

文章编号: 0253-2239(2007)03-0391-4

双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率的新方法研究*

李学彬 徐青山 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: 根据米氏(Mie)散射理论,通过数值模拟分析了气溶胶折射率虚部 n_i 在不同散射角度上对双散射角激光光学粒子计数器(L-OPC)响应曲线的影响,定义了敏感函数。根据分析,散射角应该在小于 20° 和 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间选取。以散射角系统 $\psi=9^\circ, \beta=5^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 和 $\psi=50^\circ, \beta=20^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 为例,其中一个散射角受折射率虚部 n_i 的影响较小,另一个较大。在测量粒子谱分布的同时,利用 n_i 对不同散射角度响应曲线的影响差异,来确定 n_i 值,并提出确定 n_i 的方法。还给出了双散射角激光光学粒子计数器的模拟测量结果。

关键词: 大气光学; 气溶胶; 激光光学粒子计数器; 折射率虚部

中图分类号: TN2 文献标识码: A

New Method to Deduce Imaginary Part of Refractive Index of Aerosol with Double-Scattering Angles Laser Optical Particle Counter

Li Xuebin Xu Qingshan Hu Huanling

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

Abstract: The sensitivity of a laser optical particle counter (L-OPC) measuring to the refractive index of particles is analysed, and the dependence of response on n_i , the imaginary part of the refractive index is discussed. Sensitivity function f_i is defined. A scattering angle less than 20° is chosen and another is between 40° and 60° according to analysis of theory. For example, scattering angles system $\psi=9^\circ, \beta=5^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ and $\psi=50^\circ, \beta=20^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$, the one is slightly not effected by n_i , the other is greatly. By using different sensitivity of different scattering angles to n_i , the value of n_i can be deduced from the measurement by a laser optical particle counter of double scattering system. The simulation method will be used to deduce n_i .

Key words: atmosphere optics; aerosol; laser optical particle counter; refractive index

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,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。气溶胶粒子作为云的凝结核(CCN)改变云的光学特性和生命期而间接地影响气候。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。颗粒物污染造成低能见度,细粒子进入肺部损害健康,气溶胶微物理参量的测量是认识其污染变化特点以至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量,如散射系数、吸收系数、单次反照率、相函数和角散射系数等。谱分布和折射率是气溶胶基本物理参量。气溶胶谱分布已有

* 国家自然科学基金(40475019)资助课题。

作者简介: 李学彬(1980-),男,安徽太和人,博士研究生,主要从事大气气溶胶方面的研究。

E-mail: lixuebin8011@yahoo.com.cn

导师简介: 胡欢陵(1941-),男,资深研究员,博士生导师,主要从事大气气溶胶和激光雷达及大气环境的研究。

E-mail: hlhu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2006-01-15; 收到修改稿日期: 2006-06-15

许多直接测量方法。气溶胶折射率的测量则复杂得多,滤膜取样方法^[1]和元素碳浓度法^[2]只能测量折射率虚部,误差也较大;光声方法^[3]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^[4]也有其局限性。文献[5]提出的反演气溶胶折射率的综合法,需要多种仪器同时测量,它的广泛应用受到一定的限制。因此,探索测量气溶胶折射率新的方法仍然受到普遍关注。

本文根据米氏散射理论,通过数值模拟实验,分析了气溶胶折射率虚部 n_i 在不同散射角度上对激光光学粒子计数器响应曲线的影响,提出利用 n_i 对不同角度系统响应曲线的影响差异来确定 n_i 值的方法。

2 散射角度的选取

对于激光光学粒子计数器,其响应量与粒子大小粒子折射率和散射角有关,表达式^[6]为

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

式中 λ 是光源发光波长, β 是接收透镜张角的一半, θ 是散射角变量, φ 是入射光线与接收透镜光轴的夹角变量, i_1 和 i_2 是入射光电矢量分别垂直和平行于观测平面的强度分布函数,它是粒子尺度参量 α 、复折射率 m 、散射角 θ 和波长 λ 的复杂函数, $F(\theta, \varphi)$ 是几何因子,它与光学结构有关。由于激光光源的方向

性很好,不需要汇聚透镜,只需要接收透镜,对应的 $F(\theta, \varphi)$ 为

$$F(\theta, \varphi) = 2 \sin \theta \cdot \arccos \left(\frac{\cos \beta - \cos \theta \cos \varphi}{\sin \theta \sin \varphi} \right). \quad (2)$$

为了能够确定两个最佳散射角度,即一个角度折射率的影响很大,而另一个角度折射率影响很小,分析响应曲线对折射率敏感度随散射角的变化是必要的。由于实部的影响较小^[7],这里只讨论虚部的影响。定义虚部的敏感函数 $f_i(\alpha, \theta, m)$,用它描述响应量对折射率的敏感程度:

$$f_i(\alpha, \theta, m) = \left| \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial n_i} \right|, \quad (3)$$

敏感函数 f_i 越大,粒子的折射率虚部 n_i 对响应量 R 的影响就越大。在对不同散射角度上的敏感函数的对比分析中,要求最佳的两个散射角:(1) 其中一个散射角度上敏感函数值很大,即对折射率很敏感,这样对相同粒径不同折射率粒子的响应量将会差别很大;(2) 另一个散射角度上不同折射率的敏感函数值很小,这样不同折射率响应曲线的差别才会很小。

下面给出不同尺度参量下折射率和散射角 ψ (ψ 为入射光线与接收透镜光轴的夹角)对敏感函数影响的分布图。我们取接收透镜半角 $\beta = 20^\circ$, 波长 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 。

在图 1 中,敏感函数随散射角度有规律地变化,在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 内,敏感函数值单调上升,且不同虚部的

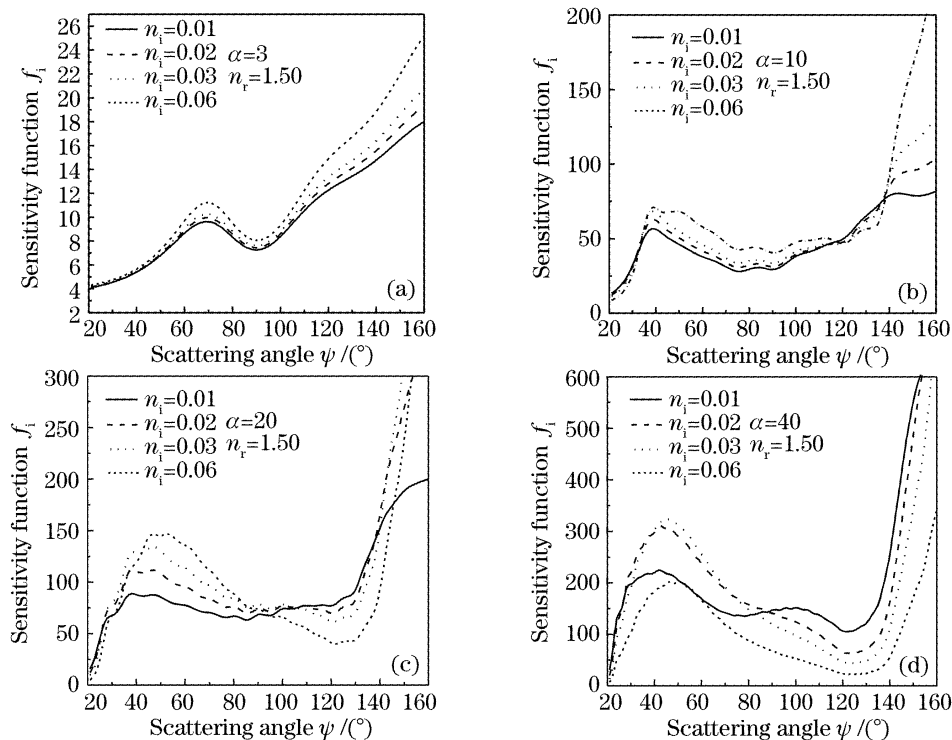


图 1 粒子折射率虚部及散射角对敏感函数的影响

Fig. 1 Sensitivity function with part of refractive index and scattering angles

敏感函数差别不大;在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 内敏感函数达到极大值,然后敏感函数值开始下降,不同折射率虚部的敏感函数曲线在 90° 和 130° 附近有一个极小值;然后在 130° 以后敏感函数值急剧增加。

由上面的分析可知,敏感函数极小值出现在小于 20° , 90° 和 130° 附近,而敏感函数的极大值一般出现在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 以及大于 130° 的范围。考虑到后向散射的信号小,信噪比小,所以不宜取 130° 附近的散射角。因此,双散射角激光光学粒子计数器的一个散射角应该在前向 $40^\circ \sim 60^\circ$ 内选取,这样折射率虚部对响应曲线的影响才较大,而另一个散射角应该

在小于 20° , 因为从图 1 上看在小于 20° 折射率虚部对响应曲线的影响可以达到最小。

根据上面的分析,经过对不同半径、不同散射角的大量计算和对比,可以找到很多组受折射率影响差异较大的散射角系统,这里作为例子,给出 $\psi=9^\circ$, $\beta=5^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ 和 $\psi=50^\circ$, $\beta=20^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ 两个散射角系统,都是旁轴接收系统,图 2 是它们的响应曲线。由图 2 可看出, $\psi=9^\circ$, $\beta=5^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ 散射角系统的响应曲线受折射率虚部的影响很小,而 $\psi=50^\circ$, $\beta=20^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ 系统的响应曲线受折射率虚部的影响很大,符合上面的条件。

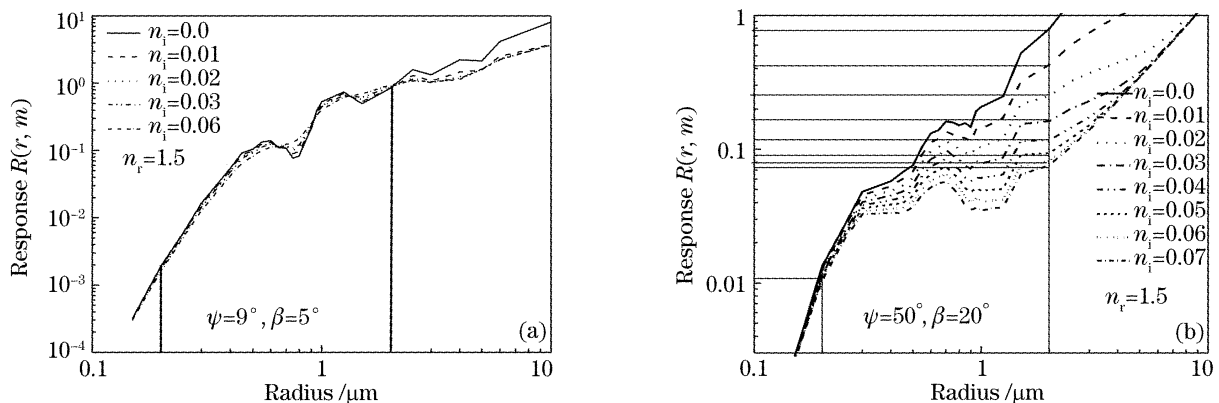


图 2 (a) $\psi=9^\circ$, $\beta=5^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$, (b) $\psi=50^\circ$, $\beta=20^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ 散射系统的响应曲线

Fig. 2 Response of scattering system (a) $\psi=9^\circ$, $\beta=5^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$, (b) $\psi=50^\circ$, $\beta=20^\circ$, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$

3 n_i 的测量方法

由于粒子计数器测量的是响应量大于 R_1 小于 R_2 的粒子数,而其对应的半径范围就是大于 r_1 小于 r_2 ,而 r_1 、 r_2 的具体值受折射率虚部的影响很大。若我们固定 r_1 和 r_2 ,则大于 r_1 小于 r_2 的粒子数 N 将随着 n_i 的增大而减小。这里的思路是找到某一个半径范围(r_1 , r_2),对于一个散射角,半径 r_1 、 r_2 处折射率对响应量的影响很小以致可以忽略,而对于另一个散射角,半径 r_1 处折射率对响应量的影响很小,半径 r_2 处折射率对响应量的影响却非常大。由图 2(a) 可以看出,在半径为 $2 \mu\text{m}$ 处,响应量只有一个值,即不同折射率的响应曲线交于一点,所以在此处折射率虚部的影响是不存在的。由于折射率对响应曲线的影响在小粒子段非常小,在半径为 $0.2 \mu\text{m}$ 处可以认为不同折射率的响应量也只有一个值,所以在某一时刻,不管用那一条响应曲线,所测量的半径在 0.2 到 $2 \mu\text{m}$ 的粒子数 N 变化很小。

而由图 2(b) 可以看出,在半径为 $2 \mu\text{m}$ 处,响应曲线受折射率虚部的影响非常大。选用不同折射率虚部的响应曲线,所得到的在 $0.2 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 之间

的粒子数 N_i ($i=1, 2, \dots, 8$) 会有很大的差异。假设图 2(a) 系统测量的 $0.2 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 的粒子数为 N , 当 $N_i = N$ 时 N_i 所对应的折射率虚部就是当时所测的大气气溶胶真实的折射率虚部。确定 N_i 的具体步骤:选择折射率虚部 $n_i = 0$ 的那条响应曲线作为粒子计数器的响应曲线,图 2(b) 中八条横线与纵轴的交点从下向上分别记做 $V_0, V_1, V_2, V_3, \dots, V_8$; 用标准粒子对粒子计数器进行标定,其中 V_0, V_1, \dots, V_8 都是相对量;在数据的采集中,响应脉冲大于 V_0 小于 V_1 记做 N_1 , 大于 V_1 小于 V_2 的记做 N_2 , 依此类推。

4 模拟计算

按照气溶胶散射计算中通常的做法,假设粒子是球形的,大小粒子具有相同的折射率。在实际中这样做会带来一定的误差,但可以简化问题使之便于处理。对双散射角激光光学粒子计数器系统进行模拟计算,对于 Junge 模式^[8],

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = cr^{-(v+1)}, \quad (4)$$

两边积分得到

$$N = \int_{r_1}^{r_2} cr^{-(v+1)} dr, \quad (5)$$

其中 r_2, r_1 是粒子半径的上下限, N 就是在大于 r_1 小于 r_2 的粒子数。这里取 $v=3, c=10$, 用折射率虚部为零的那条曲线作为响应曲线。图 2(b) 中不同响应曲线对应 $r=2$ 的纵坐标, 就是不同折射率下 ($n_i=0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$), $r=2 \mu\text{m}$ 粒子对应的响应量。假设实际大气的折射率为 $1.50+i0.01$, 则这些响应量对应的粒子半径 r_2 是图 2(b) 中八条横线与 $n_i=0.01$ 的那条响应曲线交点的横坐标。由图可知, r_2 为 $3.2 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}, 1.4 \mu\text{m}, 1.2 \mu\text{m}, 0.9 \mu\text{m}, 0.55 \mu\text{m}, 0.53 \mu\text{m}, 0.50 \mu\text{m}$, 它们与折射率虚部 n_i (其值为 $0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$) 一一对应。我们设定 $r_1=0.2 \mu\text{m}$, 则可以计算出八个不同的数 N_i 。对于图 2(a) 中的响应曲线, 不管选择那一条作为响应曲线, 由于 $2 \mu\text{m}$ 处粒子的响应量不受折射率的影响, 即 $r_2=2.0 \mu\text{m}$, 所以它计算的 $0.2 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ 之间的粒子数只有一个值。

图 3 是根据 (5) 式中不同折射率的响应曲线模拟出的粒子半径在 $0.2 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 的粒子数随折射率虚部的变化曲线 (数据在表 1 中), 也就是 $\psi=50^\circ, \beta=20^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 散射角通道模拟所测的数据经过不同折射率虚部修正后半径在 $0.2 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 的粒子数随折射率虚部的变化曲线。对于 $\psi=9^\circ, \beta=5^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 散射通道, 由于响应曲线在 r_1, r_2 处不受折射率虚部的影响, 所以模拟结果只有一个 $N=515$ 。由图 3 可知, 在没有测量误差的假设下, $N_i=515$ 在曲线上对应的横坐标正是 $n_i=0.01$, 这与假设的折射率虚部的值完全吻合。由于模拟的

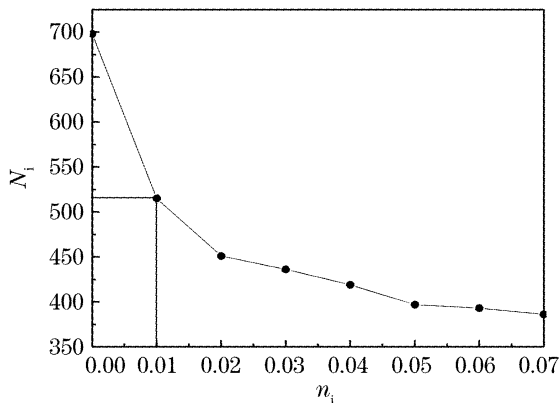


图 3 粒子数 N_i 随折射率虚部 n_i 的变化

Fig. 3 Number of particle for different the part of refractive index n_i

结果只与半径 r_1, r_2 有关, 不管选用那种大气气溶胶谱分布模式, 最终结果都是一样的。

表 1 粒子数 N_i 随折射率虚部 n_i 的变化

Table 1 Number of particle for different n_i

| n_i | 0.0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| N_i | 698 | 515 | 451 | 436 | 419 | 397 | 393 | 386 |

5 结 论

数值实验分析表明, 对于双散射角激光光学粒子计数器, 选用小于 20° 和 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间合适的受折射率影响差异较大的两个散射角, 再加上选择适当的分档半径, 是可以把折射率虚部确定出来的。例如 $\psi=9^\circ, \beta=5^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 和 $\psi=50^\circ, \beta=20^\circ, \lambda=0.65 \mu\text{m}$ 散射角系统, 分档半径选择在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 。但由于细粒子与粗粒子通常具有不同的折射率, 再加上粒子的形状通常不是球形的, 问题比较复杂, 还需要进一步去研究。

参 考 文 献

- Chin-I Lin, Marcia Baker, Robert J. Charlson. Absorption coefficient of atmospheric aerosol: a method for measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(6): 1356~1363
- G. T. Wolff, C. M. Stroup, D. P. Stroup. The coefficient of haze as a measure of particulate elemental carbon[J]. *J. Air Pollu. Control. Associ.*, 1983, **33**(8): 764~751
- Karen M. Adams. 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
- Tadahiro Hayasaka, Yasuhiko Meguro, Yasuhiro Sasano *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
- Hu Huanlin, Yan Fengqi, Yu Tong. Combining inversion method of aerosol refractive index and its diurnal variation at Beijing in summer and winter seasons[J]. *Chin. J. Proc. Engng.*, 2002, **2** (Suppl.): 297~299 (in Chinese)
胡欢陵, 阎逢旗, 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
- Tan Kun, Hu Huanlin. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinia*, 1984, **4**(1): 55~60 (in Chinese)
谭 锟, 胡欢陵. 光学粒子计数器测量结果的修正[J]. *光学学报*, 1984, **4**(1): 55~60
- Yan Fengqi, Hu Huanlin, Zhou Jun. Measurement of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinia*, 2003, **23**(7): 855~859 (in Chinese)
阎逢旗, 胡欢陵, 周 军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 855~859
- Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmosphere Physics* [M]. Beijing: Meteorology Publishing House, 1991. 37 (in Chinese)
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学* [M]. 北京: 气象出版社, 1991. 37