

卷云大气条件下目标与背景对比度模拟分析

蔡 熠^{1,2}, 刘延利³, 戴聪明¹, 徐青山¹

¹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;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

³北京系统工程研究所, 北京 100101

摘要 使用通用大气辐射传输软件模拟计算了卷云大气条件下强吸收波段的反射率, 分析了卷云粒子形状和有效尺度、光学厚度和卷云高度对大气顶反射率和背景辐射的影响。建立了高温气体目标的辐射强度计算模型, 并通过模拟获取了目标辐射在卷云大气中传输至大气顶的光谱辐射特性。计算了大气顶的目标背景对比度, 并讨论了卷云特性参数和目标高度对目标背景对比度的影响。结果表明: 在水汽强吸收波段, 卷云大气反射率随卷云高度和光学厚度的增加而增大、随卷云粒子有效尺度的增大而减小; 目标背景对比度受卷云参数的影响较大, 尤其当目标高度在 7 km 以下时卷云对目标观测的干扰很大。

关键词 大气光学; 卷云; 大气反射率; 目标背景对比度; 红外辐射

中图分类号 O432; P401 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0801001

Simulation Analysis of Target and Background Contrast in Condition of Cirrus Atmosphere

Cai Yi^{1,2}, Liu Yanli³, Dai Congming¹, Xu Qingshan¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

³Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China

Abstract The reflectance of strong absorption band in condition of cirrus atmosphere is simulated by the general atmospheric radiation transmission software. The effects of cirrus particle's shape and effective size, optical thickness and cirrus altitude on atmospheric top reflectance and background radiation are analyzed. A radiation intensity calculation model of high-temperature gas target is established and the spectral radiation characteristics of target radiation transmitted to the top of atmosphere in cirrus atmosphere are obtained by simulation. The target background contrast at the top of atmosphere is computed, and the influences of cirrus characteristic parameters and target altitude on target background contrast are also discussed. Results show that cirrus atmospheric reflectance increases with the increasing of cirrus altitude and optical thickness, and decreases with the increasing of cirrus particle effective size in the strong absorption band of vapor. The target background contrast is greatly affected by cirrus parameters. The presence of cirrus has a big disturbance to target observation, especially when the target altitude is below 7 km.

Key words atmospheric optics; cirrus; atmospheric reflectance; target background contrast; infrared radiation

OCIS codes 010.1615; 010.1300; 010.1320

1 引 言

卷云覆盖了地球上空 30% 左右的面积, 一般位于对流层大气中部以上和平流层底部, 高度范围为

收稿日期: 2017-02-28; 收到修改稿日期: 2017-03-27

基金项目: 气象专项课题(GYHY201106002-03)

作者简介: 蔡 熠(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: 412532431@qq.com

导师简介: 徐青山(1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气探测、大气辐射传输以及卫星遥感反演与图像订正等方面的研究。E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

4~20 km,在地球的能量平衡和辐射收支中起重要作用。卷云由大量各种形态的非球形冰晶粒子组成,吸收来自下层大气的红外辐射,且反射入射的太阳辐射,使大气顶的背景辐射增强。卫星对地观测时,大气中高空卷云的反射与辐射可以在卫星传感器探测波段形成强信号,从而对真实目标的识别造成干扰。卫星观测大气中高温气体目标的观测波段一般集中在中红外区,此波段上卷云反射太阳辐射较强,仅次于可见光波段;此外,卷云自身在中红外波段也有一定的热辐射。该波段卷云对大气顶背景辐射的作用机理较为复杂,因此研究卷云对大气顶中波红外背景辐射的影响具有重要意义。

近年来国内外很多学者对卷云进行了相关研究,Spinhirne等^[1]研究了卷云大气反射率和发射率与太阳天顶角的关系;Kinne等^[2]研究了粒子尺度大小对卷云大气反射率的影响;曹亚楠等^[3]研究了卷云参数和地表类型对卷云大气反射率的影响;赵燕杰等^[4]采用离散纵标法耦合大气分子吸收,模拟计算了卷云对其红外背景辐射的影响;季承荔等^[5]使用三波长雷达探测了合肥地区的卷云特性。

本文使用通用大气辐射传输软件(CART)^[6-7]计算了大气吸收波段卷云大气反射率,分析了卷云光学厚度、卷云高度、粒子有效尺度和形状对卷云大气反射率和大气顶辐射的影响;计算了大气强吸收波段大气顶高温目标背景对比度,分析了卷云参数和目标高度对目标背景对比度的影响。

2 吸收波段目标背景对比度

卫星观测的目标辐射在大气中传输时要经过大气的衰减(吸收和散射)作用,特别是在大气的强吸收波段,卫星观测的目标辐射与反射信息受到大气的强烈吸收。目标达到一定高度时,大气变得稀薄,目标的辐射和反射才能透过大气被卫星传感器接收。当卷云存在时,大气中卷云的反射辐射增强了大气顶背景辐射,对目标的识别形成干扰。卷云大气背景中的目标背景对比度(以下简称对比度)可表示为^[8]

$$C_0 = \frac{I_T - I_B}{I_B}, \quad (1)$$

式中 I_T 为目标辐射强度, I_B 为背景辐射强度。在大气顶观测时,视在对比度为

$$C = C_0 T, \quad (2)$$

式中 T 为目标至大气顶透射率。可以看出,视在对比度由目标辐射强度、背景辐射强度和目标至大气顶透射率共同决定。

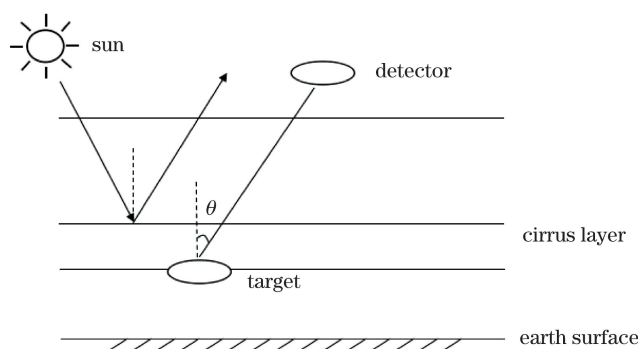


图1 大气中目标辐射传输示意图

Fig. 1 Schematic of target radiation transmission in atmosphere

3 高温气体目标辐射

假定高温气体目标主要由二氧化碳和水汽组成,则可建立目标辐射模型。目前,建立目标辐射模型的主要算法有热流法^[9]、反向蒙特卡罗法(BMC)^[10-11]和有限体积法^[12]等。热流法原理简单,计算速度快,但是不能模拟各个方向上的辐射。BMC相对于正向蒙特卡罗法计算量大大减小,计算精度较高,原理简单,容易实现。有限体积法可模拟复杂几何结构模型的辐射,但其计算精度比BMC的计算精度低。

使用BMC模拟计算高温气体目标的光谱辐射,计算过程如下:1)建立目标辐射的物理模型,即把目标

区域划分为若干子区域,假设每个子区域的场参数(温度场、压强场和气体含量)固定,根据气体分子谱线参数 HITRAN 数据库,计算每个子区域的吸收系数、发射源函数等参量;2)建立目标辐射的传输方程,即采用 BMC 模拟光子在辐射模型中的传输,获取目标表面在各个方向上的光谱辐射特性。仿真计算的目标核心温度为 1500 K,得到的目标表面法线方向的辐射光谱如图 2 所示。

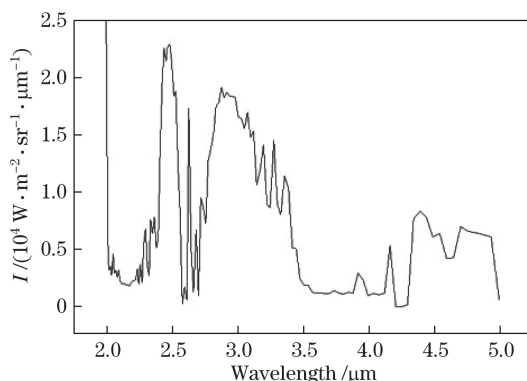


图 2 高温目标表面法线方向辐射光谱

Fig. 2 Radiation spectrum in high-temperature target surface normal direction

探测器在大气顶观测目标时会受到大气背景的干扰,卷云存在时大气背景辐射变化异常复杂,为此重点讨论卷云对大气顶中波红外背景辐射的影响机理。

4 卷云高度、光学厚度、粒子尺度与大气背景辐射的关系

根据大气反射率^[13]的定义,卷云大气反射率可表示为

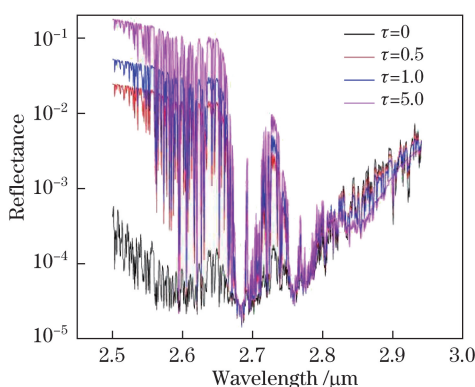
$$R(\mu, \varphi; \mu_0, \varphi_0) = \frac{\pi I(0, \mu, \varphi)}{\mu_0 F_0}, \quad (3)$$

式中 μ 为观测天顶角; μ_0 为太阳天顶角; φ 为观测方位角; φ_0 为太阳方位角; F_0 为大气顶太阳辐照度; $I(0, \mu, \varphi)$ 为大气顶处向上的辐射强度,包括热辐射和散射太阳辐射。采用 CART 计算卷云大气顶的辐射强度,进而计算卷云大气反射率。

卷云粒子的形状、有效尺度、卷云高度和光学厚度是卷云重要的物理和光学特性参数。在大气反射率模拟计算中,计算参数为:中纬度夏季大气模式,观测高度为 100 km,观测天顶角为 180° ,太阳天顶角为 60° ,观测与太阳的相对方位角为 0° ,陆地地表温度为 290 K。如无特别说明,卷云光学厚度为 1,卷云高度为 10 km,卷云粒子尺度为 50 μm ,粒子形状默认选择为聚合物。

4.1 卷云大气反射率随卷云光学厚度的变化

在 2.75 μm 中红外波段,大气中的卷云吸收来自低层大气和地表的向上辐射,同时卷云反射太阳辐射,自身也向外发射辐射。大气顶接收到的辐射主要来自卷云的反射辐射及自身的发射辐射,所以随着卷云光学厚度的增加,卷云大气反射率也将逐渐增大,如图 3 所示。由图可见,在 2.5~2.75 μm 波段,晴空大气(卷云光学厚度为 0)的反射率较小;当光学厚度达到 0.5 时,反射率显著增强 1~2 个数量级。但在 2.85~2.95 μm 波段,卷云大气反射率随着卷云光学厚度的增加略微减小,这主要是因为大气顶的背景辐射来自卷云反射太阳辐射、云下大气(地表)辐射及卷云自身辐射的综合作用。当卷云光学厚度增大时,一方面卷云对太阳光的散射作用增强,另一方面卷云对云下大气向上辐射的吸收作用增强,使得云下大气减弱了大气顶的辐射。当卷云光学厚度一定时,云下大气辐射几乎全被卷云衰减,在 2.5~2.85 μm 波段,卷云对辐射的消光(吸收和散射)作用较强,透过卷云到达大气顶的云下大气辐射较弱,大气顶辐射主要由反射太阳辐射决定,所以大气反射率随卷云光学厚度的增大而增大;在 2.85~2.95 μm 波段,卷云透射率有所增大,消光作用较弱,所以来自低层大气和地表辐射的信息更多,卷云发射的太阳辐射也减弱。此外,随着波长逐渐变大,低层大气辐射和地表热辐射的强度也逐渐增大。所以,在 2.85~2.95 μm 波段,大气反射率随卷云光学厚度的增大而略微减小。

图 3 反射率随卷云光学厚度 τ 和波长的变化Fig. 3 Variation in reflectance with cirrus optical thickness τ and wavelength

综上,在 $2.5\sim 2.85\ \mu\text{m}$ 波段,卷云的存在对大气顶辐射起到很大的增强作用,且反射率随着卷云光学厚度的增大而逐渐增大;在 $2.85\sim 2.95\ \mu\text{m}$ 波段,大气顶辐射随着卷云光学厚度的增大而略微减弱。

4.2 卷云大气反射率随卷云高度的变化

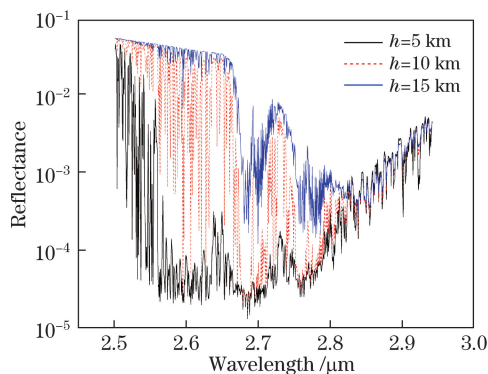
卷云在大气中的高度分布一般为 $4\sim 20\ \text{km}$,当卷云高度发生变化时大气顶反射与辐射也随之发生变化,主要表现在以下 3 个方面。

1) 卷云吸收云下大气的程辐射,而大气水汽在 $2.75\ \mu\text{m}$ 波段存在强吸收。大气中的水汽分子主要分布在 $0\sim 10\ \text{km}$,且随着高度的增加水汽分子含量骤减。卷云越高,吸收大气中水汽分子的辐射就越强。

2) 卷云反射太阳辐射。卷云越低,太阳辐射衰减越大,能够到达大气顶的太阳辐射就越弱。

3) 卷云自身的辐射要经过大气衰减到达大气顶,所以卷云越高,到达大气顶的卷云辐射越强。

反射率随卷云高度和波长的变化如图 4 所示,当卷云高度大于 $10\ \text{km}$ 时,卷云高度的变化引起的大气顶辐射的变化变小,原因是大气中水汽的垂直分布主要在 $10\ \text{km}$ 以下。

图 4 反射率随卷云高度 h 和波长的变化Fig. 4 Variation in reflectance with cirrus altitude h and wavelength

4.3 卷云大气反射率随卷云粒子有效尺度和形状的变化

图 5 给出了 $2.75\ \mu\text{m}$ 波段卷云大气反射率随卷云中冰晶粒子有效尺度的变化,可以看到有效尺度在 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 变化时,大气反射率随着有效尺度的增大逐渐减小。在实际大气中,卷云中粒子的有效尺度随着高度的变化而变化。卷云越高,温度越低,粒子尺度也越小。图 5 为高度固定时粒子有效尺度对反射率影响的定量分析,可以看出,粒子有效尺度越小,卷云反射率越大,原因是冰晶粒子在近红外波段的吸收很强,其吸收效率因子与有效尺度关系很大,有效尺度越小,吸收越弱,散射越强,则反射率越大。

图 6 为卷云大气反射率随卷云 3 种常见粒子形状(子弹花、六棱柱和聚合物)的变化。不同粒子形状的散射能力有很大差别,粒子散射能力越强,则反射的太阳光越多,进而影响了卷云大气反射率。由图可见,3 种粒子形状的散射能力由强到弱依次为子弹花、六棱柱和聚合物。在实际大气中,卷云往往是不同形状粒子的集合体,一般以一种形状粒子为主。

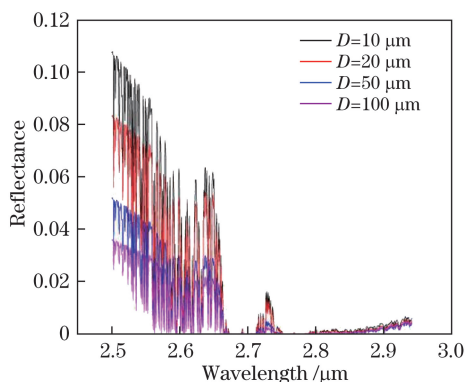


图 5 反射率随卷云有效尺度 D 和波长的变化

Fig. 5 Variation in reflectance with cirrus effective size D and wavelength

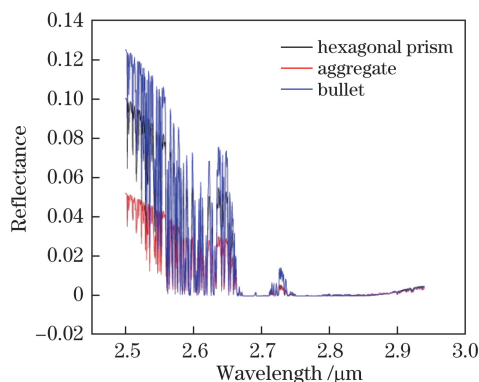


图 6 反射率随卷云粒子形状和波长的变化

Fig. 6 Variation in reflectance with cirrus particle shape and wavelength

5 目标背景对比度与目标高度和卷云参数的关系

卷云对卫星红外探测系统造成了严重影响:一方面,卷云增强了大气顶的背景辐射,形成一个重要的背景干扰源;另一方面,卷云严重衰减了云下目标的红外辐射。为说明卷云对红外探测系统的影响,以目标背景对比度为研究对象,详细分析了卷云对目标背景对比度的影响。

高温气体目标位于不同高度时,大气透射率发生很大变化,且受到卷云光学厚度的影响。图 7 分别给出了 $2.75 \mu\text{m}$ 波段大气透射率随目标高度和卷云光学厚度的变化情况。图 7(a)为目标高度在 $5 \sim 20 \text{ km}$ 范围内变化时目标至大气顶透射率的变化,可以看出随着传输路程变短,大气透射率逐渐变大。图 7(b)为卷云光学厚度在 $0 \sim 5$ 范围内变化时大气透射率的变化,可以看出卷云对辐射传输的影响较大,当卷云光学厚度达到 5 时大气透射率减小 2 个数量级。

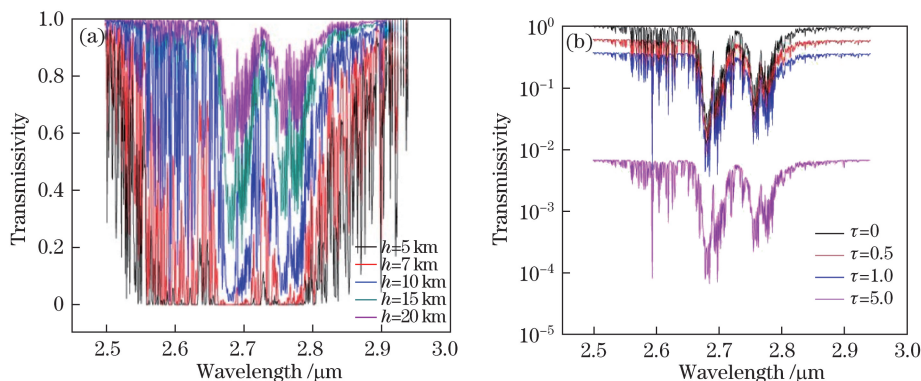


图 7 大气透射率随(a) h 和(b) τ 的变化

Fig. 7 Variation in atmospheric transmissivity with (a) h and (b) τ

考虑大气透射率和大气背景辐射的影响,根据(3)式可以计算出目标在大气顶处的目标背景对比度。卷云作为背景对大气顶背景辐射的影响一直存在,而目标辐射传输至大气顶不一定穿过卷云,故分两种情况计算目标背景对比度的变化。

5.1 目标辐射传输路径上没有卷云

当卷云位于目标周围区域,即探测视线路径上无卷云时,目标辐射上行传输未受卷云的衰减作用影响,这种情况下的目标背景对比度仅需考虑卷云的背景辐射和无卷云大气透射率。

图 8 为计算的目标背景对比度随卷云高度、光学厚度、卷云粒子形状、有效尺度和目标高度的变化。随着目标高度的增加,目标背景对比度逐渐增大,该现象在目标高度大于 7 km 时尤为明显,原因在于大气中 $2.75 \mu\text{m}$ 波段的消光主要来自水汽的吸收,而水汽主要分布在对流层下部(小于 5 km)。 10 km 附近的水汽

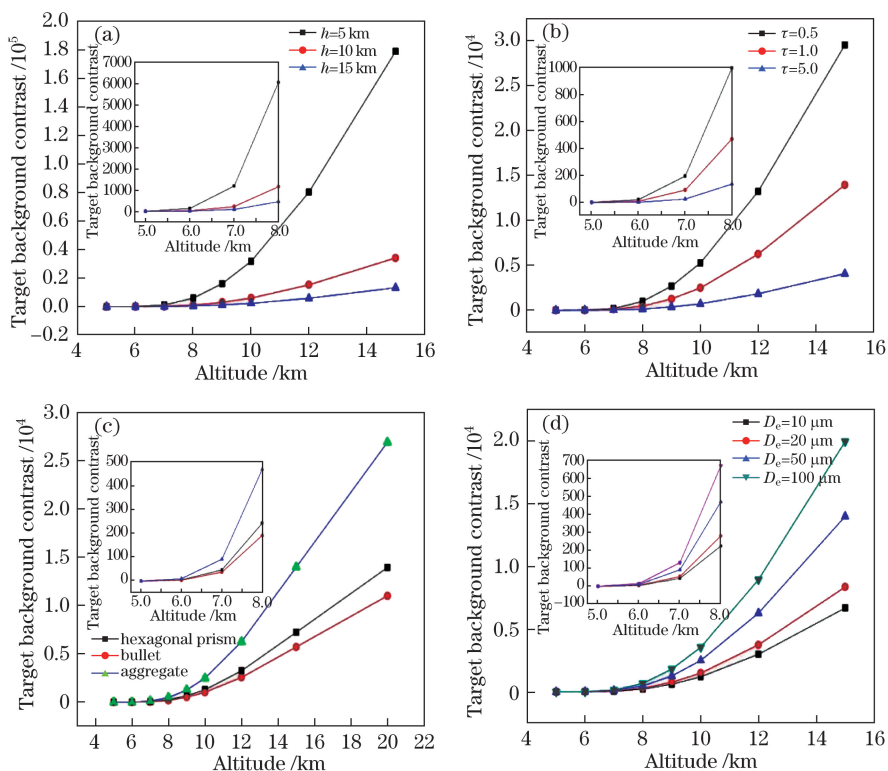


图 8 目标背景对比度随(a)卷云高度、(b)光学厚度、(c)卷云粒子形状和(d)有效尺度的变化

Fig. 8 Variations in target background contrast with (a) cirrus altitude, (b) optical depth, (c) cirrus particle shape and (d) effective size

含量非常稀少,对目标辐射的吸收明显变弱。在 $2.75 \mu\text{m}$ 波段,目标背景对比度随卷云高度及光学厚度的增加而增大,随卷云粒子有效尺度的增加而减小,与卷云大气反射率的变化一致。可以看出,卷云特性参数的变化严重影响了目标背景对比度,尤其是当目标较高时。其中,目标背景对比度随卷云高度的变化最为剧烈,其次是卷云光学厚度。当目标高度低于 7 km 时,目标背景对比度很小,且随卷云参数变化也较小,此时大气顶观测目标受到的背景干扰较大。

5.2 目标辐射传输路径上有卷云

探测视线路径上存在卷云时,不仅影响大气顶的背景辐射,也严重衰减目标辐射,降低了目标背景对比度。针对这一状况,详细分析了不同卷云特性参数及目标位置对目标背景对比度的影响。

图 9 为目标背景对比度随卷云光学厚度及目标高度的变化,卷云高度分别为 10 km 和 15 km ,粒子尺度为 $50 \mu\text{m}$ 。与图 7 相比,路径上有卷云时的目标背景对比度下降了 1 个数量级。图 10 给出了 7 km 以下目标

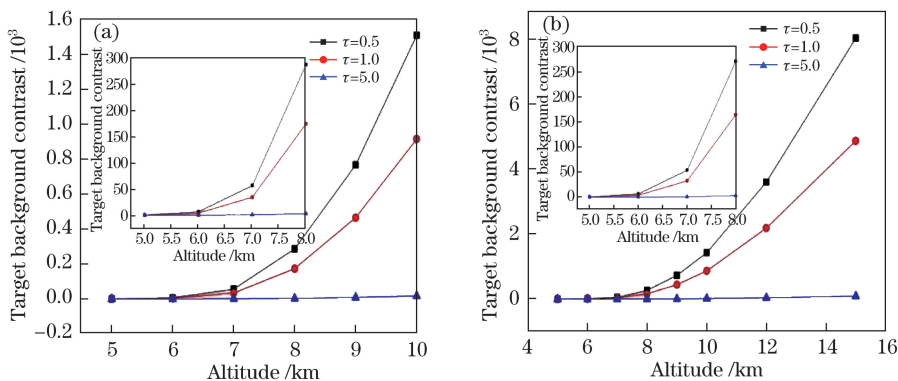


图 9 对比度随(a)卷云光学厚度和(b)目标高度的变化

Fig. 9 Variations in contrast with (a) cirrus optical depth and (b) target height

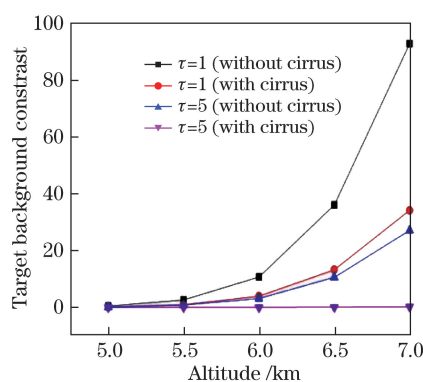


图 10 7 km 以下目标辐射传输路径上有、无卷云情况的对比度的变化

Fig. 10 Variation in contrast with and without cirrus in target radiation transmission path below 7 km

辐射传输路径上有、无卷云情况下目标背景对比度的变化。当目标处于 7 km 以下的低空(如果视线路径上存在卷云,目标背景对比度将降到 10 以下,背景辐射与目标辐射处于同一数量级),尤其是卷云光学厚度达到 5 时,无论目标高度如何变化,目标背景对比度都趋于 0。由此可见,视线路径上厚卷云的存在对卫星目标红外探测识别的影响较大。

6 结 论

使用 CART 模拟计算了卷云大气条件下水汽在 $2.75 \mu\text{m}$ 强吸收波段的大气反射率,详细分析了其随卷云物理和光学特性参数的变化,结果表明卷云大气反射率随卷云高度和卷云光学厚度的增大而增大,随卷云粒子有效尺度的增大而减小。

在此基础上,针对高温气体目标,通过建立其辐射计算模型研究了卷云对大气项目背景对比度的作用机理。针对探测视线路径有、无卷云两种典型情况,讨论并分析了卷云特性参数及目标高度对目标背景对比度的影响特性。结果表明,当目标高度大于 7 km 时,目标背景对比度显著增大;当目标高度低于 7 km 时,目标背景对比度较小,尤其当目标辐射穿过较厚的卷云(光学厚度为 5)时,目标背景对比度趋于 0。

参 考 文 献

- [1] Spinhirne J D, Hart W D, Hlavka D L. Cirrus infrared parameters and shortwave reflectance relations from observations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1996, 53(10): 1438-1458.
- [2] Kinne S, Liou K N. The effects of the nonsphericity and size distribution of ice crystals on the radiative properties of cirrus clouds[J]. Atmospheric Research, 1989, 24(1/4): 273-284.
- [3] Cao Ya'nan, Wei Heli, Chen Xiuhong, *et al.* Simulations of the reflectance of cirrus clouds in shortwave spectral region[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0801004.
曹亚楠, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波反射特性的模拟计算研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0801004.
- [4] Zhao Yanjie, Wei Heli, Chen Xiuhong, *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.
- [5] Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0401001.
- [6] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART[J]. Journal of Atmospheric and 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.
- [7] 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.
- [8] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite[J].

Infrared and Laser Engineering, 2011, 39(3): 389-393.

叶 庆, 孙晓泉, 邵 立. 红外预警卫星最佳探测波段分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 39(3): 389-393.

- [9] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0404001.
刘尊洋, 邵 立, 汪亚夫, 等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0404001.
- [10] Liu L H. Backward Monte Carlo method based on radiation distribution factor[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(4): 151-153.
- [11] Wang K C. Prediction of rocket plume radiation heating using backward Monte-Carlo method[C]. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1993: AIAA-93-0137.
- [12] Ruan Liming, Qi Hong, Wang Shenggang, *et al.* Numerical simulation of the infrared characteristic of missile exhaust plume[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 959-962.
阮立明, 齐 宏, 王圣刚, 等. 导弹尾喷焰目标红外特性的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 959-962.
- [13] Liao Guonan, Guo Caili, Zhou Shijian. An introduction to atmospheric radiation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004.