

文章编号: 0253-2239(2003)07-0855-5

# 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量

阎逢旗 胡欢陵 周军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所国家大气光学重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 介绍一种综合利用光学粒子计数器和能见度仪测量大气气溶胶折射率虚部的新方法。首先, 使用光学粒子计数器测量出大气气溶胶粒子的数密度谱(待订正), 用能见度仪同步测量出水平能见度。然后, 根据球形粒子的米氏(Mie)散射理论, 通过分析气溶胶粒子的折射率虚部、分档半径、粒子数密度谱、消光系数和能见度之间的关系, 对分档半径进行订正, 得到折射率虚部和能见度之间的对应关系。结合同步测量的能见度, 反演出大气气溶胶粒子的折射率虚部。最后, 利用折射率虚部对光学粒子计数器数据进行订正, 得到大气气溶胶粒子的数密度谱。

**关键词:** 大气光学; 气溶胶; 光学粒子计数器; 折射率虚部; 数密度谱

中图分类号: P427.1<sup>+1</sup> 文献标识码: A

## 1 引言

大气气溶胶粒子的折射率虚部  $n_i$  是大气气溶胶吸收特性的一个重要参量。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<sup>[1]</sup>。在实际大气中, 由于气溶胶粒子化学成分的不同导致  $n_i$  的变化范围相当大。近年来, 对大气气溶胶粒子折射率虚部的测量研究愈来愈引起广泛的重视<sup>[2~9]</sup>。

本文介绍一种测量大气气溶胶粒子折射率虚部的新方法。首先简要叙述了光学粒子计数器(OPC)和能见度仪的结构和工作原理, 然后进行光学粒子计数器和能见度仪测量大气气溶胶粒子折射率虚部和数密度谱的理论分析, 最后给出北京地区大气气溶胶粒子的折射率虚部和数密度谱的测量结果。

Table 1 The nominal channel radii of DLJ-92 OPC ( $m=1.59$ )

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Radius / $\mu\text{m}$	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

## 2.2 能见度仪

能见度仪(FD12 U21208, 芬兰 Vaisala 公司)根据气溶胶粒子的前向散射特性测量气象光学视距(MOR)。该仪器主要由发射、接收和控制三部分组成。发射器发出近红外光脉冲, 接收器探测气溶胶粒子的前向散射光, 然后将该信号转换成偏频信号(offset frequency)。再根据频率信号与气象光学视距之间的对数关系, 计算出气象光学视距。需要说

## 2 仪器和测量原理

### 2.1 光学粒子计数器

DLJ-92 多道光学粒子计数器是利用粒子的光散射特性来测量粒子的数密度谱和浓度的。由于它直接抽取环境空气, 不破坏粒子的悬浮状态, 所以测量结果能真实反映气溶胶粒子谱分布的特征。该仪器采用 60°的散射光学系统<sup>[10]</sup>, 气溶胶粒子通过光照区时所散射的光信号被光电倍增管接收并转换为电脉冲(称为响应量), 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。它将半径为  $0.15 \sim 6.0 \mu\text{m}$  的粒子分成 17 档, 其分档半径如表 1 所示。标定仪器使用的标准粒子是折射率  $m=1.59$ , 直径为  $(0.71 \pm 0.05)\mu\text{m}$  的聚苯乙烯小球。

明的是, 气象光学视距对应的识别目标的对比度阈值  $\epsilon=0.05$ , 而通常所说的能见度所对应的对比度阈值  $\epsilon=0.02$ 。所以气象光学视距乘以系数  $c=\ln(1/0.02)/\ln(1/0.05)$  就得到能见度。该能见度仪的探测精度为:  $\pm 10\%$  (能见度为  $10 \text{ m} \sim 10 \text{ km}$  时),  $\pm 20\%$  (能见度为  $10 \sim 50 \text{ km}$  时)。

## 3 理论分析

### 3.1 气溶胶粒子折射率虚部与数密度谱的关系

#### 3.1.1 光学粒子计数器分档半径的订正

因为光学粒子计数器响应曲线与粒子折射率有

关,所以表 1 中的分档半径只是在一个特定折射率下的响应曲线的分档值。由于不同的折射率,对应于不同的分档半径,所以应该根据实际被测气溶胶粒子的折射率对分档半径进行订正<sup>[10]</sup>。根据球形粒子的米氏散射理论,分别计算了折射率实部和虚部对光学粒子计数器响应曲线的影响。由于对流层大气气溶胶粒子的折射率实部  $n_r$  在 1.5 左右,所以首先假定折射率虚部不变 ( $n_i=0$ ),改变折射率实部 ( $n_r=1.30 \sim 1.70$ ),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 ( $n_i=0 \sim 0.072$ ),以研究  $n_i$  对响应曲线的影响。计算结果分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。由图 1 可以看出,虽然折射率实部从 1.30 到 1.70 有较大的变化,但光学粒子计数器的响应量变化并不明显;而折射率虚部变化时,光学粒子计数器的响应量的变化却很明显(例如在半径为 1  $\mu\text{m}$  处,  $n_i=0$  对应的响应量大约是  $n_i=0.072$  对应的响应量的 10 倍)。可见,光学粒子计数器响应曲线对大气气溶胶粒子折射率实部不敏感,而对折射率虚部非常敏感。

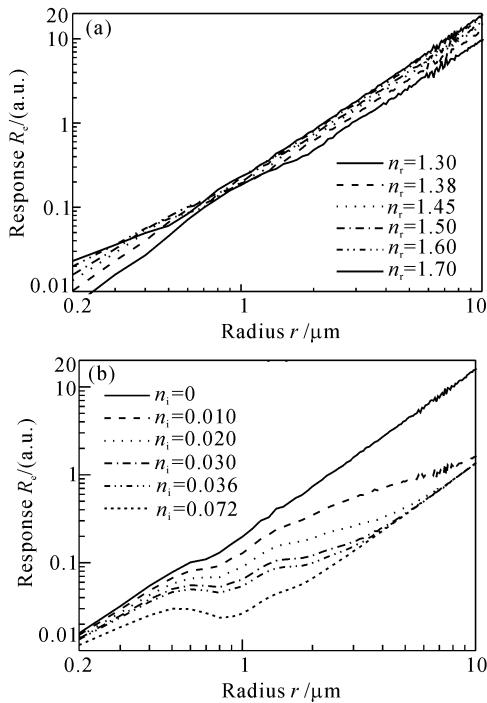


Fig. 1 The response of OPC with different refractive index (response in relative unit). (a) Different  $n_r$  ( $n_i=0$ ); (b) Different  $n_i$  ( $n_r=1.5$ )

根据上述分析,取大气气溶胶粒子的折射率实部为 1.5,根据折射率虚部对光学粒子计数器的分档半径进行订正。取 101 个折射率虚部  $n_{ix}$  ( $x=1, 2, \dots, 101$ ),  $n_{i1}=0, n_{i2}=0.001, n_{i3}=0.002, \dots, n_{i100}$

$=0.099, n_{i101}=0.100$ ,于是就有 101 个与  $n_{ix}$  相对应的分档半径  $r_x(j)$  ( $j=1 \sim 17$ )。图 2(a)、图 2(b) 分别给出了 17 档分档半径的变化趋势和各档分档半径随  $n_i$  的变化情况。从图 2 可以看出,在折射率虚部较小时,随着折射率虚部的增大,各档半径均有明显增大趋势,尤其是对应与较小粒子的前 7 档。比如  $n_i=0$  的第一档为 0.190  $\mu\text{m}$ ,而  $n_i=0.100$  的第一档为 0.249  $\mu\text{m}$ 。当  $n_i > 0.050$  时,各档半径的变化不很显著。

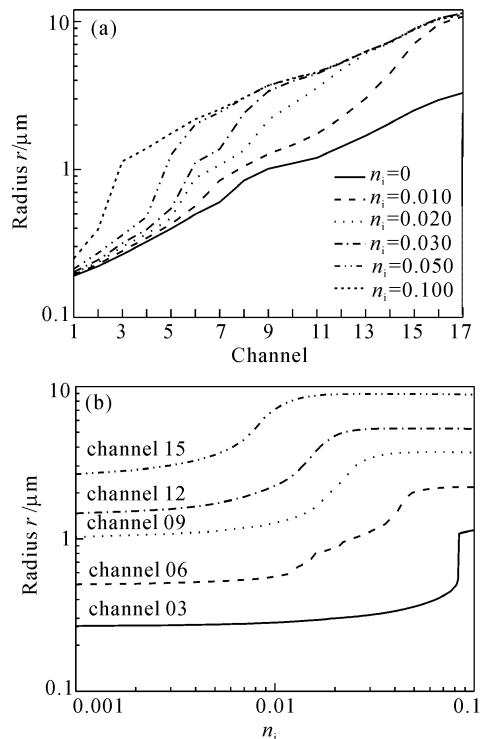


Fig. 2 Different channel radii  $r_x(j)$  ( $j=1 \sim 17$ ) for different  $n_i$

### 3.1.2 气溶胶粒子折射率虚部对光学粒子计数器测量的数密度谱的影响

为了研究折射率虚部对数密度谱的影响,对于同一组光学粒子计数器数据,取不同的折射率虚部以及与折射率虚部相对应的校正过的分档半径,计算了大气气溶胶粒子数密度谱。图 3(a) 和图 3(b) 分别是取折射率虚部依次为 0.01、0.03、0.05、0.07 时,2001 年 7 月 27 日和 2001 年 8 月 5 日当天 19:30~20:30 这两个时段内北京市大兴县榆垡镇近地面的大气气溶胶粒子数密度谱。前一时段在雨后约 8 h,期间空气清新;后一时段在雨后约 78 h,期间空气污浊。这两个时段的天气情况具有较好的代表性。从图 3 可以看出,折射率虚部对光学粒子计数器测量的大气气溶胶粒子数密度谱影响很大,尤

其是对半径在  $1\sim4 \mu\text{m}$  之间的粒子。比如在 8 月 5 日, 在气溶胶粒子半径  $r=1.59 \mu\text{m}$  时,  $n_i=0.01, 0.05, 0.07$  对应的数密度分别为  $2.08 \text{ cm}^{-3}, 100.8 \text{ cm}^{-3}, 250.0 \text{ cm}^{-3}$ 。

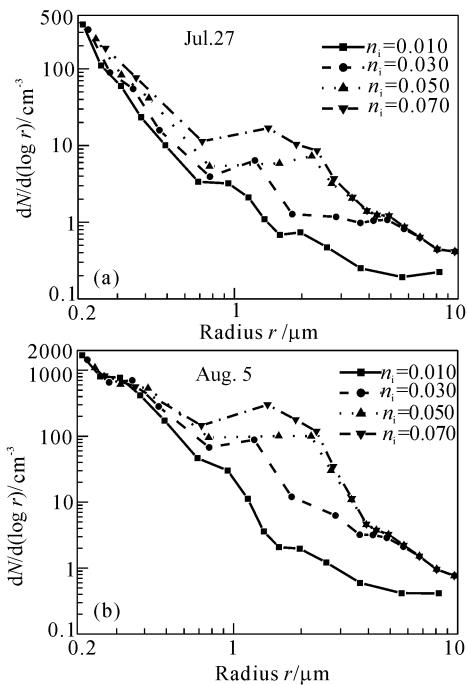


Fig. 3 Number density curves for different  $n_i$  measured with DLJ-92 OPC

利用光学粒子计数器测量的气溶胶粒子数密度谱  $n(r)$  对  $n_i$  非常敏感这一特点, 对于同一组光学粒子计数器数据, 取 101 个折射率虚部  $n_{ix}$  ( $x=1, 2, \dots, 101$ ),  $n_{i1}=0, n_{i2}=0.001, n_{i3}=0.002, \dots, n_{i100}=0.099, n_{i101}=0.100$ , 于是就有 101 个与  $n_{ix}$  相对应的分档半径  $r_x(j)$  ( $j=1\sim17$ ), 据此我们计算了与  $n_{ix}$  相对应的 101 个差别明显的大气气溶胶粒子数密度谱  $n_x(r)$ 。

### 3.2 折射率虚部与能见度的关系

根据气溶胶粒子的消光系数公式<sup>[11]</sup> (1), 可以计算出与  $n_x(r), r_x(j)$  以及  $n_{ix}$  相对应的 101 个消光系数  $\sigma_{ex}$ :

$$\sigma_{ex} = \int Q_{ex}(\alpha, m) n(r) \pi r^2 dr, \quad (1)$$

式中  $Q_{ex}(\alpha, m)$  是折射率为  $m=n_r-i n_i$ 、半径为  $r$  的粒子的消光效率因子, 并由公式(2)给出

$$Q_{ex}(\alpha, m) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) [\operatorname{Re}(a_k + b_k)], \quad (2)$$

其中, 振幅函数  $a_k$  和  $b_k$  是由里卡蒂-贝塞尔 (Riccati-Bessel) 函数决定的复数, 是尺度参数  $\alpha (=2\pi r/\lambda)$  和复折射率  $n$  的函数, 与散射角无关。 $\lambda$  是入

射光波长,  $r$  为气溶胶粒子的半径。

大气水平能见度  $V_{is}$  与气溶胶粒子消光系数  $\sigma_{ex}$  的关系为

$$V_{is} = \frac{1}{\sigma_{ex}} \ln \frac{1}{0.02}, \quad (3)$$

利用公式(3), 对于同一组光学粒子计数器实验数据, 就得到 101 个与折射率虚部  $n_{ix}$  一一对应的能见度  $V_{isx}$ 。这样就建立了包含 101 个气溶胶折射率虚部  $n_i$ —气溶胶粒子数密度谱  $n(r)$ —大气水平能见度  $V_{is}$  对应关系的数据库。图 4 给出了  $n_i$  取不同值时根据光学粒子计数器实测的  $n(r)$  计算出的水平能见度。从图 4 可以看出, 能见度对折射率虚部很敏感, 并且对于同一组光学粒子计数器数据, 折射率虚部越小, 近地面水平能见度越大。由吸收系数  $\sigma_a = 4\pi n_i / \lambda^{[11]}$ ,  $\sigma_{ex} = \sigma_{scat} + \sigma_a$ , 可知  $n_i$  与  $\sigma_{ex}$  正相关, 而能见度与  $\sigma_{ex}$  反相关, 所以  $n_i$  与能见度反相关。

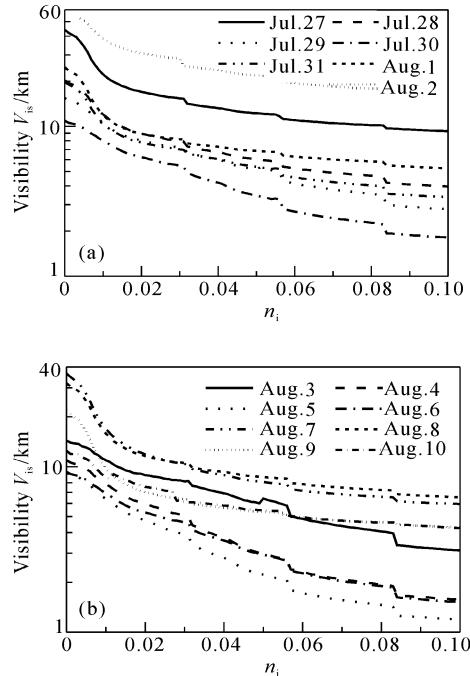


Fig. 4 Relationship between visibility and imaginary part  $n_i$  of refractive index of aerosol

能见度 FD12 U21208 同步测量的水平能见度通常与上述数据库中的能见度不相等, 于是, 通过线性内插法找到和水平能见度相对应的折射率虚部  $n_i$ , 此  $n_i$  就是当时大气气溶胶粒子的折射率虚部。

## 4 测量结果及分析

### 4.1 折射率虚部

2001 年 7 月 27 日至 8 月 10 日每天的 19:30~

20:30, 在北京市大兴县榆垡镇北京神韵温泉宾馆四楼楼顶, 我们用 DLJ-92 多通道光学粒子计数器和能见度仪(FD12 U21208)进行了同步测量。表 2 和图 5 是用上述方法反演出的大气气溶胶粒子的折射率虚部。折射率虚部  $n_i$  的平均值为  $\bar{n}_i = 0.02459$ , 标准误差为  $\sigma = 0.00369$ 。

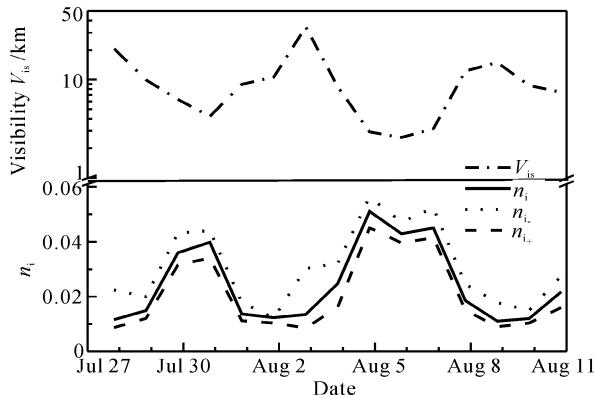


Fig. 5 Visibility and the calculated imaginary part of refractive index

Table 2 Visibility and the calculated imaginary part of refractive index

Data	$V_{is}$ / km	$n_i$
July 27	20.64	0.0116
July 28	9.94	0.0149
July 29	6.27	0.0306
July 30	4.22	0.0398
July 31	8.96	0.0137
Aug. 01	10.61	0.0124
Aug. 02	34.43	0.0135
Aug. 03	8.50	0.0247
Aug. 04	2.93	0.0511
Aug. 05	2.57	0.0429
Aug. 06	3.16	0.0450
Aug. 07	12.23	0.0186
Aug. 08	14.94	0.0111
Aug. 09	8.71	0.0120
Aug. 10	7.43	0.0217

设能见度仪探测精度上下限对应的能见度分别为  $V_{is+}$  和  $V_{is-}$ , 则有

$$V_{is-} = 0.9V_{is}, V_{is+} = 1.1V_{is}, (10 \text{ m} < V_{is} < 10 \text{ km})$$

$$V_{is-} = 0.8V_{is}, V_{is+} = 1.2V_{is}, (10 \text{ km} \leq V_{is} < 50 \text{ km})$$

利用  $V_{is+}$  和  $V_{is-}$  反演出的折射率虚部分别记为  $n_{i+}$  和  $n_{i-}$ 。设  $n_i$  为真值, 则 7 月 28 日至 8 月 1 日和 8 月 3 日至 10 日  $n_{i+}$  和  $n_{i-}$  的标准误差分别为 0.0054 和 0.0045, 相对误差分别为 20.0% 和 18.1%。7 月 27 日和 8 月 2 日(19:30—20:30)空气特别干净, 能见度比较大,  $n_{i+}$  和  $n_{i-}$  对应的标准误差和相对误差相对较大。

#### 4.2 大气气溶胶粒子数密度谱

有了折射率虚部, 就可以利用光学粒子计数器数据计算出大气气溶胶粒子数密度谱。图 6(a)和图 6(b)分别是 7 月 27 日至 30 日和 8 月 1 日至 4 日的大气气溶胶粒子数密度谱。7 月 26 日晚上至 27 日上午, 8 月 2 日上午 9:00 至下午 1:50, 榆垡镇下了小雨。降雨使大气气溶胶粒子得以较好地清除, 于是气溶胶粒子数密度减小, 尤其是尺寸较大的粒子数目的减少更加明显。7 月 31 日至 8 月 2 日, 北风较大, 使原来稳定少动的近地面污浊空气得到更新。此外, 与粒子数密度的减小相对应的是粒子消光系数的减小和能见度的增大; 随后, 由于交通扬尘、工业污染等因素使大气中的气溶胶粒子逐渐增多, 于是粒子数密度和折射率虚部逐渐增大, 能见度逐渐降低。这与实验结果(图 5 和图 6)吻合, 从而也印证了用光学粒子计数器和能见度仪测量大气气溶胶粒子折射率虚部和数密度谱的正确性。数密度谱在粒子半径为 2  $\mu\text{m}$  附近有一较大的峰值, 具有普遍性<sup>[12,13]</sup>。

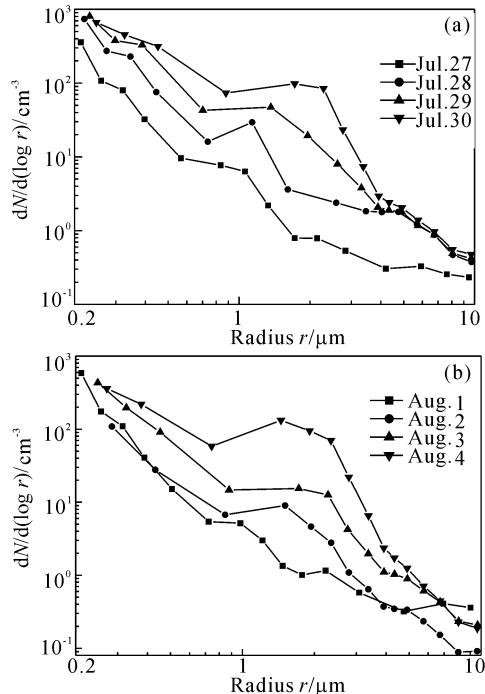


Fig. 6 Number density distribution of atmospheric aerosols for different date

#### 结论

1) 光学粒子计数器测量的大气气溶胶粒子的数密度谱对气溶胶粒子折射率虚部非常敏感, 故用光学粒子计数器测量大气气溶胶粒子数密度谱时, 需要根据当时气溶胶粒子的折射率(尤其是虚部)对

光学粒子计数器的测量结果进行订正。

2) 综合光学粒子计数器和能见度仪的测量结果, 可以直接、快速地反演出大气气溶胶粒子的折射率虚部和粒子数密度谱。

在测量仪器和试验条件方面, 得到北京市环境监测中心虞统总工程师等同志的大力支持, 得到安徽光机所的谭锐研究员、邵石生和范爱媛等同志的宝贵帮助, 在此一并表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

- 1 Yamamoto G, Tanaka M. Increase of global albedo due to air pollution. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**(8):1405~1412
- 2 Hu H, Xu J, Huang Z. The characteristics of the imaginary part of aerosol refractive index in some places of eastern China. *Chin. J. Atmos. Sci.* (大气科学), 1991, **15**(2):230~236 (in Chinese)
- 3 Gilleppe J B, Linber J D. Seasonal and geographic variations in imaginary refractive index of atmospheric particulate matter. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(12):2107~2111
- 4 Zhao Fengsheng, Gong Zhiben, Hu Huanling *et al.*. Simultaneous determination of the aerosol complex index of refraction and size distribution from scattering measurements of polarized light. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30):7992~8001
- 5 Zhao Fengsheng. Determination of the complex index of refraction and size distribution of aerosols from polar
- nephelometer measurements. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12):2331~2336
- 6 Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols. Part I : Theory. *Chin. J. Atmos. Sci.* (大气科学), 1998, **22**(5):677~685 (in Chinese)
- 7 Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols. Part II : Comparative measurement and application. *Chin. J. Atmos. Sci.* (大气科学), 2000, **24**(2):145~151 (in Chinese)
- 8 Gerber H E, Hindman E E. First international workshop on light absorption by aerosol particles: Background, activities and preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1981, **62**(9):1321~1327
- 9 Hu Huanling, Xu Jun. Deducing imaginary part of refractive index of aerosol with an optical particle counter. *Chin. J. Atmos. Sci.* (大气科学), 1991, **15**(5):18~24
- 10 Tan Kun, Hu Huanling. Correction of measured results of an optical particle counter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1984, **4**(1):55~60 (in Chinese)
- 11 van de Hulst H C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957. 127~129, 267
- 12 Zhu Wenqin. Analysis of observed size distribution of atmospheric aerosols. *Chin. J. Atmos. Sci.* (大气科学), 1982, **6**(2):217~223 (in Chinese)
- 13 Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. *Atmospheric Aerosol Tutorial* (大气气溶胶教程). Beijing: Meteorology Publishing House, 1995. 7~8 (in Chinese)

## Measurements of Number Density Distribution and Imaginary Part of Refractive Index of Aerosol Particles

Yan Fengqi Hu Huanling Zhou Jun

(National Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 4 March 2002; revised 24 June 2002)

**Abstract:** A new method is proposed for the measurement of imaginary part of refractive index  $n_i$  of aerosol by using an optical particle counter (OPC) and a visibility meter (VM). The number density distribution of aerosol particle is measured by an OPC with nominal radii, and visibility is measured simultaneously with a VM. According to the Mie scattering theory, the different distributions can be obtained with different  $n_i$  for the same set of data measured by OPC. Then, a curve of extinction coefficient can be calculated with  $n_i$  from these distributions. Actual value of  $n_i$  can be decided with the real extinction coefficient provided by visibility measurement. Finally, the actual number density distribution of aerosol particles is obtained from the OPC data and the decided  $n_i$ .

**Key words:** atmospheric optics; aerosol; optical particle counter; imaginary part of refractive index; number density distribution