

偏振光在冰水混合云中的传输特性

王海华 孙贤明* 刘万强

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要 根据米氏理论,分别计算了由纯水、纯冰和冰-水同心球形粒子构成的平面平行、各向同性云层的单次散射特性(单次散射反照率、不对称因子以及单次散射相矩阵)。根据辐射传输理论,利用累加法求解了矢量辐射传输方程,得到了3种不同构成云层的多次散射矩阵,对不同波长的太阳光的反射特性进行了比较。结果表明,反射光的偏振度比强度对云层的微观构成更敏感,并给出了理论解析。

关键词 散射;冰-水粒子;矢量辐射传输方程;累加法;云层

中图分类号 TN011.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070101

Polarization of Light Scattering by Ice-Water Mixed Clouds in Visible Regions

Wang Haihua Sun Xianming Liu Wanqiang

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

Abstract Based on the Mie theory, the light scattering properties (single scattering albedo, asymmetry parameters, and single scattering phase matrix) in the visible regions of clouds consisting of pure water, pure ice spheres and concentric water-ice spheres are computed respectively. The reflection matrixes of the three types of clouds are evaluated with the adding-doubling method by solving the radiative transfer equation. The reflection characteristics of different light wavelengths are compared. The numerical results show that the polarization degree of reflected light is more sensitive to the particle microphysics characteristics than the intensity of reflected light.

Key words scattering; ice-water particles; vector radiative transfer equation; adding-doubling method; clouds

OCIS codes 010.1310; 260.5430; 290.1090; 290.4020; 290.4210

1 引言

辐射在云层中传输取决于粒子的浓度、尺度分布和形状,以及云层的厚度和云状;云的组成和构成,直接影响着地气系统的辐射平衡。由于云层中粒子构成的多变性,以及光波在云层中传输的多次散射问题,通过遥感来确定云的微观特性是一项非常困难的任务。近年来,随着航天技术的发展,气象卫星被应用于大气遥感,这大大推动了利用太阳为辐射源的被动遥感技术的发展。被云层反射的太阳辐射强度和偏振包含着粒子微观特性的信息,因此通过求解矢量辐射传输方程来研究云层的反射特性具有很重要的应用价值。

大量的飞机实测资料显示^[1~3],在0℃层以上,云层中经常混有冰晶粒子,而在0℃层附近冰晶粒子表面将会融化,这将使光波在云层中的传输受到影响,因此对于这部分云的构成的研究非常重要。本文通过求解矢量辐射传输方程,数值计算了几种不同波长的太阳光的反射特性。研究发现,云层的微观结构对偏振的影响比强度更大,而且在近红外波段,反射光的偏振率更高,因此更适于云层微观结构的遥感^[4]。

收稿日期: 2011-02-26; 收到修改稿日期: 2011-03-07; 网络出版日期: 2011-05-09

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009AQ013)资助课题。

作者简介: 王海华(1978—),女,硕士,讲师,主要从事粒子光散射和大气辐射传输等方面的研究。

E-mail: hhwang1978@163.com

* 通信联系人。E-mail: xianming_sun@yahoo.com.cn

2 云层的单次散射矩阵

云层中粒子的形状,尤其是冰粒子的形状是多种多样的,如球状、椭球状、柱状和子弹状等^[5],但是很多研究者将冰粒子简化为等体积球来处理,因此其单次散射的特征量可以由米氏理论给出严格的解;在实际大气或云层中粒子的尺寸大小不同,具有一定的尺寸分布,Hansen等^[6]定义了有效半径和有效方差的概念,即

$$\begin{cases} r_{\text{ef}} = \frac{\int_0^{\infty} r \pi r^2 f(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 f(r) dr} & v_{\text{ef}} = \frac{\int_0^{\infty} (r - r_{\text{ef}})^2 \pi r^2 f(r) dr}{r_{\text{ef}}^2 \int_0^{\infty} \pi r^2 f(r) dr}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(r)$ 为粒子的尺寸分布函数。研究发现具有相同有效半径和方差的不同尺寸分布的云层具有相近的散射特性。在本文的计算中,采用修正的伽马分布,且有效方差均取为 1/9。在处理表面融化的冰球时,假设其为同心球,内球为冰球,内半径为 a ,外半径为 b , $c = (b - a)/b$ 表示表面融化厚度相对于整个球半径的比率。水和冰的复折射率的实部和虚部取自文献^[7]。

为了描述电磁波的偏振性质,采用了包括 4 个量的斯托克斯参数,散射场和入射场的关系为^[4]

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 R^2} \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 $[T]$ 为转换矩阵,对于球形粒子来说,非零的元素只有 8 个,而独立的只有 4 个,即

$$\begin{cases} T_{11} = T_{22} = \frac{1}{2}(S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) \\ T_{33} = T_{44} = \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \\ T_{12} = T_{21} = -\frac{1}{2}(S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) \\ T_{34} = -T_{43} = \frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*), \end{cases} \quad (3)$$

对于有一定尺寸分布的 N 个独立散射粒子,需要定义一个与变换矩阵相关的散射相矩阵,即

$$\mathbf{F}(\theta) = \frac{4\pi}{k^2 \cdot \langle C_{\text{ext}} \rangle} \cdot \langle \mathbf{T}(\theta) \rangle, \quad (4)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示尺寸分布 $f(r)$ 的加权平均, $\langle C_{\text{ext}} \rangle$ 表示平均消光截面。

单次散射的偏振百分率定义为 $-100F^{21}/F^{11}$,图 1 给出了 3 种不同波长的太阳光入射时 3 种构成云的单次散射相函数和偏振百分比,其中水云是由水滴构成的、冰云是由冰构成的,冰水混合云是由表面融合的冰晶粒子构成的,本文处理表面融化的冰球时取 $c = 0.177$ 。从图可以看出,当入射波长分别为 $\lambda = 0.7 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$ 时,有效半径为 $10 \mu\text{m}$ 的 3 种云的相函数和偏振百分比在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 差别很小,在后向有一定的差别,但仍然不是很大;而当入射波长为 $\lambda = 3.3 \mu\text{m}$ 时,从图中可以看出,水云的相函数与另外两种云的差别很大,冰云和冰水云的相函数差别不大;但是 3 种云的偏振百分比却是完全分开的,因此这个波长更适合区分云层的微观构成。

3 云层的多次散射

当介质内部无源和不及粒子间相互作用时,云层反射的辐射强度满足矢量辐射传输方程^[8]:

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{d\mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi)}{d\tau} + \mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi) = \\ \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^\pi \mathbf{I}(\tau, \vartheta', \vartheta_0, \varphi') \mathbf{Z}(\mu, \varphi; \mu', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta' + \frac{\omega_0}{4\pi} \mathbf{S}\mathbf{Z}(\mu, \varphi; \mu', \varphi') \exp(-\tau \sec \vartheta_0), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi)$ 代表斯托克斯参量, $\mathbf{I} = [I, Q, U, V]^T$, 这 4 个参数完整地描述了光波的所有信息, \mathbf{S} 为入射

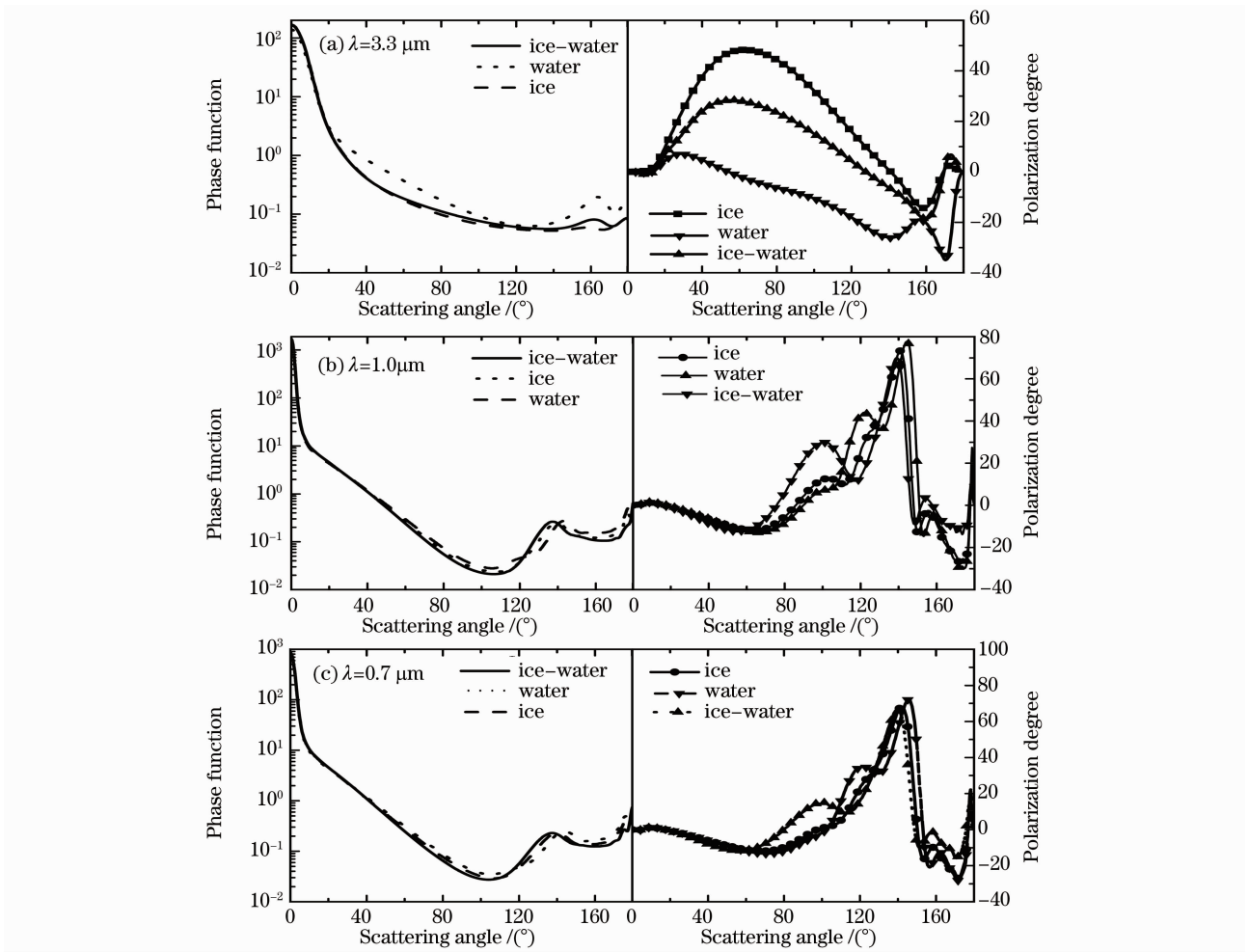


图 1 3 种不同构成的云层的单次散射相函数和偏振百分比

Fig. 1 Single scattering phase functions and polarization degrees of three types of clouds

到云层顶部的太阳车照度矢量, $\mathbf{Z}(\mu, \varphi; \mu', \varphi')$ 为相矩阵, ω_0 为云层的单次散射反照率。式中 ϑ_0 表示入射角, ϑ 为观测角, $\varphi - \varphi'$ 为入射角和观测角的方位角之差。

这里要求的是云层的上反射和透射, 因此只需要求出 $\mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi)$ 和 $\mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \varphi)$, 或者求出反射矩阵 $\mathbf{R}(\mu_0, \mu, \varphi)$ 和透射矩阵 $\mathbf{T}(\mu_0, \mu, \varphi)$ (μ_0 为入射角 ϑ_0 的余弦, μ 为观测角 ϑ 的余弦, φ 为方位角)。

$$\mathbf{R}(\mu_0, \mu, \varphi) = \frac{\mathbf{S}\mathbf{I}_r(\mu_0, \mu, \varphi)}{\mathbf{I}^*(\mu_0)}, \quad (6)$$

$$\mathbf{T}(\mu_0, \mu, \varphi) = \frac{\mathbf{I}_t(\mu_0, \mu, \varphi)}{\mathbf{I}^*(\mu_0)}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{I}_r(\mu_0, \mu, \varphi)$ 和 $\mathbf{I}_t(\mu_0, \mu, \varphi)$ 为反射和透射的斯托克斯参量, $\mathbf{I}^*(\mu_0) = \mathbf{I}_0 \mu_0$ 为被理想的 Lambertian 反射体的斯托克斯参量。 $\pi \mathbf{I}_0$ 为垂直于入射方向上单位面积入射光的斯托克斯参量。

矢量辐射传输方程的求解已有很多方法, 如累加法、离散坐标法、不变嵌入法、迭代法等。Van de Hulst^[8] 提出了累加法, 这种方法概念简单, 使用简便。基本思路是: 把大气分成一系列平面的平行层, 如果相邻的两层的反射矩阵和透射矩阵分别已知, 则这两层的结合层的反射矩阵和透射矩阵便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, 便可以决定整个云层或大气的反射矩阵^[9~12]。在本文的计算中取初始层的光学厚度为 $\tau = 2^{-25}$ 。

光的偏振度为

$$f_{\text{PO}} = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I}, \quad (8)$$

由于太阳光是非偏振光, 因此斯托克斯参量 $Q=U=V=0$ 。当非偏振光入射时, 偏振度为

$$f_{\text{PO}} = \frac{[(R^{21})^2 + (R^{31})^2 + (R^{41})^2]^{1/2}}{R^{11}} \quad (9)$$

图 2 给出了 3 种不同波长的太阳光垂直入射到光学厚度 $\tau=4$ 的云层上时,反射强度 $I=\mu_0 R^{11}$ 和偏振度 $-100Q/I=-100R^{21}/R^{11}$ 随天顶角的变化曲线,从图可以看出入射波长为 $\lambda=0.7 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 时,反射强度和偏振度差别都不是很大;但是当 $\lambda=3.3 \mu\text{m}$ 时,反射光的强度和偏振差别都很大,这主要是因为在这个波长上,冰和水的折射率差别较大,因此在进行云的相态识别时,这个波长比另外两个波长更适于进行遥感观测。

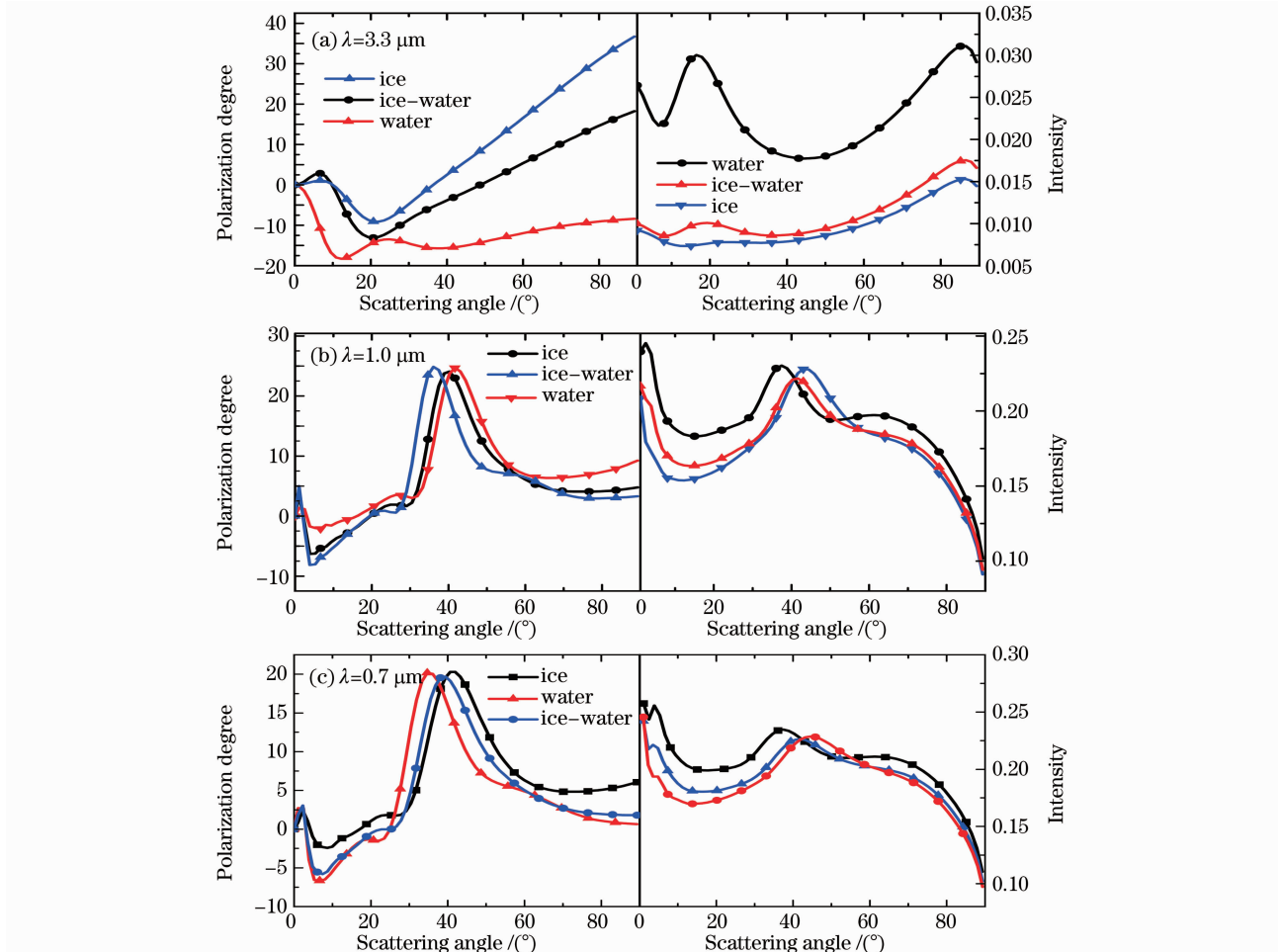


图 2 3 种不同构成的云层反射的太阳光的强度和偏振率

Fig. 2 Reflected light intensities and polarization degrees of three types of clouds obtained from adding-doubling method

4 结 论

以球形和多层球形粒子模型模拟了冰云、水云和冰水混合云中的粒子,利用米氏理论计算了其单次散射特性,并进行了比较。结果显示三者的单次散射相函数在不同波长上的差异较大。利用累加法,数值求解了矢量辐射传输方程。通过对冰水混合云的研究发现,在近红外波段的一些波长上,其偏振度对云层的相态非常敏感,因此可以用于对云层的遥感。

参 考 文 献

- 1 G. L. Stephens, C. M. Platt. Aircraft observations of radiative and microphysical properties of stratocumulus and cumulus clouds fields[J]. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 1987, **26**(9): 1243~1269
- 2 M. L. King, F. Radke, P. V. Hobbs. Determinations of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**(7): 894~907

- 3 Stewart G. Cober, Andre Tremblay, George A. Isaac. Comparison of SSM/I liquid water paths with aircraft measurement [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1996, **35**(6): 503~519
- 4 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. 2nd Ed.. San Diego: Elsevier Science, 2002
- 5 Sun Xianming, Shen Jin, Liu Wei *et al.*. Errors analysis of equivalent spheres model for computing the reflection properties of ice clouds[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2963~2967
孙贤明, 申晋, 刘伟等. 等效球模型模拟冰晶云反射的误差分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2963~2967
- 6 James E. Hansen, Larry D. Travis. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, **16**(4): 527~610
- 7 Alexander A. Kokhanovsky. Light Scattering Media Optics Problems and Solutions[M]. 3rd Ed.. New York: Springer, 2004
- 8 H. C. Van de Hulst. Multiple Lights scattering: Tables, Formulas and Application[M]. New York: Academic Press, 1980, 150~200
- 9 J. F. de Haan, P. B. Bosma, J. W. Hovenier. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light [J]. *Astron. Astrophys*, 1987, **183**(2): 371~391
- 10 K. F. Evans, G. L. Stephens. A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer*, 1991, **46**(5): 413~423
- 11 J. W. Hovenier, J. F. Haan. Polarized light in planetary atmospheres for perpendicular directions[J]. *Astron. Astrophys*, 1985, **146**(1): 185~191
- 12 W. A. de Rooij, C. C. A. H. van de Stap. Expansion of Mie scattering matrices in generalized spherical functions[J]. *Astron. Astrophys*, 1984, **131**(2): 237~248