

文章编号 1004-924X(2009)07-1528-07

双散射角光学粒子计数器的研制

李学彬,高亦桥,魏合理,纪玉峰,胡欢陵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学研究中心,安徽 合肥 230031)

摘要:为了实现同时测量气溶胶粒子的谱分布和折射率,研制了一种新的双角度光学粒子计数器(D-OPC),该计数器采用 60° 和 110° 双散射角系统对气溶胶谱分布进行测量。利用 Mie 散射理论定义敏感函数,选取两个最佳的散射角,使其既对折射率敏感又不线性相关。然后,利用气溶胶折射率对两个散射角系统敏感性的差异来反演气溶胶折射率。最后,利用该仪器对大气气溶胶谱分布以及折射率进行实际测量。与 TSI 公司黑炭仪和浊度计测量的吸收系数和散射系数对比表明,双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率和谱分布结果合理,测量误差 $<20\%$,可以满足同时测量气溶胶粒子谱分布和折射率的需要。

关键词:光学粒子计数器;双角度光学粒子计数器;气溶胶;折射率;谱分布

中图分类号:P415.3;TH724 **文献标识码:**A

Development of optical particle counter with double scattering angles

LI Xue-bin, GAO Yi-qiao, WEI He-li, JI Yu-feng, HU Huan-ling

(*Atmospheric Optical Center, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: A new Optical Particle Counter(OPC) with 60° and 110° double-scattering angles was developed in the paper for measuring aerosol refractive indexes and size distributions synchronously. On the basis of defining a sensitive function by Mie scattering theory, two optimum scattering angles were selected, then, the difference of two scattering angles sensitive to aerosol refractive indexes was used to inverse the aerosol refractive indexes. Finally, a prototype with 60° and 110° double scattering-angle of OPC (D-OPC) was used in the experiments at Hefei for measuring aerosol refractive indexes and size distributions. The scattering and absorption coefficient values measured by the D-OPC were compared with that measured by an Aethalometre and an Integrating Nephelometer (designed by TSI). The comparison results indicate that measured data by the D-OPC are reasonable and the measuring error is less than 20% , which shows the D-OPC can satisfy the requirements of measurement of aerosol refractive indexes and size distributions synchronously.

Key words: Optical Particle Counter(OPC); double scattering-angles(D-OPC); aerosol; refractive index; size distribution

收稿日期:2008-06-17;修订日期:2008-10-08.

基金项目:中国科学院合肥物质科学研究院知识创新工程青年人才领域前沿基金资助项目;国家自然科学基金资助项目(No. 40475019;40775028)

1 引言

气溶胶是大气物理化学过程中的一个重要因素,大气科学的很多领域都与气溶胶有关。大气气溶胶对气候变化有重要的直接和间接的影响。气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射,可直接改变地、气系统的能量收支;其作为云的凝结核(CCN)还可改变云的光学特性和生命期,从而间接地影响气候。卫星对地遥感数据处理中,气溶胶的修正会直接影响遥感结果的精度;而颗粒物污染造成低能见度,细粒子进入肺部损害健康,气溶胶微物理参数的测量又是认识其污染变化特点,制定治理措施的基础。在球形粒子假定下,当已知气溶胶粒子的大小谱分布 $N(r)$ 和它的复折射率 m 时,原则上可以计算出气溶胶的任何光学参数,如散射系数、吸收系数、单次反照率、相函数和角散射系数等。谱分布和复折射率是气溶胶基本物理参数,气溶胶谱分布已有许多直接或间接测量方法^[1],而气溶胶折射率的测量则复杂得多。滤膜取样方法^[2]和元素碳浓度法^[3]只能测量折射率虚部,误差也较大;光声方法^[4]测量灵敏度高,但要求的设备和技术都较复杂,还不能广泛地用于测量;遥感反演方法^[5]也有其局限性。文献[6]提出的反演气溶胶折射指数的综合法,其广泛应用也受到限制。因此,探索可以同时测量气溶胶折射率和谱分布的方法仍然受到普遍关注。

本文从理论上对双散射角光学粒子计数器(D-OPC)最佳散射角的选取进行了分析,研制了双角度光学粒子计数器,利用新研制的 D-OPC 对气溶胶的折射率和谱分布进行测量。与其它独立测量方法的结果对比表明,此仪器测量气溶胶折射率和谱分布的结果是合理的。

2 折射率和散射角对响应量的影响

旁轴接收光学系统 D-OPC 对于半径为 r 、复折射率为 m 的粒子的响应量 $R(r, m)$ 为^[7]:

$$R(r, m) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\psi-\gamma}^{\psi+\gamma} \int_{\varphi-\beta}^{\varphi+\beta} \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (i_1 + i_2) \cdot E(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot F(\theta, \varphi) d\theta d\varphi d\lambda, \quad (1)$$

式中 λ_1 和 λ_2 是光源发光波长的上下限, γ 和 β 分别是照明透镜和接收透镜张角的一半, ψ 是照明

和接受透镜光轴的交角, θ 是散射角变量, φ 是会聚入射光线与接收透镜光轴的夹角变量, $E(\lambda)$ 是白炽灯光源的能量谱分布(由普朗克黑体辐射公式给出), $S(\lambda)$ 是接收散射光的光电倍增管的光谱灵敏度, $F(\theta, \varphi)$ 是几何因子^[8]。

$$E(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (2)$$

式中 c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$, $c_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 其中 h 为普朗克常数, k 为玻耳兹曼常数, c 为真空中的光速。

$$F(\theta, \phi) = 4 \sin \phi \cdot \sin \theta \cdot \arccos\left(\frac{\cos \beta - \cos \theta \cos \phi}{\sin \theta \sin \phi}\right) \cdot \arccos\left(\frac{\cos \gamma - \cos \phi \cos \theta}{\sin \phi \sin \theta}\right). \quad (3)$$

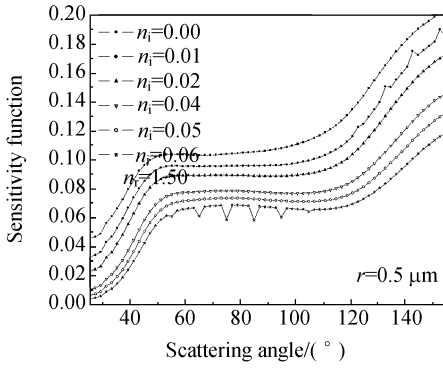
D-OPC 的基本原理是单粒子的角散射测量。D-OPC 测量单个粒子渡越其散射腔内聚焦光照区的角散射强度,光电探测元件将它转变为一定高度的电压脉冲。电压脉冲强度与粒子大小的对应关系即 D-OPC 的响应曲线,对于粒子的复折射率 $m(m = n_r - jn_i)$, n_r 和 n_i 是折射率的实部和虚部)是敏感的^[9-10]。为了能够更有效地计算折射率,要求最佳的两个散射角满足 3 个条件:(1)两个散射角度上的响应量对折射率都很敏感;(2)两个散射角度上的响应量对折射率的敏感函数值不能相同。即两个散射角系统的响应量的比值要随着折射率的变化而变化,这也是反演折射率的物理基础;(3)对散射角的选择,还要考虑响应曲线的多值性。

为了能够确定最佳散射角度,分析响应曲线对折射率敏感度随散射角的变化是必要的。由于折射率实部的影响较小^[11],这里只讨论虚部的影响。为了描述响应量对折射率的敏感程度,定义虚部的敏感函数^[12] $f_i(\alpha, \theta, m)$:

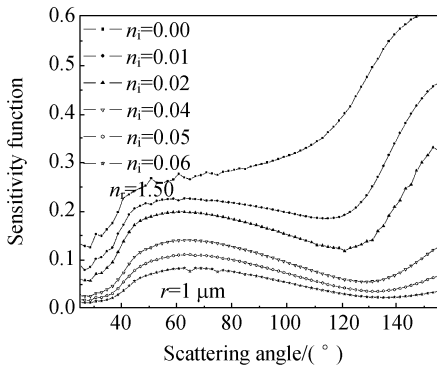
$$f_i(\alpha, \theta, m) = \left| \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial n_i} \right|. \quad (4)$$

下面计算和分析不同大小的粒子在不同折射率时敏感函数随散射角的变化。图 1 是一个例子:D-OPC 的参数为接收透镜半角 $\theta = 20^\circ$,光源为 LED 白光(色温:5 500~6 500),波长 $\lambda = 0.3 \sim 0.65 \mu\text{m}$;粒子半径 $r = 0.5, 1.0 \mu\text{m}$;粒子折射率为 $n_r = 1.50$, $n_i = 0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ 。可以看到,敏感函数的变化是比较复杂的。随着粒子尺度参数的增大,敏感函数的值

也随之增加。在相同粒径下随着折射率虚部增大,敏感函数的值减小。敏感函数随散射角度有非常明显的变化。当散射角系统在 60° 附近时,敏感函数曲线有一个极大值;当散射角系统在 120° 附近时,敏感函数曲线有一拐点,它们满足成为最佳散射角的第一个条件。



(a) $r=0.5 \mu\text{m}$



(b) $r=1 \mu\text{m}$

图 1 折射率对敏感函数的影响

Fig. 1 Effect of refractive indexes on sensitivity functions

由于 60° 和 120° 系统的光轴在同一条直线上,这样会引起两个散射通道的相互干扰,所以这里采用 110° 系统来代替 120° 系统。为了分析 60° 和 110° 两个散射角通道响应量对折射率敏感度的相关性,计算两个散射角通道响应量的比值 RC:

$$RC(n_r, n_i, r) = \text{Res}(60) / \text{Res}(110).$$

这里 $\text{Res}(60)$ 和 $\text{Res}(110)$ 分别是 60° 和 110° 两个散射角通道的响应量。图 2 和图 3 是不同 n_i 和不同 n_r 的 RC 随粒子大小 r 的变化曲线,可以看到,在不同的 n_i 和 n_r 情况下, 60° 和 110° 两个散射角通道响应量的比值 RC 随粒子大小的变化差异很大,两个散射通道的响应量在不同 n_i 和 n_r 时的变

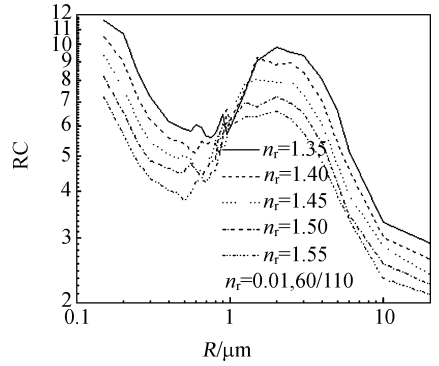


图 2 RC 随粒子大小的变化和折射率实部
Fig. 2 RC variation with particle size and n_r

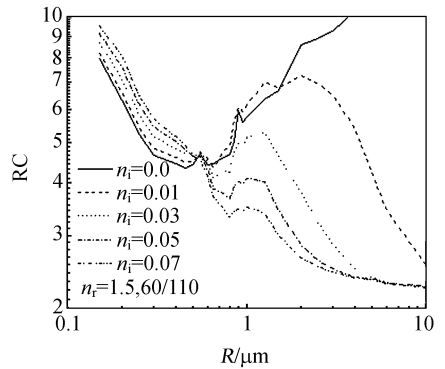


图 3 RC 随粒子大小的变化和折射率虚部
Fig. 3 RC variation with particle size and n_i

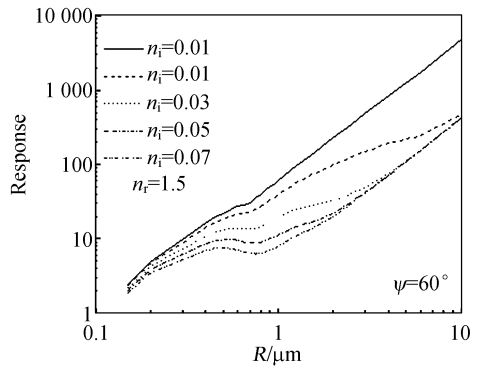


图 4 60° 散射系统响应曲线随折射率的变化
Fig. 4 Response of 60° channel with n_i

化是互不相关的,它们的测量结果可以用来同时反演气溶胶粒子的折射率实部 n_r 和虚部 n_i 。由图 3 可以看到, 60° 和 110° 两个散射角通道响应量对于半径在 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 的粒子是有一定的相关性的,但总体来说它们满足成为最佳散射角的第二个条件。图 4 和图 5 是 60° 和 110° 两个散射

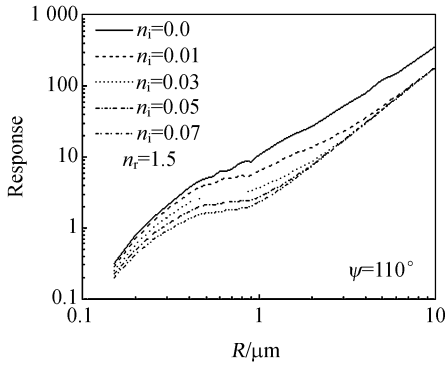


图 5 110°散射系统响应曲线随折射率的变化

Fig. 5 Response of 110° channel with n_i

角系统的相应曲线,可以看出随着粒子粒径的增大响应量几乎都是单调上升的,只是响应曲线在 0.8 μm 稍有下降,但总体来说它们满足成为最佳散射角第三个条件。

3 实验装置和仪器参数

双角度光学粒子计数器由光电测量箱和数据处理计算机两部分组成。光电测量箱包括光源、聚光系统、光学散射腔、光电倍增管等。如图 6 所示,系统参数在表 1 中,其光源采用 LED 发光二极管。气溶胶粒子通过光照区时所散射的光信号被高灵敏度光电倍增管(日本滨淞公司生产 1P28)接收并转换为电脉冲,以电脉冲的幅度来确定粒子的大小,以电脉冲的计数来确定粒子的浓度。

数据处理计算机采用工控机,兼做控制和数据处理用,其规格是:P4 1.8G CPU,液晶显示器等。工控机总线槽中配有一块高性能的 16 bit PCI A/D 转换板,它将电压信号转换成数值量供工控机处理,其特色是粒子谱的测量完全由软件完成。

被采样空气通过散射腔的气柱直径约 1 mm,气柱散射区长度是 0.8 mm。为避免气流中气溶

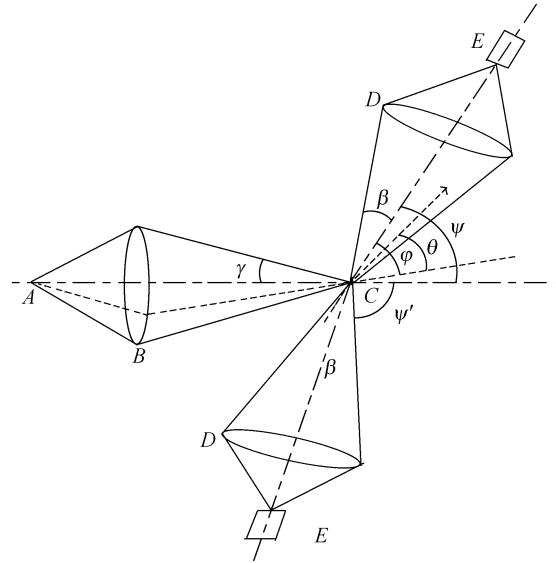


图 6 D-OPC 的光路示意图

Fig. 6 Sketch map of D-OPC optical path

胶粒子扩散出去造成镜片污染和虚假计数,气柱外有一个由气路提供的干净空气保护气套。当所采空气中气溶胶粒子浓度较大时,粒子同时穿过散射区的几率提高,使测量误差增大。这时可在混合腔中通过稀释气路输入经过滤的干净空气对粒子进行稀释,以减小误差。

从光电倍增管出来的电信号上叠加有少量的高频本底噪音,为保证测量精度设计了放大和滤波电路,放大和滤波后的信号送至 A/D 采集器。在工控机控制下做波形采集,软件对数据进行判峰、分道、计数等处理,然后再进行下一批采集直至总采集量完成。整个采集控制和信号处理软件采用 VB 语言编程,软件具有紧凑、运行快、效率高的特点,仪器的稳定性、易维护性、易使用性较好。例如需要时可改变分道数目和分道电压而无须增加任何硬件,测量结果可自动保存在硬盘上,可在屏幕上直接显示计数结果,可灵活地进行自动测量、现场分析等。这些显著的特点适合于各种大气气溶胶测量研究的需要。

表 1 D-OPC 的系统参数
Tab. 1 Specifications for D-OPC

Scatter angle	γ	β	$S(\lambda)$	T	λ_1	λ_2
$\psi = 60^\circ$	20°	20°	S_1	6 000 K	$0.35 \mu\text{m}$	$0.65 \mu\text{m}$
$\psi' = 110^\circ$	20°	20°	S_1	6 000 K	$0.35 \mu\text{m}$	$0.65 \mu\text{m}$

4 仪器标定和数据处理

D-OPC 的每个散射角系统都分为 17 档,其分档门限电压和名义分档半径如表 2 所示。对于 60° 散射系统而言,折射率为 $m=1.59-i0.0$ 对应的分档半径称为名义分档半径(0.032 V 对应于 $0.166 \mu\text{m}$, 0.045 V 对应于 $0.196 \mu\text{m}$, 0.108 V 对应于 $0.37 \mu\text{m}$,其余依此类推)。 $0.032 \text{ V} \leq V_r$

$<0.045 \text{ V}$ 的电脉冲数累计在一起作为第 1 档的计数; $0.045 \text{ V} \leq V_r < 0.060 \text{ V}$ 的电脉冲数累计在一起作为第 2 档计数, ..., $3.35 \text{ V} \leq V_r < 4.2 \text{ V}$ 的电脉冲数累计在一起作为第 16 档计数, $V_r \geq 4.2 \text{ V}$ 的电脉冲数累计在一起作为第 17 档计数。对 D-OPC 定标使用的标准粒子是折射率为 $m=1.59-j0.0$ ($\lambda=0.589 \mu\text{m}$),有效平均直径为 $(0.701 \pm 0.006) \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯小球。

表 2 D-OPC 的分档门限电压和名义分档半径

Tab. 2 Channel radii and voltages of D-OPC ($m=1.59-j0.0$)

Chan.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V_r (V)	0.032	0.045	0.060	0.085	0.12	0.17	0.235	0.325	0.455	0.545	0.65	0.90	1.25	1.70	2.40	3.35	4.20
r_{60} (μm)	0.166	0.196	0.237	0.303	0.384	0.556	0.67	0.76	0.91	1.00	1.10	1.32	1.58	1.85	2.22	2.66	3.0
r_{110} (μm)	0.186	0.214	0.250	0.296	0.371	0.477	0.69	0.91	1.13	1.25	1.50	1.82	2.26	2.89	3.56	4.36	5.1

光学粒子计数器响应曲线与粒子折射率有关^[13],表 2 中的分档半径只是在一个特定折射率下的分档值。对于同样的响应量 R ,折射率不同时粒子半径可能不同,而在同一时刻相同半径范围内粒子的数目是一定的,这也是反演大气气溶胶的物理基础。这里把 60° 和 110° 散射角在相同 n_i 和 n_r 时相同粒子半径范围(r_{a_i} , r_{b_i})的粒子数记作 $\text{NUM}_{60}(r_{a_i}, r_{b_i})$ 和 $\text{NUM}_{110}(r_{a_i}, r_{b_i})$ 。它们的比值记作 RAT_i :

$$\text{RAT}_i = \frac{\text{NUM}_{60}(r_{a_i}, r_{b_i})}{\text{NUM}_{110}(r_{a_i}, r_{b_i})}. \quad (5)$$

这里设置 4 个半径段: $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$, $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$, $2.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$, i 值可取 3 或 4,当使用折射率等于大气折射率 n_{r0} , n_{i0} 的响应曲线计算的 RAT_i 理论上应该是等于 1.0,由于计算和测量的误差,它会略偏离于 1.0,即

$$\text{RAT}_1 \approx \text{RAT}_2 \approx \text{RAT}_3 \approx \text{RAT}_4 \approx 1.0. \quad (6)$$

在计算中折射率实部和虚部分别取 n_r ($1.330, 1.335, 1.340, \dots, 1.600$) 和 n_i ($0.000, 0.001, 0.002, \dots, 0.100$),计算步骤如图 7 所示。先取 3 个或 4 个粒径范围作为计算对象,使用假设的折射率进行 RAT_i 的循环计算,满足式(6)的折射率 m_i 就是实际大气气溶胶的折射率。

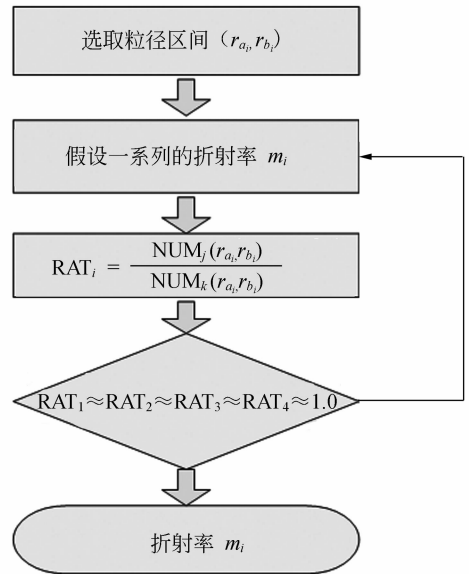


图 7 计算气溶胶折射率的流程图

Fig. 7 Flowchart of calculating refractive index

5 测量结果和对比分析

2007 年 10 月 22 日在安徽光机所大气光学中心四楼进行气溶胶测量试验,得到了 D-OPC 测量的一些数据,同时也得到了黑炭仪(AE、测量吸收系数)和浊度计(IN、测量散射系数)的测量数

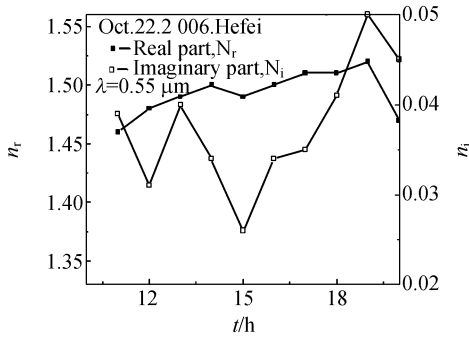


图 8 折射率随时间的变化

Fig. 8 Variation of n_r and n_i with time

据。图 8 是该天气溶胶折射率随时间的变化($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$),可以看出折射率实部在 1.45~1.52 变化,折射率虚部曲线在 0.025~0.05 变化,平均值在 0.038 附近。图 9 和图 10 是由 D-OPC 测量的谱分布和折射率计算的散射系数和吸收系数与

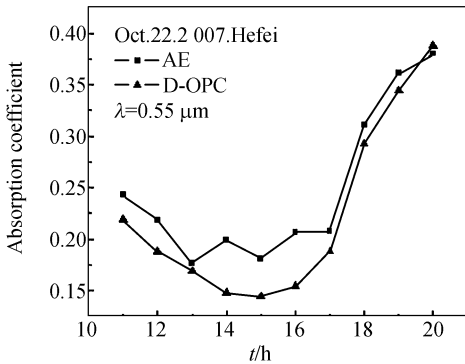


图 9 两种方法得到吸收系数的对比

Fig. 9 Comparison of absorption coefficients with two methods

浊度计和黑炭仪测量结果的对比如图 9 和图 10 可以看出两种方法得到的结果差别 $\leq 20\%$, D-OPC 测量结果稍小于浊度计和黑炭仪测量结果,但它们变化趋势有较好的一致性。以上对比初步表明利用 D-OPC 测量气溶胶谱分布和折射率的结果是合理的。

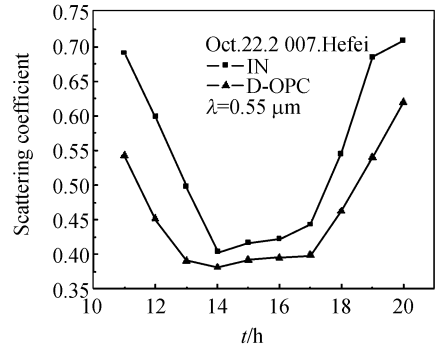


图 10 两种方法得到散射系数的对比

Fig. 10 Comparison of scattering coefficients with two methods

6 小 结

本文详细介绍了测量气溶胶谱分布和折射率的原理、方法以及一些实际测量结果。与其它仪器的测量结果对比表明,使用 D-OPC 测量气溶胶谱分布和折射率是合理的。由于测量数据有限,进一步的对比验证将会在以后的文章中陆续报道。

参考文献:

[1] 夏柱红,方黎,周留柱,等.气溶胶单粒子粒径的实时测量方法研究[J].物理学报,2004,53(1):0320-0325.
XIA ZH H, FANG L, ZHOU L ZH, *et al.*. Real-time measurement of the aerodynamic size of individual aerosol particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004,53(1):0320-0325. (in Chinese)
[2] LIN C I, BAKER M, CHARLSON R J. Absorption coefficient of atmospheric aerosol: a method for measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1973,12(6):1356-1363.
[3] WOLFF G T, STROUP C M, STROUP D P. The coefficient of haze as a measure of particulate ele-

mental carbon[J]. *J. Air Pollu. Control Associ.*, 1983,33(8):764-751.
[4] ADAMS K M. Real-time in situ measurements of atmospheric optical absorption in the visible via photoacoustic spectroscopy. 1: evaluation of the photoacoustic cells[J]. *Appl. Opt.*, 1988,27(19): 4052-4056.
[5] HAYASAKA T, MEGURO Y, SASANO Y, *et al.*. Optical properties and size distribution of aerosols derived from simultaneous measurements with lidar, a sunphotometer, and an aureolemeter[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(9):1630-1635.
[6] 李学彬,胡顺星,徐青山,等.大气气溶胶光学特性和折射率的测量[J].*强激光与粒子束*,2007,19(2): 207-210.
LI X B, HU SH X, XU Q SH, *et al.*. Measure-

- ments character of extinction and refractive index of aerosol particles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 207-210. (in Chinese)
- [7] 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 等. 散射光法探测微米群粒子场粒子性质的应用研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 5-8.
YUAN X Q, ZHAO Q, CHEN Y R, *et al.*. Scattering method applied to detect the particle properties in a multiple particle field[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 5-8. (in Chinese)
- [8] DERRY D C, MILTON K. Response calculations for light-scattering aerosol particle counters [J]. *Appl. Opt.*, 1975, 14(3): 734-739.
- [9] 谭锐, 胡欢陵. 光学粒子计数器测量结果的订正[J]. *光学学报*, 1984, 4(1): 55-60.
TAN K, HU H L. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, 4(1): 55-60. (in Chinese)
- [10] 李学彬, 宫纯文, 徐青山, 等. 气溶胶细粒子与能见度的相关性[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1177-1180.
LI X B, GONG CH W, XU Q SH. Relationship between aerosol fine particle and visibility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1177-1180. (in Chinese)
- [11] 李学彬, 高亦桥, 魏合理, 等. LED光源光学粒子计数器的研制[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 406-409.
LI X B, GAO Y Q, WEI H L, *et al.*. Development optical particle counter of LED lamp-house [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 802-806. (in Chinese)
- [12] HU H L, LI X B, ZHANG Y C, *et al.*. Determination of the refractive index and size distribution of aerosol from dual-scattering-angle optical particle counter measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(16): 3864-3870.
- [13] 阎逢旗. 大气气溶胶物理参数测量研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003: 28-30.
YAN F Q. *Measuring the Physical Characters of Atmospheric Aerosol* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003: 28-30. (in Chinese)

作者简介:



李学彬(1980—), 男, 安徽太和人, 博士, 助理研究员, 2002 年于安徽师范大学获得学士学位, 2008 年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事大气气溶胶参数光学测量的研究。E-mail: xbli@aiofm. ac. cn

高亦桥(1960—), 男, 安徽合肥人, 学士, 工程师, 主要从事大气探测技术的研究。E-mail: charlesgyq@163. com

纪玉峰(1952—), 男, 黑龙江人, 学士, 研究员, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: jyf@aiofm. ac. cn@163. com

魏合理(1965—), 男, 安徽宁国人, 博士生导师, 研究员, 主要从事大气辐射的研究。E-mail: hlwei@aiofm. ac. cn

胡欢陵(1941—), 男, 上海人, 博士生导师, 研究员, 主要从事大气气溶胶光学特性的研究。E-mail: hlhu@aiofm. ac. cn