

文章编号: 0253-2239(2010)05-1506-05

沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究

孙贤明 王海华 刘万强 申 晋

(山东理工大学电气与工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要 计算沙尘暴对电磁波的衰减特性,以及利用卫星反射率遥感反演沙尘暴的光学厚度时,通常假设沙尘粒子为球形,但实验室和现场测量结果都表明,自然界中的沙尘粒子为非球形,因此利用球形粒子模型模拟沙尘暴对激光的散射和衰减特性将带来较大误差。利用具有一定尺寸分布、形状分布、随机取向的椭球粒子模型模拟自然界中的沙尘粒子,利用T矩阵方法计算了其单次散射特性,并与球形粒子模型进行了比较,结果表明,混合椭球粒子的相函数随角度分布是平滑的、无特征的、且在侧散射方向上是平坦的,这和自然界中的沙尘粒子散射特性非常类似。最后利用累加法计算了沙尘暴对激光的多次散射特性,结果表明,利用任何一种单一形状的粒子模拟沙尘粒子的散射特性都会带来较大的误差。

关键词 激光技术;多次散射;沙尘暴;椭球粒子;累加法

中图分类号 TN011.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1506

Nonspherical Model for Sand Dust Storm and its Application to the Research of Light Multiple Scattering

Sun Xianming Wang Haihua Liu Wanqiang Shen Jin

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract Spherical particle model is often used to evaluate the attenuation of electromagnetic wave by sand and dust storm and retrieval of optical thickness with satellite reflectance sensing. Measurements in laboratory and in situ show that the shapes of natural sand and dust particles are nonspherical, thus suggesting that Mie theory may not be suitable for interpreting the scattering and attenuation properties of sand and dust storm, and it will cause large errors. A model big using shape distributions of polydisperse and randomly oriented spheroid particles was used to model the natural sand and dust particles. The rigorous T-matrix method was used to compute the single scattering of sand and dust storm, and the result was compared with the spherical model. The results show that the phase function averaged over a wide aspect-ratio distribution of spheroids is smooth, featureless and flat at the side-scattering angle and closely resembles those natural sand and dust particles. The multiple scattering characteristics of sand and dust storm were computed by the adding method, and the result indicated that significant errors will be caused with the application of any single shaped particles to compute the scattering characteristics of sand and dust particles.

Key words laser technique; multiple scattering; sand and dust storm; spheroid particle; adding method

1 引 言

近年来,我国北方沙尘暴活动的范围和出现的频度日益扩大,沙尘气溶胶粒子能够引起太阳光的散射和吸收,这种散射和吸收不但会引起光的衰减,而且将直接影响大气辐射的收支,进而影响局部甚

至全球气候的变化^[1],研究气溶胶的探测及其直接的气候效应,其基础是研究太阳光的散射和吸收。

在利用散射光进行气溶胶光学厚度反演时,反演的质量主要取决于所采用的相函数和单次散射反照率的精确性^[2]。很多研究者利用球形粒子的散射

收稿日期: 2009-06-10; 收到修改稿日期: 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(60877050)和山东省自然科学基金(ZR2009AQ013)资助课题。

作者简介: 孙贤明(1979—),男,博士,讲师,主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: xianming_sun@yahoo.com.cn

相函数来模拟沙尘粒子的散射相函数^[3~6],但是在显微镜下观测到的沙尘粒子形状为各种形状的非球形粒子^[7],且实验室和现场测量^[7]都显示自然界中的沙尘粒子的单次散射相函数和由 Mie 理论得到的球形粒子相函数差异很大,因此这种模型必将带来很大误差。Nakajima 等^[8]对黄沙粒子进行了电子显微镜扫描,并进行了统计分析,结果表明,沙尘粒子的最长轴和最短轴长比近似为 1.7,Okada 等^[9]得到了相同的结果,Hill 等^[10]得到的结果为 2.0,因此可以确定沙尘粒子的形状为非球形。实验室和现场测量结果表明^[7],沙尘粒子系的单次散射相函数随角度的分布是平滑的、无特征的,且在侧散射方向上是平坦的。但是如果按照 Nakajima 的研究结果用一种非球形粒子来代替沙尘粒子,由理论研究可以发现,任何一种非球形粒子都有其特殊的散射特征,因此利用一种形状的粒子来代替沙尘粒子的形状显然是不理想的。本文采用具有一定尺寸分布、形状分布、随机取向的旋转椭球粒子模型模拟自然界中的沙尘粒子,其中形状分布为取具有不同横纵(水平轴长度和旋转轴的长度)比的椭球粒子组成的粒子系。

2 沙尘暴的单次散射特性

描述随机分布粒子的单次散射特性参数主要有单次散射反照率、平均消光系数、平均散射系数以及单次散射反照率和不对称因子。其中相函数描述了单次散射强度的角分布,并满足归一化条件^[11]:

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi P(\theta) \sin \theta d\theta = 1, \quad (1)$$

式中 θ 为散射角(入射光线和出射光线间的夹角)。平均散射系数和消光系数定义为

$$\sigma_{\text{sca}} = N \int_0^\infty f(r) C_{\text{sca}}(r) dr, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ext}} = N \int_0^\infty f(r) C_{\text{ext}}(r) dr. \quad (3)$$

单次散射反照率定义为

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{\sigma_{\text{ext}}}. \quad (4)$$

不对称因子定义为

$$g = \langle \cos \theta \rangle = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\theta) \cos \theta d(\cos \theta). \quad (5)$$

自然界中存在的沙尘粒子的尺寸都是具有一定分布的,因此必须选取一种粒子的尺寸分布模型来

描述沙尘粒子的多分散性。采用对数正态分布来描述其尺寸分布^[12]:

$$f(r) = \frac{C_1}{r} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \quad (6)$$

$$0.05 \mu\text{m} \leq r \leq 2 \mu\text{m}$$

式中 r 为具有相同体积的球形粒子的半径, r_g 为几何平均半径,采用美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统中采用的多角度光谱辐射计(Multi-angle imaging spectro-radiometer, MISR)^[13]气溶胶反演算法中采用的值 $r_g = 0.47$, $\sigma_g = 2.51$ 。 C_1 为归一化常数,即

$$\int_{0.05}^2 f(r) dr = 1, \quad (7)$$

(6)式不同于标准的对数正态分布,因为标准对数正态分布的上下限分别为 ∞ 和 0,而实际的沙尘粒子的尺寸分布是有一定范围的,本文采用的范围为 $0.05 \sim 2 \mu\text{m}$ ^[13]。

由于粒子尺寸分布、以及空间取向的随机性,计算沙尘粒子系的散射特性需要对其进行尺寸和空间取向的平均。但是,即使进行了尺寸和取向的平均后,单个形状粒子系的散射相函数仍然具有非常强的形状特征,而真实沙尘粒子的相函数是平滑的、无形状特征的。因此将具有不同横纵比的椭球形粒子混合来模拟真实的沙尘粒子系,假设沙尘粒子的形状分布为均匀分布,最小的横纵比为 0.5,最大为 2.0。混合粒子系的单次散射消光系数和散射系数分别为

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(r_i) C_{\text{ext}}^j(r_i) \omega_i, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{sca}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(r_i) C_{\text{sca}}^j(r_i) \omega_i, \quad (9)$$

式中 N 表示椭球粒子横纵比的个数, M 表示高斯积分所取的节点数, r_i 和 ω_i 分别为在半径间隔 $[0.05 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}]$ 上取的高斯积分节点和权重。

在计算沙尘粒子系的单次散射相函数时,为了方便在多次散射计算中利用散射相函数,用勒让德级数展开^[14]

$$P(\theta) = \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} \omega_n P_n(\cos \theta), \quad (10)$$

式中 $P_n(\cos \theta)$ 为勒让德级数,求和号的上限 n_{max} 依赖于所需的计算精度。

图 1 给出了根据两个不同波长计算得到的多分散、随机取向的单一形状椭球粒子系的散射相函数,其中 $\lambda = 0.443 \mu\text{m}$ 为 MISR 在可见光范围上的观测通道波长, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 为红外激光波长,对应的

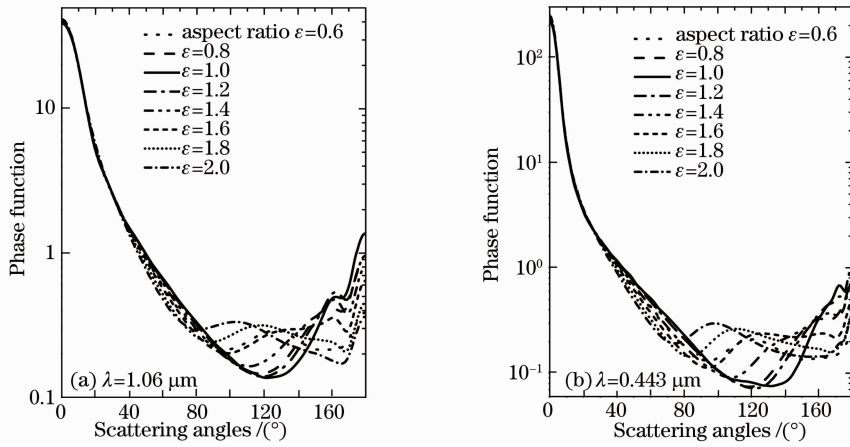


图 1 多分散的随机取向的椭球粒子相函数

Fig. 1 Phase functions for polydisperse randomly oriented spheroids

沙尘折射率^[13]分别为 $1.53 + 0.0085i$ 和 $1.55 + 0.005i$, 虚部表示沙尘的吸收。

从图 1 中可以看出,不同形状的粒子具有不同的相函数,大体可以分为 4 个区域:

- 1) $0 \leq \theta \leq 30^\circ$, 球形相函数 \approx 椭球形相函数;
- 2) $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, 球形相函数 $>$ 椭球形相函数;
- 3) $90^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$, 球形相函数 $<$ 椭球形相函数;
- 4) $150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, 球形相函数 $>$ 椭球形相函数。

对于椭球粒子的散射特性,Asano 等^[15]利用分

离变量法给出了详细的研究^[16]。

图 2 给出了多种形状的椭球粒子混合后,由 \mathbf{T} 矩阵方法计算得到的相函数^[17],作为比较具有相同体积的等效球形粒子的相函数也一同给出。从图 2 中可以看出,经过形状平均后的相函数变得无特征了,尤其在侧散射方向上几乎为平坦的,这与实验室对自然界中的土粒子、黄沙以及矿物粒子的测量结果是非常一致的^[7],说明利用混合的椭球形粒子模拟自然界中的沙尘粒子相函数是可行的。

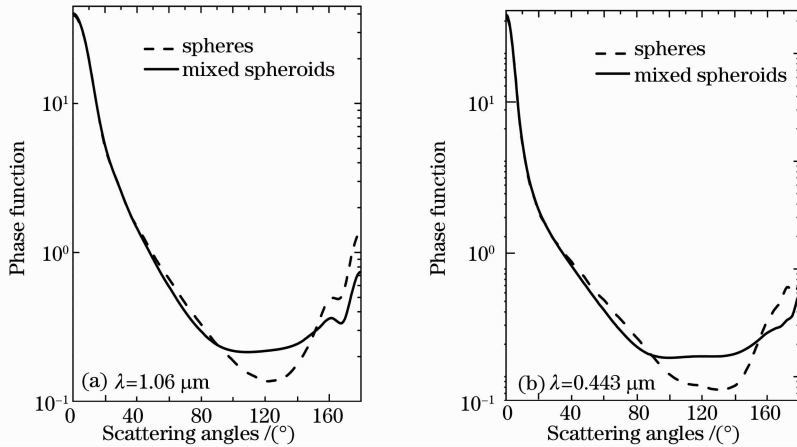


图 2 多分散球形粒子相函数以及等概率多种形状混合的椭球粒子相函数

Fig. 2 Phase functions for polydisperse spheres and phase function for equiprobable shape mixtures of spheroids

3 沙尘暴的多次散射特性

假设沙尘暴中粒子分布是各向同性的;入射波为强度归一化的非偏振平面波,且忽略边界反射。当介质内部无源和不计及粒子间相互作用时,沙尘暴对激光的散射强度满足辐射传输方程^[11]

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{dI(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \phi)}{d\tau} + I(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \phi) = \\ \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^\pi I(\tau, \vartheta', \vartheta_0, \phi') P(\gamma') \sin \vartheta' d\vartheta' + \\ \frac{\omega_0}{4\pi} SP(\gamma) \exp(-\tau \sec \vartheta_0), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $I(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi)$ 为光学厚度为 τ 处的辐射强度(辐射亮度), 而 $P(\gamma)$ 为相函数, 并且 γ 为散射角, ω 为云层的单次散射反照率。

$$\cos \gamma' = \cos \vartheta \cos \vartheta' + \sin \vartheta \sin \vartheta' \cos(\phi - \phi'), \quad (12)$$

$$\cos \gamma = \cos \vartheta \cos \vartheta_0 + \sin \vartheta \sin \vartheta_0 \cos \phi, \quad (13)$$

式中 ϑ_0 为入射角, ϑ 为观测角, $\phi - \phi'$ 为入射角和观测角的方位角之差。

在描述多次散射问题时, 通常采用反射函数和透射函数, 而不用反射强度和透射强度:

$$R(\mu_0, \mu, \phi) = \frac{\pi I_r(\mu_0, \mu, \phi)}{\mu_0 F_0}, \quad (14)$$

$$T(\mu_0, \mu, \phi) = \frac{\pi I_t(\mu_0, \mu, \phi)}{\mu_0 F_0}, \quad (15)$$

式中 F_0 表示入射方向的太阳通量密度, $I_r(\mu_0, \mu, \phi)$ 为反射强度, $I_t(\mu_0, \mu, \phi)$ 代表漫透射强度, 它不包含直接透射强度 $F_0 \exp(-\tau_1/\mu_0)$, 直接透射分量表示光学厚度为 τ_1 的粒子层对入射光的衰减。

辐射传输方程的求解是一个比较困难的问题,

已有的精确解法主要有: 累加法、离散坐标法和蒙特卡罗法等。采用累加法^[18], 把大气分成一系列平面平行的薄层(薄层光学厚度为 2^{-25}), 薄层的反射函数和透射函数可由辐射传输方程得到, 则两结合层的反射函数和透射函数可以用射线追踪方法计算, 然后在结合层特性已知基础上采用一定的累加程序, 可以决定整个云层或大气的反射函数。由于当光学厚度较大时, 透射光将很少, 因此在利用卫星进行遥感探测时, 一般采用反射光进行反演。计算光波垂直入射时, 光学厚度分别为 1(较薄)和 32(较厚), 尺寸分布服从(6)式的沙尘对波长分别为 $0.443 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 光的反射函数, 如图 3 和图 4 所示。图中比较了混合形状的椭球粒子、球形粒子、以及纵横比分别为 0.6 和 2.0 的单一形状椭球粒子对入射光的反射函数, 从图中可以看出, 四种形状的粒子的反射函数差别很大, 混合粒子的反射函数介于其他几种形状粒子之间, 因此利用任意一种单一

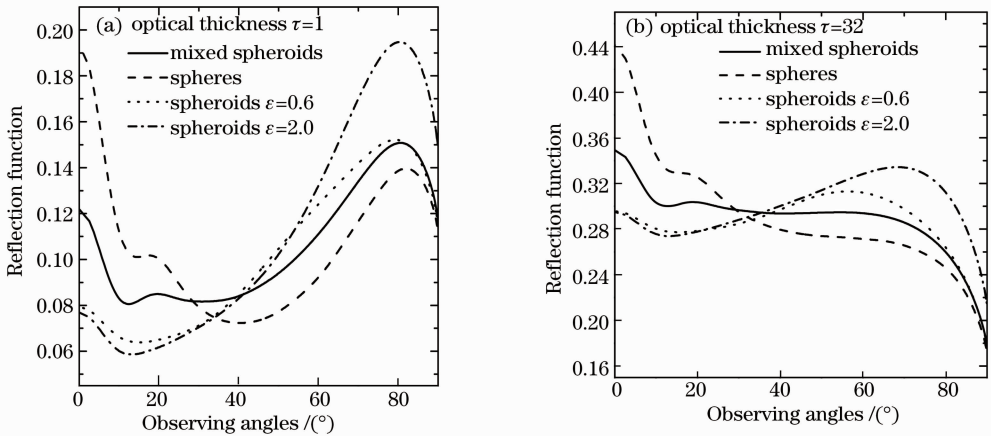


图 3 沙尘暴对波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 光的反射函数

Fig. 3 Reflection functions of sand and dust storm to the incident light at $1.06 \mu\text{m}$

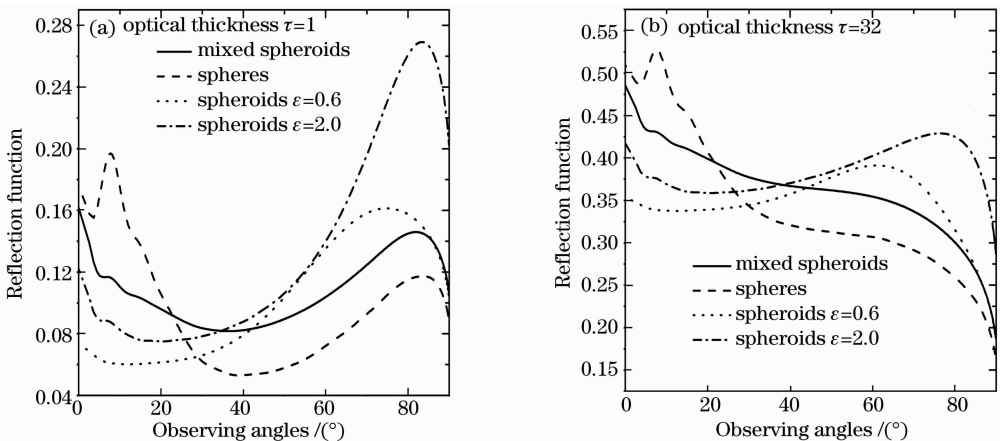


图 4 沙尘暴对波长为 $0.443 \mu\text{m}$ 光的反射函数

Fig. 4 Reflection functions of sand and dust storm to the incident light at $0.443 \mu\text{m}$

形状的粒子进行光学厚度反演时都会带来很大的误差。

4 结 论

利用多种形状混合的椭球粒子来模拟自然界中的沙尘粒子,利用 T 矩阵方法计算了随机分布、随机取向不同横纵比的椭球粒子的相函数,并将得到的相函数进行了平均,计算结果表明,平均后的相函数随散射角分布非常平滑,且没有侧散射峰,这些特点与自然界中存在的真实相函数相同。由得到的相函数,根据辐射传输理论,利用累加法计算了光学厚度分别为 1 和 32 的沙尘暴对波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.443 \mu\text{m}$ 光的多次散射特性,并与球形粒子和其他两种单一形状的椭球粒子的多次散射特性进行了比较,结果表明,利用单一形状的粒子进行多次散射计算和光学厚度反演将带来很大误差。

参 考 文 献

- 1 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)[M]. Elsevier Science, 2002
- 2 M. Wang, H. R. Gordon. Estimating aerosol optical properties over the oceans with the multiangle imaging spectroradiometers: some preliminary result [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 4042~4057
- 3 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1075~1080
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1075~1080
- 4 Gao Zhiwen, Zhou Youhe, Zheng Xiaojing. Monte-Carlo model of electromagnetic wave propagation in sand and dust storm[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, **38**(8): 955~961
高志文, 周又和, 郑晓静. 电磁波在沙尘暴中传播的 Monte-Carlo 模拟[J]. *中国科学 G 辑: 物理学·力学·天文学*, 2008, **38**(8): 955~961
- 5 Yang Ruike, Su Zhenling, Liu Kexiang *et al.*. Influence of multiple scattering on attenuation of millimeter wave propagation in sand and dust storm[J]. *Chinese J. Radio Science*, 2008, **23**(3): 530~533
杨瑞科, 苏振玲, 刘科祥 等. 沙尘暴多重散射对毫米波衰减影响研究[J]. *电波科学学报*, 2008, **23**(3): 530~533
- 6 Zhou Wang, Zhou Dongfang, Hou Deting *et al.*. Calculation and simulation of sand and dust attenuation in microwave propagation [J]. *High Power Laser and Particles Beams*, 2005, **17**(8): 1259~1262
周 旺, 周东方, 侯德亭 等. 微波传输中沙尘衰减的计算与仿真 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(8): 1259~1262
- 7 F. Kuik. Single scattering of light by ensembles of particles with various shapes[D]. Ph. D thesis, Amsterdam; Free University, 1992
- 8 T. Nakajima, M. Tanaka, M. Yamano *et al.*. Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki, II, Models [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1989, **67**: 279~291
- 9 K. Okada, A. Kobayashi, Y. Iwasaka *et al.*. Features of individual asian dust-storm particles collected at Nagoya, Japan [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1987, **65**: 515~521
- 10 S. C. Hill, A. C. Hill, P. W. Barber. Light scattering by size/shape distributions of soil particles and spheroids [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(7): 1025~1031
- 11 H. C. Van de Hulst. Multiple Lights Scattering; Tables, Formulas and Application [M]. New York; Academic Press 1980. 150~200
- 12 M. I. Mishchenko, L. D. Travis, R. A. Kahn *et al.*. Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(14): 16831~16847
- 13 D. J. Diner, C. J. Bruegge, J. V. Martonchik *et al.*. A multi-angle imaging spectroradiometer for terrestrial remote sensing from the earth observing system [J]. *Int. J. Imaging Sys. Technol.*, 1991, **3**(2): 92~107
- 14 Sun Xianming, Han Yiping. Absorption and scattering of light by Ice-water mixed clouds [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(2): 682~689
孙贤明, 韩一平. 冰水混合云的吸收和散射特性 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(2): 682~689
- 15 S. Asano, M. Sato. Light scattering by randomly oriented spheroidal particles [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(6): 962~974
- 16 Han Yiping, Du Yungang. Electromagnetic scattering for a non-spherical aerosols with arbitrary shaped beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 630~633
韩一平, 杜云刚. 非球形大气粒子对任意波束的电磁散射特性 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 630~633
- 17 M. I. Mishchenko. Light scattering by randomly oriented axially symmetric particles [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(6): 871~882
- 18 J. E. Hansen, L. D. Travis. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 1974, **16**(4): 527~610