强吸收带卷云大气红外辐射特性研究

戴聪明[1],赵凤美[1,2],刘 栋[1,2],唐超礼[1,2],魏合理[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 230026)

摘 要:卷云大气的红外辐射特性是空间光电探测系统的重要背景辐射源。基于 2.7 μm 和 4.3 μm 波段的卷云粒子散射特性参数,建立了卷云大气辐射传输模型。在 MODIS 实测卷云和大气参数条件下,仿真计算得到大气层顶的红外辐射图像。各像元辐亮度的统计结果显示:在 2.7 μm 带的平均辐亮度为 1.832e−2±3.024e−2 W/(m^2·sr),卷云像元平均辐亮度比晴空像元强 433 倍;各像元在 4.3 μm 带的平均辐亮度为 3.027e−2±2.99e−3 W/(m^2·sr),像元最大辐亮度是最小值的 2.37 倍。

关键词:卷云; 吸收带; 红外辐射; 晴空大气; MODIS
中图分类号:P42 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1204003

Infrared radiance characteristic of cirrus atmosphere in the strong absorption bands

Dai Congming[1], Zhao Fengmei[1,2], Liu Dong[1,2], Tang Chaoli[1,2], Wei Heli[1]

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Infrared radiance characteristic of cirrus atmosphere is the main clutter sources for advanced space-based electro-optical detecting systems. Based on bulk scattering parameters of cirrus particles in 2.7 μm and 4.3 μm wavebands, cirrus atmosphere radiance transfer model was constructed. With cirrus and atmosphere parameters measured by MODIS, the infrared radiation images of cirrus atmosphere were calculated. The statistical results of all pixels show that, in the 2.7 μm band, the average radiance is 1.832e−2±3.024e−2 W/(m^2·sr), and the average radiance of cirrus pixels is 433 times larger than that of the clear-sky pixels; For 4.3 μm in-band radiance of all pixels, the average value is 3.027e−2±2.99e−3 W/(m^2·sr), the maximum value is 2.37 times as large as the minimum.

Key words: cirrus; absorption band; infrared radiance; clear-sky atmosphere; MODIS

收稿日期:2018-07-05; **修订日期**:2018-08-03
基金项目:国防基础科研计划(JCKY2016204C602);装备预研项目(41416020204)
作者简介:戴聪明(1987-),男,副研究员,博士,主要从事大气环境背景辐射和大气传输建模方面的研究。Email:cmdai@aiofm.ac.cn

0 引 言

卷云一般分布在对流层中上部至平流层下部，大约覆盖地球表面的 20%~30%[1]。在中纬度，卷云云底高度通常大于 6 km，由大量各种复杂形状的冰晶粒子组成，如柱状、子弹花状、平板状和过冷水滴状等，粒子的尺度大小也不同。卷云的光散射辐射特性与云粒子的微物理特性、空间结构和光学特性密切相关。随着红外成像技术的发展，要求目标红外探测系统在各种复杂大气环境下具备自主搜索、跟踪、识别目标的能力[2-3]。卷云对工作于对流层上部的光电探测系统造成严重的影响。如以目标尾焰中水汽、二氧化碳 2.7 μm 和 4.3 μm 辐射带作为探测波段的空间红外探测系统，除了观测到目标自身辐射，还包含目标周围的卷云大气环境背景辐射[4]。卷云对目标探测识别的影响主要体现在：(1) 卷云背景辐射叠加在目标辐射上；(2) 卷云散射的太阳辐射随太阳位置变化；(3) 卷云减弱目标的辐射强度。

地球大气强吸收及卷云的光散射是国内外准确计算 2.7 μm 和 4.3 μm 波段卷云大气辐射特性的难点问题。国内关于卷云的研究重点在于讨论卷云微物理特性对卷云粒子单次散射特性及光学特性的影响[5]。目前，也开展了基于卫星红外遥感数据的卷云微物理和光学特性参数的反演研究[6-7]。相比于国内，国外则对卷云的物理特性、光学及红外辐射特性研究更为全面深入。卷云大气红外辐射传输模型大体可分为两类：一是计算精度高但计算速度慢的模型，如精确计算大气分子吸收和热辐射的逐线积分算法 LBLRTM[8]和计算卷云粒子单次散射特性的离散坐标法 DISORT[9]，它是目前国际上开展云辐射传输科学研究的主流算法[10-11]，由于其计算效率不高，不适用于常规的光电工程应用；另一种为计算速度快的近似计算模型[12-13]，包括快速计算分子吸收与发射和粒子散射快速算法，主要应用于卷云参数的卫星遥感反演或云场景红外辐射图像仿真。

上述卷云辐射传输研究的基础在于获取高精度的卷云光散射特性参数。Yang 和 Wei 等人建立了 7种非球形冰晶粒子在近红外到远红外的散射和吸收特性数据库[14]，广泛应用于卷云微物理和光学特性参数遥感反演。2013 年，该课题组开发了快速辐射传输模式来计算晴空和卷云大气可见光到短波红外的光谱反射率[15]。最近研发的有云大气可见红外成像辐射计模拟器，其内部采用相关 K 分布法计算大气分子透过率，采用 MODIS06 的冰云产品来建立冰云粒子群的散射特性[16]。由于卷云光散射特性参数化的快速发展，国际上业已集成研发了多款可模拟云场背景辐射仿真软件。如美国海军实验室空间科学部在中分辨率大气透过率计算软件 MODTRAN 的基础上，研发了中分辨率大气透过率和辐射计算软件 MOSART[17]。它既可计算视线路径的大气透过率和程辐射，也可计算目标周围包含卷云在内的环境背景辐射。

因此，建立卷云大气辐射传输模型，对掌握强吸收带卷云大气背景辐射特性至关重要，对红外探测成像系统的性能设计、红外图像的处理分析具有重要的意义[18]。

1 卷云大气辐射传输模式

在强吸收探测波段，大气分子的吸收决定该通道大气传输效率的主要因素。对于大气分子与气溶胶的吸收散射特性，可由通用大气辐射传输软件 CART[19]计算，它可快速计算无云晴空大气透过率、热辐射和散射辐射等。在此基础上，增加卷云散射辐射计算模块，即在云层内考虑云粒子、大气分子和气溶胶的共同作用。作为卷云大气辐射传输模式的基础数据，卷云粒子光学性质参数主要包括消光效率因子、单次散射反照率、不对称因子等。Yang 等建立的卷云中冰晶粒子光学特性数据库，包括 5 种粒子形状（平板状 plate、实心柱状 column、空心柱状 hollow、子弹花状 bullet 和聚合物 aggregates）在可见光到红外波段光散射特性数据库，粒子尺度范围 2~1 000 μm。采用该冰晶粒子光学特性数据库，再给定卷云粒子尺度谱分布，即可得到强吸收波段卷云的平均光学特性。

平均消光效率因子：

$$\overline{Q}_e=\frac{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)Q_{\mathrm{e}i}(D)A_i(L)\right]n(L)\mathrm{d}L}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)A_i(L)\right]n(L)\mathrm{d}L} \tag{1}$$

平均单次散射反照率：

$$\overline{\omega}=\frac{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)Q_{\mathrm{s}i}(L)A_i(D)\right]n(L)\mathrm{d}L}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)Q_{\mathrm{e}i}(L)A_i(L)\right]n(L)\mathrm{d}L}=1-\frac{\overline{Q}_a}{\overline{Q}_e} \tag{2}$$

平均散射相函数：

$$\overline{P}(\Theta)=\frac{\int_{L_{min}}^{L_{max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)P_i(\Theta,L)Q_{si}(L)\right]n(L)\mathrm{d}L}{\int_{L_{min}}^{L_{max}}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(L)Q_{si}(L)\right]n(L)\mathrm{d}L} \tag{3}$$

式中：N 为卷云非球形冰晶粒子的种类数；L_{max} 和 L_{min} 是卷云粒子尺度的上、下限。$Q_{ei}(L)$、$Q_{si}(L)$、$P_i(\Theta,L)$为第 i 种形态粒子的消光、散射效率因子和散射相函数。

给定粒子尺度谱分布和粒子形状百分比时，定义单个粒子的有效尺度：

$$D_e=\frac{3}{2}\frac{\int_{L_{min}}^{L_{max}}\left[\sum_{i=1}^{N}V_i(L)f_i(L)\right]n(L)\mathrm{d}L}{\int_{L_{min}}^{L_{max}}\left[\sum_{i=1}^{N}A_i(L)f_i(L)\right]n(L)\mathrm{d}L} \tag{4}$$

式中：f_i 为粒子形状百分比，在每个尺度 L 上满足 $\sum_{i=1}^{N}f_i=1$。

由于卷云粒子尺度谱分布的实际测量较为困难，在计算中一般采用理论谱分布模式。为此，采用 Γ 分布描述卷云中冰晶粒子的尺度分布：

$$n(r)=\frac{N_0\cdot(r_{eff}V_{eff})^{(V_{eff}-1)/V_{eff}}}{\Gamma[(1-2V_{eff})V_{eff}]}r^{(1-3V_{eff})/V_{eff}}\exp(-r/r_{eff}V_{eff}) \tag{5}$$

式中：N_0 为粒子总数；r_{eff} 和 V_{eff} 分别为有效半径和有效方差。

当给定云的可见光光学厚度 τ_{vis}，任意波长上云的光学厚度 τ_c 由下式给出(下式中的卷云特性参数，均省略波长)：

$$\tau_c=\frac{\overline{Q}_{e,\lambda}}{\overline{Q}_{e,vis}}\tau_{vis}=\frac{\overline{Q}_{s,\lambda}+\overline{Q}_{a,\lambda}}{\overline{Q}_{e,vis}}\tau_{vis}=\tau_{cs}+\tau_{ca} \tag{6}$$

式中：τ_{cs} 和 τ_{ca} 分别表示云的散射和吸收光学厚度；$\overline{Q}_{e,vis}$ 为可见光云的平均消光效率因子；$\overline{Q}_{s,\lambda}$ 和 $\overline{Q}_{a,\lambda}$ 分别是任意波长云的平均散射效率和吸收效率因子。云层高度上的光学厚度、单次散射反照率和散射相函数为：

$$\tau=\tau_{ms}+\tau_{ma}+\tau_{mc}+\tau_{as}+\tau_{aa}+\tau_{cs}+\tau_{ca} \tag{7}$$

$$\omega=\frac{\tau_{ms}+\tau_{as}+\tau_{cs}}{\tau_{ms}+\tau_{ma}+\tau_{mc}+\tau_{as}+\tau_{aa}+\tau_{cs}+\tau_{ca}} \tag{8}$$

$$p=\frac{\tau_{ms}\cdot p_m+\tau_{as}\cdot p_a+\tau_{cs}\cdot p_c}{\tau_{ms}+\tau_{as}+\tau_{cs}} \tag{9}$$

式中：τ_{ms}，τ_{ma}，τ_{mc}，τ_{as}，τ_{aa}，τ_{cs}，τ_{ca} 分别表示分子散射、分子吸收、分子连续吸收、气溶胶散射和吸收光学厚度，以及云的散射和吸收光学厚度；p_m，p_a 和 p_c 分别表示分子、气溶胶和云的散射相函数。考虑气溶胶及云粒子的多次散射作用，利用离散坐标法 DISORT 计算强吸收波段卷云大气向上辐射。

根据自然冰晶的观测数据[20]，冰晶形状主要受生长温度和湿度条件的影响，目前认为低纬度卷云主要由聚合物、实心六棱柱、子弹花瓣 3 种形状的冰晶粒子组成。图 1 给出了强吸收波段 3 种不同形状

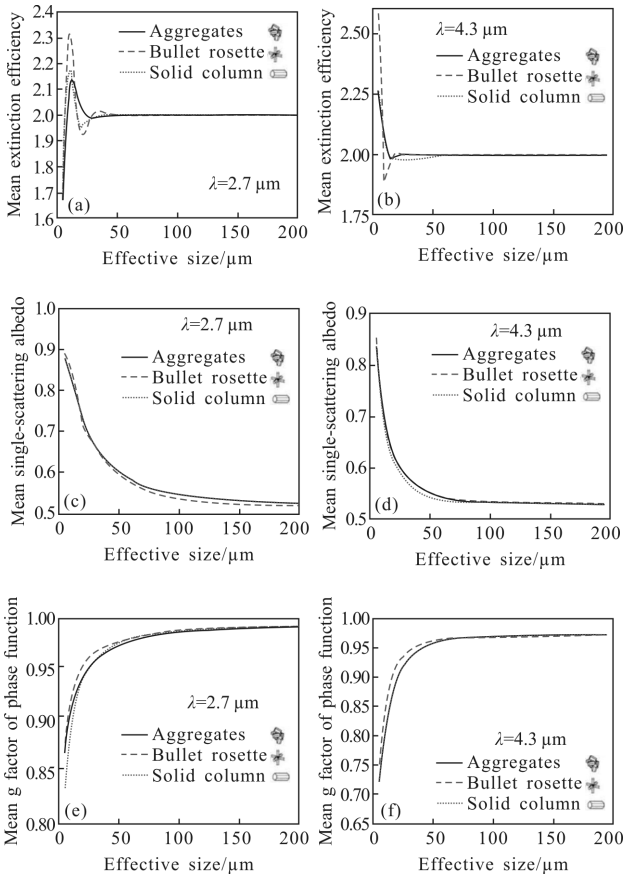


图 1 2.7 μm 和 4.3 μm 带平均消光、单次散射反照率和相函数不对称因子 g 随粒子有效尺度的变化

Fig.1 Average extinction efficiency, single-scattering albedo, g factor of phase function versus effective size in 2.7 μm and 4.3 μm bands

冰晶粒子群的平均单次散射特性随有效尺度的变化。图 1(a)~(c)显示，在 2.7 μm 波长上，当粒子有效尺度小于 40 μm，3 种冰晶粒子的消光效率因子差异较大：子弹花状粒子随有效尺度存在较大的振荡，而聚合物状冰晶粒子振荡较小。3 种冰晶粒子的单次散射反照率均随有效尺度的增大而减小，说明小粒子冰云对光的散射能力明显大于大粒子。随着粒

子有效尺度的增大，平均单次散射反照率趋近于0.53。不同形状冰晶粒子的不对称因子均为正值，说明卷云粒子散射主要集中在前向；随着粒子有效尺度的增大，不对称因子也增大，且趋近于 0.98。说明大粒子的散射能更趋向于前向。图 1(d)~(f)显示，不同形状冰晶粒子在 4.3 μm 的单次散射特性与 2.7 μm 类似，二者仅在小粒子(有效尺度小于 20μm)时差异较大。

图 2 为不同形状冰晶卷云在 2.7 μm 和 4.3 μm 波长上的散射相函数，其中粒子有效尺度分别为 20 μm 和 100 μm。图中显示，在散射角 0°~180°范围内，散射相函数变化较大，尤其在散射角小于 30°的前向方向，散射相函数随散射角的增大急剧减小。在散射角小于 5°时，粒子有效尺度 100 的相函数大于有效尺度 20，即有效尺度越大，前向散射越尖锐，这主要是因为大粒子被吸收和散射的能量主要由衍射支配，衍射能量集中于前向方向。另外，当有效尺度和波长固定时，3 种不同形状冰晶粒子的相函数随散射角变化趋势基本一致，相同散射角度下的具体数值略有不同，这是因为粒子最大尺度相同时，不同形状的有效尺度、投影面积、体积相差很多。4.3 μm 波长的散射相函数随角度的变化曲线与 2.7 μm 波长类似。

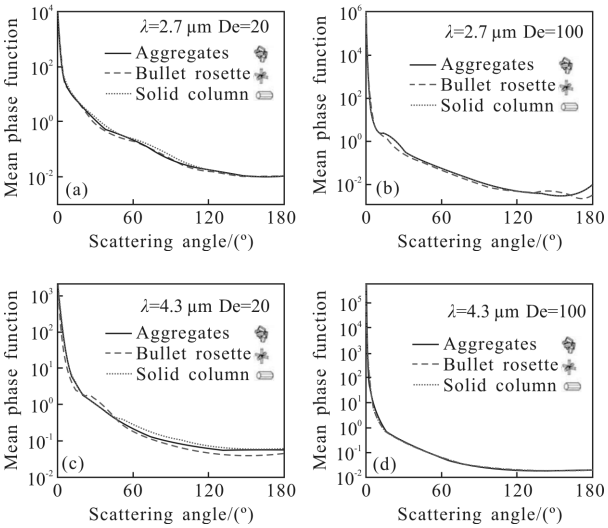


图 2 卷云 2.7 μm 和 4.3 μm 带平均散射相函数

Fig.2 Average scattering phase function of cirrus in 2.7 μm and 4.3 μm bands

2 卷云大气背景红外辐射特性

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer，MODIS) 是美国地球观测卫星携带的光学传感器[21]，其遥感数据可用于云检测、云顶参数反演、云物理和光学特性参量反演研究。MODIS 二级产品是在一级产品的基础上通过相应的算法处理得到的地球物理参数。此研究选用 MODIS 二级云产品 MOD06 和大气产品 MOD07 数据。

以 2014 年 123 天 3 小时 35 分 MODIS 观测数据为例，图 3 是 MODIS 探测器观测的 RGB 云图。在图中选择一块子区域：经度为 97.0 °E~100.0 °E，纬度为 34.0 °N~36.0 °N，具体如图中方框所示。

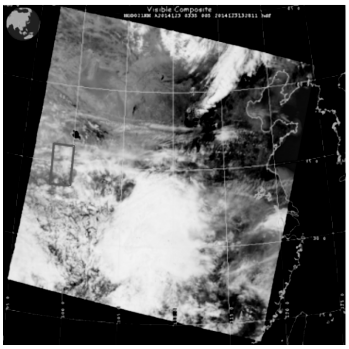
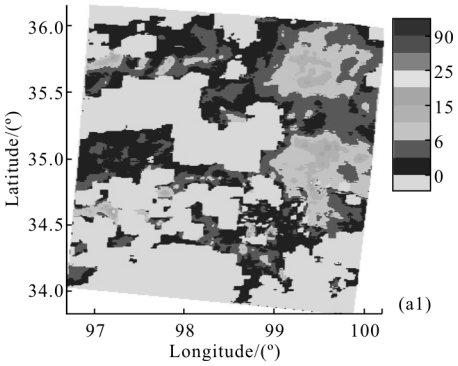


图 3 MODIS 观测的 RGB 图像

Fig.3 RGB image measured by MODIS

根据所选择区域，并结合各像元的云相态，读取卷云云光学厚度和有效尺度，对于非卷云像元，假定它为晴空大气像元。图 4 显示区域内各卷云像元的光学厚度的空间分布，可以看到，卷云主要分布在图中右上方区域，光学厚度处于 0.01~100 范围内，平均光学厚度为 4.34，且超过 99.5%的卷云光学厚度小于 20。所选择区域内的卷云有效尺度在 5.02~60.0 μm，平均有效尺度为 31.0 μm，大体呈现正态分布特性。



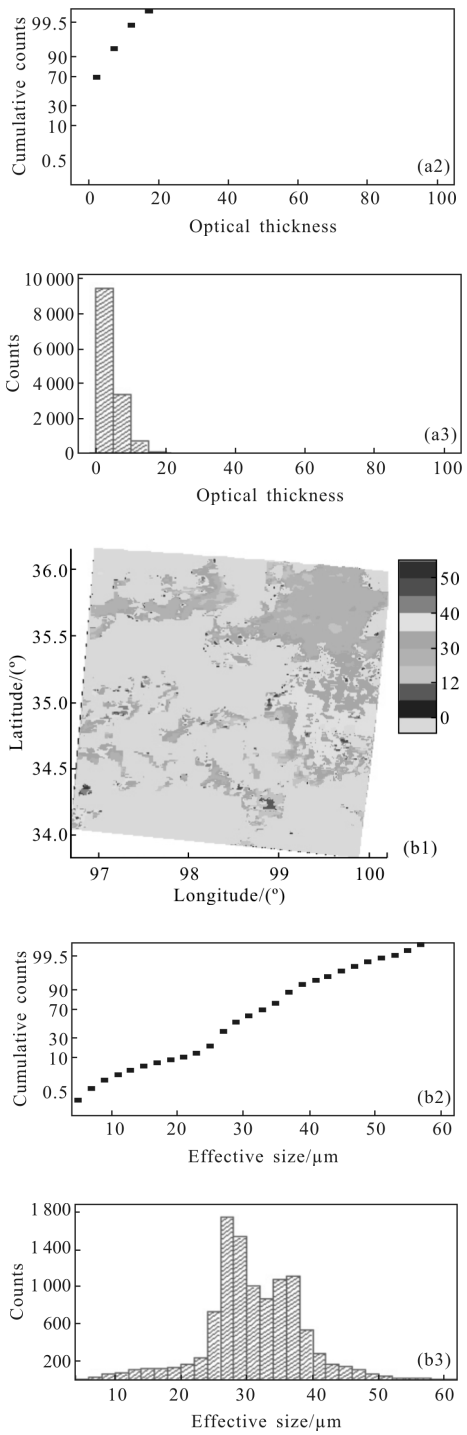


图 4 MODIS 实测的卷云光学厚度和有效尺度

Fig.4 Optical thickness and effective size of cirrus measured by MODIS

读取 MODIS 实测的低层大气数据,并根据标准大气模式制作大气参数廓线,如图 5 所示为 MODIS 第一像元的大气参数廓线。采用建立的卷云大气辐射传输模型,根据参考文献[4]选择的 2.63~2.83 μm 和 4.18~4.50 μm 两个强吸收带,计算 MODIS 观测视场内各像元在大气层顶的辐亮度。其中,输入的太阳天顶角为 45°,观测天顶角 173°,相对方位角为 178°。

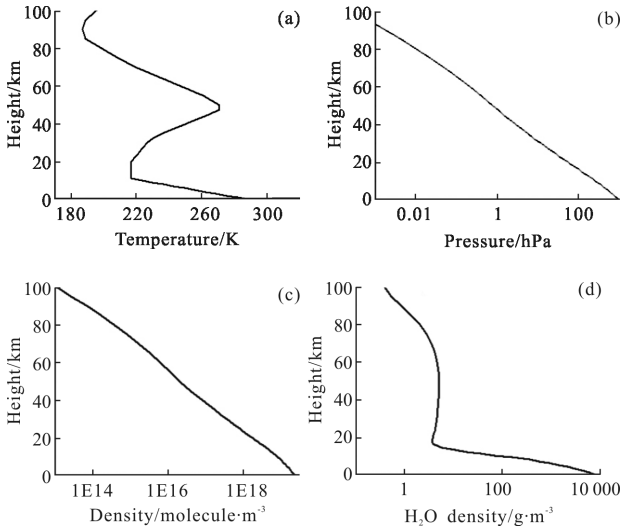
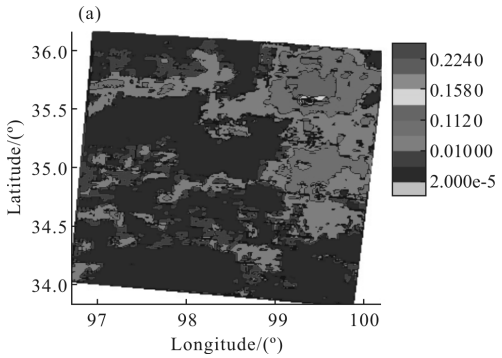


图 5 第 1 像元的大气参数廓线(温度、气压、大气和水汽浓度)

Fig.5 Atmospheric parameter profiles(temperature, pressure, atmosphere and H_2O density) of the first pixel

图 6 是计算的 MODIS 各像元在2.7 μm 带的辐射图像及其统计分布图。图中显示,有云区域大气背景辐射较强,主要分布在图中右上角区域。各像元的辐射统计分布图显示,整个观测区域内的大气背景辐射在 6.23e-5~2.237e-1 W/(m²·sr),单像元辐亮度的最大值是最小值的 3 600 倍,平均值为1.832e-2 W/(m²·sr),一倍标准偏差为 3.024e-2 W/(m²·sr)。针对卷云像元,统计得到其平均辐亮度为 3.019e-2±3.394e-2 W/(m²·sr),而晴空像元的平均辐亮度为 6.963e-5±9.114e-6 W/(m²·sr)。就平均值而言,卷云像元的辐亮度是晴空像元的 433 倍。以上结果表明,在 2.7 μm 强吸收带,卷云散射太阳光形成的背景辐射远大于晴空大气。



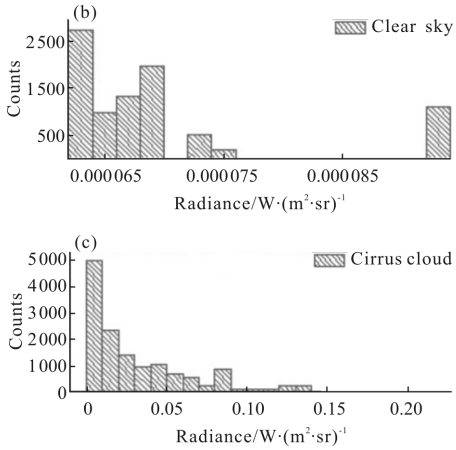


图 6 2.7 μm 带的背景辐射图及其统计分布

Fig.6 Image and statistics distribution of 2.7 μm in-band radiance

图 7 是计算的 4.3 μm 强吸收带辐亮度图像。图中显示，各像元的辐亮度处于 2.278e−2~5.415e−2 W/(m²·sr)，像元辐亮度最大值是最小值的 2.37倍，平均辐亮度为 3.027e−2 W/(m²·sr)，一倍标准偏差为 2.99e−3 W/(m²·sr)。另外，晴空像元的平均辐亮度为 3.026e−2±1.56e−3 W/(m²·sr)，而卷云像元的平均辐亮度为 3.027e−2±3.62e−3 W/(m²·sr)。由此可见，在 4.3 μm 强吸收带，卷云和晴空大气的背景辐射差异不大，即卷云对该波段大气背景辐射的影响十分微弱。

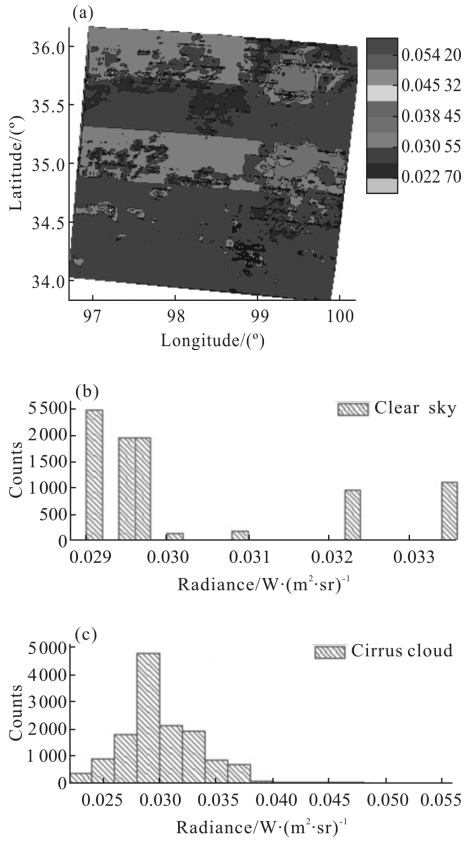


图 7 4.3 μm 带的辐射图像及其统计分布

Fig.7 Image and statistics distribution of 4.3 μm in-band radiance

3 结 论

卷云大气在短波红外波段的辐射特性是先进光电工程普遍关心的问题，尤其是在大气分子强吸收带上，其背景辐射是空间红外探测系统的重要噪声源。文中构建了卷云大气辐射传输模型，基于 MODIS 卫星实际观测数据，仿真计算了卷云大气在 2.7 μm 和 4.3 μm 强吸收带的背景红外辐射图像，并得到各像元辐亮度的统计分布特征。2.7 μm 强吸收带的背景辐射起伏变化大，有云像元的辐亮度明显强于无云像元，这表明卷云对工作于该波段的目标红外探测系统有一定的影响。与 2.7 μm 相比，卷云和晴空大气在 4.3 μm 强吸收带的背景辐射差异较小。

由于 MODIS 卷云大气遥感反演精度的问题，卷云特性参数的不确定下将引入一部分计算误差。另外，由于文中仅考虑高层的卷云，而未考虑低层水云的影响。虽然在 2.7 μm 和 4.3 μm 强吸收带上，大气顶的背景辐射仅由一定高度之上的上层大气所决定，但在某些条件下(比如高海拔干旱地区)，不考虑低层水云的影响，将使大气背景辐射产生较大的计算偏差。

参考文献：

[1] Pruppacher Hans R, Klett James D. Microphysics of Clouds and Precipitation[M]. Boston: Reidel Publishing Co., 1978.

[2] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(3): 565−573. (in Chinese)

[3] Cao Bingwei, Liu Jianwen, Qi Linlin, et al. Evaluation of cloud′s effect on atmospheric radiation transmittance in infrared guidance system [J]. ***Journal of PLA University of Science and Technology***, 2006, 7(5): 501−505. (in Chinese)

[4] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysisi of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(3): 389−393. (in

Chinese)

[5] Yang Chunping, He Xiulan, Wu Jian. Numerical simulation of cirrus scattering with the Monte Carlo method[J]. ***Journal of University of Electronic Science and Technology of China***, 2009, 38(1): 144-147. (in Chinese)

[6] Cao Yanan, Wei Heli, Dai Congming, et al. Retrieval of the optical thickness and cloud top height of cirrus clouds based on AIRS IR high spectral resolution data [J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2015, 35(5): 1208-1213. (in Chinese)

[7] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy conditions [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2011, 112(1): 109-118.

[8] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes, short communication [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2005, 91(2): 233-244.

[9] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. ***Applied Optics***, 1988, 27(12): 2502-2509.

[10] Bantges R J, Russell J E, Haigh J D. Cirrus cloud top-of-atmosphere radiance spectra in the thermal infrared [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 1999, 63(2-6): 487-498.

[11] Dubuisson P, Buriez J C, Fouquart Y. High spectral resolution solar radiative transfer in absorbing and scattering media: application to the Satellite Simulation [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 1996, 55 (1): 103-126.

[12] Fu Q, Liou K N, Cribb M C, et al. Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer [J]. ***Journal of Atmospheric Sciences***, 1997, 54: 2799-2812.

[13] Dubuisson P, Giraud V, Chomette O, et al. Fast radiative transfer modeling for infrared imaging radiometry[J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2005, 95: 201-220.

[14] Yang Ping, Wei Heli, Huang Hunglung, et al. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region [J]. ***Applied Optics***, 2005, 44(26): 5512-5523.

[15] Wang Chenxi, Yang Ping, Shaima L. A fast radiative transfer model for visible through shortwave infrared spectral reflectances in clear and cloud atmospheres [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2013, 116: 122-131.

[16] Liu C, Yang P, Nasiri S L, et al. A fast visible infrared imaging radiometer suite simulator for cloudy atmospheres [J]. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, 2015, 120: 10002/2014JD022443.

[17] William M C, Jerome M A, Jules M G. Moderate spectral atmospheric radiance and transmittance code[Z], 2011.

[18] John N Sanders-Reed, Michael Dimmler W. Scene generation for tracking small targets against cloud backgrounds [C]// SPIE, 2001, 4736: 1-8.

[19] 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. (in Chinese)

[20] Liou K N. An Introduction To Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Guo Caili, Zhou Shijian, Translated. Beijing: China Meteorological Press, 2004.

[21] King M D, Menzel W P, Kaufman Y J, et al. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS [J]. ***IEEE Trans Geosci Remote Sens***, 2003, 41(2): 442-458.