

# 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究

李学彬 徐青山 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** 为了利用激光雷达探测的消光系数垂直分布来反演气溶胶质量浓度的垂直分布, 研究气溶胶消光系数与质量浓度之间的关系就显得十分重要。根据 Mie 散射理论, 分析了气溶胶的质量消光系数、消光系数和质量浓度之间的关系, 引进了等效参数, 分析了 Junge 指数对等效参数的影响, 用实际测量的粒子谱分布、能见度、相对湿度和气溶胶质量浓度验证了气溶胶消光系数和质量浓度之间的关系。这对利用激光雷达测量的气溶胶消光系数垂直分布来反演气溶胶质量浓度的垂直分布是很有实用价值和指导意义的。

**关键词** 大气光学; 大气气溶胶; 消光系数; 质量浓度

**中图分类号** X831 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1655

## Study on Relationship between Extinction Coefficient and Mass Concentration

Li Xuebin Xu Qingshan Wei Heli Hu Huanling

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

**Abstract** Retrieving the vertical distribution of aerosol mass concentration by detecting the vertical distribution of extinction coefficient with lidar is important in environment monitoring. It is indispensable to establish the relationship between extinction coefficient and mass concentration. The relation of mass extinction coefficient, extinction coefficient and mass concentration is analyzed based on the Mie scattering theory, an equivalent parameter is introduced and the effect of Junge index on the equivalent parameter is discussed. The relationship between aerosol extinction coefficient and mass concentration is validated by measured particles spectrum distribution, visibility, relative humidity and aerosol mass concentration in Beijing, which is significant for retrieving aerosol mass concentration with lidar.

**Key word** atmospheric optics; aerosol; extinction coefficient; mass concentration

## 1 引 言

大气气溶胶是大气的重要组成部分,也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。随着工业经济的迅速发展,大气污染问题变得越来越严重,气候变得也越来越复杂,空气中的颗粒物给人们的身体健康带来了严重的危害。目前,对气溶胶的地面观测技术已经很成熟了,而对气溶胶的空间观

测特别是对气溶胶的垂直分布仅限于卫星和雷达观测<sup>[1,2]</sup>,采用机载仪器的观测方法成本很高。激光雷达只能观测气溶胶的垂直消光廓线,而对于环境污染上所关心的气溶胶质量浓度垂直分布情况,研究进展得很慢,孙景群<sup>[3]</sup>等从理论上提出了消光系数与质量浓度的关系,胡欢陵等<sup>[4]</sup>利用实测的气溶胶消光系数和质量浓度给出了经验公式,韩道文<sup>[5]</sup>利用拟合公式反演了北京地区的气溶胶质量浓度垂直分布。但由于经验公式受不同地区不同天气和外界条件的影响,使用起来受到局限,所以研究气溶胶

收稿日期: 2007-08-10; 收到修改稿日期: 2007-11-23

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目(KGCX2-SW-413)和合肥物质科学研究院院长基金资助课题。

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

导师简介: 胡欢陵(1941—),男,博士生导师,研究员,主要从事气溶胶探测方面的研究。E-mail: hlhu@aiofm.ac.cn

消光系数和质量浓度之间的关系显得非常有必要。

本文根据米氏散射理论,分析了气溶胶的质量消光系数、消光系数和质量浓度之间的关系,给出了相应的关系式,然后根据实验数据验证了消光系数和质量浓度之间的关系。这对利用激光雷达测量的垂直消光廓线反演气溶胶质量浓度的垂直分布具有指导意义。

## 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约为  $0.5^\circ \sim 5^\circ$  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<sup>[6]</sup>。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  $V_H$  (km)与消光系数  $\alpha$  ( $\text{km}^{-1}$ )和识别目标对比阈值  $\epsilon=0.02$ 的关系由下式给出:

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

由于人眼对绿光( $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ )最敏感,作为近似,认为这里的消光系数就是  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  的消光系数。

根据米氏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:

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

式中  $Q_{\text{ext}}$  是折射率  $m$ 、粒子半径  $r$  和波长  $\lambda$  的函数,谱分布  $n(r)$  由粒子计数器测量得到,若已知气溶胶的折射率  $m$ ,就可以由(2)式计算出大气气溶胶的消光系数。

质量消光系数是指单位质量粒子的消光截面,它是反映粒子消光性能的一个重要参数。对于密度为  $\rho$  的粒子组成的气溶胶,其质量消光系数<sup>[5]</sup>为:

$$a_m = 0.75 \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) \frac{dr}{r\rho}. \quad (3)$$

可以看出质量消光系数是折射率  $m$ 、粒子半径  $r$ 、粒子密度  $\rho$  和波长  $\lambda$  的函数,这里假设大气气溶胶是有一群粒径相同浓度为  $N$  的粒子组成,其消光特性和实际大气气溶胶的消光特性相同,称为等效谱分布。这样就建立了气溶胶消光系数和质量浓度之间的关系:

$$a_e = N \times M \times a_m, \quad (4)$$

由于使用了等效谱分布,所以这里对(4)式进行改进

$$a_e = C(v) \times M \times a_m, \quad (5)$$

这里  $C(v)$  定义为等效参数,它与粒子谱分布有关,这里使用颗粒物质量监测仪测量的结果  $\text{PM}_{10}$  来代替气溶胶粒子质量浓度  $M$ 。值得注意的是  $\text{PM}_{10}$  是

干气溶胶的质量,而通常气溶胶是由干气溶胶和水结合而成的,当相对湿度为  $f$  时,湿气溶胶粒子半径  $r(f)$  和干气溶胶半径  $r$  的关系有如下经验关系式<sup>[7]</sup>:

$$p = \frac{r(f)}{r} = (1 - f)^{-1/u}, \quad (6)$$

式中  $u$  为常系数,对于大陆洁净大气粒子,气溶胶吸湿性差,  $u = 5.8$ ; 对于海洋大气粒子,气溶胶吸湿性强,  $u = 3.9$ ; 对于污染大气粒子,气溶胶吸湿性介于两者之间,  $u = 4.4$ 。根据相对湿度和粒子谱可以对  $\text{PM}_{10}$  的结果进行相对湿度的修正。

下面分析谱分布的变化对  $C$  值的影响,这里假设粒子谱是 Junge 分布<sup>[8]</sup>,  $m = 1.50 - i0.02$ 、 $N_0 = 10$ 、 $\rho = 1$ 、 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ ,图 1 是  $C$  值随 Junge 指数  $V$  的相对变化图,可以看出  $C$  和  $V$  的负相关性,  $V$  值越大  $C$  值越小。图 2 是北京 2004 年 9 月 22 日 Junge 指数  $V$  的变化图。可以根据图 1 用实际测量的  $V$  值来确定  $C$  值。

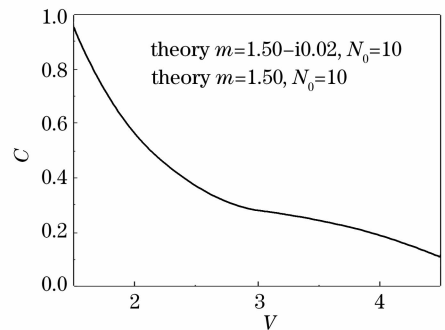


图 1  $C$  值随 Junge 指数  $V$  的变化

Fig. 1 Variation of  $C$  with  $V$  Junge index

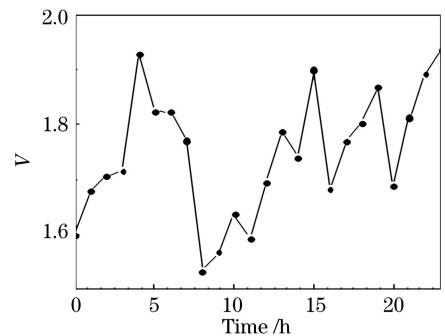


图 2 北京 9 月 22 日 Junge 指数  $V$  的变化

Fig. 2 Variation of  $V$  on Sep. 22, 2004 in Beijing

## 3 对比验证

2004 年 9 月 20 日至 10 月 6 日在中国科学院大气物理研究所铁塔部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<sup>[9~11]</sup>

(OPC)、微脉冲激光雷达(MPL-A1,中国科学院安徽光机所大气光学中心研制)、能见度仪(FD12 U21208)、温湿度测量仪、颗粒物质量监测仪 TEOM1400 系列(测量  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$ )等仪器。这里使用 9 月 22 日的测量数据作为例子对(5)式进行验证,首先使用 OPC 测量的谱分布计算出气溶胶的质量消光系数,然后对气溶胶质量浓度  $PM_{10}$  进行相对湿度的修正,最后根据(5)式计算出消光系数,把消光系数转换成能见度与能见度仪的测量结果进行比较。在本文中分两种情况计算消光系数:1)  $C$  取常数 1, 2)  $C$  的值随  $V$  值变化,折射率取  $m=1.50-i0.02$ , 计算的(Calculated)和实际测量的(Measured)能见度值如图 3 所示。

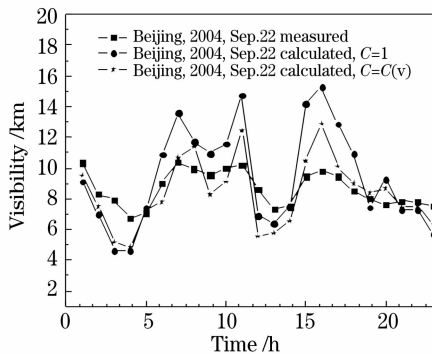


图 3 22 日能见度测量值与计算值的比较

Fig. 3 Comparison of measured and calculated visibility on Sep. 22, 2004

图 3 是 22 日能见度测量值与计算值的比较,可以看出,当  $C$  取常数 1 时,22 日的理论计算和实际测量能见度变化趋势基本一致,但有些时间段的理论计算值较测量值波动较大,对比图 2 可以看到,在 Junge 指数出现极大值时理论计算的能见度偏小,在 Junge 指数出现极小值时理论计算的能见度偏大,所以理论计算值较测量值波动主要是由谱分布的变化引起的。正是由于谱分布随时间变化,所以在计算消光系数时  $C$  值不能取常数。

图 3 中的带星号的曲线是使用实际测量的  $V$  值根据图 1 找出对应的  $C$  值重新对能见度进行计算的结果。可以看出理论计算的与测量的能见度值变化趋势一致,吻合得非常好,只是个别时刻有一定的差别,这可能与折射率随时间的变化有关。以上对比结果表明:使用实测粒子谱计算质量消光系数,使用湿气溶胶模型对气溶胶质量浓度进行修正,再结合实测的 Junge 指数确定等效参数,可以确定消光系数和质量浓度之间的关系。在气溶胶大小粒子的组分不随高度变化的情况下,使用上面的方法确

定消光系数与质量浓度的关系,根据激光雷达测量的垂直消光廓线可以反演出气溶胶质量浓度的垂直分布。

## 4 结 论

本文对气溶胶的质量消光系数、消光系数和质量浓度之间的关系进行了研究,分析了 Junge 指数对等效参数的影响,使用北京 2004 年 9 月 22 日的实验数据验证了气溶胶消光系数和质量浓度之间的关系,在气溶胶大小粒子的组分不随高度变化的情况下,可以使用该方法反演气溶胶质量浓度的垂直分布。这对使用激光雷达测量的垂直消光廓线反演气溶胶粒子质量浓度的垂直分布具有指导意义。

**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 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurement of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. *Acta Optica Sinia*, 2001, **21**(8): 1012~1015  
吴永华,胡欢陵,周军等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 2 Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun *et al.*. Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring [J]. *Acta Optica Sinia*, 2004, **24**(8): 1025~1031  
张寅超,胡欢陵,谭锐等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1025~1031
- 3 Sun Jingqun, Zhang Haifu. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, **2**(1): 36~43  
孙景群,张海福. 激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析[J]. *环境科学学报*, 1982, **2**(1): 36~43
- 4 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59~66  
胡欢陵,吴永华,谢晨波等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 59~66
- 5 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1572  
韩道文,刘文清,刘建国等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1572
- 6 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. *Atmosphere Physics* [M]. Beijing: Beijing University Publishing House, 2003. 452  
盛裴轩,毛节泰,李建国等. *大气物理学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 452
- 7 Sun Jingqun. The relativity of relative humidity and visibility [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1985, **43**(2): 230~234  
孙景群. 能见度与相对湿度的关系[J]. *气象学报*, 1985, **43**(2): 230~234
- 8 Zhou Xiujie, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmosphere Physics* [M]. Beijing: Meteorology Publishing House, 1991. 37  
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

- 9 Tan Kun, Hu Huanling. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(1): 55~60  
谭 锟,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 Li Xuebin, Xu Qingshan, Hu Huanling. New method deduce imaginary part of refractive index of aerosol with double scattering-angles L-OPC[J]. *Acta Optica Sinia*, 2007, **27**(3): 391~394  
李学彬,徐青山,胡欢陵等. 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[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 391~394
- 11 Hu Huanling, Li Xuebin, Zhang Yinchao *et al.*. Determination of the refractive index and size distribution of aerosol from dual-scattering-angle optical particle counter measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3864~3870

## 《光学学报》“空间光学”专题征稿启事

随着国家对空间技术发展的不断重视,“神舟计划”、“嫦娥计划”的深入实施,国内空间技术不断发展,其中空间光学技术发挥了极其重要的作用。为集中反映“空间光学”领域国内外的最新发展,《光学学报》计划 2008 年 12 月推出“空间光学”专题栏目,特向国内外专家征集“空间光学”方面原创性的研究论文。

### 征稿范围包括:

- 空间观测与遥感
- 空间目标探测
- 空间信息链路技术
- 天基光电对抗
- 其他空间光学领域

### 截稿日期:

2008 年 10 月 5 日。

### 投稿方式及格式:

可直接将稿件电子版发至邮箱:gxxb@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“空间光学专题投稿”)。投稿文体不限,语种不限,其电子版请使用 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 gxxb@mail.shcnc.ac.cn 询问。