub>2.5</sub>和不同粒径段颗粒物样品中水溶性有机碳(WSOC)的吸光性进行了研究. 结果表明, PM<sub>2.5</sub>上WSOC的光吸收波长指数(AAE<sub>abs</sub>)秋、冬季分别为3.72±0.41和3.91±0.70, 低于北京和北美地区测量结果. WSOC在365 nm波长的质量吸收效率(MAE)秋、冬季分别为0.52 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>和0.92 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, 两个季节具有明显的差异. 冬季WSOC的MAE值呈现随粒径增大而降低的趋势; 而秋季所有粒径段颗粒MAE<sub>WSOC</sub>都比冬季低, 特别是<0.95 μm粒径段颗粒降低得更多, 这表明秋季颗粒物中WSOC二次源的贡献更大一些, 而且主要是富集在亚微米级颗粒物上. 此外, 对比本研究以及文献中报道的元素碳(EC)和WSOC的MAE值, 可以发现在颗粒物受一次源排放影响较大的情况下, WSOC对于颗粒消光的贡献是不容忽视的.

**关键词:** 水溶性有机碳; 棕碳; 质量吸收效率; 光吸收; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0016-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.01.003

## Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou

HUANG Huan<sup>1,2</sup>, BI Xin-hui<sup>1\*</sup>, PENG Long<sup>1,2</sup>, WANG Xin-ming<sup>1</sup>, SHENG Guo-ying<sup>1</sup>, FU Jia-mo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Light absorption properties of water-soluble organic carbon (WSOC) were investigated in the urban area of Guangzhou. The fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and size-segregated samples were collected in September and December of 2014 and January of 2015. The variation of absorption with wavelength of WSOC was characterized by the absorption Ångström exponent (AAE<sub>abs</sub>). The AAE values of WSOC in PM<sub>2.5</sub> were 3.72±0.41 in autumn and 3.91±0.70 in winter, which were lower than those in Beijing and north America. The mass absorption efficiency (MAE) of WSOC at 365 nm wavelength was 0.52 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> in autumn and 0.92 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> in winter, exhibiting distinct variations between autumn and winter. In winter, the MAE<sub>WSOC</sub> values exhibited a decreasing trend with increasing particle size, and all size-segregated MAE<sub>WSOC</sub> values in autumn were lower than those in winter, particularly for the particles <0.95 μm, suggesting more contribution of the secondary formation to WSOC. Comparing the MAE values of elemental carbon (EC) and WSOC, it could be found that the contribution of WSOC to the light extinction of particles couldn't be ignored when the particles were mainly emitted from primary sources.

**Key words:** WSOC; brown carbon; mass absorption efficiency; light absorption; size distribution

近年来,有机气溶胶因其对能见度、区域及全球气候变化和人体健康有重要影响而受到广泛关注. 水溶性有机碳(WSOC)占气溶胶有机碳(OC)的20%~70%<sup>[1]</sup>. WSOC的来源比较广泛,机动车尾气排放、化石燃料和生物质燃烧被认为是WSOC的重要一次排放源<sup>[1~3]</sup>. 同时,大气光化学氧化过程和颗粒表面的多相化学反应也是WSOC的另一主要来源<sup>[4~6]</sup>. 不同地区由于环境及气候等因素往往造成WSOC的物理和化学性质出现明显差异.

棕碳是指具有吸光性的一类OC,其吸收光谱与波长的关系比黑碳(BC)更强. Chen等<sup>[7]</sup>研究发

现,棕碳在350 nm对于气溶胶总的光吸收贡献达到了20%~40%,说明在短波区内棕碳的光吸收贡献不容忽视. 传统的光学仪器很难将气溶胶中的BC和棕碳区分开,有研究用溶剂先把BC和棕碳分离,再对萃取液进行分析,这为棕碳吸光性的测定提供了新方法. 研究发现WSOC中有很多物质都具有吸光性,所以可用其进行棕碳性质的研究.

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020205); 广东省科技项目(2014B030301060)

作者简介: 黄欢(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶. E-mail: 1195146483@qq.com

\* 通讯联系人. E-mail: bixh@gig.ac.cn

近期一些研究报道 WSOC 的质量吸收效率 (MAE) 呈现明显的季节性差异. Hecobian 等<sup>[8]</sup> 在美国东南部 15 个地区采集了 PM<sub>2.5</sub> 样品, 研究发现其 MAE<sub>WSOC</sub> 值均为冬季远高于夏季. 而 Cheng 等<sup>[9]</sup> 在亚洲东部城市的研究亦得到类似的结果. 目前对于 MAE<sub>WSOC</sub> 粒径分布的研究较少. 粒径分布特征是影响有机物在大气中干、湿沉降、迁移和化学转化等过程的重要因素之一. 不同粒径段的 WSOC 由于来源或者形成机制不同, 有可能造成其不同的光学性质.

广州地区气溶胶中 WSOC 含量较高且来源广泛<sup>[10]</sup>, 但其吸光性能的研究相对较少. 本研究通过分析广州城区秋、冬两季 PM<sub>2.5</sub> 和不同粒径段颗粒样品中 WSOC 的 MAE 值, 并结合在线痕量气体数据, 探讨引起 MAE<sub>WSOC</sub> 季节性变化的原因, 通过更加深入地认识广州市大气 PM<sub>2.5</sub> 的光学性质, 以期为深入研究灰霾的成因机制提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

采样地点设置在广州市天河区中国科学院广州地球化学研究所标本楼九楼楼顶 (40 m). 采样点距离高速公路 100 m (广园快速路). 本研究于 2014 年 9、12 月和 2015 年 1 月采集 PM<sub>2.5</sub> 样品和 4 个粒径段 (<0.49、0.49~0.95、0.95~1.5 和 1.5~3.0 μm) 的颗粒物样品, 每天采集一套样品, 每次连续采集 24 h, 共采集样品 125 个. 采样仪器为 Anderson PM<sub>2.5</sub> 和 Anderson SA235 大流量采样器 (流量均为 1.13 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>). 采样前将石英纤维滤膜 (QFFs, Whatman) 于 500℃ 下灼烧 4 h, 以除去残留碳和其它杂质. 采样后, 放入 -40℃ 冰柜中储存, 尽快完成所有分析. 将部分样品膜用 >18 MΩ·cm 超纯水超声萃取, 再用一次性注射器加上 0.45 μm 水系滤头进行过滤, 最终得到 WSOC 分析样品. 另有部分样品膜用于 OC 和元素碳 (EC) 分析.

### 1.2 OC/EC 和 WSOC 吸收波长指数的测定

本研究中 OC/EC 采用 Sunset Laboratory 热光碳分析仪 (TOT) 分析; WSOC 质量浓度用总有机碳分析仪 (TOC, Elementar, 德国) 分析; WSOC 的吸光系数测定主要是应用 Hecobian 等<sup>[8]</sup> 的方法. 将 WSOC 萃取液通过紫外分光光度计 (Helios UV-VIS, Thermo, 美国) 测定其紫外吸光系数, 即 Abs<sub>λ</sub>, 单位 Mm<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>.

WSOC 的吸光系数与波长有关, 二者的关系可用以下公式表达:

$$\text{Abs}_\lambda = K \times \lambda^{-\text{AAE}} \quad (1)$$

式中  $K$  是常数, AAE 是吸收波长指数. 根据公式 (1) 通过测定不同波长的 Abs<sub>λ</sub>, 之后对其进行对数函数的线性拟合即可得到 AAE 值. 本研究中, λ 选取 8 个波段: 300、330、365、390、420、450、480、500 nm. 其中 365 nm 波段 WSOC 的吸光系数用于下面 MAE 值的计算.

### 1.3 MAE 值测定

本研究中, WSOC 的 MAE 值 (单位: m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>) 可通过下面的公式计算:

$$\text{MAE}_{\text{WSOC}} = \text{Abs}_{365} / c_{\text{WSOC}} \quad (2)$$

式中, MAE<sub>WSOC</sub> 指的是 WSOC 在 365 nm 波长的质量吸收效率; c<sub>WSOC</sub> 是 WSOC 的浓度 (单位: μg·mL<sup>-1</sup>).

EC 的 MAE 值 (MAE<sub>EC</sub>) 主要根据 Cheng 等<sup>[9]</sup> 的方法计算得到:

$$\begin{aligned} \text{MAE} &= \frac{b_{\text{abs}}}{\text{EC}} = \frac{\text{ATN}}{\text{EC} \cdot C \cdot R(\text{ATN})} \times \frac{A}{V} \\ &= \frac{\text{ATN}}{\text{EC}_s \cdot C \cdot R(\text{ATN})} \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $b_{\text{abs}}$  为光吸收系数, EC 为颗粒物中元素碳质量浓度 (μg·m<sup>-3</sup>),  $C$  (散射效应系数) 和  $R(\text{ATN})$  (遮蔽效应系数) 是常数  $A$  和  $V$  分别为滤膜面积 (cm<sup>2</sup>) 和空气采样体积 (m<sup>3</sup>), 光衰减  $\text{ATN} = \ln(I_0/I) \times 100$  ( $I$  和  $I_0$  为分析前后的透射光强度), EC<sub>s</sub> 为热-光碳分析仪测定的单位滤膜面积上的元素碳质量 (μg·cm<sup>-2</sup>).

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 中 WSOC 光吸收 AAE 值

WSOC 的 AAE 值可通过公式 (1) 拟合指数曲线得到. 本研究测得的秋季和冬季 PM<sub>2.5</sub> 样品中 WSOC 的 AAE 值分别为 3.72 ± 0.41 和 3.91 ± 0.70. 洛杉矶地区气溶胶水萃取液 AAE 值大约 7.60<sup>[12]</sup>, 北京地区不同季节气溶胶水萃取液 AAE 值都在 5.80~11.70 范围内<sup>[11]</sup>, 美国东南部地区不同季节气溶胶水萃取液 AAE 值也均在 6.20~8.30 之间<sup>[8]</sup>, 印度德里地区测得 AAE 值为 5.10 ± 2.00<sup>[13]</sup>. 之前文献报道, 不同地区 PM<sub>2.5</sub> 样品中有有机酸类等 WSOC 的种类和含量存在一定差别<sup>[14~16]</sup>, 这可能是造成 AAE 值出现地区差异的重要原因. 一些源解析研究发现, 生物质燃烧排放的

类腐殖质物质水萃取液 AAE 值为  $7.10^{[17]}$ ; 大气氧化形成的新、老二次有机气溶胶 (SOA) 水萃取液的 AAE 值分别在 7.00 和 4.70 左右<sup>[18]</sup>; 受煤燃烧和生物质燃烧排放影响的气溶胶中 WSOC 的 AAE 值约为  $3.50^{[19]}$ ; 生物质燃烧排放颗粒物的 AAE 值约为  $2.00^{[20]}$ . 由此可见, 广州城区  $PM_{2.5}$  中 WSOC 的 AAE 值与煤燃烧、生物质燃烧排放以及老化的 SOA 相对接近, 表明这些可能是广州  $PM_{2.5}$  中 WSOC 的主要贡献者.

## 2.2 秋季和冬季 $PM_{2.5}$ 的 $MAE_{WSOC}$ 差异

图 1 为各地市区不同季节  $MAE_{WSOC}$  值. 根据报道北美地区和北京地区均为冬季  $MAE_{WSOC}$  值高于夏季<sup>[8, 21]</sup>. 本研究中, 广州地区秋季  $MAE_{WSOC}$  为  $0.52 m^2 \cdot g^{-1}$ , 冬季为  $0.92 m^2 \cdot g^{-1}$ , 两个季节存在明显的差异见图 1.

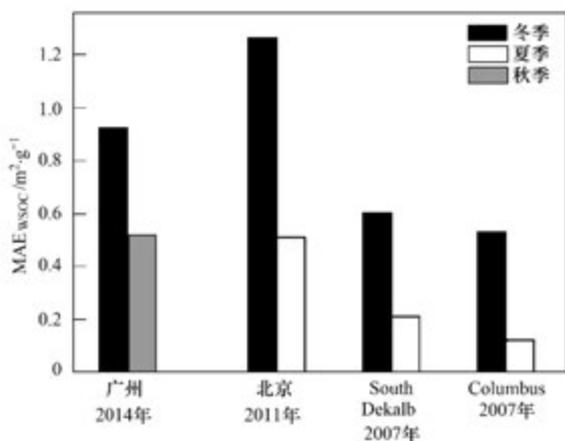
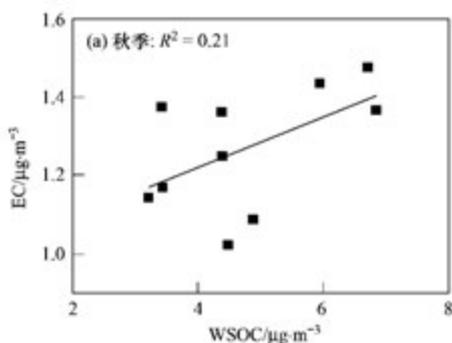


图 1 各地市区不同季节  $MAE_{WSOC}$  值

Fig. 1  $MAE_{WSOC}$  values in different seasons in different cities

有研究报道不同源排放 WSOC 的 MAE 值不同, 生物质燃烧源为  $1.19 m^2 \cdot g^{-1}$ , 柴油机车排放源为  $1.33 m^2 \cdot g^{-1}$ , 混合性一次源为  $2.89 m^2 \cdot g^{-1}$ ; 二次源影响比较大的地区  $MAE_{WSOC}$  要低很多, 例如北京受光化学氧化影响较大的地区,  $PM_{2.5}$  的  $MAE_{WSOC}$



仅为  $0.33 m^2 \cdot g^{-1}[11]$ . 这样, 本研究得到的秋季  $MAE_{WSOC}$  低于冬季, 可能说明秋季有更多二次形成的 WSOC. 图 2 是广州城区站点在线痕量气体季节平均浓度变化数据. 从中可知, 秋季  $O_3$  平均浓度较高, 这可能是因为广州秋季光照强度高, 大气光化学反应频繁, 大气中的前体有机物也比较多, 因此产生大量的  $O_3^{[22-24]}$ . 同样, 这阶段 WSOC 很可能受二次源影响较大; 冬季数据  $O_3$  平均浓度不高, 但是  $NO_x$ 、 $SO_2$  和  $PM_{2.5}$  浓度高. 秋冬季相比, WSOC 冬季一次源的贡献可能更大一些. 图 3 为  $PM_{2.5}$  中 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度的线性关系图. 从中可知, 秋季 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度相关性较低 ( $R^2 = 0.21$ ), 而冬季 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度相关性较高 ( $R^2 = 0.54$ ). 表明秋季 WSOC 受一次排放源影响较小, 而冬季 WSOC 主要受一次源影响. 两个季节 WSOC 来源不同, 从而造成它们的  $MAE_{WSOC}$  不同.

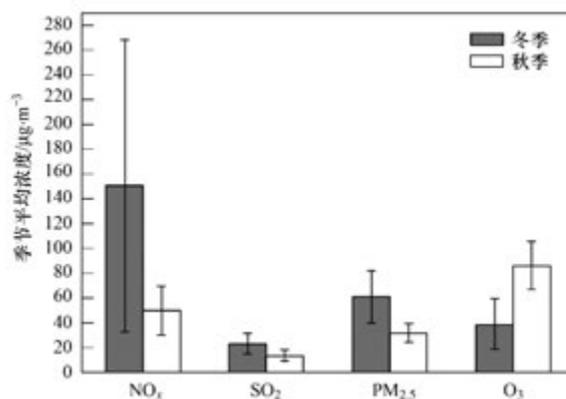


图 2 广州地区在线痕量气体和  $PM_{2.5}$  秋冬季平均浓度及方差变化情况

Fig. 2 Seasonal variations in average concentration and variance of ambient trace gases and  $PM_{2.5}$  in Guangzhou

## 2.3 $MAE_{WSOC}$ 的粒径分布特征

在颗粒物的不同粒径段上, WSOC 的含量和种类分布往往不同, 其吸光性大小也会存在差异. 为

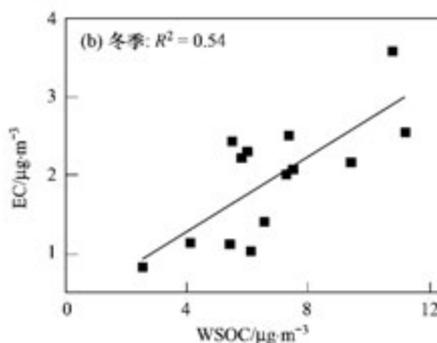


图 3 WSOC 与 EC 浓度的相关性

Fig. 3 Correlation between WSOC and EC

了探究不同粒径段 WSOC 吸光性差异的大小,本研究对两个季节 4 个粒径段颗粒的  $MAE_{WSOC}$  和  $MAE_{EC}$  进行了分析. 4 个粒径段 ( $<0.49$ 、 $0.49 \sim 0.95$ 、 $0.95 \sim 1.5$  和  $1.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ ) 的  $MAE_{WSOC}$  平均值分别为冬季  $0.93$ 、 $0.85$ 、 $0.79$  和  $0.66 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 秋季  $0.61$ 、 $0.54$ 、 $0.57$  和  $0.51 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $MAE_{EC}$  平均值分别为冬季  $13.06$ 、 $9.99$ 、 $8.00$  和  $5.47 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 秋季  $14.46$ 、 $10.36$ 、 $8.66$  和  $7.26 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . 图 4 (a) 为  $MAE_{WSOC}$  值的粒径分布. 从中可见, 冬季各粒径段  $MAE_{WSOC}$  值均高于秋季; 两个季节, 均以  $<0.49 \mu\text{m}$  段  $MAE_{WSOC}$  值最高 (冬季占  $28.79\%$ , 秋季占

$27.35\%$ ), 且整体呈现  $MAE_{WSOC}$  值随粒径增大而降低的趋势.

EC 主要来自于一次源排放. 图 4 (b) 为  $MAE_{EC}$  值的粒径分布. 从中可知, 两个季节颗粒物的  $MAE_{EC}$  值随粒径增大呈递减趋势. 冬季  $MAE_{WSOC}$  值随粒径的变化趋势与  $MAE_{EC}$  值相似, 再次说明冬季颗粒物中 WSOC 一次源贡献可能更大一些. 但秋季  $MAE_{WSOC}$  值的变化趋势与  $MAE_{EC}$  值存在一定差异, 并没有呈明显的降低趋势;  $<0.95 \mu\text{m}$  粒径段颗粒  $MAE$  值相对冬季降低了很多. 这表明小颗粒上 WSOC 二次源的贡献更大一些.

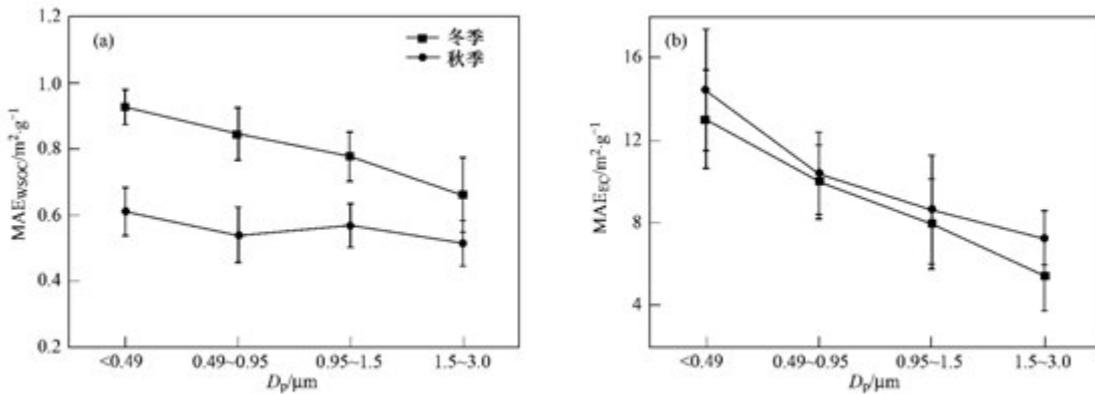


图 4  $MAE_{WSOC}$  和  $MAE_{EC}$  的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of the  $MAE_{WSOC}$  and  $MAE_{EC}$

### 2.4 颗粒物中 EC 和 WSOC 吸光性对比

本研究中,  $PM_{2.5}$  的  $MAE_{EC}$  值分别为秋季  $13.53 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $12.82 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $MAE_{WSOC}$  值分别为秋季  $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值为秋季  $26.02$ , 冬季  $13.93$ . 吸光性最强的  $<0.49 \mu\text{m}$  粒径段颗粒物 ( $PM_{0.49}$ ) 的  $MAE_{EC}$  值分别为秋季  $14.46 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $13.06 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $MAE_{WSOC}$  值分别为秋季  $0.61 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $0.93 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值为秋季  $23.70$ , 冬季  $14.04$ . 本研究 and 已有报道的  $MAE_{EC}$  值和  $MAE_{WSOC}$  值如表 1 所示, 在北京、广州等地冬季的  $MAE_{EC}$  值普遍低于夏、秋季, 而相应的

$MAE_{WSOC}$  值却为冬季远高于夏秋季,  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值均为夏、秋季远高于冬季<sup>[9]</sup>. 表 2 为已有报道的源排放结果, 表明受生物质燃烧影响地区  $PM_{2.5}$  中  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值为  $2.10$ , 柴油机车排放  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值为  $8.95$ , 混合型一次源  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值为  $1.83$ , 木柴和农作物秸秆燃烧  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值分别为  $2.47 \sim 3.81$  和  $5.24 \sim 7.24$ , 而受二次源影响地区  $PM_{2.5}$  中  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值高达  $41.00$ <sup>[9, 11, 25, 26]</sup>. 因此, 在冬季或者是一次源影响较大时,  $MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$  比值相对较小, WSOC 的吸光性能不容忽视.

表 1 本研究 with 文献中不同季节的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{0.49}$  中  $MAE_{EC}$  值和  $MAE_{WSOC}$  值

Table 1  $MAE_{WSOC}$  and  $MAE_{EC}$  values in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{0.49}$  in various seasons in previous reports and this work

采样地区	样品说明	$MAE_{EC}/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$MAE_{WSOC}/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$MAE_{EC}/MAE_{WSOC}$	文献
广州	市区 秋季 ( $PM_{0.49}$ )	14.46	0.61	23.70	本研究
广州	市区 冬季 ( $PM_{0.49}$ )	13.06	0.93	14.04	本研究
广州	市区 秋季	13.53	0.52	26.02	本研究
广州	市区 冬季	12.82	0.92	13.93	本研究
北京	市区 夏季	13.70	0.71	19.30	[9]
北京	市区 冬季	12.30	1.79	6.87	[9]

表 2 文献中不同源排放 WSOC 和 EC 的 MAE 值

Table 2 MAE values of WSOC and EC emitted from different sources in previous reports and this work

样品源	MAE <sub>WSOC</sub> / m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup>	文献	样品源	MAE <sub>EC</sub> / m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup>	MAE <sub>EC</sub> / MAE <sub>WSOC</sub>	文献
生物质燃烧源	1.19	[11]	生物质燃烧源	2.50	2.10	[26]
受二次源影响的 PM <sub>2.5</sub>	0.33	[11]	受二次源影响的 PM <sub>2.5</sub>	13.53	41.00	本研究
混合型一次源	2.89	[11]	混合型一次源	5.30	1.83	[26]
柴油机排放	1.33	[11]	柴油机排放	11.90	8.95	[9]
木柴	0.97	[11]	木柴	2.40 ~ 3.70	2.47 ~ 3.81	[25]
秸秆	1.05	[11]	秸秆	5.50 ~ 7.60	5.24 ~ 7.24	[25]
柴草	0.90	[11]	生物质颗粒	6.70 ~ 12.00	—	[25]
—	—	—	煤	4.80 ~ 11.00	—	[25]

### 3 结论

(1) 广州城区 PM<sub>2.5</sub> 上 WSOC 的光吸收波长指数 AAE 值秋冬季分别为  $3.72 \pm 0.41$  和  $3.91 \pm 0.7$ , 低于北京和北美地区测量结果。

(2) WSOC 的单位质量吸收效率 MAE<sub>WSOC</sub> 两个季节分别为  $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (秋) 和  $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (冬), 具有明显的差异, 这是由于两个季节 WSOC 的主要来源和形成机制不同造成的。

(3) WSOC 的 MAE 值在冬季呈现随粒径增大而降低的趋势, 而秋季所有粒径段颗粒 MAE<sub>WSOC</sub> 都比冬季有所降低, 特别是  $< 0.95 \mu\text{m}$  粒径段颗粒降低更多, 表明二次形成的 WSOC 主要集中在小颗粒上。

(4) PM<sub>2.5</sub> 上 MAE<sub>EC</sub> 值分别为秋季  $13.53 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $12.82 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , MAE<sub>WSOC</sub> 值分别为秋季  $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和冬季  $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , MAE<sub>EC</sub> / MAE<sub>WSOC</sub> 比值为秋季 26.02, 冬季 13.93。当颗粒物受到一次源影响较大时, MAE<sub>EC</sub> / MAE<sub>WSOC</sub> 比值相对较小, WSOC 对于颗粒吸光性的贡献不容忽视。

#### 参考文献:

- [1] Park S S, Cho S Y. Tracking sources and behaviors of water-soluble organic carbon in fine particulate matter measured at an urban site in Korea [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (1): 60-72.
- [2] Park S S, Cho S Y, Kim K W, et al. Investigation of organic aerosol sources using fractionated water-soluble organic carbon measured at an urban site [J]. Atmospheric Environment, 2012, 55: 64-72.
- [3] Wonaschütz A, Hersey S P, Sorooshian A, et al. Impact of a large wildfire on water-soluble organic aerosol in a major urban area: the 2009 Station Fire in Los Angeles County [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11 (16): 8257-8270.
- [4] Kondo Y, Miyazaki Y, Takegawa N, et al. Oxygenated and water-soluble organic aerosols in Tokyo [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (D1): D01203.
- [5] Weber R J, Sullivan A P, Peltier R E, et al. A study of secondary organic aerosol formation in the anthropogenic-influenced southeastern United States [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (D13): D13302.
- [6] 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 等. 上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算 [J]. 环境科学, 2013, 34 (5): 2003-2009.
- [7] Chen Y, Bond T C. Light absorption by organic carbon from wood combustion [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10 (4): 1773-1787.
- [8] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, et al. Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10 (13): 5965-5977.
- [9] Cheng Y, He K B, Zheng M, et al. Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11 (22): 11497-11510.
- [10] Huang H, Ho K F, Lee S C, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in PM<sub>2.5</sub>: Pearl Delta River region, China [J]. Atmospheric Research, 2012, 104-105: 227-236.
- [11] Du Z Y, He K B, Cheng Y, et al. A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing II: Light absorption properties [J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 235-241.
- [12] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, et al. Sources, composition and absorption Ångström exponent of light-absorbing organic components in aerosol extracts from the Los Angeles Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47 (8): 3685-3693.
- [13] Kirillova E N, Andersson A, Tiwari S, et al. Water-soluble organic carbon aerosols during a full New Delhi winter: Isotope-based source apportionment and optical properties [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119 (6): 3476-3485.
- [14] Ho K F, Cao J J, Lee S C, et al. Dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids, and dicarbonyls in the urban atmosphere of China [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (D22), doi: 10.1029/2006JD008011.
- [15] Ho K F, Ho S S H, Lee S C, et al. Summer and winter variations of dicarboxylic acids, fatty acids and benzoic acid in

- PM<sub>2.5</sub> in Pearl Delta River region , China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics ,2011 ,**11**( 5) : 2197-2208.
- [16] 谭吉华,赵金平,段菁春,等. 广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征[J]. 环境科学,2013 ,**34**( 5) : 1982-1987.
- [17] Hoffer A , Gelencsér A , Guyon P , *et al.* Optical properties of humic-like substances ( HULIS) in biomass-burning aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics ,2006 ,**6**( 11) : 3563-3570.
- [18] Bones D L , Henricksen D K , Mang S A , *et al.* Appearance of strong absorbers and fluorophores in limonene-O<sub>3</sub> secondary organic aerosol due to NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-mediated chemical aging over long time scales [J]. Journal of Geophysical Research , 2010 , **115** ( D5) , doi: 10.1029/2009JD012864.
- [19] Yang M , Howell S G , Zhuang J , *et al.* Attribution of aerosol light absorption to black carbon , brown carbon , and dust in China-interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE [J]. Atmospheric Chemistry and Physics , 2009 , **9** ( 6) : 2035-2050.
- [20] Marley N A , Gaffney J S , Tackett M , *et al.* The impact of biogenic carbon sources on aerosol absorption in Mexico City [J]. Atmospheric Chemistry and Physics , 2009 , **9** ( 5) : 1537-1549.
- [21] Zhang X , Hecobian A , Zheng M , *et al.* Biomass burning impact on PM<sub>2.5</sub> over the southeastern US during 2007: integrating chemically speciated FRM filter measurements , MODIS fire counts and PMF analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics , 2010 , **10**( 14) : 6839-6853.
- [22] Li Y , Lau A K H , Fung J C H , *et al.* Importance of NO<sub>x</sub> control for peak ozone reduction in the Pearl River Delta region [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres , 2013 , **118**( 16) : 9428-9443.
- [23] Wang T , Wei X L , Ding A J , *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China , 1994-2007 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics , 2009 , **9** ( 16) : 6217-6227.
- [24] Guo H , Jiang F , Cheng H R , *et al.* Concurrent observations of air pollutants at two sites in the Pearl River Delta and the implication of regional transport [J]. Atmospheric Chemistry and Physics , 2009 , **9**( 19) : 7343-7360.
- [25] Shen G F , Chen Y C , Wei S Y , *et al.* Mass absorption efficiency of elemental carbon for source samples from residential biomass and coal combustions [J]. Atmospheric Environment , 2013 , **79**: 79-84.
- [26] Xing Z Y , Deng J J , Mu C , *et al.* Seasonal variation of mass absorption efficiency of elemental carbon in the four major emission areas in China [J]. Aerosol and Air Quality Research , 2014 , **14**( 7) : 1897-1905.