DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.004
CSTR: 32220.14.gk202505004

基于光声光谱的汽车尾气 $PM_{0.1}$ 光吸收系数研究

陈加雪[1,2,3]， 唐 敏[1,2,3]， 尹亚婕[1,2,3]， 牛明生[1,2,3*]

(1 山东省激光偏振与信息技术重点实验室，山东 曲阜 273165;
2 曲阜师范大学物理工程学院，山东 曲阜 273165;
3 曲阜师范大学激光研究所，山东 曲阜 273165)

摘 要: 汽车尾气直接排放的超细颗粒物 ($PM_{0.1}$) 及其在大气中的老化过程，对人类健康和环境气候具有显著影响。本研究采用光声光谱技术，利用中心波长为1064 nm的激光器系统测量并分析了18辆汽车在空载怠速状态下尾气中的 $PM_{0.1}$ 直接吸收系数及经光照4 h和14 h光照老化后的光吸收系数。结果表明，实施国Ⅴ标准后，汽车尾气中一次 $PM_{0.1}$ 的光学吸收系数明显降低，其数值与发动机排量、汽车使用年限和重量呈正相关；$PM_{0.1}$ 的光吸收系数光照老化过程中呈现先增大后减小的变化特点。本研究为深入理解汽车尾气中 $PM_{0.1}$ 的光吸收特性及其环境行为提供了实验依据和数据支撑。

关 键 词: 光声光谱技术; 汽车尾气; 超细颗粒; 光吸收系数
中 图 分 类 号 : O433 **文 献 标 识 码 :** A **文章编号:** 1673-6141(2025)05-598-012

$PM_{0.1}$ of automobile exhaust optical absorption coefficient measurement based on photoacoustic spectroscopy

CHEN Jiaxue[1,2,3], *TANG Min*[1,2,3], *YIN Yajie*[1,2,3], *NIU Mingsheng*[1,2,3*]

(1 Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology of Shandong Province, Qufu 273165, China;
2 School of Physical and Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;
3 Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: Ultra-fine particulate matter ($PM_{0.1}$) emission from automobile exhaust and its aging process in the atmosphere have a significant impact on human health and environmental climate. In this work, the optical absorption coefficients of $PM_{0.1}$ in the exhaust of 18 automobile under no-load idle state and after 4 hours and 14 hours of light aging were researched with photoacoustic spectroscopy at 1064 nm. The results showed that the optical absorption coefficient of $PM_{0.1}$ in vehicle exhaust decreases obviously after the implementation of National V standard in China, which is positively correlated with engine displacement,

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2018MD015, 2018), 山东省重点研发计划项目 (2017GSF17125), 大学生创新实验项目 (XJ20200071)
作者简介: 陈加雪 (1998-), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事光声光谱和气溶胶探测方面的研究。E-mail: 2836349256@qq.com
导师简介: 牛明生 (1975-), 山东泰安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大气环境污染监测技术及应用、偏振遥感技术与应用、光学传感方面的研究。E-mail: qsdmsniu@qfnu.edu.cn
收稿日期: 2023-03-21; **修改日期:** 2023-04-13
*通信作者。

service life and weight and the optical absorption coefficient of $PM_{0.1}$ increased first and then decreased during light aging. This work provides an experimental basis and data support for further understanding of the light absorption characteristics and environmental behavior of $PM_{0.1}$ in automobile exhaust.

Key words: photoacoustic spectroscopy; automobile exhaust; ultrafine particles; optical absorption coefficient

0　引　言

颗粒物 (PM) 污染是环境污染的关键成因[1-4]，与人体健康危害及全球变暖进程紧密关联[5-8]。城市背景下，汽车尾气排放是PM的重要来源[9,10]，是造成雾霾、酸雨、光化学烟雾等污染的重要因素。尾气中$PM_{0.1}$ (粒径 ⩽ 100 nm) 数浓度占总PM数浓度的80%[11,12]，会对大气云凝结核数浓度产生影响，影响全球或局部地区气候变化[13]。此外，$PM_{0.1}$可吸附更多的有毒物质并深入呼吸系统，对公共健康产生很大影响[14,15]。发动机怠速工况下排放的颗粒物主要为$PM_{0.1}$，怠速工况下汽车尾气中$PM_{0.1}$的深入研究对评估大气环境和人体健康风险意义重大。

目前国内外对$PM_{0.1}$的物理性质研究有所增加[16-21]，但对$PM_{0.1}$光学特性的研究仍十分有限[22,23]，$PM_{0.1}$光吸收方面的数据依旧稀缺。$PM_{0.1}$能长时间漂浮在大气中进行远距离传输，为大气中发生非均相反应的气体提供场所，影响光散射和大气能见度[24]，吸收和散射太阳辐射改变地球辐射平衡，为全球变暖做出贡献[25]，因此对$PM_{0.1}$的光吸收进行研究至关重要。

测量气溶胶光吸收系数的方法主要有过滤器技术[26-28]、激光诱导白炽灯技术[29,30]、消光减散射技术[28,31-33]、光声光谱技术[34-36]等。其中光声光谱技术不改变粒子自然悬浮状态，也不受多次散射的干扰，是测量气溶胶光吸收最有效的方法，已得到广泛应用[36-43]。刘强等[37]基于光声光谱技术研制了一套气溶胶测量系统并应用于大气中气溶胶光吸收系数的测量，系统检测极限为1.4×10^{-8} W/(cm·$Hz^{1/2}$)；Yu等[38,39]用差分光声光谱技术分别测量了单波长 (532 nm) 和三波长 (473、532、671 nm) 下气溶胶的光吸收；Wang等[40]基于光声光谱技术在三波长 (444、532、660 nm) 下对火山灰里的气溶胶光吸收特性进行研究，得到其光吸收和光谱依赖指数；中国科学院安徽光学精密机械研究所Cao等[41,42]研发了差分光声光谱仪 (443 nm) 同时测量气溶胶光吸收和NO_2的浓度，同时研发了三波长光声光谱仪 (404、637、805 nm) 研究气溶胶光吸收和光谱依赖特性；Karhu等[43]报道了一种悬臂麦克风检测光声信号的光声系统用于气溶胶光吸收的测量。

近年来国家对汽车排放颗粒物要求不断提高，测量汽车排放$PM_{0.1}$光吸收特性对有效监管实施意义重大。有关$PM_{0.1}$光吸收系数的研究还缺乏具体的数据支撑，本研究基于搭建的光声光谱系统，对怠速工况下汽车尾气中的$PM_{0.1}$的光吸收系数进行测量，为研究汽车尾气光吸收特性提供了参考。

1　基本原理

光声光谱技术是以光声效应为基础逐渐发展起来的，可用于固体、液体和气体的光谱探测技术[26]。物质吸收调制光的能量，由基态跃迁到激发态，通过无辐射跃迁又回到基态，并向外释放热量，周围气体受热膨胀产生声波，被声传感器 (石英音叉、微悬臂梁、微音器等) 探测[44,45]。当非饱和吸收且入射光的调制频率等于光声池的共振频率时，光声信号可以表示为[46,47]

$$S_{PA}=S_M C_{cell}\alpha P, \tag{1}$$

式中 S_{PA} 为光声信号幅值，mV；S_M 为麦克风灵敏度，mV/Pa；C_{cell} 为光声池池常数，Pa/ (mW·Mm^{-1})，大小与光声池体积、长度、共振频率和品质因数有关，是描述光声池性能的重要物理量[48]；α 表示样品的光吸收系数，Mm^{-1}；P 表示入射光功率，mW。光吸收系数可表示为

$$\alpha=\frac{S_{PA}}{S_M C_{cell} P}. \tag{2}$$

由式 (2) 可知，当麦克风灵敏度、光声池池常数和入射光功率 3 者乘积确定时，光吸收系数与光声信号成正比，因此可以通过探测光声信号来计算待测样品的光吸收系数。

2 装置系统

实验原理示意图如图 1 所示，主要由三部分构成：第一部分也是最重要的部分为光声光谱测量部分，由激光器、斩波器、光声池和功率计构成；第二部分为尾气处理部分，由过滤器、真空泵和质量流量控制器组成；第三部分为信号采集处理部分，由装有前置放大器的麦克风、锁相放大器、数据采集卡和装有 Labview 的计算机构成。

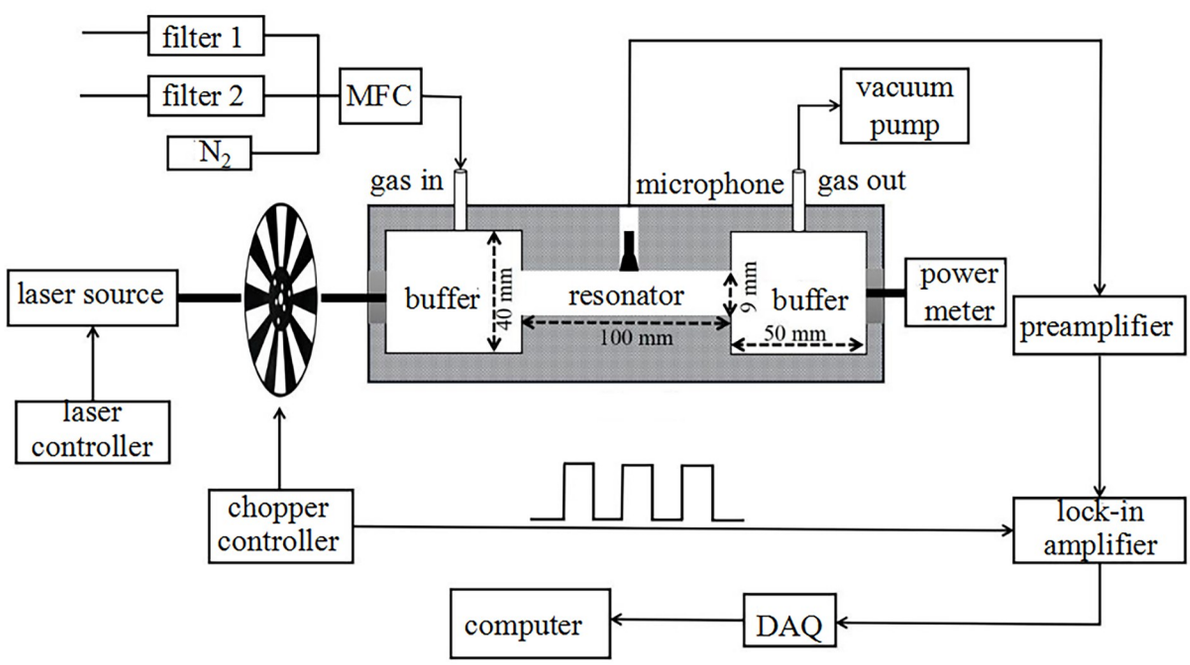

图 1 气溶胶光吸收系数测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerosol optical absorption coefficient measurement system

激光光束经斩波器强度调制后入射到充有气溶胶样品的光声池产生光声信号，被安装在共振腔中心位置且紧贴内壁的麦克风探测后由前置放大器放大输入到锁相放大器解调，解调信号被数据采集卡采集，最后输入到安装有 Labview 的计算机进行数据分析处理。功率计放置在光声池后用于监测激光功率的稳定性。激光器 (PGL-V-H-1064) 输出的中心波长为 1064 nm，功率为 531 mW，理论上经过斩波器调制后功率应减少为原来的一半，但由于光声池窗口的损耗和其他因素的影响，探测到的实际功率为 262 mW。光声池谐

振腔内径为9 mm，长度为100 mm，两端对称分布直径和长度分别为40 mm和50 mm的圆柱形缓冲腔，用于降低环境噪声。过滤器1 (9922-11-BX，Balston) 的过滤精度为0.01 μm，过滤效率为99.99%，设计加工的过滤器2可更换滤膜实现对不同粒径颗粒物的过滤，本实验选择的滤膜为0.1 μm。麦克风 (MA201，北京声望) 灵敏度为45 mV/Pa；锁相放大器 (SR850，Stanford research systems) 的时间常数和滤波器斜率分别设置为1 s和24 dB/octave。

为防止大气气体和气溶胶污染，每次测量样品前都用高纯氮气对光声池持续冲洗两分钟。测量过程为将样品经过滤器2测得的信号减去经过滤器1测得的信号，两者之差即为$PM_{0.1}$的光声信号，代入公式得到$PM_{0.1}$的光吸收系数，有效地降低了噪声和其他干扰气体的影响。

光声池是光声测量系统最关键的器件，为了测量结果的准确性，本文选择CH_4气体对光声池的池常数进行标定。在室温和一个标准大气压 (1.013 kPa) 下使用中心波长为1.654 μm的DFB激光器测量质量浓度为171 mg/m^{3}的CH_4，扫描频率的范围为900～2500 Hz，扫描步长为5 Hz。记录光声信号进行洛伦兹拟合得到光声池的频率响应曲线，如图2所示，可以看出光声池的共振频率为1655 Hz。结合HITRAN数据库CH_4的吸收系数和式 (1)，可得$S_M C_{cell}$为13.631 mV·Mm/mW。

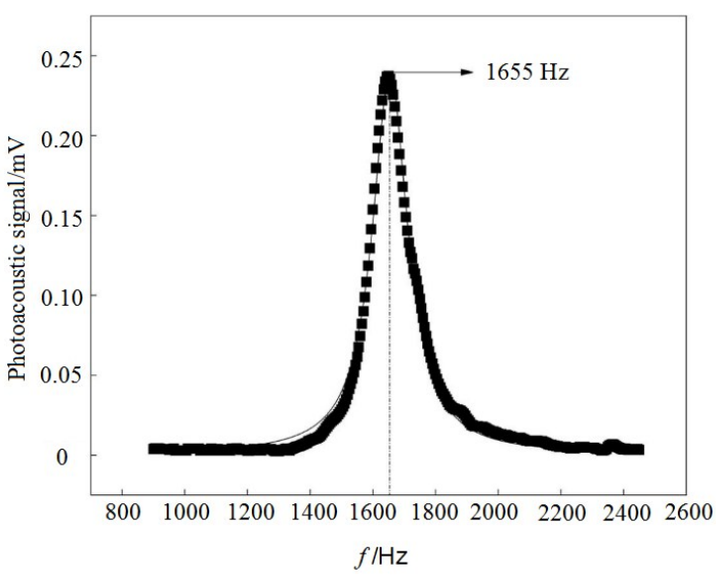

图 2　光声池的频率响应

Fig. 2　Frequency response curve of photoacoustic cell

3　结果与讨论

随机拦截了18辆汽车并收集了怠速状态下排出的汽车尾气。使用5 L清洁聚酯袋对气体进行收集，采样过程如图3所示。采样现场如图3 (a)，采集过程中用黑色塑料袋对样品气体进行遮光处理如图3 (b)，采集到的汽车尾气如图3 (c)。收集的18辆汽车中，国Ⅲ标准的车有4辆，国Ⅳ标准的车11辆，国Ⅴ标准的车1辆，国Ⅵ标准的车2辆。在室温和1.013 kPa下，在光声池的共振频率处立即对测量采集到的汽车尾气进行测量，将测量得到的结果代入式 (2) 进行计算可以得到不同类型汽车尾气的$PM_{0.1}$直接吸收系数，测量结果及车辆基本信息如表1所示。

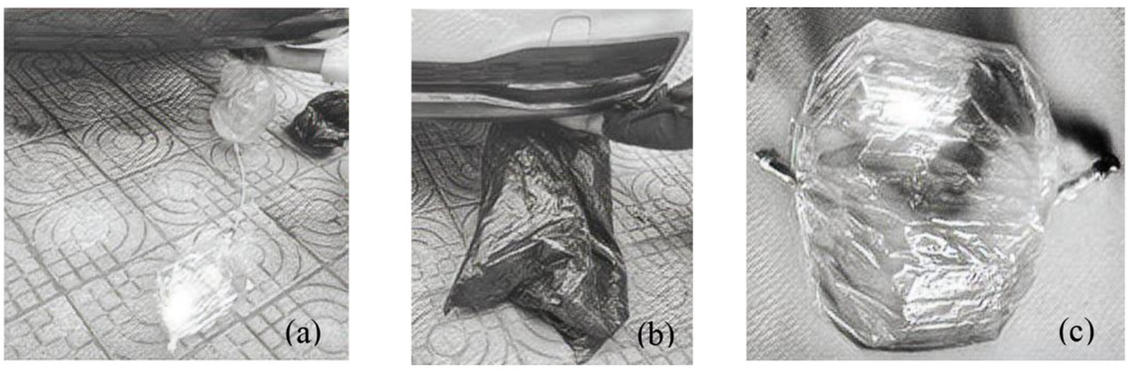

图 3 样品采集装置。(a) 采样现场; (b) 遮光过程; (c) 采集的汽车尾气

Fig.3 Sample collection unit. (a) Sampling site; (b) light shielding process; (c) collected automobile exhaust gas

表 1 实验车辆参数

Table 1 Parameters of the test automobile

National emission standard	Automobile brand	Weight/kg	Service life/a	Displacement	α/Mm^{-1}
Ⅲ	PEUGEOT	1350	12	1.4 T	77.39 ± 5.153
	NISSAN TIIDA	1321	12	1.6 L	82.20 ± 1.649
	SONATA	1435	13	2.0 L	89.77 ± 7.007
	CITROEN C5	1600	12	2.3 L	85.77 ± 2.989
Ⅳ	CITROEN C-QUATRE	1321	8	1.6 L	67.91 ± 2.061
	SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN	1744	7	2.0 T	58.94 ± 2.596
	AUDI A4L	1615	11	2.0 T	77.02 ± 8.965
	LECHI	880	10	1.2 L	75.49 ± 1.237
	BLUEBIRD (SYLPHY)	1180	10	1.6 L	74.47 ± 2.267
	CHANAN ALSVIN	1120	11	1.5 L	76.66 ± 2.885
	AUDI Q3	1560	7	2.0 L	56.97 ± 9.288
	SUZUKI SWIFT	1040	8	1.3 L	60.13 ± 7.937
	ENVISION 20T	1685	7	1.5 T	43.15 ± 5.059
	BUICK EXCELLE	1210	8	1.5 L	65.29 ± 10.72
	BEIJING HYUNDAI AUTO	1428	8	1.6 T	67.35 ± 9.080
Ⅴ	CITROEN C3-XR	1200	5	1.2 L	36.82 ± 1.989
Ⅵ	SAIC TIGUAN 280TSI	1552	3	1.4 L	35.05 ± 3.195
	LAVIDA	1318	3	1.4 L	26.10 ± 6.404

从表 1 中可以看到，执行国家 III 和国家 IV 标准的车辆直接排放的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数明显大于执行国家 V 和国家 VIa 标准的车辆。这表明中国机动车污染物排放标准关于颗粒物的制定对减少车辆尾气中的 $PM_{0.1}$ 产生了重大影响。此外，气溶胶吸收系数可能还与使用年限、车重和发动机的排量有关。

为了获得直接排放的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数与使用年限之间的关系，按照车辆使用年限分为两类：一类汽车使用年限 10 年以内，另一类汽车使用年限 10 年及以上，得到汽车尾气中直接排放的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数如图 4 所示。图 4 (a) 为使用年限 10 年以内的车辆尾气气溶胶光吸收系数，图 4 (b) 显示了使用年限 10 年及以上的汽车尾气中气溶胶的光吸收系数。从图 4 中可以看出，使用年限相近的车辆的光吸收系数近似，而使用年限较长的车辆光吸收系数较大。

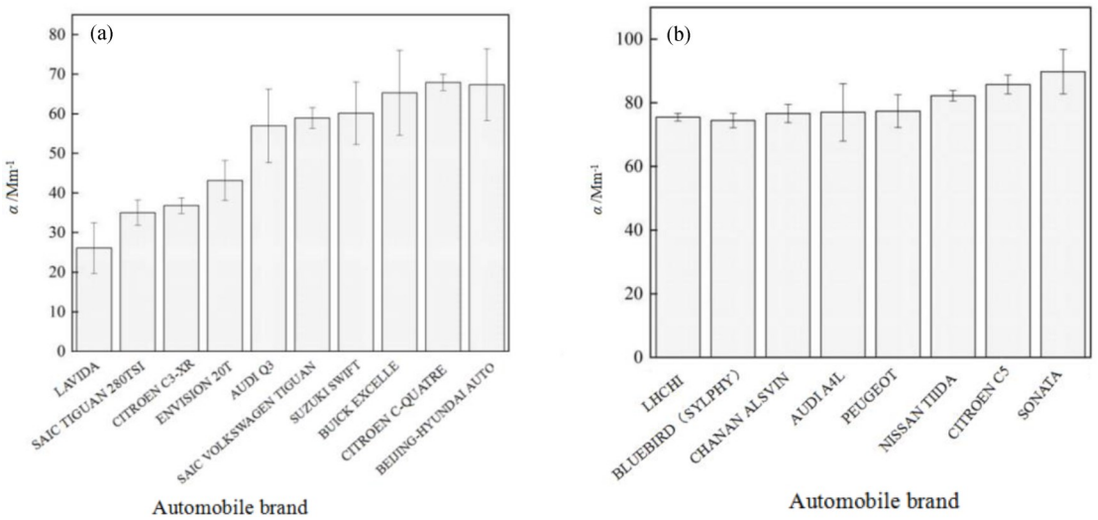

图 4　即时测量 $PM_{0.1}$ 的光吸收系数。(a) 使用年限 10 年以内; (b) 使用年限 10 年及以上

Fig. 4　The measured of the optical absorption coefficient immediately of $PM_{0.1}$.
(a) Service life less than 10 years; (b) service life of 10 years or more

按发动机排量对样品进行分类，对发动机排量相同但年限不同的汽车直接排放的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数进行比较，如图 5 所示。从图 5 (a)、(d) 和 (e) 可以看出，CITROEN C3-Xr 与 LECHI，CITROEN C-QUATRE、BLUEBIRD (SYLPHY)与 NISSAN TIIDA，AUDI Q3 与 SONATA 排量相同，直接排放的 $PM_{0.1}$ 的光吸收系数随汽车使用年限的增加而增大。由图 5 (b)，SAIC TIGUAN 280TSI 和 LAVIDA，两车使用年限和发动机排量都是相同的，但 SAIC TIGUAN 280TSI 的车重为 1552 kg，LAVIDA 车重为 1318 kg，相应的光吸收系数分别为 35.05 Mm^{-1} 和 26.10 Mm^{-1}，可以推测重量大的汽车其 $PM_{0.1}$ 光吸收系数值也越大。对比图 5 (c)和 (f)，可以看到相同排量下 BUICK EXCELLE 和 SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN 的使用年限短于 CHANAN ALSVIN 和 AUDI A4L，$PM_{0.1}$ 的吸收系数应该更小，但因车重更大而更大，这与直接排放的 $PM_{0.1}$ 的光吸收系数随车重的增加而增大的猜想吻合。

汽车直接排放的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数与发动机排量有关。以 PEUGEOT 和 NISSAN TIIDA 为例，两车均遵循国Ⅲ的排放标准，使用年限均为 12 年，车重近似相等，分别为 1350 kg 和 1321 kg，发动机排量分别为 1.4 T 和 1.6 L，对应的光吸收系数分别为 77.39 Mm^{-1} 和 82.20 Mm^{-1}，发动机排量大的 NISSAN TIIDA 其 $PM_{0.1}$ 光吸收系数较大。对于 SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN 和 ENVISION 20T，两车均遵循国Ⅳ的排放标准，使用年限均为 7 年，车重分别为 1744 kg 和 1685 kg，数值相差不大，发动机排量分别为 2.0 T 和 1.5 T，对应的光吸收系数分别为 58.94 Mm^{-1} 和 43.15 Mm^{-1}，发动机排量大的 SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN 其 $PM_{0.1}$ 光吸收系数较大。

以上分析可以发现，执行国家 VI 排放标准、重量小、发动机排量小的汽车直接排放的 $PM_{0.1}$ 的光吸收系数值较小，因此可以通过发展新的尾气处理技术来控制汽车排放中 $PM_{0.1}$ 的光吸收，从而达到治理环境污染的目的。

汽车尾气中二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物和颗粒物等会与空气里的其他气体发生光化学反应，产生硫酸盐、硝酸盐等二次气溶胶，对大气造成二次污染。为模拟汽车尾气排放到大气中 $PM_{0.1}$ 光吸收系数的真实变化情况，将空气通入过滤器 1 过滤，再将其通入已采集的汽车尾气内，每种类型的样品气体被放入两

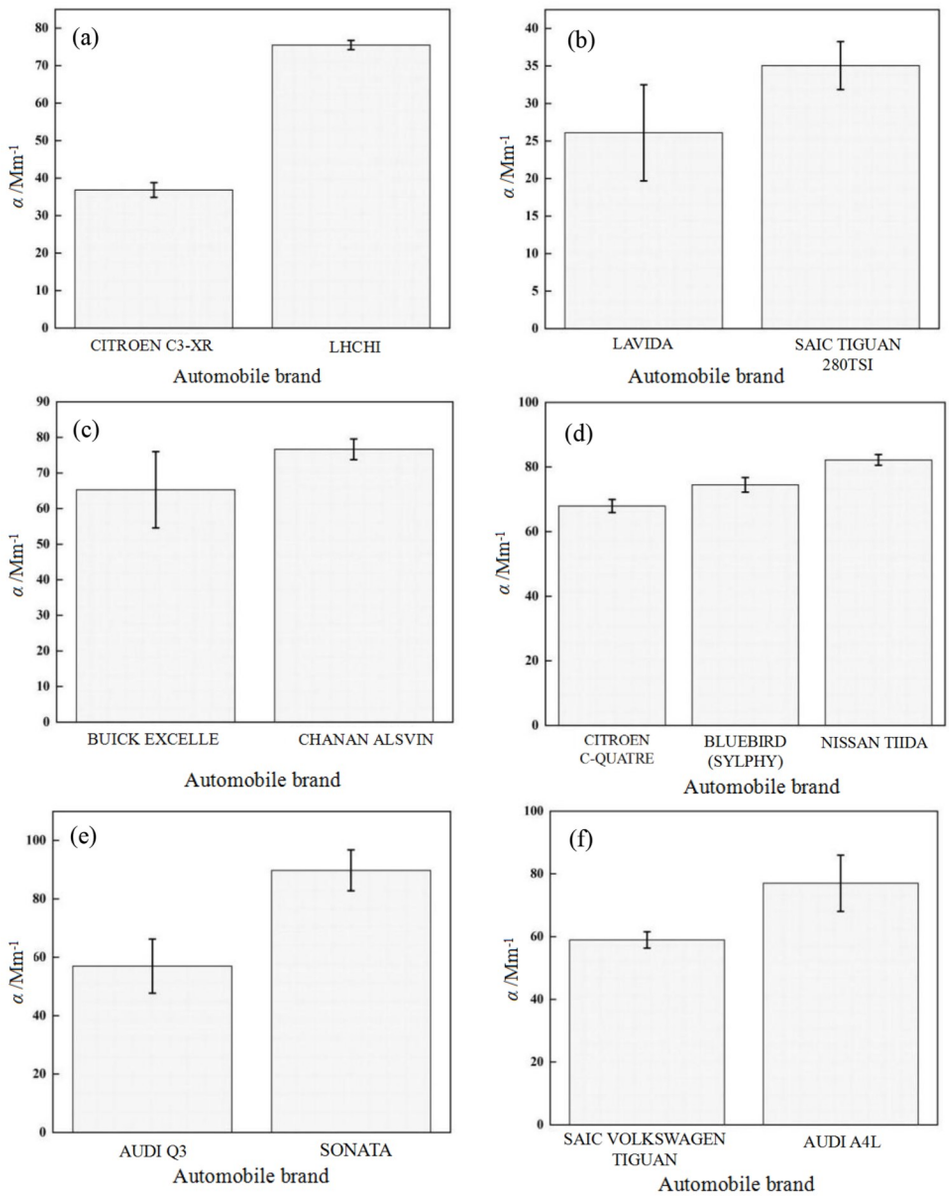

图 5 不同发动机排量下的光吸收系数。(a) 1.2 L; (b) 1.4 L; (c) 1.5 L; (d) 1.6 L; (e) 2.0 L; (f) 2.0 T

Fig. 5 Optical absorption coefficient at different engine displacement. (a) 1.2 L; (b) 1.4 L; (c) 1.5 L; (d) 1.6 L; (e) 2.0 L; (f) 2.0 T

个采样袋中，分别暴露在阳光下光照 4 h 和 14 h 后测量老化后的 $PM_{0.1}$ 光吸收系数，并与直接测量值进行比较，数据见表 2。

为便于比较经光照老化后 $PM_{0.1}$ 光吸收系数随光照时间的变化情况，将表 2 整理成图 6 的形式。从图 6 可以看出，经光照老化后 $PM_{0.1}$ 光吸收系数随光照时间的变化趋势是一致的，都是先增大后减小。$PM_{0.1}$ 光吸收系数的增加是由于一次气溶胶在阳光照射下与空气发生光化学反应，生成的二次气溶胶多于沉积和吸附的气溶胶。但在阳光照射 14 h 后，吸收系数明显下降，这可能是由于氮氧化物的光解作用，采样袋的沉积和吸附也可能是导致吸收系数下降的原因。

此外，观察不同光照时间下老化后 $PM_{0.1}$ 光吸收系数的变化情况可以看出，$PM_{0.1}$ 排放到大气中，光吸收系数的变化与车重和使用年限均有关。SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN 与 AUDI A4L，AUDI Q3 与

表 2　不同光照时间下汽车尾气中$PM_{0.1}$的光吸收系数

Table 2　The α of automobile exhaust under different sunlight time

Automobile brand	The α measured immediately/Mm^{-1}	The α measured after 4 hours of sunlight/Mm^{-1}	The α measured after 14 hours of sunlight/Mm^{-1}
LAVIDA	26.10	49.05	18.78
SAIC TIGUAN 280TSI	35.05	43.14	19.91
CITROEN C3-XR	36.82	45.40	36.14
ENVISION 20T	43.15	53.02	25.08
AUDI Q3	56.97	67.98	42.49
SAIC VOLKSWAGEN TIGUAN	58.94	82.29	53.10
SUZUKI SWIFT	60.13	72.88	47.69
BUICK EXCELLE	65.29	84.23	31.19
CITROEN C-QUATRE	67.91	82.78	35.24
BEIJING-HYUNDAI AUTO	67.35	72.58	28.35
LECHI	75.49	78.70	29.25
BLUEBIRD (SYLPHY)	74.47	82.92	30.89
CHANAN ALSVIN	76.66	80.45	50.42
AUDI A4L	77.02	84.23	43.14
PEUGEOT	77.39	89.19	32.30
NISSAN TIIDA	82.19	90.94	42.11
CITROEN C5	85.76	93.27	36.06
SONATA	89.77	95.02	43.15

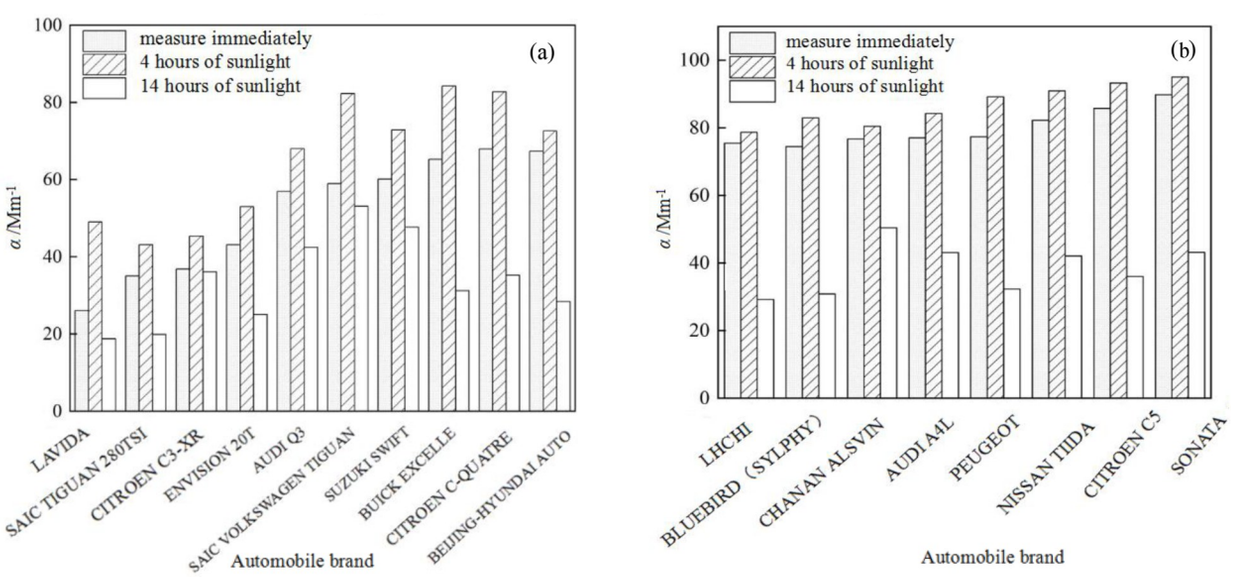

图 6　光照不同时间下的光吸收系数。(a) 使用年限 10 年以内; (b) 使用年限 10 年及以上

Fig. 6　Optical absorption coefficient under different sunlight time.
(a) Service life less than 10 years; (b) service life of 10 years or more

SONATA，CITROEN C-QUATRE与BLUEBIRD (SYLPHY)，CITROEN C3-XR与LECHI相比，相同排量下，车重较大且使用年限较短的汽车，尾气中老化后$PM_{0.1}$光吸收系数的增幅更大，降幅更小。

4 结 论

一次气溶胶和二次气溶胶的光学吸收特性是研究区域大气辐射强迫的重要因素，基于光声光谱技术在1064 nm处测量并分析了18辆汽车尾气中直接排放和经过光照老化后的$PM_{0.1}$的光吸收系数。分析了车辆重量、国家机动车污染物排放标准、使用年限、发动机排量等因素对气溶胶光吸收系数的影响。

结果表明，不同车辆尾气直接排放的$PM_{0.1}$的光吸收系数与国家车辆污染物排放标准有关。自国家机动车污染物排放标准Ⅴ实施以来，$PM_{0.1}$的光吸收系数明显下降。对于国家规定颗粒物排放标准之前的车辆，例如SONATA、CITROEN C5、BLUEBIRD (SYLPHY)，其数值分别为89.77、85.77、74.47 Mm^{-1}，远远大于40 Mm^{-1}。光吸收系数还与车辆重量、使用年限及发动机排量有关。发动机排量越大，光吸收系数值越大。在发动机排量相同的情况下，车辆越重，使用年限越长，光吸收系数值越大。对于经光照老化后的$PM_{0.1}$，我们发现不同汽车的光吸收系数变化复杂，但光吸收系数随光照时间的变化趋势都是先增大后减小。不同光照时间下$PM_{0.1}$的增大与减小情况与车重和使用年限有关，车重大且使用年限短的汽车排放的尾气中$PM_{0.1}$光吸收系数的增大较大且减小较小。根据不同光照条件下气溶胶光学吸收系数的变化，我们推测粒子的沉积、采样袋的吸附和氮氧化物的光解是导致光吸收系数降低的原因。该结果有助于加深对细颗粒物影响区域气候变化的认识，为研究汽车尾气光吸收特性提供了参考和数据支撑。

参考文献:

[1] Kanniah K D, Kaskaoutis D G, Lim H S, *et al*. Overview of atmospheric aerosol studies in Malaysia: Known and unknown [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 302-318.

[2] Guo Y H. Size Distribution characteristics of carbonaceous aerosol in a rural location in Northwestern China [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, 9(2): 193-200.

[3] Phairuang W, Inerb M, Hata M, *et al*. Characteristics of trace elements bound to ambient nanoparticles ($PM_{0.1}$) and a health risk assessment in Southern Thailand [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127986.

[4] Thuy N T T, Dung N T, Sekiguchi K, *et al*. Mass concentrations and carbonaceous compositions of $PM_{0.1}$, $PM_{2.5}$, and PM_{10} at urban locations of Hanoi, Vietnam [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(7): 1591-1605.

[5] Deng Q H, Deng L J, Miao Y F, *et al*. Particle deposition in the human lung: Health implications of particulate matter from different sources [J]. *Environmental Research*, 2019, 169: 237-245.

[6] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151(2): 362-367.

[7] Jacobson M Z. *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[8] Lohmann U, Feichter J. Global indirect aerosol effects: A Review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(3): 715-737.

[9] Zhu Y F, Hinds W C, Kim S, *et al*. Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway [J]. *Journal*

of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(9): 1032-1042.

[10] Hitchins J, Morawska L, Wolff R, *et al*. Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(1): 51-59.

[11] Deng C J, Fu Y Y, Dada L, *et al*. Seasonal characteristics of new particle formation and growth in urban Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 8547-8557.

[12] Li X X, Li Y Y, Lawler M J, *et al*. Composition of ultrafine particles in urban Beijing: Measurement using a thermal desorption chemical ionization mass spectrometer [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(5): 2859-2868.

[13] Merikanto J, Spracklen D V, Mann G W, *et al*. Impact of nucleation on global CCN [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(21): 8601-8616.

[14] Park M V D Z, Neigh A M, Vermeulen J P, *et al*. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles [J]. *Biomaterials*, 2011, 32(36): 9810-9817.

[15] Zhao Z C, Shan H Y, Zhao C R, *et al*. Environmental behavior of ultrafine particulate matters and detection technology status [J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(28):72-74.
赵志成, 单慧媚, 赵超然, 等. 超细颗粒物的环境行为及其检测技术现状 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(28): 72-74.

[16] Wang W Y. *Research on Key Technologies of On-line Measurement of Ultrafine Particle Number Concentration of Motor Vehicle Emission Based on Condensation Particle Counting* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
王文誉. 基于凝结粒子计数的机动车排放超细颗粒物数浓度在线测量关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

[17] Schraufnagel D E. The health effects of ultrafine particles [J]. *Experimental & Molecular Medicine*, 2020, 52(3), 311-317.

[18] Putri R M, Amin M, Suciari T F, *et al*. Site-specific variation in mass concentration and chemical components in ambient nanoparticles ($PM_{0.1}$) in North Sumatra Province-Indonesia [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(6): 101062.

[19] Kwon H S, Min H R, Carlsten C. Ultrafine particles: Unique physicochemical properties relevant to health and disease [J]. *Experimental & Molecular Medicine*. 2020, 52(3): 318-328.

[20] Boongla Y, Chanonmuang P, Hata M, *et al*. The characteristics of carbonaceous particles down to the nanoparticle range in Rangsit City in the Bangkok Metropolitan Region, Thailand [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 115940.

[21] Phairuang W, Suwattiga P, Chetiyanukornkul T, *et al*. The influence of the open burning of agricultural biomass and forest fires in thailand on the carbonaceous components in size-fractionated particles [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 238-247.

[22] Zhang W, Bai Z, Shi L B, *et al*. Size-fractionated ultrafine particles and their optical properties produced from heating edible oils in a kitchen laboratory [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158385.

[23] Phairuang W, Hongtieab S, Suwattiga P, *et al*. Atmospheric ultrafine particulate matter ($PM_{0.1}$)-bound carbon composition in bangkok, Thailand [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1676.

[24] Bellouin N, Quaas J, Gryspeerdt E, *et al*. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change [J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(1): e2019RG000660.

[25] Chen Y, Bond T C. Light Absorption by organic carbon from wood combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(4): 1773-1787.

[26] Sheridan P J, Arnott W P, Ogren J A, *et al*. The Reno aerosol optics study: An evaluation of aerosol absorption measurement methods [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(1): 1-16.

[27] Lack D , Cappa C , Covert D , *et al*. Bias in filter-based aerosol light absorption measurements due to organic aerosol loading: Evidence from ambient measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, 42(12): 1033-1041.

[28] Liu Q. *Research on Absorption Properties of Atmospheric Aerosol Based on Photoacoustic Spectroscopy* [D]. Hefei: University

of Science and Technology of China, 2014.
刘 强. 光声光谱技术测量大气气溶胶吸收特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

[29] Gao Y L, He X, Li H M, *et al*. Impact of laser fluence on test of soot particle size by laser induced incandescence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2425-2430.
高永利, 何 旭, 李红梅, 等. 激光能量密度对激光诱导炽光技术测试碳烟粒径的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2425-2430.

[30] Török S, Mannazhi M, Bergqvist S, *et al*. Influence of rapid laser heating on differently matured soot with double-pulse laser-induced incandescence [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2022, 56(6): 488-501.

[31] Miles R E H, Carruthers A E, Reid J P. Novel optical techniques for measurements of light extinction, scattering and absorption by single aerosol particles [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(4): 534-552.

[32] Xu X Z, Zhao W X, Zhang Q L, *et al*. Optical properties of atmospheric fine particles near Beijing during the HOPE-J^{3}A campaign [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(10): 6421-6439.

[33] Al Fischer D, Smith G D. A portable, four-wavelength, single-cell photoacoustic spectrometer for ambient aerosol absorption [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2018, 52(4): 393-406.

[34] Moosmüller H, Chakrabarty R K, Arnott W P. Aerosol light absorption and its measurement: A review [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(11): 844-878.

[35] Cao Y, Xie Y C, Wang R F, *et al*. Recent advances of photoacoustic spectroscopy techniques for gases sensing [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1152-1159.
曹 渊, 解颖超, 王瑞峰, 等. 光声光谱气体传感技术研究进展 [J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1152-1159.

[36] Cao Y. *Research on Aerosol Optical Absorption and Spectral Dependence Based on Photoacoustic Spectroscopy Technology* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
曹 渊. 基于光声光谱技术的气溶胶光吸收及其光谱依赖特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.

[37] Liu Q, Niu M S, Wang G S, *et al*. Development of a photoacoustic system for the measurement of absorption coefficient of atmospheric aerosols [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2013, 33(7): 1729-1733.
刘 强, 牛明生, 王贵师, 等. 适用于测量大气气溶胶吸收系数的光声光谱系统的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1729-1733.

[38] Yu Z H, Assif J, Magoon G, *et al*. Differential photoacoustic spectroscopic (DPAS)-based technique for PM optical absorption measurements in the presence of light absorbing gaseous species [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2017, 51(12): 1438-1447.

[39] Yu Z H, Magoon G, Assif J, *et al*. A Single-pass RGB differential photoacoustic spectrometer (RGB-DPAS) for aerosol absorption measurement at 473, 532, and 671 nm [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2019, 53(1): 94-105.

[40] Wang G X, Kulinski P, Hubert P, *et al*. Filter-free light absorption measurement of volcanic ashes and ambient particulate matter using multi-wavelength photoacoustic spectroscopy [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2019, 166: 59-74.

[41] Cao Y, Liu Q, Wang R F, *et al*. Development of a 443 nm diode laser-based differential photoacoustic spectrometer for simultaneous measurements of aerosol absorption and NO_2 [J]. *Photoacoustics*, 2021, 21: 100229.

[42] Cao Y, Liu K, Wang R F, *et al*. Three-wavelength measurement of aerosol absorption using a multi-resonator coupled photoacoustic spectrometer [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2258-2269.

[43] Karhu J, Kuula J, Virkkula A, *et al*. Cantilever-enhanced photoacoustic measurement of light-absorbing aerosols [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2021, 56(1): 92-100.

[44] Zhao Y D. *The Research of Novel Resonant Quartz-enhanced Photoacoustic Spectroscopy* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

赵彦东. 新型共振石英增强光声光谱技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

[45] Yang Z M. *Experiment Study on Fiber Photothermal Interferometry Gas Sensing* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
杨志明. 基于光热效应的光纤干涉型气体传感实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[46] Pan A J, Yan G S. Study on the concentration measurement of phosphine with laser photoacoustic spectrum [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(1): 33-35.
潘爱军, 严高师. 激光光声光谱法检测磷化氢气体浓度的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(1): 33-35.

[47] Wang J Y, Ji X M, Wu F D, *et al*. Photoacoustic spectroscopy method for trace gas detecting [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1206-1211.
王建业, 纪新明, 吴飞蝶, 等. 光声光谱法探测微量气体 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1206-1211.

[48] Liu L X. *Differential Fourier Transfomr Infrared Photoacoustic Spectroscopy Study for Atmosphere Contaminants Detection* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
刘丽娴. 差分傅里叶变换红外光声光谱大气污染气体检测研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.