

## 碳质气溶胶(OC/EC)新型观测方法对比分析

倪登峰<sup>1,2</sup>,林晶晶<sup>3</sup>,高健<sup>1\*</sup>,解静芳<sup>2</sup>,王杰<sup>4</sup>,郭英哲<sup>5</sup>,任建宁<sup>1</sup>(1.中国环境科学研究院,北京 100012; 2.山西大学环境与资源学院,山西太原 030006; 3.山东省生态环境监测中心,山东济南 250101; 4.北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029; 5.山东大学环境研究院,山东青岛 266237)

**摘要:** 基于热光反射法(IMPROVE A)和热光透射法(RT-Quartz)二种协议分析方法和新型 OC/EC 分析方法对济南市碳质气溶胶含量进行了对比观测。结果表明,协议方法在 OC/EC 的观测过程中因分析定义会造成碳质气溶胶质量浓度高估或者低估,且膜采样系统使离线分析的 OC 约为在线的 1.65 倍,而新型 OC/EC 测量方法相对于 2 种协议方法,去除了原理上和环境参数(如 VOCs)可能导致的误差,在 OC/EC/TC 测量结果上均有一定优势,在实际运行中更具有准确性、稳定性和实用性,更加适合颗粒物中 OC/EC 长期业务化在线测量。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 碳质气溶胶; 热光法; CASS; 对比分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)12-5191-07

**Comparative analysis of new observation methods for carbonaceous aerosol (OC/EC).** NI Deng-feng<sup>1,2</sup>, LIN Jing-jing<sup>3</sup>, GAO Jian<sup>1\*</sup>, XIE Jing-fang<sup>2</sup>, WANG Jie<sup>4</sup>, GUO Ying-zhe<sup>5</sup>, REN Jian-ning<sup>1</sup> (1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3.Shandong Provincial Eco-environment Monitoring Center, Jinan 250101, China; 4.Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 5.Environment Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5191~5197

**Abstract:** Based on two protocol analysis methods, Thermo-light reflection method (IMPROVE A) and Thermo-optical transmission method (RT-Quartz), and the new OC/EC analysis method, comparative analysis of carbonaceous aerosol content in Jinan was held in this study. The results show that the protocol methods may lead to overestimation or underestimation of the carbonaceous aerosol mass concentration due to the analysis definition during OC/EC observation process, furthermore, the membrane sampling system made the offline OC about 1.65times online. Compared with the two protocol methods, the new OC/EC measurement method does eliminate the errors that may be caused by principle and environmental parameters (such as VOCs), and has certain advantages in the measurement of OC/EC/TC. With more accuracy, stability and practicality in practical operation, the new method will be more suitable for long-term commercial online measurement of OC/EC in particles.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; carbonaceous aerosol; thermal-optical methods; CASS; comparative analysis

大气细颗粒物是当前大气环境中主要污染物之一,而碳质气溶胶是大气细颗粒物的主要成分之一,占 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的 10%~70%<sup>[1-2]</sup>。细颗粒物中的碳质气溶胶主要包含有机碳(OC)、元素碳(EC)和碳酸盐颗粒物(CC),而 CC 在 PM<sub>2.5</sub> 中的含量往往远小于 OC 和 EC<sup>[3]</sup>。碳质气溶胶(EC 及部分 OC)具有吸光性,能影响区域内太阳辐射胁迫,从而导致能见度下降,甚至引起降水变化等<sup>[4-5]</sup>。此外,碳质气溶胶还可以进入人体肺部,危害人体健康,对人民的生产、生活造成影响<sup>[6-7]</sup>。

从 1987 年开始,多个研究机构相继对颗粒物中的碳质气溶胶进行报道<sup>[8-10]</sup>,OC/EC 的相关观测技术也持续不断的进行改进和发展。目前普遍认可和广泛使用的是热光法,其典型代表为热光反射法(IMPROVE TOR 法)和热光透射法(NIOSH TOT 法)。

但是由于 OC/EC 切割点是没有明确的定义<sup>[11]</sup>,以往的分析方法均属于协议方法,给出的 OC/EC 测量值均是分析定义值(即基于分析方法定义给出的数值),具有一定的方法局限性,故采用的协议不同将导致结果的显著差异,和环境真实值之间也存在一定的差异。这些差异问题在测量方法间是普遍且复杂的,郇宁等<sup>[12]</sup>在 2005 年就对大气气溶胶中有机碳和元素碳的分析方法进展进行研究,发现不同的测量方法均存在各种易产生误差的问题。后续更是针对具体方法进行了大量相关研究,如庞博等<sup>[13]</sup>针对 sunset 仪器使用不同的升温程序(RT-Quartz 法、

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91544226)

\* 责任作者, 研究员, gaojian@craes.org.cn

NIOSH法、Fast-TC法)进行了研究,得出的OC/EC质量浓度值之间是显著相关的,但差异现象也是较为明显的,其中RT-Quartz对不同污染状况下的OC/EC变异程度是最稳定的.而即使是同种观测方法,外部条件的影响也是不可忽略的,胡敏等<sup>[14]</sup>通过在线分析和离线分析对颗粒物中碳质气溶胶进行对比分析,发现采样系统的区别也会对OC/EC测定值造成影响.

为了尽可能全面的考察大气颗粒物碳质气溶胶分析方法的差别,对颗粒物OC/EC质量浓度值进行多种方法的对比测量是必不可少的.近来,颗粒物碳气溶胶组分在线分析系统(CASS)在监测领域开始应用,其采用不同于热光法的计算技术进行测量,认为可以去除以往协议方法的定义误差.本研究基于3种颗粒物OC/EC测量方法(膜采样的IMPROVE A法离线分析;sunset的RT-Quartz法在线分析;CASS新型观测方法),在济南市开展同一地点、同一时间段内的OC/EC浓度值测量,对3种OC/EC观测方法进行对比评估分析,验证新方法在OC/EC测量工作中的准确性及实用性.

## 1 材料和方法

### 1.1 采样时间和点位

采样时间为2018年7月11日~9月31日,颗粒物膜采样时间为每天的早晨9:00到次日10:00,而sunset和CASS均为24h连续不间断的在线采样(降雨、断电等情况除外).采样点位均设在山东省大气环境超级监测站济南东部站房楼楼顶(117°09'30"E, 36°40'02"N),采样仪器相互分开,既保证采样头间互不干扰,同时保证采集大气样品的一致性.

### 1.2 分析方法

**1.2.1 OC/EC热光法** 在分析开始前,先将石英膜置于450℃的马弗炉中4h,以去除膜上可能残留的有机物,然后恒温恒湿进行保存,从而避免对研究结果造成影响,保证研究结果的准确性.通过颗粒物采样器进行样品采集,流量为16.7L/min.样品膜则利用DRI 2001A型有机碳/元素碳(OC/EC)分析仪进行检测,该仪器分析过程中的升温程序采用的是IMPROVE A法(简称为“offline”).

在线分析采用的是Sunset Model 4在线OC/EC分析仪(简称为“sunset”).截取部分石英膜(约1.45cm<sup>2</sup>)后,利用镊子将其放入石英炉中,待工作后

自动进行采样和分析,采样流量为8L/min.本研究中sunset仪器采用的升温程序是RT-Quartz法,这是sunset公司推荐使用的温度协议.

2种热光法的升温程序具体数值如表1所示,具体的升温过程和仪器原理构造参见相关研究报告<sup>[15-18]</sup>.

表1 IMPROVE A法及RT-Quartz法升温程序  
Table 1 Heating schedule of IMPROVE A and RT-Quartz methods

参数	热光反射法(Improve A法)		热光透射法(R法)	
	温度(℃)	停留时间(sec)	温度(℃)	停留时间(sec)
OC1	140	80~580	600	95
OC2	280	80~580	840	90
OC3	480	80~580	0	33
OC4	580	80~580	550	2
冷却				
EC1	580	80~580	550	30
EC2	740	80~580	550	25
EC3	840	80~580	650	45
EC4			870	80

**1.2.2 新型OC/EC分析方法** OC/EC新型观测技术为碳气溶胶组分在线分析系统(CASS),该分析系统主要包含二个部分,即总碳分析单元和光学吸收测试单元,如图1所示.仪器上半部分为总碳分析单元,其以环境空气作为载气,采用双通道交替采样,并通过高温氧化将颗粒物中的碳组分全部转化为CO<sub>2</sub>,再利用非色散红外(NDIR)检测器积分测定颗粒物总碳(TC)含量(扣除了环境空气中的背景值),采样流量为16.7L/min;仪器的下半部分则为光学吸收测试单元(即黑碳仪AE33),其采用双点位测量技术,克服了滤膜采样的“遮蔽”效应,以最快1s的时间分辨率连续测量颗粒物在370,470,520,590,660,880和950nm波长上的气溶胶光学吸收,从而给出黑碳(BC)的测定值,采样流量为5L/min.最后系统经过下列公式计算后给出OC/EC质量浓度值.

$$TC = EC + OC \quad (1)$$

$$EC = b \times BC \quad (2)$$

式中:TC、EC、OC、BC分别为颗粒物中的总碳、元素碳、有机碳和黑碳;*b*基于以往测定的颗粒物中EC和BC的比值确定而来,本研究中*b*为0.9437,是选取了济南市某时间段内(本研究开始前数月)的EC/BC比值求得.其中EC质量浓度是sunset测量结果,BC质量浓度选取的是880nm波长下的测量结果,尽可能排除吸光性有机碳的干扰.

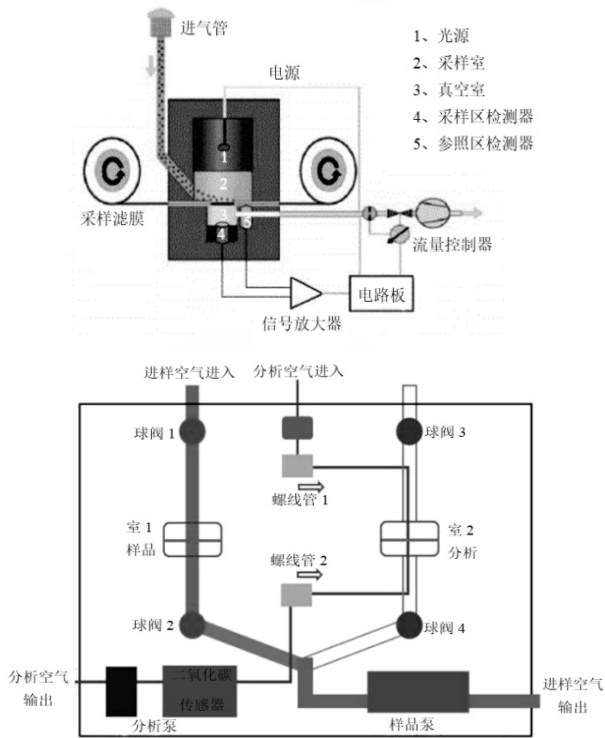


图 1 CASS 仪器示意

Fig.1 instrument graphic of CASS

### 1.3 质量控制及质量保证

膜采样离线分析和 sunset 在线分析的质量控制参考文献[19-21].CASS 为保证数据质量,降低实验研究误差,对系统的各个单元均定时进行校准.采用离线采样膜或蔗糖溶液对热燃烧(TC)测量单元进行校准;使用标准可溯源至 NIST 标准的中性密度光学滤光片对仪器进行光学校准;使用外置校准器对采样流量进行手动或自动校准,同时还不时进行动态零点、噪声和漏气检测,以确保数据的准确性.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同观测技术的 OC/EC 对比

为进行 3 种观测方法的对比分析,基于离线膜采样时间段(早上 10:00~次日早上 09:00),选取对应时间内 sunset 和 CASS 的碳质气溶胶(OC、EC、TC)小时值,平均作为对比日均值.剔除空白值和异常值后,共留有 59d 数据集,结果如图 2 所示.3 种方法的 TC/OC/EC 观测结果具有较为一致的趋势,表明 3 种方法具有一定可比性.

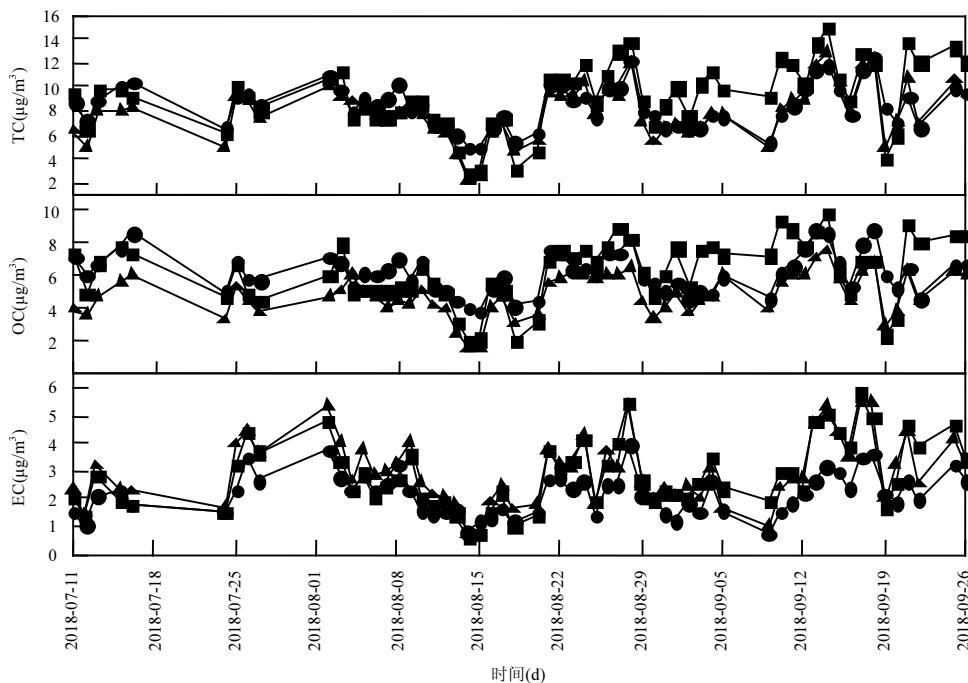


图 2 3 种分析方法下的 OC/EC/TC 时间序列

Fig.2 time series of OC/EC/TC under three analysis methods

—■— offline    —●— sunset    —▲— CASS

当然,3 种测量方法间相对差异也是较为明显的. 为了更直观表现出方法间测量结果差异,计算了 3

种测量方法的碳质气溶胶质量浓度及其对比值,结果如表 2 所示.结合图 2 可以看出,offline 的 OC 和

TC 存在明显高于 sunset 和 CASS 的时间段; sunset 的 EC 普遍低于 offline 和 CASS, 表明测量方法间存在一定的影响因素, 造成测量差异. 此外, 在进行具体分析前, 需特别说明本研究参与对比分析的 2 种传统热光法未进行变量控制. 以往大量研究<sup>[8-10,13]</sup>已经表明, 不同热光法间 OC/EC 差异主要来自于方法原理; 同一种热光法采用不同的采样系统仅造成 OC 差异, 从而形成 TC 差异. 因此认为, 本研究中 EC 差异的分析重点集中在方法原理问题上是具有科学意义的, 而 OC 差异的对比分析则需进一步深化.

表 2 3 种分析方法下各碳质气溶胶浓度均值/比值

Table 2 Mean/ratio of carbonaceous aerosol concentrations under three analysis methods

参数	offline	sunset	CASS
EC 均值	3.04	2.27	3.11
OC 均值	6.61	6.41	5.07
TC 均值	9.65	8.68	8.18
OC/EC	2.39	3.07	2.42
EC/TC	0.31	0.26	0.37

## 2.2 3 种分析方法的 EC 相关性分析

如图 3 所示, 3 种方法间 EC 相关性分别为 offline-sunset ( $R^2=0.72$ )、offline-CASS ( $R^2=0.86$ )、sunset-CASS ( $R^2=0.83$ ). offline 和 CASS 之间相关性更高, 这和图 2 的时间趋势是相一致的. 结合图 2 可以发现, sunset 和 offline 与 CASS 之间的相关性较差, 很大程度上是由于 sunset 中 EC 普遍存在低估现象, 低估比例分别为 77.97% 和 93.22%. 这和在北京<sup>[22-23]</sup>、广州<sup>[24]</sup>、北京<sup>[25]</sup>得出的研究结论是相似的. 这是因为 RT-Quartz 法升温程序中的 OC 演化温度峰值 (840°C) 远高于 IMPROVE A 法 (580°C), 可能导致 RT-Quartz 法样品中的 EC 会过早演化 (即 EC 的低估) 或 IMPROVE 法样品中的 OC 演化不完全 (即 EC 的高估). 此外, Judith 等<sup>[26]</sup>研究表明生物质燃烧和金属氧化物均会导致 EC 差异的正增长. 从图 3 可以看出, EC 质量浓度越高, sunset 的低估程度越严重, 通过对颗粒物观测数据分析发现, 随着 EC 质量浓度升高,  $PM_{2.5}$  质量浓度增长幅度较大, 均值从  $33\mu\text{g}/\text{m}^3$  增长至  $55\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 峰值甚至达到了  $97.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 认为可能随着污染程度的上升, 颗粒物中生物质燃烧产物或金属氧化物的组分含量相应增加, 从而导致在线热光法分析对于 EC 测量结果的差异性会进一步增大.

这和庞博等<sup>[12]</sup>得出 sunset 在线分析仪器在不同污染程度下的 EC 测量结果存在变异情况的研究结论相一致.

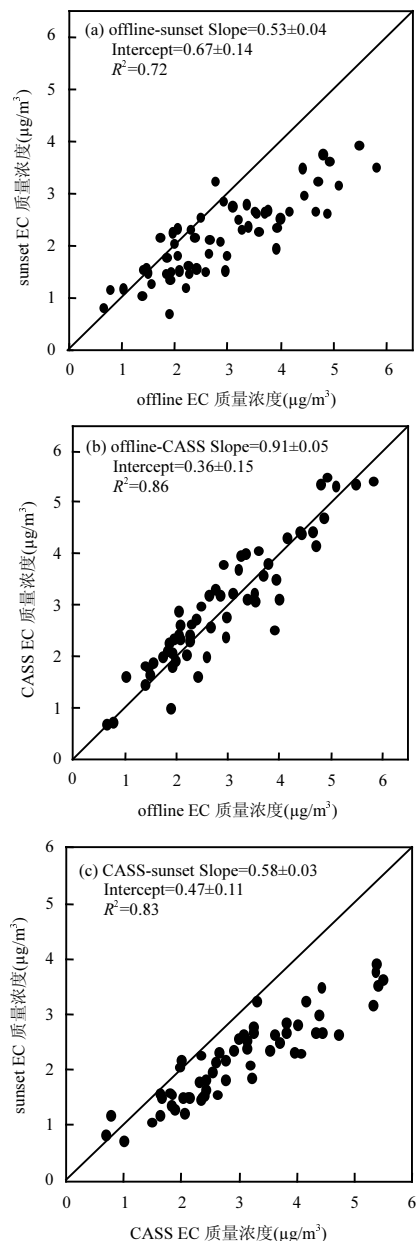


图 3 3 种分析方法的 EC 相关性  
Fig.3 EC correlations of three analysis methods

对于 offline 和 CASS, 虽然二者之间有着较好相关性, 但仍存在一定的差异, 甚至 offline 样品在某些观测日的 EC 测量值远高于 CASS. 分析认为二者间相对较小的差异可能存在以下 3 个原因: 1) CASS 中的 EC 是经过公式计算而得, 而公式中的  $b$  是基于区域特征拟合而成的, 本身存在一定的误差; 2) 2 个不同的采样分析仪器对比会产生相对误差, 从而导致 2 种

方法间的差异;3).环境空气中可能存在少量吸光性 OC,光学检测时理论上会导致 BC 的升高,从而影响 CASS 中的 EC 测量结果,BC 质量浓度是 880nm 波长下的测量结果,吸光性 OC 的影响较小.而对于少数的大差异现象,即在 9 月初期和末期出现了 2 次 offline 的 EC 测量值远高于 CASS,发现此时 sunset 和 CASS 的 EC 测量结果反而趋于一致,可能是 sunset 中的 EC 过早演化在此时转变为 offline 中 OC 演化不完全.这些结果表明,3 种方法在 EC 观测过程中均存在的一定的误差,但 CASS 确实消除了以往协议方法中因 OC/EC 划分点问题而产生的影响,相对准确.

### 2.3 3 种分析方法的 OC/TC 相关性分析

如图 4 所示,3 种分析方法 OC/TC 相关性分别为 offline-sunset( $R^2=0.39/0.52$ )、offline-CASS ( $R^2=0.68/0.75$ )、sunset-CASS( $R^2=0.63/0.79$ ).3 种方法间的 OC/TC 相关性普遍较差,这是分析方法和测量仪器共同作用的结果.传统热光法(IMPROVE A 和 RT-Quartz)的 TC 质量浓度为 OC 和 EC 测量结果的加和,而 CASS 则是基于 TC 和 EC 的测量进行计算以求得 OC,分析过程中相关仪器的数量和程序步骤相对于 EC 测量过程更为复杂,从而可能导致 3 种方法间的 OC/TC 一致性相对变差.

其中,offline 和 sunset 间的相关性最差,甚至可以认为 TC 的低相关性将会对 EC 对比分析造成较大影响.结合图 2 分析发现,2 种方法间的 TC 差异存在 2 个问题:1).sunset 间隙出现短时段的高估,检查 sunset 分析仪和数据记录本发现,出现高估的时间段和更换采样膜或停电后重启的时间段是相对应的,认为可能是仪器重新运行后产生的短时间内数据波动,从而影响测量结果,但整体上来看,该问题对 TC 一致性的影响有限,不会造成  $R^2$  大幅下降;2).最主要的影响因素是 offline 在研究后期出现的 2 次长时段的 TC 高估,这和 offline 出现 OC 异常高估的时间一致.在观测后半段出现 offline 的 OC 异常高估,约为 sunset 中 OC 的 1.65 倍,这和胡敏等<sup>[14]</sup>在北京研究分析得出离线分析的 OC 约为在线的 2 倍相似,这是因为离线分析进行手工膜采样,石英膜对 VOCs 的吸附会造成较大的正误差,而在线分析采用 denuder 去除了绝大部分 VOCs,消除了影响,但也因为降低了大气中的 VOCs 浓度,会破坏半挥发性有机物的气-固平衡,致使颗粒相转化为气相,造

成 OC 的负误差.同时发现济南市在该时段内存在较大的污染事件,且主要污染物为  $O_3$ ,认为此处  $O_3$  污染事件可能主要是由 VOCs 引起,这也间接证明在研究后期存在大量 VOCs,对 offline 的 OC/TC 测量结果造成影响.同时 VOCs 也可能是 EC 对比分析中,sunset 的低估转变为 offline 高估的原因,其导致 offline 中 OC 质量浓度大幅度的增长,当然该假设仍需后续研究进一步观测分析.为了更直观的表明前文所提及问题对 3 种方法造成的 OC/TC 相关性影响,计算了相应处理后的  $R^2$  变化,结果如表 3 所示.去除异常值后数据保有量最低为 43d,占完整数据集的 72.88%,仍具有数据代表性.其中 offline 异常值的去除处理对 OC/TC 相关程度的影响十分显著,offline-sunset 的  $R^2$  从 0.39 和 0.52 增长至 0.69 和 0.77,TC( $R^2=0.77$ )已经高于 EC( $R^2=0.72$ ),这也进一步证明了关于 2 种协议方法 EC 测量结果基于划分点问题的分析是具有研究意义的.

表 3 offline 与 sunset 及 CASS 的 OC/TC 在不同处理方式下相关性变化

Table 3 Correlations of OC / TC between offline and sunset with CASS under different processing methods

方法	处理方式	剩余数据 量(个数)	完整数据 集占比(%)	TC 相关性 ( $R^2$ )	OC 相关性 ( $R^2$ )
offline-sunset	无	59	100	0.52	0.39
	去除 sunset 异常值	52	88.14	0.43	0.25
	去除 offline 异常值	43	72.88	0.77	0.69
Offline-CASS	无	59	100	0.75	0.68
	去除 offline 异常值	43	72.88	0.84	0.73

offline 和 sunset 的 OC 异常差异在 TC 分析讨论中已进行说明.而对于 TC 相对一致时仍存在 sunset 的 OC 质量浓度高于 offline 的现象,这是协议方法间 OC/EC 划分点问题引起的,sunset 在惰性氛围上的高温(840℃)导致 EC 过早演化,这部分 EC 也就被归类为 OC.

对于 CASS,OC/TC 的  $R^2$ (对比 offline)分别为 0.68 和 0.75,去除 offline 异常值后更是达到了 0.73 和 0.84; $R^2$ (对比 sunset)分别 0.63 和 0.79.表明 CASS 和 offline、sunset 在 TC 测量方面具有较高的一致性,OC 的  $R^2$  相对较差的主要原因是前文所提及的划

分点问题.即热光法中 TC 是 OC 和 EC 的加和计算而得,OC/EC 出现的异常现象均延伸至 TC 测量结果中.而 CASS 是单独的热燃烧单元(总碳分析单元),具有相对准确的测量值,OC 也是通过 TC 和 EC 相减求得,较大限度保证数据的准确性.此外,当其中一

种协议方法出现异常值时,CASS 测量值总会与另一种协议方法的测量结果趋于一致,说明 CASS 作为在线分析仪器在连续工作时仍能保证较高的稳定性,表明 CASS 在 OC/TC 监测方面相对于传统热光法也具有一定的优势.

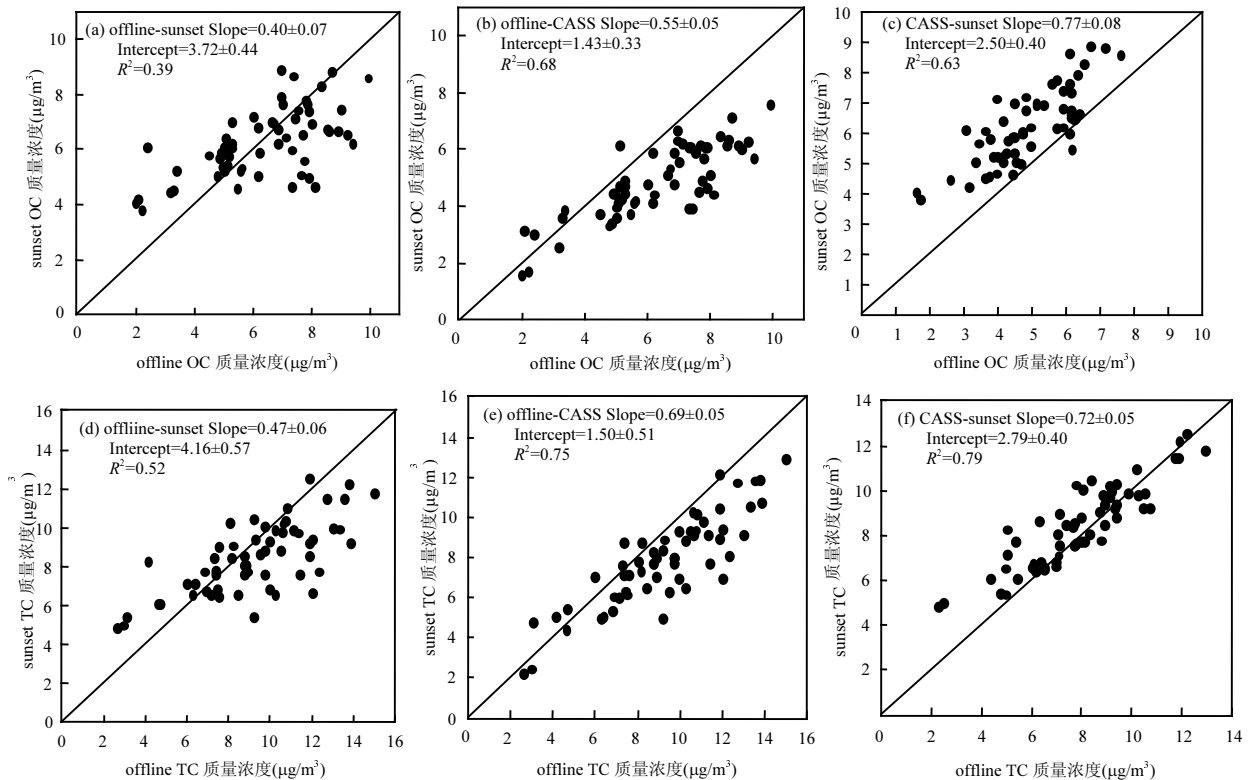


图4 3种分析方法的OC/TC相关性

Fig.4 Correlations of OC/TC under three analysis methods

### 3 结论

3.1 传统热光法对 OC/EC 检测的差异性主要来自于分析定义,即在 OC/EC 划分点问题上导致误差.

3.2 膜采样离线分析和在线分析的差异主要来自于 OC,这是因为石英膜对 VOCs 的吸附会导致离线分析中 OC 的异常高估,而在线分析系统中 denuder 能较有效的去除其影响效应,但也可能导致 OC 的负误差.

3.3 热光法和 CASS 分析系统在碳质气溶胶的观测结果上存在一定的差异,而 CASS 作为在线分析系统,区别于传统热光法而采用热燃烧法及光学吸收法,确实较好的避开了 OC/EC 难以准确划分的问题,也消除了 VOCs 的干扰,在实际运行中更具有准确性、稳定性和实用性.

### 参考文献:

- [1] Barbara J. Turpin, Pradeep S, Elisabeth A. Measuring and simulating particulate organics in the atmosphere: problems and prospects [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(18):2983-3013.
- [2] Polidori A, Turpin B J, Ho-Jin L, et al. Local and Regional Secondary Organic Aerosol: Insights from a Year of Semi-Continuous Carbon Measurements at Pittsburgh [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006,40(10):861-872.
- [3] Gray H A, Cass G R, Huntzicker J J, et al. Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon particle concentrations in Los Angeles [J]. *Environmental Science & Technology*, 1986,20(6): 580-589.
- [4] Bond T C, Bergstrom R W. Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006,40(1):27-67.
- [5] 王莉华,董华斌,闫才青,等.气溶胶 OC/EC 切割点确定方法改进及应用 [J]. *环境科学*, 2012,33(9):32-38.  
Wang L H, Dong H B, Yan C Q, et al. Improvement and application of aerosol OC/EC cutting point determination method [J]. *Environment*

- Science, 2012,33(9):32-38.
- [6] 姜文娟,郭照冰,刘凤玲,等.南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2015,36(3):774-779.
- Jiang W J, Guo Z B, Liu F L, et al. Characteristics and sources of OC/EC in PM<sub>1.1</sub> in Nanjing [J]. Environment Science, 2015,36(3):774-779.
- [7] Alves N D O, Brito J, Caumo S, et al. Biomass burning in the Amazon region: Aerosol source apportionment and associated health risk assessment [J]. Atmospheric Environment, 2015,120(11):277-285.
- [8] Chow, Judith C, Watson, et al. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U.S. Air quality studies [J]. Atmos Environ A, 1993,27(8):1185-1201.
- [9] Chow, Judith C, Watson, et al. Equivalence of Elemental Carbon by Thermal/Optical Reflectance and Transmittance with Different Temperature Protocols [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(16):4414-4422.
- [10] Chen L W A, Chow J C, Watson J G, et al. Modeling reflectance and transmittance of quartz-fiber samples containing elemental carbon particles: Implications for thermal/optical analysis [J]. Journal of Aerosol Science, 2004,35(6):0-780.
- [11] Park S S, Bae M S, Schauer J J, et al. Evaluation of the TMO and TOT methods for OC and EC measurements and their characteristics in PM<sub>2.5</sub> at an urban site of Korea during ACE-Asia [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(28):5101-5112.
- [12] 郇宁,曾立民,邵敏.气溶胶中有机碳和元素碳分析方法进展 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005,41(6):957-964.
- Huan N, Zeng L M, Shao M. Advances in analytical methods for organic and elemental carbon in aerosols [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2005,41(6):957-964.
- [13] 庞博,吉东生,刘子锐,等.大气细颗粒中有机碳和元素碳监测方法对比 [J]. 环境科学, 2016,37(4):54-63.
- Pang B, Ji D S, Liu Z R, et al. Comparison of monitoring methods of organic carbon and elemental carbon in fine particles in the atmosphere [J]. Environment Science, 2016,37(4):54-63.
- [14] 胡敏,邓志强,王轶,等.膜采样离线分析与在线测定大气细粒子中元素碳和有机碳的比较 [J]. 环境科学, 2008,29(12):3297-3303.
- Hu M, Deng Z Q, Wang Y, et al. Comparison of offline analysis of membrane sampling and online determination of elemental carbon and organic carbon in fine particles in the atmosphere [J]. Environment Science, 2008,29(12):3297-3303.
- [15] Khan, Bernine, Hays, et al. Differences in the OC/EC Ratios that characterize ambient and source aerosols due to thermal-optical analysis [J]. Aerosol Science & Technology, 2012,46(2):127-137.
- [16] Bauer, Jace J, Yu, et al. Characterization of the Sunset Semi-Continuous Carbon Aerosol Analyzer [J]. Air Repair, 2009,59(7):826-833.
- [17] Wu, Cheng, Ng, et al. Determination of elemental and organic carbon in PM<sub>2.5</sub> in the Pearl River Delta Region: Inter-instrument (Sunset vs. DRI Model 2001 thermal/optical carbon analyzer) and inter-protocol comparisons (IMPROVE vs. AC) [J]. Aerosol Science & Technology, 2012,46(6):610-621.
- [18] 陈魁,银燕,魏玉香,等.南京大气 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分观测分析 [J]. 中国环境科学, 2010,30(8):9-14.
- Chen K, Yin Y, Wei Y X, et al. Observation and analysis of carbon components in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing [J]. China Environment Science, 2010,30(8):9-14.
- [19] 范雪波,刘卫,王广华,等.杭州市大气细颗粒物浓度及组分的粒径分布 [J]. 中国环境科学, 2011,31(1):13-18.
- Fan X B, Liu W, Wang G H, et al. Concentration of fine particles and particles size distribution of components in Hangzhou [J]. China Environment Science, 2011,31(1):13-18.
- [20] 申永.气溶胶碳成分测量中热光透射法和反射法对比研究 [D]. 合肥:中国科学院合肥物质科学研究院, 2011.
- Shen Y. Comparative study of thermal-optical transmission method and emission method in aerosol carbon composition measurement [D]. Hefei Institute of Material Science, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [21] Steven Brown, Hilary Minor, Theresa O, et al. Review of sunset OC/EC instrument measurements during the EPA's sunset carbon evaluation project [J]. Atmosphere, 2019,10(5):287-309.
- [22] 刘琼玉,谈静,钟章雄,等.PM<sub>2.5</sub> 中 OC/EC 测定的离线分析与在线分析法比较 [J]. 中国环境监测, 2019,35(4):123-130.
- Liu Q Y, Tan J, Zhong Z X, et al. Comparison of offline analysis method and online analysis method for OC/EC determination in PM<sub>2.5</sub> [J]. China Environment Monitoring, 2019,35(4):123-130.
- [23] 黄睿,谈静,刘琼玉.PM<sub>2.5</sub> 中有机碳/元素碳测定探讨 [J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2016,141(1):12-18.
- Huan R, Tan J, Liu Q Y. Study on determination of organic carbon/elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2016,141(1):12-18.
- [24] 丁晴,刘建国,陆亦怀,等.大气有机碳/元素碳在线分析仪的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2014,35(6):1246-1253.
- Ding Q, Liu J G, Lu Y H, et al. Development of on-line organic carbon/elemental carbon analyzer [J]. Journal of Instrumentation, 2014,35(6):1246-1253.
- [25] 薛瑞,曾立民,吴宇声,等.大气气溶胶碳质组分在线分析仪的研制和应用 [J]. 环境科学学报, 2017,37(1):95-103.
- Xue R, Zeng L M, Wu Y S, et al. Development and application of an on-line carbonaceous aerosol analyzer [J]. Acta Science Circumstantiae, 2017,37(1):95-103.
- [26] Judith C, Chow, John G, et al. Comparison of improve and NIOSH carbon measurements [J]. Aerosol Science & Technology, 2010,34(1):23-34.

**作者简介:** 倪登峰(1996-),男,浙江永康人,山西大学硕士研究生,主要从事大气环境综合观测方面研究。