

王强, 钟琪, 郭杰, 等. 2017. 基于腔减相移光谱技术测量大气气溶胶消光系数的应用研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (1): 108–114. Wang Qiang, Zhong Qi, Guo Jie, et al. 2017. An application study on measurement of atmospheric aerosol extinction coefficient based on cavity attenuated phase shift spectroscopy technique [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (1): 108–114, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16084.

基于腔减相移光谱技术测量大气气溶胶消光系数的应用研究

王强¹ 钟琪¹ 郭杰² 于志伟² 杨凯¹

¹ 中国环境监测总站, 北京 100012

² 杭州泽天科技有限公司, 杭州 310052

摘 要 基于腔减相移光谱 (CAPS) 技术检测灵敏度高、光源性价比好、容易控制和有效吸收光程长等优点, 搭建了一套基于 CAPS 技术的连续测量大气气溶胶消光系数的监测系统。测试系统高反射镜片反射率约为 0.9999, 对应有效光程约为 4.4 km; 通过 Allan 方差测试分析系统最佳积分时间约为 80 s, 对应消光系数检测极限为 0.06 Mm⁻¹; 将系统应用于实际大气气溶胶消光系数的 12 个周期和 48 h 连续监测, 显示空腔相移基本稳定, 样品测量相移偏移明显, 反演得到的大气能见度结果稳定可靠。由此表明, 研制的基于 CAPS 技术的大气气溶胶消光系数连续测量系统应用于实际的测量是完全可行的。

关键词 腔减相移光谱 气溶胶 消光系数 测量系统

文章编号 1006-9585 (2017) 01-0108-07

中图分类号 P415

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16084

An Application Study on Measurement of Atmospheric Aerosol Extinction Coefficient Based on Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy Technique

WANG Qiang¹, ZHONG Qi¹, GUO Jie², YU Zhiwei², and YANG Kai¹

¹ China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012

² Hangzhou Zetian Technology Company Limited, Hangzhou 310052

Abstract Cavity attenuated phase shift spectroscopy (CAPS) technique has many advantages such as the impressive detection sensitivity and the high performance-price ratio of light source. It is also easy to control and has a longer effective absorption optical path. Based on the above prominent advantages, a continuous measurement system of atmospheric aerosol extinction coefficient using the CAPS is developed. The cavity reflectivity of the system is about 0.9999, and the corresponding effective optical path of 4.4 km is calculated. Based on the analysis of Allan variance, the best integration time of the system is 80 s, and the corresponding extreme value of extinction coefficient detection is 0.06 Mm⁻¹. The CAPS system is applied to the 12 cycles and 48-hour continuous monitoring for atmospheric aerosol extinction coefficient. The result shows that the empty cavity phase shift is basically stable, the cavity attenuated phase

收稿日期 2016-04-22; 网络预出版日期 2016-08-30

作者简介 王强, 男, 1977 年出生, 硕士, 正高级工程师, 主要从事大气环境监测技术、影响因素、仪器设备及相关应用质量保证质量控制研究。

E-mail: wangqiang@cnemc.cn

通讯作者 杨凯, E-mail: yangkai@cnemc.cn

资助项目 国家重大科学仪器设备开发专项项目 2013YQ060569

Funded by National Key Foundation for Scientific Instrument and Equipment (Grant 2013YQ060569)

shift of the sample measurement is evident, and the retrieved atmospheric visibility is reliable. The above results suggest that the continuous measurement system of atmospheric aerosol extinction coefficient based on the CAPS can be used for practical atmospheric aerosol measurement.

Keywords Cavity attenuated phase shift spectroscopy, Aerosol, Extinction coefficient, Measurement system

1 引言

近年来,我国城市雾霾重污染天气逐步引起广泛关注并呈现出复合区域性特征(王自发等, 2014)。气溶胶作为主要污染物已经被认为是形成重污染天气的主要“贡献”者之一(吴兑, 2012);同时气溶胶对人类健康、大气气候、空气质量和生态变化等也有着严重的影响(孙颖等, 2011)。在多种影响气候变化的影响因子中,气溶胶的辐射强迫作用是最不确定的因子之一(张小曳, 2007),然而气溶胶辐射强迫对分析大气的辐射平衡、化学过程、气候变化、污染源解析等却有着重大的科学意义(Ruan et al., 2011)。因此,国内外有关气溶胶辐射强迫的测量一直是气候变化过程和大气污染控制研究的热点(王志立等, 2009; 张小玲等, 2014)。随着气溶胶辐射强迫对气候影响研究的深入发展,准确测量气溶胶光学特性参数显得尤为重要。气溶胶光学特性参数恰恰是气溶胶气候模式研究中的关键,对于提高气候模式预报精度有着重要的意义。气溶胶消光系数作为反映大气能见度的衡量指标之一(Li et al., 2011)与气溶胶辐射吸收、散射和单次反照率有着密切关系;因此,准确测量气溶胶消光特性对了解气溶胶辐射强迫有着重要的科学意义。

目前,测量大气气溶胶消光系数的技术主要包括:激光雷达技术、脉冲腔衰荡光谱技术和太阳光度计技术等。激光雷达技术在测量气溶胶消光特性时可同时反演出气溶胶其它的多种光学特性参数(Karol, 2013),但其仪器价格较高,系统体积较大,且必须克服较强的背景干扰。脉冲腔衰荡光谱技术,其测量气溶胶消光特性精度较高(Butler et al., 2009),但所使用的激光器成本最高可达到LED(Light Emitting Diode)光源的几千倍。太阳光度计测量技术操作简单,仪器体积小且方便携带(毛节泰等, 2002),但受天气影响较大,遇到阴天或者雨雪天则测量精度下降,甚至很难完成正常测量。

腔减相移光谱技术(Cavity Attenuated Phase shift Spectroscopy, CAPS)在国内早期的研究是测量平面镜反射率(龚元和李斌成, 2007),结果表明测量反射率精度高,这为测量镜面反射率提供了一种更加简单可靠的方法。近年来,CAPS 技术被应用于大气测量研究(葛宝珠等, 2014),利用 CAPS 光谱法与传统荧光法测量大气中 NO_2 浓度,研究分析 CAPS 光谱法的测量优点,同时也验证了 CAPS 技术用于大气测量的可行性。

为了解决上述气溶胶消光系数不同测量方法存在的问题,本文将 CAPS 系统应用于大气气溶胶消光系数的测量,研制搭建了一套基于 CAPS 技术的大气气溶胶消光系数测量系统并开展了相关应用测试研究。首先将该系统用于测量谐振腔镜反射率,确定系统 LED 光源的最佳调制频率;其次通过对该测量系统的稳定性进行测试,进一步确保该测量系统测量气溶胶消光系数的可行性并完善系统的测量性能,同时通过 Allan 方差分析,获取了该测量系统的最佳测量积分时间和消光系数最小检测极限;最后选取杭州市滨江地区应用该测量系统完成了针对大气气溶胶消光系数连续 48 h 的在线实时测量,对系统的综合应用情况和能力进行了有效评估。

2 测量原理和方法

CAPS 技术具有检测灵敏度高、光源性价比好、容易控制和有效吸收光程长等优点,因此相移光谱技术在实际应用过程中具有更加突出的优势(Herbelin and McKay, 1981; Ge et al., 2013; Petzold et al., 2013; Wood and Charest, 2014)。CAPS 技术测量气溶胶消光系数的原理、试验流程和光路调节在相关文献中已有较详细的介绍(郭杰, 2015)。在 CAPS 测量过程中光学谐振腔内的光子寿命是通过测量经过调制的连续光在腔体前后的相位变化来实现的;调制的连续光束通过光学谐振腔时被检测器检测,检测到的光信号与调制的入射光信号之间的相移表示为 φ ;当腔体为空腔时,表示为 φ_0 ,

φ_0 与光子在腔内的时间常数(τ)具有相关性, 其相关关系为

$$\tan(\varphi_0) = 4\pi f \tau, \quad (1)$$

其中, f 表示入射光调制频率; τ 为空腔时间常数, 计算公式为

$$\tau = nt_c = \frac{2Ln}{c}, \quad (2)$$

其中, t_c 表示光子在腔内一次来回所要的时间, L 表示腔体长度, c 表示光速, n 表示光子在腔内来回反射的次数:

$$n = \frac{R^2}{2(1-R^2)}, \quad (3)$$

其中, R 表示腔镜反射率。将公式 (2) 和公式 (3) 代入公式 (1) 中, 则公式 (1) 可转换为

$$\tan(\varphi_0) = \frac{4\pi L f}{c} \left(\frac{R^2}{1-R^2} \right), \quad (4)$$

当待测气溶胶进入腔内后, 检测到的光信号与调制的入射光信号之间的相移 φ 可按照以下进行计算:

$$\tan(\varphi_0) = \frac{4\pi L f}{c} \left[\frac{R^2(1-A^2)}{1-R^2(1-A^2)} \right], \quad (5)$$

其中, A 表示为每一次通过腔体的消光率, 由于 $R \approx 1$ 且 $A \ll 1$, 因此公式 (4) 和公式 (5) 可联立简化为 (Massoli et al., 2010)

$$\cot(\varphi_0) = \frac{c}{2\pi L f} (1-R), \quad (6)$$

$$\cot(\varphi_0) = \cot(\varphi_0) + \frac{c}{2\pi f} \alpha_{\text{ext}}, \quad (7)$$

其中, α_{ext} 即为测量气溶胶消光系数。因此可以通过测量进入腔体气溶胶的腔减相移光谱变化来得

到气溶胶的消光系数。

3 测量系统试验装置

CPAS 测量系统试验装置结构如图 1 所示, 主要包括 LED 光源、信号发生器、LED 驱动器、平凸透镜、滤光片、光学谐振腔、光电倍增管 (PMT) 和处理器等。LED 光源中心波长为 525 nm, 半高宽约为 12 nm, 光功率约为 150 mW, 安装在散热器上, LED 温度被控制在 $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。信号发生器输出方波信号加载在 LED 驱动上, LED 驱动输出电流信号加载在 LED 上, 信号发生器的同步信号输入到锁相放大器中作为参考信号。LED 发出调制光经过平凸透镜 (直径: 30 mm, 焦距: 60 mm) 耦合进入谐振腔内, 谐振腔由两个高反射率镜片和一根不锈钢管 (长: 60 cm, 内径: 39 mm) 组成, 腔体出气口在不锈钢管中心, 进气口在不锈钢管两端。高反射率镜片为平凹镜片, 曲率半径为 1 m, 直径为 25.4 mm, 在 495~575 nm 波段内厂家标定镜片反射率大于 0.9999, 同时为了防止镜片被颗粒物污染, 连续通入干燥高纯 N_2 ($\geq 99.99\%$) 吹扫镜片。为了抑制高反射率以外的 LED 光对试验的影响, 在腔体与 PMT 之间放置一个带通滤光片 (直径: 12.7 mm, 半高宽: 10 nm)。透过滤光片的光被 PMT 检测, 检测信号输入锁相放大器中作为输入信号。经过锁相放大器解调出检测信号与参考信号相移, 由基于 PC 的数据采集卡采集, 并存储到计算机作进一步数据分析处理。在腔体进气口连续通入干燥高纯 N_2 , 测量 φ_0 , 将干燥高纯 N_2 换成大气时, 测量 φ , 因此根据公式 (7) 就可获得大气消光系数。同时在此光源波长下, 系统的可靠性检

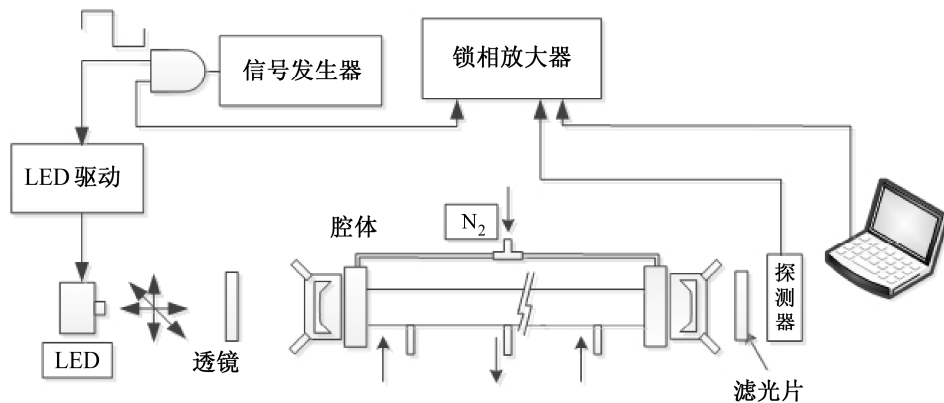


图 1 CPAS 测量系统试验装置结构图

Fig. 1 The structure of the experimental device for the CPAS (Cavity Attenuated Phase shift Spectroscopy) measuring system

查和校正方法可以依据美国沙漠实验室 Amott 小组提出的 1 ppb (10^{-9}) NO_2 气体在 532 nm 光源下消光系数为 0.36 Mm^{-1} 进行 (Amott et al., 2000), 不需要根据经典理论方法 Mie 散射 (Massoli et al., 2010) 计算消光系数。

4 试验结果与讨论

4.1 腔镜反射率测量试验

测量腔镜反射率的方法通常有以下四种 (凌六一等, 2012): (1) 通过腔衰荡吸收光谱技术 (CRDS) 测量高反镜片的反射率; (2) 测量分子的瑞利散射来测量反射率; (3) 测量定量的样品气体的吸收来测量反射率的分布; (4) 测量在相同的光谱范围也有吸收的其他气体的吸收来测量反射率。从公式 (4) 可以看出, 空腔时相移与 LED 调制频率和腔镜反射率之间具有相关关系, 这为测量腔镜反射率提供了一种更加简单的方法 (Gong and Li, 2007)。

试验方法: 利用高纯干燥氮气做背景, 改变 LED 调制频率, 测量不同调制频率下, 参考信号与 PMT 检测信号之间的相移值大小。试验结果如图 2 所示, x 轴表示 LED 调制频率, y 轴表示相移的正切值大小, 点表示不同调制频率下, 测量得到的相移的正切值, 相关曲线表示依据公式 (4) 拟合调制频率与相移的正切值的相关关系。

使用最小二乘法进行线性拟合, 拟合方程为 $y = 2\pi \times 14.56x - 0.014$ 。

拟合方程中空腔时, 光子在腔内的时间常数 τ 为 $14.56 \mu\text{s}$ 。根据拟合方程可以得腔镜反射率约为

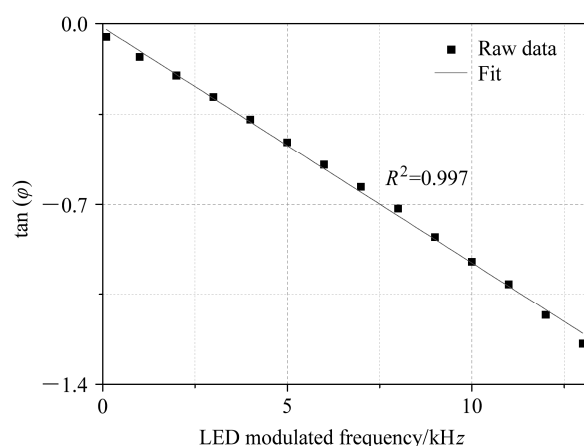


图2 空腔时 LED 光源调制频率与相移之间的相关关系

Fig. 2 The related relationship between LED (Light Emitting Diode) light source modulation frequency and phase shift under empty cavity

0.9999; 即空腔时光子在腔内行走的光程约为 4.4 km。根据参考文献 (Massoli et al., 2010) 的介绍, 一般在 LED 光源最佳调制频率下, 相移 $\phi_0 = 45^\circ$; 因此反算得到本系统 LED 光源的最佳调制频率约为 10.9 kHz。

4.2 系统稳定性和灵敏度测量试验

系统的稳定性是影响系统检测灵敏度的一个重要参数, 在本文中运用 Allan 方差分析 (Massoli et al., 2010) 来评估系统的稳定性。从理论上讲, 一个可靠的稳定体系可以通过无限次平均来获得非常高的检测灵敏度; 然而, 一般任何一个实际的测量系统只有在有限的时间内是稳定的。由于系统各个因素的不稳定性, 如光源功率的波动、波长的漂移以及检测器的噪声和温度变化引起的漂移等等。因此, 测量系统存在一个最佳积分时间, 本系统的最佳积分时间可以在稳定性测量试验中通过 Allan 方差分析得到。

试验方法: 利用高纯干燥氮气对系统的稳定性及检测灵敏度进行测量, LED 调制频率设置为 10 kHz, 氮气以 2.5 L min^{-1} 的流量通过谐振腔, 连续测量 10 h。试验结果如图 3 所示, 图 3a 为连续测量获得噪声引起的消光系数波动结果, 10 h 内的稳定性为 0.97 Mm^{-1} (1 倍标准偏差值); 图 3b 为 Allan 方差分析结果, 可以看出系统稳定性较好, 最佳积分时间约为 80 s, 对应消光系数检测极限为 0.06 Mm^{-1} , 当系统积分时间为 60 s 时, 消光系数检测极限为 0.07 Mm^{-1} , 灵敏度较高。从上述试验结果可以看出本系统的稳定性好, 测量灵敏度较高, 可以满足实验室及现场测量的基本需要。

4.3 气溶胶消光系数测量试验

在上述试验的基础上, 将 CAPS 系统用于对大气气溶胶消光系数的实际测量。

试验内容: 利用高纯干燥氮气做背景 (空腔), 每一个测量周期为 1 h, 空腔测量时间 14 min, 大气气溶胶样品测量时间 40 min, 氮气与大气置换时间 6 min; 连续测量 12 个周期。试验结果如图 4 所示, 图中 x 轴表示测量周期数, y 轴表示测量的相移大小。从图中可得出, 每一个周期中, 测量空腔时的相移基本不变, 而测量大气时相移有一定波动; 并且每个周期大气测量结果与空腔测量结果得到的相移偏移非常明显。由此可以证明, 基于 CAPS 技术的测量系统用于对大气气溶胶消光系数的测量是可行的。

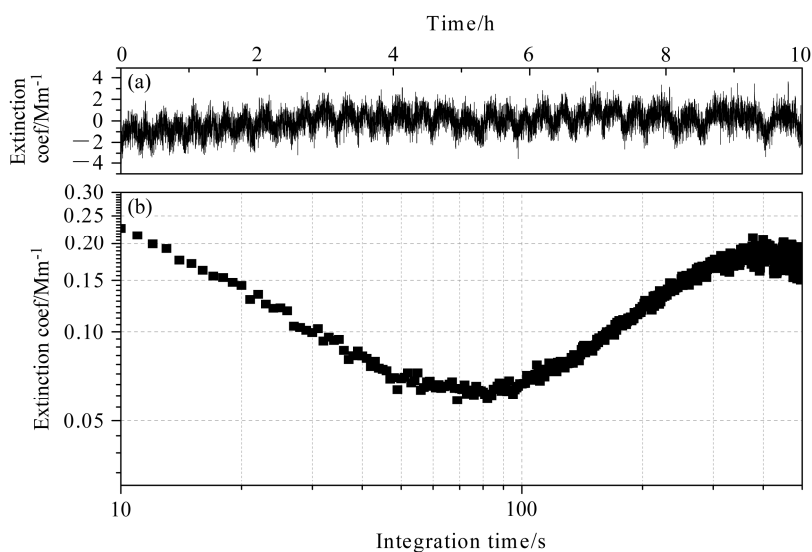


图3 (a) 系统稳定性和 (b) 测量灵敏度试验分析结果

Fig. 3 Analysis of (a) experimental results of the stability and (b) sensitivity of the measurement system

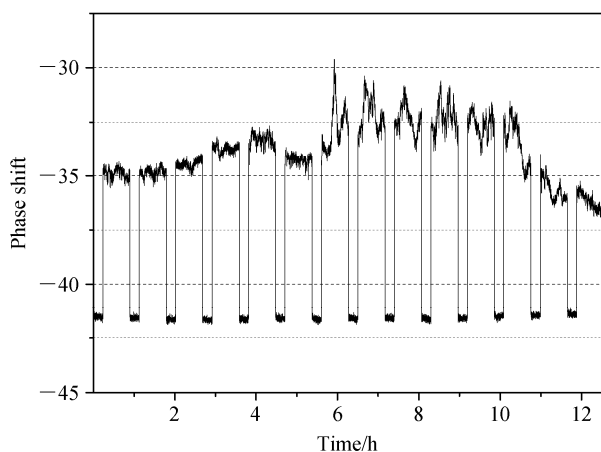


图4 CAPS 系统用于大气气溶胶消光系数的试验测量结果 (12 个周期)

Fig. 4 Measurement results of atmospheric aerosol extinction coefficient based on CAPS (12 cycles)

为进一步验证 CAPS 系统在大气能见度方面的实际应用效果,在上述测试的基础上,将 CAPS 系统应用于实地 (杭州市滨江区至仁街泰衡大楼) 大气气溶胶消光系数的连续测量,测量时间为 2 d。现场测试的同时,开展了 CAPS 系统测量可靠性的验证测试,将同一地区同时间段内大气 PM_{2.5} (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,即细颗粒物) 测量结果与消光系数测量结果进行比对,观察 PM_{2.5} 浓度与大气消光系数的变化趋势的相关情况 (徐鹏炜等, 2005)。CAPS 系统的实地测量结果如图 5 所示,大气 PM_{2.5} 浓度数据值 (测量周期

1 h) 来自全国城市空气质量实时发布网站。图 5a 图为杭州市滨江区大气 PM_{2.5} 浓度测量发布结果,图 5b 为大气气溶胶消光系数实际测量结果,最小值约为 19.00 Mm^{-1} ,最大值为 259.14 Mm^{-1} ,平均值为 79.31 Mm^{-1} ;同时通过气溶胶消光系数与能见度的反演关系 (Li et al., 2011),可以计算试验测量结果对应的大气能见度值,结果见图 5c,大气能见度最小值约为 15.09 km,最大值约为 205.89 km,平均值为 49.32 km。图 5a、5b 两图的比较可以看出,PM_{2.5} 浓度变化趋势与消光系数测量结果变化趋势基本一致。在消光系数测量结果图 5b 中出现 3 个极值,分析原因:由 CAPS 系统性能造成的影响可能性较小,这一点已经从图 3 中证明;因此很有可能是由 CAPS 测量系统附近行驶或停靠的汽车排放出的尾气造成了突然出现的测量极值。

5 结论

本文设计研制了一套基于腔减相移光谱技术 (CAPS) 的大气气溶胶消光系数连续测量系统,并对系统的基本性能和实际应用进行了相关试验和测试。(1) 腔镜反射率测量试验:测量高反镜片反射率约为 0.9999,对应有有效光程约为 4.4 km 左右,同时确定 LED 光源的最佳调制频率约为 10.9 kHz。(2) 系统稳定性和灵敏度测量试验:系统的稳定性通过 Allan 方差进行了衡量,最佳积分时间约为 80 s,对应消光系数检测极限为 0.06 Mm^{-1} ,

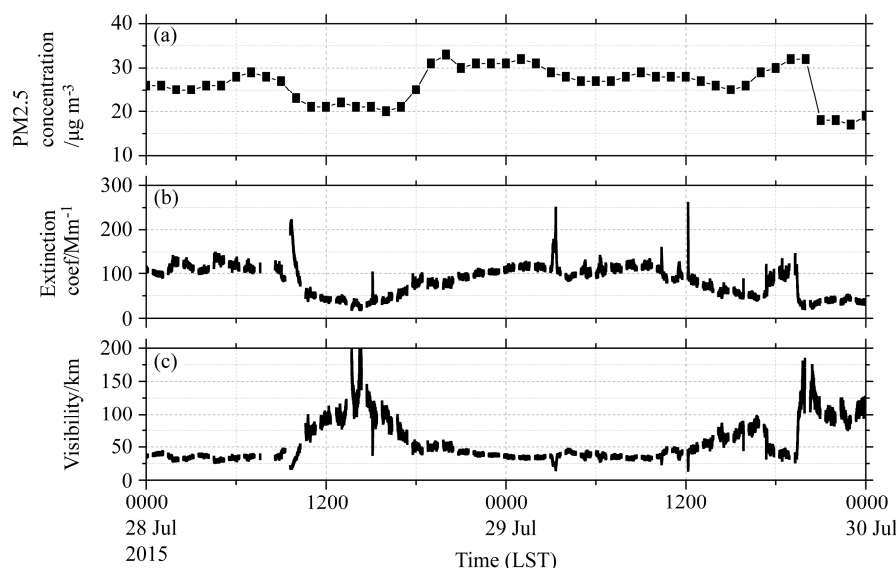


图5 CAPS 系统用于 (a) PM_{2.5} 浓度、(b) 大气气溶胶消光系数的实际测量和 (c) 反演计算得到的大气能见度结果

Fig. 5 Measurement results of (a) PM_{2.5} concentration, (b) atmospheric aerosol extinction coefficient based on CAPS, and (c) results of retrieved atmospheric visibility

当系统积分时间为 60 s 时, 消光系数检测极限为 0.07 Mm^{-1} , 证明 CAPS 系统灵敏度较高, 能够满足试验室及现场测量的需求。(3) 气溶胶消光系数测量试验: 应用 CAPS 系统连续 12 个周期对大气进行测量, 测量空腔时的相移基本不变, 而测量大气时相移有一定波动; 并且每个周期大气测量结果与空腔测量结果得到的相移偏移非常明显。(4) 将 CAPS 系统用于实地大气气溶胶消光系数两天的连续测量, 同一地区同时间段内 PM_{2.5} 浓度变化趋势与消光系数测量结果变化趋势基本一致; 气溶胶消光系数测量最小值约为 19.00 Mm^{-1} , 最大值为 259.14 Mm^{-1} , 平均值为 79.31 Mm^{-1} ; 将消光系数结果反演为大气能见度值, 最小值约为 15.09 km, 最大值约为 205.89 km, 平均值为 49.32 km。(5) CAPS 系统测量大气气溶胶消光系数的主要优势: 相比腔衰荡光 (CRDS) 技术和非相干腔增强光谱 (IBBCEAS) 技术, CAPS 系统具有成本低, 响应时间较快, 可同时测量 NO₂ 气体等技术优点。

通过系统性能和实际应用测试表明, 本文研制的基于 CAPS 技术的大气气溶胶消光系数连续测量系统应用于对大气气溶胶消光系数的测量是可行的, 系统基本克服了传统大气气溶胶消光系数测量方法存在的主要问题, 充分利用了腔减相移光谱技术检测灵敏度高、光源性价比、容易控制和有效吸收光程长等优点, 使腔减相移光谱技术在大气气

溶胶消光系数和大气能见度准确测量应用方面具有更加突出的优势; 进而将对深入研究大气气溶胶辐射强迫和气溶胶引起的环境污染和气候变化等发挥重要的基础支撑作用。

参考文献 (References)

- Arnott W P, Moosmüller H, Walker J W. 2000. Nitrogen dioxide and kerosene-flame soot calibration of photoacoustic instruments for measurement of light absorption by aerosols[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 71 (12): 4545–4552, doi: 10.1063/1.1322585.
- Butler T J A, Mellon D, Kim J, et al. 2009. Optical-feedback cavity ring-down spectroscopy measurements of extinction by aerosol particles [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 113 (16): 3963–3972, doi: 10.1021/jp810310b.
- Ge B Z, Sun Y L, Liu Y, et al. 2013. Nitrogen dioxide measurement by cavity attenuated phase shift spectroscopy (CAPS) and implications in ozone production efficiency and nitrate formation in Beijing, China [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (1): 1–13, doi: 10.1029/2012JD018174.
- 葛宝珠, 王自发, 孙业乐, 等. 2014. 光谱法与传统荧光法测量北京大气 NO₂ 浓度及其对臭氧生成效率的影响 [J]. *环境化学*, 33 (9): 1558–1565.
- Ge Baozhu, Wang Zifa, Sun Yele, et al. 2014. Comparison between cavity attenuated phase shift spectroscopy (CAPS) and chemiluminescence-based (CL) instrument in NO₂ measurement in Beijing, China [J]. *Environmental Chemistry (in Chinese)*, 33 (9): 1558–1565, doi: 10.7524/j.issn.0254-6108.2014.09.016.
- 龚元, 李斌成. 2007. 相移光腔衰荡高反射率测量中的拟合方法[J]. *强激光与粒子束*, 19 (8): 1287–1290.
- Gong Yuan, Li Bincheng. 2007. Fitting method for high reflectivity measurement with phase-shift cavity

- ring-down technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (in Chinese), 19 (8): 1287–1290.
- Gong Y, Li B C. 2007. High-reflectivity measurement with a broadband diode laser based cavity ring-down technique [J]. *Applied Physics B*, 88 (3): 477–482, doi: 10.1007/s00340-007-2703-x.
- 郭杰. 2015. 相移光谱技术在气溶胶消光系数测量中的应用研究 [D]. 浙江师范大学硕士学位论文, 58pp.
- Guo Jie. 2015. Application research of phase shift spectroscopy technology measurements of aerosol extinction coefficient [D]. M. S. thesis (in Chinese), Zhejiang Normal University, 58pp.
- Herbelin J M, McKay J A. 1981. Development of laser mirrors of very high reflectivity using the cavity-attenuated phase-shift method [J]. *Appl. Opt.*, 20 (19): 3341–3344, doi: 10.1364/AO.20.003341.
- Karol Y, Tanré D, Goloub P, et al. 2013. Airborne sun photometer PLASMA: Concept, measurements, comparison of aerosol extinction vertical profile with Lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6 (9): 2383–2390, doi: 10.5194/amt-6-2383-2013.
- Li L, Chen J M, Chen H, et al. 2011. Monitoring optical properties of aerosols with cavity ring-down spectroscopy [J]. *Journal of Aerosol Science*, 42 (4): 277–284, doi: 10.1016/j.jaerosci.2011.02.001.
- 凌六一, 秦敏, 谢品华, 等. 2012. 基于LED光源的非相干宽带腔增强吸收光谱技术探测 HONO 和 NO₂ [J]. *物理学报*, 61 (14): 140703.
- Ling Liuyi, Qin Min, Xie Pinhua, et al. 2012. Incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy for measurements of HONO and NO₂ with a LED optical source [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 61 (14): 140703, doi: 10.7498/aps.61.140703.
- 毛节泰, 刘晓阳, 李成才, 等. 2002. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. *应用气象学报*, 13 (Z1): 127–135.
- Mao Jietai, Liu Xiaoyang, Li Chengcai, et al. 2002. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (Z1): 127–135, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2002.z1.014.
- Massoli P, Kebabian P L, Onasch T B, et al. 2010. Aerosol light extinction measurements by cavity attenuated phase shift (CAPS) spectroscopy: Laboratory validation and field deployment of a compact aerosol particle extinction monitor [J]. *Aerosol Science and Technology*, 44 (6): 428–435, doi: 10.1080/02786821003716599.
- Petzold A, Onasch T, Kebabian P, et al. 2013. Intercomparison of a Cavity Attenuated Phase Shift-based extinction monitor (CAPS PMex) with an integrating nephelometer and a filter-based absorption monitor [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6 (5): 1141–1151, doi: 10.5194/amt-6-1141-2013.
- Ruan L M, Wang X Y, Qi H, et al. 2011. Experimental investigation on optical constants of aerosol particles [J]. *Journal of Aerosol Science*, 42 (11): 759–770, doi: 10.1016/j.jaerosci.2011.07.001.
- 孙颖, 潘月鹏, 李杏茹, 等. 2011. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究 [J]. *环境科学*, 32 (9): 2732–2740.
- Sun Ying, Pan Yuepeng, Li Xingru, et al. 2011. Chemical composition and mass closure of particulate matter in Beijing, Tianjin, and Hebei megacities, northern China [J]. *Environmental Science* (in Chinese), 32 (9): 2732–2740.
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (1): 3–14.
- Wang Zifa, Li Jie, Wang Zhe, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China Earth Sciences*, 57 (1): 3–13, doi: 10.1007/s11430-013-4793-0.
- 王志立, 郭品文, 张华. 2009. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 14 (2): 161–171.
- Wang Zhili, Guo Pinwen, Zhang Hua. 2009. A numerical study of direct radiative forcing due to black carbon and its effects on the summer precipitation in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (2): 161–171, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2009.02.06.
- Wood E C, Charest J R. 2014. Chemical amplification-cavity attenuated phase shift spectroscopy measurements of atmospheric peroxy radicals [J]. *Analytical Chemistry*, 86 (20): 10266–10273, doi: 10.1021/ac502451m.
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. *环境科学学报*, 32 (2): 257–269.
- Wu Dui. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 32 (2): 257–269.
- 徐鹏炜, 谭湘萍, 蔡菊珍, 等. 2005. 杭州城市大气消光系数和能见度的影响因子研究 [J]. *环境污染与防治*, 27 (6): 410–413.
- Xu Pengwei, Tan Xiangping, Cai Juzhen, et al. 2005. Study on influence factors of urban aerosol on visibility and extinction coefficient [J]. *Environmental Pollution & Control* (in Chinese), 27 (6): 410–413, doi: 10.3969/j.issn.1001-3865.2005.06.003.
- 张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 等. 2014. 区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 [J]. *环境科学*, 35 (7): 2439–2448.
- Zhang Xiaoling, Xia Xiang'ao, Che Huizheng, et al. 2014. Observation study on aerosol optical properties and radiative forcing using the ground-based and satellite remote sensing at background station during the regional pollution episodes [J]. *Environmental Science* (in Chinese), 35 (7): 2439–2448, doi: 10.13227/j.hjxx.2014.07.001.
- 张小曳. 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. *地球科学进展*, 22 (1): 12–16.
- Zhang Xiaoye. 2007. Aerosol over china and their climate effect [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22 (1): 12–16, doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2007.01.002.