

文章编号: 1001-4322(2007)09-1449-05

卷云短波红外辐射特性

赵燕杰^{1,2,3}, 魏合理¹, 陈秀红¹, 徐青山¹, 饶瑞中¹

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 物理系, 合肥 230026; 3. 山东省科学院 激光研究所, 济南 250014)

摘 要: 采用离散纵标法耦合大气分子吸收, 模拟计算了卷云大气的反射特性。研究了在短波波段卷云辐射性质随波长、卷云光学厚度、卷云有效尺度、云高和卷云中冰晶粒子形状等的变化关系, 分析了卷云对大气红外背景辐射的影响。结果表明: 在 2.7 μm 的水汽强吸收带上, 卷云的出现明显增强了该波段的大气背景辐射, 反射率随光学厚度和云高增大而增大。

关键词: 大气与海洋光学; 反射率; 离散纵标法; 卷云; 辐射特性

中图分类号: O43; P407.5 **文献标识码:** A

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]。卷云对大气背景辐射的影响是增强还是减弱取决于大气状况、波长和卷云性质等, 因此研究卷云的辐射特性对大气探测、气候、辐射传输以及遥感等方面都具有十分重要的意义。卷云的辐射特性在国际上受到广泛关注, 近年来, 人们研究用红外高分辨率光谱观测数据来反演卷云的性质^[2-3], 这类研究大多数集中在 8~12 μm 的大气窗区。S. Kinne 等^[4]对卷云辐射的研究表明, 光学厚度相同的情况下, 由小粒子组成的卷云反射率要高于由大粒子组成的卷云的反射率。国内也有相关的研究报导, 刘春雷等^[5]采用 Monte Carlo 模式, 计算了不同粒子密度分布情况下卷云在 0.55 μm 波段的反射率变化。佟彦超等^[6]利用矩阵算法得到了不同光学厚度、不同太阳天顶角下卷云与水云在短波波段的透射与反射特征。李娟等^[7]利用 SBDART 辐射模式和 libRadtran 程序包模拟分析了卷云内冰晶性质(如有效尺度、冰晶含量及冰晶形状)对卷云反射率的影响。钟志庆等^[8]利用便携式 Mie 散射激光雷达对卷云进行探测, 可以获得卷云的厚度及其峰值消光系数。

本文用逐线积分法计算大气分子吸收, 结合离散纵标法(DISORT), 建立卷云条件下的光辐射传输模式, 研究了卷云辐射性质在短波波段随波长、卷云光学厚度、卷云有效尺度、云高和卷云中冰晶粒子形状等的变化关系, 分析了卷云对大气红外背景辐射的影响。

1 卷云辐射传输模式

本文把地面到大气顶的大气分成 100 层, 每一个均质层都用单次散射反射率、相函数和光学厚度等参数来表征。假定卷云均匀地分布于某一高度层, 除卷云层和地表外, 其它层大气介质的单次散射反照率均为零, 即其它层均为全吸收。利用逐线积分(LBL)方法计算大气分子单色吸收的光学厚度。给定云顶高度、有效尺度和光学厚度等参数, 通过有效尺度可以得到卷云消光效率因子、单次散射反照率和散射相函数等。本文利用 Yang 等^[9]计算的几种冰晶粒子的散射特性数据库, 采用 分布描述卷云中冰晶粒子的尺度分布, 给定卷云中冰晶粒子尺度分布, 结合样条拟合方法获得各种有效尺度和波长的卷云平均单次散射光学性质数据库, 包括实心中空六棱柱、六角平板、子弹花、聚合物以及星形枝状六种非球形冰晶粒子在短波 0.2~5.0 μm 波段的消光效率因子、吸收效率因子、散射相函数等^[10]。由于冰晶粒子前向散射很强, 导致其相函数前向很尖锐, 利用 Legendre 多项式展开时需要数百甚至数千项才收敛, 所以需要相函数前向截断。本文利用 Hu^[11]等的拟合方法把散射相函数展开为 Legendre 多项式, 得到展开系数和相函数截断因子, 并用该因子调整单次散射反照率和光学厚度。假定卷云所在高度的温度为卷云的温度, 把这些参数输入到 DISORT 程序^[12]中, 计算得到卷云条件下空间任意方向的辐射强度。

* 收稿日期: 2007-05-22; 修订日期: 2007-08-16

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目资助课题(KGCX2-SW-413); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金资助课题
作者简介: 赵燕杰(1981—), 女, 硕士研究生, 目前主要从事大气辐射传输和卷云辐射特性的研究; yjzhao1001@163.com。

通讯作者: 魏合理, hlwei@aiofm.ac.cn。

2 计算结果

本文用反射率来表征卷云对大气顶红外辐射的影响,定义为

$$R(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) = \frac{I(0; \mu, \phi)}{\mu_0 F_0} \quad (1)$$

式中: $\mu = \cos \theta$, $\mu_0 = \cos \theta_0$ 分别为观测天顶角和太阳入射天顶角的方向余弦, (μ_0, ϕ_0) 表征了太阳入射方向; F_0 是大气顶的太阳辐照度; $I(0; \mu, \phi)$ 是方向 (μ, ϕ) 上大气顶向上的辐射强度,它包括卷云反射的太阳辐射、卷云大气以及地表的热辐射。其它参数为:假设卷云由实心六棱柱体粒子组成,使用中纬度地区夏季的大气廓线,地表温度 T 为 288.1 K,太阳入射天顶角 θ_0 为 60° ,观测天顶角 θ 为 0° ,观测方向的方位角 ϕ 与太阳入射方位角 ϕ_0 之差 $\Delta\phi$ 为 180° ,云高 h_c 为 10 km,冰晶粒子有效尺度 D_e 为 $50 \mu\text{m}$,光学厚度(指卷云在可见光(如 $0.55 \mu\text{m}$) 处的光学厚度)为 1。地表的反照率选为草地型^[13],如图 1 所示。对于波长大于 $2.5 \mu\text{m}$ 时,假定地表反照率为零。

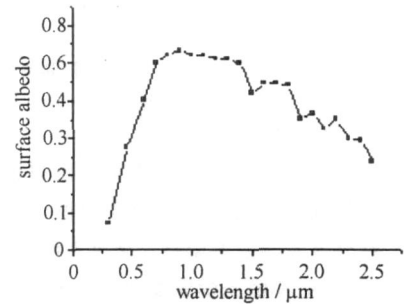


Fig. 1 Surface albedo vs wavelength
图 1 地表反照率随波长的变化关系

2.1 卷云辐射特性随波长的变化

图 2 和图 3 分别给出了在短波波段上,不同有效尺度和光学厚度下卷云的辐射光谱。可以看出,在可见光谱区,冰晶吸收很弱(见图 4),卷云的反射率与有效尺度的关系不大(主要与其光学厚度有关);而在近红外波段上,除了水汽的 $2.7 \mu\text{m}$ 强吸收带外,卷云对太阳光谱的反射取决于卷云的光学厚度,并在一定程度上取决于卷云内粒子的尺度,较小的冰晶会反射较多的太阳辐射,也就是说,有卷云存在条件下的反射率随冰晶粒子有效尺度增大而减小,在近红外光谱区的卷云反射率带有卷云中冰晶粒子有效尺度的信息。

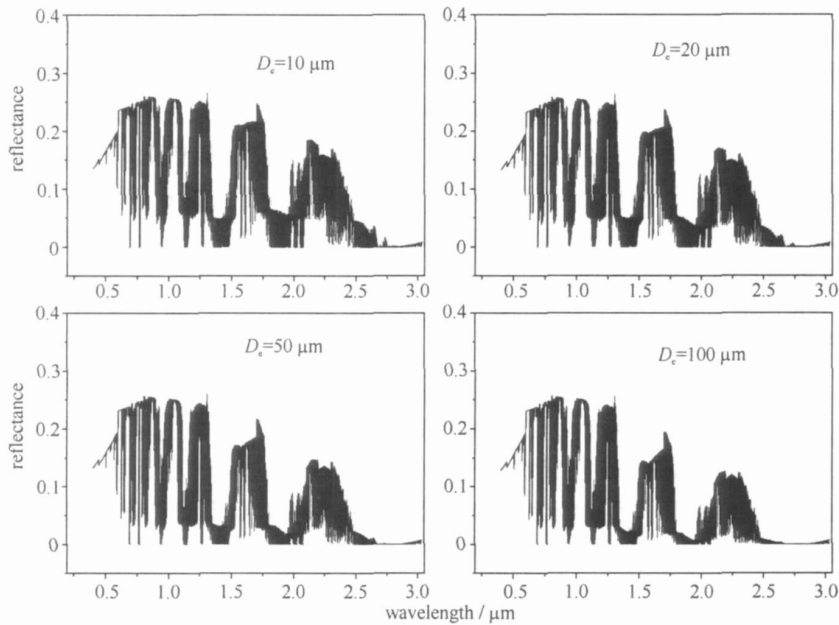


Fig. 2 Cirrus cloud radiance spectra for different effective size
图 2 不同有效尺度下卷云的辐射光谱

2.2 2.7 μm 波段上卷云辐射特性随其物理性质的变化

图 5 是 4 种不同的有效尺度下卷云反射率的光谱变化。在光学厚度为 1 时,由较小粒子组成的卷云反射率大于由较大粒子组成的卷云的相应值,也就是说,卷云的反射率随粒子有效尺度的增大而减小。

图 6 是晴天和 3 种不同的光学厚度下卷云反射率的光谱变化。在 $2.7 \mu\text{m}$ ($2.56 \sim 2.80 \mu\text{m}$) 的强吸收带上,由于水汽主要集中在对流层下部,地表和低层大气的信息被 $2.7 \mu\text{m}$ 强吸收带所吸收,从而使晴空大气的背景辐射很小,反射率很小。冰晶的多次散射能够增强谱线翼区的反射强度。有卷云存在时,卷云将反射太阳光谱,使大气背景辐射大大增强,所以该波段上大气顶向上的辐射主要来自高层卷云的信息,从图中可看出,卷云反射率随光学厚度的增加而增大,即使光学厚度为 0.5 时,反射率已经比晴天时增加两个量级。空间遥感器

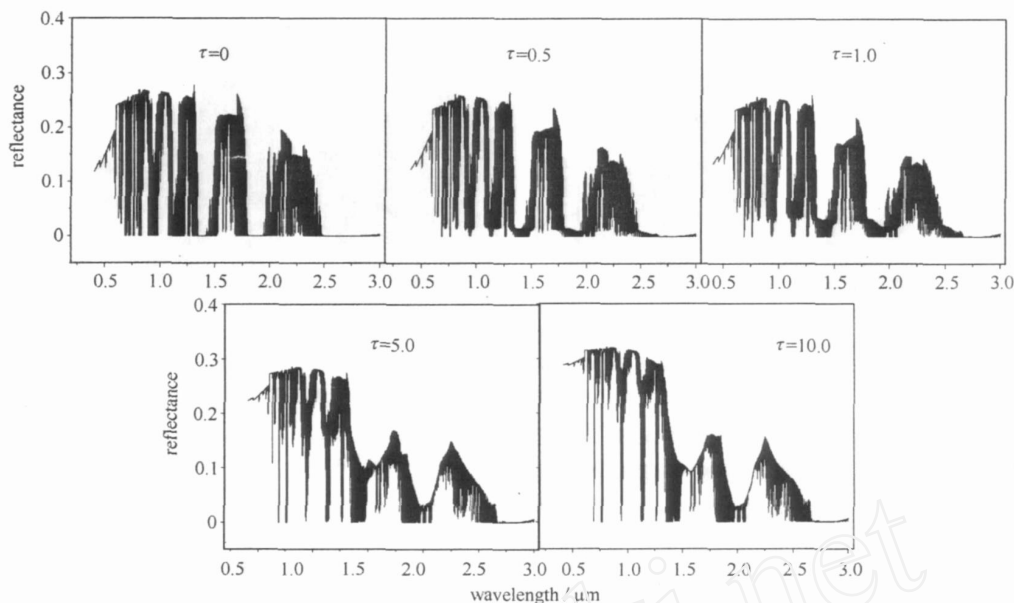


Fig. 3 Cirrus cloud radiance spectra for different optical thicknesses

图 3 不同光学厚度下卷云的辐射光谱

(如辐射计)探测到的能量主要来自高层卷云的散射,故 2.7 μm 波段在用于卫星遥感卷云微物理特性和光学特性方面具有潜在应用可能。

图 7 是 3 种不同的云高下卷云反射率的光谱变化。冰晶粒子有效尺度为 50 μm,光学厚度为 1 时,在 2.7 μm(2.56 ~ 2.80 μm)的水汽强吸收带上,卷云反射率随云高增大而增大。由于水汽含量随高度增加迅速减小,低层水汽的吸收衰减卷云的反射,故水汽吸收对卷云反射率的影响与云高有关。

2.3 卷云辐射特性随冰晶粒子形状的变化

为了比较不同形状粒子的辐射效应,我们计算了

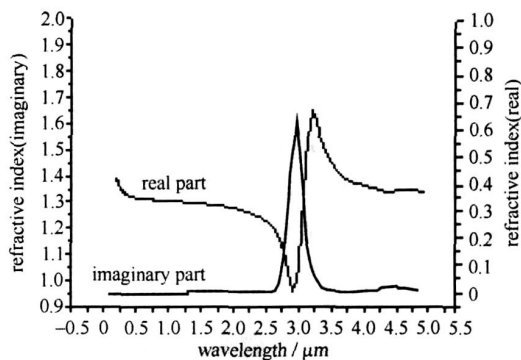


Fig. 4 Complex refractive index of ice for shortwave light

图 4 冰在短波波段的复折射率

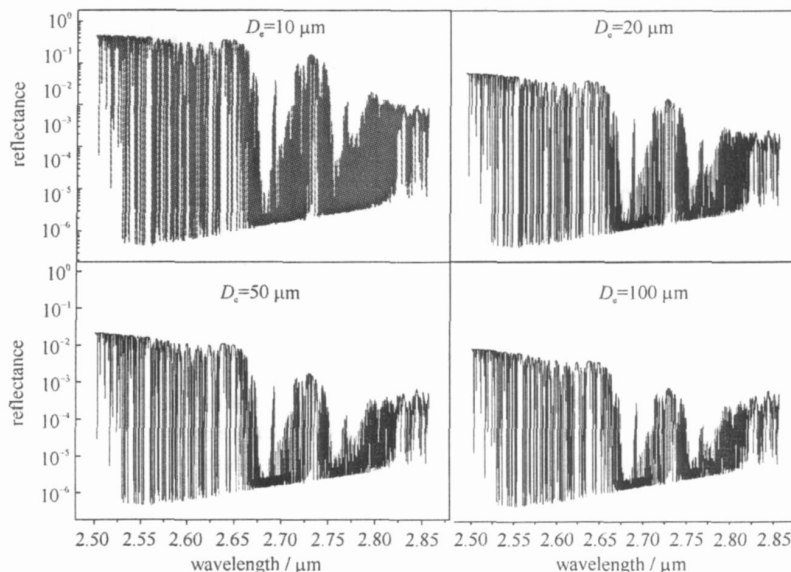


Fig. 5 Spectral reflectance of cirrus cloud for four effective sizes at 2.7 μm band

图 5 2.7 μm 带上不同有效尺度下卷云反射率的光谱变化

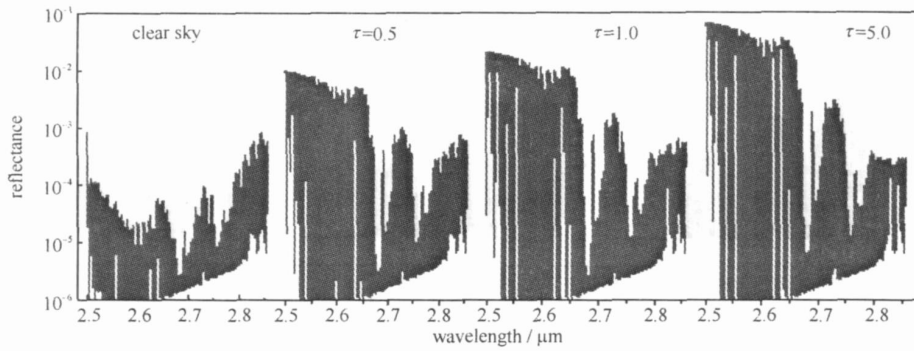


Fig. 6 Spectral reflectance of cirrus cloud for four optical thicknesses at 2.7 μm band

图 6 2.7 μm 波段不同光学厚度下卷云反射率的光谱变化

不同形状粒子组成的卷云的反射率。图 8 是由实心六棱柱、子弹花、聚合物 3 种不同的冰晶粒子组成的卷云反射率的光谱变化。并且用 Mie 散射理论计算了球形冰球粒子组成的卷云散射特性,从而得到了球形粒子的辐射光谱,将之与非球形粒子的辐射光谱作了比较,对 3 种不同形状的冰晶粒子组成的卷云其反射率也有所不同,只有聚合物粒子的反射率与球形粒子比较接近,六棱柱和子弹花形冰晶粒子的反射率与球形粒子差异都比较大。在 2.48~2.56 μm 的波段上六棱柱粒子的反射率最大,在有些波段上几乎是子弹花粒子的两倍。这是因为这些不同形状粒子排列的紧密程度不同。因此,只简单用球形粒子等效或某单一形状的非球形粒子进行计算可能会高估或低估了卷云的衰减。

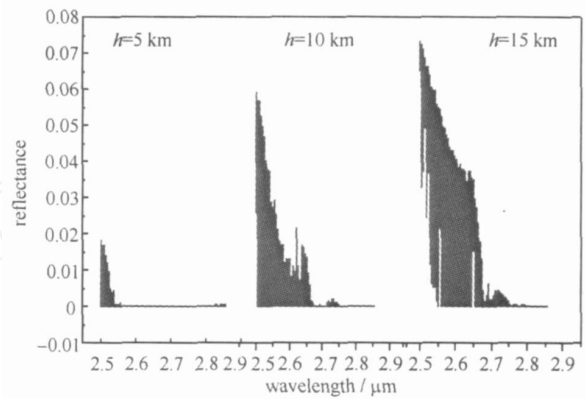


Fig. 7 Spectral reflectance of cirrus cloud for three cloud altitudes at 2.7 μm band

图 7 2.7 μm 波段不同云高条件下卷云反射率的光谱变化

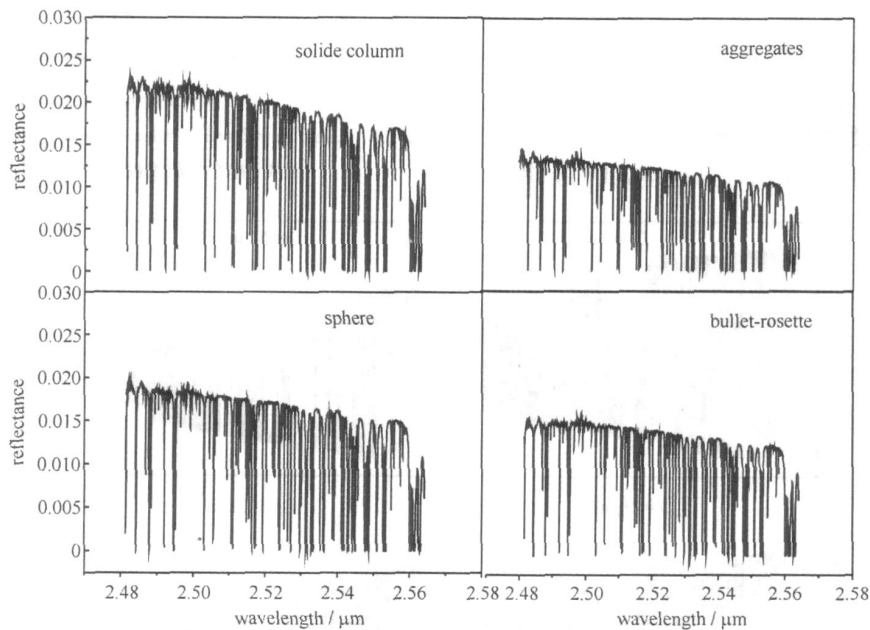


Fig. 8 Cirrus cloud reflectance spectra for various ice crystals

图 8 不同冰晶粒子形状下卷云反射率的光谱变化

3 结 论

本文利用 LBL + DISORT 方法,建立卷云条件下的光辐射传输模式,研究了卷云辐射性质在短波波段随波长、卷云光学厚度、卷云有效尺度、云高、卷云中冰晶粒子形状等的变化关系,分析了卷云对大气红外背景辐射的影响。在可见光谱区,卷云的反射率与有效尺度的关系不大(主要与其光学厚度有关);在近红外波段上,

卷云对太阳光的反射取决于卷云的光学厚度,并在一定程度上取决于卷云内粒子的尺度,较小的冰晶会反射较多的太阳光谱。在近红外光谱区卷云的反射率带有冰晶有效尺度的信息。在 $2.7\ \mu\text{m}$ 的水汽强吸收带上,卷云的出现明显增强了该波段的大气背景辐射,反射率随光学厚度和云高增大而增大,该波段在用于卫星遥感卷云微物理特性和光学特性方面具有潜在应用可能性。只简单用球形粒子等效或某单一形状的非球形粒子会给辐射计算带来一定的误差。

参考文献:

- [1] Liou K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective[J]. *Mon Weather Rev*, 1986, **114**: 1167-1199.
- [2] Smith W L, Ma X, Steven A, et al. Remote sensing cloud properties from high spectral resolution infrared observations[J]. *J Atmos Sci*, 1993, **50**:1708-1720.
- [3] Wei H L, Yang P, Li J, et al. Retrieval of semitransparent ice cloud optical thickness from atmospheric infrared sounder(AIRS) measurements[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, **42**: 2254-2267.
- [4] Kinne S, Liou K N. The effects of the nonsphericity and size distribution of ice crystals on the radiative properties of cirrus clouds[J]. *J Atmos Res*, 1989, **24**: 273-284.
- [5] 刘春雷,姚克亚. 卷云中粒子的密度变化对可见光波段能量传输的影响[J]. 大气科学, 1997, **21**(5): 599-606. (Liu C L, Yao K Y. Cirrus cloud ice particle density variation effect on the visible radiation transfer. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, **21**(5): 599-606)
- [6] 佟彦超,刘长盛. 卷云与水云的短波透射与反射特性[J]. 大气科学, 1998, **22**(1):32-38. (Tong Y C, Liu C S. Short-wave transmissivity and reflectivity of cirrus and water clouds. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22**(1): 32-38)
- [7] 李娟,毛节泰. 冰晶性质对卷云辐射特征影响的模拟研究[J]. 气象, 2006, **32**(2):9-13. (Li J, Mao J T. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties. *Meteorological Monthly*, 2006, **32**(2): 9-13)
- [8] 钟志庆,周军,戚福第,等. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(12):1145-1147. (Zhong Z Q, Zhou J, Qi F D, et al. Portable Mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12):1145-1147)
- [9] Yang P, Liou K N, Wyser K, et al. Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals[J]. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 4699-4718.
- [10] 赵燕杰,魏合理,陈秀红,等. 卷云短波光学特性[J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(3):169-174. (Zhao Y J, Wei H L, Chen X H, et al. Scattering properties of cirrus clouds in the shortwave spectral region. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 169-174)
- [11] Hu Y X, Wielicki B, Lin B, et al. -fit: a fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value decomposition least-squares fitting[J]. *J Quant Spect Radiative Transfer*, 2000, **65**: 681-690.
- [12] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Appl Opt*, 1988, **27**: 2502-2509.
- [13] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User's Manual[M]. Hanscom, AFB, MA, Air Force Research, 1997.

Infrared radiative properties of cirrus clouds in short wave spectral region

ZHAO Yan-jie^{1,2,3}, WEI He-li², CHEN Xiur-hong², XU Qing-shan², RAO Rui-zhong²

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;

2. Physical Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: DISORT method was employed to study radiative properties of cirrus clouds in the shortwave infrared spectral region. The properties were shown, as well as their dependence on wavelength, visible optical thickness of cirrus clouds, cloud altitude, the particle shapes and effective size of cirrus clouds, and so on. The influences of cirrus clouds on atmospheric infrared background radiation were analysed. The main result is that at $2.7\ \mu\text{m}$ atmospheric absorption region, the atmosphere background radiance is very weak, but when cirrus clouds appear in the sky, they reflect solar energy, thus the atmosphere background radiance is greatly enhanced.

Key words: Atmospheric and ocean optics; Reflectance; DISORT method; Cirrus clouds; Radiative properties