

1.315 μm 波长冰晶粒子辐射特性的模拟研究

赵燕杰^{1,2}, 魏合理², 徐青山², 陈秀红², 饶瑞中²

(1. 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用逐线积分法(LBL)计算得到了大气分子红外吸收信息, 结合不同形状冰晶粒子的单次散射特性, 通过离散纵标法(DISORT), 模拟计算了由实心六棱柱状冰晶粒子组成的卷云在波长为1.315 μm 时的散射特性和辐射特性, 定性分析了激光在卷云中传输时的衰减和散射规律与入射光的位置、卷云光学厚度、冰晶粒子有效尺度等参数的关系。与晴天大气相比较, 卷云的散射明显改变了光辐射的空间分布, 被其他传感器探测到的可能性增大, 其结果对于激光测距、激光探测等有关工程设计方面有非常重要的参考价值。

关键词: 大气辐射; 冰晶粒子; 激光传输; 离散纵标法

中图分类号: O43;P40 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2009)05-0782-05

Simulation of radiative properties of ice particles at 1.315 μm

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

(1. Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The line-by-line integration (LBL) method was used to calculate the infrared absorption of atmosphere molecule. Furthermore, the DISORT method was employed to study the scattering and radiative properties of cirrus clouds made of solid hexagonal prismatic shape ice particles at 1.315 μm with the single scattering properties of different shape ice particles. Then, the influence of cirrus clouds on atmospheric infrared background radiation and laser transmission were qualitatively analyzed by considering some physical parameters of cirrus clouds, including the incident angle, the observation location, optical thickness and effective size of ice particles. Compared with clear air, the scattering properties of ice particles apparently changed the space distribution of laser radiation, so the laser will be easily detected by the detectors. The results are helpful to the actual application, such as laser ranging and laser detecting.

Key words: Atmospheric radiation; Ice particles; Laser propagation; DISORT

收稿日期: 2008-12-03; 修订日期: 2009-03-08

基金项目: 合肥物质科学研究院院长基金资助项目

作者简介: 赵燕杰(1981-), 女, 山东济南人, 助理研究员, 硕士, 主要从事大气红外辐射传输和卷云辐射特性方面的研究。

Email: yjzhao1001@163.com

0 引言

近年来,随着激光技术的发展,近红外波段高能激光越来越受到大气科学界专家和学者们的青睐。目前,已开展了大量的研究工作^[1-3],大多数人眼可见的云,在实际应用过程中可以人为避开,但由于高空卷云通常位于对流层中上部到平流层底部,在光学上很薄,地面上裸眼有时不可见,给探测和研究带来了很大的困难。工作于大气中的激光辐射和红外辐射,通过卷云时要受到卷云吸收和散射的影响。首先其定向传输的能量要受到卷云的吸收;其次,卷云的散射改变了光辐射的空间分布,被其他传感器探测到的可能性增大。因此,在实际工程应用中研究卷云对主动光源(激光和红外)辐射的影响有非常重要的意义。在近红外波段,Gao B C等^[4]和 Meyer K^[5]等利用 MODIS 的 1.38 μm 和 0.645 μm 通道反演卷云的反射率和光学厚度 O_u 等^[6]建立了二维的辐射传输模式,研究了高能激光传输以及后向散射随卷云微物理性质的变化关系。

文中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,研究了由实心六棱柱状冰晶粒子组成的卷云在波长为 1.315 μm 和 3.8 μm 时的辐射特性与它的微物理性质的关系,分析了卷云对大气红外背景辐射的影响。

1 卷云平均单次散射特性

采用 Γ 分布描述卷云中冰晶粒子的尺度分布,利用 Yang 等^[7]计算的几种冰晶粒子的散射特性数据库,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^[8]。图 1 给出了由实心六棱柱组成的卷云波长为 1.315 μm 和 3.8 μm 时的单次散射反照率和吸收效率因子随波长的变化,可见,在两波长处的单次散射性质差别非常大。在有效尺度 5~200 μm 范围内,对单次散射反照率而言,波长为 1.315 μm 时,基本接近 1(大于 0.98),波长为 3.8 μm 时,随有效尺度增大而减小;对吸收效率因子而言,波长为 1.315 μm 时,基本接近 10^{-2} 或 10^{-3} ,波长为 3.8 μm 时,随有效尺度增大而增大。可见,卷云在

1.315 μm 附近对激光的主要影响是散射,吸收在消光中占了很小的部分。

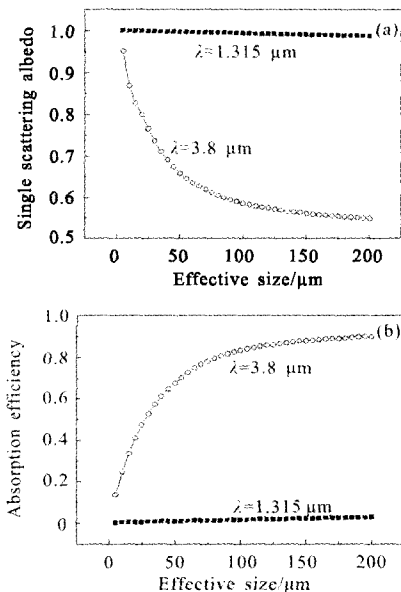


图 1 单次散射反照率和吸收效率因子随有效尺度的变化
Fig.1 Single-scattering albedo and absorption efficiency vs. the effective sizes

图 2 给出在波长为 1.315 μm 和 3.8 μm 时的相函数随散射角的分布图,对 0~180°的散射角取了 498 个点。粒子有效尺度为 50 μm 。从图中可以看出:由于冰晶的前向散射很强,导致相函数前向非常尖锐。波长为 1.315 μm 时相函数在 22°和 46°附近出现明显的晕、峰值,在 140°~160°处还有一宽阔极大值,这些冰晶的后向散射峰值是由外反射和内反射生成的;波长为 3.8 μm 时曲线较为平滑,只是在 30°附近有个较小的峰值。这是因为波长为 3.8 μm ,冰晶粒子的吸收比波长为 1.315 μm 时大得多(见图 3)。

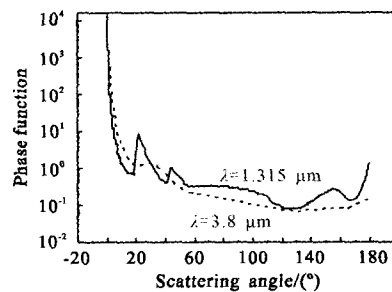


图 2 相函数随散射角的变化
Fig.2 Phase function vs. scattering angle

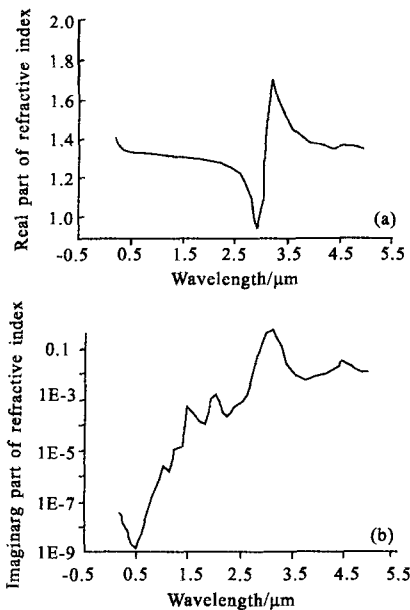


图 3 冰在短波波段的复折折射率

Fig.3 Complex refractive index of ice in the shortwave

2 卷云辐射特性

把地面到大气顶的大气分为 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, 其他层大气介质的单次散射反照率均为零, 即其他层均为全吸收。利用 LBL 方法计算所需波段各层大气分子单色吸收的光学厚度。给定卷云参数(如云顶高度、有效尺度和光学厚度), 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。DISORT 要求将相函数前向展开为勒让德多项式, 由于冰晶相函数前向很尖锐, 所以需要将相函数前向截断。文中利用 Hu^[9] 等的 δ -拟合方法把散射相函数前向截断, 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 程序中(采用 Stamnes 等^[10]编写的 DISORT β 版计算程序), 可以得到卷云条件下空间任意方向的辐射强度。

文中用反射率表征卷云对大气顶红外辐射的影响, 定义为:

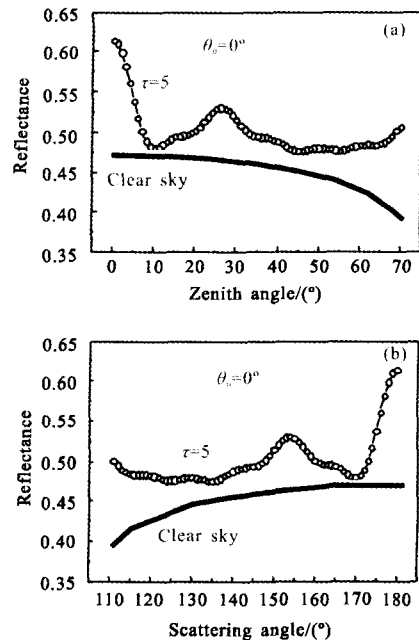
$$R(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) = \frac{\pi I(0; \mu, \phi)}{\mu_0 F_0}$$

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) 是太阳入射方向; F_0 是大气顶的太阳辐射度; $I(0; \mu, \phi)$ 是方向 (μ, ϕ) 上大气顶向上的辐射强度, 包括卷云反射的太阳辐射、卷云大气以及地表的热辐射。

在没有特别说明的情况下文中选择的参数如下: 中纬度夏季的大气廓线, 地表温度 T 为 288.1 K, 观测方向的方位角 ϕ 与太阳入射方位角 ϕ_0 之差 $\Delta\psi$ 为 180° , 云高 h_c 为 10 km, 冰晶粒子有效尺度 D_e (卷云中所有粒子的总体积除以其总投影面积的 1.5 倍) 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。假定地表为草地型, 波长为 $1.315 \mu\text{m}$ 时的反照率为 0.5。

图 4 和图 5 示出了在波长为 $1.315 \mu\text{m}$ 处卷云的反射率随观测天顶角和散射角的变化, 图 4 中太阳入射天顶角 θ_0 为 0° , 图 5 中 θ_0 为 80° 。从图中可以看出: 晴天大气随观测天顶角 θ 变化不大; 当有卷云存在时, 反射率随 θ 会出现一系列极大值, 尤其当 θ_0 为 80° 时, 在其附近出现主极大, 这是因为太阳入射天顶角 θ_0 是 80° , 在太阳入射法线对面 80° 时的反射, 犹如“镜面反射”, 可见, 卷云的存在明显改变了能量在空间的分布。反射率随散射角的变化可以对应冰晶粒子的相函数

图 4 卷云反射率随观测天顶角和散射角的变化($\theta_0=0^\circ$)Fig.4 Reflectance versus observation zenith angles and scattering angle($\theta_0=0^\circ$)

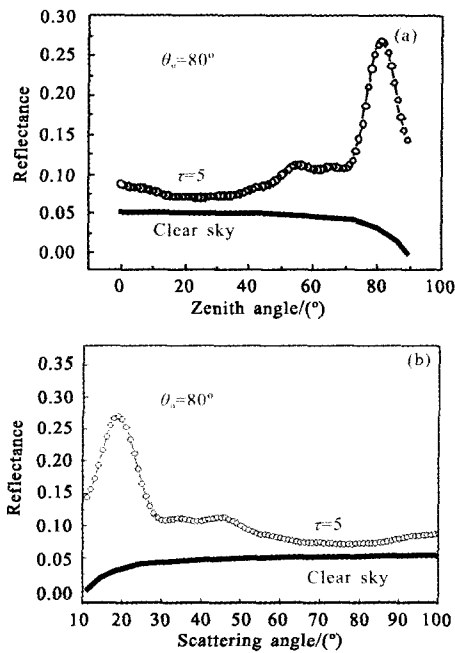


图 5 卷云反射率随观测天顶角和散射角的变化($\theta_o=80^\circ$)
 Fig.5 Reflectance vs. observation zenith angles and scattering angle($\theta_o=80^\circ$)

随散射角的变化(见图 2)。由图 4(b)可以看出:在 $140^\circ\sim 160^\circ$ 处有一宽阔极大值;由图 5(b)可以看出:在散射角为 46° 附近出现一极大值,散射角为 22° 附近的极大值与 20° 附近的主极大值(即观测天顶角)叠加在一起,可见,反射率随散射角的变化与冰晶粒子的相函数随散射角的变化趋势基本一致。

图 6 给出了波长为 $1.315\ \mu\text{m}$ 处晴天和卷云光学厚度为 5 的情况下,反射率随太阳入射天顶角 θ_o 的变化,这时的观测天顶角为 60° 。从图中可以看出:晴天大气反射率随太阳入射天顶角 θ_o 增大而减小,但有卷云存在时,太阳入射天顶角为 60° 时出现峰值,即出现“镜面反射”现象。

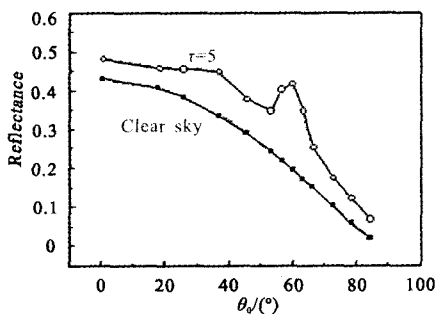


图 6 反射率随太阳入射天顶角的变化
 Fig.6 Reflectance vs. input zenith angles

图 7 是太阳入射天顶角为 0° 、观测天顶角为 60° 时,卷云存在下的反射率随光学厚度的变化。当光学厚度很薄时,卷云衰减地表反射,但当光学厚度增大到一定程度(比如 1),反射率将随光学厚度增大而增

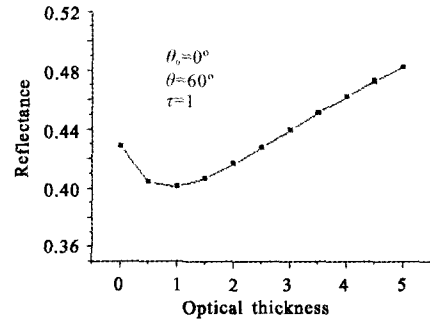


图 7 反射率随光学厚度的变化
 Fig.7 Reflectance vs. optical thicknesses

大。因为卷云将反射太阳的短波辐射,增加地球向外的辐射,使大气顶的背景辐射增强,对大气起冷却作用。在 $1.315\ \mu\text{m}$ 附近,冰的折射率虚部很小(见图 2),卷云吸收很小,反射率随卷云有效尺度的变化不是太明显(见图 8)。

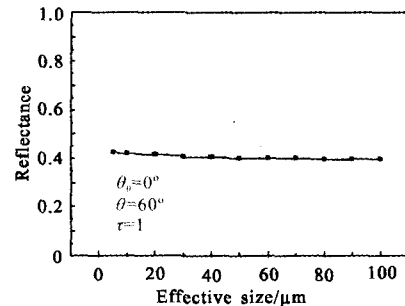


图 8 反射率随有效尺度的变化
 Fig.8 Reflectance vs. effective sizes

3 结 论

文中用逐线积分法计算大气分子红外吸收,结合离散纵标法,并耦合卷云的单次散射特性,耦合卷云单次散射特性,模拟计算了由实心六棱柱状冰晶粒子组成的卷云在波长为 $1.315\ \mu\text{m}$ 时的散射特性和辐射特性,研究了它们的差别以及与其微物理性质的关系,得到激光在卷云中传输时的衰减和散射规律与太阳光的位置、卷云参数(云光学厚度、粒子尺度、云高等)的定性分析。结论如下:

- (1) 在 $1.315\ \mu\text{m}$ 附近,散射相函数在 22° 和 46°

附近出现明显的晕值,而在波长为 $3.8\ \mu\text{m}$ 时不出现。

(2) 卷云存在时,在 $1.315\ \mu\text{m}$ 附近反射率随卷云光学厚度的增大而增大,而且当观测天顶角与太阳入射天顶角相等时,会出现明显的“镜面反射”现象;在 $3.8\ \mu\text{m}$ 附近反射率随卷云光学厚度的增大而减小,只有当光学厚度较大时,才会出现较为明显的“镜面反射”现象。

(3) 卷云在 $1.315\ \mu\text{m}$ 附近对激光的主要影响是散射,吸收在消光中占了很小的部分;其次,卷云的散射明显改变了光辐射的空间分布,被其他传感器探测到的可能性增大,这一点给实际工程应用提供了重要的理论基础。

参考文献:

- [1] RAO R Z. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering* (饶瑞中. 大气光学特性对激光工程影响的概率分析. 红外与激光工程), 2007, **36** (5): 583-587.
- [2] LV Xiang -ying, ZOU Ji -wei, LING Yong -shun. Atmospheric transparency's effect on ground target's infrared character [J]. *Infrared and Laser Engineering* (吕相银, 邹继伟, 凌永顺. 大气透明率对地面目标红外特性的影响研究. 红外与激光工程), 2007, **36** (5): 615-618.
- [3] XING Qiang, REN Hai-gang, CHEN Han-ping, et al. Simulation of infrared thermal image through atmospheric transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邢强, 任海刚, 陈汉平, 等. 经过大气传输的红外热像仿真. 红外与激光工程), 2007, **36** (1): 43-46.
- [4] GAO B C, YANG P, HAN W, et al. An algorithm using visible and $1.38\ \mu\text{m}$ channels to retrieve cirrus cloud reflectances from aircraft and satellite data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2002, **40**: 1659-1688.
- [5] MEYER K, YANG P, GAO B C. Optical thickness of tropical cirrus clouds derived from the MODIS $0.645\ \mu\text{m}$ and $1.38\ \mu\text{m}$ channels [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, **42**: 833-841.
- [6] OU S C, TAKANO Y, LIOU K N, et al. Laser transmission-backscattering through inhomogeneous cirrus clouds [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(27): 5744-5754.
- [7] 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.
- [8] ZHAO Yan-jie, WEI He-li, CHEN Xiu-hong, et al. Scattering properties of cirrus clouds in the shortwave spectral region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (赵燕杰, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波光学特性. 大气与环境光学学报), 2007, **2** (3): 169-174.
- [9] HU Y X, WIELICKI B, LIN B, et al. δ -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.
- [10] STAMNES K, TSAY S C, WISCOMBE W, 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.

书 讯

《光学系统设计》(内部资料)

《光学系统设计》主要内容包括基础光学与光学系统技术要求;光阑、光瞳和基本原理;衍射、像差和像质;光程差的概念;几何像差概述及其消除方法;玻璃的选择;球面和非球面;光学设计过程;计算机性能评价;高斯光束成像; $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 热红外成像基础和紫外光学系统;衍射光学;照明系统的设计;性能评价与光学测试;公差与生产工艺性;光学加工;光学设计中的偏振问题;光学薄膜;硬件设计问题;镜头设计优化实例;光学系统设计常见的错误和失误;经验法则和提示等。

有需求者可与《红外与激光工程》编辑部联系。电话:(022)58625202;(022)58625210;(022)23666400。