

沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性

郝增周 龚 芳 潘德炉 黄海清

(国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要 根据 Mie 散射理论, 以对数正态分布函数描述沙尘气溶胶粒子群的粒径尺度分布, 计算了沙尘气溶胶粒子群在 $0.2\sim 40\ \mu\text{m}$ 波段间对太阳短波辐射和地球大气长波辐射的单次散射反照率、散射相矩阵函数, 揭示了不同相对湿度时, 沙尘粒子群对入射辐射的散射和偏振的特征。结果表明, 沙尘粒子群的单次散射反照率随着入射波长的增加有较大起伏, 不同相对湿度条件下, 变化趋势基本一致; 在可见光、近红外波段单次散射反照率随湿度增加而变大, 湿度 95% 时非常接近于 1; 大于 $10\ \mu\text{m}$ 的热红外波段单次散射反照率随相对湿度增加而减小, 具有较强的吸收辐射能力。散射辐射强度受湿度影响较小, 随散射角的增加呈现先减小后增大的趋势, 且增大的趋势随着波长的增加而减弱; 不同波段上, 线偏振和圆偏振随散射角和相对湿度变化存在差异; 在前向和后向仅对入射辐射为圆偏振辐射产生圆偏振散射; 散射光的偏振特性及其湿度差异主要表现在后向散射区, 多以拱形形式体现。拱顶峰散射角位置存在差异, 且峰值散射角随相对湿度的降低向后向漂移。

关键词 大气光学; 散射偏振; Mie 理论; 沙尘粒子群; 单次散射反照率; 相矩阵

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0101002

Scattering and Polarization Characteristics of Dust Aerosol Particles

Hao Zengzhou Gong Fang Pan Delu Huang Haiqing

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract Based on Mie scattering theory, the single scattering albedo and the phase-matrix function of dust aerosol particles during wavelength of $0.2\sim 40\ \mu\text{m}$ for solar radiation and earth-atmosphere long-wave radiation are calculated with the lognormal distribution function to describe the dust particles size distribution. The scattering intensity and polarization characteristics of light scattered by dust aerosol particles are studied at different relative humidity conditions. The results show that, the single scattering albedo has an evident change with the incident wavelength; the variation trend is identical at different relative humidity conditions; within the visible and near-infrared band, the single scattering albedo increases with the increasing relative humidity, it is very close to 1 at relative humidity of 95%; within the thermal infrared band greater than $10\ \mu\text{m}$, the single scattering albedo decreases with the increasing relative humidity and it has strong ability to absorb radiation. The scattering intensity has less effect on relative humidity and shows a trend of decreasing firstly and then increasing with the increasing scattering angle, the increasing tendency decreases with the increasing wavelength; for the linear and circular polarization of scattered radiation, the change with the scattering angle and relative humidity has different properties at different bands; in the forward and backward scattering directions, it only produces the circular polarization by dust aerosol particles, when it is assumed that incident light is right hand circularly polarized. Polarization properties of scattered radiation and their differences with humidity mainly change in the backward scattering region, where it is as an arched form. The scattering angle for peak point is different at different relative humidities and the peak position drifts to the larger scattering angle with the decreasing relative humidity.

Key words atmospheric optics; scattering polarization; Mie theory; dust aerosol particles; single-scattering albedo; phase matrix

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 290.5850; 290.5855; 290.4020

收稿日期: 2011-05-16; **收到修改稿日期**: 2011-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(40806071)、浙江省自然科学基金(Y5090381)和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JG1013)资助课题。

作者简介: 郝增周(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋及大气环境参数遥感等方面的研究。

E-mail: hzyx80@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

1 引 言

悬浮于大气中的气溶胶粒子主要通过反射、散射和吸收太阳短波辐射以及大气长波辐射直接,或作为云凝结核增加云微滴改变云特性间接影响地-气系统的辐射收支状况,进而对区域或全球的气候效应产生影响^[1,2]。沙尘作为一种大气气溶胶,除了对大气辐射、气候效应有重要影响外^[3],对空气质量、环境生态等影响也很大^[4~6]。近几十年,由于频繁的人类活动和土地利用,大气中的沙尘气溶胶浓度在持续地上升,如每年春季亚洲内陆频繁发生的沙尘暴、非洲的撒哈拉沙尘暴等就向大气中注入了大量的沙尘气溶胶粒子^[7~9]。

了解沙尘粒子对辐射、气候和环境的影响,需要考虑以下几点信息:1)沙尘气溶胶的时空分布;2)沙尘气溶胶的物理光学性质;3)化学组成等。具体地说,在清楚沙尘气溶胶时空分布信息后,需要根据化学组分对沙尘气溶胶进行参数化处理,以获得沙尘气溶胶的具体光学特性,最后将其加入辐射传输模式来估算沙尘的辐射和气候效应^[10]。可见,物理光学性质是研究沙尘辐射、气候效应的前提条件。此外,沙尘气溶胶光学性质在卫星遥感大气校正和特性反演中也具有较重要的影响^[11,12]。早期沙尘气溶胶光学特性的研究主要集中在可见光波段处的吸收、散射和消光系数、单次散射反照率和不对称因子^[13~16],近几年,研究的波段已扩展至红外,特性参数也涉及相函数、偏振以及非球形粒子等特征。李曙光等^[17]通过数值法研究了近红外和中红外波段电磁波所受沙尘粒子的散射和衰减特性。李学彬等^[18]根据沙尘暴数据,从理论和实验上分析了沙尘粒子对可见光和红外波段的消光特性。麻金继等^[19]以实测的厦门海域气溶胶粒子谱分布,利用 Mie 散射理论对可见光和近红外波段的光学散射相函数以及偏振相函数特征进行了分析。邵士勇等^[20]运用 T 矩阵方法探讨了沙尘等单分散长椭球形粒子的散射相函数。孙学金等^[21]运用 Mie 理论,从求解 Mueller 矩阵入手,计算并分析了可见光和红外波段大气体散射的偏振度特征,卫晓东等^[22]结合 T 矩阵与几何光学方法,计算了太阳短波到红外谱段的非球形沙尘粒子的光学特性。但是人们对这些红外辐射特性、相函数特征的分析研究还很少,而对于沙尘多波段辐射散射性质的认识以及沙尘天气的红外探测和偏振探测方法的研究迫切需要这方面的研究分析。

沙尘物理光学特性包括吸收/散射/消光系数、

单次散射反照率和相矩阵函数等,不同湿度条件下,不同化学组分的沙尘气溶胶具有不同的吸湿性,也影响其散射辐射特性。本文根据 Mie 散射理论计算了 0.2~40 μm 波段上满足对数正态分布的沙尘气溶胶粒子群在不同相对湿度条件时的散射辐射特性参数,着重指出了单次散射反照率的波段分布和湿度影响,分析并比较了不同波段处的散射相矩阵元素及其湿度变化,说明了沙尘粒子群的散射和偏振特性。

2 研究数据和方法

2.1 复折射指数

复折射指数是描述电磁辐射与物质相互作用的参数,它由实部和虚部构成。一般相对湿度下气溶胶粒子的复折射指数是由于气溶胶粒子和凝结的液态水共同决定,常用等效均匀球形粒子的折射指数表示。Hänel^[23]经过大量的实验和理论验证,总结出了气溶胶复折射指数和相对湿度之间的函数关系为

$$n = n_w + (n_0 - n_w) \left(\frac{r_0}{r_{\text{Rh}}} \right)^3, \quad (1)$$

式中 n 为气溶胶复折射指数,下标 w 和 0 分别表示水和干气溶胶粒子; r_0 为干气溶胶粒子半径, r_{Rh} 为湿气溶胶粒子半径。相对湿度为 f 时,湿气溶胶粒子半径 r_{Rh} 和干气溶胶半径 r_0 的关系有如下经验关系式:

$$\frac{r_{\text{Rh}}}{r_0} = (1 - f)^{-1/u}, \quad (2)$$

式中 u 为常数,对于大陆洁净大气粒子,气溶胶吸湿性差, $u = 5.8$;对于海洋大气粒子,气溶胶吸湿性强, $u = 3.9$;对于污染大气粒子,气溶胶吸湿性介于两者之间, $u = 4.4$ 。本文研究中的沙尘粒子属弱吸湿性气溶胶, u 取 4.8。

研究中所用的干沙尘气溶胶粒子和液态水的复折射率由 HITRAN2008 数据集提供。HITRAN 数据集作为目前世界范围内常用的大气分子光谱数据库,最初是由美国空军剑桥实验室在 20 世纪 60 年代为深入细致研究大气的红外辐射特征而创建的^[24]。该数据集为研究、模拟光在大气中的辐射、传输提供了详尽的光学参数。采用数据集中的类沙尘气溶胶粒子为研究干沙尘的折射率。

根据气溶胶折射指数和相对湿度间的关系,计算了相对湿度在 30%~95% 条件下湿沙尘气溶胶粒子的复折射指数。图 1 给出了干沙尘气溶胶和相

对湿度为 30%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 和 95% 条件时湿沙尘气溶胶粒子的复折射率实部和虚部的

波段分布。

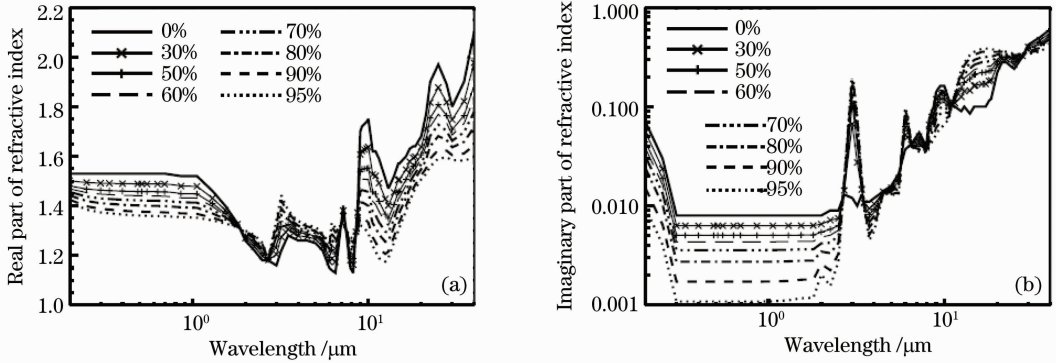


图 1 不同相对湿度条件下沙尘气溶胶粒子的复折射率实部和虚部

Fig. 1 Real and imaginary part of complex refractive index of dust aerosol particles under different relative humidities

2.2 粒子尺度谱分布

实际大气中,气溶胶是由许多不同粒径粒子构成,粒子群的粒径尺度分布复杂多变,常用一些函数来描述粒子尺度谱分布。具体研究中,利用一些经验公式来描述谱分布,常用的气溶胶粒径谱分布主要有 3 种:Junge 谱、Deirmenjian 谱和对数正态谱分布。大量的理论和实验研究表明,对数正态分布适用于一切随机过程,对数正态分布函数能够较好地描述一种模态的气溶胶粒子尺度分布^[25]。本文采用对数正态分布函数来描述沙尘气溶胶的粒子尺度分布,具体表达式为

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma}} \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right], \quad (3)$$

式中 r_0 是平均模态半径, σ 为半径的均方差。

此外,等效粒子半径是表征粒子大小的另一参数,其定义为粒子尺度的三阶矩与二阶矩的比值。在对数正态分布条件下,粒子的等效半径可表为

$$r_e = \frac{\langle r^3 \rangle}{\langle r^2 \rangle} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) dr} = r_0 \exp\left[\frac{5}{2}(\ln \sigma)^2\right]. \quad (4)$$

在对数正态分布的假设下,研究中沙尘粒子群的尺度分布取典型参数。具体地,沙尘粒子取等效半径为 2.365 μm 海洋传输型沙尘粒子(模态半径 r_0 取 0.5 μm , 方差 σ 取 2.2)。

2.3 气溶胶粒子群 Mie 散射

在湿气溶胶复折射率计算中,采用等效折射率模型,即认为湿气溶胶粒子为均匀球形粒子,其

折射指数既不同于干气溶胶的折射指数,也不同于水的折射指数,而采用等效折射指数,这样湿气溶胶的散射问题就简化为球形粒子的散射问题。单个球形气溶胶粒子的散射问题可由 Mie 散射理论求出。实际大气中气溶胶粒子群是各种尺寸粒子的集合,其散射特性是考虑一定体积内所含有的各种不同粒径粒子的贡献相加。单位体积内粒径在 r 到 $r + dr$ 间的粒子数为 $n(r)dr$, 则粒子群的体积消光系数 β_e 、散射系数 β_s 和吸收系数 β_a 为^[23]

$$\beta_{e,s,a} = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{e,s,a}(r) n(r) dr, \quad (5)$$

式中 Q_e, Q_s, Q_a 分别为粒径为 r 的单粒子消光、散射和吸收效率因子,可由 Mie 散射理论计算得,且 $Q_e = Q_s + Q_a$ 。

气溶胶粒子群的单次散射反照率为

$$\omega(\lambda) = \frac{\beta_s(\lambda)}{\beta_e(\lambda)}. \quad (6)$$

描述气溶胶散射特性的必要参数,除了上述消光系数和单次散射反照率,还有一个就是相矩阵函数,一般来说,若没对散射粒子的形状和位置做若干假设,则相矩阵共有 16 个独立元素,但对于一个均匀且各向同性的圆球来说,只有 4 个独立元素,其相矩阵表示为^[23]

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & -P_{34} & P_{44} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

本文以文献[26~28]中介绍的理论和方法为参考,以 IDL 语言为编程工具,对粒径符合对数正态分布的沙尘气溶胶粒子群,计算了不同湿度条件下,

0.2~40 μm 波段上的散射特征参数,分析单次散射反照率和散射相矩阵元素,说明沙尘粒子群的散射和偏振特性。

3 沙尘粒子群的散射辐射特性

3.1 单次散射反照率

由(6)式知,单次散射反照率 ω 定义为气溶胶粒子散射消光与总消光(吸收+散射)的比,是衡量气溶胶粒子吸收特性的参数。图 2 给出了干气溶胶粒子和 8 种相对湿度条件(30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% 和 95%)下,沙尘气溶胶粒子群的单次散射反照率在 0.2~40 μm 波段上的变化。由图 2 中可以看出沙尘粒子群单次散射反照率受湿度影响明显,在大于 9.0 μm 的热红外波段,单次散射反照率随相对湿度的增大而减小,在小于 9.0 μm 波段上,除在 2.8~3.2 μm 波段间沙尘气溶胶粒子群散射的单次散射反照率随相对湿度的增大而减小,其他波段上单次散射反照率总是随着湿度的增大而增大。整体而言,不同湿度条件下,沙尘单次散射反照率随入射波长有大的变化起伏,但其趋势大体一致,峰谷出现的位置基本相同,集中在 3.0, 6.0, 8.1 μm 附近,在这些变化剧烈区,干和湿的变化影响较大,特别是 3.0 μm 和 8.1 μm 附近;此外,可见光、近红外波段单次散射反照率较大,相对

湿度 95% 时接近于 1,具有较大散射特性,而大于 10 μm 的热红外波段吸收性较强。

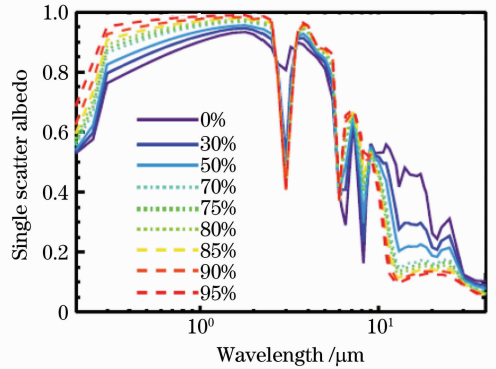


图 2 不同相对湿度条件下沙尘气溶胶粒子群单次散射反照率的波段变化

Fig. 2 Variation of single scattering albedo of dust aerosol articles with wavelength under different relative humidities

3.2 相矩阵函数

为了更进一步地说明不同波段上沙尘粒子群的散射和偏振特征,图 3~8 给出了紫外 0.337 μm 、可见光 0.55 μm 、近红外 0.86 μm 、短波红外 1.536 μm 、中红外 3.75 μm 和热红外 11.0 μm 6 种代表波段上,不同相对湿度条件(30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% 和 95%)下,沙尘粒子群散射相矩阵元素 P_{11} , $-P_{12}/P_{11}$, P_{33}/P_{11} 和 P_{34}/P_{11} 随散射角的变化。

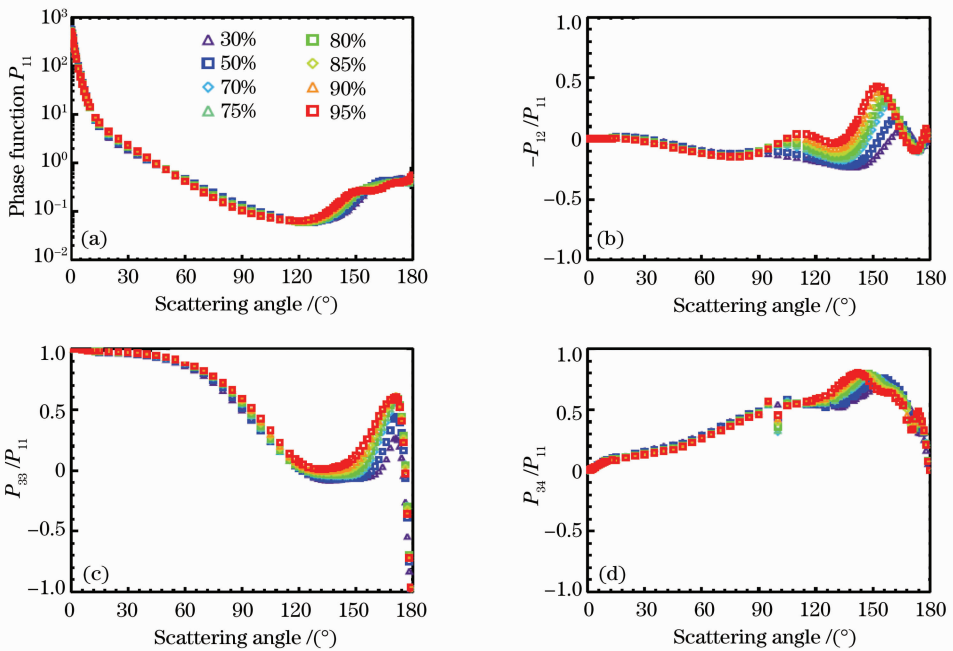


图 3 不同相对湿度条件下,0.337 μm 波段,沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化

Fig. 3 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at 0.337 μm under different relative humidities

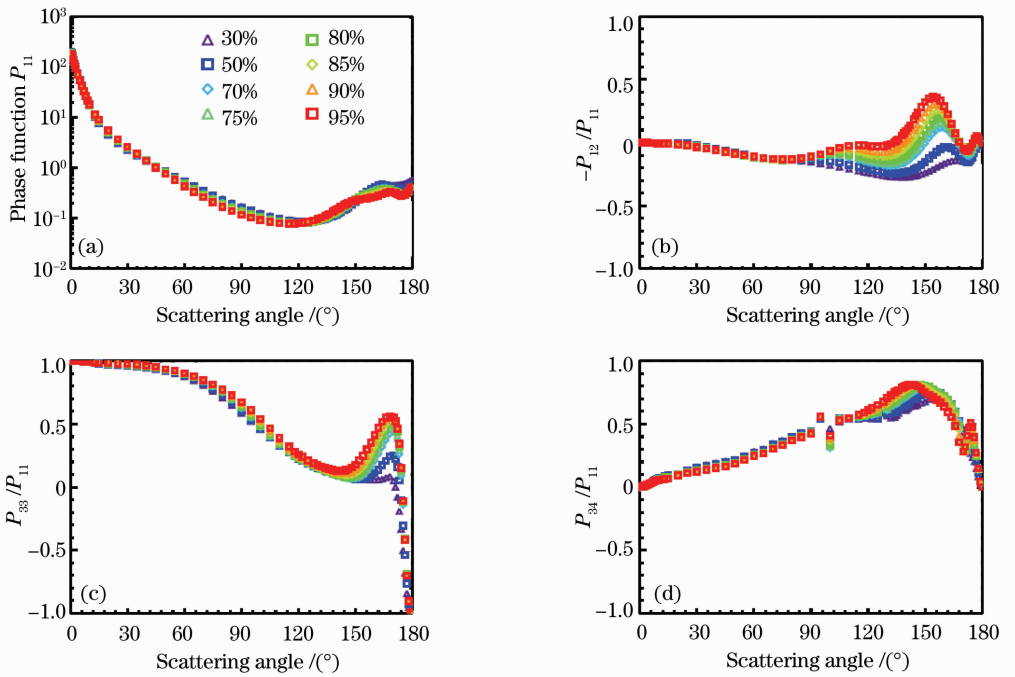


图 4 不同相对湿度条件下, $0.550 \mu\text{m}$ 波段, 沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化
 Fig. 4 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at $0.550 \mu\text{m}$ under different relative humidities

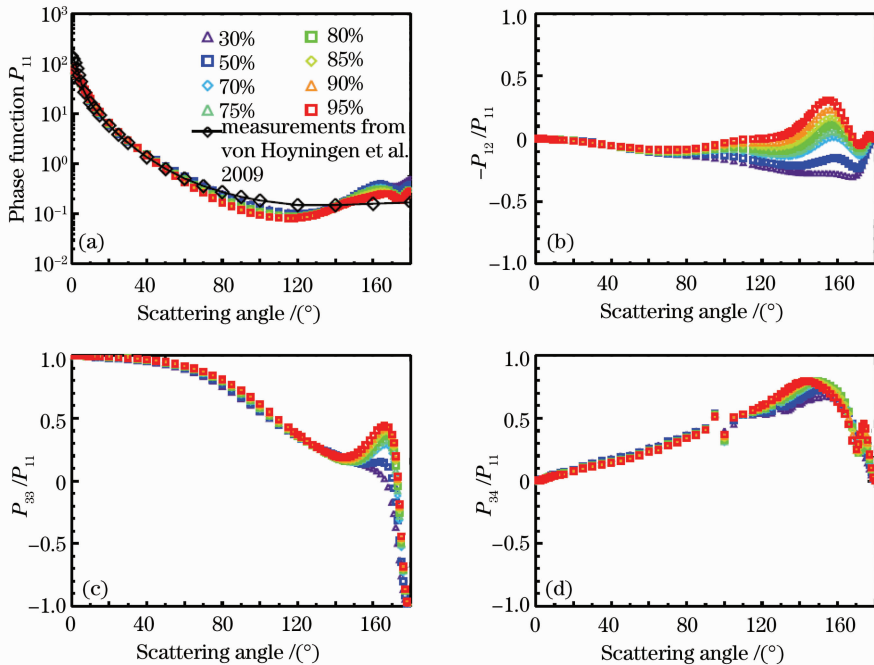


图 5 不同相对湿度条件下, $0.860 \mu\text{m}$ 波段, 沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化和相位函数 P_{11} 的初步验证
 Fig. 5 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at $0.860 \mu\text{m}$ under different relative humidity and the primaries validation of P_{11}

散射相矩阵元素 P_{11} 指入射辐射经过粒子散射后在各个方向上的散射辐射强度分布, 从图 3(a)~8(a)中可以看出, 在 $0.2 \sim 40 \mu\text{m}$ 波段内, 散射辐射强度受湿度影响较小, 随散射角的增加呈现先减小后增大的趋势, 波段越大, 后向散射区内的增大趋势

越趋平缓; 散射主要集中在小于 60° 的前向散射区, 后向散射较弱, 在 120° 附近散射光强达最小; 同时, 前向散射随着波长的增加逐渐减弱, 后向散射变化相对较小。

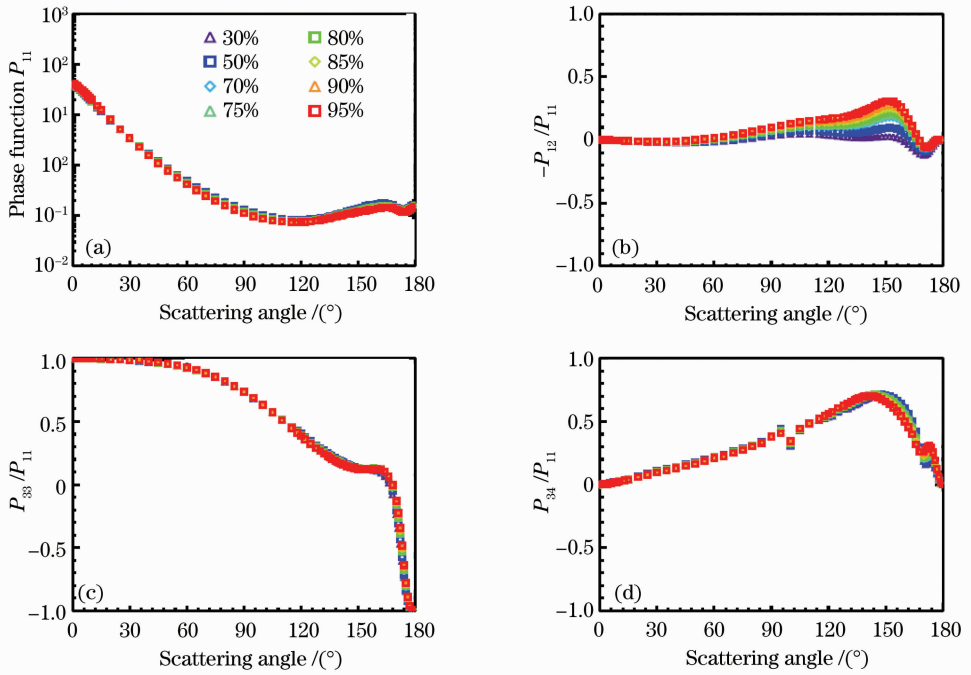


图 6 不同相对湿度条件下, 1.536 μm 波段, 沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化
 Fig. 6 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at 1.536 μm under different relative humidities

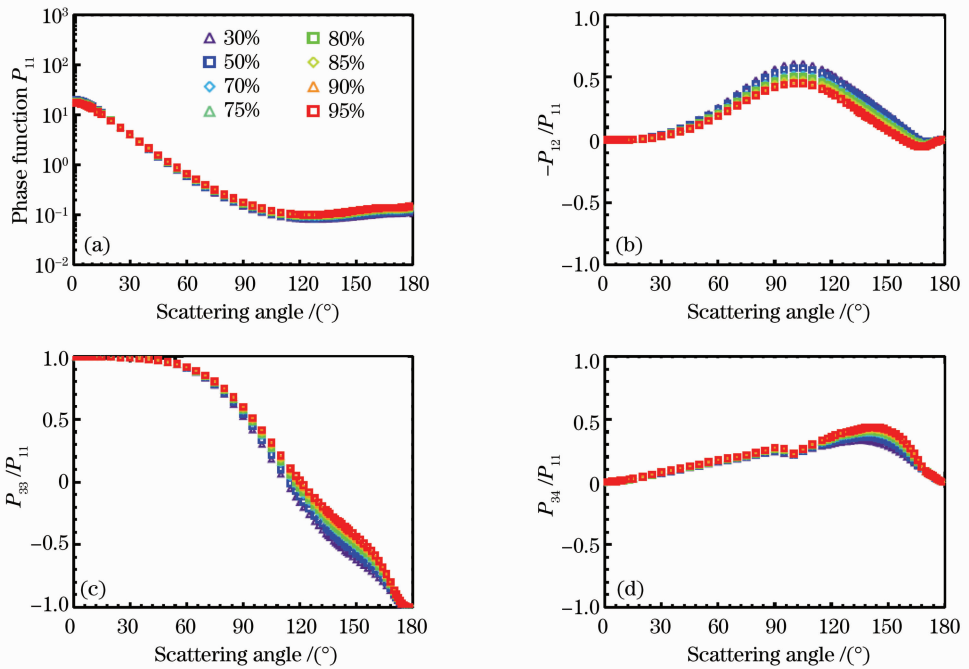


图 7 不同相对湿度条件下, 3.75 μm 波段, 沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化
 Fig. 7 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at 3.75 μm under different relative humidities

$-P_{12}/P_{11}$ 表示假定入射辐射为非偏振辐射时, 散射辐射的线偏振度。从图 3(b)~8(b)中可以看出, 对各波段, 在前向 (0°) 和后向 (180°) 方向上, $-P_{12}/P_{11}$ 为 0, 即在前向和后向无线偏振散射辐射, 整体上线偏振度沿散射角度变化较平滑, 在不同

波段上, 线偏振度 $-P_{12}/P_{11}$ 随湿度变化和散射角变化存在差异。具体的, 在紫外、可见、近红外和短波红外波段上沙尘气溶胶的线偏振度在前向散射半球内 (小于 90°) 数值较小, 受湿度的影响较小; 后向散射区内线偏振度要高于前向散射区, 随湿度变化明

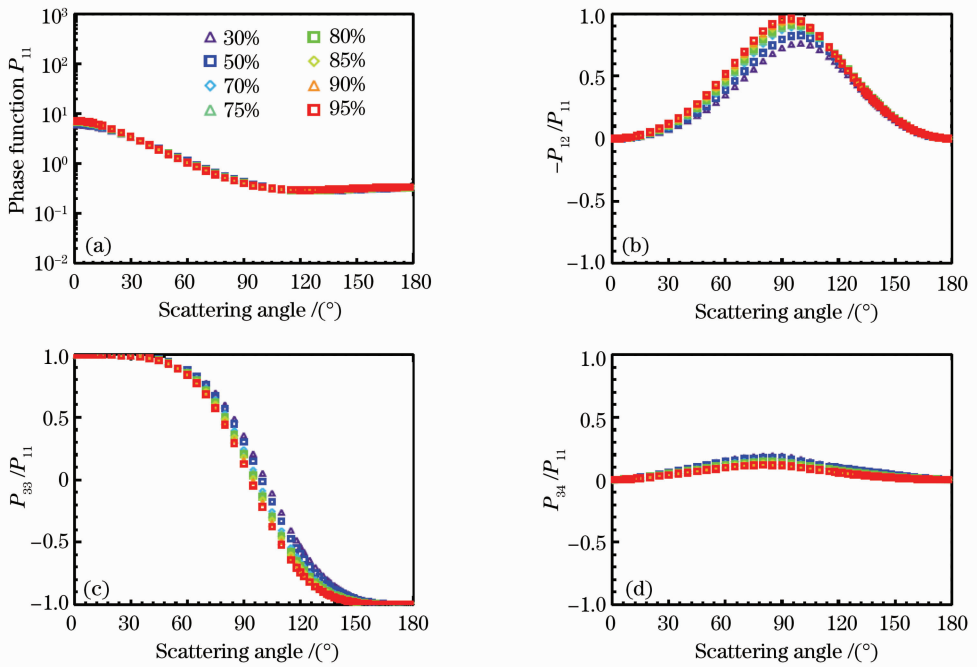


图 8 不同相对湿度条件下, 11.0 μm 波段, 沙尘粒子群散射相矩阵元素随散射角的变化

Fig. 8 Variation of scattering phase matrix elements of dust particles with scattering angle at 11.0 μm under different relative humidities

显, 随着湿度增加而增大, 特别在 $110^\circ \sim 170^\circ$ 后向散射区以拱形形式出现, 线偏振度先增大后减少, 峰值集中在散射角 $152^\circ \sim 158^\circ$ 附近, 相对湿度 95% 时, 峰值出现在散射角 153° 附近, 随着湿度的降低, 峰值降低并向后向漂移; 在中红外和热红外波段, 线偏振度随湿度变化较小, 总是正值, 随着散射角的增加线偏振度先增加后减小, 以拱形出现, 拱形区湿度差异明显, 最大值集中在 $95^\circ \sim 100^\circ$ 之间; 此外, 中红外波段, 线偏振度随湿度增大而减小, 而热红外波段, 线偏振度随湿度增大而增大。

P_{33}/P_{11} 表示假定入射辐射为右旋圆偏振辐射时, 散射辐射的圆偏振度。从图 3(c)~8(c) 中可以看出, 对各波段, 前向为 1, 后向为 -1, 圆偏振度最强, 在前向小于 30° 的前向散射区偏振度无显著变化, 在前向散射半球内, 圆偏振度变化相似, 逐渐减小, 且随湿度变化差异不明显; 在后向散射区各波段散射辐射的圆偏振度存在不同特征。具体的, 在紫外、可见、近红外和短波红外波段上圆偏振度在 $90^\circ \sim 168^\circ$ 后向散射区先减小后增大, 在 140° 处附近达到最小, 圆偏振度随湿度变化主要出现在圆偏振度上升沿, 随湿度的减小而变小, 这种趋势变化随波长增加逐渐变缓; 在大于 170° 的后向散射区 P_{33}/P_{11} 急速向 -1 值趋近; 在中红外波段, 圆偏振度随后向散射角度增大呈现近线性减小变化, 在 $110^\circ \sim 170^\circ$

的后向散射区随湿度变化明显, 随湿度增加而增大; 在热红外波段, P_{33}/P_{11} 在前向散射半球区为正, 后向散射区为负, 在高于 150° 的后向散射区圆偏振度也无显著变化, 该圆偏振度呈现以 90° 为中心的点对称变化。

P_{34}/P_{11} 是假定方位角为 -45° 的线性偏振入射辐射, 经沙尘气溶胶粒子群散射后散射辐射的圆偏振度, 从图 3(d)~8(d) 中可以看出, 对各波段, 前向和后向方向无偏振散射辐射, 该圆偏振度总是正值, 总体趋势随着散射角先增大后减小, 最大值出现在 $140^\circ \sim 150^\circ$ 之间, 峰值区附近受湿度影响明显; 相对湿度 95% 时, 峰值在 142° 附近, 随着湿度的减小峰值向后向漂移; 但对热红外波段, 该圆偏振度随散射角变化近乎无变化, 仅在 80° 处微微隆起; 此外, 在其他波段, 该圆偏振度在 $90^\circ \sim 105^\circ$ 出现跳异点, 在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 出现小拱形, 峰值在 175° , 这两种变化都随波长增加而趋缓。

3.3 理论分析与实验验证

不同湿度条件下, 不同波段上沙尘粒子群的散射和偏振特性存在差异, 这种特征差异主要是由折射指数的不同引起。从图 1 给出的不同相对湿度条件下沙尘气溶胶粒子的复折射指数实部和虚部, 可以看出, 可见光和近红外波段上复折射指数的实部和虚部都随着湿度的增加是减小的, 同时实部比虚

部要高出几十至几千倍量级,特别是在高湿度条件下,这就造成了沙尘粒子群在可见光、近红外波段上的散射要远强于吸收,即单次散射反照率值较高,且随着湿度增大而增大;短波红外上,虽然实部随湿度增加是增大的,但相对变化不大,同时实部仍高于虚部百倍量级,所以其单次散射反照率仍然较高,随湿度增加仍保持增大变化;而热红外波段上,实部随湿度增加而减小,虚部却随湿度增加而增大,两者在量级上也只差几倍,致使该波段上单次散射反照率变小,呈现出随湿度增加逐渐减小的趋势。

同样,不同波段处,相矩阵函数表现出的湿度差异也可由复折射指数进行部分解释,如关键散射角(最小或最大,其值随折射指数实部的增大而增大^[29,30])随湿度增大向小的散射角处漂移,但在中红外 3.75 μm 处,沙尘折射指数实部随湿度增大而增大(不同于其他波段),其相矩阵元素也表现出不同其他波段的特征:关键散射角随湿度向大散射角漂移,相矩阵元素值随湿度增加而减小。此外,Mie 散射理论指出,粒子大小与波长比值即粒子尺度参数可说明粒子的散射分布^[26,31],本文选择的海洋传输型沙尘粒子粒径大小是固定的,其粒子尺度参数随波长的增加而减小,对可见光和近红外波段,其粒子尺度参数要高于 1,沙尘粒子群的前向散射也远高于后向散射[图 3(a)~6(a)];对于短波红外和远红外波段,波长与粒子群等效半径相当或大于,其粒子尺度参数却小于 1,此时粒子群的前向散射虽高于后向散射但相差不大[图 7(a),8(a)]。

本文理论计算了不同湿度条件下沙尘粒子群的散射和偏振特性,结果的可信度需要实验或实测数据进行验证。为此,研究选择撒哈拉沙尘实验(SAMUM)实验期间,站点 Porte au Sahara 连续实际测量的沙尘数据对本文理论计算的单次散射反照率 ω 和相矩阵元素 P_{11} 进行了初步验证。SAMUM 实验期间,沙尘的单次散射反照率和散射相函数是从实测的气溶胶光学厚度值和 27 个不同方位上天空光辐射测量值反演获得^[32]。实验数据表明,可见光波段处沙尘的单次散射反照率在 0.9 以上,与本文的计算结果相符;图 5(a)也给出了 SAMUM 实验期间反演的 0.87 μm 波段上平均沙尘相位函数的角度分布,足见,与实验测量反演值相比,本研究计算的不同湿度下的相位函数的角度分布趋势是一致的,在前向散射区理论计算值与实际测量反演值的相对误差较小,后向散射区两者的相对误差变大。但由于实验测量反演值涉及的后向散射角度较少,

测量时湿度条件没有明确界定,同时反演方法本身也会带来一定的反演误差,因此,更深入细致的验证工作还需要更多的实验或实测数据。总的来说,本文研究的沙尘粒子群的散射和偏振特性具有一定的可信度。

4 结 论

基于 Mie 散射理论,结合对数正态分布函数分布的沙尘气溶胶粒子群,计算了 8 种相对湿度条件下,沙尘粒子群的光散射特性参数。在 0.2~40 μm 波段范围内,不同湿度下,沙尘粒子群的单次散射反照率变化趋势一致,除在 3.0,6.0 和 8.1 μm 附近出现跳跃性变化外,其他变化相对平滑。在可见光、近红外波段单次散射反照率随湿度增加而接近于 1,具有较大散射特性,而大于 10 μm 的热红外波段吸收性较强,随湿度增加而减小。对于 0.2~40 μm 内,散射光强受湿度影响较小,随散射角的增加呈现先减小后增大的趋势,前向散射远高于后向散射,随着波长增加散射光强减弱,且波段越大,后向散射区内的增大趋势越趋平缓。不同波段的入射光经沙尘粒子群散射产生的线偏振和圆偏振随散射角和湿度变化存在差异:散射光的偏振特性及其湿度差异主要表现在后向散射区,多以拱形形式体现,拱顶峰值散射角位置存在差异,且峰值散射角随湿度的降低向后向漂移;特别的,在热红外波段,线偏振呈现以 90°为中心的轴对称分布,入射光为圆偏振光时产生的圆偏振呈现以 90°为中心的点对称变化,入射光为-45°方位向的线性偏振光时产生的圆偏振变化起伏不大,同样以近 90°为中心的轴对称形式;在前向和后向仅对入射光为圆偏振光时产生圆偏振散射。最后从理论和实验数据对研究进行了初步的分析和验证,表明沙尘气溶胶粒子群的散射偏振特性具有一定的可信度。这些结论为沙尘气溶胶辐射、气候效应研究提供了前提和基础,为沙尘的可见光、红外遥感和偏振遥感技术研究提供了一定的参考。

值得注意的是,在自然界中气溶胶种类繁多,颗粒多以非球形形状存在,本文研究在一定湿度条件下,以球形湿沙尘气溶胶为研究对象,对沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性进行了研究分析,对于非球形的湿气溶胶粒子群的散射和偏振问题,以及沙尘气溶胶与其他类型气溶胶粒子散射特性的比较将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- 1 J. Haywood, O. Boucher. Estimates of the direct and indirect

- radiative forcing due to tropospheric aerosols; a review[J]. *Rev. Geophys.*, 2000, **38**(4): 513~543
- 2 V. Ramanathan, P. J. Crutzen, J. L. Kiehl *et al.*. Aerosol, climate, and hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, **294**(5549): 2119~2124
- 3 X. Yue, H. Wang, H. Liao *et al.*. Simulation of dust aerosol radiative feedback using the GMOD: 2. dust-climate interactions [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: D04201
- 4 Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Fang Xiaoming *et al.*. Dust storm in Asia continent and bio-environment effects in the North Pacific: a case study of the strongest dust event in April 2001 in central Asia [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2005, **50**(23): 2649~2655
韩永翔, 奚晓霞, 方小敏等. 亚洲大陆沙尘过程与北太平洋地区生物环境效应: 以2001年4月中旬中亚特大沙尘暴为例[J]. *科学通报*, 2005, **50**(23): 2649~2655
- 5 Gao Huiwang, Qi Jianhua, Shi Jinhui *et al.*. Long-range transport of dust and its effects on ocean ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(1): 1~8
高会旺, 祁建华, 石金辉等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(1): 1~8
- 6 A. J. Gabric, R. A. Cropp, G. H. McTainsh *et al.*. Australian dust storms in 2002~2003 and their impact on Southern Ocean biogeochemistry[J]. *Glob. Biogeochem. Cycle*, 2010, **24**: GB2005
- 7 N. M. Mahowald, A. R. Baker, G. Bergametti *et al.*. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean[J]. *Glob. Biogeochem. Cycle*, 2005, **19**: GB4025
- 8 Han Yongxiang, Fang Xiaomin, Zhao Tianliang. Long range trans-pacific transport and deposition of Asian dust aerosols[J]. *J. Environmen. Sci.*, 2008, **20**(4): 424~428
- 9 J. M. Prospero. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere; impact of African dust on the environment of the southeastern United States[J]. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, 1999, **96**: 3396~3403
- 10 Wang Hong, Shi Guangyu, T. Aoki *et al.*. Radiative forcing due to dust aerosol over east Asia-North Pacific region during spring, 2001[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2004, **49**(20): 2212~2219
- 11 H. R. Gordon, M. H. Wang. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS; a preliminary algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**: 443~452
- 12 R. S. Fraser, Y. J. Kaufman. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing[J]. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, 1985, **23**(5): 625~633
- 13 S. Irina, G. George. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosols[J]. *Atmos. Environ.*, 1993, **27A**(16): 2509~2517
- 14 Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Shi Guangyu *et al.*. Aerosol optical characteristics in Mu Us Desert under weather conditions of dust storm and haze [J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, **11**(3): 122~125
车慧正, 张小曳, 石广玉等. 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特征 [J]. *中国粉体技术*, 2005, **11**(3): 122~125
- 15 Cheng Tiantao, Shen Zhibao. A numerical simulation of optical characteristics for atmospheric dust aerosol in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology*, 2001, **20**(3): 291~297
成天涛, 沈志宝. 中国西北大气沙尘光学特性的数值试验[J]. *高原气象*, 2001, **20**(3): 291~297
- 16 Hao Li, Yang Wen, Wu Tongwen *et al.*. Optical properties and radiative forcing effect of dust aerosol[J]. *J. Desert Research*, 2010, **30**(6): 1477~1482
郝丽, 杨文, 吴统文等. 沙尘气溶胶的光学特性及辐射强迫效应[J]. *中国沙漠*, 2010, **30**(6): 1477~1482
- 17 Li Shugang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. The absorption and extinction of infrared radiation in lower atmosphere by sand storm [J]. *Chinese J. Radio Science*, 2003, **18**(1): 43~47
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 沙尘暴对低层大气红外辐射的吸收和衰减[J]. *电波科学学报*, 2003, **18**(1): 43~47
- 18 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli *et al.*. Extinction character of one sand and dust blowing[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 566~567, 575
李学彬, 徐青山, 魏合理等. 1次沙尘暴天气的消光特性研究 [J]. *激光技术*, 2008, **32**(6): 566~567, 575
- 19 Ma Jinji, Cheng Jin. Using the Mie theory to calculate aerosol optical characterization [J]. *J. Atom. & Mol. Phys.*, 2005, **22**(4): 701~707
麻金继, 陈瑾. 用Mie散射理论计算大气气溶胶光学特性[J]. *原子与分子物理学报*, 2005, **22**(4): 701~707
- 20 Shao Shiyong, Huang Yinbo, Wei Heli *et al.*. Phase function of prolate spheroidal mono-disperse aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 108~113
邵士勇, 黄印博, 魏合理等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 108~113
- 21 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 501001
孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 501001
- 22 Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 501002
卫晓东, 张华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 501002
- 23 G. Hänel. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air[J]. *Adv. Geophys.*, 1976, **19**: 73~118
- 24 L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transf.*, 2009, **110**: 533~572
- 25 S. Lekhtmakher, M. Shapiro. About randomness of aerosol size distributions [J]. *J. Aerosol Science*, 2005, **36**(12): 1459~1467
- 26 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed., San Diego: Academic Press, 2002. 176~195
- 27 Xiang Jiansheng, He Junhua. Numerical calculation of Mie theory[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(3): 363~366
项建胜, 何俊华. Mie光散射理论的数值计算方法[J]. *应用光学*, 2007, **28**(3): 363~366
- 28 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: Wiley Press, 1983. 99~116
- 29 A. A. Kokhanovsky. Integral scattering characteristics of light scattering by big spherical particles with the relative refractive index below unity[J]. *Opt. Spectrosc.*, 1989, **67**: 93~95
- 30 N. Fiedler-Ferrari, H. M. Nussenzweig, W. J. Wiscombe. Theory of near-critical-angle scattered from a curved interface [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **43**(2): 1005~1038
- 31 Hao Zengzhou, Pan Delu, Gong Fang *et al.*. Optical radiance characteristics of sea fog based on remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2420~2426
郝增周, 潘德炉, 龚芳等. 海雾的遥感光学辐射特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2420~2426
- 32 W. Von Hoyningen-Huene, T. Dinter, A. A. Kokhanovsky *et al.*. Measurements of desert dust optical characteristics at Port au Sahara during SAMUM [J]. *Tellus*, 2009, **61B**: 206~215