相对湿度和粒子形态对海盐气溶胶粒子散射特性的影响

张学海[1,2],戴聪明[2],张 鑫[1],魏合理[2*],朱希娟[3],马 静[3]

(1. 河南工业大学 信息科学与工程学院,河南 郑州 450001;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室,安徽 合肥 230031;
3. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室,北京 100854)

摘 要:根据海盐粒子在不同相对湿度条件下的不同形态,分别建立了低湿度(RH=0%)、中湿度(RH=50%)和高湿度(RH=95%)三种条件下海盐立方体和球形粒子模型。利用离散偶极子近似法(DDA)、Mie 散射理论研究了相对湿度和粒子形态对海盐散射的特性影响,采用离散坐标法(DISORT)研究了相对湿度和粒子形态对海盐特性的影响。结果表明:相对湿度和粒子形态对海盐散射特性影响较大,不同相对湿度条件下,海盐气溶胶粒子由于相态不同,呈现出不同的特性。中湿度条件下,粒子形状因子对海盐散射辐射特性的影响更强。当光学厚度较小时,球形-立方体海盐气溶胶的双向反射分布函数(BRDF)相对差异超过 15%,在研究海盐气溶胶散射辐射特性时,需同时考虑相对湿度和粒子形态的影响;当光学厚度较大时,相对差异不超过 5%,一定精度范围内,可采用等效球方法进行模拟计算。研究结果对于大气气溶胶散射和辐射传输理论及应用研究具有重要的参考价值。

关键词:海盐; 散射; 相对湿度; 形状因子

中图分类号:P40; O43 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0809002

Effect of relative humidity and particle shape on the scattering properties of sea salt aerosols

Zhang Xuehai[1,2], Dai Congming[2], Zhang Xin[1], Wei Heli[2*], Zhu Xijuan[3], Ma Jing[3]

(1. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100854, China)

Abstract: According to the hygroscopic characteristics and different forms of sea salt particles in different relative humidity conditions, the models of sea salt particles under three conditions were established: low humidity(RH=0%), medium humidity(RH=50%), high humidity(RH=95%). Influence of relative humidity and particle morphology on the scattering characteristic of sea salt was studied by

收稿日期:2019-03-15; **修订日期**:2019-04-25

基金项目:国防基础科研计划项目(JCKY2016204C602);装备预先研究项目(41416020204);河南省科技攻关项目(182102310999);省属高校基本科研业务经费专项资金项目青年支持计划(2017QNJH02);河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2017BS026)

作者简介:张学海(1987-),男,讲师,博士,主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。Email: zhangxuehai2012@163.com

通讯作者:魏合理(1965-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事红外辐射大气传输、卷云红外辐射特性方面的研究。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

discrete dipole approximation (DDA) method. Influence of relative humidity and particle morphology on the scattering and radiation characteristic of sea salt was studied by DDA method, Mie scattering theory and Discrete Ordinate Method Radiative Transfer (DISORT) method. The results show that relative humidity and particle morphology have great influence on the scattering characteristics of sea salt particles. Under medium relative humidity, the scattering and radiative transfer characteristics of the sea salt aerosol are more sensitive to particle shape. When the optical thickness is equal to 0.1, the relative difference of BRDF of spherical-cubic sea salt model can be more than 15%, the effect of relative humidity and particle morphology must be taken into account when studying the scattering and radiation transfer properties of sea salt aerosol. With the increase of optical thickness, the relative difference of BRDF decreases, when the optical thickness is greater than 1, the relative difference of BRDF is less than 5%, the equivalent sphere method can be used to simulate calculation within a certain precision range. These findings have important implications to the theory and application of atmospheric aerosol scattering and radiation transfer.

Key words: sea salt; scattering; relative humidity; shape factor

0 引 言

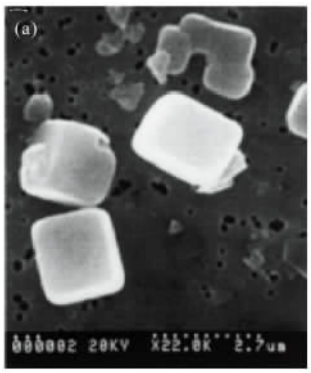
海盐是大气中最主要的自然源气溶胶之一,也是对流层中最大的颗粒物来源,对全球辐射收支平衡及气候变化均有重要影响[1]。气溶胶的辐射强度由其光学特性决定[2]。气溶胶粒子通过散射入射太阳光影响洁净地区背景大气的辐射特性。海盐特性的错误估计会对其他气溶胶造成影响,精确定量化评估海盐气溶胶辐射特性至关重要[3-4]。

迟建伟等[5]在第 29 次南极科考航渡期间进行了海洋大气气溶胶形貌特征、数量分布等研究,结果表明在我国南海地区海盐颗粒占总颗粒物样品的 82.7%。Clarke[6]发现海盐粒子的尺寸一般小于 10 μm,且由于较大海盐气溶胶粒子只存在距离海平面几米的范围内,其生命周期很短,因此只有小尺度海盐粒子对大气气溶胶特性的影响比较大。Freney 等[7]研究发现,大气气溶胶颗粒在不同的环境条件下(如湿度)表现出不同的特征。一方面,在潮解过程中,随着湿度的增加,气溶胶颗粒在相应的湿度条件下固态颗粒物瞬间可转化为液态颗粒,另一方面,在结晶过程中,会在相应的湿度条件下转化为固体颗粒,但是潮解点的湿度要比结晶点的湿度大很多,在此湿度范围内,气溶胶会以液滴和固体颗粒的形式共存。对于海盐粒子,在低湿度下海盐粒子主要为立方体粒子,在高湿度(RH>80%)情况下,由于与水的包裹、融合,转变为球形粒子,同时其粒径将会变大,散射特性也将增强。而在中湿度范围(45%~75%)内,海盐液滴与立方体晶体共存[8]。因此,通过生成机理、实验分析、理论模拟等方法研究相对湿度、粒子形态及混合态等因素对海盐等气溶胶散射和辐射的影响成为目前的热点[9-13]。

1 海盐气溶胶微物理特性参数

1.1 海盐粒子模型

图 1 给出了不同相对湿度条件下海盐粒子形态示例图,可以看出:干海盐粒子以立方体为主,高相对湿度条件下,海盐以液滴为主,而在中等相对湿度条件下,海盐球形和立方体粒子形状并存。文中根据海盐在不同相对湿度条件下的形态及吸湿增长特性,建立了海盐粒子球形和非球形模型,如图 2 所示。对于低湿度(RH=0%)条件,采用立方体粒子模型



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

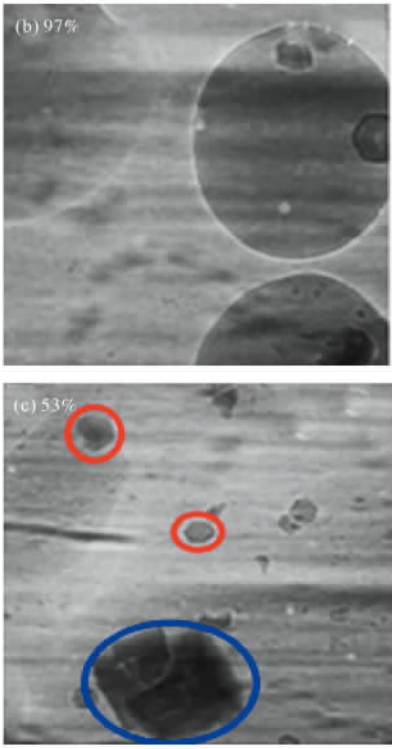


图 1 (a)干海盐粒子形态[4],(b)潮解过程中相对湿度为 97%的湿粒子形态[14],(c)结晶过程中相对湿度为 53%的湿粒子形态[14]

Fig.1 (a) Scanning electron photographs of dried sea salt particles, (b) wet sea salt with RH =97% in the deliquescence process, (c) wet sea salt with RH=53% in the crystallization process after deliquescence[14]

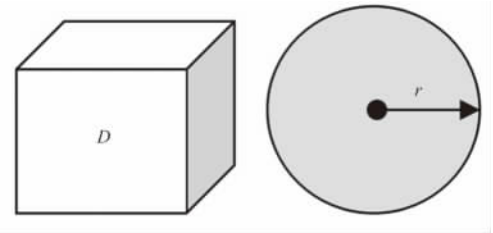


图 2 海盐粒子模型

Fig.2 Model of particles for sea salt

进行模拟,对于高湿度(RH=95%)条件,采用球形液滴模型进行模拟计算。采用 DDA 方法计算了立方体粒子散射特性，采用 Mie 散射理论计算了球形粒子的散射特性。对于中湿度(RH=50%)条件,采用两种模型进行对比分析，以定量了解相对湿度和粒子形态对海盐粒子散射特性的影响。文中仅考虑吸湿增长对粒子半径的影响。

1.2 海盐粒子复折射率

复折射率是研究粒子散射特性的一个重要参数。可溶性盐核粒子吸湿潮解后,其形状和粒子半径均会发生较大变化，复折射率也会发生较大改变[15]。吸湿后粒子的复折射率是由盐核粒子与所吸收的水分共同决定的,常用等效复折射率 $m=m_r-m_i i$ 表示。Hanel[16]在大量实验和理论研究的基础上,得到了盐核吸湿增长半径后复折射率变化规律,如公式(1)所示：

$$\begin{cases} m_{re}=m_{rw}+(m_{r0}-m_{rw})frh^{-3} \\ \dfrac{m_{ie}}{m_{re}^2+2}=\dfrac{m_{iw}}{m_{rw}^2+2}+\left(\dfrac{m_{i0}}{m_{r0}^2+2}-\dfrac{m_{iw}}{m_{rw}^2+2}\right)frh^{-3} \\ frh^{-3}=\dfrac{r}{r_0}=(1-\mathrm{RH})^{-\frac{1}{\mu}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：m_{rw}、m_{iw} 为纯水复折射率的实部和虚部；m_{r0}、m_{i0} 表示干盐核复折射率的实部和虚部；m_{re}、m_{ie} 表示湿粒子的折射率实部和虚部；frh 为吸湿增长因子；r_0 为干盐核半径；r 为吸湿后海盐粒子等效半径；RH 为相对湿度；μ 为质量增长因子,对于海盐气溶胶,μ 为 3.9。文中选取入射波长为 632.8 nm，在此波长处,干海盐和水的折射率分别为 $1.377\sim1.62\times10^8 i$ 和 $1.332\sim1.46\times10^8 i$[17]。因此,相对湿度为 50%时,海盐的吸湿增长因子为 1.2，复折射率为 $1.358\ 4\sim1.55\times10^8 i$。相对湿度为 95%时，盐滴的吸湿增长因子为 2.2,复折射率为 $1.377\sim1.475\ 58\times10^8 i$。

1.3 海盐粒子尺度谱分布

气溶胶粒子的光学特性由尺度参数 $x=2\pi r/\lambda$ 决定,其中 λ 是入射波长,r 是粒子尺寸,对于海盐气溶胶，其中粒子尺寸为 0.3 μm 的细粒子占主导地位[6]。海盐气溶胶粒子尺度分布可由对数正态分布表示[18]：

$$N(r)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \delta r}\exp\left\{-\frac{\ln^2(r/r_m)}{2\delta^2}\right. \tag{2}$$

归一化为：

$$\int_0^\infty N(r)\mathrm{d}r=1 \tag{3}$$

式中：r 为粒子等效半径，文中采用等效体积半径方法获得粒子等效半径；r_m 为中值半径；δ 为几何标准方差。文中假定 r_m=0.3 μm,δ=0.9。

根据给定粒子谱分布，海盐气溶胶粒子的平均散射相矩阵可由下式得到：

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$P_{ij}(\theta)=\frac{\sum_{r=r_{min}}^{r=r_{max}}\left[p_{ij}(\theta)Q_s(r)N(r)d(r)\right]}{\sum_{r=r_{min}}^{r=r_{max}}\left[Q_s(r)N(r)d(r)\right]} \tag{4}$$

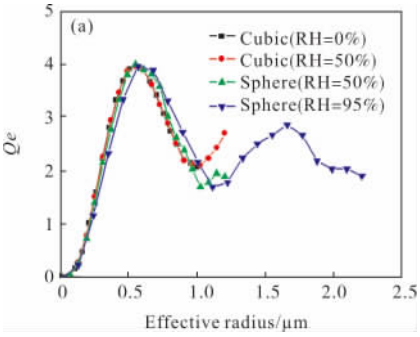
式中：$p_{ij}(\theta)$为单粒子散射相矩阵元素，i=1,4；j=1,4。其中 $p_{11}(\theta, r)$称为散射相函数，表征入射光被散射后在空间的强度分布。$P_{ij}(\theta)$为平均散射相矩阵。文中选取其中几个最重要的元素进行分析，分别选取 $P_{11}(\theta)$，$P_{12}(\theta)$，$P_{33}(\theta)$，$P_{34}(\theta)$，并进行相应的归一化处理。

2 海盐气溶胶散射特性及其与相对湿度和粒子形态的关系

2.1 单次散射特性

采用 DDA 方法计算了立方体粒子的单次散射特性，采用 Mie 散射方法计算了球形粒子的单次散射特性，包括消光效率因子、不对称因子、散射相函数等散射参量，由于海盐气溶胶粒子在可见光波段折射率虚部很小，粒子基本无吸收，因此，其单次散射反照率接近 1。根据给定粒子尺度谱分布，计算了海盐粒子群的平均散射相矩阵。分析研究了相对湿度和粒子形状因子对海盐气溶胶粒子散射特性的影响。

图 3 为单个海盐粒子的单次散射参量随粒子等效半径的变化。从中可以看出：当相对湿度较小时，由于粒子吸湿性增长很小，海盐气溶胶粒子的非散射角散射参量与相对湿度基本无关。随着相对湿度的增加，粒子吸湿性增长增强，相对湿度对海盐消光效率因子、不对称因子等有一定影响，海盐气溶胶粒子的散射效率因子振荡周期增大，其单粒子的不对称因子也有所增加，但整体趋势保持不变。在相同相对湿度条件下(RH=50%)，粒子形态对海盐气溶胶粒子的影响较大，甚至超过由于粒子吸湿性增长造成的影响，因此在研究海盐气溶胶散射特性时，需考虑粒子非球形特性造成的影响。



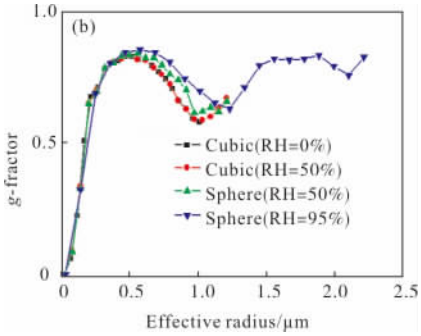
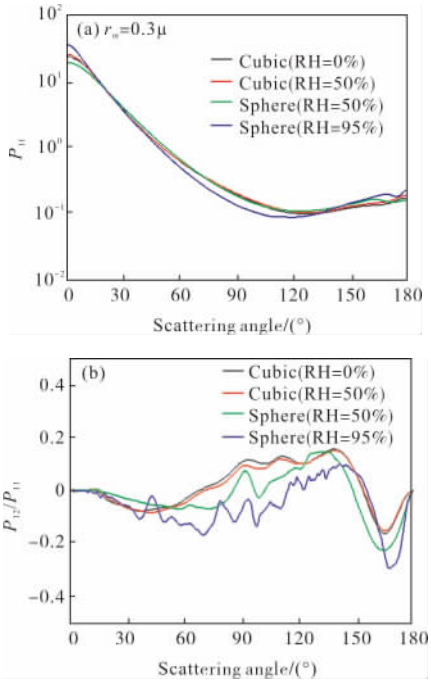


图 3 海盐气溶胶单粒子的单次散射参量随等效半径的变化

Fig.3 Single scattering parameters of single sea salt aerosol particles vs effective radius

图 4 为采用公式(4)得到的海盐气溶胶粒子群的平均散射相矩阵。从图 4(a)可以看出：气溶胶粒子形状和相对湿度对散射相函数的影响较大，由于吸湿作用影响，高湿度条件下，海盐粒子为球形粒子，其粒子半径远大于低湿度条件下粒子半径，这导致高湿度条件下，其散射相函数在前向和后向增强，而在侧向散射方向减弱，这与球形粒子随尺度增长的变化趋势一致。在中湿度条件下，立方粒子的前向和后向散射相函数均强于球形粒子。因此，在采用后向散射信号进行海盐气溶胶探测时，采用球形假设方法在一定程度上会低估后向散射信号。



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

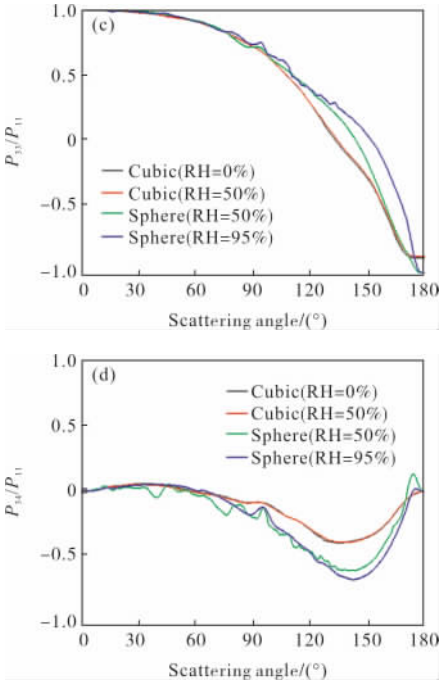


图 4 海盐气溶胶粒子群的平均散射相矩阵

Fig.4 Average scattering matrix of sea salt aerosol particles

从图 4 散射相矩阵的其他元素可以看出：海盐立方体粒子的散射相矩阵与球形粒子有明显差别。对于 P_{12}/P_{11}，立方粒子在 60~135 之间要比球形粒子高出很多，同时球形粒子在 165 附近则具有更深的谷值。对于 P_{33}/P_{11}，在前向散射方向，相对湿度和粒子形状对其均无影响，而在后向散射方向，不同相对湿度和粒子形状的 P_{33}/P_{11} 快速分开，球形-立方体粒子差异显著。从 P_{34}/P_{11} 也可以看出：球形粒子要比立方粒子具有更深谷值。同时由于粒子吸湿增长，对于球形粒子，高湿度(RH=95%)要比中湿度(RH=50%)具有更深谷值，但是对比中湿度条件下球形-立方体粒子 P_{34}/P_{11}，很明显，吸湿增长效果要远小于粒子非球形特性造成的差异。

通过对比散射相矩阵，可以明显得出：在中低湿度条件下，相比相对湿度，海盐气溶胶散射特性更依赖于气溶胶粒子的形状因子，只有当相对湿度变化很大，从而导致粒子尺度明显增大时相对湿度的影响才会明显加强，而海盐气溶胶的偏振特性明显更依赖于海盐粒子形状因子。因此，仅采用球形假设方法进行模拟计算海盐气溶胶粒子的散射特性，必然会造成一定误差，需要考虑不同相对湿度条件粒子形状因子的影响。

2.2 考虑多次散射特性海盐粒子的双向反射分布

研究表明当光学厚度大于 0.1 时，多次散射对总散射的贡献将会超过 10%[19-21]，我国大部城市均存在不同程度污染，整层大气光学厚度大多数情况都超过 0.1，因此，多次散射对实际大气散射和辐射计算具有非常重要的影响。由前期研究可知：太阳天顶角对粒子群双向反射分布函数(BRDF)影响具有规律性[17]，多次散射过程细节也可参见参考文献[17]，文中针对入射天顶角为 0°和 45°情况进行分析，采用离散坐标法(DISORT)计算了入射天顶角为 0°和 45°时，不同相对湿度、以及光学厚度下海盐气溶胶粒子群的多次散射特性，得到了海盐气溶胶粒子群的 BRDF。

从图 5 可以看出，在入射角一定时，不同相对湿度条件下的海盐气溶胶粒子群的 BRDF 曲线分布基本一致，都在入射天顶角的镜像(图 5(a)为 0°反射角，图 5(b)为-45°反射角)方向存在峰值，随着光学厚度的增大，BRDF 的角分布趋于平坦。

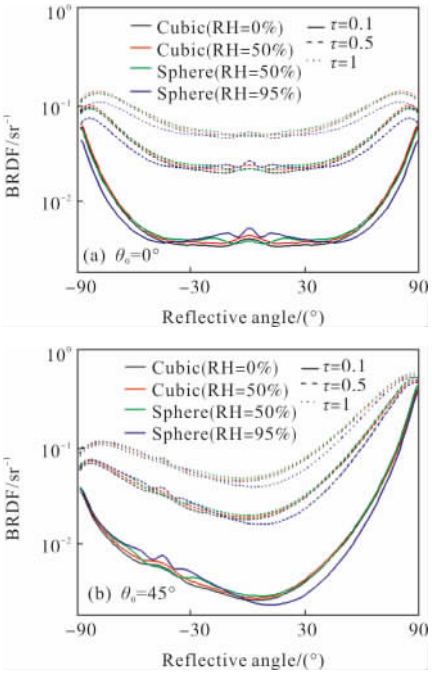


图 5 不同入射角和光学厚度的海盐气溶胶 BRDF 随反射角的变化关系

Fig.5 BRDF of sea salt aerosol varies with reflective angle with different incident angles and optical depths

在入射角和光学厚度一定时，随着相对湿度的增大，由于吸湿特性，海盐立方粒子和盐滴的 BRDF

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

峰值均会增大，但是通过对比中湿度条件下立方体和球形海盐气溶胶粒子的 BRDF 可以看出：相同湿度条件下，立方粒子比球形粒子具有更高的 BRDF 峰值。因此，在计算海盐粒子群散射特性时应考虑由粒子非球形特性所造成的误差，为定量说明相对湿度和粒子非球形特性对 BRDF 造成的影响，笔者给出了不同相对湿度下海盐气溶胶 BRDF 的相对差异，以及中湿度条件下，不同入射角和光学厚度下球形和立方海盐气溶胶粒子的 BRDF 相对差异。相对差异定义为：

$$(BRDF_{RH_h}-BRDF_{RH_l})/BRDF_{RH_h}\times 100\% \tag{5}$$

$$(BRDF_{sph}-BRDF_{cub})/BRDF_{sph}\times 100\% \tag{6}$$

式中：$BRDF_{RH_h}$ 为较高相对湿度气溶胶 BRDF；$BRDF_{RH_l}$ 为较低相对湿度气溶胶 BRDF；$BRDF_{sph}$ 为球形海盐气溶胶粒子群的 BRDF；$BRDF_{cub}$ 为立方体海盐气溶胶粒子群的 BRDF。

图 6 给出了中湿度条件下球形-立方体海盐气溶胶粒子群的 BRDF 相对差异。可以看出：球形-立方海盐气溶胶粒子群的 BRDF 相对差异在很大角度范围内都比较大，在一定角度甚至可以达到 15%，单独采用球形粒子进行计算会造成明显偏差，随着光学厚度的增加，相对误差减小，当光学厚度增大到 1 时，球形-立方海盐气溶胶粒子群的相对误差基本上小于 5%，在一定精度范围内，可采用球形粒子进行模拟计算。

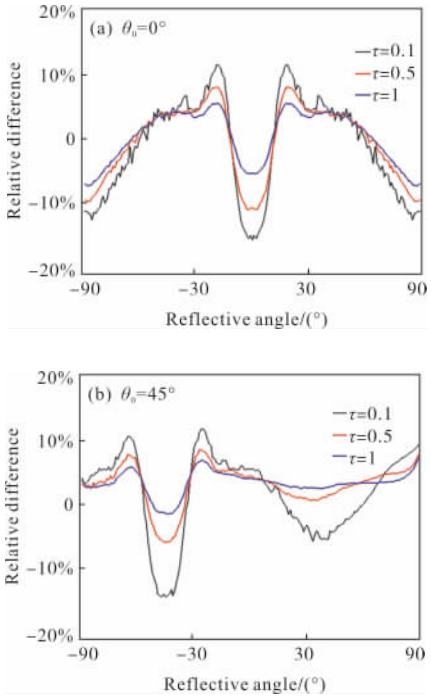


图 6 中湿度条件下球形-立方体海盐气溶胶粒子 BRDF 的相对差异

Fig.6 Relative difference of BRDF of sphere and cubic sea salt aerosol particles in medium relative humidity

图 7 分析了相对湿度对海盐气溶胶散射特性的影响。从图 7(a)可以看出，当光学厚度等于 0.1 时，由于相对湿度较低时，粒子吸湿增长作用较弱，相对湿度对气溶胶 BRDF 影响不大，相对差异一般在 8%以内。随着相对湿度的增加，粒子吸湿增长特性导致粒径变大，散射作用增强，相对差异最高可以达到 30%以上(图 7(b))，因此相对湿度对海盐气溶胶的影响主要在中湿度向高湿度转变中起主导作用。通过对比图 6(a)和图 7(a)可以看出，在中低湿度条件下，粒子形状因子对海盐气溶胶影响要大于吸湿增长造成的影响，此时需考虑粒子形状因子造成的影响。

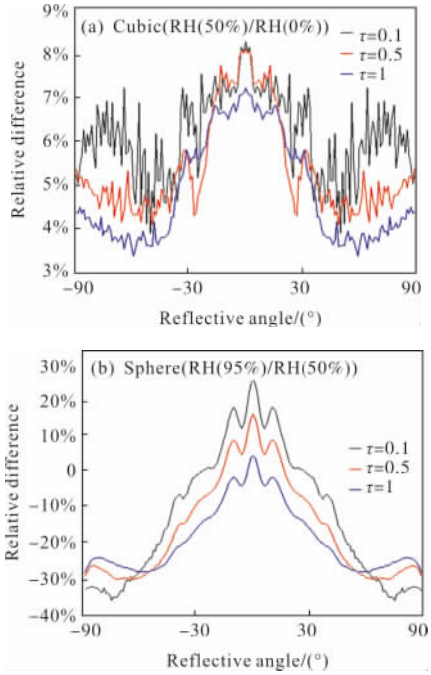


图 7 相对湿度对海盐气溶胶 BRDF 的影响

Fig.7 Effect of relative humidity on the BRDF of sea salt aerosol

3 结 论

采用 DDA 和 Mie 散射方法，根据海盐气溶胶粒子在不同相对湿度条件下所表现的不同相态，考虑到粒子的吸湿增长，分为低湿度(RH=0%)、中湿度

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(RH=50%)和高湿度(RH=95%)三部分建立了海盐气溶胶粒子模型,根据海盐气溶胶粒子谱分布,分析研究了 632.8 nm 波段海盐气溶胶的散射特性。结果表明:由于海盐气溶胶粒子的吸湿增长特性,其散射特性随相对湿度的增大而增强。海盐气溶胶粒子的散射效率因子振荡周期增大,其单粒子的不对称因子也有所增加,但整体趋势保持不变。海盐气溶胶粒子群的前向和后向散射相函数均随湿度的增加而加强,而在侧向散射方向则随湿度增加而减弱。通过对比散射相矩阵元素可以看出:相比散射相函数,海盐气溶胶的偏振信息对粒子形状更为敏感,在一定程度上,甚至超过了吸湿性增长特性对其的影响。对其偏振信息的研究对于采用偏振探测方法区分球形和非球形的立方体海盐气溶胶粒子具有一定的价值。

采用 DISORT 方法计算了三种湿度条件下,不同天顶角和光学厚度的海盐气溶胶粒子的 BRDF,并分析了不同湿度和粒子形态海盐气溶胶的 BRDF 的相对差异。结果表明:不同湿度条件下粒子群的 BRDF 随反射角的变化趋势基本一致,在高湿度条件下,由于粒子吸湿性增长较大,粒子散射效应相应增强,在入射角的镜像方向出现更高的峰值。同时在中湿度条件下,由于粒子吸湿性增长不大,其对粒子散射效应的影响小于粒子形状因子,因此,其在镜像方向的峰值要小于立方粒子群。球形-立方体海盐气溶胶粒子群的 BRDF 相对差异随光学厚度的增大而减小,当光学厚度为 0.1 时,其相对差异会超过 15%,光学厚度大于 1 时,则一般不超过 5%。湿度对海盐气溶胶散射特性影响主要集中在中高湿度,在中低湿度条件下,相比相对湿度,海盐气溶胶散射特性更依赖于气溶胶粒子的形态特征。

文中研究结果有助于发展统一的海盐气溶胶光散射模型,对于海盐气溶胶散射和辐射传输特性的理论及应用具有一定的意义。

参考文献:

[1] Zakey A S, Giorgi F, Bi X. Modeling of sea salt in a regional climate model: Fluxes and radiative forcing[J]. ***Journal of Geophysical Research Atmospheres***, 2008, 113: D14221.

[2] Haarig M, Ansmann A, Gasteiger J, et al. Dry versus wet marine particle optical properties: RH dependence of depolarization ratio, backscatter and extinction from multiwavelength lidar measurements during SALTRACE [J]. ***Atmospheric Chemistry & Physics***, 2017, 17(23): 1-32.

[3] Murphy D M, Anderson J R, Quinn P K, et al. Influence of sea-salt on aerosol radiative properties in the Southern Ocean marine boundary layer [J]. ***Nature***, 2015, 392: 62-67.

[4] Chamaillard K, Jennings S G, Kleefeld C, et al. Light backscattering and scattering by nonspherical sea-salt aerosols [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2003, 79(2): 577-597.

[5] Chi Jianwei, Li Chuanjin, Sun Junying, et al. Physico-chemical characteristics of individual aerosol particles in marine atmosphere on south hemisphere [J]. ***Environmental Science***, 2017, 38(3): 903-910. (in Chinese)
迟建伟, 李传金, 孙俊英, 等. 南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 903-910.

[6] Clarke A, Kapustin V, Howell S, et al. Sea-salt size distributions from breaking waves: implications for marine aerosol production and optical extinction measurements during SEAS[J]. ***Journal of Atmospheric & Oceanic Technology***, 2003, 20(10): 1362-1374.

[7] Freney E J, Martin S T, Buseck P R. Deliquescence and efflorescence of potassium salts relevant to biomass-burning aerosol particles [J]. ***Aerosol Science & Technology***, 2009, 43(8): 799-807.

[8] Lewis E R, Schwartz S E. Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements and Models -A Critical Review [M].Washington:American Geophysical Union, 2004: 53-63.

[9] Li J, Ma X, Salzen K V, et al. Parameterization of sea-salt optical properties and physics of the associated radiative forcing[J]. ***Atmospheric Chemistry & Physics***, 2008, 8(16): 4787-4798.

[10] Fan T, Toon O B. Modeling sea-salt aerosol in a coupled climate and sectional microphysical model: mass, optical depth and number concentration [J]. ***Atmospheric Chemistry & Physics***, 2011,11(9): 4587-4610.

[11] Bi L, Lin W, Wang Z, et al. Optical modeling of sea salt aerosols: the effects of nonsphericity and

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

inhomogeneity [J]. ***Journal of Geophysical Research Atmospheres***, 2018, 123(1): 543-558.

[12] Cheng T, Wu Y, Gu X, et al. Effects of mixing states on the multiple-scattering properties of soot aerosols [J]. ***Optics Express***, 2015, 23(8): 10808-10821.

[13] Wu Y, Cheng T, Zheng L, et al. Models for the optical simulations of fractal aggregated soot particles thinly coated with non-absorbing aerosols [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer***, 2016, 182: 1-11.

[14] Zeng J, Zhang G, Long S, et al. Sea salt deliquescence and crystallization in atmosphere: an in situ investigation using x-ray phase contrast imaging [J]. ***Surface & Interface Analysis***, 2013, 45(5): 930-936.

[15] Pan Xiaole. Observation study of atmospheric aerosol scattering characteristics as a function of relative humidity [D]. Beijing: The Chinese Academy of Meteorological Science, 2007. (in Chinese)
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.

[16] Hänel G. 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(C): 73-188.

[17] Shi Guangyu. Atmospheric Radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[18] Kokhanovsky Alexander A. Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Stmosphere[M]. Chichester UK: Praxis Publishing, 2008.

[19] Chen Xiuhong, Liu Qiang, Wei Heli. The treatment of scattering phase function in the multi-scattering radiative transfer calculation [J]. ***The Journal of Light Scattering***, 2007, 19(3): 283-289. (in Chinese)
陈秀红, 刘强, 魏合理. 多次散射辐射传输计算中的相函数处理[J]. 光散射学报, 2007, 19(3): 283-289.

[20] Zhang Xuehai, Wei Heli, Dai Congming, et al. Influence of aspect ratio on the light scattering properties of spherical aerosol particles [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2015, 64(22): 152-162. (in Chinese)
张学海, 魏合理, 戴聪明, 等. 取向比对椭球气溶胶粒子散射特性的影响[J]. 物理学报. 2015, 64(22): 152-162.

[21] Zhang Xuehai, Wei Heli, Dai Congming, et al. A study of scattering properties of fly ash aerosols: comparison of laboratory and lorenz-Mie results [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2015, 27(7): 27-33. (in Chinese)
张学海, 魏合理, 戴聪明, 等. 飞尘气溶胶粒子散射特性分析:对比实验和米散射方法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 27-33.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net