

文章编号 1004-924X(2008)10-1831-05

厦门地区气溶胶折射率的测量

李学彬, 黄印博, 徐赤东, 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, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对气溶胶折射率在分析大气气溶胶光学特性中的重要性, 提出了一种综合利用黑碳仪、浊度计和光学粒子计数器反演大气气溶胶折射率的新方法。该方法根据黑碳仪和浊度计测量的气溶胶吸收系数和散射系数以及光学粒子计数器测量的粒子谱分布, 采用球形粒子的米(Mie)散射理论, 通过分析吸收系数、散射系数、粒子谱分布和折射率之间的关系来反演大气气溶胶粒子的折射率, 并可以同时反演折射率实部和虚部。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是合理的。最后, 利用此方法分析了厦门地区的气溶胶折射率。

关键词: 大气气溶胶; 折射率测量; 粒子谱分布; 消光系数; 散射系数

中图分类号: P421 **文献标识码:** A

Measurement of refractive index for aerosol particle in Xiamen

LI Xue-bin, HUANG Yin-bo, XU Chi-dong, WEI He-Li, HU Huan-ling

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

Abstract: A new method was proposed for measurement of refractive index of aerosol by using an Aethalometre, an Integrating Nephelometer and an Optical Particle Counter (OPC), because the refractive index is important for studying aerosol. The absorption coefficient and scattering coefficient were measured with the Aethalometre and Integrating Nephelometer, and at the same time, the number density distributions of aerosol particles were measured by the OPC with nominated radii. According to Mie scattering theory, the different distributions could be obtained with different refractive indexes for the same one measured by OPC. Then, the curves of absorption coefficient and scattering coefficient could be calculated with different refractive indexes. Actual value of refractive index could be decided with the real absorption coefficient and scattering coefficient provided by the Aethalometre and Integrating Nephelometer. The comparisons with other instruments show that this method is reasonable. Finally, the refractive characteristics of aerosol particles in Xiamen city area were analyzed.

Key words: aerosol; refractive index measurement; number density distribution; extinction coefficient; scattering coefficient

收稿日期: 2008-01-03; **修订日期:** 2008-03-21.

基金项目: 中科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; No. 40775028)

1 引言

大气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,可直接改变地-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理参数。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。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,因此要精确测量折射率非常困难。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,滤膜取样法^[1-2]和元素碳浓度法^[3]就是常用的方法,它们简单易行,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。第二类方法是光声方法^[4],该方法测量灵敏度高,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^[5-6],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光学特性分析中的重要性以及直接测量气溶胶折射率存在的困难,本文首先从测量气溶胶的光学特性以及谱分布入手,然后使用 Mie 散射理论来反演气溶胶折射率,最后与其它方法独立的测量结果进行对比,证明此方法反演气溶胶折射率是合理的。此方法可以同时反演 n_r 和 n_i ,弥补了有些方法^[1-4]不能反演折射率实部的不足。最后,利用此方法分析了厦门地区的气溶胶折射率。

2 实验仪器和理论分析

2.1 黑碳仪

黑碳仪(AE-31, TSI)是利用差分光学透射方

法实时监测气溶胶粒子中的“黑碳”或“元素碳”光吸收的最先进的科学仪器。由于黑碳气溶胶是大气气溶胶中最主要的吸光物质,除去一些特殊的天气状况(如沙尘、扬尘),黑碳对气溶胶总的光吸收贡献在 90%到 95%以上。黑碳仪就是利用黑碳气溶胶对光的这种吸收特性进行测量的,而且一般认为黑碳气溶胶粒子的吸收系数即为实际大气气溶胶粒子的吸收系数。

2.2 积分浊度计

积分浊度计(IN3536, TSI)是一种能够探测气溶胶粒子散射特性的高精度仪器。其工作原理如下:在采样泵的驱动下,被采样气体通过进气管进入测量腔,在测量腔内被光源照射到的采样气体中的气体和粒子成分对入射光产生散射。测量室内设有数个光阑,用于保证一次散射光到达光电倍增管,而多次散射光不能到达。光电倍增管产生的电信号正比于采样气体的散射系数,然后再扣除掉检测腔内壁的散射、气体分子的散射和探测器内部的电子噪声,用过滤的空气对仪器进行校准,把空气的瑞利散射部分去除,从而得到气溶胶粒子的散射系数。

2.3 光学粒子计数器

DLJ-06 多道光学粒子计数器^[7-8](安徽光机所研制)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应气溶胶粒子谱分布的特征。该仪器采用 60°的散射光学系统,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,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 0.15~6.0 μm 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指数 $m = 1.59 - i0.0$,直径为(0.71±0.05) μm 的聚苯乙烯小球。

表 1 DLJ-06 多道光学粒子计数器的名义分档半径

Tab. 1 Nominal channel radii of DLJ-06 OPC

道 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
分档半径(<i>m</i>)	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

2.4 理论分析

根据 Mie 散射理论^[9-10],由气溶胶的谱分布和它的折射率可以计算出大气气溶胶的散射系数和吸收系数,其公式表示为:

$$\sigma_s = \int Q_s(\alpha, m)n(r)\pi r^2 dr, \quad (1)$$

$$\sigma_a = \int Q_a(\alpha, m)n(r)\pi r^2 dr, \quad (2)$$

式中, $\alpha = 2\pi r/\lambda$ 是粒子的尺度参数, r 是粒子半径, λ 是入射光波长, $m (= n_r - in_i)$ 是粒子的折射率, $n(r)$ 是粒子的谱分布, Q_s 和 Q_a 是与 α 和 m 相对应的散射效率因子和吸收效率因子。由式(1)和(2)可以看出, σ_s 和 σ_a 是气溶胶谱分布 $n(r)$ 、波长 λ 以及折射率 m 的函数,这里用浊度计测量出散射系数 σ_s ,用黑碳仪测量出吸收系数 σ_a ,用光学粒子计数器测量出粒子的谱分布 $n(r)$,由式(1)和(2)就可以反过来计算出大气气溶胶的折射率 m 。由于黑碳仪、浊度计和光学粒子计数器都用于测量气溶胶的光学特性,在各仪器的测量误差范围内可以实现对气溶胶折射率的反演。

计算气溶胶折射率的具体步骤为:先假定折射率实部和虚部分别为 n_r (1.330, 1.335, 1.340, ..., 1.555) 和 n_i (0.000, 0.001, 0.002, ..., 0.100) 时,实部利用光学粒子计数器测量出粒子的谱分布 $n(r)$,由式(1)和(2)计算出散射、吸收系数 σ_s, σ_a ,然后与实测的散射系数 σ_s^m 、吸收系数 σ_a^m 进行对比,它们的相对差别定义如下:

$$\epsilon_s = (\sigma_s - \sigma_s^m) / \sigma_s^m, \quad (3)$$

$$\epsilon_a = (\sigma_a - \sigma_a^m) / \sigma_a^m, \quad (4)$$

$$\epsilon = \sqrt{(\epsilon_s^2 + \epsilon_a^2)} / 2. \quad (5)$$

当假设的折射率与实际大气的折射率最接近时,利用实测的谱分布和假设的折射率计算的散射系数和吸收系数也应该最接近实测的散射系数和吸收系数,此时 ϵ 最小,这说明使 ϵ 具有最小值时所对应的折射率就是所测量大气气溶胶的折射率。

3 实验结果分析

2006 年 12 月在厦门,使用黑碳仪、浊度计和光学粒子计数器进行两周的同步测量。这里把数据进行每小时平均,图 1 和 2 是计算结果与激光雷达测量结果的比较。图 1 是折射率的昼夜变化

图,由图 1 可以看出,2006 年 12 月 n_r 在 1.48~1.55 之间变化,其平均值在 1.53 附近, n_i 曲线有一个共同的特点,就是晚上 6 点以后总体趋势会下降; n_i 曲线在 0.005~0.02 之间变化,平均值在 0.008 附近,它有明显的昼夜变化,一般是早晨 7 点前后有一个峰值,中午 12 点到下午 3 点有一个极小值,晚上又有所上升。图 2 是利用粒子谱分布和反演得到的折射率计算的消光系数与激光雷达测量的消光系数的对比,可以看出两者变化趋势一致,并且吻合地也非常好,这间接证明使用该方法反演气溶胶折射率是合理的。由图 2 还可以看出,在某些时刻两种方法计算的能见度结果相差较大,主要原因如下:(1)不同仪器不同方法测量同一个参数的结果之间有一定的误差;(2)由于气溶胶大小粒子的成分不同,所以大小粒子的折射率也不同,这里假设气溶胶大小粒子成分相同,使用平均折射率会给计算结果带来一定的误差;(3)使用 Mie 散射理论和 n_r 和 n_i 变化步长选取也会给计算结果带来一定的误差。

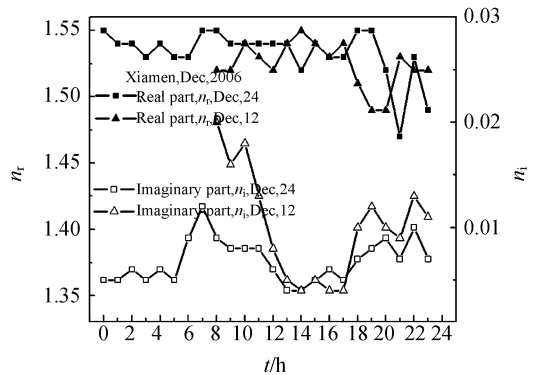


图 1 2006 年 12 月厦门地区折射率的昼夜变化
Fig. 1 Average diurnal variations of refractive index in Dec. 2006

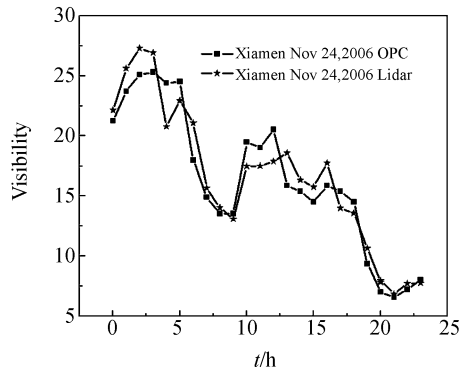


图 2 两种方法测量能见度的对比
Fig. 2 Comparison of visibilities by two methods

图 3 是厦门地区不同月份 n_i 随时间的平均变化图^[11],可以看出图 1 中 2006 年 12 月份 n_i 的变化与图 3 中 2002 年 11 月份的平均变化有很多

相似之处,而与 2004 年 8 月份和 2005 年 3 月份有明显的差别,可见 n_i 的季节性变化还是比较明显的,这说明不同季节气溶胶的来源有所不同。

4 结 论

本文介绍一种综合利用黑碳仪、浊度计和光学粒子计数器测量大气气溶胶折射率的新方法,此方法可以同时反演出大气气溶胶 n_r 和 n_i ,与激光雷达测量结果对比表明此方法反演气溶胶折射率是合理的。通过对厦门地区折射率的分析可以得出:(1)厦门地区 n_r 在 12 月份无明显的昼夜变化,其值在 1.48~1.55 之间波动,平均值在 1.53 附近; n_i 有明显的昼夜变化,曲线在 0.005~0.02 之间变化,平均值在 0.008 附近。(2)厦门地区折射率有明显的季节变化,这说明不同季节气溶胶的来源有所不同。

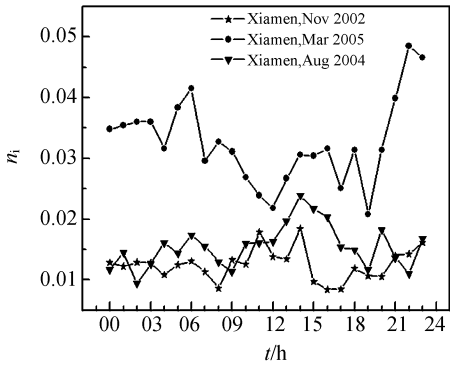


图 3 厦门地区不同月份折射率的昼夜变化

Fig. 3 Average diurnal variations of refractive index in different months in Xiamen

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] 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.
HU H L, XU J, HUANG ZH. 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. (in Chinese)
- [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] 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. 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. Measurements character of extinction and refractive index of aerosol particles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 207-210. (in Chinese)
- [7] 谭锬, 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 Sinia*, 1984, 4 (1): 55-60. (in Chinese)
- [8] 李学彬, 高亦桥, 纪玉峰. 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, JI Y F. Development optical particle counter of LED lamp-house[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 406-409. (in Chinese)
- [9] 宋正方. *应用大气光学基础*[M]. 合肥: 气象出版社, 1990.

SONG ZH F. *Applied Atmospheric Optics*[M]. Hefei: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)

- [10] 谢晨波,韩永. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. *强激光与粒子束*,2005,17(7):971-975.
XIE CH B,HAN Y. Mobile Lidar for visibility measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005,17(7):971-975. (in Chinese)
- [11] 李学彬,韩永,徐青山. 厦门地区大气气溶胶变化特征分析[J]. *大气与环境光学学报*,2006,1(3):161-165.
LI X B,HAN Y,XU Q SH. Variation of atmospheric aerosol parameters in xiamen[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006,1(3):161-165. (in Chinese)

作者简介:李学彬(1980—),男,安徽人,博士,主要从事气溶胶方面的研究。E-mail:xbli@aiofm.ac.cn

●下期预告

基于 AFM 的单晶铜薄膜压痕的分子动力学研究

黄跃飞,李洪平

(江西理工大学 机电学院,江西 赣州 341000)

为了研究基于 AFM 的单晶铜薄膜压痕过程,建立了单晶铜薄膜纳米压痕过程的三维分子动力学模型。采用对势 Morse 势计算试件原子之间,试件原子和压头原子之间的相互作用。模拟了不同压入深度(0 nm, 0.361 nm, 0.722 nm, 1.083 nm)的压痕过程,分析了压入深度对压头应力、系统势能变化的影响。结果显示单晶铜薄膜的纳米压痕的力学机理是非晶态产生的变形。当采用不同压入深度,最大系统势能分别为 170、340、560、710 eV,基本呈正比变化;最大压头应力为 8.3、9.4、10.9、12.2 bar · A³,也基本呈正比变化,体现出强烈的尺寸效应。