

光吸收对冰晶粒子散射相函数的影响*

姚克亚 刘春雷

(中国科学技术大学地球和空间科学系,

第三世界科学院中国科学技术大学地球科学和天文学高级研究中心, 合肥 230026)

摘 要 本文利用射线跟踪法对冰晶粒子散射、吸收进行了研究。从理论上对一些常见的近似处理方法进行了讨论, 计算了长为 $300\mu\text{m}$, 半径为 $30\mu\text{m}$ 的六棱柱状冰晶粒子在不同波段的光散射相函数以及在波长 $2.2\mu\text{m}$ 时, 五种不同大小冰晶粒子的单次散射反照率。结果表明, 即使在有吸收情况下, Snell 公式和 Lambert 公式仍是近似成立的, 而吸收效应对散射相函数有明显影响。

关键词 冰晶 散射相函数 吸收

1 引言

高层卷云与长、短波辐射场之间的相互作用已经成为一个很重要的课题。由于卷云寿命长, 覆盖面广, 它对气候的变化将有重要的影响。在目前的气候模式中, 卷云的光学参数(散射和消散系数, 单色反照率, 非对称因子)普遍来自于 Mie 散射近似, 也就是将云中粒子转换成相同表面积或相同体积的球形粒子, 然后用 Mie 散射公式计算其光学参数。但是, 实际上高层卷云主要由不规则形状的冰晶粒子组成, 它与球形粒子有根本不同的光散射、吸收特性^[1], 因此不能用球形粒子简单地代替^[2]。

在近期的文献中, 有很多关于冰晶粒子光散射的文章, 特别是关于六棱柱状冰晶粒子的光散射, 像 Cai 和 Liou, Wendling 等人^[1,3], Takano 和 Liou 及 Rockwitz 等^[4,5]。除 Liou 等人^[6]在计算中考虑了光的吸收之外, 还无人对冰晶粒子的光吸收进行详细讨论, 其原因之一是因为大部分文章讨论的是冰晶粒子对可见光的散射, 因此光的吸收可忽略不计。再者, 在光散射模式中考虑光的吸收会使模式变得很复杂, 因为在考虑冰晶粒子对光的吸收后简单的 Snell 公式不再成立, 光反射、折射系数也很复杂^[7]。但是, 在考虑红外波段时, 无论是近红外还是远红外, 冰晶粒子对光的吸收都不能被忽略^[8]。

研究冰晶粒子红外光吸收对卫星资料的分析处理, 遥感探测技术的改进, 都有着很重要的意义, 本文对冰晶粒子的光吸收进行了研究, 从理论上讨论了一些常见的近似处理方法, 对冰晶粒子的散射相函数随波长的变化也进行了讨论。

2 方法

对于平面波, 其电矢量 (E) 可以写成

1994-08-09 收到, 1995-04-28 收到修改稿

* 本项工作得到中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室资助

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} - \vec{s})}, \quad (1)$$

其中 ω 是圆频率, t 是时间, \vec{k} 是波数, \vec{r} 是空间一点位置矢量, \vec{s} 是光波传播的方向矢量, i 是虚数, E_0 是波的振幅。根据 Born 和 Wolf 的推导^[7], 当冰晶粒子的光折射率 m ($= m_r - im_i$) 为复数时, 光在冰晶内的传播是非均匀的, 简单的 Snell 公式不再成立, 折射角 (θ'_i) 和入射角 (θ_i) 的关系由以下公式决定:

$$\sin \theta'_i = \sin \theta_i / (\sqrt{\sin^2 \theta_i + u^2}), \quad (2)$$

平行(l)和垂直(r)于散射平面的电矢量的反射(R)和折射(T)系数分别为

$$\begin{cases} R_l = \frac{(m_r - im_i)^2 \cos \theta_i - (u + iv)}{(m_r - im_i)^2 \cos \theta_i + (u + iv)}, & R_r = \frac{\cos \theta_i - (u + iv)}{\cos \theta_i + (u + iv)}, \\ T_l = \frac{2(m_r - im_i)^2 \cos \theta_i}{(m_r - im_i)^2 \cos \theta_i + (u + iv)}, & T_r = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + u + iv}, \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$u = \{[(m_r^2 - m_i^2 - \sin^2 \theta_i) + ((m_r^2 - m_i^2 - \sin^2 \theta_i)^2 + 4m_r^2 m_i^2)^{1/2}] / 2\}^{1/2}, \quad (4)$$

$$v = \{[-(m_r^2 - m_i^2 - \sin^2 \theta_i) + ((m_r^2 - m_i^2 - \sin^2 \theta_i)^2 + 4m_r^2 m_i^2)^{1/2}] / 2\}^{1/2}. \quad (5)$$

为了考查光吸收效应对折射角的影响, 我们对公式 (2) 和简单的无吸收情况下 Snell 公式 ($\sin \theta_i = \sin \theta'_i / m_r$) 的结果作了定量的分析比较 (图 1)。可以看出, 即使考虑光吸收, 在多数情况下, Snell 公式近似仍给出相当精确的结果。只有当吸收非常强, 入射角又非常大的情况下, 折射角的值略小于 Snell 公式的值。

由方程 (1) 知, 吸收的影响可表示为

$$E = E'_0 e^{i\varphi} e^{(v/m_i) \cos \theta'_i l m_i k_0}, \quad (6)$$

其中 l 是光线在冰晶内传播的距离, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$, λ_0 是入射光在真空中的波长, φ 是波的相位。因为 v 是负数, 所以振幅是衰减的。

与简单的 Lambert 吸收公式相比较, 多出了 $v \cos \theta'_i / m_i$ 因子。当 $\theta_i = 0^\circ$ 时, 该因子值是 -1; 当 $\theta_i = 20^\circ$ 时, 图 2 中给出了该因子的值随折射率虚部的变化。从图中可以

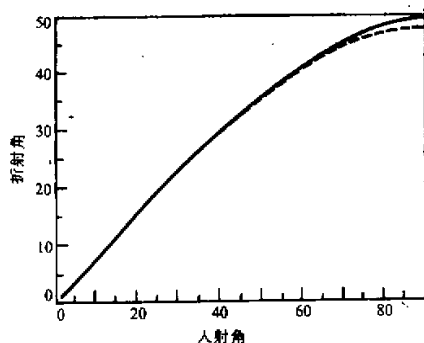


图 1 光吸收对折射角的影响 (折射率实部为 1.3106, 虚部分别为 0.01, 0.08 和 0.27)

实线: 折射率虚部为 0.01, 0.08 以及
Snell 公式, 虚线: 折射率虚部为 0.27

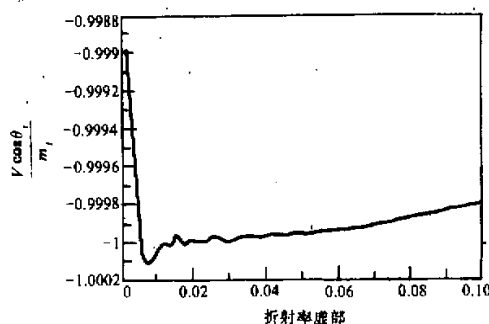


图 2 因子 $v \cos \theta'_i / m_i$ 随折射率虚部的变化 (入射角为 20°)

看出, 对绝大多数折射率虚部来说, 该因子的值非常接近-1, 仅在折射率虚部值很小时有较大变化, 因此 Lambert 公式是近似成立的。

3 计算结果

从可见光到红外, 冰晶粒子折射率的实部和虚部随波长的变化很大。图 3 给出了在不同波段 (波长分别为 0.56 、 2.105 和 $2.882\mu\text{m}$, 相应的折射率分别为 $1.3106-i3.29\times 10^{-9}$ 、 $1.269-i0.000841$ 和 $0.982-i0.127$), 长为 $300\mu\text{m}$, 半径为 $30\mu\text{m}$ 的六棱柱体冰晶粒子的光散射相函数。这三个波段分别代表了弱吸收, 中等吸收和强吸收情形。当吸收很小时, 相函数形状无多大变化, 但是峰值位置随折射率的实部大小而变化。当吸收很

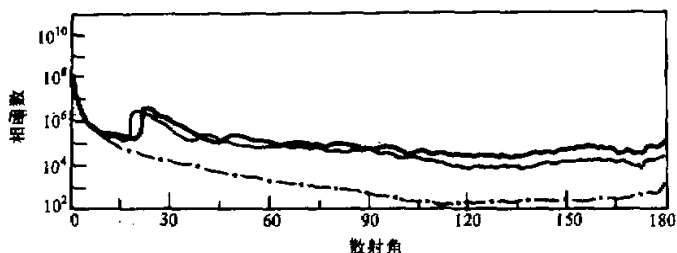


图 3 不同波长的相函数随散射角变化曲线

冰晶形状: 长 $300\mu\text{m}$, 半径 $30\mu\text{m}$ 的六棱柱体

粗实线: $m = 1.3106 - i3.29 \times 10^{-9}$, 细实线: $m = 1.269 - i0.000841$, 点划线: $m = 0.982 - i0.127$

强时, 相函数形状完全被改变, 由于部分能量被吸收, 整个曲线向下移动, 并且在不同角度, 相函数形状的变化率也不一样, 前向散射受衍射支配, 受吸收影响小, 所以变化不大, 后向散射主要来自于光线在冰晶粒子内部的多次反射, 所以受吸收影响变化很大。

粒子的单色单次散射反照率是散射能量和消散能量的比率。在波长为 $2.2\mu\text{m}$ 时, 我们对五种不同大小 (长和宽的比率分别为 $(\mu\text{m}/\mu\text{m})$: $20/20$, $50/40$, $120/60$, $300/100$ 和 $750/160$) 的冰晶粒子的单次散射反照率进行了计算, 其结果如图 4 所示, 同时与 Takano 和 Liou 的结果进行了比较, 尽管我们得的值稍大, 但两个独立的模式的计算结果非常接近。

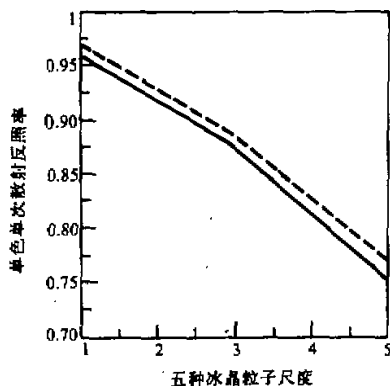


图 4 五种不同大小的冰晶粒子单次散射反照率

实线: Takano 和 Liou 的结果; 虚线: 本文作者的结果

4 结论

- (1) 即使在有吸收情况下, Snell 公式和 Lambert 公式都是近似成立的。
- (2) 吸收效应对散射相函数影响是明显的。当吸收很小时, 相函数形状变化不大, 但峰值位置随折射率实部大小而变化, 当吸收很强时, 相函数形状完全改变。

参 考 文 献

- 1 Wendling P, R. Wendling and K.K. Weickmann, 1979, Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals, *Appl. Optics.*, **18**, 2663~2671.
- 2 Minnis, P., K.N. Liou and Y. Takano, 1992, Inference of cirrus cloud properties using satellite-observed visible and infrared radiances, Part I: Parameterization of radiance fields, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1279~1304.
- 3 Cai, Q. and K.N. Liou, 1982, Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: theory, *Appl. Opt.*, **21**, 3569~3580.
- 4 Takano, Y. and K.N. Liou, 1989, Solar radiation transfer in cirrus clouds, Part I: Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3~19.
- 5 Rockwitz, K.D., 1989, Scattering properties of horizontally oriented ice crystal columns in cirrus clouds, Part I. *Appl. Opt.*, **28**, 4103~4110.
- 6 Liou, K.N., Y. Takano, S.C. Ou, A. Heymsfield and W. Kreiss, 1990, Infrared transmission through cirrus clouds: a radiative model for target detection, *Appl. Opt.*, **29**, 1886~1896.
- 7 Bom, M. and E. Wolf, 1975, *Principles of Optics*, Pergamon, New York.
- 8 Warren, S. G., 1984, Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, *Appl. Opt.*, **23**, 1206~1225.

The Effect of Light Absorption on the Ice Crystal Scattering Phase Function

Yao Keya and Liu Chunlei

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China,
Advanced Centre for Earth Sciences and Astronomy, University of Science and Technology of China,
Third World Academy of Sciences, Hefei 230026)

Abstract The treatment of the light absorption by ice crystals has been studied using the ray tracing method. Its effect on the ice crystal scattering phase function has been investigated for different wavelengths. It is found that the halo and peak positions, as well as the phase function angular distribution will vary with the wavelength. Comparison with other model results shows good agreement. The approximation method used in the absorption calculations has been discussed theoretically.

Key words ice crystal scattering phase function absorption