

不同碳质气溶胶在线监测技术的实测比较研究

兰紫娟¹ 黄晓锋¹ 何凌燕^{1,†} 胡敏² 薛莲¹ 孙天乐¹ 胡伟伟² 林云¹ 张远航²

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: hely@pku.edu.cn

摘要 2009年10月31日—11月8日,用国际上应用较多的4种气溶胶在线监测仪同步监测了深圳大气细粒子中元素碳(EC)和有机物(OM)的浓度。比对结果显示:黑碳仪与单颗粒黑碳光度计测定EC有很高的相关度, $R^2 = 0.97$,斜率为1.00;在线EC/OC分析仪的EC监测结果与前两者的相关度 R^2 均大于0.95,但是其浓度水平总体偏低30%~40%;在线EC/OC分析仪测定的OC与气溶胶质谱仪测得的OM也比较吻合,相关度 $R^2 = 0.83$,但是在OM高浓度时在线EC/OC分析仪的测量结果相对偏低。对造成不同在线仪器观测数据差异的因素进行了初步探讨,为研究者掌握这些在线仪器获得的高时间分辨率观测数据的准确性和差异性提供支撑信息。

关键词 有机物;元素碳;在线监测;比对

中图分类号 X132

Comparison of Measurement Results of Several Online Carbonaceous Aerosol Monitoring Techniques

LAN Zijuan¹, HUANG Xiaofeng¹, HE Lingyan^{1,†}, HU Min², XUE Lian¹, SUN Tianle¹,
HU Weiwei², LIN Yun¹, ZHANG Yuanhang²

1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental

Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University,

Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: hely@pku.edu.cn

Abstract A couple of carbonaceous aerosol online monitoring instruments, which are popularly used in the world, were compared by real atmospheric measurement, in order to provide some useful information on their characteristics to scientists in the field. Elemental carbon (EC) and organic matter (OM) in atmospheric fine particles in Shenzhen were monitored simultaneously by 4 different online instruments from October 31 to November 8, 2009, and the comparison among the results indicated that the EC concentrations measured using an aethalometer and an single particle soot photometer (SP2) agreed with each other quite well, with $R^2 = 0.97$ and slope = 1.00; the EC concentrations measured using an online EC/OC analyzer also correlated well ($R^2 > 0.95$) with those by the aethalometer and SP2, but presented 30%–40% lower concentration levels; the organic carbon (OC) concentrations measured using the online EC/OC analyzer correlated well ($R^2 = 0.83$) with the OM concentrations measured using an Aerosol Mass Spectrometer (AMS), but deviated from the OM time-series trends relatively more when the OM were at high concentration levels. Possible reasons for the differences among the measurement results are discussed.

Key words organic matter; elemental carbon; online monitoring; comparison

国家自然科学基金(20777001, 40805049)和深圳市科技计划项目(CXB200903090046A)资助

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-28; 网络出版日期: 2010-12-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20101223.1043.006.html>

大气气溶胶组分中有相当一部分是含碳物质,碳质可占气溶胶质量浓度的 20% ~ 80%^[1-2]。碳质气溶胶主要由 3 种物质组成:有机物(organic matter,简称 OM)、元素碳(elemental carbon,简称 EC)及少量的碳酸盐(carbonate carbon,简称 CC)。由于 CC 主要存在于粗粒子中,一般在研究细粒子时所说的碳质只包括 OM 和 EC^[3-4]。碳质气溶胶主要来源于燃煤、机动车排放、生物质燃烧、扬尘、建筑尘和大气中的二次转化等^[5]。这些含碳物质的性质在很大程度上影响着大气气溶胶的性质:如 EC 有很强的吸光性质,通过影响辐射强度而影响区域和全球气候变化,并造成局地能见度下降;OM 中则含有大量致癌、致突变物质,会对人体健康造成很大影响^[6-7]。因此,对大气颗粒物中含碳物质的研究具有重要意义。

国内外学者已经对碳质气溶胶的测量方法、理化性质和迁移转化规律等进行了较为深入的研究,而对于碳质气溶胶测定方法的研究是掌握其理化性质和迁移转化规律的基础。实际上,气溶胶中有机物和元素碳的界定与分析方法有很大关系。较为传统的分析方法是将大气颗粒物采集到石英纤维膜或玻璃纤维膜上,然后再将样品膜送入实验室进行分析。通过热化学法进行测定时,以某一加热温度为分割点,将到达该温度之前在惰性气体氛围下挥发氧化的碳认为是有机物中的碳,称为有机碳(organic carbon,简称 OC),而将超过该温度之后在高温有氧环境下挥发氧化的碳认为是元素碳。后来的研究发现升温过程中存在显著的有机物碳化问题^[8-12],于是引进激光监测采样膜吸光度在升温过程中的变化以进行碳化校正,称为热/光法。另外,由于元素碳通常被认为是大气中唯一的吸光性颗粒态组分,因此还可以通过测定气溶胶吸光性大小的方法来测定的元素碳含量,此时元素碳被称为黑碳(black carbon,简称 BC)。在实际应用中,BC 和 EC 常常混用。

细粒子来源的复杂性和天气系统的快速变化导致其在大气中的化学组成和浓度水平也都在实时演变,不能在较高时间分辨率下精确、细致地掌握细粒子污染的变化过程,就无法深入地了解和监控大气污染的本质原因和形成机理。因此,在线监测细粒子的理化性质显得越来越重要。目前可在线监测碳质气溶胶的商品化仪器主要有气溶胶质谱仪、单颗粒黑碳光度计、黑碳仪和在线 EC/OC 分析仪等。除

了黑碳仪外,其他几种在线仪器在国内的应用还很少。随着对我国碳质气溶胶研究的不断深入,这些在线仪器今后在国内的应用必将越来越广泛。

该研究于 2009 年秋季在北京大学深圳研究生院校园内对目前国际上应用较多的几种碳质气溶胶在线观测仪器进行了实际大气观测比对,分析比较不同仪器的观测结果,初步判断这些仪器在国内大气污染观测中的准确性和差异性,为研究人员掌握这几种在线碳质气溶胶监测仪器的特性提供第一手资料,为基于野外观测的大气化学机理研究提供误差来源信息。

1 实验仪器

该次比对实验采样地点位于深圳大学城北京大学园区内。该采样点位于深圳市区西北部,周边有大型水库和疗养基地,植被覆盖率较高,无大的工业污染源。采样器架设在 E 栋教学楼楼顶(距离地面约 20 m),切割头离楼顶约 1.5 m,楼顶全部为水泥铺盖,不易起尘。采样时间从 2009 年 10 月 31 日 0 时开始,到 11 月 8 日 0 时结束,为期 8 天,共计 192 h。参与比对的仪器及其测量原理简介如下。

1.1 AE-31 型黑碳仪在线监测 BC

该次比对观测采用美国 Magee 科技公司生产的 AE-31 型多波段黑碳仪实时在线监测细粒子中 BC 浓度。黑碳仪工作时,环境空气连续地通过滤膜带的采样区,颗粒物被收集在该部分滤膜上;每隔一个时间周期,仪器测量有光源照射和无光源照射两种条件下透过石英滤膜采样区和参照区的光强,并根据光强信号计算每个测量周期内采样区的光学衰减增量,最终得出该周期内收集的黑碳气溶胶质量和相应的黑碳质量浓度。其具体原理及分析过程见文献[13]。该黑碳仪检测限为 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,精密度 $<5\%$,时间分辨率为 5 min,采集的颗粒物粒径 $<2.5 \mu\text{m}$,计算黑碳浓度时采用标准测量波长 880 nm 下的监测数据。比对实验开始前对仪器进行了检测和流量标定。

1.2 单颗粒黑碳光度计在线监测 BC

该次比对观测采用美国 Droplet Measurement Technologies(DMT)公司生产的单颗粒黑碳光度计(Single Particle Soot Photometer,简称 SP2)在线测量黑碳气溶胶。单颗粒黑碳光度计利用激光诱导的白炽光来定量单个气溶胶颗粒的黑碳含量,具有灵敏度高、响应速度快和对黑碳选择性强等特性。引入

仪器的气流中吸光的、难熔的黑碳颗粒被一束强激光照射升温至汽化,发出可见的白炽光,其辐射强度与颗粒中黑碳的质量呈正比,因此可以通过其白炽光辐射强度来计算获得单个颗粒的黑碳含量,再累加出整个粒子群中的黑碳浓度。其具体原理及分析过程参见文献 [4]。该单颗粒黑碳光度计检测限 $<10 \text{ ng/m}^3$,精密密度 $<3\%$,时间分辨率为 $<1 \text{ s}$,采集的颗粒物粒径 $<2.5 \text{ }\mu\text{m}$,并于比对实验开始前进行激光校正、流量校正和响应校正。

1.3 气溶胶质谱仪在线监测有机物

该次比对观测采用美国 Aerodyne 公司生产的飞行时间气溶胶质谱仪 (Aerosol Mass Spectrum, 简称 AMS)。该仪器能够实时在线测量大气细粒子中硫酸盐、硝酸盐、铵盐和有机物等非难熔组分的浓度水平和粒径分布。气溶胶质谱仪通过一个空气动力学透镜将颗粒采集进来,同时形成一个很集中的粒子束后进入粒径测定区,不同大小的粒子以不同时间飞行穿过粒径测定区,然后到达高温状态下的热体表面 (约 $600 \text{ }^\circ\text{C}$),非难熔组分就会在高真空环境下被快速蒸发,再经电子轰击电离 (EI 源) 形成离子碎片后进入质谱检测,获得粒子的化学组成信息。其具体原理及分析过程参见文献 [5]。该气溶胶质谱仪的检测限低于 3 ng/m^3 ,精密密度 $<3\%$,时间分辨率为 2 min ,粒径检测范围为 $60 \sim 1000 \text{ nm}$ 。采样前对仪器进行流量标定、响应校正和粒径校正。

1.4 光/热法在线测量 OC 和 EC

该次对比对观测采用美国 Sunset 实验室生产的光/热法半连续 EC/OC 分析仪 (Sunset Laboratory Semi-Continuous EC/OC analyzer, Model 3 型),其是

一个全自动半连续式大气中 EC/OC 在线分析仪器。该在线 EC/OC 分析仪自动利用石英膜采集气溶胶样品,并采用光/热法在线测量颗粒物中的 OC 和 EC,其具体原理及分析过程参见文献 [6]。该在线 EC/OC 分析仪检测限为 $0.4 \text{ }\mu\text{gC/m}^3$,精确度 $<5\%$,时间分辨率为 1 h (其中采样 40 min ,分析 20 min),采集的颗粒物粒径 $<2.5 \text{ }\mu\text{m}$,温度程序采用 NIOSH/TOT 分析方法,具体分析过程参见文献 [7]。采样前进行流量标定和响应标定。

2 结果与讨论

比对观测期间各仪器监测所得主要数据见表 1。

表 1 比对观测期间各在线仪器的监测结果

Table 1 The monitoring results of four online instruments during the monitoring period $\mu\text{g/m}^3$

仪器	最小值	最大值	中位数	平均值
黑碳仪-BC	1.12	27.69	12.30	8.04
单颗粒黑碳光度计-BC	0.88	25.22	11.70	7.67
在线 EC/OC 分析仪-EC	0.74	18.38	9.23	6.09
气溶胶质谱仪-OM	2.93	59.93	28.69	20.70
在线 EC/OC 分析仪-OC	2.21	31.24	20.04	12.70

2.1 黑碳仪与单颗粒黑碳光度计数据比对

由于黑碳仪与单颗粒黑碳光度计数据监测的时间分辨率不同,所以以黑碳仪时间为标准 (时间分辨率为 5 min),将单颗粒黑碳光度计数据在对应时间内做平均,以便进行比对。从图 1 可以看出黑碳仪与单颗粒黑碳光度计所测得的 BC 浓度变化趋势非常吻合,线性相关性系数 $R^2 = 0.97$,且斜率等于 1.00,截距接近 0 (如图 2)。由于这两台仪器都是

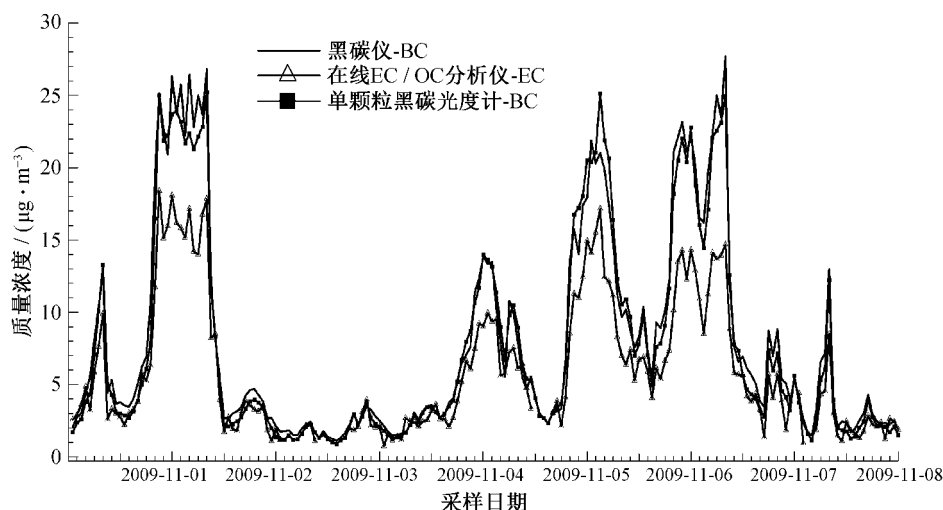


图 1 在线 EC/OC 分析仪与黑碳仪及单颗粒黑碳光度计在线监测 EC 数据变化趋势图

Fig. 1 The time series of EC concentrations by the online EC/OC analyzer and the aethalometer

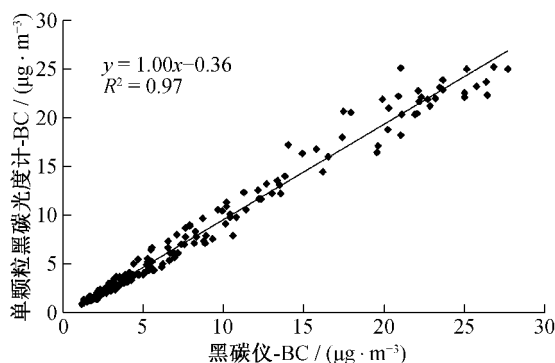


图 2 黑碳仪与单颗粒黑碳光度计在线监测 BC 数据线性相关图

Fig. 2 The linear correlation of BC concentrations by aethalometer and SP2

利用光学原理测定气溶胶 BC, 因此这两台仪器对气溶胶黑碳的测定有很好的可比性。

2.2 在线 EC/OC 分析仪与单颗粒黑碳光度计和黑碳仪数据比对

由于在线 EC/OC 分析仪时间分辨率为 1 h, 其中采样时间为 40 min (整点前后各 20 min), 所以将单颗粒黑碳光度计和黑碳仪数据分别在相应时间段内做平均, 以便进行比对。从图 1 中可以看出在线 EC/OC 分析仪所测得 EC 结果与黑碳仪和单颗粒黑碳光度计监测所得的 BC 结果变化趋势比较一致, 相关系数分别为 $R^2 = 0.95$ 和 $R^2 = 0.97$, 如图 3 和 4 所示; 相关的斜率分别为 0.62 和 0.63, 说明在线 EC/OC 分析仪的 EC 测量结果总体偏低 30% ~ 40%。在图 1 中还可看出, 在 BC 高浓度时, 如 11 月 1 日、15 日和 16 日 0 时前后, 在线 EC/OC 分析仪测量结果偏低体现得比较明显。

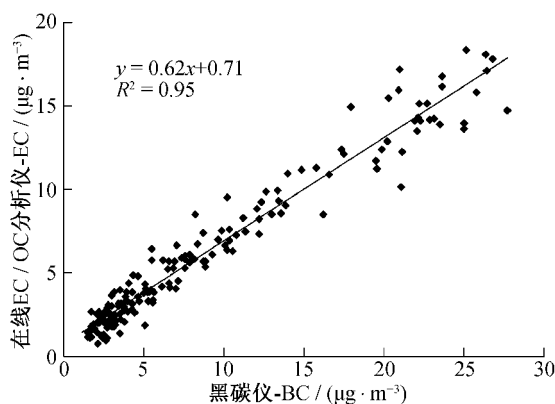


图 3 在线 EC/OC 分析仪与黑碳仪在线监测 EC 数据线性相关图

Fig. 3 The linear correlation of BC concentrations by the aethalometer and online EC/OC analyzer

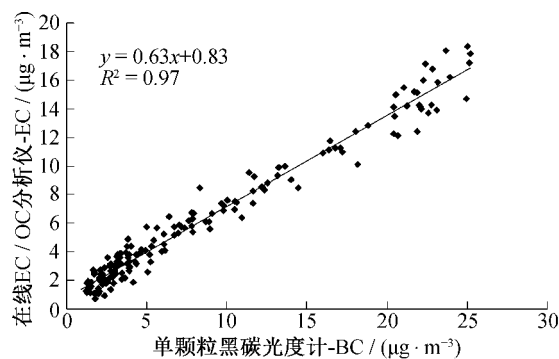


图 4 在线 EC/OC 分析仪与单颗粒黑碳光度计在线监测 EC 数据线性相关图

Fig. 4 The linear correlation of BC concentrations by the SP2 and online EC/OC analyzer

结合其他学者对 EC 不同测量方法比对研究的结论, 分析该比对实验的观测数据差异原因主要有以下几方面。首先, 以往研究发现当采样膜上碳质气溶胶浓度较高时, 热/光法碳质分析仪的激光信号值回到初始值的时间将会延迟, 从而使激光校正的 OC 碳化值偏大, 进而导致 EC 的最终结果偏小 [8-20]。Chen 等 [21] 的研究表明激光对于采样膜上原有的 EC 和由于碳化产生的 EC 的响应并不一样, 而热/光法碳质分析仪的原理假设它们的光学性质相同。因此, 当气溶胶浓度较高而碳化产生的 EC 量较大时, 在线 EC/OC 分析仪测量结果的不确定性增大, 从而造成其与另外两台仪器监测结果的差异更加明显。

其次, 由于黑碳仪和单颗粒黑碳光度计都是利用黑碳光学原理进行 BC 质量的测量, 而这与 BC 光衰减系数 (σ_{ATN}) 有很大关系。研究表明黑碳仪测定时使用的 σ_{ATN} 值偏高, 而实际上其并非恒值且大小变化与 BC 浓度高低变化一致, 所以这就会造成当 BC 浓度较高时所测得的 BC 最终结果偏高 [8, 22-23]。Lioussé 等 [24] 及 Kirchstetter 等 [25] 均指出不同研究中应用的 σ_{ATN} 变化范围可达 5 ~ 20 m²/g。而 LaRosa 等 [26] 研究表明当污染物浓度增高时, BC 浓度读数变化率趋向于增加。Snyder 等 [27] 研究表明吸光性碳质的 σ_{ATN} 值会随着一天时间变化而变化, 其最小值出现在早晨交通高峰期, 最大值出现在夜晚。而从图 1 可以看出, 该比对实验中 BC 峰值亦出现在一天的晚上, 而此时热/光法分析仪所得结果与另外两台光学监测仪所得结果相比明显偏低。

此外, Kanaya 等 [28] 基于不同仪器的同步观测结果指出, 当测得的 BC/EC 比值增大时, 很可能是由

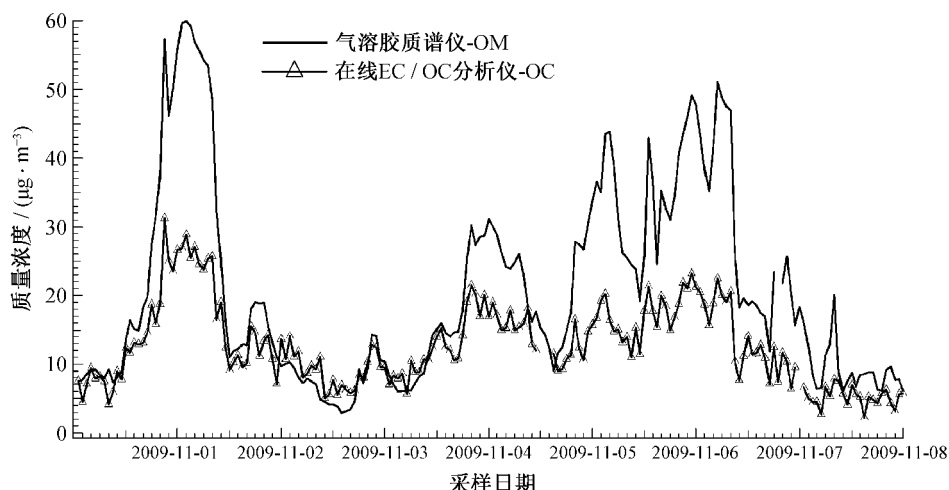


图 5 在线 EC/OC 分析仪测得的 OC 与气溶胶质谱仪测得的 OM 数据变化趋势图

Fig. 5 The time series of OC concentrations by the online EC/OC analyzer and OM concentrations by the AMS

于 EC 颗粒包裹物(如硫酸盐、有机物)的聚焦效应导致 EC 吸光性增大,进而使计算所得的 BC 含量较实际含量偏高。

2.3 在线 EC/OC 分析仪与气溶胶质谱仪数据比对

以在线 EC/OC 分析仪时间点为基准,在其采样时间段内对气溶胶质谱仪相应的有机物(OM)数据做平均,然后与在线 EC/OC 分析仪监测所得 OC 值进行比对,变化趋势如图 5。可以看出两者的变化趋势基本一致, $R^2 = 0.83$, 总体上符合较好。Venkatachari 等^[29] 也曾在 2004 年做过气溶胶质谱仪 OM 与 Sunset 在线 EC/OC 分析仪 OC 值的比对。相关性在 0.57 ~ 0.87 之间,与本研究结论相似。从图 6 中还可以看出,当气溶胶质谱仪测得的 OM 浓度较高时 ($> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$),绝大多数数据点位于回归

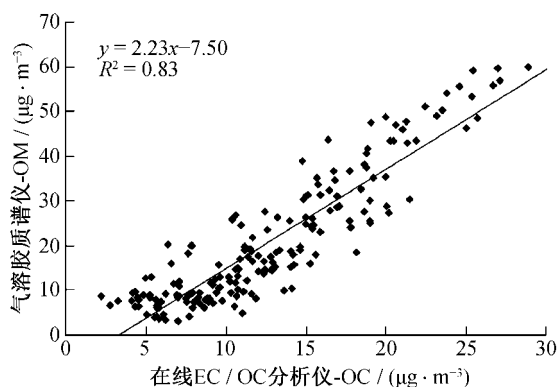


图 6 在线 EC/OC 分析仪测得的 OC 与气溶胶质谱仪测得的 OM 数据线性相关图

Fig. 6 The linear correlation of OC concentrations by the online EC/OC analyzer and OM concentrations by the AMS

直线的上方,说明此时在线 EC/OC 分析仪测量结果更显著地低于气溶胶质谱仪的测量结果。为了进一步探求不同浓度范围内 OC 与 OM 的关系,以 $\text{OM} = 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为界将不同浓度范围的 OM 和 OC 分别进行比对,如图 7(a) 和 7(b) 所示。当 OM 浓度小于 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,OM/OC 的斜率为 1.36,这个系数接近气溶胶研究中常用的 OC 向 OM 转换的经验系数

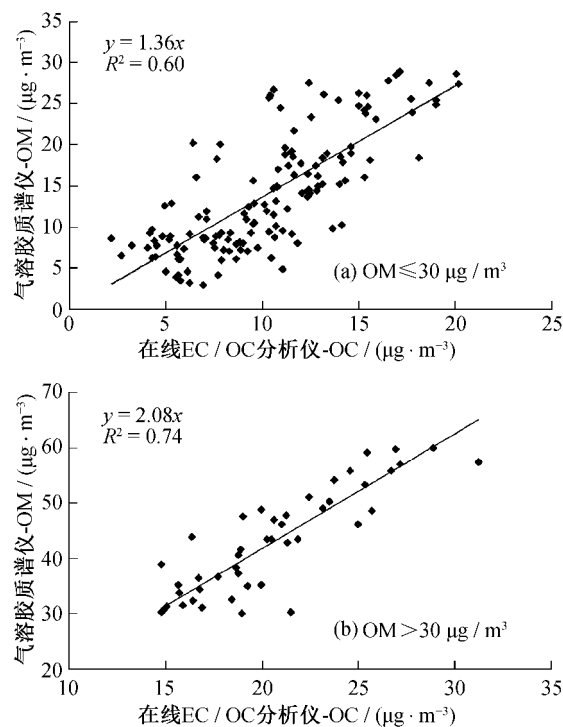


图 7 不同浓度范围下在线 EC/OC 分析仪测得的 OC 与气溶胶质谱仪测得的 OM 数据线性相关图

Fig. 7 The linear correlation of OC concentrations by the online EC/OC analyzer and OM concentrations by the AMS at different concentrations

1.4; 但当 OM 浓度大于 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, OM/OC 的斜率为 2.08, 显著大于 1.4。Chen 等^[60]在香港地区的研究表明, 当该地区气溶胶污染较为严重时, 常常伴随有大量的高氧化态二次有机气溶胶生成, 而此时有机气溶胶的 OM/OC 比值经常超过 2, 与本研究结论一致。

另外, 高浓度 OM 时在线 EC/OC 分析仪的测量结果相对偏低还可能是受到半挥发性有机物的影响。Gui 等^[61]的研究表明在白天与晚上的颗粒物采样过程中, 颗粒有机物会有 42% ~ 62% 的半挥发性有机物损失。由于在线 EC/OC 分析仪在石英膜采样之前装有有机物平行扩散管对挥发性有机物进行吸附消除, 就可能破坏原有颗粒物表面的气固平衡, 在较长的采样时间中 (40 min) 造成石英膜上半挥发性有机物的挥发, 进而影响 OC 的实际含量, 而这种效应在高浓度气溶胶污染时可能更加明显^[62-66]。

3 结论

在本次比对观测实验中得到如下初步结论。

1) 美国 DMT 公司生产的单颗粒黑碳光度计和 Magee 公司生产的黑碳仪测量大气颗粒物中的 BC 具有高度一致性和可比性, 线性相关度达 0.97, 斜率为 1.00。

2) 美国 Sunset 实验室生产的在线 EC/OC 分析仪测量的 EC 与黑碳仪和单颗粒黑碳光度计也具有较好的可比性, 但在浓度绝对值上整体偏低 30% ~ 40%。

3) 美国 Sunset 实验室生产的在线 EC/OC 分析仪测得的 OC 值与美国 Aerodyne 公司生产的气溶胶质谱仪测得的 OM 值也表现出较好的相关性, 但在 OM 高浓度时在线 EC/OC 分析仪的测量结果相对偏低。

致谢 研究工作得到曾立武老师的帮助, 表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Rogge W F, Hildemann L M, Mazruek M A, et al. Quantification of urban organic aerosols at a molecular level: Identification, abundance and seasonal variation. *Atmos Environ*, 1993, 27: 1309-1330
- [2] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 305-327

- [3] Clarke A G, Karani G N. Characterization of the carbonate content of the atmospheric aerosols. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, 14: 119-128
- [4] 王玮, 陈宗良. 大气气溶胶中无机碳和有机碳. *环境科学丛刊*, 1991, 12(2): 27-34
- [5] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源研究. *环境科学研究*, 2005, 18(5): 0001-05
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2001: radiative forcing of climate*. New York: Cambridge University Press, 2001
- [7] 任丽新, 游荣高, 吕位秀, 等. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响. *气候与环境研究*, 1999, 49(1): 67-73
- [8] Hitzenberger R, Jennings S G, Larson S M, et al. Inter-comparison of measurement methods for black carbon aerosols. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 2823-2833
- [9] Yang H, Yu J Z. Uncertainties in charring correction in the analysis of elemental and organic carbon in atmospheric particles by thermal/optical methods. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 5199-5204
- [10] Turpin B J, Saxena P, Allen G, et al. Characterization of the southwestern desert aerosol, Meadview, AZ. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1997, 47: 344-356
- [11] Allen G A, Lawrence J E, Koutrakis P. Field validation of a semi-continuous method for aerosol black carbon (aethalometer) and temporal patterns of summer time hourly black carbon measurements in southwestern PA. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(5): 817-823
- [12] Chow J C, Watson J G, Crow D, et al. Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. *Aerosol Science and Technology*, 2001, 34: 23-34
- [13] Michelle S, Nelson T, Sandberg J. Particle identification by laser-induced incandescence in a solid-state laser cavity. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 26-37
- [14] Schwarz J P, Gao R S, Fahey D W, et al. Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D16207
- [15] Canagaratna M R, Jayne J T, Jimenez J L, et al. Chemical and microphysical characterization of ambient aerosols with the aerodyne aerosol mass spectrometer. *Mass Spectrometry Reviews*, 2007, 26: 185-222
- [16] NIOSH. Method 5040 Issue 3 (Interim): elemental

- carbon (diesel exhaust). NIOSH manual of analytical methods. Cincinnati, OH: National Institute of Occupational Safety and Health, 1999
- [7] Lin P, Hu M, Deng Z, et al. Seasonal and diurnal variations of organic carbon in $PM_{2.5}$ in Beijing and the estimation of secondary organic carbon. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D00G11
- [8] Petzold A, Kopp C, Niessner R. The dependence of the specific attenuation cross-section on black carbon mass fraction and particle size. *Atmospheric Environment*, 1997, 31: 661-672
- [9] Bond T C, Anderson T L, Campbell D. Calibration and inter-comparison of filter based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 1999, 30: 582-600
- [20] Kopp C, Petzold A, Niessner R. Investigation of the specific attenuation cross-section of aerosols deposited on fiber filters with a polar photometer to determine black carbon. *Journal of Aerosol Science*, 1999, 30: 1153-1163
- [21] Chen L W, Chow J C, Watson J G, et al. Modeling reflectance and transmittance of quartz fiber filter samples containing elemental carbon particles: implications for thermal/optical analysis. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 35: 765-780
- [22] Jeonga C H, Hopkea P K, Eugene K, et al. The comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon and Aethalometer black carbon measured at multiple monitoring sites. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 5193-5204
- [23] Jeong C H, Hopke P K, Kim E, et al. The comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon and aethalometer black carbon measured at multiple monitoring sites. *Atmos Environ*, 2004, 38: 5193-5204
- [24] Liousse C, Cachier H, Jennings S G. Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: variations of the specific attenuations cross-section, σ . *Atmos Environ*, 1993, 27A: 1203-1211
- [25] Kirchstetter T W, Novakov T. Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods. *Atmos Environ*, 2007, 41: 1874-1888
- [26] LaRosa L E, Buckley T J, Wallace L A. Real-time indoor and outdoor measurements of black carbon in an occupied house: an examination of sources. *J Air & Waste Manage Assoc*, 2002, 52: 41-49
- [27] Snyder D C, Schauer J J. An inter-comparison of two black carbon aerosol instruments and a semi-continuous elemental carbon instrument in the urban environment. *Aerosol Science and Technology*, 2007, 41: 463-474
- [28] Kanaya Y, Komazaki Y, Pochanart P, et al. Mass concentrations of black carbon measured by four instruments in the middle of Central East China in June 2006. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 7637-7649
- [29] Venkatachari P, Zhou L M, Hopke P K, et al. An inter-comparison of measurement methods for carbonaceous aerosol in the ambient air in New York City. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40: 788-795
- [30] Chen X, Yu J Z. Measurement of organic mass to organic carbon ratio in ambient aerosol samples using a gravimetric technique in combination with chemical analysis. *Atmos Environ*, 2007, 41: 8857-8864
- [31] Gui W X, Eatough D J, Estough N L. Fine particulate organic material in the Los Angeles basin — I: assessment of the high-volume Brigham Young University Organic Sampling System, BIG BOSS. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1998, 48: 1024-1037
- [32] Polidori A, Turpin B J, Lim H J, et al. Local and regional secondary organic aerosol: insights from a year of semi-continuous carbon measurements at Pittsburgh. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40: 861-872
- [33] Park S S, Harrison D, Pancras J P, et al. Highly time-resolved organic and elemental carbon measurements at the Baltimore Supersite in 2002. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: doi:10.1029/2004JD004610
- [34] Lim H J, Turpin B J, Edgerton E, et al. Semi-continuous aerosol carbon measurements: comparison of Atlanta Supersite measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: doi:10.1029/2001JD001214
- [35] Kondo Y, Komazaki Y, Miyazaki Y, et al. Temporal variations of elemental carbon in Tokyo. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: doi: 10.1029/2005JD006257
- [36] Solomon P, Baumann K, Edgerton E, et al. Comparison of integrated samplers for mass and composition during the 1999 Atlanta Supersites project. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: doi: 10.1029/2001JD001218