

卷云中粒子的密度变化对可见光波段 能量传输的影响*

刘春雷** 姚克亚

(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 本文讨论了卷云冰晶粒子的密度随其尺度大小的变化, 及其对折射指数的影响。对该变化所导致的粒子的光散射参数的变化进行了计算。采用 Monte Carlo 模式, 根据观测到的冰晶粒子的数密度, 使用不同的粒子密度分布, 计算了卷云对 $0.55\ \mu\text{m}$ 波长的入射光的反射和透射率。结果表明, 不同的粒子密度假设会导致一定的差别, 但卷云中粒子的密度变化对可见光波段能量传输的影响非常小, 可忽略不计。

关键词 冰晶粒子密度 光散射 Monte Carlo 模式

1 引言

近年来, 对卷云的研究越来越受到重视。由于卷云的位置高, 一般在对流层上部, 有时伸展到平流层^[1], 很难进行直接观测。一年四季, 不论地球表面的地理状况如何(高山、平原、还是江河湖海), 卷云覆盖大约 20%~30% 的地球表面, 因此是全球气候变化的重要因子。在全球气候变化模式(GCM)中, 需要对卷云的光学性质进行参数化, 这要知道卷云的粒子尺度谱, 粒子的外部形状和内部结构。美国在 1986 年开始了著名的 FIRE (First International Satellite Cloud Climatology Project Regional Experiment) 项目, 西欧各国也于 1989 年开始了 ICE (Ice Cloud Experiment) 项目, 从实验和理论上对卷云进行了全面的研究。通过多次的飞机测量, 取得了大量的第一手资料, 使人们对卷云的微物理过程和光学特性有了较为全面的了解, 对卷云中各种形状的冰晶粒子的光散射特性研究也有了很大进展^[2~7], 并开始用光传输模式对卷云的光散射特性进行探讨^[8~10]。卷云内部的温度低, 且温度分布差别很大, 卷云内冰晶粒子的形状不再是简单的球形, 而是不规则的各种形状的冰晶粒子的混合体。冰晶粒子一般是六边形结构, 常见的有长、短六棱柱体, 单个和复合的子弹体, 锥体和其他各种形体。要知道卷云在全球气候变化中的地位和作用, 必须知道卷云对长波和短波的散射特性, 从理论上对各种形状的冰晶粒子的光散射性质进行研究, 或者在各种气候条件下对卷云的光散射性质进行实际测量。但是在以前的文献中, 无论是单个冰晶粒子的光学特性进行计算, 还是对整个冰晶云的光学特性进行计算, 都只考虑粒子是固态的, 即粒子

1996-02-06 收到, 1996-06-25 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的资助

** 现在英国里丁大学气象系

密度为 0.92 g/cm^3 。而实际上,卷云中冰晶粒子的密度并不是常数,而是随粒子尺度大小的变化而变化。本文对粒子密度变化所造成的冰晶粒子本身的光学性质的变化,以及对光在卷云中传输的影响进行了探讨,以便对卷云在光传输过程中的作用有进一步的认识。至今为止,人们对卷云中粒子形状的确切结构尚不完全清楚,在某个体积里,也许存在着各种形状的,空间随机取向的冰晶粒子,很难知道其整体的光学性质,也不知道用什么样的粒子形状可代替这些混合的粒子群,因此,为了突出研究重点,作为初步近似,可用球形粒子来研究粒子的密度变化对其光学性质的影响^[11]。

2 卷云中粒子的密度变化及其对折射指数的影响

在对流云中,存在着各种形状和各种密度的降水粒子,像固体冰粒的密度是 0.92 g/cm^3 ,冰雹的密度是 0.5 g/cm^3 ,雪片的密度是 0.1 g/cm^3 ^[12]。在卷云中,小的冰晶粒子是由水汽分子聚合而形成的,是纯净的,密度约为 0.92 g/cm^3 (我们称其为纯粒子)。大的冰晶粒子的增长是由小粒子聚合而成的,其中含有空气气泡,因此它的密度比较小。Locatelli 和 Hobbs^[13]对对流云中冰晶粒子的密度进行了测量,发现冰晶粒

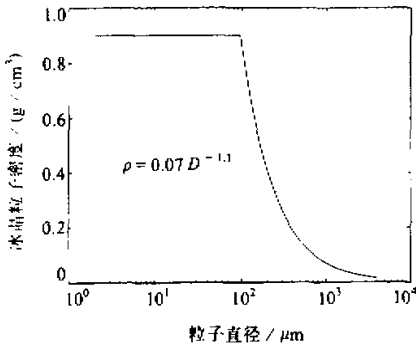


图1 卷云中冰晶粒子的密度随粒子直径的变化

子的密度随粒子尺度的增大而递减。后来,在对中纬度地区卷云进行的飞机观测中^[14],云中冰晶的谱分布是由二维的粒子谱仪测量的,并与其他独立测到的冰晶含量相比较,从而给出了冰晶粒子的密度分布公式为

$$\rho = 0.07 D^{-1.1}, \quad (1)$$

其中 D 是粒子直径,单位是 mm 。冰晶粒子的密度随粒子尺度的变化见图1。这个分布是否具有普适性,还有待于进一步的验证。

粒子密度的变化必然导致粒子光折射指数的变化,该变化可由 Maxwell-Garnett^[15]公式计算:

$$\varepsilon_{av} = \frac{(1-f)\varepsilon_m + f\beta\varepsilon}{(1-f) + f\beta}, \quad m = \sqrt{\varepsilon_{av}}, \quad (2)$$

其中 ε_m 和 ε 分别是空气和固体冰晶粒子的介质常数, f 为冰晶粒子的密度与固体冰晶粒子的密度之比,

$$\beta = \frac{2\varepsilon_m}{\varepsilon - \varepsilon_m} \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon - \varepsilon_m} \ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right) - 1 \right].$$

对于波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 的入射光,固体冰晶粒子的光折射指数是 $1.311 - i3.1 \times 10^{-9}$ ^[16]。由公式2算出的冰晶粒子的光折射指数的实部和虚部随粒子直径的变化见图2。无论实部 m_r 还是虚部 m_i 都随粒子直径的增大而减小,而且实部的变化曲线与密度的变化曲线形

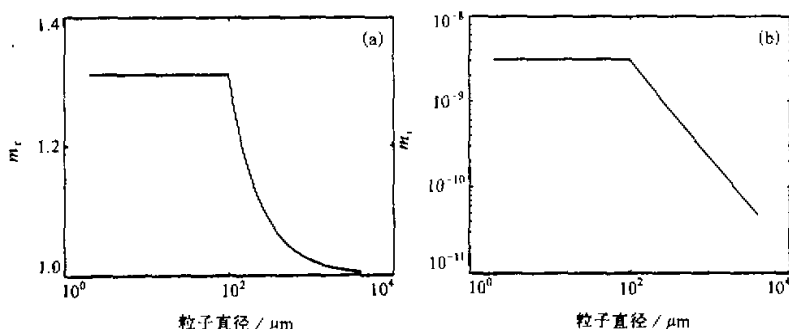


图2 当入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时, 卷云中冰晶粒子的光折射指数的实部 m_r 和虚部 m_i 随粒子直径的变化

状非常一致。

3 卷云中粒子的密度变化对其光学参数的影响

常用的卷云中的粒子谱分布可由指数函数表示^[17]

$$N(D) = N_0 e^{-3.67(D/D_0)}, \quad (3)$$

其中 D_0 是粒子尺度的中间值, 其定义是: 分别将粒子尺度 D_0 两侧的粒子体积加起来, 两边的体积相等。单位体积里总的粒子数 N_t 可表示为

$$N_t = \frac{N_0 D_0}{3.67}. \quad (4)$$

根据 Takano 和 Liou^[18], 卷云中单位体积里总的粒子数 N_t 大约为 $0.2 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。如果粒子的直径是从 $2 \mu\text{m}$ 到 $4000 \mu\text{m}$, 假设粒子密度分别是 $0.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ 和随公式 1 变化, 那么, 用米散射计算的上述粒子谱分布所产生的消光系数 σ_e , 吸收系数 σ_a 和后向散射系数 σ_b 随 D_0 的变化可表示为

$$\begin{cases} \sigma_e = \pi \sum_i Q_{ie} (D_i/2)^2 N(D_i) \Delta D, \\ \sigma_a = \pi \sum_i Q_{ia} (D_i/2)^2 N(D_i) \Delta D, \\ \sigma_b = \pi \sum_i Q_{ib} (D_i/2)^2 N(D_i) \Delta D, \end{cases} \quad (5)$$

其中 Q_e , Q_a 和 Q_b 分别是单个粒子的消光效率, 吸收效率和后向散射效率。 $N(D_i) \Delta D$ 是直径为 D_i 的粒子数。公式 5 的计算结果见图 3。为比较起见, 在图 3 中考虑的人射波长分别为 $0.55 \mu\text{m}$ (可见光) 和 $2.24 \mu\text{m}$ (红外), 粒子的尺度参数较大, 所以单个粒子的消光效率接近 2, 受粒子的密度影响不大。粒子的密度变化对可见光的吸收系数的影响可忽略不计, 但当 $D > 100 \mu\text{m}$ 时, 对红外光的吸收系数有较大影响。粒子的密度变化对可见光和红外光的后向散射系数都有影响。

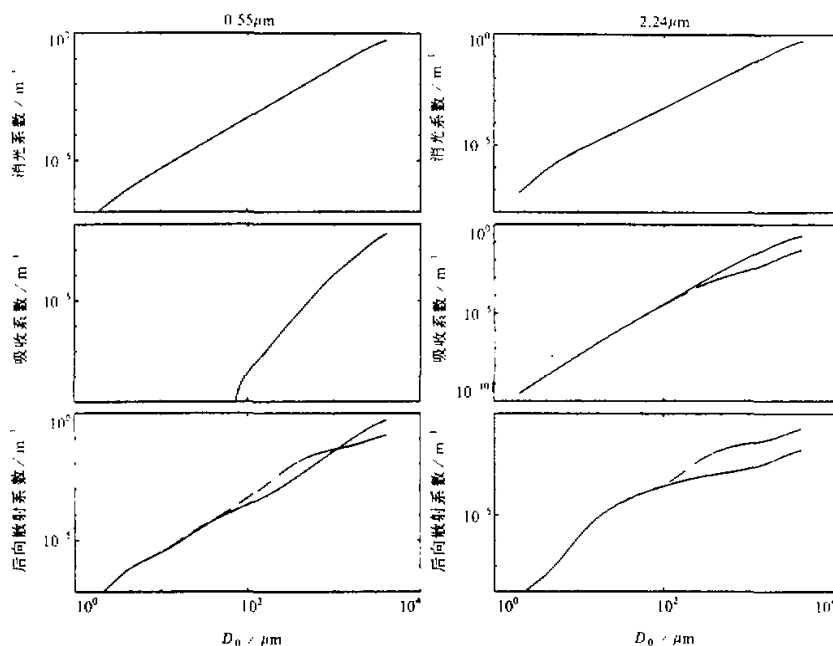


图3 当入射光波长分别为 $0.55 \mu\text{m}$ 和 $2.24 \mu\text{m}$ 时, 消光系数 σ_e 、吸收系数 σ_a 和后向散射系数 σ_b 随 D_0 的变化
实线: 假设所有粒子的密度是 0.92 g/cm^3 (固体); 虚线: 粒子的密度随尺度变化由公式 1 给出

4 对能量传输的影响

对于同样的粒子谱分布, 不同的密度分布会引起粒子的光折射指数的变化, 从而导致光散射角分布的变化, 影响卷云对光的反射和传输。在本节中使用 Monte Carlo 模式^[19], 研究卷云对波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 的短波的反射和传输。该模式以 Jonas^[20]的描述为依据, 使用的人射光子是 10^7 个。光子在卷云内的多次散射过程被连续跟踪。该模式的输入参量为: (1) 单位体积内粒子的消光系数, 可从公式 5 计算; (2) 单位体积内粒子的相函数角分布, 可用下式表示:

$$P(\theta) = \frac{\sum_i P(\theta, D_i) C_s(D_i) N(D_i) \Delta D}{\sum_i C_s(D_i) N(D_i) \Delta D}, \quad (6)$$

其中 $P(\theta, D_i)$ 是单个粒子的相函数角分布, C_s 是粒子的光散射截面。相函数累积概率角分布可用下式表示:

$$P_R(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^\theta p(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (7)$$

假设 $D_0 = 40 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$, N_i 是 0.2 个/cm^3 。由公式 6 计算的相函数角分布, 和由公式 7 计算的累积概率角分布见图 4。两种粒子密度假设下的计算结果非常接近。

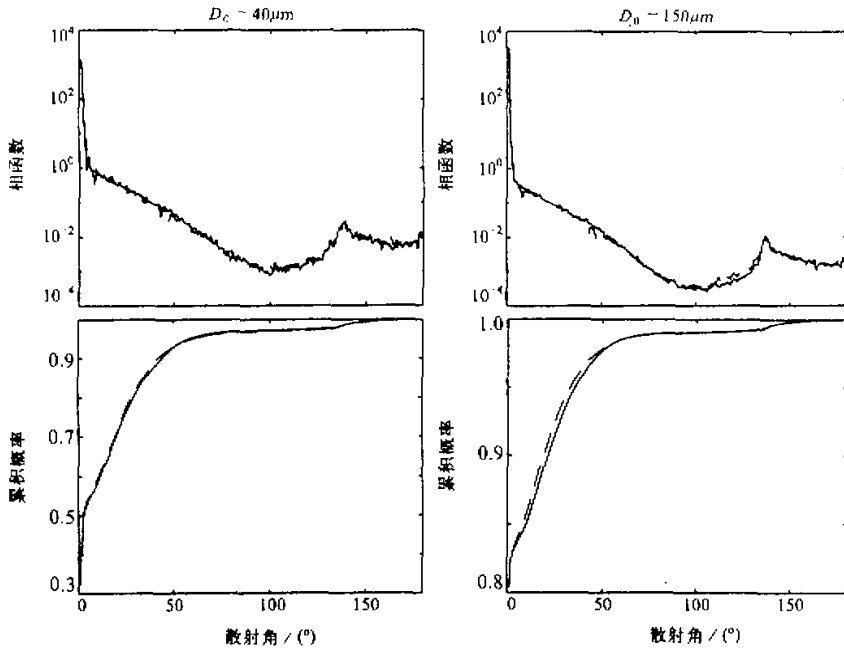


图4 当入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时, D_0 分别为 $40 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 时, 相函数和累积概率随散射角的分布
实线: 假设所有粒子的密度是 0.92 g/cm^3 (固体); 虚线: 粒子的密度随尺度变化由公式 1 给出

下面, 将讨论粒子的密度变化对 $0.55 \mu\text{m}$ 太阳光能量传输的影响。这里使用 $0.55 \mu\text{m}$, 因为大部分太阳光能量集中在这个波段左右。在模式中, 卷云水平尺度为 30 km , 厚度从 1 km 渐增到 5 km , 假设太阳光入射角分别为 0° 、 30° 和 60° , 我们对粒子密度的两种分布 (粒子密度分别是 0.92 g/cm^3 和随公式 1 变化) 进行了考虑。对于 $D_0 = 40 \mu\text{m}$, 消光系数分别为 $3.88 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 和 $4.83 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$; 对于 $D_0 = 150 \mu\text{m}$, 消光系数分别为 $5.33 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 和 $6.66 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。计算的反射率和透射率随卷云厚度的变化由图 5 和图 6 所示。

图 5 中, $D_0 = 40 \mu\text{m}$ 。反射率随入射角的增大而增大, 透射率随入射角的增大而减小。当粒子密度随公式 1 变化时, 对于同样的入射角, 与纯粒子的结果相比, 反射率变小了, 透射率增大。由于卷云的光学厚度较小, 只有很少量的光子被反射。当 $D_0 = 150 \mu\text{m}$ 时, 大粒子对反射的贡献较大。如图 3 所示, 密度变化对大粒子的光学参数影响较大, 从而对反射率和透射率的影响较大。为了定量地研究这个影响, 图 7 中给出了在两种粒子密度假设下, 所得到的反射率差别率和透射率差别率 $|X - X_1| / X$ 随卷云的厚度的变化。其中 X 是粒子为纯粒子时卷云对入射光的反射率或透射率, X_1 是粒子密度随公式 1 变化时, 相应的卷云对入射光的反射率或透射率。结果表明, 对于不同的粒子密度假设, 计算出的反射率差别率较大, 随卷云厚度变化较小。透射率差别率较小, 随卷云厚度变化较大, 随卷云厚度的增大而增大。考虑到反射率的绝对值较小, 透

射率的绝对值较大, 由此, 对可见光波段而言, 可以得到卷云中冰晶粒子密度的测量误差对反射或透射能量的计算影响不大。

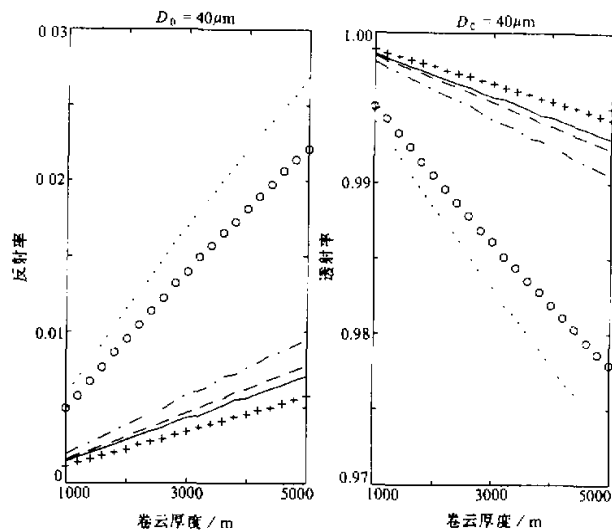


图 5 当入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$, $D_0 = 40 \mu\text{m}$ 时, 反射率和透射率随云厚度的变化
当冰晶粒子的密度由公式 1 给出, ++: 入射角为 0° ; —: 入射角为 30° ; ○○: 入射角为 60°
当冰晶粒子的密度为固体时, --: 入射角为 0° ; -·-: 入射角为 30° ; ···: 入射角为 60°

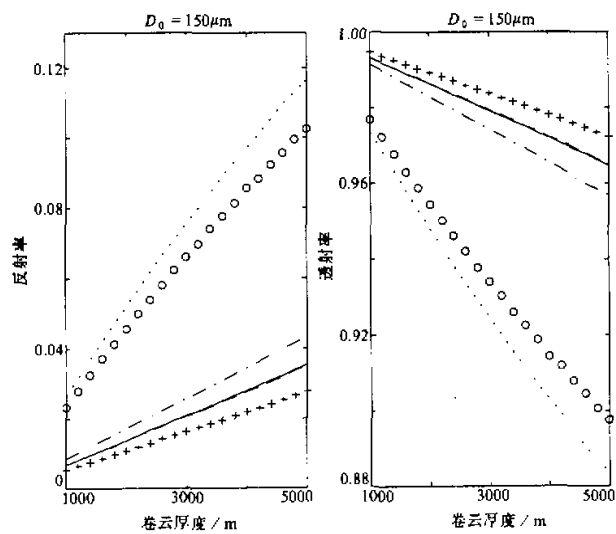


图 6 同图 5, $D_0 = 150 \mu\text{m}$

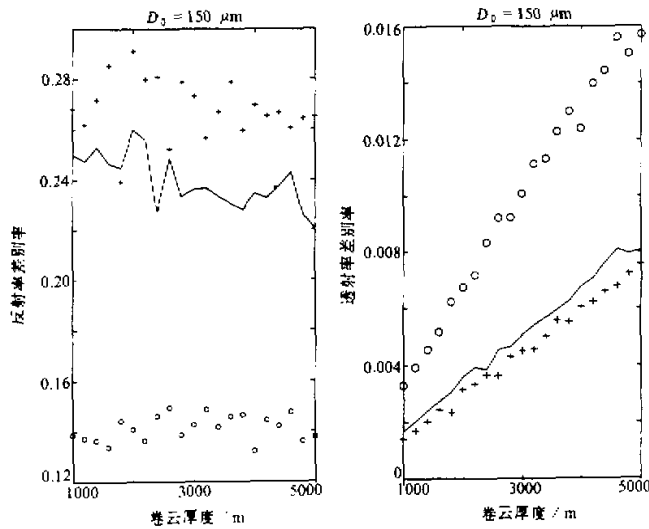


图 7 入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$, $D_0 = 150 \mu\text{m}$, 反射率差别率和透射率差别率随云厚度的变化
+++; 入射角为 0° ; —; 入射角为 30° ; ○; 入射角为 60°

5 总结

本文讨论了卷云中冰晶粒子的密度随其尺度大小的变化, 及其对折射指数的影响。对该变化而导致的粒子的光散射参数的变化进行了计算。结果表明, 当粒子直径 D 大于 $100 \mu\text{m}$ 时, 粒子的一些光散射参数将受粒子密度变化的影响。采用 Monte Carlo 模式, 根据观测到的冰晶粒子的数密度, 使用不同的粒子密度分布, 计算了卷云对 $0.55 \mu\text{m}$ 波长的入射光的反射和透射率。结果显示, 不同的粒子密度假设导致的差别不大, 指出了对可见光波段而言, 卷云中冰晶粒子密度测量误差对反射或透射能量的计算影响不大。

这里仅对 $0.55 \mu\text{m}$ 的入射光波的反射和透射率进行了讨论, 在以后的研究中, 有必要对近红外波段的反射和透射进行讨论, 从而从整体上研究卷云对太阳能的反射和透射。

参 考 文 献

- 1 Ackerman, T. P., K. N. Liou, F. P. J. Valero and L. Pfister, 1988, Heating rates in tropical anvils, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1606~1623.
- 2 Cai, Q. and K. N. Liou, 1982, Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: theory, *Appl. Opt.*, **21**, 3569~3580.
- 3 Takano, Y. and K. N. Liou, 1989, Solar radiative transfer in cirrus clouds, Part I: Single scattering and optical properties of hexagonal ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3~19.
- 4 Takano, Y. and K. N. Liou, 1995, radiative transfer in cirrus clouds, Part III: Light scattering by irregular ice

- crystals, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 818~837.
- 5 Macke, A., 1993, Scattering of light by polyhedral ice crystals. *Appl. Opt.*, **32**, 2780~2788.
 - 6 姚克亚、刘春雷, 1996, 光吸收对冰晶粒子散射相函数的影响, *大气科学*, **20**(1), 123~126.
 - 7 Liu Chunlei and Yao Keya, 1996, ice Crystal diffraction calculation, *Advances in Atmospheric Sciences*, **13**(3), 340~348.
 - 8 Fu, Q. and K. N. Liou, 1993, Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2008~2025.
 - 9 Minnis, P., K. N. Liou and Y. Takano, 1993, Inference of cirrus cloud properties using satellite observed visible and infrared radiance, Part I: Parameterization of radiance fields, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1279~1304.
 - 10 Liu Chunlei and Yao Keya, 1996, Ice particle shape effect on the cirrus cloud albedo, *南京大学学报(自然科学)*, 自然灾害成因与对策专辑, **32**, 314~319.
 - 11 Intrieri, J. M., G. L. Stephens, W. L. Eberhard and T. Uttal, 1993, A method for determining cirrus cloud particle sizes using lidar and radar backscatter technique, *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1074~1082.
 - 12 Frost, I. R., J. W. F. Goddard and A. J. Illingworth, 1991, Hydrometeor identification using cross polar Radar measurements and aircraft verification. American meteorological Society, 25th Conference on Radar Meteorology, Paris, France, 658~661.
 - 13 Locatelli, J. D. and P. V. Hobbs, 1974, Fall speeds and masses of solid precipitation particles, *J. Geophys. Res.*, **79**, 2185~2197.
 - 14 Brown, P. R. A. and P. N. Francis, 1995, Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water evaporator, *J. Atmos. Oceanic Technology*, **12**, 410~414.
 - 15 Maxwell-Garnett, J. C., 1904, Colours in metal glasses and in metallic films, *Philos. Trans. R. Soc.*, **A203**, 385~420.
 - 16 Warren, S. G., 1984, Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, *Appl. Opt.*, **23**, 1206~1225.
 - 17 Brown, P. R. A., A. J. Illingworth, A. J. Heymsfield, G. M. McFarquhar, K. A. Browning and M. Gosset, 1995, The role of spaceborne millimetre-wave radar in global monitoring of ice cloud, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2346~2366.
 - 18 Takano, Y. and K. N. Liou, 1989, Solar radiative transfer in cirrus clouds, Part II: Theory and computation of multiple scattering in an anisotropic medium, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 20~36.
 - 19 McKee, T. B. and S. K. Cox, 1974, Scattering of visible radiation by finite clouds, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1885~1892.
 - 20 Jonas, P. R., 1992, Some effects of spacial variations of water content on the reflectance of clouds, *Ann. Geophys.*, **10**, 260~266.

Cirrus Cloud Ice Particle Density Variation Effect on the Visible Radiation Transfer

Liu Chunlei and Yao Keya

(Department of Earth and Space Science, 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 ice particle density variation with the particle size and its effect on the ice particle refractive index were investigated. The variations in the scattering parameter caused by ice particle density variations were calculated. Based on the measured ice particle number concentration and different ice particle density assumptions, the reflection and refraction ratio of cirrus cloud for the wavelength $0.55\ \mu\text{m}$ have been calculated using a Monte Carlo model. The results show that the effect of ice particle density variation in cirrus clouds on the visible radiative transfer is very small and can be neglected.

Key words ice particle density light scattering Monte Carlo model