

吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析

徐 博 黄印博 范承玉 乔春红

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

摘要 以两种典型的吸湿性气溶胶组分(氯化钠和硫酸铵)为例,采用米氏散射程序,计算了粒子的吸收效率因子等光学参量,并分析了吸湿性气溶胶粒子加热的等效吸收系数随时间的变化规律,着重分析了忽略粒子自身吸收对等效吸收系数的影响,常规计算值与等效吸收系数在 $1\ \mu\text{s}$ 时相对误差可达到 234.7% 和 255.2%。同时,就不同相对湿度、不同波长对等效吸收系数含时变化规律的影响进行了对比分析,并讨论了采用均匀混合模型计算结果的相对误差,在 $1\ \mu\text{s}$ 时实际值与计算值相对误差最大,分别小于 3.62% 和 7.07%。

关键词 大气光学;等效吸收系数;米氏散射;气溶胶;相对湿度

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0101001

Calculation of Equivalent Absorption Coefficient of Uniformly Mixed Hygroscopic Aerosol Particles

Xu Bo Huang Yinbo Fan Chengyu Qiao Chunhong

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

Abstract By means of the Mie scattering theory, the absorption efficiency factor and other optical factors of hygroscopic aerosol made of NaCl and H_2O as well as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and H_2O which are set as the typical example are calculated, and the equivalent absorption coefficients with time of them are analyzed. The influence on the equivalent absorption coefficient when ignoring the energy absorbed by particles themselves is analyzed and the relative error of the equivalent absorption coefficient considering and ignoring the energy absorbed by the particles themselves is 234.7% and 255.2% at the time $1\ \mu\text{s}$, and the influence of different relative humidities and wavelengths on it is discussed. The relative errors of the results calculated by an uniformly mixed model are discussed, and the relative errors of the real results and calculated results are maximum at the time $1\ \mu\text{s}$ which are less than 3.62% and 7.07%, respectively.

Key words atmospheric optics; equivalent absorption coefficient; Mie scattering; aerosol; relative humidity

OCIS codes 010.1030; 010.1110; 010.1290; 010.1300; 010.3310

1 引 言

气溶胶粒子和气体分子的吸收引起的非线性热晕效应将会影响光束质量,限制光电系统在实际大气中的工程应用。气溶胶粒子由于具有非零的比热,吸收的能量首先主要被自身吸收,向周围辐射能量较小,达到饱和温度后吸收的能量才主要用于加

热大气,这和气体分子的吸收效应有显著的不同^[1,2]。

一般计算中假定气溶胶吸收的能量全部用于加热周围大气。Chan^[1]就一种气溶胶粒子吸收的能量对热晕效应的影响进行了研究,并提出了有效吸收系数这个概念。有效吸收是指在气溶胶的实际吸

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(40905009)资助课题。

作者简介: 徐 博(1985—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输和气溶胶光学性质等方面的研究。

E-mail: ybhuang@aiofm.ac.cn

导师简介: 范承玉(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输和自适应光学校正等方面的研究。

E-mail: cyfan@aiofm.ac.cn

收中,真正用于加热大气的那一部分吸收,有效吸收系数即文献[2]中的加热的等效吸收系数。

实际大气中的气溶胶粒子通常是由多种组分的粒子混合形成的^[3],对于黑碳等不溶于水的气溶胶粒子,与水结合通常形成内混合的气溶胶粒子体系,本课题组曾针对这种混合体系采用核壳模型,利用分层米氏散射程序,获得了等效吸收系数随时间的变化规律,并进一步对比分析了传输波长以及内外半径比对其的影响。计算结果表明,等效吸收系数随传输时间的增长变化特征明显。文献[4~6]对水溶性气溶胶和烟尘气溶胶形成的多分散外混合气溶胶体系的传输特性以及沙尘粒子等气溶胶粒子的光散射特性进行了分析。

对海盐等吸湿性气溶胶粒子,由于实际大气中存在着水汽,空气中的水汽附着在干气溶胶粒子上,形成均匀混合的气溶胶粒子,并引起气溶胶粒子粒径和复折射率的改变,进而影响激光在大气中的传输特性^[7]。这种典型的气溶胶粒子不能再简单采用如上介绍的核壳模型进行计算分析。

本文针对干气溶胶粒子在不同相对湿度下形成的均匀混合气溶胶粒子展开研究,分析了忽略粒子自身吸收的能量时对气溶胶粒子等效吸收系数的影响,并选择 10%, 30%, 50%, 70% 和 90% 5 种相对湿度和 0.55, 1.06, 3.75 和 10.6 μm 4 种波长,利用米氏散射计算程序^[8~10],对比分析了不同相对湿度和不同波长对吸湿性均匀混合气溶胶粒子体系等效吸收系数含时变化规律的影响。

2 吸湿性气溶胶粒子体系等效吸收系数的计算

2.1 等效吸收系数的计算

Chan^[1]给出了等效吸收系数的表达式:

$$\alpha_{\text{eq}}(t) = \int \pi r^2 Q_{\text{abs}}(r) n(r) \{1 - \exp[-t/\tau(r)]\} dr, \quad (1)$$

式中 r 为气溶胶粒子半径, $Q_{\text{abs}}(r)$ 为吸收效率因子(由米氏散射程序计算得到), $n(r)$ 为粒子的谱分布, t 为时间, $\tau(r)$ 为气溶胶粒子达到饱和温度所需要的时间,其表达式为

$$\tau(r) = r^2 \rho_p c_p / 2k_a, \quad (2)$$

式中 ρ_p, c_p 分别为气溶胶粒子的密度和比热, k_a 为粒子周围空气的热传导率。

2.2 吸收效率因子的计算

干粒子的半径为 a , 吸湿后形成的湿气溶胶粒

子的半径为 b , 粒子周围空气的热传导率同样为 k_a , 忽略两种粒子由于混合所导致的体积减小以及溶解热, 并且最终粒子内核和外壳达到相同温度, 根据湿粒子吸收的能量为干粒子吸收的能量和水吸收的能量和, 可以得到

$$\begin{aligned} \overline{c_p} \rho_p \frac{4}{3} \pi b^3 \Delta t = c_w \rho_w \frac{4}{3} \pi (b^3 - a^3) \Delta t + \\ c_0 \rho_0 \frac{4}{3} \pi a^3 \Delta t, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\overline{c_p}, \overline{\rho_p}$ 分别为粒子吸湿后的平均比热和平均密度。 c_w, ρ_w, c_0, ρ_0 分别为水的比热、密度和干粒子的比热、密度。由(2)式和(3)式可以得到粒子达到饱和温度所需要的时间 $\tau(a, b)$:

$$\begin{aligned} \tau(a, b) = r^2 \rho_p c_p / (3k_a) = \\ [\rho_0 c_0 a^3 + \rho_w c_w (b^3 - a^3)] / (3k_a b), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $k_a = 2.60 \times 10^2 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{k})$, 湿气溶胶粒子谱分布选择常用的 Junge 分布:

$$n = \begin{cases} 2 \times 10^{-12} \times b^{-4}, & 2 \times 10^{-8} \text{ m} < b < 3 \times 10^{-5} \text{ m} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

Hänel 等^[11~14]经过大量的实验和理论验证, 指出在潮湿空气中, 空气中的水凝结在干气溶胶粒子上, 形成的均匀混合的气溶胶粒子, 其复折射率 m_c 是由干粒子和凝结的液态水共同决定的, 并总结出了气溶胶折射指数和相对湿度 R_H 之间的函数关系为

$$m_{\text{re}} = m_{\text{rw}} + (m_{\text{ro}} - m_{\text{rw}}) [b/a]^{-3}, \quad (6)$$

$$\frac{m_{\text{ie}}}{m_{\text{re}}^2 + 2} = \frac{m_{\text{iw}}}{m_{\text{re}}^2 + 2} + \left(\frac{m_{\text{io}}}{m_{\text{ro}}^2 + 2} - \frac{m_{\text{iw}}}{m_{\text{rw}}^2 + 2} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{-3}, \quad (7)$$

式中角标中的 r 表示折射率实部, i 表示虚部, w, o 和 e 分别表示水、干粒子和湿粒子。如 m_{re} 表示湿粒子的折射率实部, m_{ie} 表示湿粒子的虚部。 m_w, m_o 和 m_e 分别为水、干粒子和湿粒子的复折射率。

气溶胶粒子吸湿后的半径 b 和干气溶胶粒子半径 a 的比值 f 的表达式为

$$f = b/a = (1 - R_H)^{-1/\mu}, \quad (8)$$

式中, 对于海洋性气溶胶粒子, μ 取 3.9; 对于大陆型气溶胶粒子, μ 取 5.8, $0 \leq R_H \leq 0.995$, 当相对湿度 R_H 大于 0.995 时, 仍取 0.995。忽略由于相对湿度增加和减少的不同而引起的滞后现象, 即认为不论在相对湿度增加的过程中还是相对湿度减少的过程中, 粒子在相同的相对湿度下, 半径大小相同。

由(1), (4), (6)和(7)式可以得到等效吸收系数的表达式为

$$\alpha_{\text{eff}}(t) = \int \pi b^2 n Q_{\text{abs}}(m_e, y) \{1 - \exp[-t/\tau(a, b)]\} db, \quad (9)$$

式中 $y = 2\pi b/\lambda$, λ 为波长, $Q_{\text{abs}}(m_e, y)$ 由米氏散射程序得到。忽略粒子用于加热自身的能量的混合气溶胶粒子体系的吸收系数表达式为

$$\alpha(t) = \int \pi b^2 Q_{\text{abs}}(m_e, y) n db. \quad (10)$$

3 忽略粒子本身的吸收对等效吸收系数的影响

分别选取海洋型和大陆型气溶胶中两种典型的吸湿性气溶胶组分:氯化钠和硫酸铵,其中氯化钠的折射率虚部和水相差较大,而硫酸铵的折射率虚部和水相差较小。各粒子对应的比热、密度和复折射

表 1 不同气溶胶粒子的密度、比热和复折射率

Table 1 Densities, specific heat capacities and complex refractive indices of different particles of aerosols

	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Complex refractive index			
			0.55 μm	1.06 μm	3.75 μm	10.6 μm
H ₂ O	1.0×10^3	4.2×10^3	$1.333-1.96\times 10^{-9}\text{i}$	$1.326-4.18\times 10^{-6}\text{i}$	$1.369-3.5\times 10^{-3}\text{i}$	$1.179-0.0674\text{i}$
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.769×10^3	1.4235×10^3	$1.530-1.0\times 10^{-7}\text{i}$	$1.510-1.8\times 10^{-6}\text{i}$	$1.580-3.6\times 10^{-2}\text{i}$	$1.970-0.056\text{i}$
NaCl	2.165×10^3	2.329×10^3	$1.547-6.8\times 10^{-11}\text{i}$	$1.531-3.5\times 10^{-10}\text{i}$	$1.522-1.8\times 10^{-9}\text{i}$	$1.491-8.0\times 10^{-8}\text{i}$

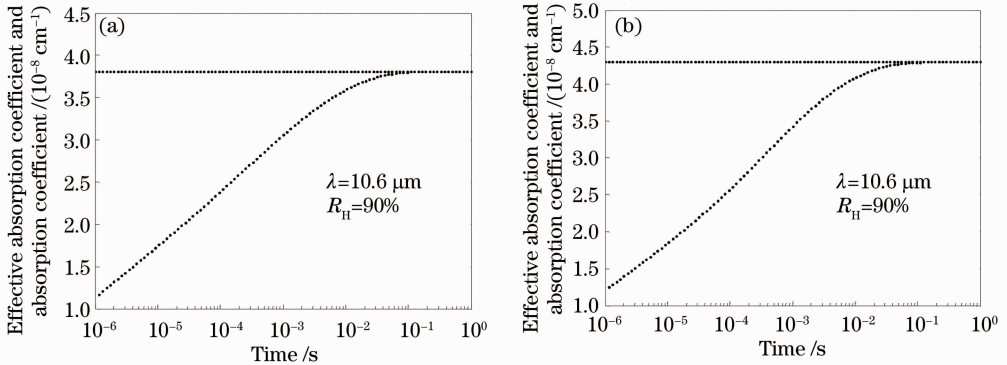


图 1 (a)氯化钠和(b)硫酸铵在波长为 10.6 μm ,相对湿度为 90%时的吸收系数和等效吸收系数

Fig. 1 Absorption coefficients and equivalent absorption coefficients of (a) NaCl and (b) (NH₄)₂SO₄ irradiated at wavelength of 10.6 μm and R_H of 90%

4 不同相对湿度对等效吸收系数的影响

图 1 中两种干粒子分别吸湿形成的均匀混合的气溶胶粒子体系,在波长为 3.75 μm ,相对湿度分别为 10%,30%,50%,70%,90% 5 种情况下的等效吸收系数随时间的变化情况分别如图 2 所示。

如图 2(a)所示,氯化钠吸湿形成的气溶胶粒子的等效吸收系数随相对湿度的增大而增大。如表 2 所示,5 种相对湿度下,氯化钠吸湿形成的气溶胶粒

率如表 1 所示。图 1(a)为波长 10.6 μm ,相对湿度为 90%时,氯化钠吸湿形成的气溶胶粒子的吸收系数和等效吸收系数,图 1(b)为相同条件下硫酸铵吸湿形成的气溶胶粒子的。定义 $\epsilon = [\alpha(t) - \alpha_{\text{eff}}(t)]/\alpha_{\text{eff}}(t)$ 表示吸收系数和等效吸收系数的相对误差。从图中可以看出,由于忽略用于加热粒子自身的能量,氯化钠和硫酸铵吸湿后对应的吸收系数为一个定值,分别为 $3.809\times 10^{-8}\text{ cm}^{-1}$ 和 $4.301\times 10^{-8}\text{ cm}^{-1}$ 。粒子的等效吸收系数在 1 μs 时分别为 $1.138\times 10^{-8}\text{ cm}^{-1}$ 和 $1.211\times 10^{-8}\text{ cm}^{-1}$,相对误差分别达到 234.7%和 255.2%。在 0.01 s 时,两种粒子的相对误差分别为 6.447%和 5.637%。在 0.1 s 时,相对误差分别仅为 0.199%和 0.112%,这时等效吸收系数已经趋近于吸收系数。

子的折射率虚部分别为 3.010×10^{-4} , 9.118×10^{-4} , 1.541×10^{-3} , 2.206×10^{-3} , 2.959×10^{-3} ,而吸收和折射率虚部有关,如图 2(a)和图 3(b)所示,随着相对湿度的增大,折射率虚部逐渐增大,等效吸收系数也逐渐增大。如图 2(b)所示,硫酸铵吸湿形成的气溶胶粒子的等效吸收系数随相对湿度的增大而减小,如图 3(b)和表 2 所示,折射率虚部随相对湿度的增加而减小,随着折射率虚部减小,等效吸收系数逐渐减小。所以,硫酸铵吸湿形成的气溶胶粒

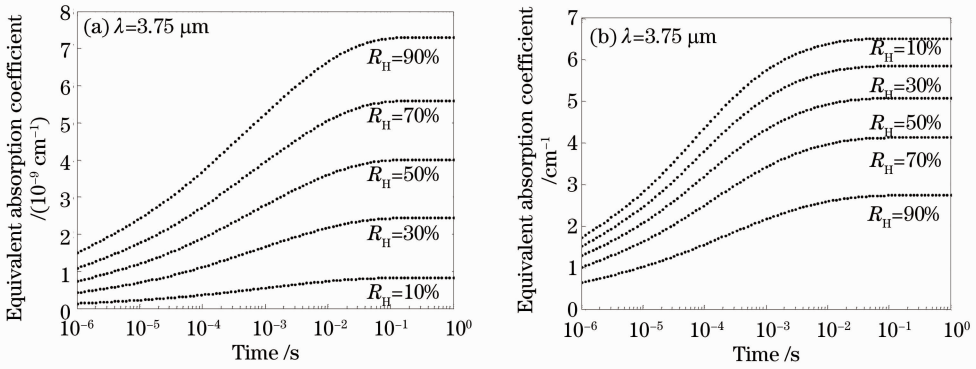


图 2 (a)氯化钠和水(b)硫酸铵和水在 $3.75 \mu\text{m}$ 时 4 种相对湿度下对应的时间变化的气溶胶粒子体系的等效吸收系数
Fig. 2 Equivalent absorption coefficients of aerosols made of (a) NaCl and H_2O and (b) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and H_2O irradiated at $3.75 \mu\text{m}$ of four different relative humidities

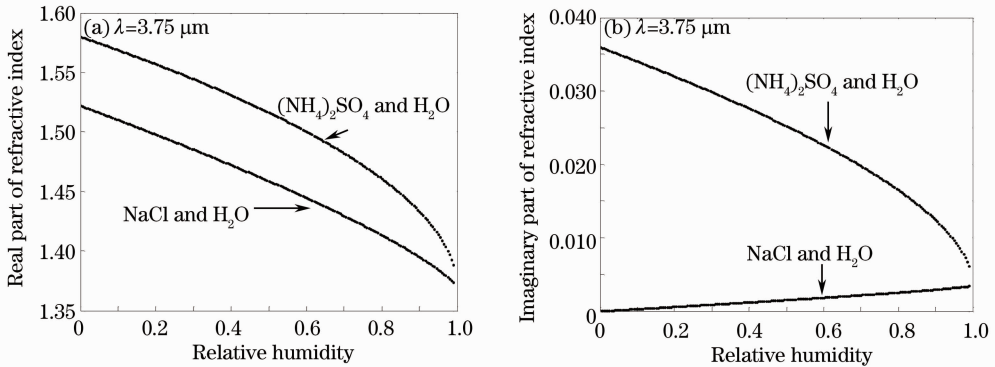


图 3 不同相对湿度对应的两种粒子的折射率(a)实部和(b)虚部
Fig. 3 (a) Real and (b) imaginary parts of refractive indices of two different aerosols corresponding to different relative humidities

表 2 $3.75 \mu\text{m}$ 时不同相对湿度对应的复折射率

Table 2 Complex refractive indices of aerosol particles of different relative humidities

R_H	10%	30%	50%	70%	90%
$m(\text{NaCl}, \text{H}_2\text{O})$	$1.510-3.010 \times 10^{-4}i$	$1.485-9.118 \times 10^{-4}i$	$1.459-1.541 \times 10^{-3}i$	$1.430-2.206 \times 10^{-3}i$	$1.395-2.959 \times 10^{-3}i$
$m[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4, \text{H}_2\text{O}]$	$1.569-3.404 \times 10^{-2}i$	$1.544-2.986 \times 10^{-2}i$	$1.516-2.522 \times 10^{-2}i$	$1.482-1.978 \times 10^{-2}i$	$1.433-1.241 \times 10^{-2}i$

子的等效吸收系数随相对湿度的变化规律和氯化钠吸湿形成的气溶胶粒子的相反。

对比氯化钠和硫酸铵分别吸湿形成的气溶胶粒子的折射率虚部和等效吸收系数可知,虚部越大,等效吸收系数越大。湿硫酸铵对应的折射率虚部在 5 种相对湿度下都比湿氯化钠对应的折射率虚部大,湿硫酸铵的等效吸收系数大部分在 10^{-8} 量级,湿氯化钠的等效吸收系数大部分在 10^{-9} 量级,两者相差一个量级。取相对湿度为 70%,如表 2 所示,氯化钠和硫酸铵两种干粒子吸湿形成的气溶胶粒子的折射率虚部分别为 2.206×10^{-3} 和 1.978×10^{-2} ,在 $100 \mu\text{s}$ 时对应的等效吸收系数分别为 $2.735 \times 10^{-9} \text{cm}^{-1}$ 和 $2.511 \times 10^{-8} \text{cm}^{-1}$ 。

波长为 $3.75 \mu\text{m}$ 时,氯化钠没有吸湿时,等效

吸收系数较小,只有 10^{-15} 量级。吸湿后的等效吸收系数增大为 10^{-9} 量级。这是由于氯化钠的折射率虚部相对较小,为 1.8×10^{-9} ,水的折射率虚部较大,氯化钠吸收水后,形成的混合气溶胶粒子的折射率虚部增大幅度较大。可见,氯化钠粒子吸湿后,形成的气溶胶粒子的等效吸收系数明显增大。硫酸铵在没有吸收水时的等效吸收系数和吸收水后都在一个量级,变化不大,这是因为硫酸铵折射率虚部和水的折射率虚部大小相当,吸湿后的气溶胶粒子的折射率虚部变化不大。

5 不同波长对等效吸收系数的影响

除了相对湿度,入射光波长是影响气溶胶粒子等效吸收系数的另一个重要因素。图 4 为氯化钠和

硫酸铵在波长分别为 0.55, 1.06, 3.75, 10.6 μm 时吸湿形成的气溶胶粒子的等效吸收系数随时间的变化曲线。气溶胶粒子同样选择 Junge 分布, 相对湿度选择 90%。

如图 4(a) 所示, 氯化钠吸湿形成的气溶胶粒子体系的等效吸收系数随波长的增加而增加, 这是因为氯化钠和水的折射率虚部受波长影响较大, 如表 1 和表 3 所示, 随着波长增加, 氯化钠和水的折射率虚部的增加幅度都较大, 形成的均匀混合气溶胶粒子的折射率虚部增加幅度较大, 导致等效吸收系数

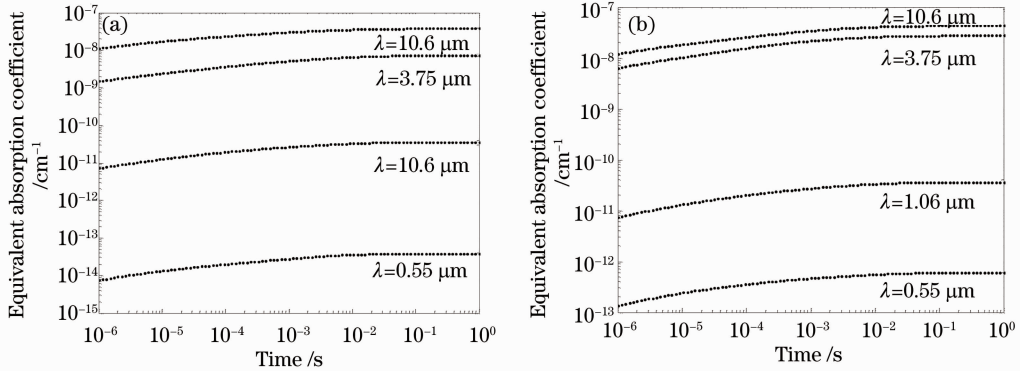


图 4 (a)氯化钠和水以及(b)硫酸铵和水形成的气溶胶在不同波长时的等效吸收系数

Fig. 4 Equivalent absorption coefficients of aerosols made of (a) NaCl and H₂O and (b) (NH₄)₂SO₄ and H₂O irradiated at different wavelengths

表 3 硫酸铵和氯化钠分别和水形成的气溶胶粒子在 4 种不同的波长时的复折射率

Table 3 Complex refractive indices of two different aerosols irradiated at four different wavelengths

Wavelengths	0.55 μm	1.06 μm	3.75 μm	10.6 μm
$m(\text{NaCl}, \text{H}_2\text{O})$	$1.369 - 1.679 \times 10^{-9}i$	$1.361 - 3.555 \times 10^{-6}i$	$1.395 - 2.959 \times 10^{-3}i$	$1.232 - 5.805 \times 10^{-2}i$
$m[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4, \text{H}_2\text{O}]$	$1.393 - 2.901 \times 10^{-8}i$	$1.382 - 3.527 \times 10^{-6}i$	$1.433 - 1.241 \times 10^{-2}i$	$1.419 - 6.718 \times 10^{-2}i$

硫酸铵吸湿形成的气溶胶粒子的等效吸收系数与氯化钠的变化规律相似。如表 3 所示, 折射率虚部从 0.55 μm 时的 2.901×10^{-8} 到 10.6 μm 时的 6.718×10^{-2} , 变化了 6 个量级, 引起等效吸收系数从 10^{-13} 变化到 10^{-8} 量级。3.75 μm 和 10.6 μm 时的折射率虚部相差不大, 对应的等效吸收系数也相差不大, 1.06 μm 和 3.75 μm 折射率虚部相差较大, 对应的等效吸收系数相差 3 个量级。

6 误差的分析

在上面的计算中, 假定粒子吸湿后, 体积为干粒子的体积与水的体积之和。这时水的体积取下限为 $\frac{4}{3}\pi(b^3 - a^3)$, 粒子的饱和时间最小, 由(4)式给出。水的体积上限为 $\frac{4}{3}\pi b^3$, 即认为粒子吸湿后, 总体积

增幅也较大。氯化钠吸湿后的折射率虚部相差越大, 等效吸收系数也相差越大。如 1.06 μm 和 3.75 μm 的波长对应的折射率虚部分别为 3.555×10^{-6} 和 2.959×10^{-3} , 相差 3 个量级, 对应的等效吸收系数差别较大, 在 1 μs 时, 等效吸收系数分别为 $7.25 \times 10^{-12} \text{cm}^{-1}$ 和 $1.51 \times 10^{-9} \text{cm}^{-1}$, 相差 3 个量级; 在 1 s 时等效吸收系数分别为 $3.64 \times 10^{-11} \text{cm}^{-1}$ 和 $7.31 \times 10^{-9} \text{cm}^{-1}$, 相差 2 个量级。3.75 μm 和 10.6 μm 对应的折射率虚部相差 1 个量级, 所以对应的等效吸收系数相差较小, 相差 1 个量级。

为水的体积, 这时饱和时间最大, 为

$$\tau'(a, b) = r^2 \rho_p c_p / (3k_a) = (\rho_0 c_0 a^3 + \rho_w c_w b^3) / (3k_a \times b). \quad (11)$$

由于溶解, 水实际的体积介于上、下限之间。由(4), (9)和(11)式, 随着水的体积的增加, 饱和时间增大, 等效吸收系数减小。实际的等效吸收系数在两个极限情况下对应的等效吸收系数之间。

取相对湿度为 90%, 波长为 10.6 μm , 粒子谱分布同样选择 Junge 分布, $\tau(a, b)$ 对应的等效吸收系数为 $\alpha_{\text{eff}}(t)$, $\tau'(a, b)$ 对应的等效吸收系数为 τ'_{eff} , 相对误差定义为 $\chi = [\alpha_{\text{eff}}(t) - \tau'_{\text{eff}}] / \alpha'_{\text{eff}}(t)$ 。

图 5 为氯化钠和硫酸铵吸湿后两种极限情况下的等效吸收系数的相对误差随时间的变化关系。两种粒子的相对误差最大值都出现在初始时刻, 在 1 μs 时分别为 3.62% 和 7.07%, 随着时间增加, 相对误差逐渐减小; 在 0.1 s 时, 相对误差分别仅为

0.0974%和0.147%。实际的等效吸收系数在上、下限之间,所以1 μs 时实际的等效吸收系数与计算得到的等效吸收系数的相对误差分别小于3.62%和7.07%,随着时间增加,实际值与计算值的相对误差逐渐减小。

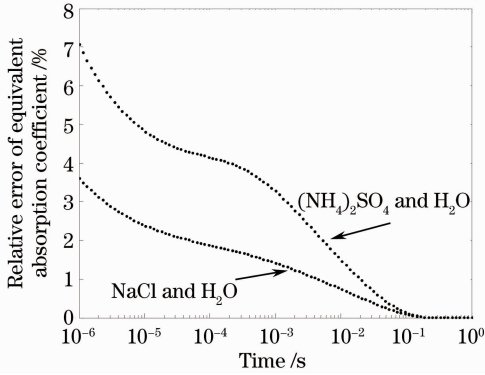


图5 等效吸收系数的相对误差

Fig. 5 Relative errors of equivalent absorption coefficient

7 结 论

以海洋型和大陆型气溶胶中两种典型的吸湿性气溶胶组分(氯化钠和硫酸铵)为例,计算分析了吸湿性气溶胶粒子的等效吸收系数随时间的变化规律,着重分析了忽略粒子自身吸收对等效吸收系数的影响,以及不同波长、不同相对湿度对等效吸收系数含时变化规律的影响,并分析了计算结果的相对误差。然而粒子谱分布、粒子组分和混合状态等条件也会对气溶胶粒子的等效吸收系数造成一定的影响,为了全面了解气溶胶粒子的光学性质以及其对激光大气传输效应的影响,下一步将深入探讨这些因素对气溶胶粒子等效吸收系数的影响。

参 考 文 献

1 C. H. Chan. Equivalent absorption for thermal blooming due to aerosols [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(11): 628~630

2 Liu Yanyan, Wang Junbo, Le Shixiao *et al.*. Equivalent absorption of aerosol heated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, **5**(4): 540~544
刘炎焱, 王俊波, 乐时晓等. 光致气溶胶粒子加热的等效吸收系数[J]. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(4): 540~544

3 Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Atmospheric Aerosol Tutorial[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 1~65
张澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 1~65

4 Bai Lu, Tang Shuangqing, Wu Zhensen *et al.*. Transmission characteristic of external mixture of aerosol from ultraviolet to visible-light band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (8): 2175~2179
白 璐, 汤双庆, 吴振森等. 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2175~2179

5 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101002
郝增周, 龚 芳, 潘德炉等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101002

6 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101005
王家成, 乔延利, 杨世植等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1101005

7 Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. Influence of relative humidity on short-wave radiative properties of atmospheric aerosol particles[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 1999, **23** (2): 239~247
杨 军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响[J]. *大气科学*, 1999, **23**(2): 239~247

8 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: John Wiley, 1983. 181~185

9 H. C. van de Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: Dover Publication, 1981. 267~297

10 Christian Mätzler. Matlab functions for Mie scattering and absorption [R]. Institut für Angewandte Physik Research Report, 2002

11 G. Hänel. The physical chemistry of atmospheric particles[C]. *Hygroscopic Aerosols*, 1984. 1~20

12 G. Hänel. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air [J]. *Advances in Geophysics*, 1976, **19**: 73~188

13 F. Kasten. Visibility forecast in the phase of pre-condensation [J]. *Tellus*, 1969, **21**(5): 631~635

14 A. Goroch, S. Burk, K. L. Davidson. Stability effects on aerosol size and height distributions [J]. *Tellus*, 1980, **32**(3): 245~250

栏目编辑: 王晓琰