

取向比对随机取向的六角形冰晶粒子米勒矩阵的影响

类成新

(山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049)

摘要 利用离散偶极子近似方法对随机取向的六角形冰晶粒子的米勒矩阵进行了数值计算,给出了各个米勒矩阵元素的角分布曲线,探讨了随机取向的六角形冰晶粒子的取向比对其米勒矩阵的影响。研究表明,随机取向的六角形冰晶粒子的取向比对其米勒矩阵元素的影响在一定散射角范围内均相当大,并随着粒子尺度参数的变化而变化;此外,相同尺度参量、不同取向比粒子的米勒矩阵元素的角分布曲线均有一个交点,并且随着粒子尺度参量的增加,交点所对应的散射角度值逐渐向小角度方向移动。

关键词 大气光学; 米勒矩阵; 离散偶极子近似; 取向比; 六角形冰晶粒子

中图分类号 P422.3

OCIS 290.1090 290.4020

文献标识码 A

Influence of Aspect Ratio on Mueller Matrices of Hexagonal Ice Crystals in Random Orientation

Lei Chengxin

(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract Mueller-matrix elements of hexagonal ice crystals in random orientation are calculated by the discrete dipole approximation (DDA) method and the profiles of Mueller-matrix elements are presented. The influence of the aspect ratio on Mueller matrices of hexagonal ice crystals in cirrus cloud is discussed. The results show that the influence of the aspect ratio on Mueller matrix elements of hexagonal ice crystals in random orientation is quite large in certain angular regions, and it varies with the size parameters of the hexagonal ice crystals in random orientation. In addition, there is a nodical point in the profiles of mueller matrices of hexagonal ice crystals with the same sizes but different aspect ratios, and this point will extend forward with the increase of the size parameters of particles.

Key words atmospheric optics; Mueller matrices; discrete dipole approximation method; aspect ratio; hexagonal ice crystals

1 引言

卷云由分布在大气高层的各种形状的冰晶粒子组成,一般位于大气对流层中上部到平流层底部,大约覆盖地球表面的20%^[1]。卷云的辐射特性对大气探测、气候模式、辐射传输以及遥感等方面都具有十分重要的意义^[2~4],其中卷云中非球形冰晶粒子的吸收、散射特性的研究是进行卷云中辐射传输计算的前提。卷云中冰晶粒子的散射特性与其形状、大小、取向比以及入射波长等因素有关。在目前的气候模式中,对卷云的散射特性及其参数化的研究多采用等效球米氏(Mie)理论^[5,6],也就是把非球形粒子的散射特性用同等(体积或者表面积)大小的球形粒子的散射特性来代替。在辐射传输计算和大气遥感中,迫切需要包括多种多样的非球形粒子的散射特性数据库。因此,对影响卷云中非球形粒子散射特性的各种因素有必要进行深入的研究。粒子的取向比是影响其散射特性的重要因素之一,而目前国内外仅有少数文献涉及到取向比对冰晶粒子散射特性影响的计算^[7~10]。

卷云中冰晶粒子的形状具有多样性,其中六角形冰晶粒子是最基本的粒子形状。本文以六角形冰晶粒子为例,利用离散偶极子(DDA)近似方法^[11~13]对随机取向的六角形冰晶粒子的米勒矩阵角分布进行数值

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-02-01

作者简介: 类成新(1976—),男,硕士,讲师,主要从事目标激光散射特性方面的研究。E-mail: leichengxin2009@163.com

计算,探讨取向比对不同尺寸参数六角形冰晶粒子米勒矩阵的影响。

2 米勒矩阵

米勒矩阵是描述散射体散射特性的一个重要物理参量,它为一个 4×4 的实矩阵,体现了散射体的所有散射特性和极化特性,其具体形式为^[14]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对于随机取向且具有某种对称性的粒子,其米勒矩阵元素共有 8 个不为零

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

并且 $M_{21} = M_{12}, M_{43} = -M_{34}$, 这样只有 6 个元素是独立的: $M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{33}, M_{34}, M_{44}$ ^[15]。各个米勒矩阵元素表示的物理意义分别为: M_{11} 反映总的入射场强度在散射发生前后的变化情况,并且能反映出粒子尺寸参数的总体信息; M_{12} 表示平行和垂直于散射平面的线性极化电磁波的去极化率; M_{22} 描述线性极化的入射波 ($\pm 90^\circ$) 相对应于线性极化的散射波 ($\pm 90^\circ$) 的变化情况; M_{33}, M_{44} 描述线性极化的入射波 ($\pm 45^\circ$) 相对应于线性极化的散射波 ($\pm 45^\circ$) 的变化情况; M_{34} 描述圆极化的入射波相对应于线性极化的散射波 ($\pm 45^\circ$) 的变化情况。

大气中的粒子空间取向是随机的,对于随机取向冰晶粒子的米勒矩阵采用文献^[15]的方法来解决。在计算过程中,需要给定非球形粒子的等效半径 R_{eff} 。采用等效体积的方法计算非球形粒子的等效半径,即用和非球形粒子体积相同的球的半径作为非球形粒子的等效半径。对应的非球形粒子的尺度参数 $x_{\text{eff}} = 2\pi R_{\text{eff}}/\lambda$, 其中 λ 为入射波的波长,取入射波长为 $0.55 \mu\text{m}$, 对应的冰晶粒子的复折射率为 $m = 1.311 + 3.11 \times 10^{-9}i$ ^[16]。

3 结果与分析

为研究随机取向六角形冰晶粒子的取向比对其米勒矩阵的影响,定义六角形冰晶粒子的取向比^[9]

$$\alpha = D/L, \quad (3)$$

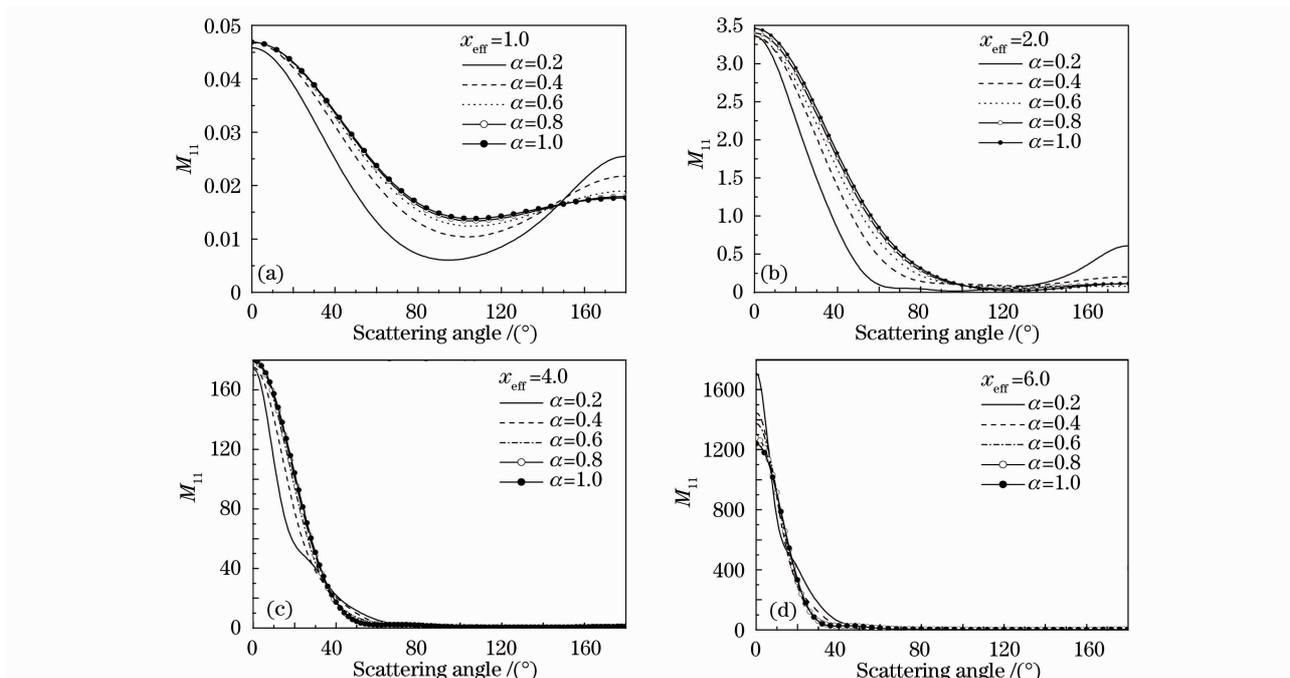
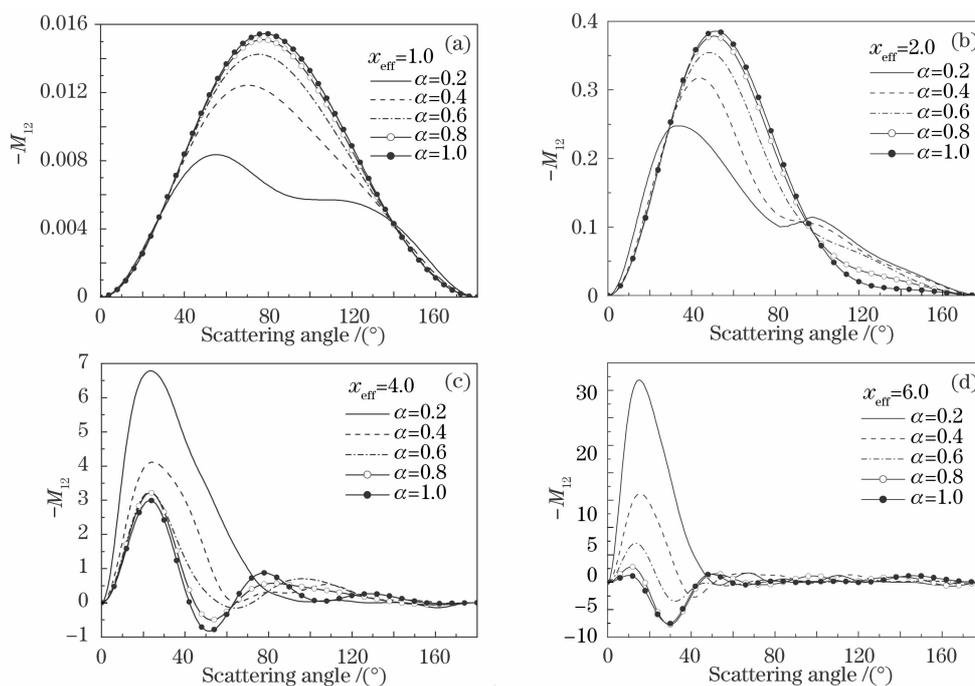
式中 D 为粒子横截面边长的 2 倍, L 为粒子的长度。不同等效球形粒子尺度参量 x_{eff} 及取向比分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 的相应六角形冰晶粒子尺度参量 $x_L = 2\pi L/\lambda$ 和 $x_D = 2\pi D/\lambda$, 如表 1 所示。

表 1 六角形冰晶粒子的尺度参数 x_L 和 x_D 以及等效球形粒子尺度参量 x_{eff}

Table 1 Size parameters (x_L, x_D) of hexagonal ice crystals and the size parameters x_{eff} of equivalent sphere

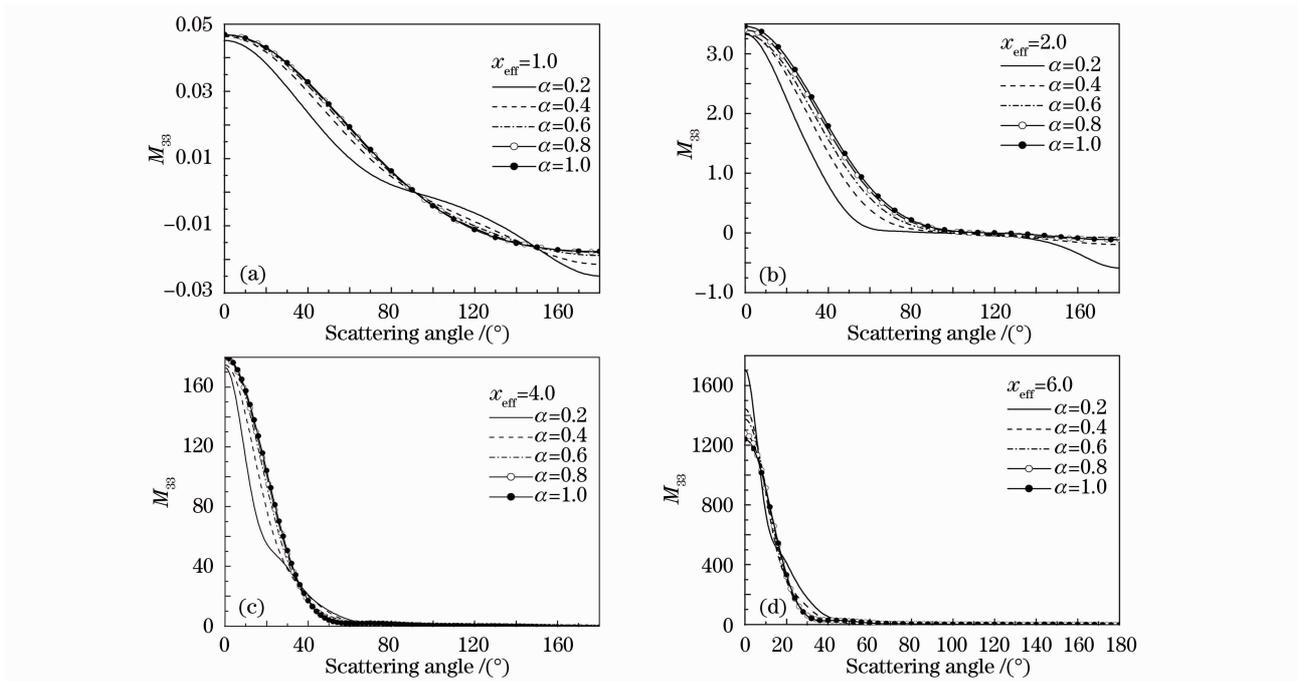
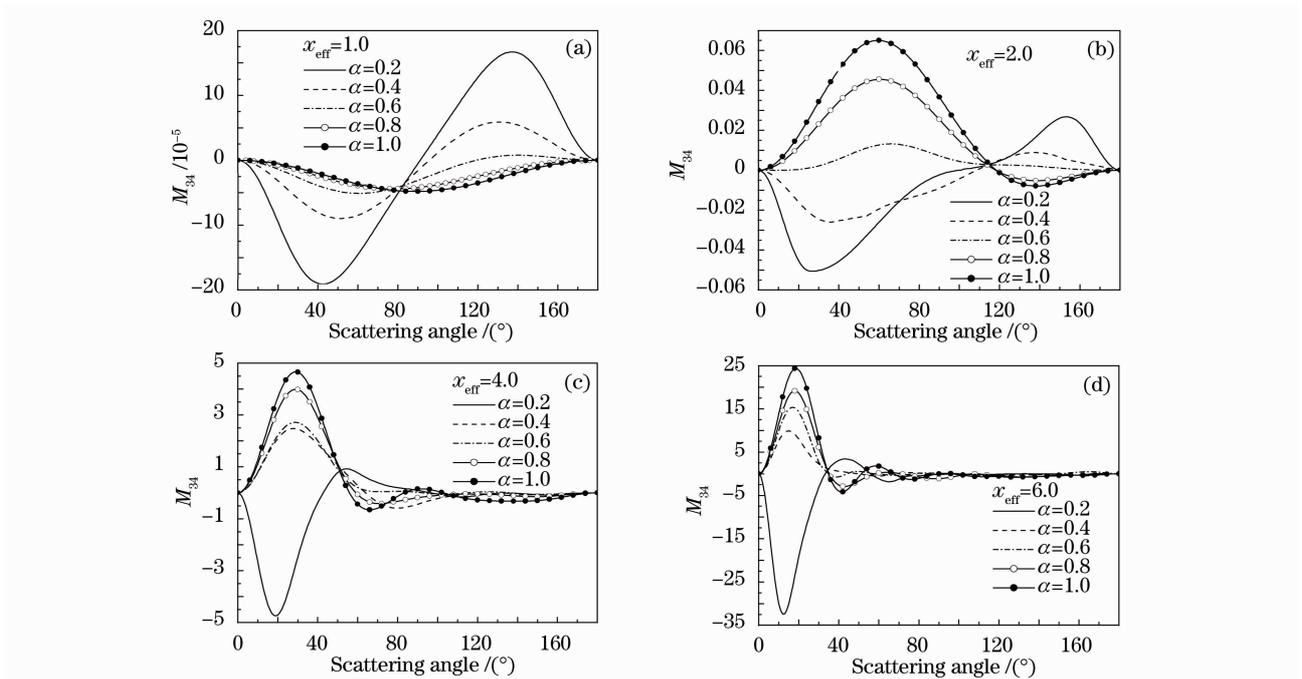
x_{eff}	x_L	x_D	α									
	5.44363	1.08873		10.8885	2.1777		21.777	4.3554		32.6655	6.5331	0.2
	3.42927	1.37171		6.85932	2.74373		13.7186	5.48745		20.5780	8.23118	0.4
1.0	2.61702	1.57021	2.0	5.23463	3.14078	4.0	10.4693	6.28156	6.0	15.7039	9.42234	0.6
	2.16030	1.72824		4.32109	3.45687		8.64218	6.91374		12.9633	10.3706	0.8
	1.86169	1.86169		3.7238	3.7238		7.4476	7.4476		11.1714	11.1714	1.0

计算结果表明,随机取向六角形冰晶粒子的米勒矩阵元 M_{22} 与 M_{11}, M_{44} 与 M_{33} 随其取向比的变化规律一致。图 1~4 给出了不同尺度参量 x_{eff} 的六角形冰晶粒子,在取向比分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 时,其米勒矩阵元 $M_{11}, M_{12}, M_{33}, M_{34}$ 随散射角变化曲线。从图 1 和图 3 可知,在尺度参量相同的情况下,冰晶粒子的前向散射明显强于后向散射,说明粒子散射的能量主要集中在前向,且随着粒子取向比的增加,粒子的前向散射逐渐增强,后向散射相应减小;随着粒子尺度参量的增加,后向散射与前向散射的差距明显增大,并且不同

图1 不同尺度不同取向比六角形冰晶粒子的米勒矩阵元素 M_{11} Fig. 1 Mueller matrix element M_{11} of hexagonal ice crystals with different size and aspect ratios图2 不同尺度不同取向比六角形冰晶粒子的米勒矩阵元素 M_{12} Fig. 2 Mueller matrix element M_{12} of hexagonal ice crystals with different size and aspect ratios

取向比的冰晶粒子的米勒矩阵元 M_{11} , M_{33} 角分布曲线逐渐向散射角减小方向靠拢。从图 2 可以发现, 当粒子尺度参数较小(例如 $x_{\text{eff}} = 1.0$)时, 不同取向比的冰晶粒子的米勒矩阵元 M_{12} 在 $0 \sim 30^\circ$ 范围内的变化趋势一致, M_{12} 的值在 $30^\circ \sim 140^\circ$ 范围内随着取向比的增大而增大, M_{12} 的值在大于 140° 的后向散射区域随着取向比的增大而减小, 减小的幅度不是很大。当粒子尺度参数增大时, 不同取向比的冰晶粒子的米勒矩阵元 M_{12} 的角分布曲线变化趋势不再一致, 并且在后向散射方向出现了振荡现象。

另外, 随着粒子尺度参数的增大, 不同取向比的冰晶粒子的米勒矩阵元 M_{12} 角分布曲线越来越集中到前

图3 不同尺度不同取向比六角形冰晶粒子的米勒矩阵元素 M_{33} Fig. 3 Mueller matrix element M_{33} of hexagonal ice crystals with different size and aspect ratios图4 不同尺度不同取向比六角形冰晶粒子的米勒矩阵元素 M_{34} Fig. 4 Mueller matrix element M_{34} of hexagonal ice crystals with different size and aspect ratios

向散射方向,并且集中的角度越来越窄;当尺度参数较大时, M_{12} 的分布曲线出现了双模状态(出现极大值和极小值),并且在 M_{12} 角分布曲线集中的角度范围(尺度参数越大,此角度范围越小)内, M_{12} 的值随着取向比的增大而减小。图4反映出,不同粒子尺度参数的 M_{34} 的角分布曲线均为双模状态,粒子尺度参数较小(例如 $x_{\text{eff}}=1.0$)时, M_{34} 的角分布曲线关于 $M_{34}=0$ 对称,随着尺度参数的增大,这种对称性逐渐变差。在前向散射一定角度范围内,粒子的米勒矩阵元 M_{34} 的值随着取向比的增大而增大并且在极值处增大的幅度为最大;在后向散射区域, M_{34} 的值随着取向比的增大而减小。另外,图1~4均表明,在相同尺度参量条件下,不

同取向比粒子的所有米勒矩阵元素的角分布曲线都有一个交点,在该交点角度的粒子的散射强度不受取向比的影响,并且随着粒子尺度参量的增加,交点所对应的散射角度值逐渐向小角度方向移动,这与宫纯文等^[17]研究圆柱形粒子时得出的结论一致。此外,图2中 M_{12} 分布曲线的交点随着粒子尺度参量的增加而消失;图3中米勒矩阵元素 M_{33} 分布曲线的交点出现了两个,并且随着粒子尺度参量的增加,此交点的个数先减小后增加。造成上述现象的原因目前还不清楚,有待进一步深入研究。

4 结 论

利用离散偶极子近似方法对具有不同取向比的六角形冰晶粒子的米勒矩阵进行了数值计算,给出了各个米勒矩阵元素的角分布曲线,探讨了随机取向的六角形冰晶粒子的取向比对其米勒矩阵的影响。研究表明:六角形冰晶粒子的取向比对其米勒矩阵存在着不同程度的影响;在相同尺度参量条件下,不同取向比粒子的米勒矩阵元素的角分布曲线均存在一个交点,在该交点角度的粒子的米勒矩阵元素的值均不受取向比的影响,并且随着粒子尺度参量的增加,交点所对应的散射角度值逐渐向小角度方向移动;此外,随着粒子尺度参数的增大,不同取向比的冰晶粒子的米勒矩阵角分布曲线越来越集中到前向散射方向,并且集中的角度越来越窄。取向比是影响非球形粒子散射特性的重要因素之一,通过数值计算所得到的非球形粒子的米勒矩阵元素($M_{11}, M_{12}, M_{33}, M_{34}$)的角分布图,可以确定卷云中冰晶粒子的结构以及这些粒子的散射特性,为进一步深入研究卷云的辐射特性提供依据。

致谢 特别感谢美国普林斯顿大学的 B. T. Draine 教授向本文作者提供的 DDA 程序。

参 考 文 献

- 1 K. N. Liou. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**(6): 1167~1199
- 2 Q. Fu, P. Yang, W. B. Sun. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models[J]. *J. Climate*, 1998, **11**(9): 2223~2237
- 3 Q. Fu, W. B. Sun, P. Yang. Modeling of scattering and absorption by nonspherical cirrus ice particles at thermal infrared wavelength[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**(16): 2937~2947
- 4 P. Yang, K. N. Liou, K. Wyser *et al.*. Parameterization of scattering and absorption properties of individual ice crystals[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D4): 4699~4718
- 5 S. Chung, S. Ackerman, P. F. van Delst *et al.*. Model calculations and interferometer measurements of ice-cloud characteristics[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 634~644
- 6 D. H. Deslover, W. L. Smith, P. K. Piironen *et al.*. A methodology for measuring cirrus cloud visible-to-infrared spectral optical thickness ratios[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1999, **16**: 251~262
- 7 Gao Taichang, Liu Lei, Li Hao *et al.*. Effect of shape and character of aerosol on its near-infrared scattering characteristics [J]. *J. PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, **8**(3): 302~306
高太长,刘磊,李浩等. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, **8**(3): 302~306
- 8 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. 单分散长椭球气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 108~113
- 9 Ping Yang, Qiang Fu. Dependence of ice crystal optical properties on particle aspect ratio[J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, **110**: 1604~1614
- 10 P. Yang, H. L. Wei, G. W. Kattawar *et al.*. Sensitivity of the backscattering Mueller matrix to particle shape and thermodynamic phase[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**: 4389~4395
- 11 E. M. Purcell, C. R. Pennypacker. Scattering and absorption by non-spherical dielectric grains[J]. *Astrophys. J.*, 1973, **186**: 705~714
- 12 B. T. Draine. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains[J]. *Astrophys. J.*, 1988, **333**: 848~872

- 13 B. T. Draine, P. J. Flatau. The discrete-dipole approximation for scattering calculations[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4): 1491~1499
- 14 C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*[M]. New York: Wiley, 1983. 63~69
- 15 Lei Chengxin, Zhang Huafu, Liu Hanfa. Numerical calculation of Mueller matrices of randomly distributed soot cluster agglomerates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7168~7175
类成新,张化福,刘汉法. 随机分布烟尘簇团粒子缪勒矩阵的数值计算[J]. *物理学报*, 2009, **58**(10): 7168~7175
- 16 G. W. Stephen. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 1206~1225
- 17 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. 取向比对圆柱形冰晶粒子光散射特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1155~1159