

获取多波长气溶胶光学特性的方法研究

李学彬, 李超, 徐青山, 魏合理

(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:为了获得多波长气溶胶的垂直消光特性, 本文提出了一种综合利用光学粒子计数器、能见度仪和激光雷达获取多波长气溶胶光学特性的新方法。该方法根据光学粒子计数器测量的谱分布、能见度仪测量的能见度和激光雷达测量的消光后向散射比反演出气溶胶粒子($\lambda = 0.532\mu\text{m}$)的折射率, 作为初始值, 根据气溶胶模式提供的折射率随波长的变化关系, 确定其他波长上的折射率。再根据气溶胶折射率和谱分布计算不同波长上的消光特性, 最后采用激光雷达测量的垂直消光廓线来反演其他波长上的消光廓线。以 $0.532\mu\text{m}$, $1.06\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 三波长为例, 给出北京 2004 年 8 月 24 日气溶胶在不同波长上的垂直消光廓线。

关键词:大气光学; 大气气溶胶; 消光系数; 折射率

中图分类号:X831.02

文献标识码:A

The Study of Obtaining Multi-wavelength Aerosol Optical Characteristics

LI Xue-bin, LI Chao, XU Qing-shan, WEI He-li

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

Abstract: A new method is proposed for the obtaining multi-wavelength aerosol optical characteristics by using visibility meter (VM), optical particle counter (OPC) and micro pulse lidar (MPL). The refractive index of $\lambda = 0.532\mu\text{m}$ is retrieved by extinction coefficient. The ratio of extinction-to-backscatter and number density distribution of aerosol particle measured by VM, OPC and MPL, and the refractive index of other wavelength can be obtained by mode using the initialization value of $\lambda = 0.532\mu\text{m}$. So some other wavelength aerosol optical characteristics can be obtained by using Mie theory. This paper also provided the aerosol optical characteristic vertical distribution of $0.532\mu\text{m}$, $1.06\mu\text{m}$ and $10.6\mu\text{m}$ according to results of extinction coefficient vertical distribution measured by MPL in Beijing.

Key words: atmospheric optics; aerosol; extinction coefficient; refractive index

1 引言

大气气溶胶是大气的重要组成部分, 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。建立在大气光散射基础上, 测量气溶胶光学特性的方法

大体上可以分为两类: 主动探测和被动探测^[1], 激光雷达等属于主动探测, 卫星遥感属于被动探测。不管是主动探测还是被动探测都有一定的局限性,

基金项目:中科院知识创新方向性项目(KGCX2-SW-413)资助。

作者简介:李学彬(1980-), 男, 博士, 主要从事气溶胶光学特性方向的研究。E-mail: xbli@aiofm.ac.cn

收稿日期:2007-09-10; **修订日期:**2007-11-14

例如:对气溶胶折射率的测量上,不同类型气溶胶不同波长上的折射率是不同的,虽然有很多方法可以反演气溶胶折射率^[2-6],但目前有很多波长上的折射率只能依靠模式提供。再例如:由于主动测量方法受到可供使用激光波长的限制,所以很多波长上的消光系数也只能靠模式推导得到^[7],因此研究气溶胶在不同波长上的折射率和消光系数是很有意义的。

本文介绍了一种综合利用光学粒子计数器、能见度仪和激光雷达获取多波长气溶胶光学特性的新方法,使用以上仪器的测量结果反演出气溶胶粒子($\lambda=0.55\mu\text{m}$)的折射率,作为初始值,根据气溶胶模式提供的折射率随波长的变化关系,确定其他波长上的折射率。然后根据测量数据对多波长气溶胶光学特性的方法进行理论分析。最后以 $0.532\mu\text{m}$, $1.06\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 三波长为例,给出北京2004年8月24日多波长气溶胶的垂直消光特性。

2 理论分析

能见度通常是指视力正常的人在白天无云的天空背景下辨认出一个视角为 $0.5^\circ\sim 5^\circ$ 的黑色目标物轮廓和形体的最大距离,在夜间则是能看到和确定出一定强度的灯光的最大距离^[8]。晴空背景和黑体目标情况下,对于白光而言,大气水平能见度 $V_H(\text{km})$ 与消光系数 $\alpha(\text{km}^{-1})$ 和识别目标对比阈值 $\varepsilon(=0.02)$ 的关系由下式给出^[9]:

$$V_H = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\varepsilon} \approx \frac{3.912}{\alpha} \quad (1)$$

对于其他波长应作适当的订正。作为近似,可以用人眼最敏感的绿光($\lambda=0.55\mu\text{m}$)的消光系数代替白光的消光系数:

$$V_H = \frac{3.912}{\alpha} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right) \quad (2)$$

这里使用能见度仪对能见度进行测量,然后由公式(2)就可以转化为波长532的消光系数。根据 Mie 散射理论由气溶胶的谱分布和它的折射率可以计算出气溶胶的消光系数和后向散射系数:

$$\alpha_a = \pi \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr \quad (3)$$

$$\beta_a = \int \frac{\lambda^2}{8\pi^2} [M_1(180^\circ) + M_2(180^\circ)] n(r) dr \quad (4)$$

$$S_1 = \alpha_a / \beta_a \quad (5)$$

这里, Q_{ext}, M_1, M_2 是折射率 m 、粒子半径 r 和波长 λ

的函数,由于谱分布可以由粒子计数器测量得到, $\lambda=0.532\mu\text{m}$,只要我们假设一定的折射率 m 就可以由 Mie 理论计算出来 α_a 和 S_1 。这里先由能见度仪和激光雷达方程的测量结果确定 α_a 和 S_1 ,若计算出的 α_a 和 S_1 与测量结果在一定范围内相同或者相近,此时假设的折射率就是大气气溶胶等效的平均折射率。

这里知道了 $\lambda=0.532\mu\text{m}$ 的折射率,假设北京地区夏季气溶胶为水溶型。根据水溶型气溶胶折射率随波长的变化关系以及在 $\lambda=0.532\mu\text{m}$ 的折射率值,就可以计算出不同波长上的折射率。结合式(3)就可以计算不同波长的消光系数。根据不同波长上的消光系数与 $\lambda=0.532\mu\text{m}$ 消光系数的关系,利用微脉冲激光雷达测量的垂直消光廓线可以反演其他波长上的消光廓线。

3 测量、计算结果和讨论

3.1 计算结果

2004年8月20日至9月20在北京市大兴区黄村,对大气气溶胶进行了测量。使用的仪器主要有 DLJ-92 多道光学粒子计数器^[10-11](OPC)、微脉冲激光雷达(MPL-A1)^[12](中国科学院安徽光机所大气光学中心研制)、能见度仪(FD12 U21208)等。这里选取2004年8月24日14时的数据作为例子来分析气溶胶的消光特性。使用能见度仪、粒子计数器和微脉冲激光雷达相结合的方法反演出气溶胶的折射率 $m=1.48-i0.021$,假设当时的气溶胶是水溶型粒子。图1是水溶性粒子的折射率模式以及通过 $\lambda=0.532\mu\text{m}$ 初始值 $m=1.48-i0.021$ 得到的折射率随波长的分布。图2是根据图1提供的折射率结合气溶胶谱分布计算的不同波长上的消光系数。

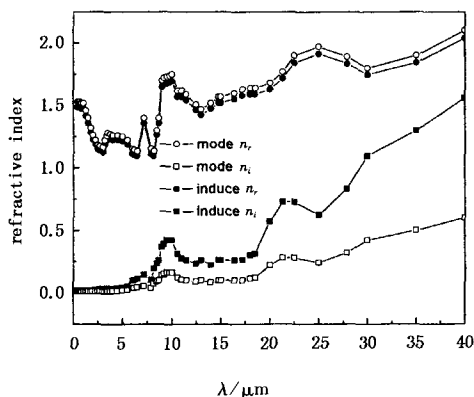


图1 折射率随波长的变化

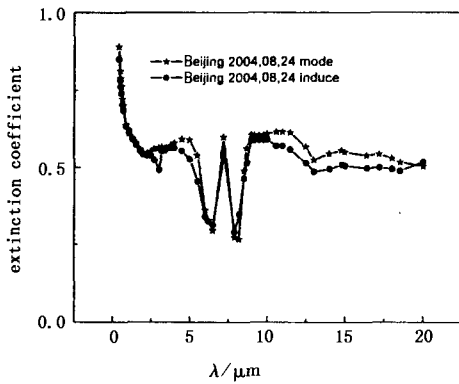


图2 消光系数随波长的变化

图1 折射率随波长的变化,可以看出气溶胶折射率实部与模式差别不大,而折射率虚部与模式随着波长的变化差别很大。图2是8月24日14时消光系数随波长的变化,可以看出在 $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长上有很强的消光作用,但可见波段的消光作用最大,这可能与占绝大多数的气溶胶粒子的大小与可见光波长相当有关。消光系数在 6.4 和 $8.2 \mu\text{m}$ 附近有两个极小值,这是由折射率实部在这两个波长附近出现极小值引起的。两种方法的计算结果变化趋势一致,但也存在一定的差异,在波长大于 $10 \mu\text{m}$ 时利用模式计算的消光系数稍大一些。

图3是根据图2得到不同波长上的消光系数与 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 消光系数的关系和 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 的垂直消光廓线得到的消光系数随高度的变化,可以看出三波长的消光系数之间的差别不大,消光系数随高度的增加在减小,在 200m , 2000m 和 4000m 附近存在极值,这与气溶胶随高度的变化不均匀以及边界层和逆温层有直接关系。

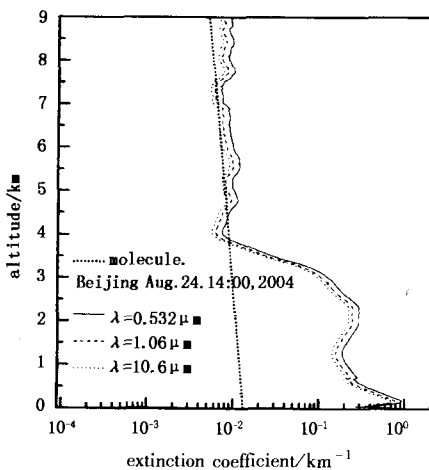


图3 消光系数随高度的变化

3.2 误差来源分析

(1)根据误差传递理论,由光学粒子计数器的

测量结果导致的误差大概在15%以内。

(2)在反演气溶胶平均折射率时,消光系数是由能见度仪测量给出的,消光后向散射比是由激光雷达测量给出的,由此产生的测量误差在22%以内。

(3)Mie散射理论的计算和根据模式来确定折射率随波长的变化关系也会带来一定的误差。

4 结论

本文根据光学粒子计数器、能见度仪和激光雷达的测量结果获取多波长气溶胶的光学特性,并得到了多波长气溶胶的消光系数的垂直分布廓线,尽管还存在不足,但它对不同波长的光在大气中的传输、大气环境和大气辐射的研究具有重要意义。

致谢:本文的部分数据由北京环境保护监测中心虞统工程师提供,这里表示感谢!

参考文献:

- [1] 毛节泰,张军华,等.中国大气气溶胶研究综述[J].气象学报,2002,60(5):625-634.
- [2] Yan F Q, Hu H L, Zhou J. 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)
- [3] 胡欢陵,李学彬,李琛.双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率[J].过程工程学报,2004,4(增),827-832.
- [4] Li Xuebin, Xu Qingshan, et al. Analysis of sensitivity of L-OPC's response to refractive index and its multi-value character[J]. Optics technique, 2006, 32(4): 486-489.
- [5] 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, 2006, 19(2): 207-210.
- [6] 李学彬,韩永,徐青山,等.两种粒子计数器相结合测量大气气溶胶折射率[J].过程工程学报,2006,(增2):1-4.
- [7] 韩永,饶瑞中,王英俭.利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性[J].红外与激光工程,2007,36(2): 265-269.
- [8] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.
- [9] Horvath H. Atmospheric visibility[J]. Atmospheric Environment, 1981, 15: 1785-1796.
- [10] 周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学[M].北京:气象出版社,1990.
- [11] 谭颀,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.
- [12] Spinhirne J D. Micro pulse lidar IEEE trans[J]. Geose Rem Sens, 1993, 3(1): 48-54.