

一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性

张小林^{1,2} 黄印博¹ 饶瑞中¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 以包含灰尘、黑碳和水三种成分的单分散内混合初次气溶胶为例, 利用消光、吸收、散射效率因子和不对称因子, 探讨了以等效折射率描述具有不同成分的内混合气溶胶粒子系统的适用性。结果表明, 在尺度参数为 0.1~25 时不同半径比下, 消光、吸收和散射效率因子的等效性较好, 相对误差分别在 3%、3% 和 4% 以内; 不对称因子的等效性相对稍差, 相对误差在 13% 以内。当半径比 a/b 小于 1/5, 即内混合体中所含灰尘和黑碳较少时, 等效折射率实部和虚部值基本可以确定, 而不必考虑尺度参数的影响。用除散射相函数之外的其他光学量来等效时, 较为容易找到等效的气溶胶粒子。

关键词 散射; 大气光学; 气溶胶粒子; 等效性; 内混合

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0629001

Equivalence of Light Scattering by One Internal-Mixed Model for Aerosol Particles

Zhang Xiaolin^{1,2} Huang Yinbo¹ Rao Ruizhong¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the monodispersion of dust and black carbon particles coated by water in internal mixing state, the validity of equivalent refractive index for the mixture is analyzed using extinction-, absorption-, scattering-efficiency factors and asymmetry parameters. The equivalences for extinction-, absorption- and scattering-efficiency factors are good with the relative errors less than 3%, 3% and 4%, respectively at different radius ratios for the size parameters from 0.1 to 25. The equivalence for asymmetry parameters is relatively a bit poor with the relative errors less than 13%. The complex refractive indices can almost be determined for the radius ratio less than 1/5, which is irrespective of the size parameter. It is easy to obtain the equivalent refractive indices of the internal mixture of particles using the optical parameters except the scattering phase function.

Key words scattering; atmospheric optics; aerosol particles; equivalence; internal mixing

OCIS codes 290.4020; 290.5825; 290.5850

1 引言

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系, 其来源可分为自然过程和人类活动两部分, 灰尘是陆地上自然气溶胶的

主要成分, 而黑碳则是化石燃料和生物质不完全燃烧后人为排放的副产品初次气溶胶粒子煤灰的主要成分^[1,2]。刚排放的黑碳大多与其它难溶物质如灰尘构成外混合体, 但是随着时间推移, 它们将由于凝

收稿日期: 2011-11-14; **收到修改稿日期**: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(40905009)资助课题。

作者简介: 张小林(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。

E-mail: ybhuang@aiofm.ac.cn

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输及大气光学特性等方面的研究。

E-mail: rao@aiofm.ac.cn(中国光学学会会员号: S0404207915)

结、碰撞等作用变成内混合体,在污染的城市大气中,大约 12 h 后,黑碳内混合体还会被包裹上一层水、硫酸盐和有机质^[3,4]。

激光在大气中传输时,气溶胶粒子的吸收、散射效应将直接导致激光能量的衰减,同时吸收效应所产生的非线性热晕效应还会引起光斑畸变和光束偏移等^[5,6]。在激光工程应用、太阳光偏振散射特性^[7,8]、船尾流激光后向散射^[9]和水雾^[10]等研究中,考虑气溶胶粒子的影响时,通常假设其为单一成分的均匀球体。但是,实际大气中的气溶胶粒子多是由不同化学成分组成的复杂混合体,因成分的不同而没有固定复折射率,特别是虚部变化范围很大,难以精确测定^[11]。因此,通过光散射的等效性分析获取等效折射率将是获得复杂混合体复折射率的一种行之有效的方法。

目前在光散射等效性方面的研究国内外已经开展了不少工作。海盐和烟羽两种典型粒子所构成的外混合气溶胶粒子系统的等效性^[12]已经探讨过,利用各效率因子和散射相函数来分析以等效折射率描述外混合系统的适用性,结果无论单分散还是多分散系统等效效果皆不是太好。黄红莲等^[13]以消光效率因子和散射相函数为等效判据,分析了两种成分所组成的内混合系统的等效性,发现散射相函数等效性很差,而各效率因子的等效性较好。目前光散射等效性的研究更多的是两种成分混合系统的等效性,而针对三种成分的多成分复杂混合系统的研究并不多见。

本文以包含灰尘、黑碳和水的内混合陆地初次气溶胶粒子为研究对象,利用光学量消光、吸收、散射效率因子和不对称因子为等效判据,探讨了以等效折射率描述具有不同复折射率组成的内混合气溶胶粒子系统的适用性。为了区分气溶胶的复折射率和谱分布的作用,本文仅分析不需要考虑谱分布影响的单分散陆地初次气溶胶粒子。另外,还研究了光学量选取对等效性的影响。

2 计算方法

离散偶极子近似(DDA)法是将实际的散射物体近似为一系列可极化点阵,从而计算入射光与这些点阵的相互作用。DDSCAT 7.1 代码可从其文献^[14, 15]处得到,它在粒子尺度参数 $x \leq 25$ 时能得到很精确的计算结果^[14]。其中的尺度参数 $x = 2\pi r/\lambda$, r 为粒子的半径, λ 为照射粒子的入射光波长。

由于 DDSCAT 7.1 对计算硬件条件的要求较

高以及计算十分耗时,仅使用 DDSCAT 7.1 进行等效性计算是比较困难的,而同时利用 DDSCAT 7.1 和 MIEV0^[16]则必须考虑两者计算相同光学量的固有偏差。以球形含碳气溶胶粒子在 $0.55 \mu\text{m}$ 波长为例,DDSCAT 7.1 和 MIEV0 相比,消光、吸收、散射效率因子和不对称因子的相对偏差大多在 1% 以内,最多不超过 8%;而散射相函数的偏差相对较大。散射相函数在米氏散射区具有振荡结构的特性影响了其作为等效判据的适用性,用 DDSCAT 7.1 和 MIEV0 来研究散射相函数的等效性不太合适。同时,考虑了散射相函数的外混合^[12]和内混合^[13]气溶胶粒子系统的等效效果也不是太好。不对称因子是散射相函数的一阶矩,反映相函数衍射峰的陡峭程度,代表前向散射的相对强度,是辐射传输中一个重要参数。因此,本文在光散射等效性判据选择时,利用了消光、吸收、散射效率因子和不对称因子,而没有利用散射相函数。

内混合陆地初次气溶胶模型由灰尘、黑碳和水三种成分所组成的球体,其中,水包裹灰尘和黑碳,灰尘和黑碳是体积等大的两小球体,两者球心位于被水所包裹大球体的某条直径上,且皆位于包裹大球体半径的中心处,对称分布于包裹大球体球心两侧,如图 1 所示。

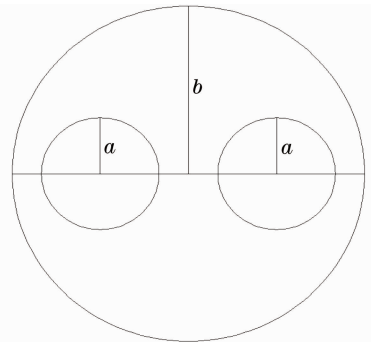


图 1 三成分内混合粒子示意图

Fig. 1 Sketch map of three-composition particle in internal mixing state

灰尘、黑碳和水在波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 处的复折射率分别为 $1.55 - 5.00 \times 10^{-3}i$ ^[17]、 $1.87 - 0.569i$ ^[17]和 $1.333 - 1.96 \times 10^{-9}i$ ^[13]。假设灰尘和黑碳的半径皆为 a ,而整个内混合体半径为 b ,则根据其复折射率,利用 DDA 法可算出整个内混合气溶胶模型的光散射量,如消光、吸收、散射效率因子 Q_{ext} , Q_{abs} , Q_{sca} 和不对称因子 g 等。然后,将上述气溶胶粒子等效为尺度参数 $x = 2\pi b/\lambda$, 折射率 $m = n - ik$ 的均匀球粒子。其中等效粒子折射率的实部 n 和虚部 k

均由等步长增加的一组数据组成,在不同的折射率下,用米散射程序 MIEV0 分别计算相应的光散射量 $Q_{\text{ext}}^E, Q_{\text{sca}}^E, Q_{\text{abs}}^E, g^E$ 等。由此得到的各光学量与用 DDA 法计算所得参量的相对误差 ϵ 具有最小值时,对应的折射率即为内混合系统的等效折射率 $m_E = n_E - ik_E$, 相对误差 ϵ 表达式为

$$\epsilon = \sqrt{(\epsilon_{Q_{\text{ext}}}^2 + \epsilon_{Q_{\text{abs}}}^2 + \epsilon_{Q_{\text{sca}}}^2 + \epsilon_g^2)/4}, \quad (1)$$

式中 $\epsilon_{Q_{\text{ext}, \text{sca}, \text{abs}}}$ 分别对应消光、吸收和散射效率因子的相对误差, ϵ_g 为不对称因子的相对误差, 表达式分别为

$$\epsilon_{Q_{\text{ext}, \text{sca}, \text{abs}}} = (Q_{\text{ext}, \text{sca}, \text{abs}}^E - Q_{\text{ext}, \text{sca}, \text{abs}})/Q_{\text{ext}, \text{sca}, \text{abs}}, \quad (2)$$

$$\epsilon_g = (g^E - g)/g, \quad (3)$$

在等效性分析中, 尺度参数选取从 0.1-25 共 25 个等对数间隔点, 复折射率实部由 0.05-1.95 (步长为 0.02) 共 951 个数据组成, 复折射率虚部由 1.0×10^{-11} -1.0 (等对数间隔) 共 2201 个数据组成。所选取的等效折射率库的区间范围已经包含了地球大气气溶胶常见成分的复折射率, 而且其间隔比文献 [12, 13] 要小很多。

当 a/b 分别为 1/10、1/7、1/5、1/3 和 1/2 时, 对内混合体的消光、吸收、散射效率因子和不对称因子与等效粒子各光散射量的相对误差进行了数值计算和分析, 并重点分析了吸收效率因子的等效性, 因为其精确测量到目前为止依然是非常困难的。

最后还考察了只用消光、吸收和散射效率因子的相对误差最小时的等效情况, 从而分析了等效计算时光学参量的选取对等效效果的影响。

3 结果与讨论

3.1 等效折射率

图 2 是五种半径比 (a/b 分别为 1/10、1/7、1/5、1/3 和 1/2) 下, 内混合体等效折射率实部 n_r 和虚部 n_i 随尺度参数的变化关系。由图 2(a) 可以看出:

1) 当 $a/b=1/10$ 时, 等效折射率实部与尺度参数无关, 基本为水的复折射率实部。当 $a/b=1/7$ 和 1/5 时, 等效折射率实部除了尺度参数大于 10 的某些尺度参数以外, 也与尺度参数无关, 基本为水的复折射率实部。也就是说, 灰尘和黑碳含量较少时, 它们对等效折射率实部的影响可以忽略不计, 等效折射率实部即为主要成分水的复折射率实部。这与两种成分黑碳和水的内混合情况 [13] 不同, 比其在黑碳含量也较少 (体积占内混合体的 1%) 时复折射率实部的等效情况要好。而这与 Lee 等 [18] 在探讨硫酸

盐和黑碳聚合体气溶胶消光特性时, 所得出的当黑碳和硫酸盐体积相比很小时整个聚合体的消光特性由主体硫酸盐决定相似。

2) 当 $a/b=1/3$ 时, 在尺度参数小于 0.8 以及在 2~4 时, 等效折射率实部基本不随尺度参数变化, 其值比内混合体主要成份水的复折射率实部略大; 当尺度参数在 0.8~2.0 时, 等效折射率实部较小, 其值在 0.5~0.6 范围内变化; 当尺度参数大于 4 时, 等效折射率实部起伏较大, 其值在 1.3~1.7 范围内变化。

3) 当 $a/b=1/2$ 时, 在尺度参数小于 0.3 以及在 2~3 时, 等效折射率实部基本不随尺度参数变化, 结合前两种半径比情况可知其值与复折射率实部较大的灰尘和黑碳含量有关, 含量越多其值越大; 当尺度参数在 0.2~2.0 时, 等效折射率实部较小, 其值在 0.4~0.6 范围内变化; 当尺度参数大于 4 时, 与 $a/b=1/3$ 情形类似, 等效折射率实部起伏较大, 其值在 1.3~1.8 范围内变化。

图 2(b) 显示, 各种半径比下, 等效折射率虚部与尺度参数的关系具有明显的区域性。当尺度参数小于 0.6 时, 等效折射率虚部基本与尺度参数无关, 而与半径比密切相关, 随复折射率虚部较大的黑碳的含量增加而增加; 当尺度参数大于 0.6 时, 等效折射率虚部起伏稍大, 其变化范围在 $10^{-4} \sim 0.2$ 之间, 皆在内混合体所含物质中最大 (黑碳) 和最小 (水) 复折射率虚部之间, 且随复折射率虚部较大的黑碳含量的增加而增加。和等效折射率实部的情形类似, 在 $a/b=1/10$ 时, 此时灰尘和黑碳的体积分别占内混合体的 0.1%, 等效折射率虚部在瑞利散射和米散射区, 与尺度参数无关, 其值基本为 5×10^{-4} 。此半径比下比两种成分黑碳和水内混合情况的复折射率虚部的等效情况 [13] 也要好。

结合图 2(a) 和 (b) 可以看出, 半径比 a/b 越小, 即内混合体中所含的杂质越少, 其复折射率等效的稳定性越强, 复折射率的等效效果越好。除了尺度参数在 1 附近的半径比 a/b 较大时以及尺度参数大于 10 半径比 a/b 较小时, 等效折射率实部比内混合体所含物质中最小复折射率实部 (水) 还小之外, 等效折射率实部和虚部皆分别在内混合体所含物质中最大和最小复折射率实部和虚部范围内。在内混合体确定 (半径比 a/b 确定) 计算其等效折射率实部和虚部时, 等效折射率实部较小通常对应着等效折射率虚部较大, 这说明复折射率实部和虚部与各光学量皆有关系, 而不仅仅是复折射率实部与散射有关,

复折射率虚部与吸收有关。虽然部分尺度参数范围内的等效折射率实部和虚部随尺度参数变化,其值比较难以确定,但在水球中所含的杂质灰尘和黑碳含量较少时,内混合体的等效折射率实部和虚部基本可以确定,而不必考虑尺度参数的影响。其中,等效折射率实部即为内混合体主体成分的复折射率实

部,等效折射率虚部基本为恒定值。黄红莲等^[13]在两种成分内混合水球中含黑碳较少时折射率实部和虚部比较难以确定,与其利用消光效率因子和散射相函数的等效判据可能有关,这也间接说明用随散射角具有较强振荡的散射相函数来等效内混合体的复折射率不太合适。

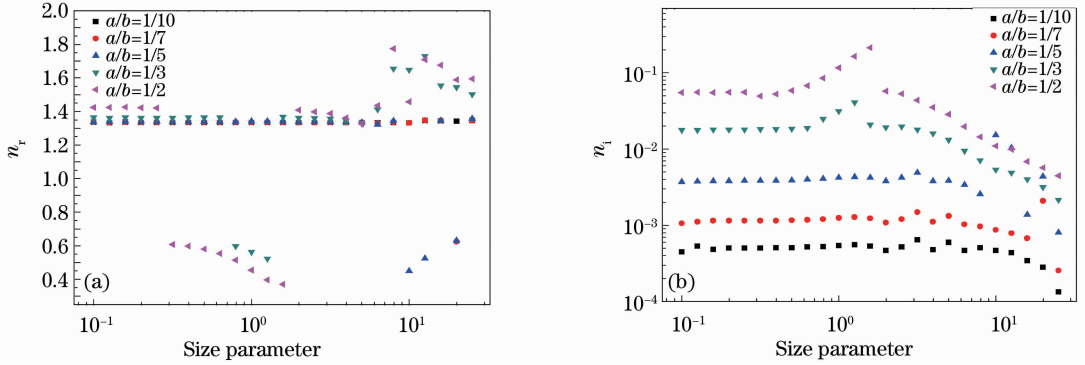


图 2 五种半径比下等效折射率实部(a)和虚部(b)随尺度参数的变化关系

Fig. 2 Real part (a) and imaginary part (b) of equivalent refractive indices as the function of size parameters at five different radius ratios

尺度参数在 1 附近的半径比 a/b 较大时,等效折射率实部有大幅度的下降,而 a/b 较小以及分层模型^[13]却没有出现这一不规则现象。如图 1 所示,当 a/b 较大时气溶胶粒子模型的内部杂质将更靠近左右边界,特别是 $a/b=1/2$ 时模型的内部杂质已经完全达到左右边界。这一不规则现象的出现可能与

粒子模型的内部杂质部分的靠近边界所引起的边界效应有关。

3.2 光学量误差

图 3(a)~(d)分别为五种半径比下求内混合体等效折射率时,消光、吸收、散射效率因子和不对称因子的相对误差 ϵ_{ext} 、 ϵ_{abs} 、 ϵ_{sca} 、 ϵ_g 随尺度参数的变化。

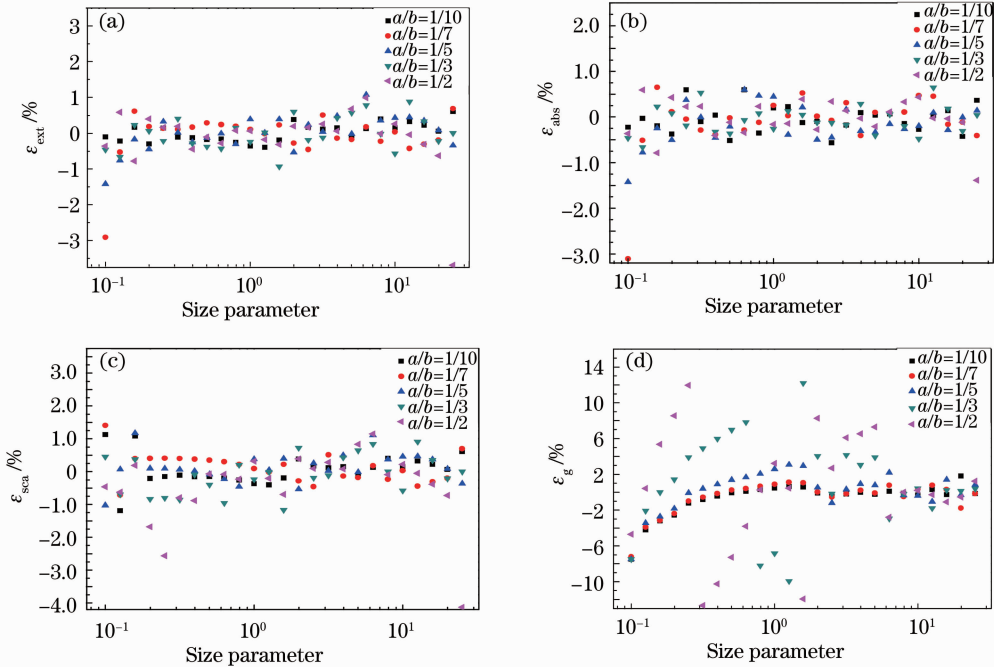


图 3 五种半径比下消光(a)、吸收(b)、散射效率因子(c)和不对称因子(d)的相对误差

Fig. 3 Relative errors of extinction- (a), absorption- (b), scattering-efficiency factors (c) and asymmetry parameters (d) at five different radius ratios

其中相对误差定义为利用 MIEV0 所计算得出的等效球体的光学量(计算参数选择的是同一粒子半径 b 以及计算得出的等效折射率)与用 DDA 法计算的内混合体的光学量的相对误差。可以看出,各半径比下的情形大体一致,消光、吸收和散射效率因子的相对误差很小,分别在 3%、3% 和 4% 以内,说明消光、吸收和散射效率因子的等效性比较好;不对称因子的相对误差稍大,但也仅在 13% 以内,其等效性稍微差一些。相对而言,不对称因子的相对误差大体随半径比的增大而增大,而消光、吸收和散射效率因子因其相对误差太小不太明显。与考虑了散射相函数的外混合^[12] 和内混合^[13] 相比,用除散射相函数之外的其他光学量来等效内混合体的复折射率所引起的消光、吸收和散射效率因子的相对误差要小很多。这进一步说明散射相函数不太适用来等效内混合体的复折射率,而用除散射相函数之外的其他光学量来等效时,则比较容易找到其等效复折射率,

从而找到等效的均匀成分的球形气溶胶粒子。

3.3 光学量选取对等效性的影响

图 4(a)~(f) 分别为仅以消光、吸收和散射效率因子相对误差最小来等效时,五种半径比下等效折射率实部和虚部以及消光、吸收、散射效率因子和不对称因子的相对误差。可以看出,与前面用消光、吸收、散射效率因子和不对称因子的四个光学量作为等效判据来等效相比,利用消光、吸收和散射效率因子的三个光学量来等效的效果要差一些。等效折射率实部随尺度参数的变化出现较多起伏,即便在尺度参数较小以及半径比 a/b 较小时等效折射率实部也出现起伏;等效折射率虚部在尺度参数较大以及半径比 a/b 较大时,甚至出现交叉;消光、吸收和散射效率因子的相对误差虽然略为变小了,其值皆在 1% 以内,但不对称因子的相对误差却变大了,变化范围在 45% 以内。

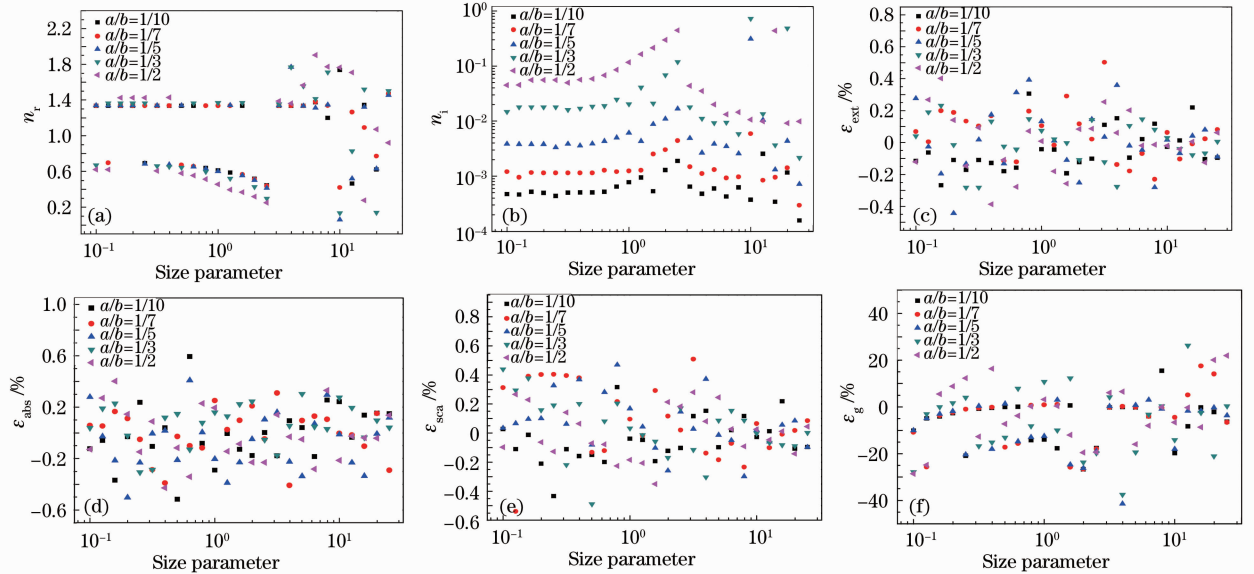


图 4 仅以消光、吸收和散射效率因子相对误差最小来等效时,五种半径比下等效折射率实部(a)和虚部(b)以及消光(c)、吸收(d)、散射效率因子(e)和不对称因子(f)的相对误差

Fig. 4 Real part (a) and imaginary part (b) of equivalent refractive indices, and relative errors of extinction- (c), absorption- (d), scattering-efficiency factors (e) and asymmetry parameters (f) at three different radius ratios with least error of extinction-, absorption- and scattering-efficiency factors

研究内混合气溶胶粒子光散射的等效性时,光学量的选取至关重要。消光、吸收和散射效率因子只是散射角光学积分量,没有散射角上的光学信息,而不对称因子可以部分地反映散射角上的光学信息,它代表前向散射的相对强度。散射相函数表示散射光强随散射角的相对变化,它能反映各散射角上的光学信息,但由于它具有随散射角强烈振荡的

特性,利用各效率因子和散射相函数为等效判据的等效效果并不好。只考虑了消光、吸收和散射效率因子的等效判据,使消光、吸收和散射效率因子的相对误差稍微变小,但其他光学量,如不对称因子,相对误差却变大,复折射率等效的稳定性也不是太好。而添加了不对称因子的等效判据,使各光学量的等效效果变好,复折射率等效的稳定性也较好地增强。

在求内混合体等效折射率时,非散射角函数的各光学量选取越多,内混合体等效的稳定性越强,复折射率的等效效果越好。

4 结 论

以包含灰尘、黑碳和水三种成分的内混合复杂初次气溶胶为例,利用光学量消光、吸收、散射效率因子和不对称因子,探讨了以等效折射率描述具有不同成分组成的内混合气溶胶粒子系统的适用性。结果表明:各光学量在各半径比下的情形大体一致,消光、吸收和散射效率因子的等效性比较好,相对误差分别在 3%、3% 和 4% 以内;不对称因子的等效性稍差,但相对误差也仅在 13% 以内。特别是,当内混合体中所含杂质较少时,其等效折射率实部和虚部基本可以确定,而不必考虑尺度参数的影响,其中等效折射率实部即为内混合体主体成分的复折射率实部,等效折射率虚部基本为恒定值。除了尺度参数在 1 附近的半径比 a/b 较大时,等效折射率实部比内混合体所含物质中最小(水)复折射率实部还小之外,等效折射率实部和虚部皆分别在在内混合体所含物质中最大和最小复折射率实部和虚部范围内。

与考虑了散射相函数的外混合^[12]和两种成分内混合^[13]相比,用除散射相函数之外的其它光学量来等效内混合体复折射率所引起的消光、吸收和散射效率因子的相对误差要小很多,这说明散射相函数不太适用等效内混合体的复折射率。用与散射角相关的散射相函数来等效,一般难以找到合适的等效粒子,而用非散射角函数的光学量来等效时,则比较容易找到等效的气溶胶粒子。研究内混合气溶胶粒子光散射的等效性时,非散射角函数的各光学量选取越多,内混合体等效的稳定性越强,复折射率的等效效果越好。

本文以比分层粒子更接近实际的多成分复杂内混合气溶胶粒子为研究对象,这无疑对获得实际气溶胶粒子复折射率以及激光光电系统在实际大气中的应用更具有意义。虽然散射相函数的等效效果不太好,添加了不对称因子的等效效果却较好,而不对称因子是散射相函数的一阶矩,反映相函数衍射峰的陡峭程度,故利用散射相函数的其他相关因子有可能获得更高精度的等效粒子,这有待进一步深入地研究。另外,为了区分折射率分布对光散射特性的影响,文中仅以不需要考虑谱分布影响的单分散气溶胶粒子为研究对象,但是实际的大气气溶胶多为多分散系统,因此,对于多分散气溶胶系统也需

要深入研究与分析,以准确了解实际大气气溶胶粒子光散射特性。

参 考 文 献

- 1 I. N. Sokolik, O. B. Toon. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D8): 9423~9444
- 2 M. J. Gatari, J. Boman. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa [J]. *Atmos. Environ.*, 2003, **37**(8): 1149~1154
- 3 N. Moteki, Y. Kondo. Effects of mixing state on black carbon measurement by laser-induced incandescence [J]. *Aerosol Sci. Technol.*, 2007, **41**: 398~417
- 4 M. Shiraiwa, Y. Kondo, N. Moteki *et al.*. Evolution of mixing state of black carbon in polluted air from Tokyo [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L16803
- 5 Rao Ruizhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 130~134
饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 130~134
- 6 Huang Yinbo, Wang Yingjian. Effect of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 720~724
黄印博, 王英俭. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5): 720~724
- 7 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006
黄旭锋, 步 扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 8 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005
吴良海, 高 隽, 范之国 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0701005
- 9 Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 14~18
- 10 Du Yongcheng, Yang Li. Study on optimal extinction radius of water fog particles based on phase function and extinction factor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2459~2463
杜永成, 杨 立. 基于相函数和消光因子的水雾粒子最佳消光半径研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2459~2463
- 11 C. Levoni, M. Cervino, R. Guzzi *et al.*. Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different component sand classes [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 8031~8041
- 12 Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by external mixture of atmospheric aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1099~1108
饶瑞中. 外混合气溶胶粒子光散射的等效性 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1099~1108
- 13 Huang Honglian, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by strong absorbing aerosol particles in internal mixing state [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1066~1070
黄红莲, 黄印博, 饶瑞中. 内混合强吸收气溶胶粒子光散射的等效性 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1066~1070
- 14 B. T. Draine, P. J. Flatau. User guide for the discrete dipole

- approximation code DDSCAT (Version 7a1) [J]. 2000, arXiv: astro-ph/0008151
- 15 B. T. Draine, P. J. Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering approximations [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4): 1491
- 16 W. Wiscombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1505~1509
- 17 M. Mallet, J. C. Roger, S. Despiaud *et al.*. Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE [J]. *Atmos. Res.*, 2003, **69**(1): 73~97
- 18 T. W. Lee. Orientation-averaged light-extinction characteristics of compound particles including aggregate effects [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(3): 514~517

栏目编辑：谢 婧