

# 卷云短波反射特性的模拟计算研究

曹亚楠<sup>1,2</sup> 魏合理<sup>1</sup> 陈秀红<sup>1</sup> 官纯文<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 利用通用大气辐射传输(CART)软件模拟计算了 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率,分析了卷云大气的反射率随波长、光学厚度、有效尺度、卷云高度和地表类型变化情况,并模拟计算了 0.55, 1.38, 2.75  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率间关系。结果表明,可见光到近红外波段,卷云大气反射率随卷云光学厚度的增大而增大。可见光波段,卷云大气反射率随卷云粒子有效尺度变化很小;近红外波段,卷云大气的反射率随卷云粒子有效尺度增大而减小;近红外大气强吸收波段,卷云大气的反射率随卷云高度的增大而增大。大气窗口区卷云大气的反射率随地表类型的变化有显著的变化。通过 0.55  $\mu\text{m}$  和 2.75  $\mu\text{m}$  波段,1.38  $\mu\text{m}$  和 2.75  $\mu\text{m}$  波段的卷云大气反射率间关系可以反演卷云光学厚度和有效尺度。

**关键词** 大气光学;卷云大气反射率;通用大气辐射传输软件;短波辐射;光学厚度;有效尺度

**中图分类号** O43; P407.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0801004

## Simulations of the Reflectance of Cirrus Clouds in Shortwave Spectral Region

Cao Ya'nan<sup>1,2</sup> Wei Heli<sup>1</sup> Chen Xiuhong<sup>1</sup> Gong Chunwen<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Anhui, Hefei 230031, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The reflectance of cirrus atmosphere from 0.4  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$  is simulated by a combined atmospheric radiative transfer (CART) software. The effects of wavelength, optical thickness, effective size, cirrus altitude and surface type on the reflectance of cirrus atmosphere are analyzed. The relationships between reflectance of cirrus atmosphere at 0.55, 1.38 and 2.75  $\mu\text{m}$  bands are simulated. Results show that the reflectance increases with optical thickness from visible with near infrared wavelength regions. Variation of the reflectance with effective size of cirrus clouds is small at the visible band, and the reflectance decreases with effective size at near IR wavelength band. The reflectance increases with cirrus altitude at IR absorption band of water vapor. Variation of the reflectance with different surface types is distinct in the atmospheric window region. The cirrus optical thickness and effective size can be retrieved with the relationship between reflectance of cirrus atmosphere at 0.55  $\mu\text{m}$  and 2.75  $\mu\text{m}$ , 1.38  $\mu\text{m}$  and 2.75  $\mu\text{m}$  bands.

**Key words** atmospheric optics; reflectance of cirrus atmosphere; combined atmospheric radiative transfer (CART) software; shortwave radiation; optical thickness; effective size

**OCIS codes** 010.1290; 010.5620; 010.1300; 010.1615; 010.2940

## 1 引 言

卷云位于地球大气的对流层中上层和平流层的下层,在全球能量平衡、辐射收支和天气等变化中起

着重要作用。一方面卷云反射(或散射)太阳辐射,使到达地表和大气的能量减少,冷却大气;另一方面卷云吸收地表和大气发射的长波辐射,加热大气。

**收稿日期**: 2011-12-20; **收到修改稿日期**: 2012-04-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077081)资助课题。

**作者简介**: 曹亚楠(1986—),女,硕士研究生,主要从事卷云红外辐射特性方面的研究。E-mail: cyn@mail.ustc.edu.cn

**导师简介**: 魏合理(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性等方面的研究。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

卷云对大气的冷却作用和卷云大气的反射率密切相关。卷云是由大量非球形冰晶粒子组成的,卷云中非球形冰晶粒子在可见光波段和红外波段的散射和吸收特性对于利用遥感技术推测卷云光学和微物理性质相当重要。

近年来国内外许多学者对卷云反射率进行了研究。Spinhirne 等<sup>[1]</sup>研究表明,卷云反射率和发射率依赖于太阳天顶角,同时发现 Henyey-Greenstein (HG)相函数不适合用于卷云反射率的研究。刘春雷等<sup>[2]</sup>利用 Monte Carlo 模式,根据观测到的冰晶粒子数密度,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。佟彦超等<sup>[3]</sup>利用矩阵算法计算了不同太阳天顶角下不同光学厚度的卷云和水云在短波波段的透射和反射特性。Kinne 等<sup>[4]</sup>的研究表明,光学厚度相同的情况下,小粒子卷云的反射率比大粒子卷云的反射率大。李娟等<sup>[5]</sup>利用 SBDART 辐射模式和 libRadtran 程序包模拟分析了卷云反照率随卷云内冰晶性质如有效半径、冰晶含量以及形状变化情况。赵燕杰等<sup>[6]</sup>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。

本文利用研制的通用大气辐射传输 (CART)<sup>[7~9]</sup> 软件模拟计算卷云大气的反射率,分析可见到近红外(0.4~2.5  $\mu\text{m}$ )波段卷云反射率随波长、光学厚度、有效尺度、卷云高度和地表类型变化情况。同时选择 0.55, 1.38, 2.75  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率进行进一步的研究。该研究加深了人们对可见光和近红外卷云大气反射率的认识,并可用于星载光谱传感器定量遥感卷云的特性。

## 2 CART 软件计算卷云大气反射率原理

CART 软件是一套基于我国大气模式的大气辐射传输软件,可以用来快速计算大气光谱透射率、大气热辐射、大气散射辐射和太阳直接辐照度等<sup>[7~9]</sup>。在新的版本中,增加了卷云和水云存在情况下的大气辐射计算功能。本文利用 CART 软件计算大气顶向上的辐射强度以及太阳入射直接辐照度,从而模拟计算出卷云大气的反射率。

假定从大气顶向下对地观测,卷云大气反射率定义为

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

式中  $\mu$  和  $\mu_0$  分别是观测天顶角和太阳天顶角的余

弦, $\phi$ 和 $\phi_0$ 分别为观测方位角和太阳方位角。 $(\mu_0, \phi_0)$ 表示太阳入射方向, $F_0$ 是大气顶的太阳辐照度, $I(0, \mu, \phi)$ 是方向 $(\mu, \phi)$ 上大气顶向上的辐射强度,它包括热辐射(路径程辐射、地表发射辐射和热辐射散射辐射)、散射太阳辐射和地表反射辐射。

## 3 模拟结果及分析

在模拟计算卷云大气反射率中,选择前美国空军地球物理实验室(AFGL)的中纬度夏季标准大气模式,假定卷云光学厚度为 0.5~10,有效尺度为 10~80  $\mu\text{m}$ ,卷云高度为 6, 10, 17 km,观测天顶角为 180°(垂直向下),太阳天顶角为 60°,观测高度为 100 km,观测和太阳相对方位角为 0°。地表类型分别为雪、沙子、海水、草地、土壤(陆地)、树叶和农作物。地表为雪地时假设地表温度为 270.0 K;对其他地表类型,地表温度设为 290.0 K。在没有特别说明的情况下本文中选择的参数如下:光学厚度为 1,有效尺度为 20  $\mu\text{m}$ ,卷云高度为 10 km,地表类型为陆地,卷云粒子形状为聚合物。由于在整个地气系统中,气溶胶是不可忽视的一部分,所以取近地面气溶胶模式为干净大陆型,能见度为 23 km,10~30 km 气溶胶高度分布类型为背景平流层型,气溶胶高度分布按 Modtran 气溶胶高度分布模式。用  $\tau$  和  $D_0$  分别表示卷云的光学厚度和有效尺度。下面将从 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率随卷云性质和地表类型的变化,0.55, 1.38, 2.75  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率随卷云性质的变化,以及 0.55, 2.75, 1.38  $\mu\text{m}$  波段卷云大气反射率间关系 3 个部分进行研究。

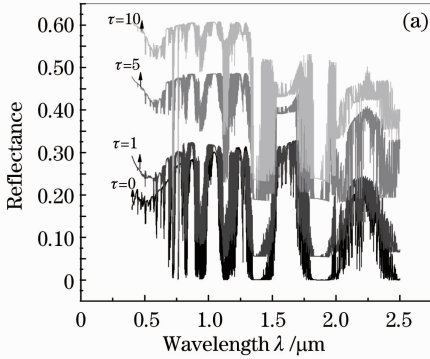
### 3.1 卷云大气反射率随卷云性质和和地表类型变化情况

#### 3.1.1 卷云大气反射率随卷云光学厚度和有效尺度的变化情况

卷云对太阳辐射的反射会对大气造成冷却作用,即太阳反照率效应。卷云对地气系统的冷却作用不仅和当时的天气状况有关,同时还与卷云的微物理参数(如卷云的光学厚度、冰水含量、冰晶尺寸和形状等)有关。卷云粒子尺度、卷云光学厚度以及卷云高度是决定卷云反射太阳辐射和卷云红外温室效应的相对强度的重要参量。因此研究卷云有效尺度、光学厚度以及卷云高度对卷云反射率的影响具有重要意义。

图 1 为卷云大气反射率随光学厚度、有效尺度以及波长的变化情况。在可见光和近红外波段,不管是在“大气窗口”区还是在大气强吸收带上,卷云

反射率都依赖于光学厚度,且随着卷云光学厚度的增大而增大。同时,可见光波段卷云反射率和卷云粒子有效尺度的关系不明显;而在红外波段上,卷云的反射率在一定程度上依赖于卷云粒子的有效尺度,同时卷云反射率随有效尺度增大而减小。也就是说,光学厚度一定的情况下有较小粒子尺度的卷云反射率比有较大粒子尺度的卷云反射率要大。可



见,在近红外光谱区的卷云反射率带有卷云粒子的有效尺度的信息,这与文献[9]研究结果一致。其原因是卷云中的冰晶粒子在可见光波段吸收很少,在红外波段有较强的吸收,而冰晶粒子的吸收效率因子与粒子尺度关系很大,粒子越小,吸收越小,单次散射越高,反射率越大。

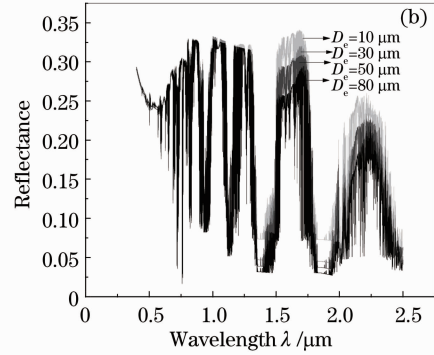


图1 卷云大气反射率随光学厚度、有效尺度和波长的变化情况

Fig. 1 Reflectance of cirrus atmosphere versus optical thickness, effective size and wavelength

由图1还可以看出,在大气强吸收波段(如 $1.38\ \mu\text{m}$ 和 $1.87\ \mu\text{m}$ 波段)没有卷云的情况下,晴空大气背景反射率较小,当有卷云存在时,卷云反射太阳辐射,使得大气强吸收波段地球大气向外的背景辐射显著增强。这就会使得空间探测器接收到的来自高层卷云反射(或散射)的太阳辐射增强,有助于卷云的监控和探测,如中分辨率成像光谱仪(MODIS)即用 $1.38\ \mu\text{m}$ 通道探测大气卷云<sup>[10]</sup>。

### 3.1.2 卷云大气反射率随卷云高度的变化情况

图2是卷云大气反射率随卷云高度( $h$ )和波长的变化情况。在大气窗口区,卷云反射率与云高关系不大,大气强吸收带处,卷云反照率随云高增加而显著增加,如在水汽吸收很强的 $1.38\ \mu\text{m}$ 和 $1.87\ \mu\text{m}$ 吸收带上,当卷云处在低高度时(如 $6\ \text{km}$ ),由于水汽的强吸收作用,在大气顶处看不到卷云反射的太阳辐射,随着卷云的增高,大气吸收的减少,卷云反射率逐渐增大,卷云反射率随卷云高度增高而增大。因此卷云高度不同对用大气强吸收波段卷云的反射率定量遥感卷云特性会产生一定的影响。

另外,卷云高度不同,卷云粒子的有效尺度不同。卷云越高,温度越低,卷云粒子的有效尺度越小,反射的太阳辐射越多,卷云对地气系统的冷却作用越大;卷云越低,温度越高,卷云粒子的有效尺度越大,反射的太阳辐射越少,卷云对地气系统的冷却作用越小,这对气候变暖起到一定的抑制作用。因

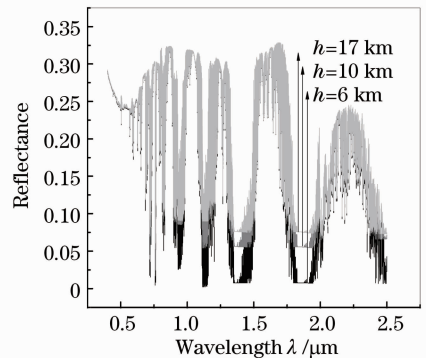


图2 卷云大气反射率随卷云高度和波长的变化情况

Fig. 2 Reflectance of cirrus atmosphere versus cirrus altitude and wavelength

此卷云对太阳辐射反射的研究对全球能量平衡、辐射收支、天气等变化具有重大的意义。

### 3.1.3 卷云大气反射率随地表反照率的变化情况

因为一般情况下,卷云较薄,从空间观测,大气窗口和半透明波段不可避免地带有地表的信息,所以模拟计算了不同地表类型下卷云大气的反射率。图3是卷云大气反射率随地表类型和波长的变化(a)以及7种地表反照率在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段的变化情况(b)。从图3(a)可以看出,在可见光波段,地表类型为雪时卷云大气的反射率最大,这是因为在可见光波段,地表类型为雪时地表反照率在7种地表反照率中最高,如图3(b)所示。在近红外波段,除了 $1.38\ \mu\text{m}$ 和 $1.87\ \mu\text{m}$ 水汽强吸收波带外,地表类型为沙子时卷

云大气反射率最大,地表类型为海水时最小。这是由于水体地表在近红外具有很强的吸收特性,几乎吸收了全部的人射辐射,地表反射率很小,相比之下沙子、土壤和草地等地表在近红外波段吸收的能量就较少,具有较高的地表反射率。在卷云大气反射率计算中卷云大气顶向上的辐射强度包括热辐射(路径辐射、地表发射辐射和热辐射散射辐射)、散射太阳辐射

和地表反射辐射。在其他参数不变的情况下,地表反照率越高,地表反射辐射越多,大气顶向上的辐射强度越大,卷云大气反射率也就越大。参考文献[9]表明在近红外波段,沙子地表类型的向上的大气辐射最大,海水地表类型的向上的大气辐射最小,所以,近红外波段地表为沙子地表类型时,卷云反射率最大;地表为海水地表类型时,卷云反射率最小。

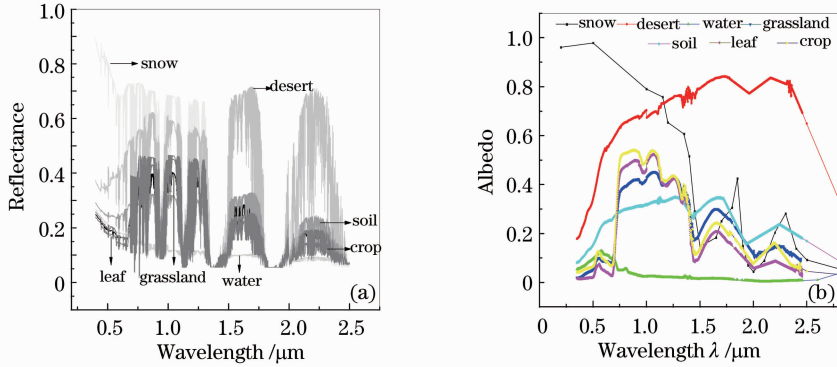


图 3 卷云大气反射率随地表类型和波长的变化情况(a)以及 7 种地表反照率随波长的变化(b)

Fig. 3 Reflectance of cirrus altitude versus the earth's surface type and wavelength (a) and albedo of seven earth's surface types versus wavelength (b)

### 3.2 不同波段卷云大气反射率随卷云性质的变化

为了进一步了解不同波段卷云大气反射率的特性,为利用卫星数据反演卷云性质做准备,选择 0.55, 1.38, 2.75 μm 这 3 个波段进行研究。

相对来说,可见光波长比较短,分辨率较高,但是易受大气的影响。利用卫星辐射数据获得反演地表产品或海洋产品可信而准确的算法,必须适当的消除大气的影响,而卷云污染是大气校正中一个重要因素,太阳能量的峰值处在 0.55 μm 波段,低层和中层的卷云反射太阳辐射。1.38 μm 大气强吸收波段在 MODIS 卫星数据中被用来遥感卷云的反射率<sup>[10]</sup>, 2.75 μm 带也是水汽强吸收带,通过选择可见光波段 0.55 μm 和红外 1.38, 2.75 μm 波段来模拟计算卷云条件下的大气反射率。

1.38 μm 和 2.75 μm 波段都位于水汽的强吸收带上,相比较来说,冰晶粒子在 2.75 μm 波段的吸收更大。由于大气中水汽主要集中在对流层下层,从卫星上观测时,地表、较低层云和大气的散射辐射将被水汽吸收,空间遥感器(辐射计)可以探测到的能量主要来自中高层卷云的散射,因此,这两个波段可用来探测卷云。

由于不同高度处卷云粒子的尺度不同,卷云高度越高,大气温度越低,卷云粒子的尺度越小;卷云高度越低,大气温度越高,卷云粒子的尺度越大。但是为了定性研究卷云大气反射率随光学厚度和卷云高度的变化,在 3 个不同的高度处选用了相同的卷云粒子有效尺度,如图 4 所示。在可见光波段(0.55 μm 波段),卷云大气反射率随光学厚度的增

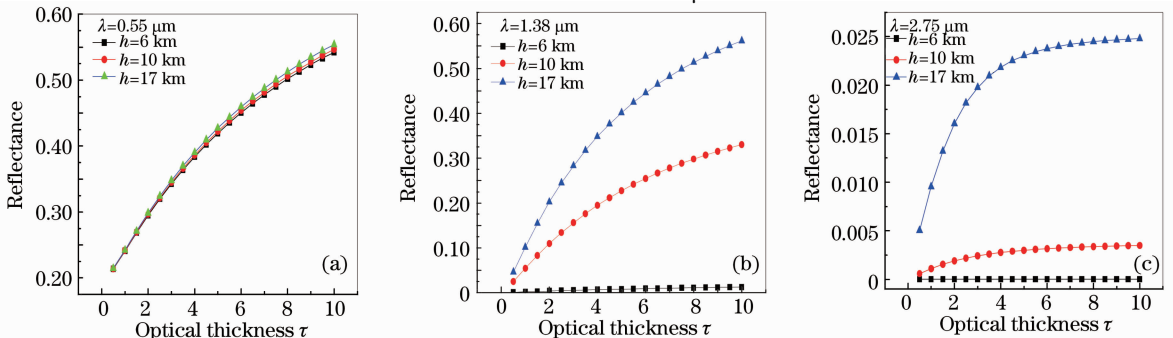


图 4 0.55, 1.38, 2.75 μm 波段卷云大气反射率随光学厚度和卷云高度的变化情况

Fig. 4 Reflectance of cirrus atmosphere with optical thickness and cirrus altitude at 0.55, 1.38 and 2.75 μm bands

大而增大,随着卷云高度的增大略微增大,增大幅度很小,这主要是因为可见光波段,气体吸收少,水汽的吸收可以忽略,大气透射率在6~17 km高度范围内随高度变化不大。而在水汽强吸收带1.38  $\mu\text{m}$ 波段,由于水汽的强烈吸收,大气中水汽含量随海拔高度的增大而迅速减少,使得到达卷云的辐射随高度增大而增大,到达大气顶的辐射强度增大,从而使得卷云反射率随卷云高度的增高而显著增大,中高层卷云大气的反射率随光学厚度的增大而增大,低层卷云大气的反射率很小,接近于0,且基本上不随光学厚度的变化而变化。水汽的另一较强吸收带2.75  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气的反射率随光学厚度和卷云高度的变化趋势基本上和1.38  $\mu\text{m}$ 波段一致。但是由于2.75  $\mu\text{m}$ 波段冰晶粒子的吸收比1.38  $\mu\text{m}$ 处强,且2.7  $\mu\text{m}$ 波段也是 $\text{CO}_2$ 的较强吸收带,所以

2.75  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气的反射率比1.38  $\mu\text{m}$ 波段处要小。

图5为3个波段处卷云大气反射率随光学厚度和有效尺度的变化情况。0.55,1.38,2.75  $\mu\text{m}$ 波段处,卷云大气的反射率都随光学厚度的增大而增大。在可见光波段(0.55  $\mu\text{m}$ 波段),卷云大气的反射率基本上不依赖于有效尺度。在水汽强吸收带(1.38  $\mu\text{m}$ 和2.75  $\mu\text{m}$ 波段),卷云大气反射率随着卷云有效尺度的增大而减小,同样光学厚度情况下,小粒子卷云的反射率明显大于大粒子卷云的反射率,这与文献[4]研究结果一致。由图还可以看出,有效尺度从80  $\mu\text{m}$ 减小到10  $\mu\text{m}$ ,1.38  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气反射率增大1倍左右,而2.75  $\mu\text{m}$ 波段处卷云大气反射率增加了6倍左右,可见利用2.75  $\mu\text{m}$ 波段可以反演卷云粒子有效尺度。

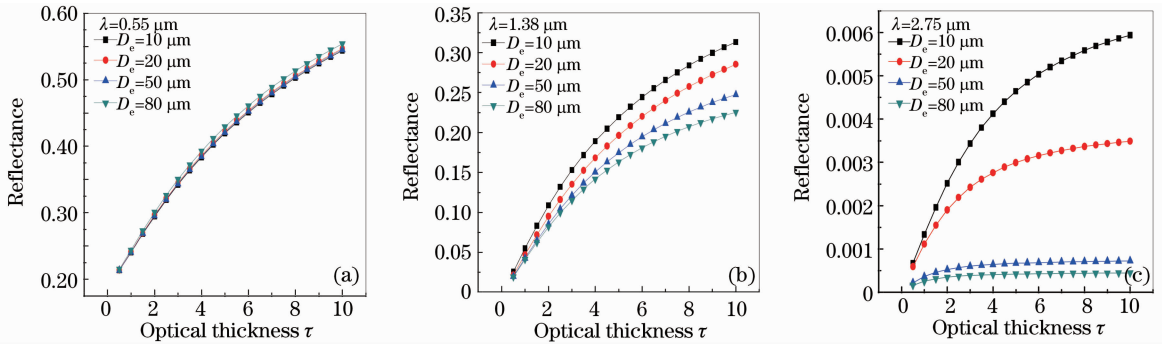


图5 0.55,1.38,2.75  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气反射率随光学厚度和有效尺度的变化情况

Fig. 5 Reflectance of cirrus atmosphere versus optical thickness and effective size at 0.55, 1.38 and 2.75  $\mu\text{m}$  bands

### 3.3 0.55,1.38,2.75 $\mu\text{m}$ 波段卷云反射率间关系

在可见到近红外波段利用卫星数据反演卷云的性质,需要利用不同波段处卷云的反射率<sup>[10~12]</sup>。由于1.38  $\mu\text{m}$ 波段附近太阳的能量比2.75  $\mu\text{m}$ 波段附近大,对空间探测器对信号的接收和分辨更为有利;同时,1.38  $\mu\text{m}$ 附近冰晶粒子的吸收明显小于2.75  $\mu\text{m}$ 附近的值,有助于探测卷云的光学厚度等性质的反演。但是由于1.38  $\mu\text{m}$ 波段冰晶粒子的吸收比2.75  $\mu\text{m}$ 波段小的多,2.75  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气反射率携带有更多的卷云粒子尺度的信息,仅仅研究0.55  $\mu\text{m}$ 和1.38  $\mu\text{m}$ 波段反射率间关系只能反演出卷云的光学厚度,而无法反演卷云粒子的有效尺度,如图6所示,0.55  $\mu\text{m}$ 和1.38  $\mu\text{m}$ 波段卷云反射率间基本呈线性关系,随卷云的有效尺度的变化不大(相对图7的2.75  $\mu\text{m}$ 波段)。

根据图5的分析可知,2.75  $\mu\text{m}$ 波段可以反演卷云粒子的有效尺度,模拟计算0.55  $\mu\text{m}$ 和2.75  $\mu\text{m}$ 波段,1.38  $\mu\text{m}$ 和2.75  $\mu\text{m}$ 波段间卷云大气反射率间关

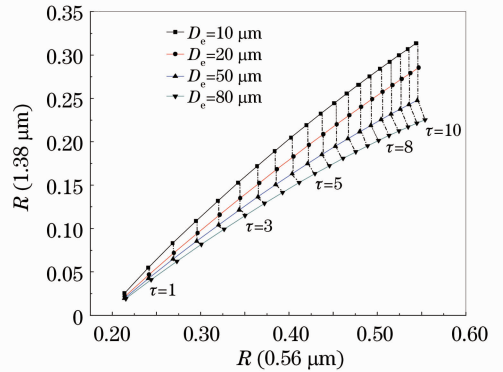


图6 0.55  $\mu\text{m}$ 和1.38  $\mu\text{m}$ 波段卷云大气的反射率间关系

Fig. 6 Relationship between reflectances of cirrus atmosphere at 0.55  $\mu\text{m}$  and 1.38  $\mu\text{m}$  bands

系,如图7所示。从图中可以看出,0.55  $\mu\text{m}$ 和2.75  $\mu\text{m}$ 波段,1.38  $\mu\text{m}$ 和2.75  $\mu\text{m}$ 波段间卷云大气反射率间关系不仅依赖于卷云的光学厚度,还与卷云粒子的有效尺度有关,也就是说,可以利用它们间关系反演出卷云粒子的有效尺度和光学厚度。

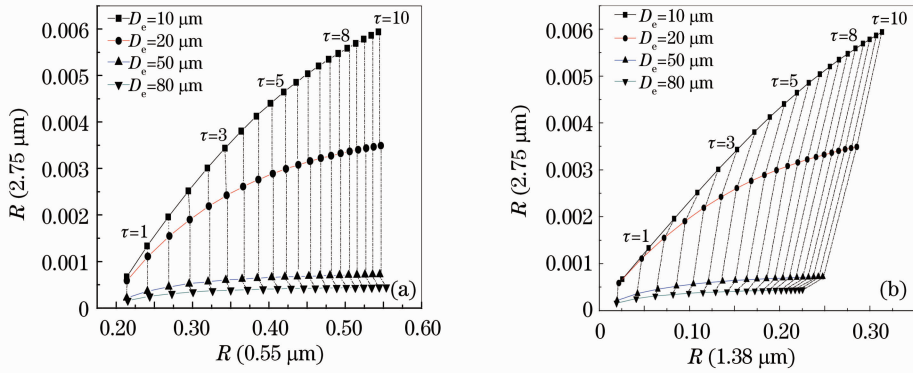


图7 0.55 μm 和 2.75 μm 波段(a)以及 1.38 μm 和 2.75 μm 波段(b)卷云大气反射率间关系

Fig.7 Relationships between reflectances of cirrus atmosphere. (a) At 0.55 μm and 2.75 μm bands; (b) at 1.38 μm and 2.75 μm bands

通过以上的研究可见,已知 1.38 μm 和 2.75 μm 波段间卷云大气反射率,理论上根据文献[11,12]的方法可以反演出卷云的光学厚度和有效尺度。所以研究卷云短波反射特性,为卷云光学厚度和有效尺度的反演打下了基础。

#### 4 结 论

利用通用 CART 软件模拟计算了卷云大气的反射率,分析了可见到近红外 0.4~2.5 μm 波段卷云反射率随波长、光学厚度、有效尺度,卷云高度和地表类型变化情况。同时,研究了 0.55,1.38,2.75 μm 波段卷云大气反射率随卷云性质的变化,并研究了 3 个波段间卷云大气反射率间关系。结果表明:1)可见光波段,卷云大气的反射率随卷云光学厚度的增大而增大;近红外波段,卷云大气的反射率随卷云光学厚度和卷云高度的增大而增大,同时,卷云大气的反射率随地表类型的变化而变化。2)在可见光(0.55 μm)波段,卷云大气反射率随光学厚度的增大而增大,基本上不依赖于有效尺度,同时随着卷云高度的增大而增大,但是增大幅度很小;在水汽强吸收带 1.38 μm 波段,卷云反射率随卷云高度的增高而增大,中高层卷云大气的反射率随光学厚度的增大而增大,随卷云有效尺度变化较小;水汽的另一较强吸收带 2.75 μm 波段卷云大气的反射率随光学厚度和卷云高度的变化基本上和 1.38 μm 波段处一致。但是由于 2.75 μm 波段冰晶粒子的吸收比 1.38 μm 处强,其反射率不仅随卷云光学厚度变化,而且随有卷云效尺度变化而变化。3)通过模拟计算和分析 0.55 μm 和 1.38 μm 波段,0.55 μm 和 2.75 μm 波段以及 1.38 μm 和 2.75 μm 波段卷云大气反射率间关系,为卷云光学厚度和有效尺度的反

演打下了基础。

#### 参 考 文 献

- 1 J. D. Spinhirne, W. D. Hart, D. L. Hlavka. Cirrus infrared parameters and shortwave reflectance relations from observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**(10): 1438~1458
- 2 Liu Chunlei, Yao Keya. Cirrus cloud ice particle density variation effect on the visible radiation transfer[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, **21**(5): 599~606  
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
- 3 Tong Yanchao, Liu Changsheng. Cirrus cloud ice particle density variation effect on the visible radiation transfer [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22**(1): 32~38  
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
- 4 S. Kinne, K. N. Liou. The effects of the nonsphericity and size distribution of ice crystals on the radiative properties of cirrus clouds[J]. *J. Atmospheric Research*, 1989, **24**(1-4): 273~284
- 5 Li Juan, Mao Jietai. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties [J]. *Meteorological Monthly*, 2006, **32**(2): 9~13  
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
- 6 Zhao Yanjie, Wei Heli. Chen Xiuxong *et al.*. Infrared radiative properties of cirrus clouds in shortwave spectral region[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(9): 1449~1453  
赵燕杰,魏合理,陈秀红等. 卷云短波红外辐射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(9): 1449~1453
- 7 Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong *et al.*. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8360~8370
- 8 Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART[J]. *J. Atmospheric & Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 446~450  
魏合理,陈秀红,饶瑞中. 通用大气辐射传输(CART)软件介绍[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(6): 446~450
- 9 Chen Xiuhong. Development of the Combined Atmospheric Radiative Transfer Software[D]. Hefei:Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. 148~149  
陈秀红. 通用大气辐射传输软件 CART 研制[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所,2010. 148~149
- 10 B. C. Gao, P. Yang, W. Han *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*, 2002, **40**(8): 1659~1668
- 11 K. Meyer, P. Yang, B. C. Gao. Optical thickness of tropical cirrus clouds derived from the MODIS 0.66 and 1.375- $\mu\text{m}$  channels[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 2004, **42**(4): 833~841
- 12 T. Nakajima, M. D. King. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: theory[J]. *J. Atmos. & Environm. Opt.*, 1990, **47**(15): 1878~1893

栏目编辑：谢 婧