

# 大气气溶胶相对湿度影响碳黑团聚物辐射特性分析

殷金英, 郑宇浓, 杨洪艳, 周 真

哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 基于分形理论生成了高、低相对湿度下典型形态包覆水层碳黑团聚物, 分析了大气气溶胶相对湿度与碳黑粒子等效折射率和半径之间的关系, 得出包覆水层碳黑粒子半径随相对湿度的增加而显著增大的结论。采用 Coat-Mie 理论验证了利用 Maxwell-Garnett(MG)理论结合 T 矩阵(MG-T)的方法计算包覆水层碳黑粒子辐射特性的准确性, 且采用 Coat-Mie 理论和 MG-T 方法得到的计算结果吻合较好。利用 MG-T 方法计算了两种典型形态包覆水层碳黑团聚物红外波段的辐射特性, 结果表明, 随着相对湿度增大, 密实状团聚物的辐射特性值远大于枝节状团聚物的辐射特性值; 当空气湿度大于 50% 时, 水层厚度的增加使得碳黑团聚物粒子半径增大, 从而两形态碳黑团聚物辐射特性值均显著增大, 碳黑粒子半径的增大是使得其团聚物辐射特性显著增大的主要因素。

**关键词** 大气光学; 辐射特性; Maxwell-Garnett 理论; 碳黑团聚物; 相对湿度

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0529001

## Effect of Relative Humidity of Atmospheric Aerosol on Radiation Properties of Soot Aggregate

Yin Jinying, Zheng Yunong, Yang Hongyan, Zhou Zhen

*School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering,  
Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China*

**Abstract** According to the fractal theory, soot aggregates which have typical morphologies coated with water are generated in high and low relative humidity conditions. The relationships among relative humidity of atmospheric aerosol, equivalent refractive index and radius of soot particle are investigated. It is found that the radius of soot particle coated with water remarkably increases with the increase of relative humidity. The radiation properties of soot particles are calculated by means of Maxwell-Garnett (MG) theory and T matrix (MG-T) method, while the accuracy of the calculation results is verified by Coat-Mie theory. The calculation results of the radiation properties of soot particles calculated by MG-T method are in well agreement with that by Coat-Mie theory. The radiation properties of two kinds of soot aggregates in infrared wavelength are calculated by MG-T method. The results reveal that the values of radiation properties of packed soot aggregates are much larger than those of the branched soot aggregates with the increasing relative humidity. When the relative humidity is larger than 50%, the values of the radiation properties of the two kinds of soot aggregates increase due to the increase of water layer thickness and radius of soot aggregates. It is confirmed that the radius of soot aggregates plays a critical role in determining the radiation properties for soot aggregates.

**Key words** atmospheric optics; radiation property; Maxwell-Garnett theory; soot aggregates; relative humidity

**OCIS codes** 010.1290; 290.1310; 290.4210; 290.5850

## 1 引 言

大气中的碳黑粒子往往聚集成团聚物, 碳黑团聚物是大气气溶胶中一种重要的组成部分, 是由于含碳物质的不完全燃烧而排放出来的无定型碳质, 在可见光到红外光波段对太阳辐射均有强烈的吸收作用<sup>[1-2]</sup>。碳黑团聚物通过吸收太阳光和大气辐射影响地气系统的能量收支, 造成温室效应, 进而影响气候<sup>[3]</sup>。碳黑团聚物的光谱特性是影响其散射能力的主要因素。然而, 大气中湿空气直接影响碳黑团聚物的形态结构, 进而影

**收稿日期:** 2016-12-07; **收到修改稿日期:** 2017-01-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(51206038)

**作者简介:** 殷金英(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事粒子辐射特性方面的研究。E-mail: jinying\_yin@126.com

响其辐射特性。对空气湿度影响碳黑团聚物辐射特性的分析可以为大气环境监测<sup>[4]</sup>、大气红外辐射传输<sup>[5]</sup>、气候预测<sup>[6]</sup>和卫星遥感<sup>[7]</sup>等技术领域提供辐射特性计算的理论基础。

目前,国内外研究工作者对碳黑团聚物的辐射特性进行了广泛研究,但大部分研究人员仅对干燥环境中碳黑粒子的辐射特性进行了分析<sup>[8-11]</sup>,并没有考虑相对湿度( $R_H$ )对碳黑团聚物辐射特性的影响。实际大气并非理想干燥气体,当相对湿度高于60%时,颗粒物的基本物理状态发生明显改变,其中颗粒物粒径和形状变化尤为明显,湿空气中水蒸汽包覆在碳黑颗粒上使得粒径增大,其颗粒物的形状也由原来的不规则几何体转变为近似球形<sup>[12-15]</sup>。在湿空气的影响下,碳黑粒径和团聚物形态发生变化,同时吸附在碳黑粒子外的水层会改变团聚物的光学常数,进而影响其辐射特性。关于大气气溶胶中空气湿度对其辐射特性的影响,国内外已有部分学者进行了研究。田文寿等<sup>[16]</sup>讨论了大气湿度对气溶胶等效折射率的影响,发现湿气溶胶等效折射率虚部随相对湿度的增大而显著增大。杨军等<sup>[17]</sup>提出了相对湿度在65%~95%之间变化时气溶胶湿粒子半径与干粒子半径的关系,指出相对湿度对单个气溶胶粒子粒径的影响,并指出若不考虑相对湿度的影响将会给计算结果带来较大的误差。黄红莲等<sup>[18]</sup>基于米散射理论和分层球模型计算了海盐和水内混合组成气溶胶粒子的消光特性,分析了用等效折射率描述内混合气溶胶系统的适用性。Freney等<sup>[19]</sup>提出内部混合气溶胶粒子包含固体和液体,并采用离散偶极子近似方法(DDA)研究了在相对湿度影响下气溶胶粒子的光散射特性。然而,目前对在大气湿度的影响下碳黑团聚物辐射特性的研究较少。Fan等<sup>[20]</sup>研究了波长为1.6  $\mu\text{m}$ 时大气湿度对碳黑团聚物的散射特性的影响,研究结果表明大气湿度对碳黑团聚物散射特性具有显著影响。因此,大气湿度会对碳黑团聚物粒径、团聚物形态和等效折射率产生影响,进而影响其辐射特性,相关分析仍需要进一步研究。

根据分形理论生成了高、低相对湿度下典型包覆水层碳黑团聚物,分析了相对湿度对包覆水层碳黑粒子粒径的影响。以包覆水层碳黑粒子为例,利用Maxwell-Garnett(MG)理论给出了不同相对湿度包覆水层碳黑粒子的等效折射率,同时利用Coat-Mie理论验证了MG理论结合T矩阵(MG-T)的方法计算包覆水层碳黑粒子辐射特性的准确性,进而利用MG-T方法计算了不同相对湿度下包覆水层碳黑团聚物的吸收、散射和消光截面,深入分析了大气气溶胶相对湿度对包覆水层碳黑团聚物辐射特性的影响规律。

## 2 包覆水层碳黑团聚物辐射特性计算方法

碳黑团聚物的生成采用分形理论的团簇-团簇聚集(CCA)模型<sup>[21]</sup>,该模型粒子数目与分型维数之间的关系为

$$N = k_f (R_g/r_p)^{D_f}, \quad (1)$$

式中 $k_f$ 为前因子, $R_g$ 为回转半径, $r_p$ 为碳黑单体半径, $D_f$ 为碳黑团聚物的分形维数。包覆水层碳黑粒子的等效介电常数采用MG理论进行计算<sup>[22]</sup>,再采用T矩阵法计算包覆水层碳黑团聚物的辐射特性。T矩阵法最初被用于计算单个粒子的散射性质,而对于多个粒子的散射特性,根据Maxwell方程和边界条件,散射场系数 $p_{mn}$ 、 $q_{mn}$ 与入射场系数 $a_{mn}$ 、 $b_{mn}$ 的关系可以通过转换矩阵表示为<sup>[23]</sup>

$$p_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mnm'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mnm'n'}^{12} b_{m'n'}), \quad (2)$$

$$q_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mnm'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mnm'n'}^{22} b_{m'n'}), \quad (3)$$

式中 $T_{mnm'n'}^{11}$ 、 $T_{mnm'n'}^{12}$ 、 $T_{mnm'n'}^{21}$ 和 $T_{mnm'n'}^{22}$ 为矩阵转换因子, $m$ 和 $n$ 为系数展开的级数。(2)、(3)式可以由T矩阵方程表示为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $p$ 和 $q$ 为散射场矩阵单元, $a$ 和 $b$ 为入射场矩阵单元, $T^{11}$ 、 $T^{12}$ 、 $T^{21}$ 和 $T^{22}$ 为 $\mathbf{T}$ 矩阵单元。入射场系数 $a_{mn}$ 和 $b_{mn}$ 可以利用散射体封闭解析表达式获得,如果散射单体的T矩阵已知,则可通过计算得到散射场系数 $p_{mn}$ 和 $q_{mn}$ ,进而由(4)式得到碳黑团聚物的T矩阵。碳黑团聚物的消光截面 $C_{\text{ext}}$ 、散射截面 $C_{\text{scat}}$ 和吸收截面 $C_{\text{abs}}$ 可分别表示为<sup>[23]</sup>

$$C_{\text{ext}} = -\frac{2\pi}{k^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (T_{nmn}^{11} + T_{nmn}^{22}), \quad (5)$$

$$C_{\text{sca}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \sum_{m'=-n'}^{n'} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |T_{mm'n'ij}|^2, \quad (6)$$

$$C_{\text{abs}} = C_{\text{ext}} - C_{\text{sca}}, \quad (7)$$

式中  $k$  为光场波数,  $\text{Re}$  为取实部运算。碳黑粒子消光因子、散射因子和吸收因子表达式为<sup>[23]</sup>

$$Q_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}}{G}, \quad Q_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{G}, \quad Q_{\text{abs}} = \frac{C_{\text{abs}}}{G}, \quad (8)$$

式中  $G$  为碳黑粒子有效截面积。

### 3 相对湿度对碳黑粒子及团聚物辐射特性的影响

#### 3.1 相对湿度对碳黑粒径和等效折射率的影响

在干燥空气中,碳黑粒子的光学常数依赖于单体成分。当空气湿度较大时,碳黑粒子会吸附水蒸气,形成外表面附着水层的碳黑粒子,含水碳黑粒子的光学常数不能简单等效为碳黑光学常数。同时,随着大气气溶胶相对湿度的增加,碳黑团聚物单体会形成以碳黑粒子为核的包覆水层结构,并且水层的厚度  $H$  随相对湿度  $R_H$  的变化关系遵循

$$r_{\text{coat}}/r_{\text{core}} = (1 - R_H/100)^{-0.25}, \quad (9)$$

式中  $r_{\text{coat}}$  为包覆水层湿粒子半径,  $r_{\text{core}}$  为干粒子内核半径。MG 理论中碳黑粒子的体积分数  $f = (r_{\text{core}}/r_{\text{coat}})^3$ <sup>[20]</sup>。表 1 为不同  $R_H$  下单个包覆水层碳黑粒子等效折射率  $n_{\text{equ}}$  和  $r_{\text{coat}}$  与  $r_{\text{core}}$  之比,其中碳黑粒子内核半径  $r_{\text{soot}} = 15 \text{ nm}$ , 波长  $\lambda = 2 \text{ }\mu\text{m}$  时,对应波长的碳黑粒子和水的复折射率  $n_{\text{soot}}$  和  $n_{\text{water}}$  分别为  $1.8+0.49i$  和  $1.42+8.0 \times 10^{-3}i$ <sup>[24]</sup>。由表 1 可知,随着相对湿度的增加,包覆水层碳黑粒子中水的含量增大,其等效折射率逐渐减小。然而,随着相对湿度的增加,包覆水层单个碳黑粒子的粒径增加。当相对湿度  $R_H > 50\%$  时,包覆水层单个碳黑粒子的粒径随  $R_H$  的增加显著增大,当相对湿度超过  $95\%$  时,粒径增加 1 倍。

表 1 包覆水层碳黑粒子的  $n_{\text{equ}}$  和  $r_{\text{coat}}/r_{\text{core}}$   
Table 1  $n_{\text{equ}}$  and  $r_{\text{coat}}/r_{\text{core}}$  of soot particle coated with water layer

$R_H / \%$	$n_{\text{equ}}$	$r_{\text{coat}}/r_{\text{core}}$
0	1.80+0.49i	1.00
50	1.64+0.29i	1.19
60	1.61+0.25i	1.25
70	1.57+0.20i	1.35
80	1.53+0.15i	1.49
90	1.48+0.09i	1.78
95	1.46+0.05i	2.11

#### 3.2 相对湿度对碳黑粒子辐射特性的影响

对于包覆水层的碳黑粒子单体,采用 Coat-Mie 理论<sup>[25]</sup>和 MG-T 方法分别计算了辐射特性随波长和相对湿度的变化情况。图 1 为  $r_{\text{soot}}$  分别为 15, 40, 80 nm 时,  $r_{\text{coat}}/r_{\text{core}} = 1.25$  时包覆水层单个碳黑粒子的辐射特性随波长的变化,对应波长的碳黑粒子和水的复折射率取自文献[24]中的数据。由图 1 中两种粒径包覆水层碳黑粒子的辐射特性曲线可知,随入射波长的增加,单个碳黑粒子的吸收因子、消光因子和散射因子均逐渐减小,采用 Coat-Mie 理论和 MG-T 方法计算得到的结果吻合较好。在短波长范围  $0.2 \sim 0.3 \text{ }\mu\text{m}$  内,碳黑粒子内核  $r_{\text{soot}} = 80 \text{ nm}$  时两种方法计算得到的包覆水层粒子辐射特性存在较大偏差,而整个波段内 MG-T 方法相对于采用 Coat-Mie 理论计算得到的消光因子、吸收因子和散射因子的相对偏差统计平均值分别为  $9.3\%$ ,  $8.1\%$  和  $6.8\%$ ;碳黑粒子内核  $r_{\text{soot}} = 40 \text{ nm}$  时的包覆水层粒子的消光因子、吸收因子和散射因子的相对偏差统计平均值分别为  $8.5\%$ ,  $7.9\%$  和  $7.3\%$ ;碳黑粒子内核  $r_{\text{soot}} = 15 \text{ nm}$

时的包覆水层粒子消光因子、吸收因子和散射因子相对偏差统计平均值分别为 7.3%, 7.0% 和 5.8%。采用 MG 理论计算包覆水层碳黑粒子等效折射率时存在一定偏差, 直接导致 MG-T 方法计算的包覆水层碳黑粒子辐射特性存在偏差, 随着包覆水层碳黑粒子粒径的增大, 偏差逐渐增大, 最大偏差为 9.3%。然而, 实际的碳黑团聚物的粒子半径为 15 nm<sup>[26]</sup>, 因此采用 MG-T 方法计算碳黑团聚物辐射特性的相对偏差影响小于 7.3%。

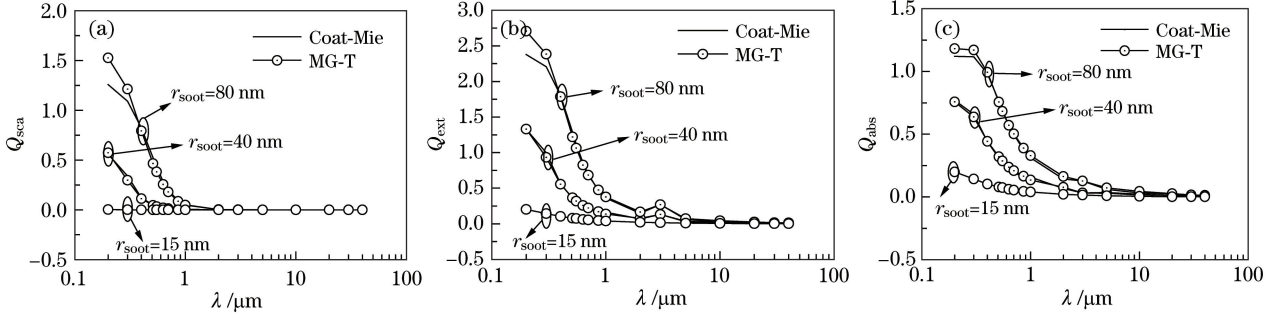


图 1 包覆水层单个碳黑粒子的(a)散射因子,(b)消光因子和(c)吸收因子随波长的变化  
Fig. 1 Radiation properties of single soot particle coated with water layer versus wavelength.  
(a) Scattering index; (b) extinction index; (c) absorption index

图 2 为波长为 1.5 μm 和 2 μm,  $r_{\text{soot}} = 15 \text{ nm}$  时, 在尺度参数  $x_p = 2\pi r_p / \lambda = 0.063$  和  $x_p = 0.047$  条件下, 碳黑粒子单体在不同相对湿度下的辐射特性, 对应波长的复折射率分别为  $n_{\text{soot}} = 1.77 + 0.46i$ ,  $n_{\text{water}} = 1.51 + 2.3 \times 10^{-2}i$  和  $n_{\text{soot}} = 1.8 + 0.49i$ ,  $n_{\text{water}} = 1.42 + 8.0 \times 10^{-3}i$ <sup>[24]</sup>。由图 2 中两尺度参数包覆水层碳黑粒子的辐射特性曲线可知, 随相对湿度的增大, 碳黑粒子的散射因子缓慢增大, 吸收因子和消光因子变化不显著, 采用 Coat-Mie 理论和 MG-T 方法计算得到的结果吻合较好。采用 MG-T 方法和 Coat-Mie 理论计算得到两种尺度参数包覆水层碳黑粒子消光因子、吸收因子和散射因子的相对偏差统计平均值分别为 7.8%、7.77%、0.4% 以及 9.7%、9.7%、1.67%。

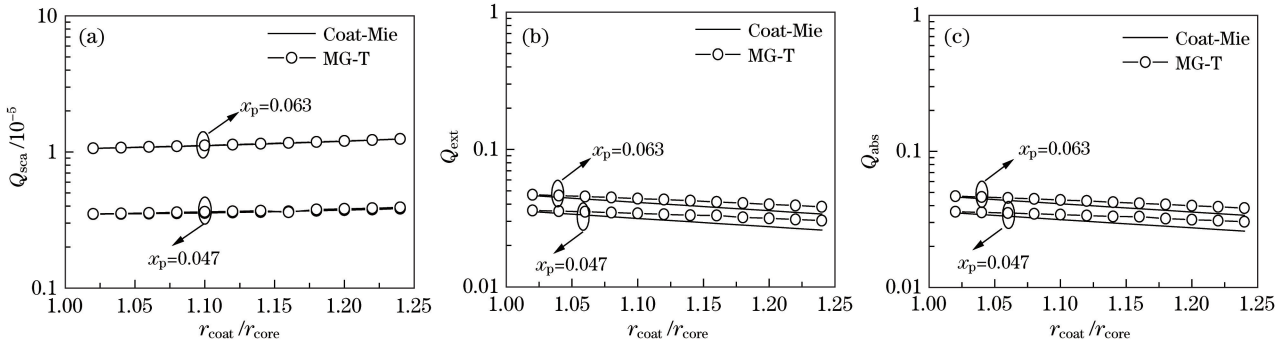


图 2 包覆水层单个碳黑粒子的(a)散射因子,(b)消光因子和(c)吸收因子随  $r_{\text{coat}}/r_{\text{core}}$  的变化  
Fig. 2 Radiation properties of single soot particle coated with water layer versus  $r_{\text{coat}}/r_{\text{core}}$ .  
(a) Scattering index; (b) extinction index; (c) absorption index

### 3.3 相对湿度对碳黑团聚物辐射特性的影响

在大气辐射传输中, 大气气溶胶相对湿度对碳黑团聚物辐射特性的影响不可忽视, 当相对湿度增加时, 吸水性碳黑单体包覆水层厚度增大, 碳黑团聚物由枝节状极易凝结成密实状团聚物, 形态发生了较大改变。图 3 为利用分形理论生成的典型高、低相对湿度下的包覆水层碳黑团聚物, 形态参数中分形维数和前向因子分别为  $D_f = 3.0, k_f = 2.0$  和  $D_f = 1.7, k_f = 1.3$ , 粒子数  $N = 200$ 。

为分析相对湿度对多个碳黑粒子团聚物辐射特性的影响, 采用 MG-T 方法分别计算了枝节状和密实状包覆水层碳黑团聚物的辐射特性, 粒子数  $N$  分别为 100, 200, 300 时的计算结果如图 4 所示。算例中枝节状团聚物形态参数中分形维数和前向因子为  $D_f = 1.7, k_f = 1.3$ , 密实状团聚物形态参数中分形维数和前向因子为  $D_f = 3.0, k_f = 2.0$ , 团聚物碳黑单体内核  $r_p = 15 \text{ nm}$ <sup>[26]</sup>。

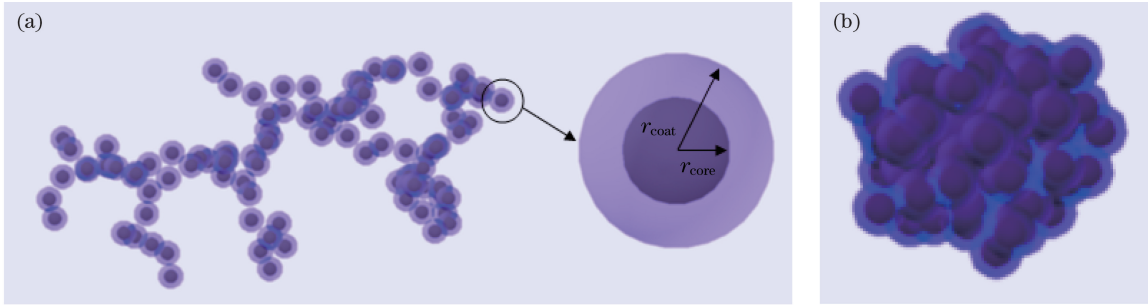


图 3 当  $N=200$  时包覆水层碳黑团聚物形态。(a)枝节状碳黑团聚物;(b)密实状碳黑团聚物  
Fig. 3 Morphology of soot agglomerates coated with water layer when  $N=200$ .  
(a) Branch soot agglomerate; (b) packed soot agglomerate

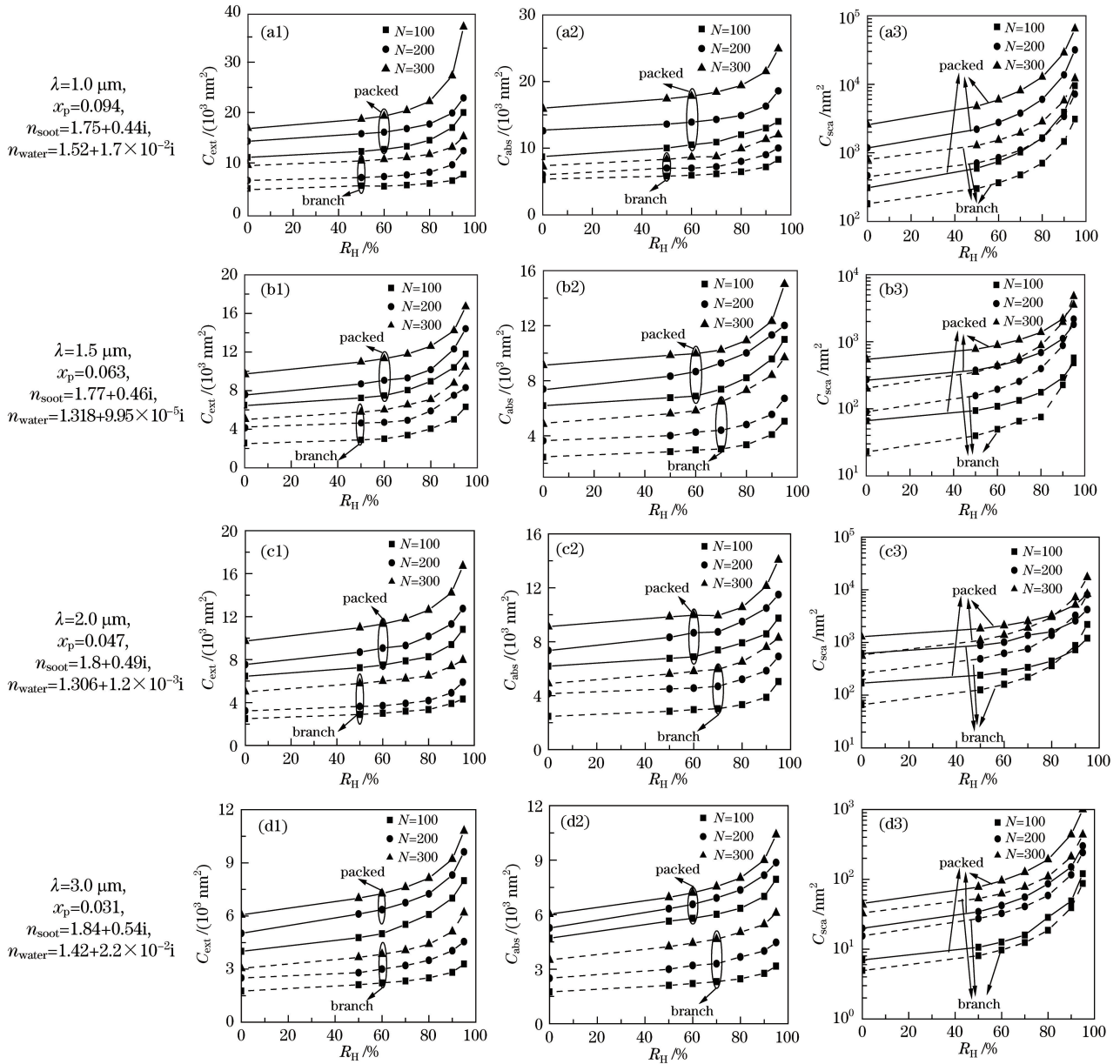


图 4 包覆水层碳黑团聚物的(a1)(b1)(c1)(d1)消光截面,(a2)(b2)(c2)(d2)吸收截面和  
(a3)(b3)(c3)(d3)散射截面随相对湿度的变化

Fig. 4 Radiation properties of single soot aggregate coated with water layer versus relative humidity.

(a1)(b1)(c1)(d1) Extinction cross-section; (a2)(b2)(c2)(d2) absorption cross-section; (a3)(b3)(c3)(d3) scattering cross-section

在红外波段,水为可视半透明材料,但由图4可知,两形态的消光截面、吸收截面、散射截面均随着大气气溶胶相对湿度的增加而增大、随粒子数的增加而增大,且密实状团聚物辐射特性值远大于枝节状团聚物辐射特性值。对应于3组粒子数、4种单体尺度参数的碳黑团聚物,当大气气溶胶相对湿度从50%增加至95%时,碳黑团聚物表面水层厚度增加,碳黑团聚物的消光截面、吸收截面、散射截面均有显著的增大趋势。当碳黑单体的尺度参数 $x_p=0.094$ 时,3组粒子数包覆水层碳黑团聚物消光截面最大增加64%、89.8%和120%,吸收截面最大增加60%、63%和66%,而散射截面最大增加至初始粒子的24,26,29倍;当碳黑单体的尺度参数 $x_p=0.063$ 时,3组粒子数包覆水层碳黑团聚物消光截面最大增加82.9%、96.4%和108%,吸收截面最大增加64%、83%和104%,散射截面最大增加至初始粒子的22,23,24倍;当碳黑单体的尺度参数 $x_p=0.047$ 时,3组粒子数包覆水层碳黑团聚物消光截面最大增加71.9%、73.4%和82.9%,吸收截面最大增加64%、68.8%和104%,而散射截面最大增加至初始粒子的28,30,32倍;当碳黑单体的尺度参数 $x_p=0.031$ 时,3组粒子数包覆水层碳黑团聚物消光截面最大增加78.2%、91.6%和103%,吸收截面最大增加73.5%、78.8%和81.1%,而散射截面最大增加至初始粒子的14,16,21倍。由于随相对湿度的增加碳黑团聚物单体粒子包覆水层增厚,包覆水层单体碳黑粒子的粒径增大,使得团聚物的辐射特性逐渐增大。虽然水层增厚使得包覆水层单体的等效折射率减小,进而减小团聚物的吸收和散射,但是水层厚度的增加使粒子半径增大,粒子半径增大导致团聚物辐射特性显著增大。因此,水层包覆引起粒径的增加是导致团聚物辐射特性显著增大的主要因素。

## 4 结 论

分析了大气气溶胶相对湿度与碳黑粒子等效折射率和粒径的关系,利用团聚物模型生成了典型的高、低相对湿度下包覆水层碳黑团聚物,利用Coat-Mie理论验证了MG-T方法计算包覆水层碳黑粒子的散射特性的准确性。计算结果表明采用MG-T方法和Coat-Mie理论得到的计算结果吻合较好。利用MG-T方法计算了两种典型形态的包覆水层碳黑团聚物在红外波段的辐射特性。结果表明,随着相对湿度增大,枝节状团聚物粒子聚集为密实状,形态变化影响了碳黑团聚物的辐射特性,密实状团聚物辐射特性远大于枝节状团聚物的辐射特性;当相对湿度大于50%时,两形态的辐射特性均随着大气气溶胶相对湿度的增加而显著增大。虽然相对湿度的增大使碳黑团聚物包覆水层增厚,水含量增大导致的团聚物等效折射率的减小直接削弱了团聚物的吸收和散射特性,但水层厚度的增加导致碳黑团聚物单体半径增大是使团聚物辐射特性显著增大的主要因素。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Light scattering analysis of an asymmetrical two-component aerosol particle model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1101001.  
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种非对称双成分气溶胶粒子模型的散射特性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1101001.
- [2] Li Shuwang, Shao Shiyong, Mei Haiping, *et al.* Simulation of atmospheric aerosol particle absorption characters based on photo-thermal interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101004.  
李树旺, 邵士勇, 梅海平, 等. 光热干涉法测量大气气溶胶粒子吸收特性的仿真分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101004.
- [3] Pan Xiaole. Observation study of atmospheric aerosol scattering characteristics as a function of relative humidity[D]. Beijing: China Observation Research Academy of Meteorological Sciences, 2007: 1-15.  
潘小乐. 相对湿度对气溶胶散射特性影响的观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007: 1-15.
- [4] Zong Pengcheng, Miao Qilong, Wei Xiaoyi. Effect of different mixing scenarios on aerosol radiative properties[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(5): 627-633.  
宗鹏程, 缪启龙, 魏晓奕. 不同混合方案对气溶胶辐射特性的影响[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 627-633.
- [5] Shiraiwa M, Kondo Y, Moteki N, *et al.* Evolution of mixing state of black carbon in polluted air from Tokyo[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(16): L16803.
- [6] Khalizov A F, Xue H, Wang L, *et al.* Enhanced light absorption and scattering by carbon soot aerosol internally mixed

- with sulfuric acid[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, 113(6): 1066-1074.
- [7] Ben-David A, Embury J F, Davidson C E. Radiative transfer model for aerosols in infrared wavelengths for passive remote sensing applications[J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6860-6875.
- [8] Lei Chengxin, Zhang Huaifu, Liu Hanfa. Study of extinction characteristics of solar radiation by soot aerosols[J]. Acta Optica Sinica. 2010, 30(12): 3373-3377.  
类成新, 张化福, 刘汉法. 煤烟气溶胶粒子对太阳辐射的消光特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3373-3377.
- [9] Lei Chengxin, Wu Zhensen, Feng Dongtai. Extinction characteristics of soot-silicate mixed agglomerates in random distribution[J]. Acta Optica Sinica. 2012, 32(4): 0429001.  
类成新, 吴振森, 冯东太. 随机分布黑碳硅酸盐混合凝聚粒子的消光特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0429001.
- [10] Liu F, Smallwood G J. Radiative properties of numerically generated fractal soot aggregates: the importance of configuration averaging[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 023308.
- [11] Wu Y, Cheng T H, Gu X F, *et al.* The single scattering properties of soot aggregates with concentric core-shell spherical monomers[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 135: 9-19.
- [12] Chen L Y, Jeng F T, Chen C C, *et al.* Hygroscopic behavior of atmospheric aerosol in Taipei[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(15): 2069-2075.
- [13] Prenni A J, DeMott P J, Kreidenweis S M. Water uptake of internally mixed particles containing ammonium sulfate and dicarboxylic acids[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(30): 4243-4251.
- [14] Brooks S D, DeMott P J, Kreidenweis S M. Water uptake by particles containing humic materials and mixtures of humic materials with ammonium sulfate[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(13): 1859-1868.
- [15] Hänel G. The size of atmospheric aerosol particles as a function of the relative humidity[J]. Beitragezur Physikder Atmosphaere, 1970, 43: 119-132.
- [16] Tian Wenshou, Huang Qian, Chen Changhe. Calculation of effective refractive index of atmospheric aerosol and the effect of relative humidity on it[J]. Environmental Science, 1996, 17(3): 31-34.  
田文寿, 黄倩, 陈长河. 大气气溶胶有效折射率的计算及相对湿度对它的影响[J]. 环境科学, 1996, 17(3): 31-34.
- [17] Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles[J]. Chinese Journal of 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.
- [18] Huang Honglian, Huang Yinbo, Han Yong, *et al.* Light extinction properties of marine aerosol particles in internal mixing state[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(3): 179-183.  
黄红莲, 黄印博, 韩永, 等. 内混合海洋型气溶胶粒子消光特性的分析[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 179-183.
- [19] Freney E J, Adachi K, Buseck P R. Internally mixed atmospheric aerosol particles: hygroscopic growth and light scattering[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D19210.
- [20] Fan M, Chen L, Xiong X, *et al.* Scattering properties of soot-containing particles and their impact by humidity in 1.6  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 134: 91-103.
- [21] Köylü Ü Ö, Faeth G M. Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times[J]. Combustion and Flame, 1992, 89(2): 140-156.
- [22] Yin Jinying, Liu Linhua. Analysis on feasibility of effective medium theory for radiative property of coal ash[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 50-54.  
殷金英, 刘林华. 煤灰辐射特性的有效介质理论适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 50-54.
- [23] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. Scattering, absorption, and emission of light by small particles[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [24] Cheng T H, Gu X F, Wu Y, *et al.* The optical properties of absorbing aerosols with fractal soot aggregates: implications for aerosol remote sensing[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 125: 93-104.
- [25] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley Interscience, 1998: 485-493.
- [26] Liu F, Smallwood G J. Radiative properties of numerically generated fractal soot aggregates: the importance of configuration averaging[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 023308.