

# 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析

卫晓东<sup>1,2</sup> 张 华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国气象科学研究院, 北京 100081  
<sup>2</sup> 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

**摘要** 将 T 矩阵方法与几何光学方法相结合, 精确计算了从太阳短波到红外谱段具有一定形状分布和谱分布的非球形沙尘粒子的光学特性, 并与等体积球形沙尘的光学特性进行了比较。结果表明: 1) 相比沙尘粒径大小分布对沙尘气溶胶消光效率因子, 单次散射反照率以及不对称因子的影响, 沙尘形状对上述参数的影响明显偏小; 2) 非球形与球形沙尘粒子的相函数在短波区存在显著差异, 这种差异在卫星探测常用的可见光区达到最大, 并且随着散射角的变化具有一定的规律; 3) 在短波区, 雷达方程中的消光后向散射比受沙尘形状的影响比较显著, 因此在利用雷达方程反演沙尘气溶胶光学厚度时应考虑非球形效应。

**关键词** 大气光学; 光学特性; T 矩阵方法; 几何光学方法; 沙尘气溶胶; 非球形粒子

**中图分类号** P415.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0501002

## Analysis of Optical Properties of Nonspherical Dust Aerosols

Wei Xiaodong<sup>1,2</sup> Zhang Hua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China  
<sup>2</sup> Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration,  
Beijing 100081, China

**Abstract** The optical properties of nonspherical dust aerosols in the wavelength range of 0.2~40  $\mu\text{m}$  are calculated by combination of T-matrix method and an improved geometric optics under the conditions of representative shape distribution and size distribution. By comparing the optical properties of dust particles between nonspherical and isochoric sphere hypothesis. It is found that 1) the shape of dust aerosols has a smaller influence on the extinction efficiency factor, scattering albedo and asymmetry factor compared to the size distribution; 2) the difference of phase function between nonspherical and spherical dust aerosols in the short-wave region is significant, especially in the visible region, and they change with different scattering angles; 3) in short-wave region, the extinction-to-backscattering ratio in the so-called lidar equation is affected by the shape of dust aerosols greatly, therefore, the nonspherical effects should be considered in the retrieval of dust optical thickness by using the lidar equation.

**Key words** atmospheric optics; optical properties; T-matrix method; geometric optics method; dust aerosol; nonspherical particle

**OCIS codes** 010.0010; 010.1110; 010.1290; 010.3920; 290.1350

## 1 引 言

沙尘气溶胶具有特殊的光学特性, 它既可以通

过强烈散射太阳辐射使地面和低层大气获得的太阳辐射减少, 它也可以吸收地面发射的长波辐射使对

**收稿日期**: 2010-11-08; **收到修改稿日期**: 2011-01-06

**基金项目**: 国家科技支撑计划(2008BAC40B02)、国家 973 计划(2011CB403405)和科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906020)资助课题。

**作者简介**: 卫晓东(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。

E-mail: weixiaodong007@163.com

**导师简介**: 张 华(1965—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事温室气体、气溶胶和云的辐射强迫与气候效应等方面的研究。E-mail: huazhang@cma.gov.cn

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

流层顶出射的净辐射减少。此外,与其他气溶胶粒子不同,实验室以及观测数据表明:沙尘粒子的形状在很大程度上都是不规则的<sup>[1,2]</sup>。目前在辐射传输模式以及遥感应用中针对沙尘粒子光学特性的研究广泛采用的是洛伦兹-米氏(Lorenz-Mie)理论,但运用该方法需要满足3个条件:沙尘粒子为理想的球形,内部混合均匀,表面为镜表面。而实际存在的沙尘粒子既不是球形也不是均质,因此,采用洛伦兹-米氏散射理论来计算沙尘的光学特性,在一定程度上会影响计算结果的精度和准确性。

近年来,国外有许多研究用不同方法从不同角度证实了非球形沙尘粒子的散射与球形沙尘粒子的散射具有很大差别<sup>[3-5]</sup>。其中Yang等<sup>[4]</sup>将T矩阵与几何光学方法结合起来计算椭球沙尘粒子的光学特性,并与球形沙尘粒子对比后指出:两种计算结果在相函数,尤其是后向散射相函数,差异较大,但是文中假设沙尘粒子的形状均为纵横比为1.7的扁椭球粒子,另外文献<sup>[4]</sup>没有指出红外波段非球形与球形沙尘光学特性的差异;Fu等<sup>[5]</sup>比较了纵横比为1.7的扁椭球沙尘粒子与等体积等表面积球形沙尘粒子光学特性的差别,指出用等体积等表面积的球形粒子代替非球形沙尘粒子的误差主要表现在相函数上,但是该结论局限于0.55  $\mu\text{m}$  波长处;Mishchenko等<sup>[3]</sup>用T矩阵方法验证了用具有不同纵横比的多分散系椭球粒子模拟非球形沙尘粒子光学特性的可行性,但是该结论局限于特定的复折射指数和谱分布下。国内也有研究<sup>[6,7]</sup>用不同方法分析了非球形与球形粒子的散射差异,这些研究针对单个气溶胶粒子在单一波长下的光学特性进行对比分析,而大气气溶胶在真实大气中具有不同谱分布并且在不同波长下光学特性具有较大差别,因此对不同波长下非球形气溶胶的光学特性进行分析是十分必要的。本文在前人研究工作的基础上,将T矩阵方法与改进的几何光学方法相结合,详细计算和讨论了从太阳短波到红外波段下椭球形沙尘气溶胶的光学特性,并与等体积球形沙尘气溶胶的光学特性进行了比较。

## 2 计算方法与物理量介绍

### 2.1 计算方法简介

T矩阵方法是由Waterman<sup>[8]</sup>于1971年引进的。目前最有效的T矩阵数值计算程序是Mishchenko和Travis<sup>[9]</sup>于1994年建立的适用于随机取向且具有对称轴粒子的算法,该数值算法已在小椭球粒子光学性质的计算中得到广泛应用<sup>[4,5,10]</sup>。

当粒子尺度参数较大时,几何光学概念可以用来计算非球形粒子的光学特性。Yang和Liou<sup>[11]</sup>于1996年发展了一种改进的几何光学算法(IGOM),可以用来准确计算具有较大尺度参数的非球形粒子光学特性。

到目前为止,没有一个单一的数值算法可以计算从瑞利到几何光学粒子尺度范围内的非球形粒子的单次散射光学特性,本文将T-matrix方法<sup>[12]</sup>与IGOM<sup>[11]</sup>方法相结合,分别用于计算粒子尺度参数小于50和大于50时的非球形粒子的单次散射特性。

球形沙尘粒子散射特性的计算是基于经典的洛伦兹-米氏散射理论,采用已经得到广泛使用的Wiscombe数值算法<sup>[13]</sup>和计算程序。

### 2.2 物理量介绍

实际沙尘粒子的形状极不规则,没有严格的几何形状,根据实际沙尘的不规则形状计算其光学性质不会导致误差,但是针对这些不规则形状的数值方法无法覆盖实际沙尘的粒径范围并且计算非常耗时<sup>[14]</sup>,因此根据实际沙尘的不规则形状计算其光学性质不具备可行性。

本文研究中用旋转对称的椭球形近似非球形沙尘粒子的形状,这种近似具有以下优点:首先该形状仅决定于两个参数即纵横比和等体积半径,因此在传统球形模型的基础上假定纵横比即可确定非球形沙尘的形状;其次根据2.1节中所述方法可以准确高效地计算椭球粒子的光学特性;最后观测结果表明:虽然各种不规则形状的沙尘粒子光学特性差别较大,但是实际沙尘粒子以多粒径分散系的形式存在,其光学特性是考虑各种形状权重后的光学特性,而这种平均后的光学特性与不同纵横比的椭球粒子平均后的光学特性差别比较接近<sup>[3]</sup>。

旋转对称的椭球形是椭圆的横轴 $b$ 绕纵轴 $a$ 旋转而成。纵横比 $R_{a/b} < 1$ 时旋转椭球体为扁椭球体,形状类似于圆盘形;纵横比 $R_{a/b} > 1$ 时旋转椭球体为长椭球体,形状类似于针形<sup>[3]</sup>。本文将沙尘形状划分为 $R_{a/b}$ 的值为1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.2和2.4的长椭球和横纵比 $R_{b/a}$ 的值为1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.2,2.4的扁椭球共14种,并且每种形状沙尘占的比例相等。

复折射指数是计算气溶胶光学特性的重要参数,由构成粒子的化学成分决定,随着气溶胶源区地理位置不同存在很大差异<sup>[15]</sup>。本文采用王宏等<sup>[16]</sup>总结的0.2~40  $\mu\text{m}$  光谱范围内东亚沙尘的复折射指数。

由于实际气溶胶粒子大小并不均一,因此必须

考虑用一种粒径大小分布函数(即气溶胶谱分布)来代表气溶胶粒子的实际分布,从而通过积分得到整体气溶胶的光学特性。沙尘气溶胶粒子中尺度较小的粒子相对集中,因此采用对数正态分布描述沙尘粒子分布,谱分布参数采用与东亚沙尘气溶胶最接近的 OPAC 模型,该模型将沙尘气溶胶分为核膜态(MINM),积聚态(MIAM),粗模态(MICM)以及传输态(MITR)4种模态<sup>[17]</sup>。

描述粒子对辐射传输影响的光学参数分别为消光效率因子  $Q_e$ 、单次散射反照率  $\omega$ 、不对称因子  $g$  以及相函数  $P_{11}$ ,单个沙尘粒子的光学参数分别采用椭球和等体积球形来计算,在此基础上用 OPAC 谱分布参数计算不同谱分布下的光学特性<sup>[5]</sup>。此外,本文还分析了雷达反演气溶胶中的常用参数消光后向散射比  $R_{cb}$ <sup>[18]</sup>。

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 单分散系椭球沙尘粒子的光学特性

在分析具有一定形状分布和谱分布的椭球沙尘粒子的光学特性之前,首先通过单分散椭球沙尘粒子的光学特性来详细说明本文所采取的计算过程。

图 1 给出了 T-matrix 方法与 IGOM 计算的单分散系椭球沙尘粒子在波长  $0.55 \mu\text{m}$  纵横比  $R_{a/b}=1.7$  时光学特性随尺度参数的变化,根据 2.1 节所述两种方法的特点,T-matrix 方法和 IGOM 分别用来计算尺度参数在  $0.5\sim 50$  和  $20\sim 800$  的粒子。对比两种方法在尺度参数  $20\sim 50$  的结果发现,该区域属于 T-matrix 方法到 IGOM 的过渡区,在该区域 T-matrix方法与 IGOM 计算的消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的差别较小,由于前者的计算精度较高<sup>[14]</sup>,因此用 IGOM 计算较大尺度参数沙尘粒子的光学特性是可行的。椭球沙尘粒子在其他波长和纵横比的情况下用两种方法的计算结果与上述结果一致,因此本文在计算从太阳短波到红外谱段椭球沙尘粒子的光学特性时,分别用 T-matrix 方法和 IGOM 计算尺度参数小于或等于 50 和尺度参数大于 50 的椭球沙尘光学特性。图 1 为 T-matrix 方法与 IGOM 计算的椭球沙尘粒子在波长为  $0.55 \mu\text{m}$  纵横比  $R_{a/b}=1.7$  时光学性质的对比, $x$  轴是用椭球沙尘等体积半径表示的尺度参数, $x$  值在  $0.5\sim 50$  的曲线为 T-matrix 方法计算结果, $x$  值在  $20\sim 800$  的曲线为 IGOM 计算结果。

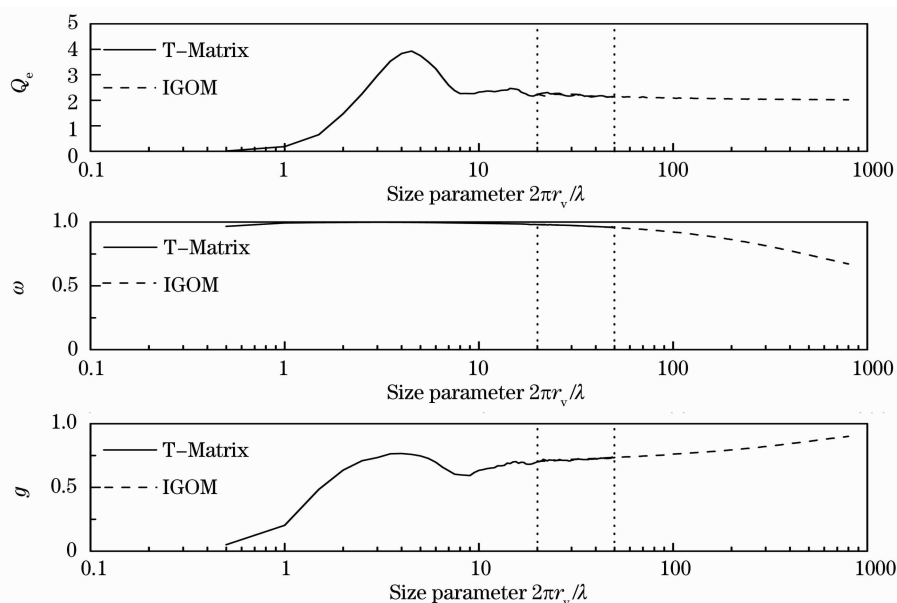


图 1 T-matrix 方法与 IGOM 方法计算结果的比较

Fig. 1 Comparison of the calculation result between the T-matrix and IGOM method

#### 3.2 消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的对比分析

消光效率因子是粒子从入射能中移除的总能量与粒子几何面积的比,反应了气溶胶对辐射传输的衰减作用强弱。单次散射反照率体现了气溶胶散射

占辐射传输衰减的比例。沙尘气溶胶的相函数在  $0^\circ$  散射角普遍有尖峰,所以沙尘不对称因子表示了前向散射的相对强度<sup>[19]</sup>。上述 3 个参量是影响沙尘气溶胶辐射传输过程的重要参量,下文详细给出这 3 个参量的对比分析。

图 2 是四种模态球形沙尘粒子的消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子从短波到红外谱段的变化。如图 2(a)所示,四种模态沙尘气溶胶在可见光区的消光作用差别较小,长波区差异明显。在长波区 MICM 消光作用最强,尤其是在 10  $\mu\text{m}$  附

近消光存在一个极大值,比 MINM 消光效率因子大 1~2 个数量级;MITR 次之,并且与 MIAM 的消光作用差别最小;MINM 的消光作用最弱,在 4~40  $\mu\text{m}$  的消光接近 0。上述差别是由于所采用的谱分布差别<sup>[17]</sup>所致。

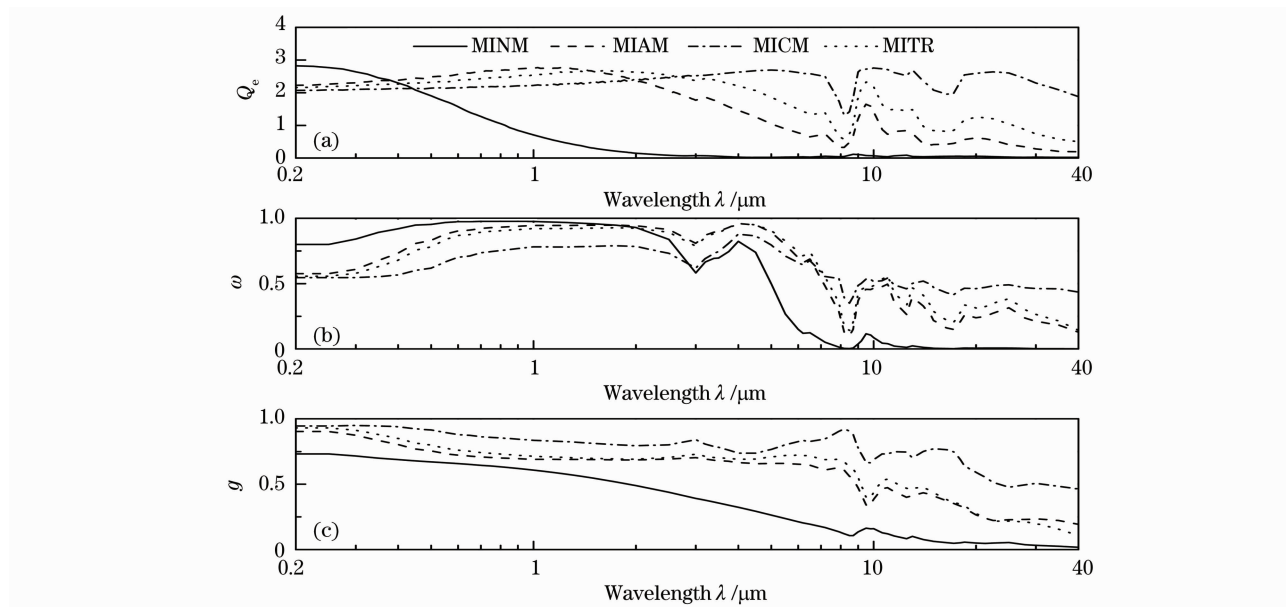


图 2 短波到红外谱段 4 种模态沙尘气溶胶的消光效率因子  $Q_e$  (a), 单次散射反照率  $\omega$  (b) 以及不对称因子  $g$  (c) 随波长的变化

Fig. 2 Change of (a) extinction efficiency factors  $Q_e$ , (b) single scattering albedo  $\omega$  and (c) asymmetrical factors  $g$  of four types of dust aerosols with wavelength

由图 2(b)可见,四种模态气溶胶在短波区的单次散射反照率均大于 0.5,并且在可见光区单次散射反照率达到最大,MINM、MIAM、MICM 以及 MITR 的最大值依次为 0.98, 0.95, 0.88 和 0.93;在长波区四种模态气溶胶的单次散射反照率显著减小,而且不同模态差异明显增大,其中 MICM 与 MINM 相差 1~2 个数量级。另外由图 2(b)可见,在短波区,MINM 沙尘比其他三种模态沙尘的单次散射反照率大,说明小粒子沙尘的散射性最强,而在长波区则相反。

由图 2(c)可见不对称因子随着波长的增大而减小,这是由于随着波长的增大尺度参数在减小,而随着尺度参数的减小,散射更趋近于各向同性的瑞利散射,不对称因子也趋近于 0。另外由图 2(c)可见,从太阳短波到红外谱段范围内 MINM 沙尘粒子比其他 3 种模态的不对称因子小,在短波区 MINM 沙尘粒子与其他 3 种模态沙尘粒子的不对称因子差别较小,在长波区差异显著增大。

图 3 是分别用椭球体与等体积球体计算的沙尘粒子消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的比值随波长的变化。由图 3 可见,与不同模态

沙尘气溶胶光学特性的差异相比,椭球形与球形沙尘之间的光学特性差异不大。

由上述分析可知, MICM 沙尘是决定沙尘气溶胶消光强弱的主要成分,而由图 3(a)可见四种沙尘模态中, MICM 沙尘在椭球和球形两种情况下的消光差别最小,且相对误差在  $\pm 5\%$  以内。对于 MIAM 和 MITR 沙尘,用椭球形与等体积球形计算的消光效率因子相对误差在  $\pm 10\%$  以内。MINM 沙尘在两种形状下长波消光差别波动较大,但由上述分析可知 MINM 在长波的消光接近 0,因此,由粒子形状造成的这种消光差异可以忽略。

如图 3(b)所示,在整个波段范围内椭球形与等体积球形计算的四种模态沙尘单次散射反照率相对误差在  $\pm 5\%$  以内,在散射起主要作用的短波区二者差别最小,其相对误差在  $\pm 2\%$  之内,这种差别也小于沙尘粒径大小不同所导致的单次散射反照率差别。

如图 3(c)所示,在整个波段范围内椭球形与等体积球形计算的沙尘不对称因子相对误差在  $\pm 8\%$  以内,这个结果与 Mishchenko 等<sup>[3]</sup>对不同尺度参数的椭球形与球形沙尘在指数谱分布下的对比结果一致。

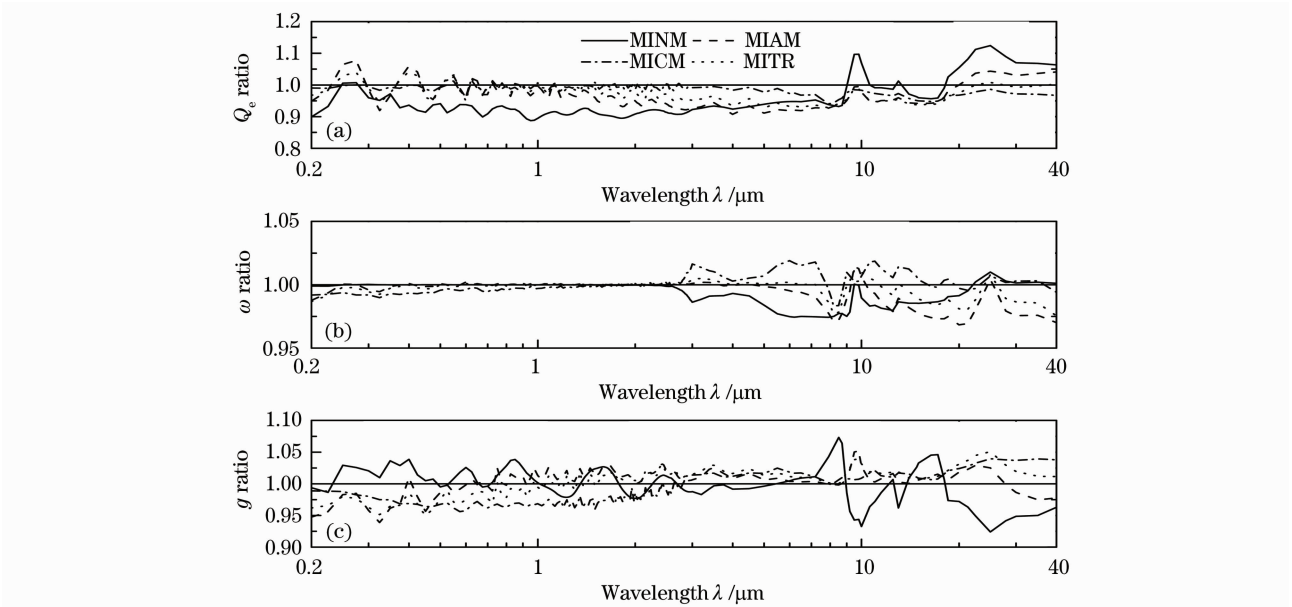


图 3 短波到红外谱段椭球与球形沙尘气溶胶消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的比值随波长的变化  
 Fig. 3 Change of ratios of extinction efficiency factors, single scattering albedo and asymmetrical factors of spheroid to those of sphere dust aerosol with wavelength from ultraviolet to infrared band

### 3.3 相函数对比

相函数是散射角的函数,它代表散射能的角分布。在卫星探测反演气溶胶光学厚度时,气溶胶的光学厚度与双向反射比、单次散射反照率以及散射相函数有直接关系,除双向反射比由实测获得外,单次散射反照率以及散射相函数则由气溶胶的尺度分布计算得到,因此,相函数在卫星探测反演气溶胶光学厚度中起着至关重要的作用。

图 4 和图 5 分别给出 MINM 与 MICM 沙尘气溶胶从短波到红外谱段椭球沙尘与球形沙尘相函数的比值,MIAM 与 MITR 两种形状相函数的比值与 MICM 的规律相类似,此处不再赘述。综合图 4,5 可以看出,从 MINM 到 MICM,随着粒子几何平均半径的增大,椭球形与球形相函数的差异也变大,而且对于这两种模态的沙尘,相函数差异都是在短波区大于长波区,尤其是在可见光区差异达到最大。

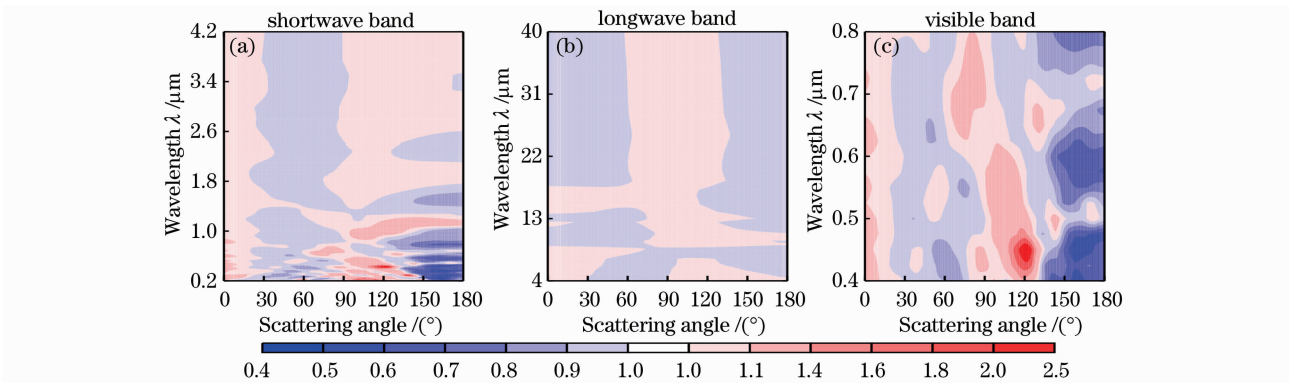


图 4 短波到红外谱段 MINM 椭球沙尘与球形沙尘相函数的比值随波长的变化  
 Fig. 4 Change of ratios of phase function of spheroid to that of sphere for nucleus mode dust aerosols with wavelength from ultraviolet to infrared band

由图 5 可以看出, MICM 沙尘在短波区相函数差异最明显,尤其是在可见光区,这种差别可以根据散射角分为三个区域:  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,  $90^\circ \sim 150^\circ$  以及  $150^\circ \sim 180^\circ$ , 其中前向散射(散射角位于  $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 差异较小, 后向散射(散射角位于  $90^\circ \sim 180^\circ$ ) 差异较大。短波区

散射角位于  $90^\circ \sim 150^\circ$  时, 椭球沙尘比球形沙尘的相函数偏大。在可见光区散射角位于  $90^\circ \sim 150^\circ$  时, 对于消光作用最强的 MICM 沙尘, 椭球沙尘的相函数是球形沙尘相函数的 10 倍。短波区散射角位于  $150^\circ \sim 180^\circ$  时, 椭球沙尘比球形沙尘的相函数偏小。

在可见光区散射角位于  $150^\circ \sim 180^\circ$  时,对于消光作用最强的 MICM 沙尘,椭球沙尘的相函数是球形沙尘相函数的  $10\% \sim 30\%$ 。另外,虽然 MINM 沙尘相函数的差异整体偏小,但是在可见光区散射角位于  $150^\circ \sim 180^\circ$  之间时,椭球沙尘比球形沙尘的相函

数明显偏小。

对于 MINM 与 MICM 沙尘,在长波区椭球形与球形相函数的比值均介于  $0.9 \sim 1.1$ ,因此这种差异相比于短波区而言可以忽略,而且长波区的相函数差异没有显著的规律。

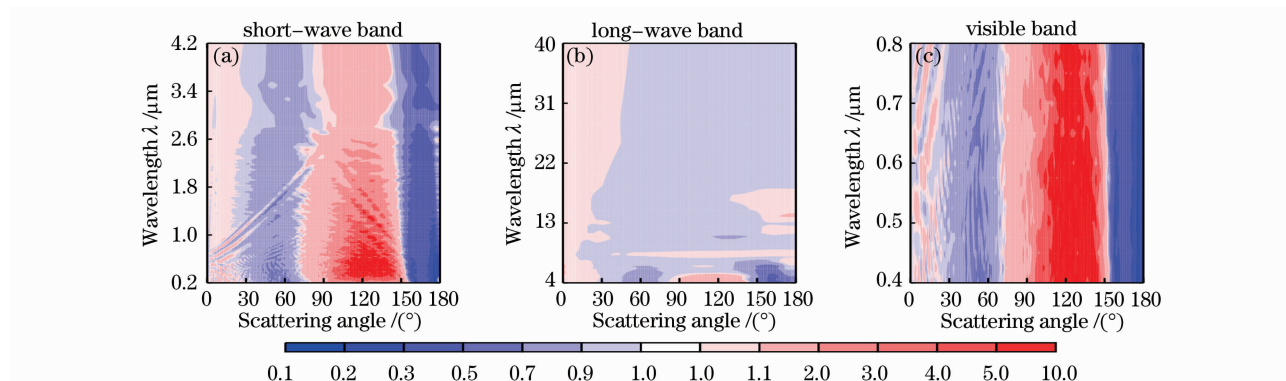


图 5 短波到红外波段 MICM 椭球沙尘与球形沙尘相函数的比值

Fig. 5 Change of ratios of phase function of spheroid to that of sphere for coarse mode dust aerosols with wavelength from ultraviolet to infrared band

由 3.2 节可知沙尘气溶胶在可见光区的散射消光最强,卫星探测沙尘气溶胶时通常采用可见光通道,而由上述分析可知椭球形与球形沙尘在可见光区的后向散射差异最为明显,而卫星探测气溶胶时主要采用后向散射信号,因此,在卫星探测沙尘气溶胶时应该考虑非球形对沙尘相函数的影响。

由于可见光区椭球与球形相函数差别最大并且该区域对气溶胶遥感非常重要,图 6 比较了 MICM 椭球与球形沙尘在  $0.532 \mu\text{m}$  的相函数随散射角的变化。与上述分析一致,前向散射差异较小,后向散射差异较大。另外由图可见在散射角位于  $90^\circ \sim 150^\circ$  时球形沙尘相函数起伏较大,而椭球沙尘的相函数更加平滑,而实际沙尘的相函数变化趋势也十分平滑<sup>[3,14]</sup>,因此用具有一定形状分布的椭球沙尘可以更好的描述实际沙尘的相函数分布。

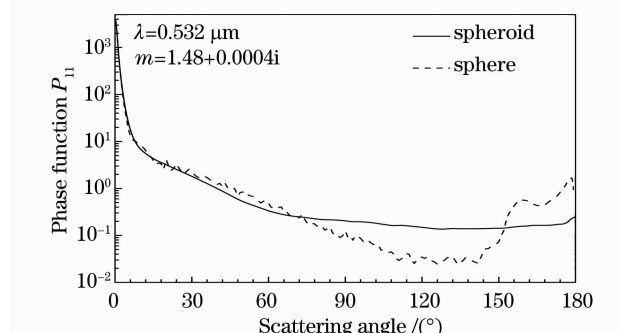


图 6 粗模态椭球与球形沙尘在  $0.532 \mu\text{m}$  的相函数

Fig. 6 Phase functions of coarse mode dust aerosol based on spheroids and spheres at the wavelength of  $0.532 \mu\text{m}$

### 3.4 消光后向散射比的对比分析

消光后向散射比在雷达方程中决定后向散射系数与消光系数的参数化关系<sup>[18]</sup>,它是激光雷达反演气溶胶光学厚度中的一个重要参数。对于洛伦兹-米氏形粒子,根据消光后向散射比的表达式可知其与粒子的复折射指数和谱分布有关。由 3.3 节可知形状对沙尘相函数的影响较大,因此根据消光后向散射比的表达式可推知沙尘气溶胶的消光后向散射比与沙尘形状有关。如图 7 所示,在短波区椭球沙尘与球形沙尘的消光后向散射比有较大差别,其中消光作用最强的粗模态沙尘在两种形状下的消光后向散射比差异最明显,因此沙尘气溶胶的消光后向

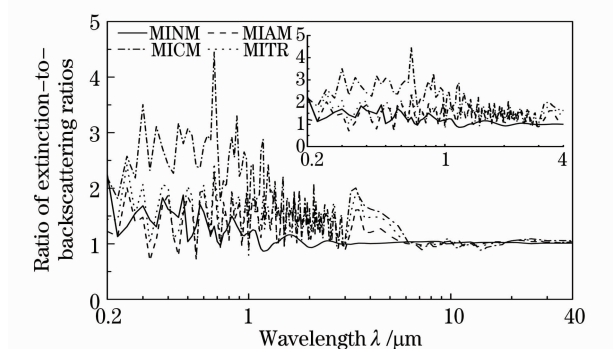


图 7 短波到红外波段椭球沙尘与球形沙尘消光后向散射比的比值随波长的变化

Fig. 7 Change of ratios of extinction-to-backscattering ratios of spheroid to that of sphere with wavelength from ultraviolet to infrared band

散射比除了与粒子的复折射指数以及谱分布有关外,还要考虑沙尘粒子形状的影响。另外,由图 7 可见,在长波区椭球沙尘与球形沙尘的消光后向散射比没有明显的差异,由第 3.3 节分析可知,这是因为长波区二者的相函数差别较小。

由于激光雷达探测气溶胶通常采用小于  $1\ \mu\text{m}$  的短波波段,如图 7 所示这个区域椭球沙尘与球形沙尘的消光后向散射比差异最为显著,因此,在用激光雷达反演沙尘气溶胶光学厚度时考虑非球形效应是非常必要的。

由于短波波段椭球与球形消光后向散射比差异明显,并且激光雷达探测气溶胶通常采用小于  $1\ \mu\text{m}$  的短波波段,图 8 给出了短波波段四种模态椭球沙尘的消光后向散射比随波长的变化。由图 8 可见,在  $0.2\sim 0.5\ \mu\text{m}$  范围内不同模态椭球沙尘的消光后向散射比随波长的变化起伏较大,其中 MINM 与 MICM 的起伏最明显;在激光雷达探测常用的  $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$  范围内,四种模态椭球沙尘的消光后向散射比随波长的变化起伏较小,MINM,MIAM,MITR 和 MICM 的消光后向散射比数值分别维持在 5,2,2 和 4 附近。另外由图 8 可见,除 MINM 以外,其他三种模态椭球沙尘的消光后向散射比在波长  $3\ \mu\text{m}$  附近有个明显的峰值。

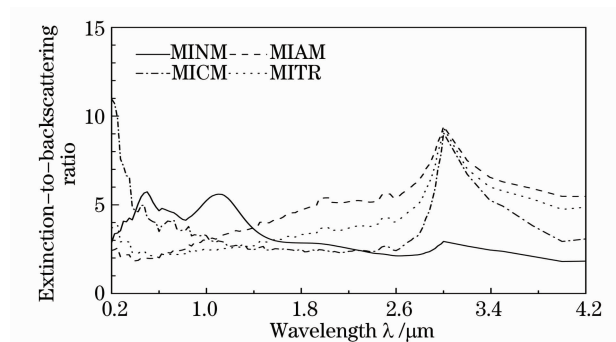


图 8 短波波段四种模态椭球沙尘的消光后向散射比随波长的变化

Fig. 8 Change of extinction-to-backscattering ratios of spheroid for four modes with wavelength in short-wave band

## 4 结 论

本文将 T 矩阵算法与几何光学方法相结合来计算椭球沙尘粒子的光学特性,并在此基础上讨论了形状对沙尘光学特性的影响。研究表明,与沙尘粒径大小分布对沙尘气溶胶消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的影响相比,沙尘形状对

上述参数的影响明显偏小。

椭球与球形沙尘的相函数在卫星探测常用的可见光区达到最大。在可见光区散射角位于  $0^\circ\sim 90^\circ$  时椭球与球形相函数的差异较小;在散射角位于  $90^\circ\sim 150^\circ$  时,椭球比球形沙尘的相函数偏大,在这个区域 MICM 椭球沙尘是球形沙尘相函数的 10 倍;当散射角位于  $150^\circ\sim 180^\circ$  时,椭球比球形沙尘的相函数偏小,在这个区域 MICM 椭球沙尘是球形沙尘相函数的 10%~30%。因此,在卫星反演气溶胶光学厚度过程中必须考虑非球形对沙尘相函数的影响。

最后,对消光后向散射比的研究表明,在短波区沙尘气溶胶的消光后向散射比除了与粒子的复折射指数以及谱分布有关外,也要考虑沙尘粒子形状的影响,因此,在用激光雷达反演沙尘气溶胶光学厚度时也应该考虑沙尘的非球形效应。

**致谢** 感谢美国德克萨斯 A&M 大学大气科学系杨平教授和美国华盛顿大学大气科学系傅强教授对本文的指导和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Gao, J. R. Anderson. Characteristics of Chinese aerosols determined by individual-particle analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D16): 18037~18045
- 2 K. Okada, J. Heintzenberg, K. Kai *et al.*. Shape of atmospheric mineral particles collected in three Chinese arid-regions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(16): 3123~3126
- 3 M. I. Mishchenko, L. D. Travis, R. A. Kahn *et al.*. Modeling phase functions for dust tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D14): 16831~16847
- 4 P. Yang, Q. Feng, G. Hong *et al.*. Modeling of the scattering and radiative properties of nonspherical dust aerosols [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2007, **38**(10): 995~1014
- 5 Q. Fu, T. J. Thorsen, J. Su *et al.*. Test of Mie-based single-scattering properties of non-spherical dust aerosols in radiative flux calculations [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2009, **110**(14-16): 1640~1653
- 6 Gong Chunwen, Wei Heli, Li Xuebin *et al.*. The influence of the aspect ratio to the light scattering properties of cylinder ice particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1155~1159  
宫纯文, 魏合理, 李学彬等. 取向比对圆柱状冰晶粒子光散射特性的影响 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1155~1159
- 7 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
- 8 P. C. Waterman. Symmetry, unitarity, and geometry in electromagnetic scattering [J]. *Phys. Rev. D*, 1971, **3**(4): 825~839
- 9 M. I. Mishchenko, L. D. Travis. T-matrix computations of light scattering by large spheroidal particles [J]. *Opt. Commun.*,

- 1994, **109**(1-2): 16~21
- 10 Ping Yang, Heli Wei, Hung-Lung Huang *et al.*. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(26): 5512~5523
- 11 P. Yang, K. N. Liou. Geometric-optics-integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(33): 6568~6584
- 12 M. I. Mishchenko, L. D. Travis, A. A. Lacis. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles [M]. Eds. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2002. 445
- 13 W. J. Wiscombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1505~1509
- 14 O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok *et al.*. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(D11208): 1~34
- 15 J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs *et al.*. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 881
- 16 Wang Hong, Shi Guangyu, T. Aoki *et al.*. Radiative forcings of dust aerosol over East Asia-North Pacific in 2001 spring [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(19): 1993~2000  
王宏, 石广玉, T. Aoki 等. 2001年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫 [J]. *科学通报*, 2004, **49**(19): 1993~2000
- 17 M. Hess, P. Koepke, I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds; the software package OPAC [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**(5): 863~844
- 18 G. L. Stephens. Remote Sensing of the Lower Atmosphere: an Introduction [M]. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1994. 486
- 19 Liou Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition) [M]. Guo Caili, Zhou Shijian Transl. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 108  
廖国男. 大气辐射导论(第2版) [M]. 郭彩丽, 周诗健译. 北京:气象出版社, 2004. 108