

文章编号: 1001-3806(2008)05-0523-04

## 1.064 $\mu\text{m}$ 波长卷云反射率的模拟研究

赵燕杰<sup>1,2,3</sup>, 魏合理<sup>1\*</sup>, 陈秀红<sup>1</sup>, 饶瑞中<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>

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

**摘要:** 为了给激光测距、激光对大气的探测等实际工程应用提供理论依据, 采用逐线积分方法计算大气分子吸收, 结合离散纵标法, 并耦合卷云的单次散射特性, 对由实心六棱柱状冰晶粒子组成的卷云在波长为 1.064 $\mu\text{m}$  时的散射特性和辐射特性进行了理论分析, 得到了该波长上激光在卷云中传输时的反射率随入射光源的位置、观测器的位置以及卷云参量(云光学厚度、粒子尺度等)的关系。结果表明, 卷云在 1.064 $\mu\text{m}$  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, 散射的方向变化主要由卷云的散射相函数以及光线入射角度和观测角度决定。这一结果对实际工程应用(比如激光测距、激光对大气的探测等)是有帮助的。

**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:** P407.5 **文献标识码:** A

## Simulation study on the reflectance of cirrus clouds at the wavelength of 1.064 $\mu\text{m}$

ZHAO Yan-jie<sup>1,2,3</sup>, WEI He-li<sup>1</sup>, CHEN Xiu-hong<sup>1</sup>, RAO Rui-zhong<sup>1</sup>, XU Qing-shan<sup>1</sup>

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Institute of Laser Research, Shandong Academy of Sciences, Ji'nan 250014, China)

**Abstract:** In order to provide a theoretical basis for the actual application such as laser ranging and laser detection of the atmosphere, line-by-line integration was used to calculate the optical thickness of atmosphere molecular absorption. Discrete coordinate method was employed to study property of cirrus clouds at 1.064 $\mu\text{m}$  with the single scattering properties of cirrus clouds and the atmospheric absorption. The influence of cirrus clouds on laser transmission was analyzed by changing the incident angle, the observation location and some physical parameters of cirrus clouds. The results showed that the main effect of the cirrus clouds on laser transmission is scattering at 1.064 $\mu\text{m}$  and the absorption take a very small part in the extinction. The spatial distribution of the radiation is changed by scattering of the cirrus clouds significantly and the direction changes of scattering are decided by scattering phase function, observation zenith angles and scattering angle. This results are helpful to the actual application.

**Key words:** atmospheric and ocean optics; reflectance; discrete ordinates radiative transfer; cirrus clouds; radiative properties

## 引言

工作于大气中的激光辐射, 通过卷云时要受到卷云的吸收和散射。由于卷云一般由非球形冰晶粒子组成, 在可见光到近红外波段散射的方向性非常强, 在不同的方向上散射能量将有很大差异。1.06 $\mu\text{m}$  YAG 激光是最常用的激光之一, 在大气遥感、对地观测等方面有着重要的用途。当它用于空间对地观测时, 有卷云

存在情况下, 卷云将散射激光或太阳的能量, 对仪器性能的影响很大。因此, 在实际工程中用激光对大气探测时, 卷云的影响必须考虑。卷云辐射特性的研究越来越受到国内外一些专家和学者的关注<sup>[1]</sup>。LIU 等<sup>[2]</sup>在波长为 1.315 $\mu\text{m}$  时研究了激光通过薄卷云后的辐射特性, 得到了卷云对激光传输的影响。OU 等<sup>[3]</sup>建立了 2 维的辐射传输模式, 研究了激光传输以及后向散射随卷云微物理性质的变化关系。

作者用逐线积分法计算大气分子吸收, 结合离散纵标法, 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 1.064 $\mu\text{m}$  时的散射特性和辐射特性, 分析了在该波长上卷云的反射率与入射光的位置、观测器的位置以及卷云参量的关系。其结果可供有关工程设计参考。

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目资助项目 (KGCX2-SW-413)

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。

\* 通讯联系人。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-05-28; 收到修改稿日期: 2007-09-10

### 1 卷云平均单次散射特性

作者利用 YANG 等<sup>[4]</sup>计算的几种单个冰晶粒子的散射特性数据库,采用  $\Gamma$  分布描述卷云中冰晶粒子的尺度分布,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特性数据库<sup>[5]</sup>。图1中给出了卷云在 1.064 $\mu\text{m}$  波长的单次散射反照率和吸收效率因子随有效尺度的变化。为了比较,把 3.8 $\mu\text{m}$  波长

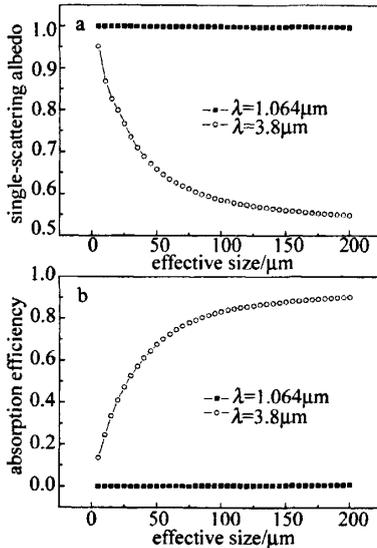


Fig. 1 Single-scattering albedo and absorption efficiency versus the effective sizes

上卷云相关的量也示于图中。从图中可以看出,在两波长上的单次散射性质差别很大。当有效尺度在 5 $\mu\text{m}$  ~ 200 $\mu\text{m}$  范围内时,对单次散射反照率而言,波长为 1.064 $\mu\text{m}$  时基本接近 1 (均大于 0.997), 波长为 3.8 $\mu\text{m}$  时随有效尺度增大而减小;对吸收效率因子而言,波长为 1.064 $\mu\text{m}$  时基本上在  $10^{-3}$  量级以下, 波长为 3.8 $\mu\text{m}$  时随有效尺度增大而增大。可见,卷云在 1.064 $\mu\text{m}$  附近对激光的主要影响是散射,吸收在消光中占很小的部分。图 2 是在这两个波长上的相函数随散射角的分布图,粒子有效尺度为 50 $\mu\text{m}$ 。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

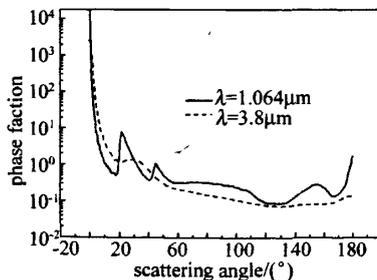


Fig. 2 Phase function versus scattering angle

常尖锐。波长为 1.064 $\mu\text{m}$  时相函数在 22° 和 46° 附近出现明显的晕、峰值,在 140° ~ 160° 处有一宽阔极大值,这些后向散射峰值是由外反射和内反射而产生的;波长为 3.8 $\mu\text{m}$  时曲线较为平滑,只是在 30° 附近有个较小的峰值。因为在波长为 3.8 $\mu\text{m}$  时冰晶粒子的吸收比波长为 1.064 $\mu\text{m}$  时大得多(见图 3)。

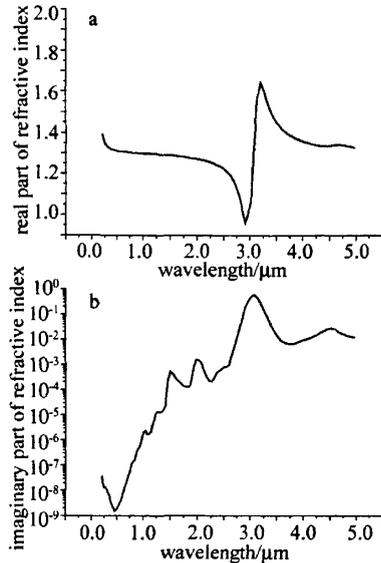


Fig. 3 Complex refractive index of ice in the shortwave

### 2 激光在卷云中传输时的反射率特性

作者把地面到大气顶的大气分成 100 层,每个均质层都用单次散射反照率和光学厚度等参量来表征。假定卷云均匀地分布于某一高度层,该层的温度为卷云的温度,除卷云层和地表外,其它层均为全吸收,给定卷云参量(如云高、有效尺度和光学厚度等),卷云的平均单次散射性质见参考文献<sup>[5]</sup>。离散纵标法要求散射相函数展开为勒让德多项式,由于相函数前向非常尖锐,展开系数需要数百甚至数千项才能收敛,因此相函数需要在前向被截断,利用 HU 等<sup>[6]</sup>的  $\delta$ -拟合方法把相函数前向截断,得到展开系数和截断因子,并用该因子调整单次散射反照率和光学厚度。利用逐线积分法计算大气分子吸收的光学厚度。最后结合离散纵标法程序(作者采用的是 STAMNES 等<sup>[7]</sup>编写的离散纵标法  $\beta$  版计算程序),可得到卷云条件下空间任意方向的辐射强度。

假定从大气顶向下对地观测,用反射率来表征卷云对大气顶向上的背景辐射的影响,反射率的定义:

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

式中,  $\mu = \cos\theta, \mu_0 = \cos\theta_0$ , 分别为观测天顶角和入射天顶角的方向余弦,  $\phi$  与  $\phi_0$  分别为观测方向方位面和入射方向方位角,  $(\mu_0, \phi_0)$  表征了入射光方向,  $F_0$  是大气

顶的入射光强度,  $I(0; \mu, \phi)$  是方向  $(\mu, \phi)$  上大气顶向上的辐射强度, 它包括卷云反射的入射光辐射、卷云大气以及地表的热辐射。

没有特别说明的情况下本文中选择如下参量: 使用中纬度夏季的大气廓线, 地表温度  $T = 288.1\text{K}$ , 观测方向的方位角  $\phi$  与入射方位角  $\phi_0$  之差  $\Delta\Psi = 180^\circ$ , 云高  $h_c = 10\text{km}$ , 冰晶粒子有效尺度  $D_e = 50\mu\text{m}$ 。假定地表为草定型, 波长为  $1.064\mu\text{m}$  时的地表反照率为 0.52。

图 4a 和图 4c 分别展示了入射天顶角  $\theta_0$  为  $0^\circ$  和  $80^\circ$  时在波长为  $1.064\mu\text{m}$  处卷云的反射率随观测天顶角的变化。从图中可以看出, 晴天大气随观测天顶角

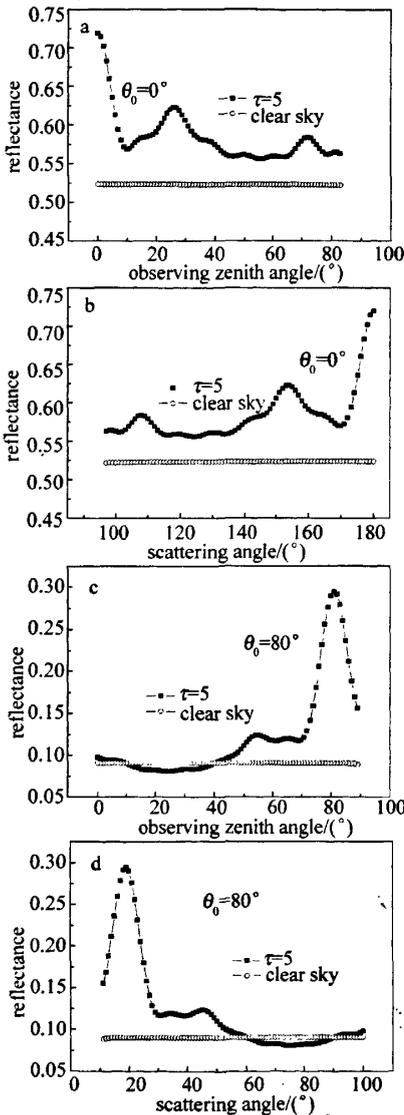


Fig. 4 Reflectance versus observation zenith angles and scattering angle  $\theta$  变化不大; 当有卷云存在时, 反射率随  $\theta$  会出现一系列极大值, 尤其当  $\theta_0 = 80^\circ$  时, 在  $\theta = 80^\circ$  附近出现主极

大, 因为入射天顶角  $\theta_0 = 80^\circ$ , 在入射光线对面  $80^\circ$  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, 反射率与入射光和散射光的方向有关。为了比较反射率的方向变化与散射相函数的关系, 根据入射和反射光的空间几何关系, 得到了反射率随散射角的变化关系, 见图 4b 和图 4d。由图 4b 可以看出, 在  $140^\circ \sim 160^\circ$  处有一宽阔极大值; 由图 4d 可以看出, 在散射角为  $46^\circ$  附近有一极大值, 散射角为  $22^\circ$  附近的极大值与  $20^\circ$  附近 (即观测天顶角为  $80^\circ$  时) 的主极大值叠加在一起, 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 (见图 2)。综上所述, 反射率的方向变化主要由卷云的散射相函数以及入射光角度和观测角度决定。

图 5 中给出了波长为  $1.064\mu\text{m}$  处晴天和卷云光学厚度为 5 的情况下, 反射率随入射天顶角  $\theta_0$  的变化 (假

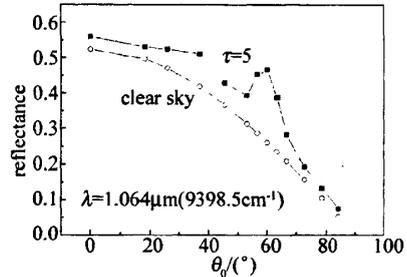


Fig. 5 Reflectance versus incident zenith angles ( $\theta = 60^\circ$ )

定观测天顶角为  $60^\circ$ )。由图可知, 对晴天大气反射率随入射天顶角  $\theta_0$  增大而减小, 但有卷云存在时, 入射天顶角为  $60^\circ$  时出现峰值, 即出现“镜面反射”现象。

图 6 是入射天顶角为  $0^\circ$ 、观测天顶角为  $60^\circ$  时, 波长为  $1.064\mu\text{m}$  处反射率随光学厚度 (见图 6a) 和有效

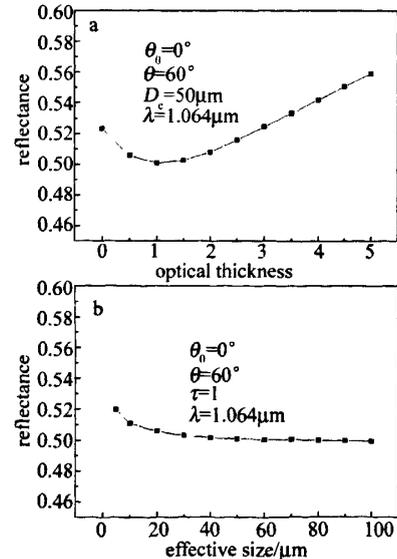


Fig. 6 Reflectance versus optical thicknesses and effective sizes of cirrus clouds

尺度(见图6b)的变化。由于地表反照率较高(0.52),当光学厚度很小时,卷云衰减地表反射,使大气顶向外的反射率随光学厚度增大而减小,但当光学厚度增大到一定程度(比如1),卷云将增加地球向外的辐射,使大气顶的背景辐射增强,反射率将随光学厚度增大而增大(见图6a)。在 $1.064\mu\text{m}$ 附近,冰的折射率虚部很小(见图3),反射率随卷云有效尺度的变化不明显(见图6b,此时光学厚度为1),只有对小粒子而言,这种变化关系较为明显:反射率随粒子有效尺度增大而减小。

### 3 结论

采用逐线积分法和离散纵标方法,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 $1.064\mu\text{m}$ 时的反射率特性,得到有卷云存在条件下 $1.064\mu\text{m}$ 激光对地观测时的反射率与入射光源的位置、观测天顶角和卷云参量(云光学厚度、粒子尺度等)的定性分析。

主要结论如下:(1)在 $1.064\mu\text{m}$ 附近,散射相函数在 $22^\circ$ 和 $46^\circ$ 附近出现明显的峰、晕值。(2)卷云存在时,在 $1.064\mu\text{m}$ 附近反射率随卷云光学厚度的增大而增大,随有效尺度的变化不明显;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。(3)卷云在 $1.064\mu\text{m}$ 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,散射的方向变化主要由卷云的散射相函数以及光线入射角度和观测角度决定。这一点给实际工程应用(比如激光测距、激光对大气的探测等)提供了理论基础。

### 参考文献

- [1] SASSEN K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72: 1848-1886.
- [2] LIOU K N, TAKANO Y, OU S C, *et al.* Laser transmission through thin cirrus clouds [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(27): 4886-4894.
- [3] 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.
- [4] YANG P, LIOU K N, WYSER K, *et al.* Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 105: 4699-4718.
- [5] ZHAO Y J, WEI H L. Scattering properties of cirrus clouds in the shortwave spectral region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 169-174 (in Chinese).
- [6] HU Y X, WIELICKI B.  $\delta$ -Fit: a fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value decomposition least-squares fitting [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2000, 65(3): 681-690.
- [7] STAMNES K, TSAY S C, *et al.* A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(13): 2502-2509.

(上接第476页)

### 3 结论

综上所述,可以构建一套高精度控制光电式光栅刻划机的系统。本系统以精密的光栅栅距作为计量标准,采用双频激光作为光源,由基准光栅的自准直衍射光束相干产生测量信号,具有一系列优点。实验证明此系统控制光电式光栅刻划机的分度运动,配合专门的硬件电路,使整个分度系统简洁、实用,计量误差很小,完全达到了中阶梯光栅等特种光栅对刻划机的高精度分度要求。

目前,已经建立了一套测量平台,相应的刻划机械结构改造工作正在进行之中,相信很快就可以投入到光栅刻划工作中使用。由于其优良特性,在精密计量方面有着广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] ZHU Sh J, ZHOU H X, BAO X Ch, *et al.* Diffraction grating [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986: 172-179, 205-219 (in Chinese).

- [2] YIN Ch Y. Modern interferometric measuring technique [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 149-177 (in Chinese).
- [3] ZHOU W L. Technology and application in high precise measurement of grating interferometer [J]. *Implement Technology*, 1994, 28(1): 37-42 (in Chinese).
- [4] ZHU M Ch, ZHOU Zh F, ZHANG T. Research of the He-Ne laser beat-wave interferometer [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 531-533 (in Chinese).
- [5] HAO D F. Theory of diffraction grating interferometer [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 1986: 3-40 (in Chinese).
- [6] LIN D J, JIANG H, YIN Ch Y. Nanometer interferometer using grating Doppler effect [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2002, 27(12): 1080-1084 (in Chinese).
- [7] DOBOSZ M. High-resolution laser transducer of linear displacements [J]. *Opt Engng*, 1992, 31(3): 500-503.
- [8] SHI L, MA Ch X, HU D J. Study of the photoelectric ruling control on the fabricating of the high density diffraction grating [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(3): 340-342 (in Chinese).
- [9] DOBOSZ M. Application of a divergent laser beam in a grating interferometer for high-resolution displacement measurements [J]. *Opt Engng*, 1994, 33(3): 897-901.