

煤烟凝聚粒子对紫外光散射信道的影响研究

赵太飞^{1,2*}, 段钰桢¹, 李星善³, 官春杰¹

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000;

³湖北航天技术研究院总体设计所, 湖北 武汉 430040

摘要 针对具有不同粒子数量的煤烟气溶胶,使用团簇-团簇凝聚(CCA)模型形成4球、16球凝聚模型,并结合单个气溶胶粒子的吸湿性以及凝聚粒子的分形理论,生成了包覆水层的凝聚粒子模型。利用离散偶极子近似(DDA)方法仿真分析包覆水层的煤烟气溶胶的散射特性,仿真结果表明,相对湿度的增大对回转半径 ≤ 40 nm的凝聚粒子的消光因子、散射因子和吸收因子的影响最大。使用无线紫外光单次散射脉冲响应模型分析了凝聚粒子以及相对湿度对紫外光脉冲响应和路径损耗的影响,仿真结果表明,凝聚粒子和相对湿度对紫外光的通信影响集中在半径较小($r_0 \leq 40$ nm)的单体粒子上。当单体粒子半径一定时,组成凝聚体的粒子数量越大或者凝聚粒子相对湿度越大,脉冲响应就越大,路径损耗越小,紫外光接收端信号越好。

关键词 散射; 煤烟气溶胶; 相对湿度; 日盲紫外光; 光散射; 煤烟凝聚粒子; 离散偶极子近似

中图分类号 O648.18

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1529001

Effect of Soot Aggregates on Light Scattering in Ultraviolet Communication Channels

Zhao Taifei^{1,2*}, Duan Yuzhen¹, Li Xingshan³, Gong Chunjie¹

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks,
Xi'an, Shaanxi 710000, China;

³System Research Institute of Hubei Space Technology Academe, Wuhan, Hubei 430040, China

Abstract In this study, a cluster-cluster aggregation (CCA) model was used to form 4-sphere and 16-sphere aerosol aggregate models for different numbers of soot aerosol particles. By combining the hygroscopic nature of individual aerosol particles and the fractal theory of aerosol aggregates, a model for aerosol aggregates covering a water layer was generated. The scattering characteristics of soot in the coating layer were simulated and analyzed using the discrete dipole approximation (DDA). Simulation results show that an increase in relative humidity has the greatest influence on the extinction, scattering, and absorption of aerosol aggregates with a rotation radius ≤ 40 nm. Furthermore, the influence of aerosol aggregates and relative humidity on the UV pulse response and path loss was analyzed using a single-scattering pulse response model. The simulation results show that the effects of aerosol aggregates and relative humidity on UV communication are concentrated on monomer particles with smaller radii ($r_0 \leq 40$ nm). When the radius of the monomer particles is fixed, if the number of particles forming a cluster or the relative humidity of the aerosol aggregates increases, the pulse response is larger, the path loss is smaller, and the signal at the UV receiver is better.

Key words scattering; soot aerosol; relative humidity; solar blind ultraviolet light; light scattering; soot aggregates; discrete dipole approximation

OCIS codes 290.1310; 010.1310; 290.4020; 290.5850

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-04-02; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅服务地方专项计划(17JF024)、陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、西安市科学计划项目(CXY1835(4))、西安市碑林区科技计划项目(GX1921)

* E-mail: zhaotaifei@163.com

1 引 言

日盲紫外光是指波段为 200~280 nm 的紫外光^[1]。该波段光不受太阳背景光的干扰,具有抗干扰能力强、全天候工作等优势,因此在紫外光通信、探测方面有着越来越广泛的应用^[2-3]。紫外光作为载体在通过自由大气时,开放大气环境下的气溶胶粒子以及不同天气条件直接影响通信质量。煤烟气溶胶是一种典型的强吸收型气溶胶,往往以团聚物的状态出现在大气环境中。

在开放大气环境下,大气相对湿度是影响气溶胶光学特性最重要的因素。一般来讲,相对湿度大于 35% 时,气溶胶便可以吸附水汽增大;相对湿度大于 60% 时,气溶胶吸附水汽能力显著增强^[4]。1999 年,杨军等^[5]利用重庆实测资料计算并分析了气溶胶粒子的短波辐射特性与相对湿度及粒子数密度的关系,研究结果表明,当相对湿度在 65%~95% 范围内变化时,气溶胶粒子群体光学特性参数对入射光的影响在量级上与气溶胶粒子浓度成倍变化对入射光的影响相当。对煤烟气溶胶及其团聚物的吸湿增长特性的分析结果可以为大气环境监测^[6]、光通信^[7]、气溶胶粒子遥感反演^[8]等提供理论参考。

近年来,越来越多国内外学者开始着手研究气溶胶吸湿特性对光散射特性的影响。聂敏等^[9]采用波长为 0.5 μm 的光信号,研究了大气湿度对自由空间量子通信性能的影响;Freney 等^[10]利用透射电镜对内混合的非球形颗粒进行研究,结果表明,由一种或多种吸湿性化合物组成的内混合气溶胶粒子可以同时包含固体和液体成分,随着相对湿度的增大,气溶胶粒子通过固-液态转变改变粒子的形状、尺寸和折射率,进而影响其光散射特性。2014 年,Fan 等^[11]研究了入射光波长为 1.6 μm 时,相对湿度对

内混合粒子、煤烟团簇气溶胶以及半外部混合物的影响,结果发现相对湿度与分形对烟煤团簇气溶胶同等重要。2017 年,殷金英等^[12]采用 T 矩阵(MG-T)方法,分别计算了 1.0, 1.5, 2.0 μm 这 3 个红外波段下,两种典型包覆水层碳黑粒子的辐射特性。文献[11-12]的研究结果显示,相对湿度对团簇粒子的形态、回转半径以及复折射率产生较大影响,从而影响光散射特性。目前相对湿度的研究大多集中在单个气溶胶粒子,鲜有针对多球凝聚粒子光散射特性的分析。同时,关于湿度影响气溶胶光散射的研究大多是在可见光和红外波段,并没有考虑到紫外波段。而日盲紫外光由于其独特优势,在通信以及探测领域受到人们越来越多的关注,因此研究环境湿度条件下凝聚粒子对日盲紫外光散射特性的影响显得尤为重要。

本文使用团簇-团簇凝聚(CCA)方法形成 4 球和 16 球气溶胶凝聚粒子,使用离散偶极子近似(DDA)方法分析了不同湿度条件下 4 球和 16 球气溶胶凝聚粒子的散射特性,同时仿真分析不同的凝聚形态和相对湿度对日盲紫外光散射信道特性的影响。

2 相对湿度对煤烟气溶胶以及凝聚粒子的影响

2.1 相对湿度对单个粒子半径和复折射率的影响

随着相对湿度的增加,大气中的水蒸气凝结在煤烟气溶胶粒子上,改变了气溶胶粒子的半径和复折射率。气溶胶半径变化可表示为^[13]

$$R(f) = r_0 \cdot (1 - f)^{-(1/\mu)}, \quad (1)$$

式中: $R(f)$ 表示气溶胶粒子的半径; r_0 表示干气溶胶粒子半径; f 为相对湿度; μ 为常数因子^[14]。等效球形气溶胶粒子的复折射率与相对湿度的关系^[5]可表示为

$$m_{re} = m_{re,w} + (m_{re,0} - m_{re,w})[R(f)/r_0]^{-3}, \quad (2)$$

$$m_{im} = (m_{re}^2 + 2) \cdot \left\{ \frac{m_{im,w}}{m_{re,w}^2 + 2} + \left(\frac{m_{im,0}}{m_{re,0}^2 + 2} - \frac{m_{im,w}}{m_{re,w}^2 + 2} \right) [R(f)/r_0]^{-3} \right\}, \quad (3)$$

式中: m_{re} 、 m_{im} 分别表示复折射率的实部和虚部;下标 0 和 w 分别表示干气溶胶和水。表 1 为部分相对湿度环境下,包覆水层的煤烟气溶胶与干粒子的半径比值以及波长为 250 nm 的日盲紫外光的复折射率。

2.2 日盲紫外光非直视信道

紫外光在大气中经过单次散射或多次散射到达接收端,完成信息传输。由于单次散射可以描述紫

外光的信道特性,因此本研究选择紫外光单次散射信道模型。图 1 所示为无线紫外光非直视(NLOS)单次散射信道模型,其中 r 为发射端与接收端间的距离, V 表示公共散射体, θ_s 为散射角, β_T 、 β_R 分别为发射端、接收端的仰角, θ_T 为发射端发散半角, θ_R 为接收视场半角, TX 和 RX 分别表示发射端和接收端。

表 1 包覆水层煤烟气溶胶的复折射率和 $R(f)/r_0$
Table 1 Complex refractive index of soot aerosol coated with water layer and $R(f)/r_0$

Relative humidity / %	Refractive index	$R(f) / r_0$
0	1.620+0.450i	1.000
30	1.564+0.430i	1.080
50	1.523+0.420i	1.171
70	1.476+0.407i	1.312
90	1.416+0.390i	1.688
95	1.396+0.384i	1.976

发射端发送一个脉冲信号,其脉冲信号经过信道到达接收端,接收端接收到的波形即为信道脉冲响应,可以用来分析无线紫外光非直视通信的接收

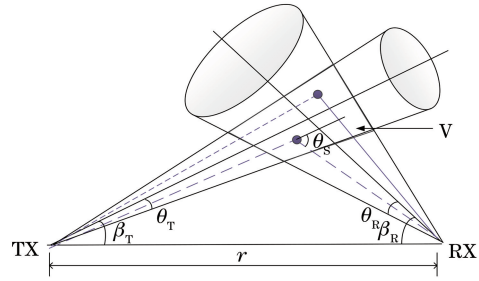


图 1 无线紫外光非直视单次散射通信模型

Fig. 1 Wireless UV NLOS single-scatter communication model

信号特性。结合椭球坐标系,信道脉冲响应 $E(\xi)^{[15]}$ 可以表示为

$$E(\xi) = \begin{cases} 0 & , \xi < \xi_{\min} \\ \frac{E_T c k_s \exp(-k_c r \xi)}{2\pi \Omega_i r^2} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \frac{2g[\varphi_2(\xi, \eta)] P(\mu)}{\xi^2 - \eta^2} d\eta, & \xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} \\ 0 & , \xi > \xi_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ξ 为椭球坐标系的径向坐标; E_T 为发射端能量; c 为光速; k_s 为凝聚粒子的散射系数; k_c 为凝聚粒子的消光系数; Ω_i 为发射端光束立体角; η_1 和 η_2 为角坐标; g 为与系统参数有关的物理量; φ_2 为方位角; P 为散射相函数; η 为角坐标。将 $\xi = ct/r$ (t 为时间) 代入(4)式得到单位脉冲响应,由路径损耗的定义式可计算得到路径损耗。本次仿真用到的部分仿真参数如下: $\beta_T = \beta_R = 60^\circ$, $\theta_T = 15^\circ$, $\theta_R = 30^\circ$ 。

2.3 煤烟凝聚粒子模型

日盲紫外光通过气溶胶粒子的散射实现非直视通信,气溶胶的大小和形态、大气的温度和湿度会对紫外光的散射产生一定的影响,进而影响紫外光通信。本研究分析凝聚粒子以及相对湿度对紫外光非直视通信的影响。CCA模型是基于“分形生长”,以大气中的尘埃聚集或胶体粒子为背景的团簇模型^[16-17],可用于构建煤烟凝聚粒子,生成的凝聚粒子如图2所示。

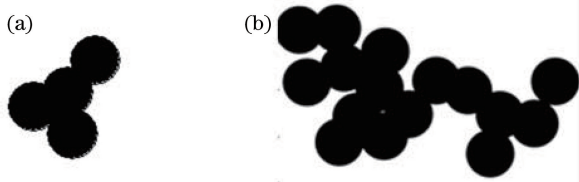


图 2 随机生成的煤烟凝聚粒子。(a) 4 球;(b) 16 球

Fig. 2 Random soot aggregates. (a) 4-sphere; (b) 16-sphere

凝聚后的粒子回转半径满足以下关系

$$N = k_f (R_g / r_p)^{D_f} \quad (5)$$

式中: N 为粒子数量; r_p 为单体粒子粒径; D_f 为分形维度; k_f 为分形因子; R_g 为粒子的回转半径。枝节状团聚物的参数选取为 $D_f = 1.74$, $k_f = 1.23$ ^[18]。当相对湿度增大时,单个气溶胶粒子吸水增大,凝聚粒子呈现图3所示的枝节状。

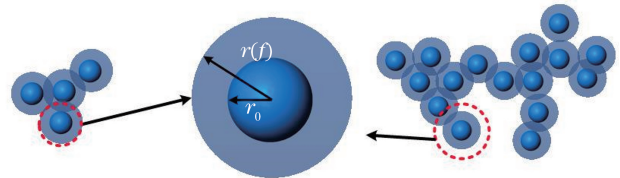


图 3 包覆水层的煤烟气溶胶

Fig. 3 Soot aerosol coated with water layer

2.4 煤烟凝聚粒子散射特性的计算方法

DDA(discrete dipole approximation)是一种可用于研究任意尺寸与形状的大气气溶胶光散射特性的方法,其基本思想是:近似连续散射体为有限的可极化点阵,其中每个点通过电场响应获得偶极矩,散射体上的所有点在远场的辐射综合构成散射场^[19]。

假设空间位置 \mathbf{r}_j ($j = 1, 2, \dots, N_0$, N_0 为偶极子的数量)处的电场强度为 \mathbf{E}_j ,极化率为 α_j ,则 \mathbf{r}_j 点的偶极距 \mathbf{P}_j 为

$$\mathbf{P}_j = \alpha_j \mathbf{E}_j = \alpha_j (\mathbf{E}_{\text{inc},j} - \sum_{l \neq j} \mathbf{A}_{jl} \mathbf{P}_l) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}_{\text{inc},j}$ 为入射电场; $-\mathbf{A}_{jl} \mathbf{P}_l$ 表示在 \mathbf{r}_l 处偶极子

\mathbf{P}_l 产生的电场; \mathbf{A}_{jl} 为 3×3 的矩阵^[19]。当 $j \neq l$ 时,

$$\mathbf{A}_{jl} = \frac{\exp(ikr_{jl})}{r_{jl}} \left[k^2 (\mathbf{r}_{jl} \mathbf{r}_{jl} - \mathbf{I}_3) + \frac{ikr_{jl} - 1}{r_{jl}^2} (3\mathbf{r}_{jl} \mathbf{r}_{jl} - \mathbf{I}_3) \right], \quad (7)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为入射光波长; \mathbf{I}_3 为 3×3 的单位矩阵; r_{jl} 表示点 r_j 、 r_l 之间距离; \mathbf{r}_{jl} 表示第 j 个和 l 个偶极子之间的单位矢量。

$$\mathbf{r}_{jl} = \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_l}{r_{jl}}, \quad (8)$$

$$r_{jl} = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_l|. \quad (9)$$

偶极矩满足

表 2 4 球凝聚粒子回转半径

Table 2 Radius of gyration of 4-sphere aggregates

Relative humidity	R_g/nm			
	$r_0 = 20 \text{ nm}$	$r_0 = 40 \text{ nm}$	$r_0 = 60 \text{ nm}$	$r_0 = 80 \text{ nm}$
0	39.4	78.8	118.2	157.6
30%	42.7	85.4	128.1	170.9
50%	46.1	92.2	138.3	184.4
70%	51.8	103.6	155.4	207.1
90%	66.5	132.9	199.4	265.9

表 3 16 球凝聚粒子回转半径

Table 3 Radius of gyration of 16-sphere aggregates

Relative humidity	R_g/nm			
	$r_0 = 20 \text{ nm}$	$r_0 = 40 \text{ nm}$	$r_0 = 60 \text{ nm}$	$r_0 = 80 \text{ nm}$
0	87.4	174.7	262.1	349.5
30%	94.8	189.5	284.3	379.0
50%	102.3	204.6	306.8	409.1
70%	114.9	229.7	344.6	459.5
90%	147.5	294.9	442.4	589.8

采用 DDA 方法对不同湿度条件下的煤烟凝聚粒子的散射特征量进行仿真,且为了保证结果的精

确性,最大尺度参数选到 25^[22],仿真结果如图 4 所示。

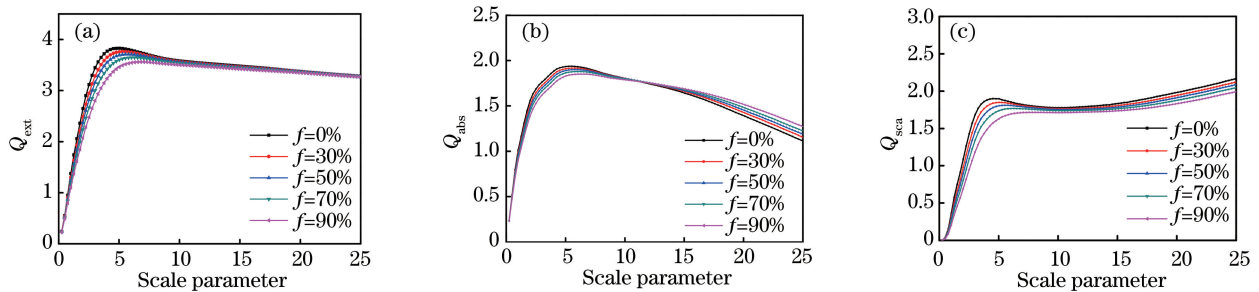


图 4 凝聚粒子散射特征量随尺度参数的变化。(a)消光因子;(b)吸收因子;(c)散射因子

Fig. 4 Variation of feature quantities of aerosol aggregates with scale parameters. (a) Extinction factor;

(b) absorption factor; (c) scattering factor

由图 4(a)可知,当尺度参数较小(回转半径约为 200 nm)时,消光因子随着尺度参数的增大而增

大,当消光因子超过一定值(临界值)时,消光因子随着尺度参数的增大而减小,且湿度越大,该临界值越

大。由图 4(b)可知,当尺度参数较小(回转半径约为 230 nm)时,吸收因子随着尺度参数的增大而增大,当吸收因子超过临界值时,吸收因子随着尺度参数的增大而减小,且湿度越大,临界值越大。由图 4(c)可知,当尺度参数较小(回转半径约为 200 nm)时,散射因子随着尺度参数的增大而增大,当尺度参数继续增大时,散射因子随着湿度的增大而减小(回转半径为 200 ~ 440 nm),当散射因子超过临界值时,散射因子随着尺度参数的增大而增大,且湿度越大,对应的临界值增大。

3.2 无线紫外光非直视脉冲响应

发射端发送一个脉冲信号,经过大气信道的散射和吸收作用到达接收端,接收端接收到的波形称

为信道脉冲响应。气溶胶粒径大小、凝聚粒子数量以及气溶胶的吸湿作用导致气溶胶的物理特性具有不确定性,从而导致接收端接收到的脉冲响应发生一定程度的变化。通过分析脉冲响应的变化即分析接收信号的特性,从而分析凝聚粒子以及相对湿度对无线紫外光散射信道特性的影响。

图 5 和图 6 所示分别为通信距离 $r=50\text{ m}$ 和 $r=100\text{ m}$ 时 4 球凝聚气溶胶的无线紫外光脉冲响应仿真结果。可以看到:当气溶胶单体较小时,紫外光脉冲响应随着相对湿度的增加而增大;单体粒子较大($r_0=80\text{ nm}$)时,增大相对湿度对紫外光脉冲响应几乎没有影响。仿真结果说明相对湿度对小粒子凝聚的影响更大。

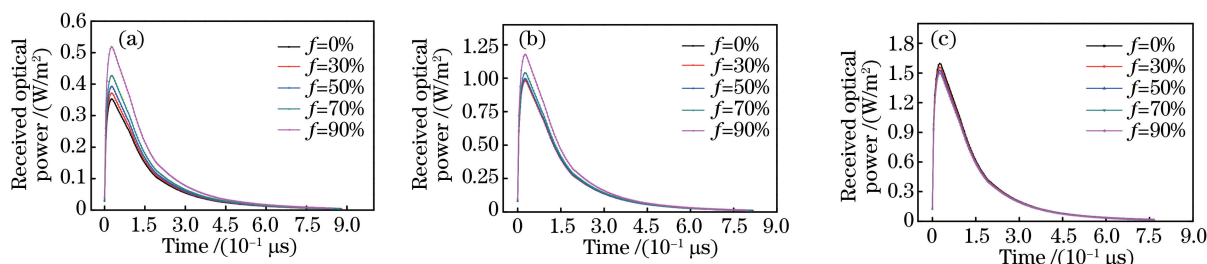


图 5 通信距离 $r=50\text{ m}$ 时具有不同单体粒子半径的 4 球凝聚粒子无线紫外光脉冲响应。

(a) $r_0=20\text{ nm}$; (b) $r_0=40\text{ nm}$; (c) $r_0=80\text{ nm}$

Fig. 5 Wireless ultraviolet pulse response of 4-sphere aggregates at communication distance $r=50\text{ m}$ with different monomer radii. (a) $r_0=20\text{ nm}$; (b) $r_0=40\text{ nm}$; (c) $r_0=80\text{ nm}$

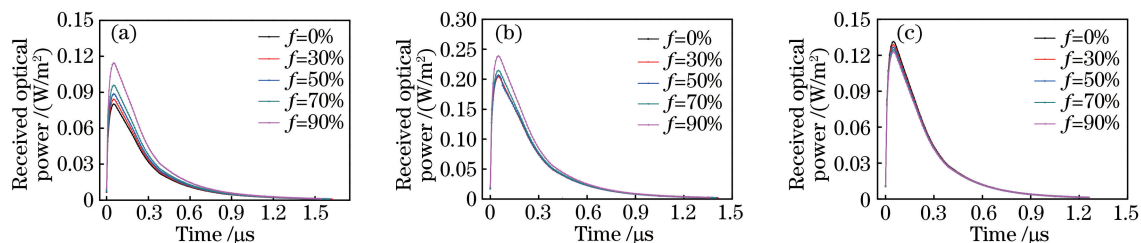


图 6 通信距离 $r=100\text{ m}$ 时不同单体粒子半径的 4 球凝聚粒子无线紫外光脉冲响应。

(a) $r_0=20\text{ nm}$; (b) $r_0=40\text{ nm}$; (c) $r_0=80\text{ nm}$

Fig. 6 Wireless ultraviolet pulse response of 4-sphere aggregates at communication distance $r=100\text{ m}$ with different monomer radii. (a) $r_0=20\text{ nm}$; (b) $r_0=40\text{ nm}$; (c) $r_0=80\text{ nm}$

图 7 和图 8 所示分别为通信距离 $r=50\text{ m}$ 和 $r=100\text{ m}$ 时的 16 球凝聚粒子无线紫外光脉冲响应。比较图 5~8 可以发现:当单体粒子半径较小时,16 球凝聚粒子在不同相对湿度条件下的脉冲响应总大于 4 球凝聚粒子;随着单体粒子半径逐渐增大,4 球凝聚粒子的脉冲响应逐渐增大,当单体粒子半径为 80 nm 时 4 球凝聚粒子的脉冲响应与 16 球凝聚粒子的脉冲响应相差很小。仿真结果说明,对于凝聚粒子来说,凝聚的粒子数量对无线紫外光的影响主要来自于较小的单体粒子;对于单体粒子较

大的气溶胶来说,凝聚的粒子数量对紫外光脉冲响应的影响较小。

采用接收到的信号脉冲响应的半峰全宽 (FWHM) 作为量化紫外信号的脉冲展宽的指标^[23-24]。图 9 和图 10 所示分别为 4 球、16 球凝聚粒子的脉冲响应半峰全宽仿真结果,可以发现,当凝聚粒子的单体粒子半径一定,通信距离一定时,随着相对湿度的增加,脉冲响应的半峰全宽保持恒定,且通信距离一定,气溶胶单体半径为 20 nm 时,半峰全宽最小。脉冲响应的半峰全宽随着单体半径的增

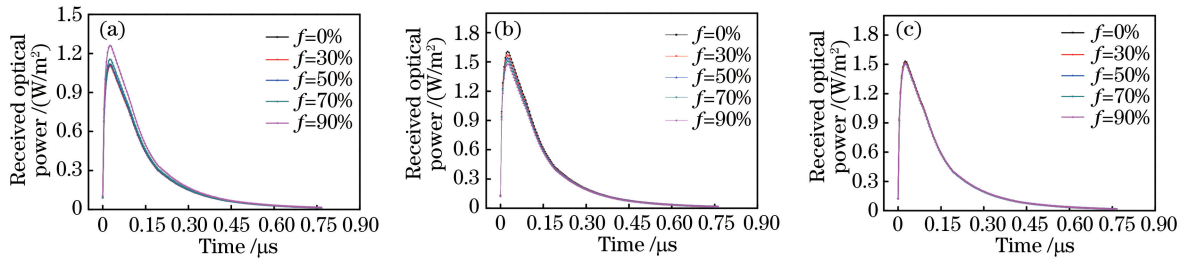


图 7 通信距离 $r=50$ m 时不同单体粒子半径的 16 球凝聚粒子无线紫外光脉冲响应。

(a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

Fig. 7 Wireless ultraviolet pulse response of 16-sphere aggregates at communication distance $r=50$ m with different monomer radii. (a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

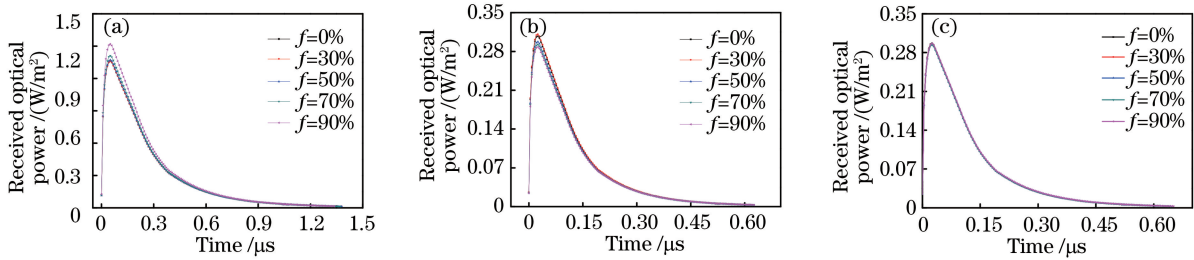


图 8 通信距离 $r=100$ m 时不同单体粒子半径的 16 球凝聚粒子无线紫外光脉冲响应。

(a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

Fig. 8 Wireless ultraviolet pulse response of 16-sphere aggregates at communication distance $r=100$ m with different monomer radii. (a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

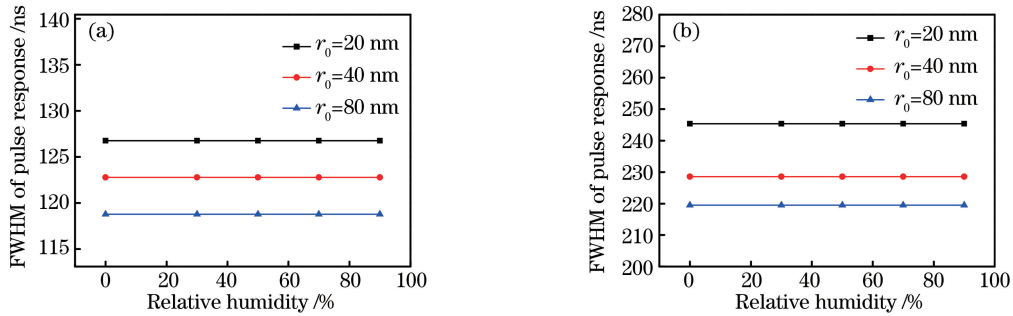


图 9 不同通信距离时 4 球凝聚粒子的脉冲响应半峰全宽。(a) $r=50$ m; (b) $r=100$ m

Fig. 9 FWHM of pulse response of 4-sphere aggregates with different communication distances.

(a) $r=50$ m; (b) $r=100$ m

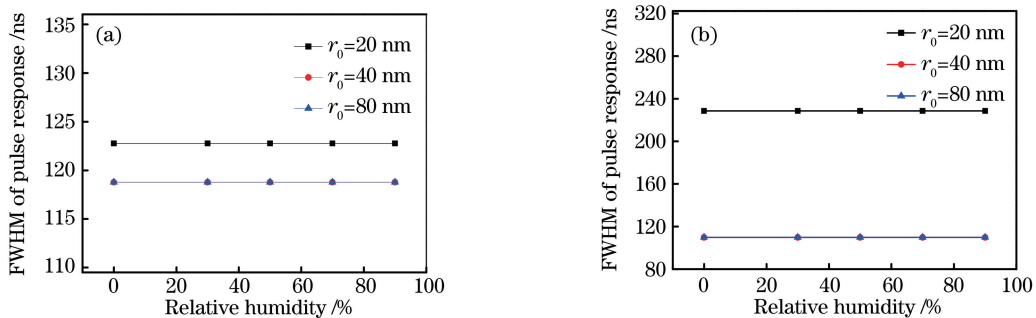


图 10 不同通信距离时 16 球凝聚粒子的脉冲响应半峰全宽。(a) $r=50$ m; (b) $r=100$ m

Fig. 10 FWHM of pulse response of 16-sphere aggregates with different communication distances.

(a) $r=50$ m; (b) $r=100$ m

大而减小,且通信距离越大,随着单体粒子半径的增大,半峰全宽的速率减小得越快。

3.3 无线紫外光非直视路径损耗

无线紫外光利用气溶胶散射实现信号传输,然而气溶胶的吸收作用会对紫外光散射传输造成一定的影响。本节对不同相对湿度条件下4球凝聚粒子

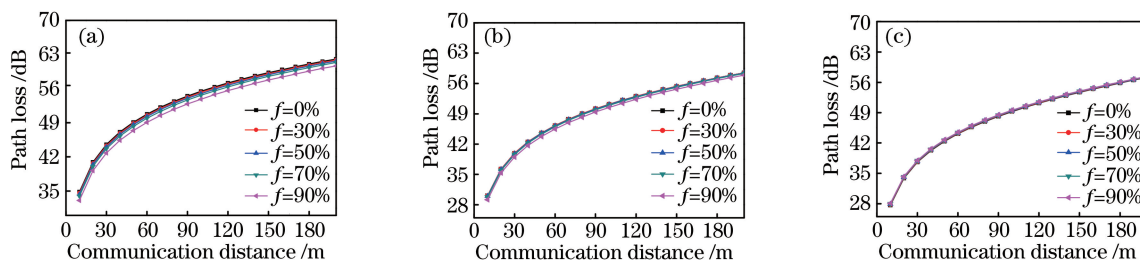


图 11 不同单体粒子半径时 4 球凝聚粒子的路径损耗。(a) $r_0=20$ nm;(b) $r_0=40$ nm;(c) $r_0=80$ nm

Fig. 11 Path loss of 4-sphere aggregates with different monomer radii.

(a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

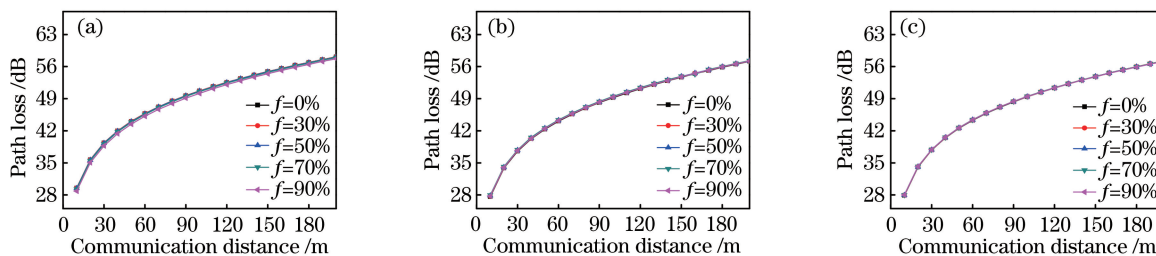


图 12 不同单体粒子半径时 16 球凝聚粒子的路径损耗。(a) $r_0=20$ nm;(b) $r_0=40$ nm;(c) $r_0=80$ nm

Fig. 12 Path loss of 16-sphere aggregates with different monomer radii.

(a) $r_0=20$ nm; (b) $r_0=40$ nm; (c) $r_0=80$ nm

从图 12 可以看出,对于 16 球凝聚粒子,相对湿度的增加对路径损耗的影响很小。比较图 11 和图 12 可以发现,单体粒子数量较少时,相对湿度对单体粒子半径较小的凝聚粒子的影响较大,且随着相对湿度的增加,路径损耗减小。单体粒子数量较大时(16 球凝聚气溶胶),相对湿度对凝聚粒子紫外光路径损耗的影响较小。

引入 $\pm 1\%$ 、 $\pm 3\%$ 和 $\pm 5\%$ 的误差^[25],分析不同相对湿度条件下不同单体粒子的光散射因子随光学参数引入误差的变化。结果表明,很小的引入误差对最终的光散射特性影响较大。当单体粒子半径为 20 nm,相对湿度由 0%增加到 90%时,消光因子、散射因子和吸收因子的平均误差由 2.23%、10.04%和 1.25%分别增加到 3.77%、12.85%和 2.21%。在单体粒子半径为 40 nm 的条件下,相对湿度由 0%增加到 70%时,消光因子、散射因子和吸收因子的平均误差由 4.88%、10.93%和 2.60%分别增加到 6.40%、10.84%和 3.24%;相对湿度由

和 16 球凝聚粒子的路径损耗进行仿真分析,结果如图 11 和图 12 所示。

从图 11 可以看出:当单体粒子较小时($r_0 < 40$ nm),路径损耗随着相对湿度的增加而减小;而当单体粒子为 80 nm 时,相对湿度对凝聚气溶胶的路径损耗几乎没有影响。

70%增加到 90%时,消光因子、散射因子和吸收因子的相对误差均减小,但减小幅度较小,平均相对误差分别为 5.72%、11.34%和 2.87%。在单体粒子半径增加到 60 nm 的条件下,相对湿度由 30%增大到 90%时,平均相对误差随着相对湿度的增加小幅减小,由 5.26%、9.63%和 2.49%分别小幅减小为 4.61%、8.05%和 2.15%。当单体粒子半径为 80 nm 时,与单体粒子半径为 60 nm 的情况类似,相对湿度由 30%增大到 90%时,消光因子、散射因子和吸收因子的平均相对误差分别由 4.22%、6.91%和 2.12%减小为 3.15%、5.13%和 1.54%。通过对平均相对误差的分析可以看出,当单体粒子半径 ≤ 40 nm 时,光散射误差随着湿度的增加而增大,但当单体粒子半径 ≥ 60 nm 时,光散射因子的计算误差随着相对湿度的增加而减小。

4 结 论

使用 CCA 模型建立 4 球、16 球凝聚粒子模型,

并考虑到气溶胶吸湿特性以及相对湿度条件对凝聚粒子的分形影响,建立了吸湿后的4球、16球凝聚粒子模型,并使用DDA方法研究了不同相对湿度条件下的消光因子、吸收因子和散射因子。建立了日盲紫外光非直视脉冲响应模型,对包覆水层的凝聚粒子的脉冲响应、脉冲响应半峰全宽和路径损耗进行仿真分析。比较4球凝聚粒子和16球凝聚粒子的仿真结果,发现单体粒子半径 $r_0 \leq 40$ nm时,16球凝聚气溶胶的脉冲响应总大于4球凝聚气溶胶的脉冲响应,脉冲响应半峰全宽总小于4球凝聚粒子的脉冲响应半峰全宽,路径损耗总小于4球气溶胶的路径损耗。单体粒子半径大于40 nm时,16球凝聚气溶胶和4球凝聚气溶胶的脉冲响应、半峰全宽和路径损耗均相差很小。

仿真结果表明:对于煤烟凝聚粒子,相对湿度对单体粒子粒径较小的凝聚粒子影响较大,且相对湿度越大,脉冲响应越大,脉冲响应半峰全宽越小,路径损耗越小,紫外光通信性能越好;单体粒子粒径一定($r_0 \leq 40$ nm)时,在相同相对湿度条件下,随着凝聚粒子数量的增加,脉冲响应增大,脉冲响应半峰全宽减小,路径损耗减小,紫外光通信性能变好。不同湿度下气溶胶粒子及凝聚粒子对日盲紫外光散射特性影响的结论可以为日盲紫外光通信以及气溶胶粒子、凝聚粒子反演方面的应用提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] Ke X Z, Deng L J. Wireless optical communication [M]. Beijing: Science Press, 2016: 153-155.
柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 153-155.
- [2] Wu T F, Ma J S, Yuan R Z, et al. Single-scatter model for short-range ultraviolet communication in a narrow beam case [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(3): 265-268.
- [3] Shi D C, Hua D X, Huang B, et al. Influence of ultraviolet wavelength selection on detection performance of all-day water vapor Raman lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1228003.
石冬晨, 华灯鑫, 黄波, 等. 紫外域波长选择对全天时水汽拉曼激光雷达探测性能的影响 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1228003.
- [4] Sun J Q. Relationship between visibility and relative humidity [J]. Journal of Meteorology, 1985, 43 (2): 104-108.
孙景群. 能见度与相对湿度的关系 [J]. 气象学报, 1985, 43(2): 104-108.
- [5] Yang J, Huang S H. 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, 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.
- [6] Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Full-time lidar system for ultraviolet high spectral Rayleigh temperature measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0601003.
邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统 [J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0601003.
- [7] Wu T F, Ma J S, Su P, et al. Modeling of short-range ultraviolet communication channel based on spherical coordinate system [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 242-245.
- [8] Chen L F, Li S S, Tao J H. Research and application of aerosol remote sensing quantitative inversion [M]. Beijing: Science Press, 2011.
陈良富, 李莘莘, 陶金花. 气溶胶遥感定量反演研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] Nie M, Ren J M, Yang G, et al. Influences of nonspherical aerosol particles and relative humidity of atmosphere on the performance of free space quantum communication [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65 (19): 190301.
聂敏, 任家明, 杨光, 等. 非球形气溶胶粒子及大气相对湿度对自由空间量子通信性能的影响 [J]. 物理学报, 2016, 65(19): 190301.
- [10] 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(D19): D19210.
- [11] Fan M, Chen L, Xiong X Z, et al. Scattering properties of soot-containing particles and their impact by humidity in 1.6 μm [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2014, 134: 91-103.
- [12] Yin J Y, Zheng Y N, Yang H Y, et al. Effect of relative humidity of atmospheric aerosol on radiation properties of soot aggregate [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0529001.
殷金英, 郑宇浓, 杨洪艳, 等. 大气气溶胶相对湿度影响碳黑团聚物辐射特性分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0529001.
- [13] Cai J, Gao J, Fan Z G, et al. The polarization characteristic research of aerosol particles under the humidity influence [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(5): 639-644.
蔡嘉, 高隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性 [J]. 发光学报, 2013, 34(5): 639-644.

- [14] Zhang S, Fu Q, Duan J, et al. Research of influence of humidity on transmission characteristics of polarized light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0511001.
张肃, 付强, 段锦, 等. 湿度对偏振光传输特性影响的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0511001.
- [15] Luettgen M R, Reilly D M, Shapiro J H. Non-line-of-sight single-scatter propagation model [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [16] Sun X, Wu Z Q, Huang Y. Fractal principle and application [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003: 124-127.
孙霞, 吴自勤, 黄响. 分形原理及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 124-127.
- [17] Draine B T, Flatau P J. User guide for the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.3 [EB/OL]. (2013-05-26) [2019-12-29]. <https://arxiv.org/abs/1305.6497>.
- [18] Brasil A M, Farias T L, Carvalho M G. Evaluation of the fractal properties of cluster-cluster aggregates [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, 33(5): 440-454.
- [19] Draine B T. The discrete dipole approximation for scattering calculations [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11: 1491-1499.
- [20] Shettle E P, Fenn R W. Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties [J]. *The Lancet*, 1987, 48(4068): 504.
- [21] Zhao T F, Leng Y X, Yang L Y, et al. Characteristics of ultraviolet light scattering by soot cluster particles [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050103.
赵太飞, 冷昱欣, 杨黎洋, 等. 紫外光在烟尘团簇粒子中的散射特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050103.
- [22] Zhang X L, Huang Y B, Rao R Z. Numerical analysis of scattering phase function for natural aerosol aggregates [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1675-1679.
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 团簇自然气溶胶散射相函数的数值分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7): 1675-1679.
- [23] Liao L C, Drost R J, Lang T, et al. Long-distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis: experimentation and modelling [J]. *IET Optoelectronics*, 2015, 9(5): 223-231.
- [24] Song P, Ke X Z, Xiong Y Y, et al. Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106004.
宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106004.
- [25] Zhao J. Research on fine inversion of aerosol optical and microphysical characteristics by lidar and photometer [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
赵静. 激光雷达与太阳光度计精细反演气溶胶光学及微物理特性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.