

# 大气气溶胶粒子折射率虚部反演方法研究\*

李学彬, 宫纯文, 黄印博, 魏合理, 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, 合肥 230031)

**摘 要:**提出了反演折射率虚部的方法. 以光散射为原理的粒子计数器测量光学等效直径, 其结果受折射率虚部的影响较大; 以粒子飞行时间为原理的粒子计数器测量空气动力学直径, 其结果不受折射率虚部的影响. 利用两种仪器的测量结果受折射率影响的差异来反演大气气溶胶的折射率虚部. 通过与其它独立的测量结果对比表明, 该方法反演气溶胶折射率虚部是合理的.

**关键词:**大气气溶胶; 粒子计数器; 折射率虚部

**中图分类号:** P402; TN249      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-401-4

## 0 引言

大气气溶胶对气候变化有重要的直接或间接的影响, 通过气溶胶粒子吸收和散射太阳辐射, 直接改变地气系统的能量收支. 折射率  $m = n_r - in_i$  是大气气溶胶粒子的重要物参数. 折射率实部  $n_r$  主要与光散射有关, 而折射率虚部  $n_i$  主要与光吸收有关, 是大气气溶胶吸收特性的一个重要参数. 它决定了大气气溶胶在辐射和气候效应中的作用是加热还是冷却. 由于在实际大气中气溶胶粒子化学成分的不同导致  $n_i$  的变化范围相当大. 折射率的测量方法大体上可以分为三类. 第一类是测量直接取样得到的气溶胶粒子样品的吸收系数, 滤膜取样方法<sup>[1-2]</sup>和元素碳浓度法<sup>[3]</sup>就是常用的一种方法, 它简单易行, 但由于测量中改变了粒子的悬浮性, 所以测量结果的误差较大. 第二种方法是光声方法<sup>[4]</sup>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. 第三类方法是反演法<sup>[5-6]</sup>, 例如测量气溶胶的谱分布和散射系数、吸收系数, 通过 Mie 散射理论可以反演出气溶胶粒子的平均折射率. 本文所提出的方法就是反演法.

针对气溶胶折射率在分析其光学特性中的重要性以及直接测量气溶胶折射率存在的困难, 本文使用两种不同原理的仪器同时测量气溶胶的谱分布, 利用折射率对它们测量结果影响的差异来反演气溶胶折射率, 最后还与黑碳仪的测量结果进行了对比.

## 1 仪器和测量原理

### 1.1 APS3321 气溶胶粒度仪

APS3321 气溶胶粒度仪采用双束激光的空气

动力学粒径测量方法测量气溶胶粒子的粒径, 如图 1. 这种方法使用两束连续激光, 两激光束之间相距一定的距离  $d$ , 将这两束激光平行并垂直于粒子飞行路径的轴线照射到沿着轴线飞行的气溶胶粒子上, 粒子与激光束碰撞产生的散射光分别被两个光电倍增管 (Photo Multiplier Tube, PMT) 接收, PMT 产生的电信号经过放大和整形, 再输入设计好的时标电路, 通过该时标电路就可以测出气溶胶粒子在这两束激光间飞行所用的时间, 由此即可计算出粒子的飞行速度. 而气溶胶粒子的飞行速度与其粒径大小是紧密相关的, 气溶胶粒子束在发生绝热膨胀过程中, 由于气溶胶粒子惯性的不同, 气溶胶粒子将获得一个速度分布 (一般在几百 m/s 的数量级), 较小的粒子获得较大的速度, 而较大的粒子获得较小的速度. 利用这个性质, 先用已知粒径的标准粒子得到粒子飞行速度与粒径大小之间关系的定标曲线<sup>[7-8]</sup> (图 2), 有了此定标曲线, 只要测出待测气溶胶粒子的飞行时间即可得到该粒子粒径的大小. 这种方法因不受气溶胶粒子本身所固有的性质如折射率、非球型等因素的影响, 从而大大提高了粒子粒径测量的精度.

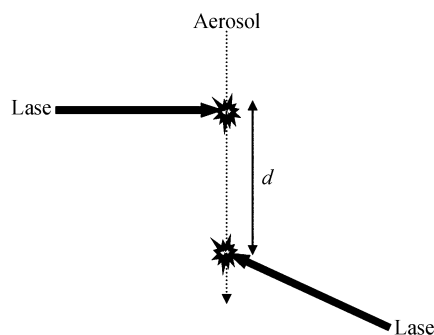


图 1 APS3321 光学工作原理  
Fig. 1 APS3321 work principle

\* 国家自然科学基金(40475019)和中国科学院知识创新方向性项目(KGCX2-SW-413)资助

Tel: 0551-5595005      Email: xbli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-10-12

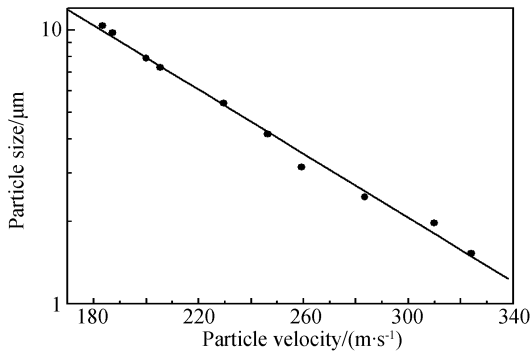


图2 粒子速度与粒子半径

Fig. 2 Particle velocity vs particle size

## 1.2 光学粒子计数器

DLJ-92多道光学粒子计数器<sup>[9-10]</sup> (Optical Particle

表1 光学粒子计数器 DLJ-92 的名义分道半径 ( $m=1.59-0.0i$ )

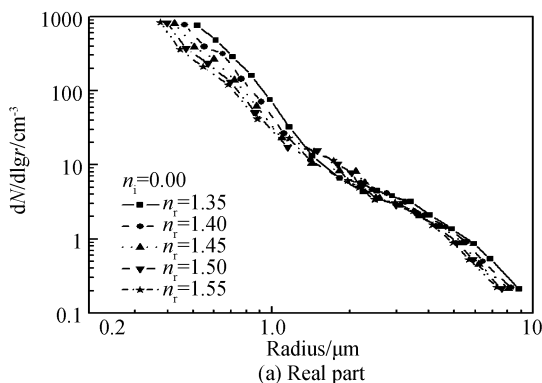
分道	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
半径 $r/\mu\text{m}$	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00

## 2 理论分析

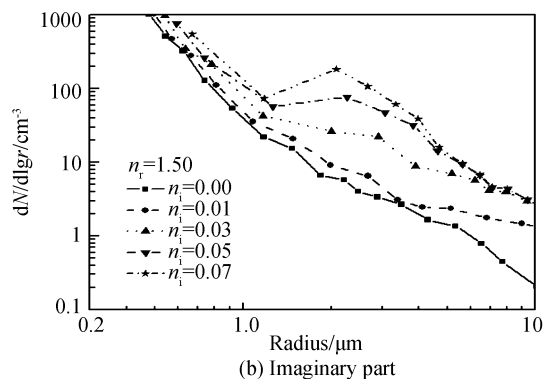
### 2.1 折射率对光学粒子计数器测量结果的影响

对于光学粒子计数器不同的折射率和不同的分档半径相对应,所以折射率通过分档半径影响到 OPC 测量的大气气溶胶粒子谱分布. 为了研究折射率对大气气溶胶粒子谱分布的影响,这里对 2006 年 12 月 12 日 11:30~12:00 在厦门测量的同一组 OPC 数据,本文利用不同折射率对应的分档半径计算大气气溶胶粒子谱分布  $n(r)$ . 由于对流层大气气溶胶实部在  $n_r=1.50$  左右,所以首先假定折射率虚部不变  $n_i=0.0$ ,改变折射率实部 ( $n_r=1.35\sim 1.65$ ),以研究  $n_r$  对响应曲线的影响;然后假定折射率实部不变 ( $n_r=1.50$ ),改变折射率虚部 ( $n_i=0.0\sim 0.07$ ),以研究  $n_i$  对响应曲线的影响. 计算结果分别如图 3(a)和(b).

由图 3 可以看出,对于同样的  $n_i$ ,不同  $n_r$  对应的气溶胶粒子数密度  $n(r)$  的结构类似. 对于同样的  $n_r$ ,不同  $n_i$  对应的  $n(r)$  存在明显差别. 上述分析表明,OPC 测量的  $n(r)$  对气溶胶的折射率是敏感的,



(a) Real part



(b) Imaginary part

图3 不同折射率实部和虚部对应的气溶胶谱分布

Fig. 3 The size distribution with different refractive indices, especially for  $n_i$  is very sensitive. This provides a possibility for the inversion of the refractive index imaginary part.

### 2.2 $n_i$ 的计算方法

由于使用两个不同原理的仪器同时对气溶胶谱分布进行测量,它们的测量结果既存在一定的相关性,也存在一定的差异. 由于绝大部分气溶胶粒子都不是球形的以及化学成分的差异,使得两种方法测量粒子的大小有所不同,如图 4,但从粒子谱形上考虑,两种方法测量的气溶胶粒子谱形即斜率是相同的或者是一致的. 图 5 是 2006 年 12 月 19 日用 3321 测量的谱分布计算的消光系数和散射系数(假设折射率  $m=1.50-0.01i$ )与黑碳仪和浊度计测量结果的对比,可以看到它们差别也很大,黑碳仪和浊度计测量结果大于用 APS3321 计算的结果,但两种方法得到的消光系数和散射系数曲线的变化趋势具有很好一致性,这说明动力学粒径和光学粒径之间具有一定的比值关系,这就为反演折射率提供了条件.

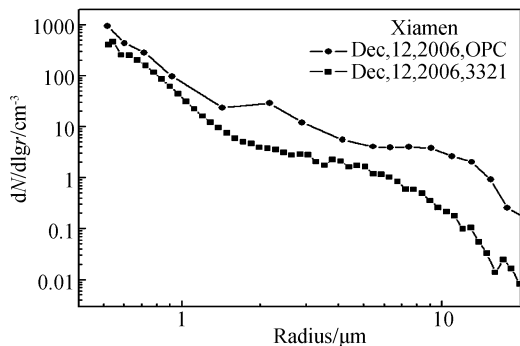


图4 两种方法得到气溶胶谱分布结果比较  
Fig. 4 Comparison of size distribution measured by OPC and APS3321

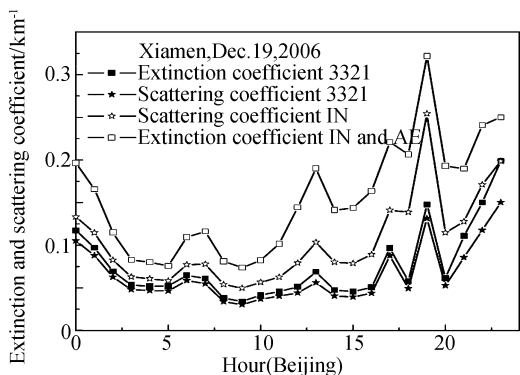


图5 两种方法得到的气溶胶散射系数和消光系数的比较  
Fig. 5 Comparison of extinction and scattering coefficient measured by OPC and APS3321

这里把两个仪器测量的在相同半径范围( $ra_i$ ,  $rb_i$ )的光学粒子谱和动力学粒子谱曲线斜率分别记作  $V_g(ra_i, rb_i)$  和  $V_d(ra_i, rb_i)$ , 它们的比值记作  $RAT_i$

$$RAT_i = \frac{V_g(ra_i, rb_i)}{V_d(ra_i, rb_i)} \quad (1)$$

这里设置四个半径段:  $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$ ,  $0.7 \sim 1.2 \mu\text{m}$ ,  $2.0 \sim 4.0 \mu\text{m}$ ,  $5.0 \sim 8.0 \mu\text{m}$ . 在数值试验中,  $i$  值可取 2, 3 或者 4. 这里假设  $n_r = 1.50$ , 当用不同于实际测量气溶胶的折射率虚部  $n_{i0}$  对应的粒子谱计算的  $RAT_i$  相互是不同的, 用折射率虚部等于  $n_{i0}$  的粒子谱计算的  $RAT_i$  理论上应该是等于 1.0, 实际上, 由于反演计算中谱拟合的误差, 它会略偏离于 1.0, 即

$$RAT_1 \approx RAT_2 \approx RAT_3 \approx RAT_4 \approx 1.0 \quad (2)$$

这里把它们的相对差别定义为

$$\epsilon_i = 1 - RAT_i \quad (3)$$

使式(4)所表达具有最小值时所对应的折射率即认为是所测量气溶胶的折射率

$$\epsilon = \sqrt{(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_i^2)} / i \quad (4)$$

### 3 计算结果

2006 年 12 月在厦门, 使用 DLJ-06 多道光学子计数器、APS3321 气溶胶粒度仪和黑碳仪进行同

步测量. 这里对测量数据进行 1 h 平均. 图 6 是利用本文方法反演折射率的昼夜变化图, 由图 6 可以看出, 折射率虚部曲线在  $0.005 \sim 0.025$  之间变化, 平均值在 0.007 附近, 它有明显的昼夜变化. 图 7 是利用粒子谱分布和反演得到的折射率虚部计算的吸收系数与黑碳仪测量的吸收系数的对比, 可以看出两者变化趋势基本一致, 与测量值相比计算值在 10% 以内波动, 这证明该方法反演气溶胶折射率虚部是合理的. 图 7 中的吸收系数昼夜变化与图 6 中的折射率变化有很好的一致性, 这也正说明了折射率虚部是反映气溶胶粒子吸收的重要参数.

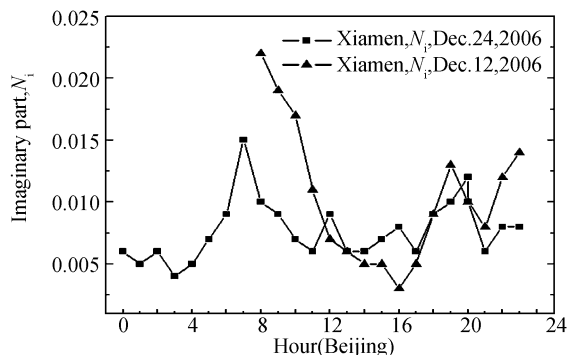


图6 折射率虚部的昼夜变化  
Fig. 6 The Average diurnal variations of  $n_i$

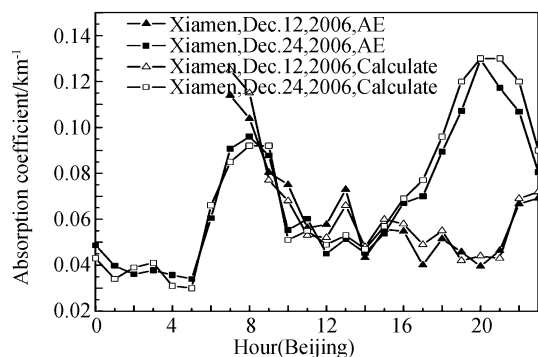


图7 两种方法得到吸收系数的比较  
Fig. 7 Comparison of absorption coefficient

### 4 结论

在本文中, 详细介绍了利用两种不同原理的仪器的测量结果来反演气溶胶粒子折射率虚部的原理、方法及一些实际计算的结果. 与其它方法的测量结果对比表明此方法是合理的. 由于反演计算中谱拟合的误差以及折射率实部也有一定的影响, 所以此方法存在一定的误差, 还有待于进一步深入研究.

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] HU Huan-ling, XU Jun, HUANG Zheng. The characteristics of the imaginary part of aerosol refractive index in some places of eastern china [J]. *Chinese J of Atmos Sci*, 1991, 15(3): 18-23.

- 胡欢陵,许军,黄正. 中国东部若干地区大气气溶胶虚折射指数特征[J]. 大气科学, 1991, **15**(3):18-24.
- [3] WOLFF G T, STROUP C M, STROUP D P. The coefficient of haze as a measure of particulate elemental 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] HU Huan-ling, YAN Feng-qi, YU Tong. Combining inversion method of aerosol refractive index and its diurnal variation at Beijing in summer and winter seasons[J]. *Chin J Proc Eng*, 2002, **2**(suppl):297-299.
- 胡欢陵,阎峰旗,虞统. 综合法反演气溶胶折射指数及其在北京夏冬季的日变化[J]. 过程工程学报, 2002, **2**(suppl):297-299.
- [6] LI Xue-bin, HU Shun-xing, XU Qing-shan, *et al.* Measurements character of extinction and refractive index of aerosol particles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2):207-210.
- 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.
- [7] XIA Zhu-hong, FANG Li. Real-time measurement of the aerodynamic size of individual aerosol particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(01):0320-0325.
- [8] LIAN Yue, LIU Wen-qing, ZHANG Tian-shu. Measurement analysis of atmospheric aerosol aerodynamics size with APD detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1837-1840.
- 连悦,刘文清,张天舒,等. 利用 APD 对大气气溶胶空气动力学直径测量分析[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1837-1840.
- [9] TAN Kun, HU Huan-ling. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(1):55-60.
- 谭锃,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.
- [10] JIA Guang-ming, ZHANG Zhe, ZHANG Gui-zhong, *et al.* Measurement of refractive index of polystyrene beads by using Mie scattering theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10):1473-1475.
- 贾光明,张喆,张贵忠,等. 用 Mie 氏散射理论测量聚苯乙烯微球的折射率[J]. 光子学报, 2005, **34**(10):1473-1475.

## Method of Retrieving Refractive Index of Aerosol Particles

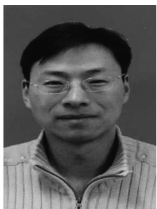
LI Xue-bin, GONG Chun-wen, HUANG Yin-bo, WEI He-li, HU Huan-ling

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Heifei 230031, China)

Received date: 2007-07-25

**Abstract:** A new method was proposed to retrieve imaginary part of aerosol refractive index by using two kinds of particle counters. One measured the optical size of aerosol particle, which was greatly effected by the refractive imaginary part, and the other one measured aerodynamic of aerosol particle size, which was not effected by refractive imaginary part. The aerosol refractive index was retrieved by combining the measurement of these two kinds of particle counters.

**Key words:** Aerosol; Particle counter; Refractive imaginary part



**LI Xue-bin** was born in 1980. He obtained the Ph. D. degree from Key Lab of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and his research interests focus on atmospheric aerosol and optical instrument.